烟气排放连续监测系统运行维护

中国环境保护产业协会　组织编写

生态环境保护设施运行维护人员操作技能培训教材

烟气排放连续监测系统运行维护

YANQI PAIFANG LIANXU JIANCE XITONG
YUNXING WEIHU

中国环境保护产业协会　组织编写

生态环境保护设施运行维护人员操作技能培训教材

烟气排放连续监测系统运行维护

中国环境保护产业协会　组织编写

本书编委会

主　　编： 周　刚　王　强　苏　磊

副 主 编： 迟　颖　井　鹏　梁　宵　钟　琪　高晓晶

编　　委： 左　航　赵金宝　赵　欣　周　茜　杨　杰　张利军
杜　英　曹　炜　齐　宇　朱　伟　王向东　金大建

参编人员： 李铭煊　张　杨　薛　瑞　邓宝卿　张超然　孙海林
王　晶　赵长江　王高伟　闫兴钰　唐艳平　谢　耀
兰敬隆　范黎锋　杨　波　李熠豪　李　鹏　刘承伟
韩占恒　黄文平　俞小刚　张　川　李　云　王富生
唐　柯

（以上排名不分先后）

序　言

当前，党领导全国人民开启向第二个百年奋斗目标进军的新征程。在习近平生态文明思想指导下，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念 做好碳达峰碳中和工作的意见》《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》全面谋划了新时期我国绿色低碳发展和生态环境保护工作的宏伟蓝图。我国生态文明建设进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期，我国生态环境产业也由此进入转型升级的关键时期。

中国环境保护产业协会第六届理事会成立以来，坚决贯彻党的十九届六中全会精神，以习近平生态文明思想为统领，完整、准确、全面贯彻新发展理念，紧紧围绕减污降碳、深入打好污染防治攻坚战和支撑经济社会绿色发展的目标，努力推动生态环境产业高科技、复合型、一体化、高质量发展，为生态文明建设提供坚实的产业支撑。

高素质的职业人才是生态环境产业高质量发展的重要基础。习近平总书记对职业教育工作作出重要指示，要求“优化职业教育类型定位，深化产教融合、校企合作，深入推进育人方式、办学模式、管理体制、保障机制改革，……增强职业教育适应性，加快构建现代职业教育体系，培养更多高素质技术技能人才、能工巧匠、大国工匠”。

为推动生态环境产业职业技能培训实现产教融合、提质培优、增值赋能，中国环境保护产业协会深入把握新时代新征程对生态环境产业一线职业人才的最新要求，基于雄厚的行业基础和长期职业技能培训工作的丰富经验，组织权威专家和行业一线资深高技能领军人才，博采众家之长，理论与实操相结合，打造适合生态环境产业职业人才特点的培训体系和教学大纲，不断完善教材，丰富课件和习题库建设。

生态环境保护设施运行维护人员操作技能培训教材——《烟气排放连续监测系统运行维护》，是为了全面提升我国广大社会化运营机构从业人员的业务素质，规范社会化运营机构，同时为了应对固定污染物监测监控所面临的严峻挑战，紧密配合超低

排放监测、排污单位自行监测等重点工作，力争全面系统地介绍固定污染源 CEMS 监测技术现状、仪器结构原理及其在污染源现场安装调试、比对验收、运行维护等全过程质控措施，并在每个章节中穿插了典型应用案例，列举了常见故障及排除方法，实用性强，该教材既可用于社会化运营机构系统培训教学，也可用于自学，还可供相关职业技术学校（院）和普通高校环境工程专业本科实训教学参考。欢迎大家在教学实践中与我们一道，共同更新教学内容、丰富教学手段、完善课程设置，不断把生态环境产业高质量发展的最新成果体现到教材里。

最后，我代表中国环境保护产业协会第六届理事会，感谢全行业和各位专家长期以来对协会培训工作的大力支持。

中国环境保护产业协会第六届理事会会长 郭承站

目　录

第一篇　气态污染物 CEMS

第 1 章　概述 …… 2

1.1　CEMS 应用现状 …… 2
1.2　CEMS 系统描述 …… 3
1.2.1　CEMS 的主要作用 …… 3
1.2.2　CEMS 基本组成 …… 3
1.2.3　CEMS 分类和原理 …… 4
1.3　CEMS 质量保证和质量控制 …… 8
1.3.1　适用性检测 …… 8
1.3.2　安装验收 …… 8
1.3.3　运行维护 …… 8

第 2 章　二氧化硫和氮氧化物 CEMS …… 9

2.1　完全抽取式 CEMS …… 9
2.1.1　气态污染物 CEMS 基本组成 …… 9
2.1.2　气态污染物 CEMS 分类 …… 11
2.1.3　气态污染物 CEMS 分析技术 …… 14
2.1.4　安装调试要点 …… 50
2.1.5　日常运营要点 …… 131
2.1.6　常见故障与处理 …… 134
2.1.7　典型应用案例 …… 136
2.2　稀释抽取式 CEMS …… 142
2.2.1　气态污染物 CEMS 基本组成 …… 142
2.2.2　气态污染物 CEMS 分类 …… 143
2.2.3　气态污染物 CEMS 分析技术 …… 144
2.2.4　安装调试要点 …… 148
2.2.5　日常运营要点 …… 150
2.2.6　常见故障及排除 …… 151
2.2.7　典型应用案例 …… 151
2.3　原位测量式 CEMS …… 153
2.3.1　气态污染物 CEMS 基本组成 …… 153
2.3.2　气态污染物 CEMS 基本分类 …… 153

2.3.3 气态污染物 CEMS 分析技术 …… 154
2.3.4 安装测试要点 …… 156
2.3.5 日常运营要点 …… 159
2.3.6 常见故障及排除 …… 160
2.3.7 典型应用案例 …… 161

第 3 章 垃圾焚烧 CEMS …… 164

3.1 垃圾焚烧 CEMS 监测技术 …… 164
3.1.1 垃圾焚烧排放特点 …… 164
3.1.2 基本结构及分类 …… 164
3.1.3 常用分析技术 …… 167
3.2 安装调试要点 …… 171
3.2.1 样品采集和传输 …… 171
3.2.2 预处理设备 …… 172
3.2.3 分析仪安装调试 …… 172
3.2.4 辅助设备 …… 172
3.3 日常运营要点 …… 172
3.3.1 周期巡检、维护 …… 172
3.3.2 分析仪表维护保养 …… 172
3.4 常见故障及排除 …… 173
3.5 典型应用案例 …… 174
3.5.1 湿度测量准确性对干基换算影响 …… 174
3.5.2 背景气中干扰影响 …… 174

第 4 章 挥发性有机物 CEMS …… 175

4.1 挥发性有机物 CEMS 监测技术 …… 175
4.1.1 基本分类 …… 175
4.1.2 总量监测 …… 175
4.1.3 总量监测分析技术 …… 175
4.1.4 组分监测 …… 176
4.1.5 组分监测分析技术 …… 177
4.1.6 系统结构 …… 178
4.2 非甲烷总烃 CEMS 安装调试要点 …… 180
4.2.1 样品采集和传输设备 …… 180
4.2.2 预处理设备 …… 181
4.2.3 分析仪安装调试 …… 181
4.2.4 辅助设备安装 …… 185
4.3 VOC 组分 CEMS 安装调试要点 …… 187
4.3.1 气相色谱法 …… 187
4.3.2 傅里叶红外法 …… 195

4.4 日常运营要点 …… 196
4.4.1 运营要点 …… 196
4.4.2 常见故障与排除 …… 196
4.5 喷涂行业总量和组分监测应用案例 …… 197
4.5.1 污染源挥发性有机物在线监测系统在扬州某喷涂企业的应用 …… 198
4.5.2 案例 …… 199

第 5 章 气态汞 CEMS …… 200

5.1 气态汞 CEMS 监测技术 …… 200
5.1.1 基本结构及分类 …… 200
5.1.2 常用分析技术 …… 201
5.2 气态汞 CEMS 安装调试要点 …… 205
5.2.1 采样位置的要求 …… 205
5.2.2 采样探头的安装和调试 …… 206
5.2.3 气体传输系统的安装和调试 …… 206
5.2.4 分析仪安装调试 …… 207
5.2.5 校准单元 …… 207
5.3 日常运营要点 …… 208
5.3.1 日常巡检 …… 208
5.3.2 日常维护保养 …… 208
5.3.3 汞 CEMS 的标准和校验 …… 208
5.4 常见故障及排除 …… 209
5.4.1 完全抽取式 CEMS 系统常见故障 …… 209
5.4.2 稀释抽取式 CEMS 系统常见故障 …… 210
5.5 典型应用案例 …… 210
5.5.1 背景气干扰组分对汞测量影响 …… 210
5.5.2 气态汞发生器及校准控制 …… 213
5.5.3 低浓度汞测量 …… 214

第 6 章 氨 CEMS …… 217

6.1 氨监测技术 …… 217
6.1.1 应用概况 …… 217
6.1.2 基本结构及分类 …… 218
6.1.3 常用分析技术 …… 219
6.2 安装调试要点 …… 224
6.2.1 抽取法氨监测系统安装调试要点 …… 225
6.2.2 原位对穿式系统调试要点 …… 225
6.2.3 数据采集传输 …… 226
6.3 日常运营要点 …… 226
6.3.1 抽取法氨监测系统日常运营内容 …… 226

6.3.2 原位法氨监测系统日常运营内容 …… 226
6.4 常见故障及排除 …… 226
6.4.1 预处理堵塞问题 …… 226
6.4.2 仪表问题 …… 227
6.4.3 例行维护 …… 227
6.4.4 故障和报警 …… 227
6.5 典型应用案例：脱硝后逃逸氨监测应用 …… 227
6.5.1 氨逃逸监测应用案例一 …… 227
6.5.2 氨逃逸监测应用案例二 …… 228

第二篇 颗粒物 CEMS

第 7 章 原位式颗粒物 CEMS …… 232

7.1 监测技术 …… 232
7.1.1 光透射法 …… 232
7.1.2 光散射法 …… 235
7.2 安装调试要点 …… 238
7.2.1 安装 …… 238
7.2.2 调试 …… 239
7.3 日常运营要点 …… 240
7.4 典型应用案例 …… 240
7.4.1 后散射法 …… 240
7.4.2 前散射法 …… 244

第 8 章 抽取式颗粒物 CEMS …… 246

8.1 监测技术 …… 246
8.1.1 光散射法（直抽法） …… 246
8.1.2 光散射法（稀释法） …… 247
8.1.3 β 射线法 …… 249
8.2 安装调试要点 …… 250
8.2.1 光散射法（直抽法） …… 250
8.2.2 光散射法（稀释法） …… 252
8.2.3 β 射线法 …… 253
8.3 日常运营要点 …… 254
8.3.1 直抽法 …… 254
8.3.2 稀释法 …… 254
8.3.3 β 射线法 …… 255
8.4 典型应用案例 …… 255
8.4.1 直接抽取测量（前散射） …… 256
8.4.2 稀释抽取测量（前散射） …… 258

8.4.3 光散射+β射线 …… 260

第 9 章 可凝结颗粒物 CEMS …… 263

9.1 可凝结颗粒物测试技术 …… 263
9.1.1 定义和成分特性 …… 263
9.1.2 国内外 CPM 测试方法现状 …… 266
9.1.3 稀释采样法 …… 268
9.1.4 控制冷凝法 …… 270
9.2 安装调试要点 …… 272
9.2.1 系统安装 …… 273
9.2.2 系统调试 …… 273
9.3 日常运营要点 …… 277
9.3.1 日常维护 …… 277
9.3.2 故障处理 …… 277

第三篇 烟气参数和数据采集

第 10 章 含氧量 CMS …… 279

10.1 监测技术 …… 279
10.1.1 氧化锆 …… 279
10.1.2 燃料电池式 …… 280
10.1.3 顺磁式 …… 281
10.1.4 极限电流型氧化锆传感器 …… 286
10.2 安装调试要点 …… 287
10.2.1 氧化锆 …… 287
10.2.2 燃料电池 …… 288
10.2.3 顺磁氧 …… 288
10.2.4 极限电流型氧化锆传感器 …… 289
10.3 日常运营要点 …… 289
10.3.1 氧化锆 …… 289
10.3.2 燃料电池 …… 289
10.3.3 顺磁氧 …… 289
10.3.4 极限电流型氧化锆传感器 …… 290
10.4 典型应用案例：酸性液体燃料电池 …… 290

第 11 章 烟气流速 CMS …… 291

11.1 监测技术 …… 291
11.1.1 皮托管法 …… 291
11.1.2 多点差压法 …… 292
11.1.3 超声波法 …… 292

11.1.4 光闪烁法 …… 294
11.2 安装调试要点 …… 295
11.2.1 安装测点位置基本要求 …… 295
11.2.2 调试过程基本要求 …… 296
11.2.3 皮托管法流速 CMS 安装与调试 …… 296
11.2.4 多点差压法流速 CMS 安装与调试 …… 297
11.2.5 超声波法流速 CMS 安装与调试 …… 298
11.2.6 光闪烁法流速 CMS 安装与调试 …… 298
11.3 日常运营要点 …… 299
11.3.1 皮托管法日常运营维护 …… 299
11.3.2 多点差压法日常运营维护 …… 300
11.3.3 超声波法日常运营维护 …… 300
11.3.4 光闪烁法日常运营维护 …… 300
11.4 典型应用案例 …… 300
11.4.1 皮托管流速仪产品简介 …… 300
11.4.2 多点差压法流速仪产品简介 …… 304
11.4.3 超声波法 …… 306
11.4.4 光闪烁法 …… 306

第 12 章 湿度 CMS …… 308

12.1 监测技术 …… 308
12.1.1 阻容法 …… 308
12.1.2 极限电流法 …… 309
12.1.3 激光红外法 …… 310
12.2 安装调试要点 …… 311
12.3 日常运营要点 …… 312
12.4 典型应用案例 …… 312
12.4.1 标准阻容法湿度仪 …… 312
12.4.2 常见故障以及维护方法 …… 313

第 13 章 烟温 CMS …… 316

13.1 监测技术 …… 316
13.2 安装调试要点 …… 316
13.3 日常运营要点 …… 316

第 14 章 烟气压力 CMS …… 317

14.1 监测技术 …… 317
14.2 安装调试要点 …… 317
14.3 日常运营要点 …… 318
14.4 典型应用案例 …… 318

第 15 章　数据采集及传输 …… 319

15.1　基本功能要求 …… 319
15.2　系统组成 …… 319
15.2.1　数据采集模块 …… 319
15.2.2　计算机/数据处理软件 …… 320
15.3　数据采集技术 …… 320
15.3.1　模拟量采集 …… 321
15.3.2　数字量采集 …… 321
15.4　数据处理技术 …… 321
15.4.1　数据计算 …… 321
15.4.2　数据存储 …… 325
15.4.3　报表 …… 325
15.4.4　故障报警 …… 328
15.5　通信与传输 …… 328
15.5.1　CEMS 与数采仪通信 …… 328
15.5.2　数采仪与监控平台通信 …… 329
15.6　技术要求 …… 329
15.6.1　数据采集与处理单元技术要求 …… 329
15.6.2　数据采集传输仪技术要求 …… 333

第四篇　质量保证和质量控制

第 16 章　调试和验收 …… 336

16.1　调试检测 …… 336
16.1.1　目的和必要性 …… 336
16.1.2　基本要求 …… 336
16.1.3　内容和方法 …… 337
16.1.4　调试报告 …… 345
16.2　CEMS 验收 …… 347
16.2.1　CEMS 验收的基本前提要求 …… 347
16.2.2　CEMS 验收内容 …… 348
16.2.3　CEMS 验收报告 …… 358

第 17 章　CEMS 运行维护 …… 363

17.1　CEMS 运行质量管理体系的建立 …… 363
17.1.1　CEMS 运行质量管理体系必须遵循的法律法规 …… 363
17.1.2　管理体系的方针与目标 …… 364
17.1.3　组织结构和资源配置 …… 365
17.1.4　编写体系文件 …… 365

17.2 CEMS 运行维护和监督管理 …… 366
17.2.1 CEMS 现场监督检查 …… 366
17.2.2 CEMS 现场比对监测 …… 372
17.3 CEMS 安全防护要求 …… 374
17.3.1 CEMS 安全防护技术要求 …… 374
17.3.2 CEMS 分析机柜设计与安装 …… 391
17.3.3 CEMS 仪器间技术要求 …… 392

第 18 章 校验和比对 …… 396

18.1 概念和依据 …… 396
18.1.1 校验和比对的概念 …… 396
18.1.2 比对监测的主要工作内容 …… 396
18.1.3 比对监测的技术依据 …… 396
18.2 CEMS 比对监测前的准备工作 …… 397
18.2.1 了解掌握 CEMS 及污染源比对现场的情况 …… 397
18.2.2 手工参比仪器设备的校准和维护 …… 398
18.2.3 安全防护装备和通信设备 …… 400
18.2.4 编制《CEMS 比对监测现场实施方案》 …… 400
18.2.5 人员设备和方法 …… 400
18.3 现场测试和质量保证 …… 402
18.3.1 现场安装 CEMS 仪器检查 …… 402
18.3.2 颗粒物 CEMS 比对监测 …… 402
18.3.3 气态污染物（含 O_2）CEMS 比对监测 …… 409
18.3.4 烟气流速、温度 CEMS 比对监测 …… 416
18.3.5 湿度测量的校准和比对 …… 419
18.3.6 质量保证 …… 423

第五篇 相 关 法 规

第 19 章 法律法规 …… 427

19.1 法律法规 …… 427
19.2 规范性文件 …… 427

第 20 章 技术规范 …… 428

20.1 排放标准 …… 428
20.2 监测方法标准 …… 429
20.3 监测技术规范 …… 429
20.4 监测仪器技术要求 …… 430

参考文献 …… 431

第一篇　气态污染物 CEMS

第1章 概 述

1.1 CEMS应用现状

CEMS是Continuous Emission Monitoring System的缩写，指的是固定污染源烟气排放连续监测系统（以下简称CEMS）。它是为适应固定污染源废气排放监测、污染物排放监管以及总量减排核算等国家环境管理需求而安装使用的一种污染物排放连续监测计量分析仪器。

我国于1996年发布的《火电厂大气污染物排放标准》。首次要求对锅炉排放烟气安装连续监测系统进行监测管理。随后开展了一系列针对CEMS的技术研究和仪器设备开发工作。2000年以后，CEMS技术研究和设备开发趋于成熟，并应用在污染源废气监测和监管工作中，同时配套的法律法规和技术规定也相应地逐步颁布和实施。2003年7月和2004年1月颁布实施的《排污费征收使用管理条例》和新《火电厂污染物排放标准》中均提出必须安装CEMS，并规定将CEMS数据作为执法的依据。2005年11月1日国家环保总局发布了《污染源自动监控管理办法》（国家环保总局令第28号），规定污染源自动监控设备是污染防治设施的组成部分，经验收合格并正常运行的CEMS数据可作为环保部门进行排污申报核定、排污许可证发放、总量控制、环境统计、排污费征收和现场环境执法等环境监督管理的依据。为加强污染源自动监控设施运行的监督管理，保证污染源自动监控设施正常运行，2008年5月1日又颁布了《污染源自动监控设施运行管理办法》（环发［2008］6号）。“十一五”和“十二五”期间，分别将二氧化硫和氮氧化物作为主要污染物进行总量减排考核，导致包括除尘、脱硫、脱硝等污染物治理设施大量投运，CEMS在国控、省控等废气污染源的安装和使用量迅猛增加。在此期间，生态环境部分别于2009年7月22号、2012年2月1日印发了《国家监控企业污染源自动监测数据有效性审核办法》和《国家重点监控企业污染源自动监测设备监督考核规程》（环发［2009］88号）、《污染源自动监控设施现场监督检查办法》（部令第19号）等管理文件。

2015年在《关于做好燃煤机组达到燃机排放水平环保改造示范项目评估监测工作的通知》（环办［2015］60号）中首次提到了“超低排放”概念，计划在2020年前，对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造。

同时，《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》（HJ 75）和《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》（HJ 76）也从2001版到2007版修订版，再到2017版修订版，进行了两次完善与更新。

当前我国CEMS主要检测的污染物和烟气参数如下：污染物主要有二氧化硫、氮氧化物、颗粒物；烟气参数主要有：含氧量、烟气流速（流量）、烟气温度、压力和湿度等。根据燃料的不同及燃烧工艺的不同可能还要监测一氧化碳、氯化氢等。

除已纳入减排计划的污染物（二氧化硫、氮氧化物、颗粒物）外，氨、硫化氢、氟化氢、重金属（汞、铅等）、挥发性有机物、温室气体（二氧化碳、甲烷、六氟化硫、一氧化

二氮等）也是今后排放监测的发展方向。

就CEMS技术而言，二氧化硫、氮氧化物、颗粒物及相关的烟气参数［温度、压力、湿度、流速（流量）、含氧量］与国外发达国家相比，国产CEMS仪器设备的技术能力已经达到国际一流水平，但在技术细节、传感器、仪器设备的质量和稳定性等方面与欧美日本等同类产品还有一定差距。

1.2 CEMS系统描述

1.2.1 CEMS的主要作用

（1）监控污染物排放。安装在净化装置后的CEMS，监控净化装置除去污染物的效果，应用监测结果判断是否符合排放标准，答复公众关心排污的问题，满足环境管理的需要。

（2）改善和优化生产过程。用于指导生产，改善和优化生产过程，降低控制装置的运行费用。

（3）提供核定污染物排放种类和数量的依据。CEMS数据能够为核定污染物排放种类、数量提供依据，用于排污收费、总量控制、制定酸雨控制计划和“污染物排放量”交易。

总之，依靠CEMS数据进行环保设备的监控和管理，提高环保设施的效率、降低运行费用；判定排污企业污染物浓度和排放总量是否达标。

1.2.2 CEMS基本组成

CEMS由颗粒物监测单元和（或）气态污染物监测单元、烟气参数监测单元、数据采集与处理单元组成。可以测量烟气中颗粒物浓度、气态污染物浓度，烟气参数（温度、压力、流速或流量、湿度、含氧量等），同时计算烟气中污染物排放速率和排放量，显示（可支持打印）和记录各种数据和参数，形成相关图表，并通过数据、图文等方式传输至管理部门。

1.2.2.1 颗粒物监测单元

对烟气中的烟尘浓度进行实时测量，主要构成为颗粒物监测仪（或称烟尘仪）及反吹、数据传输等辅助部件。烟气中颗粒物又称烟尘或粉尘，一般是指颗粒物粒径为0.01～200μm的固态物质。

1.2.2.2 气态污染物监测单元

监测烟气中以气态形式存在的污染物的浓度。烟气中气态污染物主要包括：二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO_2）、氯化氢（HCl）、氟化氢（HF）、氨气（NH_3）、汞（Hg）以及挥发性有机污染物（VOCs）等。安装在火电行业的常规CEMS监测的气态污染物通常为SO_2和NO_x。

1.2.2.3 烟气参数监测单元

对排放烟气的温度、压力、湿度、流速（流量）以及含氧量等参数进行连续监测。测量温度和压力用于污染物、流量的工况与标态之间的转换，统一于标准状态下；测量流速（流量）用于排放速率和排放量的计算；测量湿度用于干、湿基数据状态转换以及计算标干流量；测量含氧量用于计算污染物的折算浓度，是否满足排放限值。

1.2.2.4 数据采集与处理单元

数据采集与处理单元采集现场的各污染物浓度数据并进行处理、存储，以表格和图文显

示、故障警告、安全管理和支持打印功能；系统有设置通信接口，用于数据输出和通信功能。CEMS一般使用工控机作为数采和记录工具。

1.2.3 CEMS分类和原理

CEMS的工作原理和技术分类按其测量分析方式可分为两大类：一类是抽取测量方式，将烟气从烟囱或烟道中抽取出来进行测试分析，另一类是直接测量方式，将测量分析单元安装在烟囱或烟道上直接对排放烟气进行测试分析。抽取测量方式依据其采样单元的不同又分为完全抽取和稀释抽取方式两种。CEMS采取不同的采样和分析测量方式，测量分析单元对应使用的分析方法和原理也不相同，出具的数据状态更是有较大差异，常见的CEMS技术分类和工作原理见表1-1。

CEMS分类和工作原理 **表1-1**

监测参数	采样分析方式和工作原理		
	抽取测量方式		直接测量方式
	完全抽取式	稀释抽取式	
颗粒物	光散射法、β射线法、振荡天平法	光散射法	浊度法、光散射法、光闪烁法
二氧化硫	非分散红外、非分散紫外、气体过滤相关红外法、紫外差分吸收法、傅里叶红外法	紫外荧光法	紫外差分吸收法、非分散红外、气体过滤相关红外法
氮氧化物	非分散红外、非分散紫外、气体过滤相关红外法、紫外差分吸收法、傅里叶红外法	化学发光法	紫外差分吸收法、非分散红外、气体过滤相关红外法
氧气	电化学法、氧化锆法、顺磁法	—	氧化锆法
流速	—	—	皮托管法、热平衡法、超声波法
温度	—	—	铂电阻法、热电偶法
湿度	阻容法、红外法、极限电流法	—	红外法、阻容法、极限电流法

1.2.3.1 气态污染物测量

气态污染物CEMS测量按照采样和测量方式可分为完全抽取方式、稀释抽取方式和直接测量方式三种。详细的系统结构分类见图1-1。

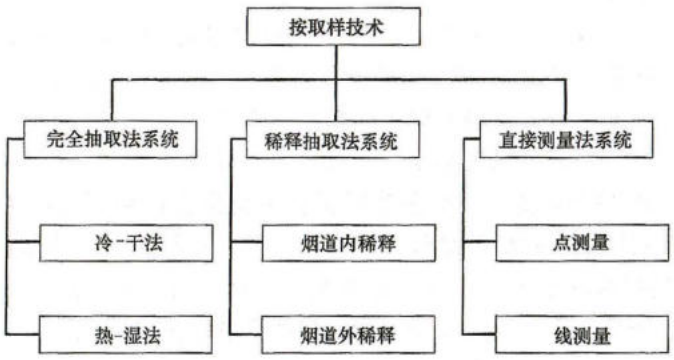


图1-1 气态污染物CEMS按结构分类

(1) 完全抽取式CEMS

完全抽取式CEMS是指直接从烟囱或烟道内抽取烟气，经过适当的预处理后将烟气送入分析仪进行检测的CEMS。完全抽取式又可分为冷干抽取式和热湿抽取式，所谓冷-干式

和热-湿式是针对样气预处理步骤而言。烟气经抽取后全过程不除湿（保持烟气在露点温度以上），分析仪直接分析热湿态样气，称为热湿抽取式；样气在进入分析仪之前经冷却除湿设备除去水分变成干态后再分析则称为冷干抽取式。冷干抽取式测量气态污染物浓度为干基值，热湿抽取式测量污染物浓度为湿基值。由于我国排放标准以干基排放的气态污染浓度计，所以我国安装的 CEMS 以冷干直接抽取式居多。冷干式又可分为后处理式和前处理式两种。后处理式需要对采样探头和传输管路加热，保证样气在输送过程中不会因传输管道温度低于采样气体露点温度而结露，然后在进入分析仪前再除去水分；前处理式即在烟气抽出烟道就应用制冷技术或化学反应除水技术除去烟气中的水分，使样气传输时无需加热。

经典的冷干直接抽取式（后处理式）CEMS 基本流程是：通过具有加热装置的烟尘过滤器将样气采集至加热输气管线，在分析小屋内通过两级冷凝脱水后，经过细过滤器进入分析仪，对烟气成分和浓度进行分析。其基本结构包括采样探头、采样伴热管、过滤器、除湿器、采样泵、气体分析仪及辅助单元。

热湿式系统由取样单元和高温分析单元组成。取样单元包括带加热过滤器的高温取样探头、伴热取样管线、高温取样泵、高温条件运行的细过滤器、流量计、反吹控制、校准阀组。高温分析单元包括使用高温测量气室及检测器的分析仪。

（2）稀释抽取式 CEMS

稀释抽取式 CEMS 是指使用经多级处理后的洁净空气对烟气样品进行一定比例稀释后再使用气体分析仪进行分析并取得数据，之后将所得数据乘以稀释倍数得出实际样品浓度的 CEMS。由于经稀释后的样气露点很低，通常不需要加热传输，但稀释式样气并未除湿，因此直接测量得到的污染物浓度值仍为湿基，还需实测烟气湿度来计算得到干基值。

稀释式 CEMS 关键技术在于稀释取样探头，它包括临界小孔（critical orifice）、文丘里管（venturi）和喷嘴（nozzle），其主要作用是将样气按比例精确稀释，根据稀释探头在烟道内和烟道外，又可将稀释抽取式分为烟道内稀释式和烟道外稀释式。稀释探头在烟气混合稀释之前应对烟气进行过滤以去除颗粒物。为补偿样气和标气温度差异对稀释比的影响，有些稀释探头在前段还装有加热装置，以确保样气和标气以基本恒定的温度通过音速喷嘴。

典型稀释式 CEMS 基本结构由稀释取样探头、稀释气处理单元、取样管线、气体分析仪、稀释探头控制器等组成。

（3）直接测量式 CEMS

直接测量式 CEMS 是指利用直接安装在烟道内的传感器或穿过烟道的特殊光束，无需对被测成分进行采样和预处理而直接测定烟气中污染物浓度的 CEMS。直接测量式又称 in-situ 式、原位式或直插式，是一种结构相对简单的 CEMS 技术。直接测量式 CEMS 测得的污染物浓度值为湿基值，需要用烟气湿度来计算得到干基值。

直接测量式 CEMS 按测量范围一般分为两类：一类是直接在烟道中测量的传感器或发射一束光穿过烟道，利用烟气的特征吸收光谱进行气态污染物的分析测量，一般概念上的直接测量式 CEMS 即是指这种系统；另一类是指使用电化学或光电传感器，传感器安装在探头的端部，探头插入烟道，测量较小范围内烟气中污染物的浓度，相当于点测量，氧化锆法测氧仪、阻容法湿度仪都属于这种方式。

根据仪器的构造和测量点的位置不同，直接测量式 CEMS 可分为内置式和外置式；根据光源发射和接收段的位置和光线是否两次穿过被测烟气可分为双光程和单光程。直接测量法 CEMS 有采用探头和光谱仪紧凑相连的一体式结构，也有将探头和光谱仪分开的分体式结构，探头和光谱仪之间采用光纤进行光信号传输。

（4）气态污染物 CEMS 测量技术

气态污染物除了常规监测的二氧化硫（SO_2）和氮氧化物（NO_x），还有一些特殊行业排放的气态污染物，如垃圾焚烧厂需要监测氯化氢、一氧化碳以及近年受到更多关注的气态汞、温室气体二氧化碳、挥发性有机物（VOCs）、氨气等。

SO_2 和 NO_X 测量技术目前以光学技术为主，分为紫外光谱、红外光谱和荧光光谱三种类型，SO_2 和 NO_X 等许多其他气体吸收红外光和紫外光（例如 SO_2 吸收 7300nm、NO 吸收 5300 nm 的红外光；SO_2 吸收 280~320nm, NO 吸收 195~225nm、NO_2 320~500nm 的紫外光），利用污染物分子吸收特征波长光的特点，根据朗伯－比耳定律，能够检测出不同种类的污染物含量。常用的检测方法有非分散红外 NDIR, Luft 检测器、红外光声法 PAS 测量法、气体过滤相关 GFC、傅里叶变换 FTIR、紫外差分吸收光谱法（DOAS）、非分散紫外 NDUV、紫外荧光法和化学发光法。

卤族气体即指 HCl、HF 等，垃圾焚烧厂都需测 HCl 和（或）HF。通常除了可以采用光学法测量技术外，也可采用可调谐二极管激光技术来测量。激光二极管的光通过被测量气体后被光二极管检测，激光二极管的波长可调谐成被测气体的吸收波长，此光被调谐波长扫描并由光二极管将透过光的信号记录下来，由计算单元计算吸收光信号的大小并得到被测气体的浓度，此方法叫作可调谐二极管激光光谱（TDLS）或可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）。

烟气中气态汞的监测近年受到越来越多的关注。汞 CEMS 分为在线自动监测法（US EPA Method 30A）和半自动方式的吸附管监测法（US EPA Method 30B）两种方法。其中在线自动监测法依照采样方法的不同，可分为稀释采样法、直接采样法和直接测量法三种。燃煤电厂多采用稀释采样和直接采样法汞 CEMS，垃圾焚烧多采用直接采样法和直接测量法汞 CEMS。为提高检测灵敏度，汞 CEMS 可采用金汞齐富集方式对样气进行预处理。汞 CEMS 主要采用的分析方法有冷原子吸收光谱法（CVAAS）、塞曼分光原子吸收光谱法（ZAAS）、原子荧光光谱法（CVAFS）和紫外差分吸收光谱法（DOAS）等。

固定污染源 VOCs 在线监测分为总量监测和组分监测，总量指征指标是非甲烷总烃，测量原理主要有气相色谱（GC）＋氢火焰离子化检测（FID）、催化转化＋FID，系统结构多采用完全抽取或稀释抽取方式。组分监测按照不同行业排放特征决定监测对象，目前市面主流测量原理为气相色谱结合不同检测器，其所能监测物质种类取决于方法开发能力。

固定污染源氨的监测有两个应用场景：其一是合成氨等典型行业的最终排放口，其二是过程控制的逃逸氨监测。氨 CEMS 的主要分析原理有紫外差分吸收光谱法、可调谐激光二极管法、傅里叶红外法等，系统结构主要有原位式和抽取式。

近年来，远距离利用红外扫描有毒气体及云团进行遥测的设备，也应用到了污染源监测上，其原理基于被动傅里叶红外技术，通过光学和红外成像系统获得被测区域的视频图像，再定性识别污染物，同时对污染物浓度、浓度梯度、扩散范围进行直观分析。

1.2.3.2 颗粒物测量

颗粒物监测仪（烟尘仪），也称为颗粒物 CEMS，按采样和测量方式分为直接测量式和抽取测量式，“十一五”“十二五”期间我国应用最多的颗粒物监测技术是浊度法和散射法，安装量最大的是原位后散射法烟尘仪。近年随着烟气超低排放推进，抽取式烟尘仪安装量增加迅速。

浊度法烟尘仪也称对穿法烟尘仪，应用原理为朗伯-比尔定律。以一定频率调制发射的光，穿过含有颗粒物的气流时光强度会衰减，颗粒物浓度越高，衰减越厉害。在烟道的另一

侧设置反光镜，用检测器接收反射回来的光的透过率，转换成电信号，通过用手工采样质量法测定的颗粒物浓度与信号值建立的相关关系，将仪器的电信号转换为颗粒物浓度，此种烟尘仪称为单侧双光程浊度法烟尘仪。另外，还有双侧发射同时双侧接收的双光程浊度法烟尘仪，也为对侧双光程浊度烟尘仪。

原位散射法烟尘仪也是用类似于朗伯-比尔定律，即波格尔定律而设计的测定烟气中颗粒物浓度的仪器。当光射向颗粒物时，颗粒物能够吸收和散射光，使光偏离它的入射路径，检测器在预设定偏离入射光的一定角度接收散射光的强度。颗粒物浓度越高，散射光强度越大，可以通过计算并得到颗粒物浓度。仪器接收经颗粒物后向散射的光的强度的方式，称为后向散射法烟尘仪。另有前散射法、边散射法烟尘仪，原理与后散射法烟尘仪类似，只是接收的是颗粒物向前还是向侧面散射的光。

抽取式烟尘仪的出现是为了解决烟气超低排放后通常需要在饱和湿烟气条件下准确测量低浓度颗粒物的难题。其技术路线是：将烟气从烟道抽取至一个测量腔室，通过加热或稀释的方法将烟气维持在露点温度以上，使待测烟气不含液态雾滴，从而对光学法烟尘仪不再产生干扰。然后再采用光散射原理或β射线方法进行颗粒物浓度的测量。

颗粒物测量其他原理主要有动态光闪烁法和静电感应法。光闪烁法是感知测量区截面上浊度的变化来探测颗粒物浓度，类似于浊度法。静电感应法也称电荷法，主要用于布袋除尘器后检测报警的定性判断，极少用于定量判定的颗粒物浓度监测。

1.2.3.3 烟气参数测量

烟气参数连续监测单元是CEMS必不可少的重要组成部分，用于污染物排放浓度状态的转换、折算以及污染物排放速率、排放量的计算。烟气参数包括烟气含氧量、烟气压力、烟气流速、烟气温度和烟气湿度。

烟气含氧量是反映燃烧效果的重要指标，因此一些重点行业的污染物排放标准均设置了“基准含氧量”作为燃烧效果控制指标。当污染源排放烟气实际含氧量高于基准含氧量时，可认为该排放源排放烟囱或烟道漏风或人为鼓风。因此废气排放浓度限值均指通过含氧量折算后的浓度。含氧量是计算污染物排放折算浓度的重要参数，同时也是环境监督执法中判断污染物排放是否超标的重要参数。常用的含氧量分析仪分析原理主要有氧化锆法、顺磁法（磁风、磁压或磁力矩法）、电化学法等。

烟气流速监测是烟气在线监测系统中用于计算污染物排放速率和排放总量的重要参数，流速CMS测量方式一般包括点测量和线测量两种，无论点测量还是线测量均必须与手工烟气流速测量得到的烟囱或烟道截面的平均流速进行比较，并通过得到的速度场系数进行校验，从而计算出准确的烟气流量，因此烟气流速测量的测定非常关键。目前烟气流速测量方法主要有压差法、热传感法、声波法、靶式流量计法、光闪烁法、红外法等。

烟气压力包括两个部分，即推动烟囱或烟道内气流前进的动压和烟气对烟道壁造成的静压，动压和静压加和等于全压，一般参与污染物浓度状态转换计算的压力参数指的是烟气的静压，静压一般用表压力或真空度表示，使用压力变送器或传感器直接测量。

烟气温度是污染物浓度状态转换计算的重要参数，其监测技术比较成熟，通常采用热电偶法或铂电阻法。

烟气湿度一般指烟气的绝对湿度，即水分含量，用于污染物干基浓度和湿基浓度的转换计算。目前烟气湿度在线测量方法主要有阻容法（湿敏传感器法）、极限电流法、激光红外法等。

1.3 CEMS 质量保证和质量控制

CEMS 的质量保证与质量控制是保证监测数据“真、准、全”的重要手段。除了企业自己的研发、生产、出厂检验、安装、调试检测等内部质控环节外，CEMS 适用性检测、验收以及运行维护等重要的外部质控环节也是必不可少的。

适用性检测是 CEMS 质控规范体系的源头质控措施、首要环节。验收检测是针对安装在污染源现场的每一套 CEMS 开展的，是外部质控的第二阶段。日常运行维护是确保 CEMS 在现场正常运行和保持良好状态的基础，是 CEMS 全过程质控中最重要的环节。

1.3.1 适用性检测

环境监测仪器设备适用性检测，是指针对进入环境监测领域使用的各类环境监测专用仪器设备进行的仪器设备性能指标和功能要求以及技术特点和能力水平的抽样测试，考核其是否满足连续自动监测或手工采样监测分析的需求，能否使用与环境质量监测或固定污染源现场监测的环境条件要求，能否在环境质量或污染源监测中实现长期、可靠的稳定运行，为环境监管服务。

CEMS 适用性检测的技术依据是《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》HJ 76 标准。检测环节分为实验室检测和现场检测两部分，实验室检测通过完善的技术指标体系评估 CEMS 仪器能力水平、生产过程的一致性和仪器设备的稳定性；现场检测主要考核 CEMS 在污染源现场的适用性和可靠程度。

1.3.2 安装验收

CEMS 的安装要求、位置选取以及配套规范应按照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75 标准执行。

CEMS 在完成安装、调试检测并和主管部门联网后，由排污企业自主进行验收。虽然技术验收一般包括 CEMS 技术指标验收和联网验收，但管理制度记录档案也是重要的组成部分，其中准确度的技术指标通常由有资质的第三方用参比方法进行比对监测来完成。

1.3.3 运行维护

CEMS 运行维护必须以完成适用性检测和安装、调试、验收的工作为前提，如果前两个阶段的质量控制不合格或者没有前面的过程，那么运行维护工作的开展将十分困难。

CEMS 运行维护是指从事自动监控设施操作、维护和管理，保证设施正常运行的活动，分为专业化运行单位的社会化运行和排污单位自运行两种方式。

CEMS 日常运行管理的要求是：CEMS 运维单位应根据 CEMS 使用说明书和《固定污染源烟气（SO_2、NO_X、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ75 标准中的要求编制仪器运行管理规程，确定系统运行操作人员和管理维护人员的工作职责。运维人员应当熟练掌握烟气排放连续监测仪器设备的原理、使用和维护方法。CEMS 日常运行管理应包括以下方面：日常巡检、日常维护保养、CEMS 的校准和校验等。

CEMS 日常运行质量保证的要求是：当 CEMS 不能满足技术指标而失控时，应及时采取纠正措施，并缩短下一次校准、维护和校验的间隔时间。运营单位应该做到：定期校准、定期维护、定期校验、分析及排除故障、失控数据判别与修约、对 CEMS 技术指标抽检。

第 2 章　二氧化硫和氮氧化物 CEMS

2.1　完全抽取式 CEMS

2.1.1　气态污染物 CEMS 基本组成

完全抽取式气态污染物 CEMS 系统基本组成：抽取系统（采样探头、采样伴热管、过滤器、除湿冷凝系统、采样泵）；气体分析仪；辅助系统（尾气排放系统、冷凝排水系统、反吹系统、标定控制系统）。其中抽取系统中的各传输和预处理部件根据测量的方式不同为可选部件。不同处理方式的完全抽取式气态污染物 CEMS 基本组成结构示意见图 2-1、图 2-2 和图 2-3。

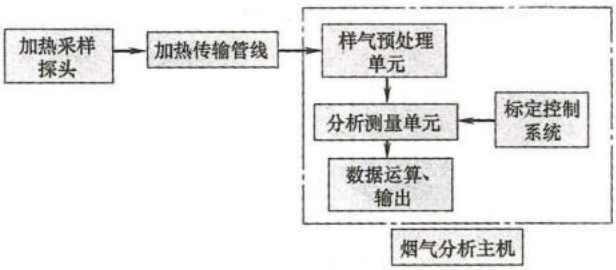


图 2-1　完全抽取式气态污染物 CEMS（冷干后处理式）组成结构示意图

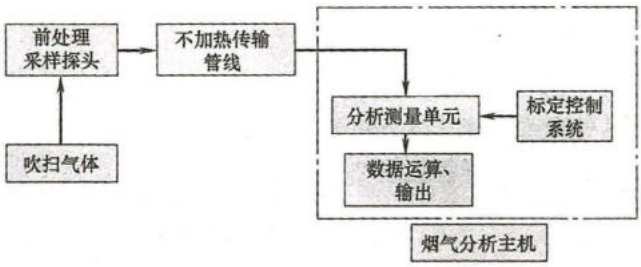


图 2-2　完全抽取式气态污染物 CEMS（冷干前处理式）组成结构示意图

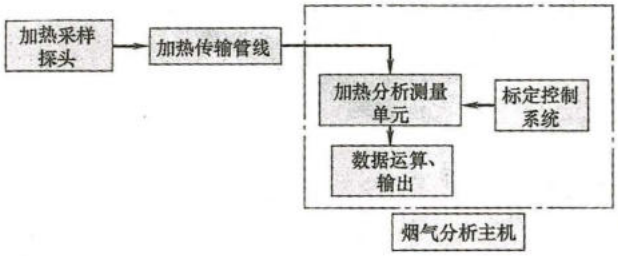


图 2-3　完全抽取式气态污染物 CEMS（热湿）组成结构示意图

完全抽取式气态污染物 CEMS 的关键部件见表 2-1。

完全抽取式气态污染物 CEMS 的关键部件　　表 2-1

测量方式	类　别		关键部件	
完全抽取方式	冷干系统	烟道边脱水(前处理方式)	采样探头 采样泵 过滤器 气体分析仪	探头脱水装置 (含压缩空气预处理系统)
		分析小屋内脱水(后处理方式)		除湿冷凝装置 伴热管线 排水系统
	热湿系统	全程伴热		伴热管线

2.1.1.1　加热采样探头

加热采样探头（图 2-4）将烟道中气体取出，并对烟气颗粒物进行初级过滤，以避免颗粒物对后续取样单元的影响。初级过滤介质通常为烧结不锈钢和多孔陶瓷。初级过滤介质不宜过细，孔径太小，一方面阻力增大，对泵的功率要求较高；另一方面，也更容易堵塞，导致维护量增大。完全抽取式气态污染物 CEMS 采样探头应具备 CEMS 系统全过程标定和加热反吹的功能。

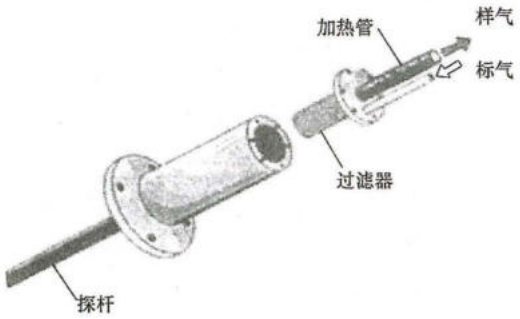


图 2-4　加热采样探头结构图

2.1.1.2　样品传输管线

完全抽取式气态污染物 CEMS 的样品传输管线主要作用是将烟气保持在露点以上并无污染无损失地送至样品处理系统或气体分析单元。传输管线的加热温度应等于或高于烟气中介质冷凝的露点温度。复合式采样管见图 2-5。

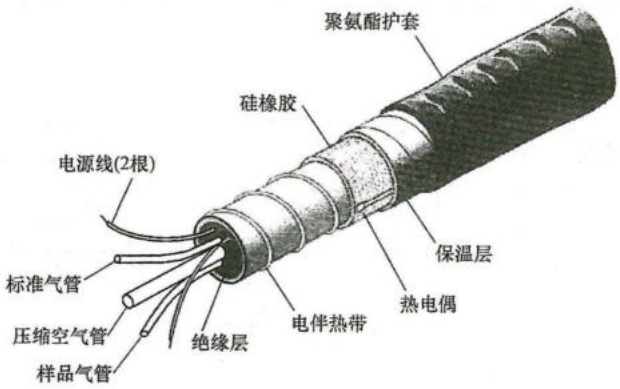


图 2-5　复合式采样管

伴热管线长度一般在 20～70m，不宜过长。传输管线过长，导致样气压力降过大，传输时间过长。安装时，为避免样气管线内冷点发展，通常从取样探头直至冷凝装置始终保持至少 5°的倾斜。

2.1.1.3 样品预处理系统

样品预处理单元主要包括：除湿系统、过滤器、采样泵。

烟气进入采样泵前，通常要除去湿气，因为水蒸气和酸雾容易在未加热的泵上冷凝并腐蚀内部器件。烟气受冷超过露点（空气被水饱和时的温度）时就会引起湿气冷凝，因此除湿系统设计成将烟气温度降低到露点以下。在完全抽取式气态污染物 CEMS 中，最常见的是冷凝系统和干燥器。

过滤器主要用来滤除样品中的固体颗粒物，有时也可用来滤出液体颗粒物（水雾、油雾等）。

采样泵用以将样气从烟道传输到分析仪。泵的能力应满足分析仪对抽气量的要求，不漏气，不会因润滑油而被污染。在完全抽取式气态污染物 CEMS 中一般选用隔膜泵和射流泵。

2.1.1.4 标定控制系统

系统标定是建立分析仪输出信号与标准物质在预计的仪器测量范围内的相互关系。气态污染物 CEMS 标定使用标准气体。标定一般分为分析仪标定和全系统标定。分析仪标定是将标准气体直接通入系统分析仪表进行标定，一般用于检查分析仪表性能；全系统标定是将标准气从采样探头通入，经过传输管线和预处理系统，这样使样气和标准气以同样条件进入分析仪表进行标定，这种方法用于对 CEMS 进行系统标定，减少系统误差。

2.1.1.5 气体分析单元

一般来说，一台分析仪包括系统的控制/显示单元、测量单元、信号处理单元。分析原理主要是红外光谱吸收原理和紫外光谱吸收原理。气体分析单元是用来测量气体污染物浓度的分析仪器，是 CEMS 里最核心的部件。仪器应具有自动诊断和标定功能，一般用于测量气态污染物中的二氧化硫、氮氧化物、氧气浓度，也可以根据用户的需求进行选择和配置。

2.1.2 气态污染物 CEMS 分类

完全抽取式 CEMS 根据预处理系统的不同主要可分为冷干 CEMS 和热湿 CEMS。

2.1.2.1 冷干 CEMS

典型的冷干式 CEMS 流采样流程见图 2-6。在样品气体进入分析仪之前，应除去样气中的颗粒物、水分，降低烟气的温度，实现烟气的净化、冷却和干燥，有两种处理烟气的方式：

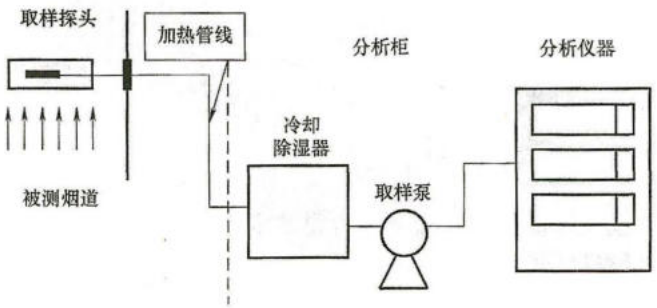
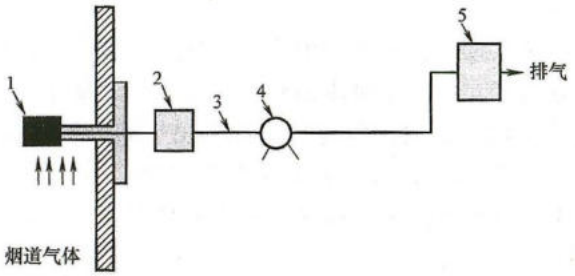


图 2-6 典型的冷干 CEMS 系统流程图

前处理式（图 2-7）：在靠近采样探头处处理，输送气体的管路不需要加热。前处理样品气体流程是气体通过颗粒物过滤器，然后快速冷却，排除冷凝水。经冷却、清洁、干燥的气体输送到分析仪。但需要提供靠近烟道壁的加热的高压清洁空气，定时、有效地反吹装有颗粒物过滤器的探头，整个结构简单、紧凑。



1—紧凑型探头；2—冷却器；3—未加热的样品传输管线；4—未加热的采样泵；5—分析仪

图 2-7　前处理完全抽取法流程图

后处理式（图 2-8）：在进入分析仪前处理，由于气体传输途中环境温度远远低于采样气体温度，会造成传输管道结露而损失 SO_2、NO_x，并腐蚀管道，所以要对采样探头、烟尘过滤器和传输管路加热。保证采样气体在流动过程中能保持一个稳定的温度，并且保证在流动过程中不会因传输管道温度低于采样气体露点温度而结露。

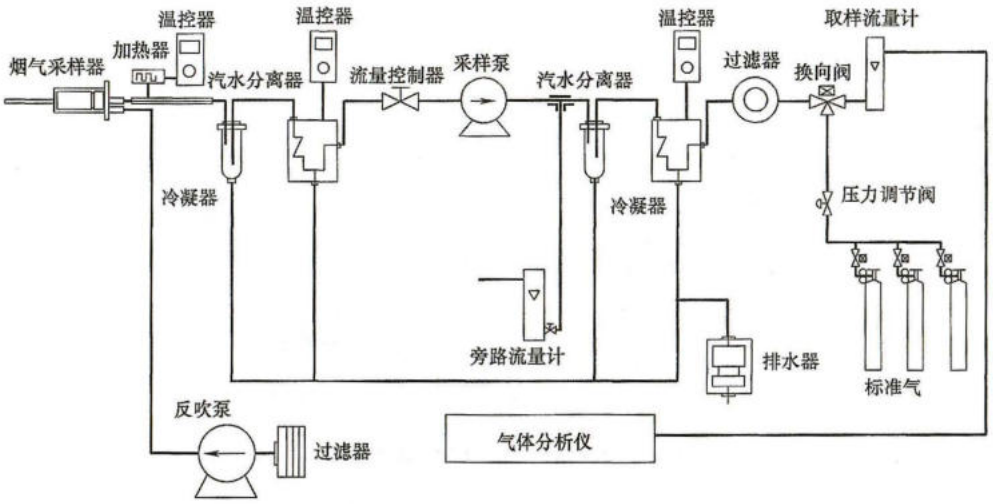


图 2-8　后处理完全抽取法 CEMS 流程及控制示意图

后处理样品气体处理一般工作过程：含尘烟气被抽入烟气采样器，烟气采样器中有烟尘过滤装置及加热装置，滤过烟尘颗粒物的样品气经加热保温的传送管，进入第一级汽水分离器，对水汽进行粗过滤，对颗粒物进行细过滤。然后对其进行冷凝，冷凝过程中对水进行了分离，然后样品气进行第二级汽水分离，经再次过滤后，已满足仪器对样品气的要求，然后进入分析仪分析。

冷干式的样品处理应保证样品气被测组分是真实的，保证能满足在线分析仪器对被测样品气的要求：被测量的样品气，应该是无尘的、干燥的，并符合分析仪器要求的适宜的环境温度范围（常温）。

通常冷干式分析系统的取样处理的除尘要求能达到 0.5～1μm；除湿器的设定温度一般

为4℃±2℃，分析仪器传感器大多恒温在40℃左右，在分析检测中不会有水分析出。

样气传输管线的连接应特别注意电加热传输管线与取样探头的连接处以及与分析柜内的除湿器接头处的加热与保温，防止在这些部位因局部温度降低产生冷凝水，导致腐蚀管路及连接件，管路与连接件材质大多采用聚四氟乙烯和316不锈钢材料来降低管路吸附及化学腐蚀。

样品气体经抽取、预处理后，能更灵活地选择分析仪。按干基烟气计算排放量或测量多种污染物时，通常采用这种技术。完全抽取系统出现问题时，易于维护，系统的组件易于改进或更换，能灵活地适应工况的变化。烟气样品从烟道抽取后经冷却除去水分，优点是仪器可用压缩空气自动调零，再用标气校准。缺点是在冷凝除水的同时，有些可溶性污染气体（如SO_2、NO_2等）除水后容易受到一定损失，而对一些易溶于水的气体（NH_3、HCl等）则损失较大基本不能完成后续测量。

2.1.2.2 热湿CEMS

典型的热湿式CEMS采样流程见图2-9。热湿式是将加热采样管和输送气体到分析仪的管路全程加热，加热温度一般不低于150℃（实际温度取决于待测气体的种类和浓度）。把热湿气体送入分析仪，至少要在探头上装有粗过滤器以除去颗粒物；对于易溶于水的气体，必须小心维持从探头到分析仪所抽取的气样的温度高于露点。如果加热系统发生故障，湿气将迅速地冷却并污染整个系统，由此可能会腐蚀系统的部件、造成堵塞，甚至会引起分析仪故障和损伤，致使整个系统瘫痪。

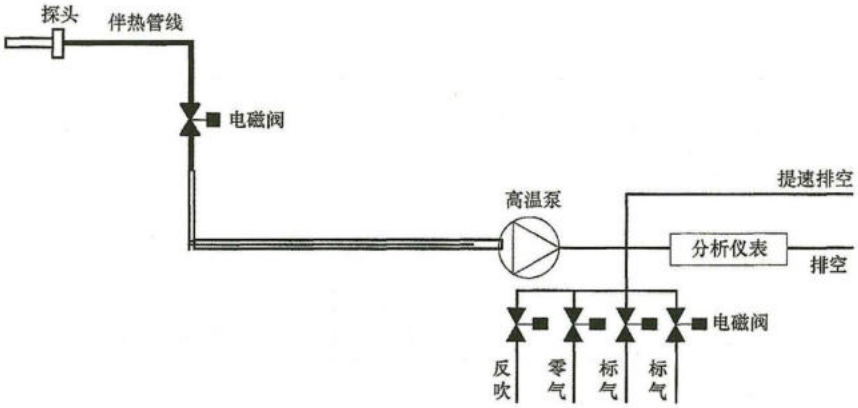


图2-9 典型的热湿CEMS系统流程图

其优点是不用去掉水蒸气，尽量保持烟气的物理化学状态，没有可溶性气体损失问题。另一优点是能自动调零和校准，但抽样、送样系统价格和维护费用均较高。

系统由取样单元和高温多组分气体分析仪组成。取样单元包括带加热过滤器的高温取样探头、伴热取样管线、高温取样泵、高温条件运行的细过滤器、流量计、反吹控制、校准阀组。高温分析单元包括使用高温测量气室及检测器的分析仪，一般安装在分析小屋的机柜中。

上述结构设计保证所有与气体介质接触的组件温度均高于烟气的（酸）露点，不会被烟气腐蚀。在取样过程中除减少了气体的粉尘浓度以外，其余的所有组分均保持不变，特别是没有水分损失，这样，不仅可在需要时进行气态水分的测量，同时避免了除水过程造成的测量误差和设备腐蚀。用于分析仪的电子线路和加热控制单元集成在机箱内，方便检修和维护。

热湿式对于气体分析仪的防腐要求较高。常用的方法有傅里叶红外法、高温红外法和紫外差分吸收法。热湿式 CEMS 能够把在抽取系统表面对气体的吸附减至最少，输送有代表性的样品至分析仪，还适合于测定易溶于水的气体，例如：HCl、NH_3、NO_2 和某些挥发性有机物。

2.1.3　气态污染物 CEMS 分析技术

完全抽取监测系统常用的分析仪器技术有：简单非分散红外（NDIR）；Luft 检测器；气体过滤相关（GFC）；傅里叶变换红外光谱（FTIR）；差分光学吸收光谱（DOAS）；非分散紫外（NDUV）；定电位电解等。其中，简单的非分散红外（NDIR），Luft 检测器，气体过滤相关（GFC），傅里叶变换红外光谱（FTIR），都属于红外光谱技术；差分吸收和非分散紫外属于紫外光谱技术。

杂原子分子，即含有 2 个或 2 个以上不同原子的分子，在红外光区有独特的吸收特征，如 SO_2、NO、CO、HCl、CO_2、碳氢化合物以及其他气体。只含有相同原子的分子，在红外光区没有特征吸收，因而红外光谱吸收技术不能测量同原子分子，所以尽管烟气中含有大量的 N_2 和 O_2，但它们不会掩盖样品中其他气体的吸收。

简单 NDIR 分析仪使用带通滤光器和一些其他构件在比较狭窄的波长范围或“光谱带”内测量气体对光的吸收。这种分析仪适用于测量一种气体，相对而言价格比较低，可靠和耐用。但使用中所受到的限制是：其他气体吸收目标气体相同光谱范围的光，在测量中引起正干扰。水蒸气和 CO_2 在红外区域有强烈的吸收，因此在样品气体进入分析仪前，必须在样品中除去。解决该问题的办法之一是用串联排列的吸收室，如 Luft 检测器。Luft 检测器可用于多组分红外气体分析仪，同一个检测器可以将被测气体和背景气体（横向灵敏度的）同时检测出来，然后采用数据处理方式进行自动补偿。

气体过滤相关技术已应用于抽取系统的分析仪中，测量 SO_2、NO、CO_2、CO、NH_3、H_2O、HCl 和 CH_4，能够设计在同一时间测量几种不同气体的仪器系统。通过旋入测量气体的气体滤光器（参比仪器），在一台仪器上能够测量多种气体。用限制 IR 特征吸收光谱范围的窄带通滤光器，与气体滤光器合成一体组成滤光器旋转轮，旋转通过光束，连续测量多种气体的浓度。这种技术的分析仪坚固耐用，成本低且对振动影响的敏感度低。

FTIR 技术是传统的实验室技术，现在也应用于排放源的现场检测，适用于燃烧源、危险废物焚烧炉和工业过程的监测。FTIR 光谱技术能够测量固定污染源排放气体污染物 ppm 级浓度。FTIR 光谱技术原理的分析仪能够同时测量多达 50 种化合物，极快的响应时间并且交叉干扰比 NDIR 分析方法少。FTIR 的最大特点是不需要对照参考物质频繁地校准分析。一旦仪器经过校准，校准数据即存入光谱库保存在软件中。当测量新的化合物时不必重新设计新的仪器，如果该化合物吸收红外区域的光，应用 FTIR 技术就能测量。但是需要在光谱库中建立在预计的污染物浓度范围内目标化合物的光谱。

早期设计的差分吸收光谱技术分析仪器用滤光器选择波长，现在发展了用可调谐二极管激光器（TDL）、光电二极管阵列和移动狭缝选择波长或检测。传统的红外气体检测器常常受到因其他分子之间的碰撞导致吸收线宽度变化的干扰，红外 TDL 利用先进的数字过滤技术，从测量的第二谐波信号中提取的线宽信息，自动补偿由其他气体引起的吸收线宽度的变化对测定的影响，可调谐二极管激光检测器仅仅测量特定气体的游离分子的浓度，对与其他分子组成复杂化合物的分子和附着或溶解在颗粒物水滴上的分子不敏感。因此，当与其他测量技术比较测量结果时应注意这点。

目前 NDUV 技术采用光学滤光器，移动狭缝，衍射光栅选择参比光谱带和被测化合物吸收光谱带，用光电倍增管或光电二极管阵列作检测器。差分吸收 NDUV 仪器在排放源监测应用中非常可靠，这种技术干扰少。

定电位电解技术已经应用于排放源排放废气的连续监测。利用这种技术发展了能够监测 SO_2、NO、NO_2、CO、O_2、H_2S、Cl_2、HCN、NH_3 和 HCl 的电化学传感器。电化学传感池中的电解液最终会消耗，因而不得不更换电化学传感器。在环境空气中 SO_2 电化学传感器的预期寿命为 2 年，当安装在 CEMS 中连续运行时，可能要求 3 到 6 个月甚至更短的时间内更换，对传感器的正确维护很重要。由于利用化学反应的原理，因此，不适用于含有其他活性较强的干扰组分，如：含有 HF 的试样的测定。

下面介绍完全抽取式 CEMS 最常用两类分析技术。

2.1.3.1 红外吸收光谱分析技术

红外线气体分析仪是利用不同气体对红外波长的电磁波能量具有特殊吸收特性的原理而进行气体成分和含量分析的仪器。主要测量对象有 CO、CO_2、SO_2、NO、NH_3、CH_4 及多种烷、烯烃气体。

（1）红外线气体分析基础

1）红外线的定义

红外线是一种波长范围在 0.75～1000μm 的不可见光，它在可见光谱红光界限之外，红外波段的参数如表 2-2 所示。

红外波段的界限　　表 2-2

项　目	下 限 值	上　限
波长	0.75μm	1mm
频率	3×10^{11}Hz	4×10^{14}Hz
光子能量	1.23×10^{-3}eV	1.72eV
波数	$10cm^{-1}$	$1.3\times10^{4}cm^{-1}$

所有的电磁波辐射被物体吸收后均会产生热量，而红外波段还具备自己的独有特点：

① 红外辐射被物体吸收后产生的热量很容易被检出。

② 受热物体即可做红外辐射的良好发射源。

③ 红外波段是电磁波谱中热功率最大的。

因为红外谱段很宽，根据波段层次，又被分为近红外段（0.75～15μm）、中红外段（15～100μm）和远红外段（100～1000μm）。气体分子吸收峰密集于近红外段，所以红外气体分析仪多采用近红外波段。

2）红外线气体分析仪的基本原理

各种分子具有不同的能级，不论是吸收外来的辐射能还是向外放射辐射能发生能级跃迁，都符合公式：

$$E_2-E_1=h\gamma \tag{2-1}$$

式中　E_2-E_1——分别表示较高能级和较低能级的能量；

h——普朗克常数，$h=6.625\times10^{-27}$erg/s；

γ——辐射光的频率。

也就是说，只有当外来辐射能的频率符合某种分子按式（2-1）所规定的频率才有可能被该种分子所吸收，并产生有选择性的吸收能量的跃迁。而产生此跃迁时，辐射电磁波的频

率必须与吸收所要求的频率数值相同。这就是各种分子吸收或辐射电磁波的能量选择性，这种选择性是对频率而言。这种频率就叫分子的特征频率或特征波长。

在红外波段不是所有气体都有特征吸收波长。单元素气体分子如 N_2、Ar 等在红外波段不产生吸收。大部分有机和无机的多元素气体分子在红外波段内都有其特征吸收峰，有的气体还有两个或多个特征吸收峰。表 2-3 列出了几种分子的特征波长。

理论上讲，只要某气体对红外线有特征吸收，就能用红外线气体分析器对其浓度进行检测。

几种分子的特征波长　　**表 2-3**

名称	分子式	吸收峰波长(μm)
二氧化碳	CO_2	2.7　4.26　14.5
甲烷	CH_4	3.3　7.55
一氧化碳	CO	2.37　4.65
乙烯	C_2H_4	3.45　5.3　7　10.5
水蒸气	H_2O	2.0　2.8

电磁辐射的本质是相同的，但不同的波段范围都有自己的特点。在 0.76～25μm 的红外线区域的一个独特之处是它对热能的辐射能力很强。一个炽热的物体向外辐射能量，大部分是通过红外线辐射出来的。以普通白炽灯为例，其辐射能几乎 90%是红外线辐射能。因此，为达到分析的目的，可以利用分子对红外线热能的吸收。在近红外区中，每克分子的吸收能可达 1000～4000cal。对这样大的热能，完全可以通过适当的转换（如转换为温度或压力）来进行测量。这就是利用近红外区的红外线的热效应进行成分分析的基础。

（2）朗伯-比尔吸收定律

当红外线通过待测介质层时，具有吸收光能的待测介质就吸收一部分能量，使通过后的能量较通过前的能量减少。下面分析待测介质（即待分析组分）对红外光线能量的吸收规律。

入射光为平行光，光的强度 I_0，出射光的强度为 I，吸收室内待测介质的厚度为 l，如图 2-10 所示。

取吸收室内一薄层介质对光能的吸收，设薄层的厚度为 l，其中能吸收光能的物质浓度为 C，进入该薄层的光强度为 I'，实践证明，对光能的吸收量与入射光的强度 I'和薄层中的能吸收光能的物质的分子数 dN 成正比，即 dt 层中的吸光能量，“—”号表示光能量是衰减的：

$$dI'=-I'kdN \tag{2-2}$$

式中　k——为比例常数，即待测介质对光能的吸收系数。

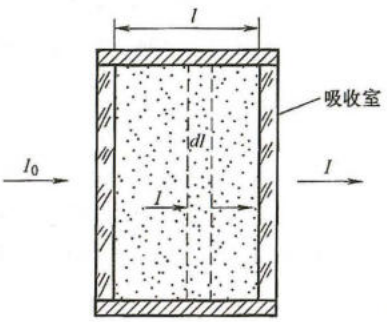


图 2-10　介质对光能的吸收

显然

$$dN=cdl \tag{2-3}$$

所以

$$\frac{dI'}{I'}=-kcdl \tag{2-4}$$

对上式进行积分，并取积分限为 $I_0 \rightarrow I'$、$0 \rightarrow 1$，则得：

$$\int_{I_0}^{I'} \frac{dI'}{I'} = -kc\int_0^l dl \tag{2-5}$$

$$\ln I' - \ln I_0 = -kcl \tag{2-6}$$

即

$$I' = I_0 e^{-kcl} \tag{2-7}$$

式（2-7）就是朗伯-比尔吸收定律。公式表明待分析物质是按照指数规律对射入它的光辐射能量进行吸收的。

经吸收后剩下来的光能，可用式（2-7）来求得：

$$I = I_0 - I' = I_0 - I_0 e^{-kcl} = I_0(1 - e^{-kcl}) \tag{2-8}$$

应该指出的是吸收系数 k 在式（2-7）中是针对单色光（特征吸收波长），是常数，而且随波长不同而不同，但实际上由光源得到的光大多数不是单色光。当入射光中没有待分析物质组分的特征光谱时，从理论上说吸收系数 $k=0$。所以严格说 k 应写作 $k(\lambda)$，即对应不同波长的吸收系数。

公式（2-7）也叫指数吸收定律。e^{-kcl} 可根据指数的级数展开为：

$$e^{-kcl} = 1 + (-kcl) + \frac{(-kcl)^2}{2!} + \cdots \tag{2-9}$$

如果 $kcl \ll 1$ 时，公式（2-7）所表示的指数吸收定律就可以用线性吸收定律来代替，即用下式表示：

$$I' = I_0(1 - kcl) \tag{2-10}$$

公式（2-10）是在 cl 很小（cl 也叫吸收深度）时，经过吸收后辐射能量的衰减与 cl 呈线性关系。当气室长度 l 固定后，则辐射能量的衰减与待分析组分的浓度 c 呈线性关系。仪表的刻度可按分析组分的浓度 c 进行等分。

实际上，由于辐射光多数不是单色光，所以吸收规律既非线性，也不按指数规律进行。但在一般分析仪器的生产中，都是从降低测量气室（也叫工作气室）的吸收深度 cl 和改变检测器内的配气比例（配不同浓度的气体）的方法进行调整。

（3）红外线气体分析仪分类

1）按分光物理特征分类

从红外线气体分析器的物理特征分类，可分为分光型（色散型）和非分光型（非色散型）两大类。

① 分光型红外线分析仪

分光型是根据待测组分的特征吸收光谱采用的一套分光系统（可连续改变波长），使通过介质层的辐射光谱与待测组分的特征吸收光谱相吻合，以对待测组分进行定性、定量的测定。这类分析器的优点是选择性高，灵敏度也比较高。缺点是分光系统分光后光束的能量很小，同时分光的光学系统任一元件位置的微小变化，都会严重影响分光的波长。所以一直用于工作条件很好的实验室。因此把分光型也叫实验室型。但是随着科学技术的发展和生产需要，特别是窄带干涉滤光片的发展，在生产流程上分光型的分析仪也越来越多。它的结构与非分光型的区别只是有无干涉滤光片。

② 非分光型红外线气体分析仪

即光源发出的连续光谱全部都投射到待测样品上，而待测组分吸收其特征波长的各个波带，就其吸收波长来说具有积分性质。例如，CO_2 在波长为 2.6～2.9μm 及 4.1～4.5μm 处

具有吸收峰。由此可见非分光型仪器灵敏度较高。它没有由于分光系统的几何位置微小变化的相对移动而带来的波长移动的因素，并且有较高的信号/噪音比，所以它有良好的稳定性。其主要缺点是待测样品各组分间有重叠的吸收峰时，会给测量带来干扰。但是可在结构上增加干扰滤波气室等办法，去掉这种干扰的影响。

2）按测量光束的数目分类

① 双光束

从光源发出两路彼此平行的红外光束，分别经过几何光路相同的参比室、分析室后分别进入检测器的两窗口进行测量。

② 单光束

是指从光源发出的红外光束只有一束，这是对几何光束而言。对检测器来说单光束有三种方式实现检测：

方式一：检测器依然接受两个不同的波长，只是在不同时间内到达检测器。它利用旋转的调制盘上能通过不同波长的干涉滤光片，实现时间上的双光路。

方式二：检测系统通过电磁阀控制交互通入样品气室内的样气与零气，分别记录样气与零气数据，得出检测结果。

方式三：检测系统在通入样品气室通入零气时记录信号值，进行模拟检测。保存模拟零气值，与样气值进行计算，得出结果。这种检测方式需定期更新模拟零气值，即需定期校准零点。

（4）主要部件组成及要求

各种红外线气体分析仪的工作原理虽然不尽相同，其结构也各有差异，但它们都由一些共同的部件和基本环节构成，如红外线辐射光源、测量气室、检测器、信号运算放大器、辅助装置等。运算放大器是将检测器的微弱电信号进行放大、对数-反对数放大、模/数转换、数学运算、线性补偿等信息处理工作，以便二次仪表显示和纪录。红外线气体分析仪除上述基本部件外，根据工作原理的不同，还需要一些辅助装置，如恒温控制器、恒流控制器、电源稳压器、湿度补偿装置和防震防爆装置等。

1）红外线辐射光源

红外光源发生器是红外光源的发生装置。一般采用选择光源材料并加热的方式。例如：将镍铬丝加热到730℃时，其发射光谱的波长主要集中在3～10μm。

红外线辐射光源的组成：光源包括辐射源、反射镜和切光片三部分。

① 对光源的要求

辐射大的光谱成分要稳定，因为各种气体对红外线的吸收具有选择性，如果发射的光谱成分（波长和能量）不稳定，对同一浓度的气体，吸收的能量就会有差异，必将造成测量误差。

为满足这一要求，首先应选择合适的灯丝材料，工业上用的红外线分析仪中，辐射光源的材料可以用碳化硅、镍铬丝、铁铬铝合金丝以及锆、钇钍等金属氧化物。一般以镍铬丝用得最广泛，因为它的热稳定性好、抗氧化性能也较强，同时也容易获得，价格也较便宜。有的厂家还使用了硅酸铝镍铬丝，以便使红外线的发射能量增大，提高发射效率，保温性能也较好，光谱也不宽。

其次必须保证激发辐射的条件恒定，主要是加热电流必须稳定。因为加热电流发生变化，灯丝的温度也相应地发生变化，将造成光谱成分和辐射能量的变化。一般仪表的灯丝电流，多由晶体管（或集成块）稳压电源供电或稳流电源供给。

辐射能量应大部分集中在待分析组分特征吸收波段范围内，以便增加待测组分能够吸收的能量，提高测量灵敏度。适当地选择光源灯丝的材料和工作温度可以得到较好的效果。例如，镍铬丝在730℃时，其辐射光谱的波长主要集中在3～10μm范围内，能满足绝大部分气体分析器的要求。

加热功率可通过调整光源电阻丝两端电压降实现控制。检测器为电容式的分析器光源功率可在5～8W，也有10W以上的。

通过各气室的红外线，应平行于气室的中心轴（工作室与参比气室），否则气室内红外线经过多次反射，容易造成测量误差。

② 红外光源的种类

a. 按光源的结构分类

单光源：用一个光源，把光源丝绕成螺旋形或锥形。为减小体积和热量散失，螺距要尽量小些，以使不同层间短路为限。再用两个反射镜置于光源的两侧，将单光源反射得到两束平行的红外光。其优点是没有双光源的选择配对问题，而且没有因两个光源变化不一致所引起的误差。其缺点是要使两束红外光的能量平行且相等，单光源的安装和调整是很麻烦的。

双光源：在工作侧和参比侧各有一个光源和反光镜，使其各自产生一束平行红外光束。其优点是安装、调整比较方便，通过调整参比侧的挡光板位置，使两路光束能量相等（调光路平衡），这样两路光束能量不对称造成的误差降低到最小。其缺点是光源丝需要配对，以保证发出的光谱是对称的。

b. 按发光体分类

合金丝做发光体：以镍铬丝、硅酸镍铬丝、铁铬铝或铬铝钴合金丝等为光源材料，在一螺旋形胎具上绕制，绕成后先用热水清洗放入脱脂液中脱脂，再退火以后用镊子整形，螺旋距为0.5mm左右，用铂金丝做引线进行封装。老化时间约100小时，时间长一些更好，直到其阻值不变为止。老化完后从几何形状和电阻值上进行选择配对，选择对称的光源作为一台仪器的测量光源和参比光源。

以黄金丝为加热丝的陶瓷光源：两个相同的光源都是在两片陶瓷片之间夹着，印刷在上面的黄金做加热丝，陶瓷片受热后辐射功率加大。为了使最大辐射能量集中在待测组分特征吸收波段范围内，在白色陶瓷片涂上黑色涂料，不同涂料最大发射波长也不同，涂黑色涂料也是为了增大发射率。

这种光源的优点是寿命长，镍铬丝能放出微量气体，而且黄金物理性能特别稳定，不产生微量气体，又因密封既安全又隔爆。

激光光源：有气体激光器，如CO_2气体激光器，可发出CO_2的特征吸收波长10.6μm，做测量CO_2浓度分析的光源。固体激光二极管也可发单色的红外光。半导体激光光源，振荡波长可连续变化，对CO、SO_2等公害气体进行测量时，可做光源。另外还有多组分分析器使用的可调激光器、等离子激光器等波长连续变化的光源。

激光光源的独特优点是：(a) 发射单色光谱线窄，不需滤光片或滤波气室；(b) 发射的能量大；(c) 聚光性能好；(d) 可得到连续可调波长的激光；(e) 指向性好。其缺点是，与普通的红外光源相比，结构较复杂，成本也高，而且寿命比普通红外光源短。

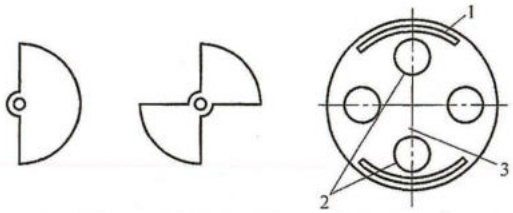
③ 反光镜

由合金丝绕制的光源，其辐射是向各个方向的，它对气室窗口所张的立体角很小，为了增强通过气室的光强，可用一反射镜，反射镜的表面要求粗糙度为12，表面不易氧化，反射效率高。理想情况的光源应该是点光源，放在抛物形反射面的焦点上，可得到通过气室的

平行光。但实际光源在反射镜内腔有很大的空间，与点光源差别很大。除单光源采用平面反射镜外，双光源用抛物面反射镜最好，容易得到平行光，但加工困难。为加工方便，反射面常做成球形或圆柱形。反射镜一般采用黄铜镀金、铜，或钢镀铬，或铝合金抛光制成。

④ 切光片

在结构中，光源与气室之间应放一个切光片，它由同步电机带动旋转。切光片的几何形状有多种，图 2-11 中是常见的三种。单通式电容微音器式检测器配用的是半圆形切光片，而双通式配用的是十字形切光片，几何单光路用的切光片则如图 2-11 中（c）所示。切光片的作用是把光源射入气室的光调制成频率固定的间断的光束，使后面检测器的输出信号也变成交流，便于放大。切光片要求平直，一般用镀黑的铝合金制作。



(a) 半圆形切光片　(b) 十字形切光片　(c) 几何单光路切光片

1—同步孔；2—参比滤光片；3—澳Ⅰ量滤光片

图 2-11　切光片几何形状

2）气室

① 测量气室

测量气室是样品吸收红外辐射的装置，采用防腐镜面材料加工而成。测量气体需持续稳定地以一定流速通过测量气室，保证检测结果的稳定性。

气室包括测量气室、参比气室和滤波气室。它们的结构基本相同，都是圆筒形，两端都用晶片密封。测量气体是连续地通过测量气室。参比气室都密封并充有中性气体（多为 N_2 气，也可以充 Ar 气）。滤波气室也是密封的。它们的结构特点是内壁光洁，不吸收红外线，不吸附气体，化学性能特别稳定。因此气室材料选用黄铜镀金、玻璃镀金或用铝合金，或在气室内壁套一层镀金的铜皮圆筒，但内部表面都要求抛光。气室内壁的光洁度对仪器的灵敏度影响很大，因为光有很大一部分要经过气壁的多次反射才能到达接收气室。表面光洁度越高，反射系数越大，光强损失越小。粗糙的表面能吸收投射到它上面的很大一部分光能。为此，不仅要求气室的内壁光洁度要高，为了减少反射，还要求气室的轴线与红外光线平行。

测量微量浓度的气室较长（300～1000mm），为避免加工困难，多用玻璃管做成，内部镀金。由于光洁度很高，金的化学性质极稳定，气室的内壁永远也不氧化，所以能保持很高的反射系数。

气室的内径一般取 20～30mm。太粗会使测量滞后增大，也增大仪器的重量，太细则削弱了光强，降低仪表的灵敏度。

常规气室外还有一种特殊的多重反射气室。通过光学反射体将红外辐射光在气室内进行 10～40 次反射。增加气室内光程距离，将常规气室 300～1000mm 的光程增加至 1～5m。通过有效提高光程，提高微量浓度检测的信号强度。多重反射气室光路和内部结构见图 2-12 和图 2-13。

② 窗口材料

各气室和检测器都需要密封，但又要让红外线穿过，而且希望对应于待测组分特征波长的光应尽量保留，同时尽可能阻止其他波长的光通过。所以说各气室的窗口材料（晶片）的选择是红外线分析器中的一个重要问题。对其要求首先是透光的波长理想的窗口材料，使透过的光的波长局限在待测气体特征吸收波段较窄的范围。这样晶片不仅是密封元件，又是滤波元件（滤光片或滤波气室）。其次，它的机械强度应能保证密封，不应容易破裂，不怕潮湿，且表面光洁度能长期保持，对接触的介质有化学稳定性，能经受温度变化的影响。

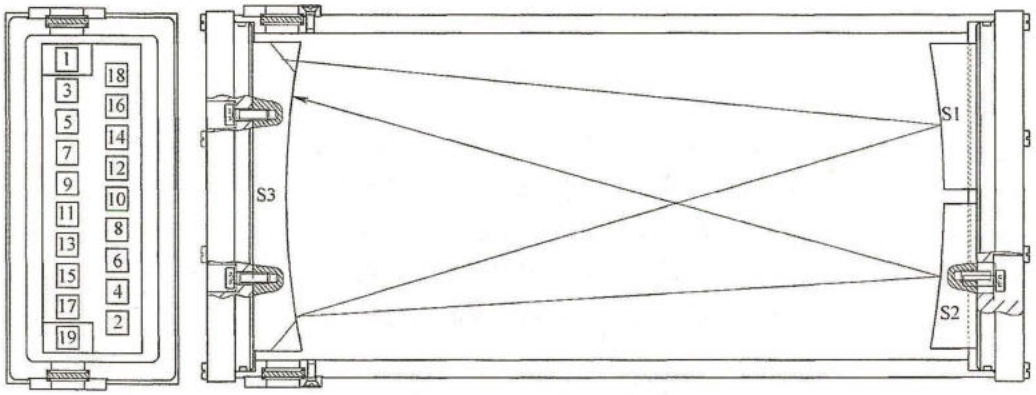


图 2-12 多重反射气室示意图

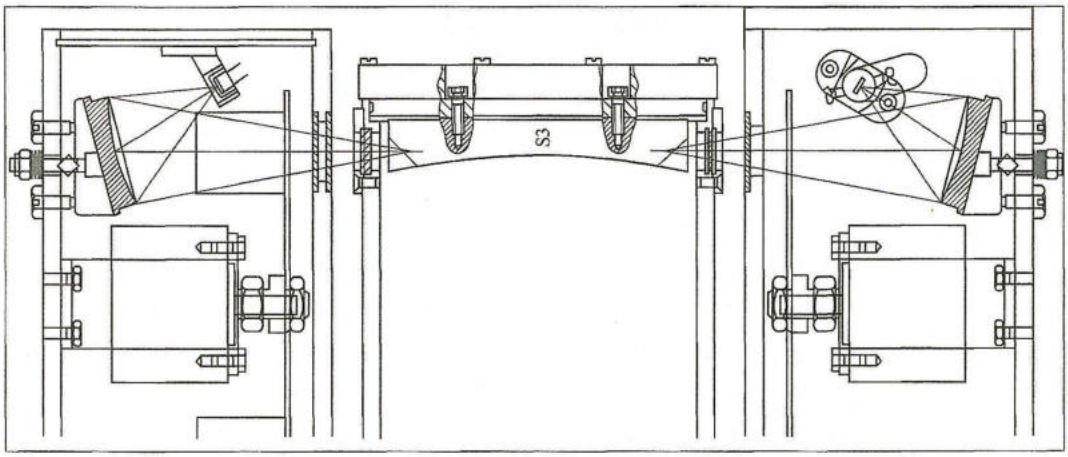


图 2-13 多重反射气室光路图

普通玻璃对可见光有很高的透明度，但对于 3μm 以上的红外线辐射则透明度很低（低于 30%）。所以，普通玻璃不能作为红外线透光材料。一些常用材料的性能见表 2-4。

常用窗口材料的性能 **表 2-4**

材料	透射限(μm)	热膨胀系数(10^{-6}/℃)	性能
光学玻璃	2.7	4～10	机械性能好，不怕潮，易抛光
熔凝石英	4.5	0.55	机械性能好，热性能好，价格便宜
氟化锂	6.5	36	易磨损，慢溶于水，透射率高
氟化钙	13	25	易磨损，机械性能差，透射率高
云母	5.3	—	易破碎，强度差
氯化钠	25	44	易潮解，透射限宽
氯化钾	21	—	透射率高
青玉	5.5	5～5.7	机械性能好，热性能好
金红石	6.0	9	机械性能好，热性能好

在线分析器中用的最多的是氟化锂、氟化钙（萤石）、蓝宝石（青玉），这些材料都采用

单晶结构。由于氯化钠易潮解，故表面需涂敷防潮物质。图 2-14 是这四种材料的光谱特性曲线。

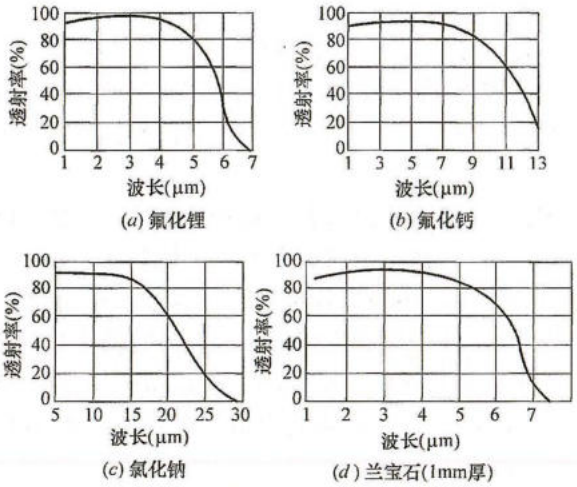


图 2-14　红外透光材料的光谱特性

用氟化锂和氟化钙作窗口材料时，其厚度可取 2～3mm，太薄则机械强度差。它和窗口的接合目前多采用胶合法。

当用环氧树脂胶合时，要加合适的填料。参比气室和滤波气室是密封且不可拆的。由于工作气室可能受到污染，有的生产厂家为了用户能拆开工作室，清除室内污物，以避免因工作室有污物而增加测量误差，采用橡皮密封结构，但因橡胶材料化学稳定较差，真空橡胶不理想，而用黑色耐油橡胶圈较好。可拆式密封结构的缺点是长期密封性差。

晶片上沾污、灰尘、起毛等都会使仪表的灵敏度下降、测量误差增大和零点漂移增大。因此必须保持晶片的清洁，但不能用手指揩拭晶片表面，应用擦镜纸或绸布擦拭。

3）检测器

检测器是仪器的核心部件，它将被测组分浓度变化转换成某种电参数变化。通过测量电路转换成电压或电流信号输出。

① 检测器的作用

检测器是分析器中的敏感元件，它将通过测量气室的被待测组分吸收后剩余的光能，转换为某种形式的信号供测量用。所以它是一种变换器，将红外光能转变为电能或其他形式。

② 检测器的种类

a. 按测量方法分类

（a）光电导检测器：它是利用半导体光电导效应的原理制成的，在入射红外光作用下，光敏元件的电子状态发生变化，分为本征吸收和非本征吸收光电导效应，分别构成本征光电导探测器和非本征光电导探测器，也称作光敏电阻。

首先发明了硫化铊探测器，后来出现硫化铅（PbS）、锑化铟（InSb）、锗掺杂（金、铜、隔、汞……）和碲镉汞（HgCdTe）探测器等。从结构上它们又分为多晶薄膜型和单晶型。

（b）热电堆检测器：热电偶和热电堆是一种最古老的辐射热检测器，为了提高灵敏度，把许多支热电偶串联在一起，就组成了热电堆。

当测温端与冷端温差 ΔT 不大时（在红外线分析器中测量时，温升很小），热电势 E 与

ΔT 有线性关系：

$$E=K\Delta T \tag{2-11}$$

式中 K——比例系数。

比例系数由热电偶材质决定。为了提高对红外线的吸收率，把它的受光面积（热接点区）敷于约 $4mm^2$ 的铂黑或炭黑等物质的表层上，作为接收面，而冷接点则通过绝缘片（譬如云母片）夹持在金属导热基体上，利于基体的良好导热性保持冷接点温度恒定于基体温度上。

热电堆的响应时间一般在几秒到零点几秒，最小可达 0.01 秒。减小响应时间的方法是设法减小热容量和热损失，为此，热电极是极细的，一般只有 0.01～0.07mm（为减小热惯性，缩短时间常数）。为提高效率，减少热损失及温度波动，可把热电偶密封在能透过红外光材料的窗口的真空小容器内。用金属真空沉积法制造出的薄膜热电偶和热电堆更先进，其响应时间更小。有两种热电堆应用较广，第一种是用块状材料制作的器件，通常用细丝制作，有一个薄的黑色辐射接收器；第二种是真空蒸发各组分制成的薄膜热电堆，它可以光刻，因此做成的器件精度很高。

由于热电偶及热电堆具有稳定、可靠、寿命长以及能进行两个结构之间温差的绝对值测量等优点，所以至今仍得到广泛的应用。特别是近年来制造的热电堆辐射检测器，是灵敏（高效热电堆）且稳定的，它本身的结构坚固，对很宽的波长范围的辐射都有响应。这些特点不是靠冷却和偏压取得的。当不能用制冷的方法或者需要很宽的光谱带宽时，热电堆就能很好地胜任检测工作。

（c）热电阻检测器：其原理和一般的测量电阻温度计相同。它的敏感元件，是一根非常细的金属丝或一片非常薄的金属条（金属条可薄至几微米乃至零点几微米），并在其表面涂黑使其对红外光的吸收率提高，为了减少热损失也可将其置于能透过红外线的窗口的真空小容器内。当入射红外线射到上述检测元件上时，其温度升高，电阻增加，变化后的电阻值可用惠斯登电桥进行测量。如图 2-15 所示。

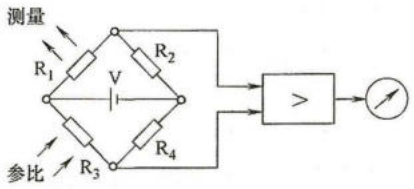


图 2-15 测辐射热电阻温度计

同样用金属真空沉积法或溅射法也可制成金属薄膜电阻测辐射红外光能，常用的金属有铂、镍、金以及铋的合金等，薄膜制备在基片上（如氧化钡陶瓷），膜厚几个微米。

后来发展起来的半导体热敏电阻，其灵敏度更高，其电阻温度系数约为－6%～－3%。而且克服了金属热电阻滞后大的严重缺点，其灵敏度可达 10^{-9}W 数量级，与之对应的温度变化小于 10^{-6}℃。

（d）薄膜电容检测器与微流量检测器。它们是现阶段红外线分析器检测器的主要形式，所以在下文专门介绍。

（e）光伏检测器：当红外辐射在半导体上时，产生载流子的地方有势垒存在，趋向于把不同电荷隔开而形成电势差，这种效应叫光伏效应。它与光敏电阻一样都属于内光电效应。利用光伏效应制成的检测器，叫光伏检测器。这种器件用特种的Ⅲ-Ⅴ族化合物及其混合物制成。用这些材料制作的 p-n 结器件具有较窄的光谱响应，是靠材料本身的吸收性能来实现滤波的。

这种光伏检测器在红外线分析器中用得并不多，故不作详细介绍。这类元件还有光敏二极管、光敏三极管、雪崩光敏二极管。

b. 按对红外线的吸收特性分类

(a) 选择性检测器：检测器对红外光的波长有选择性，如电容微音器检测器、微流量检测器等都属此类检测器。这类检测器特点是：都是在检测器内充一定量的待分析组分气体，通过待分析组分对红外光波长的选择吸收产生的热能，可直接测量由于吸收热能而产生的温度或压力变化，也可转换为其他参数进行测量，所以选择性较好。

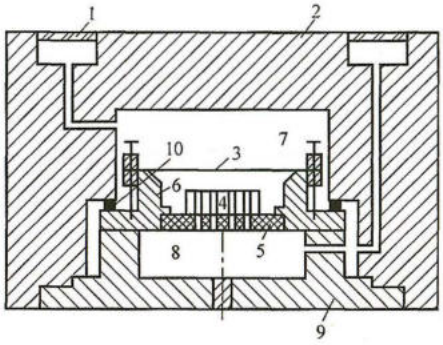
(b) 非选择性检测器：检测器对红外光的波长没有选择性。如热电堆检测器、热电阻检测器均属此类，光电导检测器、光伏检测器、热释电检测器也属于此类检测器，但后者对红外光波长有一定选择性，其工作原理是基于内光电效应。

③ 薄膜电容检测器

a. 薄膜电容检测器的结构

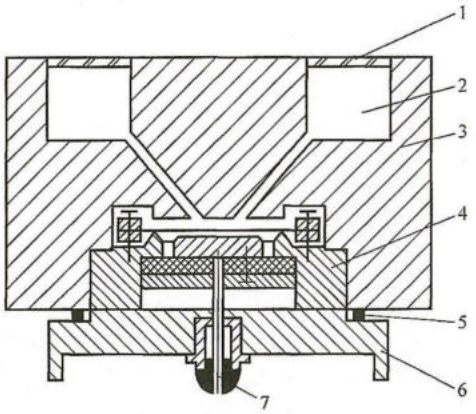
检测器可分为壳体、薄膜电容器后盖和平衡孔部分。

(a) 壳体：由铝合金制成，它的外表面被氧化处理过。从图 2-16 和图 2-17 中可以看到，检测器正面有两个能吸收红外线的检测气室，这两个小气室的结构尺寸完全一样，两气室的端面分别封有能透过红外光的晶片。气室的后部有小孔分别与薄膜电容器的内腔相通，这就是传递压力脉冲信号的孔道。壳体的后面是薄膜电容器的内腔。内腔表面要求清洁、光亮，而且不允许像外表面那样被氧化。



1—晶片（窗口）；2—壳体；3—薄膜；4—定片；5—绝缘体；6—支持器；7、8—薄膜两侧的空间；9—后盖；10—密封垫圈

图 2-16　双通式检测器结构简图



1—晶片；2—气室；3—壳体；4—薄膜电容检测器；5—密封圈；6—后盖；7—电极引线

图 2-17　单通式检测器结构简图

(b) 薄膜电容检测器：是分析器的心脏部件，也就是由它将红外线辐射能转变为电信号。它是由薄膜作“动片”也叫作“动极”，与另一个“定片”（固定片也叫作“定极”）构成了一个以气体为介质的电容器。薄膜材料为铝镁合金，其厚度为 5～8μm，膜厚则较硬，灵敏度低，噪声小，信号噪声比大；膜薄则软一些，灵敏度高，噪声大，信号噪声比小。钛膜刚性好，不易腐蚀。工作稳定、寿命长，灵敏度可能低一些，所以钛膜应薄一些。定片与薄膜间的距离为 0.04～0.1mm，电容量为 40～100pF。定片是一圆形金属块，中间有许多小孔，它通过绝缘板（同样也有许多小孔）与支持器固定在一起。定片与薄膜片间的绝缘电阻大于 100000MΩ。检测器的加工和装配要求比较严格，因为它的好坏将直接影响仪表的性能。比如薄膜的选择要求质地均匀，在放大镜下面看，不能有小孔或看得见的颗粒，表面要平坦不能有严重皱折现象。薄膜由紧固环固定在刀口圆环支架上，膜片张紧的程度对仪表的

性能影响很大，太松在受压力作用时容易与定片接触发生短路，太紧则灵敏度降低，而膜也容易破裂。如有小孔则漏气，灵敏度大大降低。

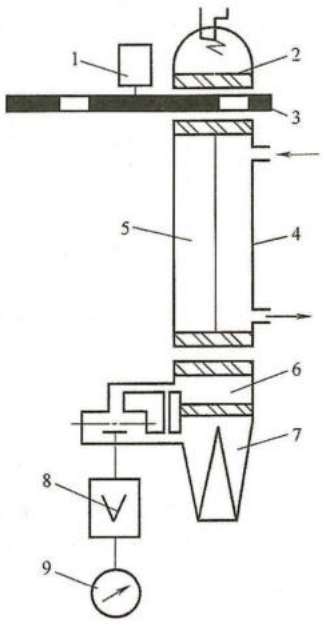
(c) 后盖：后盖上封接有接触柱（引出电极），信号由此引出与前置放大器连接，后盖靠密封垫圈与检测器壳体压封。

(d) 平衡孔：在两个小气室之间有一毛细管孔道，它能补偿由于温度等缓慢变化给微音电容器带来的工作漂移，而且还能使两个小室工作时的压力很快恢复平衡，减少噪声。孔径大小由试验决定。太大使灵敏度降低，太小两室压力恢复平衡时间长、噪声大。此外，在充气时，当两小气室压力不平衡时容易损伤膜片，而有平衡孔时，可以使两小气室的静压力平衡。在生产中有的生产厂家打两个更小的平衡孔，这样做不仅噪声小，对灵敏度影响也很小。

b. 薄膜电容检测器的分类及结构特点

(a) 串联式：它是一个新型光路串联式薄膜电容检测器，如图 2-18 所示。检测器的两个接收室 6 和 7 按光路一前一后的串联形式，按光路顺序先进入的室叫前接收室（简称前室），后进入的室叫后接收室（简称后室）。前室与后室之间用一片晶片（如氟化钙）把两个接收室隔开。在前室的上端还粘一片晶片，使接收室密封。在检测器的内腔中位于两个接收室的一侧装有薄膜电容检测器，并分别把前室和后室与薄膜电容器的内腔连通。通过参比室和测量室的两光路都交替地射入前室和后室，在检测室较短的前室 6 充有被测气体，这里辐射的吸收主要是发生在红外线光谱“谱带”的中心处，在较长的后室 7 也充有被测气体，它吸收“谱带”两侧的边缘辐射。

当测量（分析）气室通过不含待测组分的混合气（即零点气或叫零气样）时，它不吸收待测组分的特征波长，红外辐射被检测室待测组分吸收后，检测器内气体被加热，腔内气体压力上升，检测器内薄膜电容器的薄膜两边压力相等。接收室的几何尺寸和接收室充入气体的浓度都是按上述原则设计的。即测量室通零点气时，检测器内气体被加热，前后两室压力相等。当测量气室通过含有待测组分混合气体时，因为待测组分在测量气室已先吸收了一部分红外辐射，使检测器的辐射强度变小。此辐射强度的变化主要发生在谱带的中心处，主要影响前室的吸收能量，使前室的吸收能量变少，被待测组分吸收后的红外辐射将前、后室的气体加热，使其压力上升，但能量平衡已被破坏，所以前后室的压力不相等，从而产生了压力差，此压力差使薄膜电容器膜片位置发生变化（变形）进而改变了电容器的电容量，因为辐射光源已被调制，因此电容的变化量通过电气部件转换为交流的电信号，经放大后由指示表或记录仪指示出待测组分（气体）的浓度。



1—同步电机；2—红外辐射源；3—切光片；4—分析气室；5—参比气室；6、7—前、后接收室；8—电气部件；9—指示仪表

图 2-18 串联式薄膜电容检测器

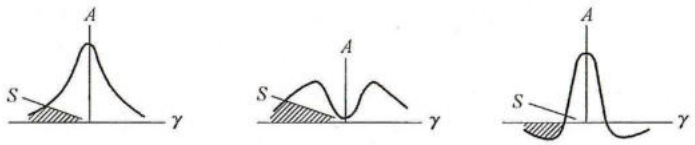
串联型检测器与老式并联式检测器相比有两大优点：零点稳定；抗干扰组分影响的能力强。

动零点和静零点：光学系统在零点（通零点气）工作时，膜片（动片）两边（与前、后室相通）的气体同时吸收红外线，其温度上升压力增大，其方向相反，相互抵消，特殊情况

下正好完全补偿。而且这种压力是常数，不随时间变化，所以叫“静零点”。由于这种光学系统在零点工作时膜片上受到的压力没有变化，因此其状态十分稳定，不易受外界干扰的影响。而如今国内外各厂家生产的红外线分析器所采用的双通式检测器或单通式检测器在零点上工作时，或者检测器内部工作压力起伏变化，或者虽然压力也是常数，不随时间变化，但是当气体吸收状态有变化时（例如光强变化等），二者都会影响零点不稳。这个被称为“动零点”。所以串联式检测器的零点稳定是它突出的特点之一。

抗干扰组分影响的能力强，是串联式检测器另一个突出的优点。这是由它的结构特点，即两个接收室串联结构决定的。

图 2-19 中 *a* 图是串联检测器前室的红外辐射吸收特性曲线；*b* 图是检测器后室的红外辐射吸收特性曲线；*c* 图是两者合成后的红外辐射吸收特性曲线。所谓干扰组分对分析器的影响，就是指干扰组分在前室产生的信号和在后室产生的信号合成后差值的大小。实际上是干扰组分在后室产生的负信号对干扰组分在前室产生的正信号的补偿。但这种有价值的补偿在并联式的双通式或单通式检测器是不存在的。因为在这两种检测器中，干扰组分和待测组分在相应的接受室中都产生同样的正信号，相互间是叠加的关系，并无补偿作用。由于串联式检测器有此突出优点，所以在一般情况下，这种光学系统不加干涉滤光片、不设滤波气室，分析器也能获得相当满意的选择性。



(*a*) 前腔　　(*b*) 后腔　　(*c*) 合成　*S*-干扰组分

图 2-19　串联型检测器抗干扰组分影响吸收特性曲线

（b）并联式检测器

双通式（双边式）：

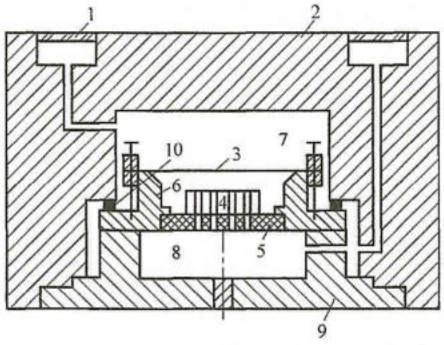
其结构简图见图 2-20。壳体和后盖由铝合金制成，检测器的正面有两个能吸收红外线的接受气室，这两个小气室的结构尺寸完全一样，两气室的端面分别封有能透过红外线的晶片。气室的后部有小孔分别与薄膜电容器膜片的上下空间 7 和 8 相通，两个气室 7 和 8 由电容器的动片（膜片）隔开，但结构上设置一个小孔把两个气室连通起来，以便使两室的静压平衡。由于定片 4 和绝缘体 5 呈多孔状，所以薄膜下面的空间与定片和绝缘体下面的空间是相通的。薄膜电容的动片与检测器壳体相连，而定片则与之绝缘。其绝缘电阻应大于 100000MΩ。检测器的加工和装配要求很严格，因为它的好坏将直接影响仪器的性能，使用和维护时应特别注意。

单通式（单边式）：

双通式是两个接受气室（也叫检测气室）后部的小孔分别通到薄膜电容薄膜（也叫膜片）的两侧，而单通式检测器的两个接收气室后部的小孔只与薄膜电容器薄膜的一侧空间相通，两个接收气室内的气体吸收红外线后，温度上升，其压力变化都作用于薄膜的一侧空间，其结构简图如图 2-21 所示。

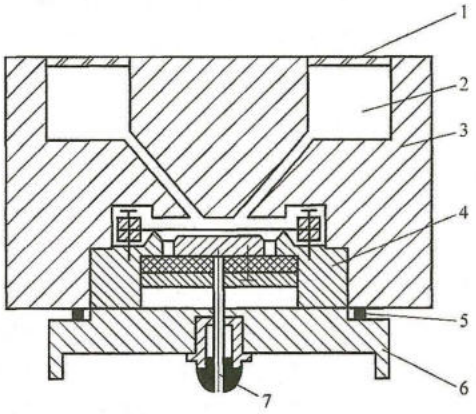
c. 各种膜片电容检测器性能比较

单通式检测器：（a）加工工艺可简单一些，因两路光束都作用于膜片的一侧，膜片两侧容积不必相等，体积也可小一些。（b）从理论上说可以不用平衡孔（实际上多数厂家还加平衡孔）。（c）当通零气样时（仪器处于零位），薄膜处于平衡位置，故其零点稳定性很好。



1—晶片（窗口）；2—壳体；3—薄膜；4—定片；
5—绝缘体；6—支持器；7、8—薄膜两侧的空间；
9—后盖；10—密封垫圈

图 2-20 双通式检测器结构简图



1—晶片；2—气室；3—壳体；4—薄膜电容检测器；
5—密封圈；6—后盖；7—电极引线；

图 2-21 单通式检测器结构简图

(d) 与双通式比，线性度要差一些（相同的测量范围）。

双通式检测器：(a) 由于作用在薄膜上的压力是从两个接收气室直接导入的，减少了膨胀室的死体积，因此检测器的灵敏度可能比单通式高。(b) 由于切光片相位、两个接收气容积不对称、传递压力孔道长短不相等等因素，使其零点稳定性不如单通式好。

串联式检测器：(a) 零点稳定。(b) 选择性好，抗干扰组分影响的能力强，干扰组分在前、后室产生的信号相互抵消，使检测器对光谱的响应变窄，即串联检测器仅对吸收谱带的中心部分敏感。所以不加滤光片或滤波气室，一般情况下也能得到良好的选择性。

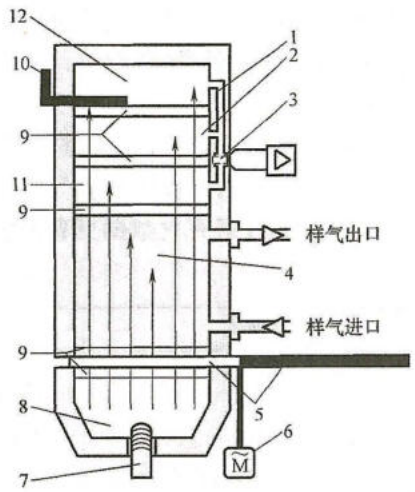
④ 微流量检测器

微流量检测器其结构如图 2-22 所示，是在两个接收气室中间有一通道，通道中放一个 3mm×3mm 的云母片（绝热、绝缘），在云母片上有在显微镜下光刻成的很细的镍丝。镍丝通电，加热至 120℃。当有待测组分时，接收气室的两侧压力不平衡而产生微小压差，产生的微小气流流过中间通道，使镍丝冷却，电阻变化，它代表了待测组分的浓度信号，灵敏度极高，价格也较便宜。这种检测器也叫热线微风速检测器，精度为±1.0%。

微流量检测器的工作原理与串联式薄膜电容检测器基本一致。差别在于微流检测器将第一与第二检测气室的热能差转换为流量信号，而薄膜电容检测器检测的是前后气室压力差。

⑤ 半导体检测器

半导体检测器结构简单、制造容易、体积小、成本较低、寿命长、响应迅速，可采用更高的调制频率。使放大器的制作更容易，由于与窄带干涉滤光片配合使用，使仪表具有很高的可靠性和



1—毛细管；2—第二检测气室；3—微流量检测器；
4—取样单元；5—切光片；6—切光片电机；
7—红外光源；8—反射镜；9—晶片窗口；
10—调节滑片；11—第一检测气室；
12—第三检测气室

图 2-22 微流量检测器结构简图

选择性。

通常说的半导体检测器，实际上是一种光子检测器，它是利用入射光子与半导体元件相互作用而产生一定信号。如果入射光子的能量足够大，使电子从某些半导体表面释放出来而产生电信号，此现象称外光电效应。当入射光子只能使半导体内部产生自由电子或自由空穴，或两者同时产生而出现某种电信号，称内光电效应。半导体检测器主要用后者。当红外光照射在半导体上时，它吸收光子能量使电子状态发生变化，引起电导率的改变，即电阻值发生变化，所以也叫光电导检测器。光电导检测器对波长有一定的选择性，又因为它是基于光电效应，故响应快，其时间常数很小，一般在毫秒级甚至微秒级范围内。所以可采用较高的调制频率，信号处理也较容易。

作为光电导检测器的材料有：

a. 硫化铅（PbS）在300K时，其光谱响应范围是0.3～3.5μm，峰值在2.5μm。一般说来，在一定辐射能量下，输出信号与所加电压呈线性关系，即在其工作范围内，符合欧姆定律。响应时间为（1～4）×10^{-4}s。

b. 硒化铅（PbSe）在通常温度下，其光谱响应范围是3～4μm。如果制冷至77K，其响应范围可扩展到4～6μm。它的响应速度较PbS快，响应时间为1～2×10^{-6}s。

c. 锑化铟（InSb）是一种Ⅲ～Ⅴ族化合物。在室温下，其光谱响应范围是从可见光到7.5μm，峰值响应在5.5μm，响应时间为5×10^{-6}s。在红外线波长3～7μm范围内具有高响应率（即检测器的电输出和灵敏面入射能量之比值），而且在此范围内CO、CO_2、CH_4、C_2H_2、NH_3等几种气体均有吸收带，因此可以制成通用性强（只要改换干涉滤光片的透过波长和仪表的刻度即可）的快速响应的红外检测器。InSb光电导检测器可以做成室温（295K）、中温（195K）和低温（77K）型，其中室温型由于使用波长长、结构简单、性能稳定、实际使用方便，在仪表中应用很广。

4）滤光元件

滤光元件包括滤波气室和滤光片。

① 滤波气室：其结构和窗口材料与气室的基本相同，只是其中充有干扰组分。例如：CO_2的特征吸收波长为2.7μm、4.26μm，CO的特征吸收波长为2.37μm、4.65μm，而CH_4的特征吸收波长为3.3μm、7.65μm，如果测CO_2浓度，因为它的特征吸收波长与CO和CH_4的特征吸收波长范围有重叠部分，所以CO和CH_4是CO_2的干扰气体。同样道理，这三种气体中任一种气体作被测气体时，另两种气体就成为干扰气体。因此，当要测这三种气体时，其滤波气室充气数据见表2-5。

滤波气室充气数据　　表2-5

分析器种类	滤波气室充气成分	充气浓度%
CO_2分析仪	CO+CH_4	50+50
CO分析仪	CO_2+CH_4	50+50
CH_4分析仪	CO+CO_2	50+50

如果干扰组分是一种成分，则滤波气室充以100%的干扰组分。滤波气室装在测量侧，而参比侧则在参比室充以与滤波气室相同的组分。

② 滤光片：是一种光学滤波元件，应用滤光片可以改变射到测量气室的辐射通量和光谱成分，可消除或减少散射辐射或干扰组分吸收辐射能的影响，可以具有特征吸收波长的红外辐射。滤光片是基于各种不同的光学现象（吸收、干涉、选择性反射、偏振等）而工作

的。在结构上可分为固体的、气体的、液体的三大类，以固体为最常用。固体滤光片可分为四类。近代滤光片，还可根据透过特性的不同，分为截止滤光片和带通滤光片两大类，它们各自又分为两类。

在红外线分析器中，固体的晶片允许透过的光波长是有一定范围的，因此也有一定的滤波效果。但理想的滤光片还是干涉滤光片，它属于固体滤光片是根据光线通过薄膜时发生干涉现象而制成的滤光片，因而称作干涉滤光片。最常见的干涉滤光片是根据法布里—珀罗标准原理制作的。法布里—珀罗型滤光片是由一组厚度为$\lambda/2$整数倍的间隔层分开的两反射膜组成的窄带滤光片。如果两反射膜是由金属组成，则称为金属性干涉滤光片；若为高低交替的介质膜组成，则叫全介质型干涉滤光片。

具体做法：多是以石英或白宝石为基底，在基底上交替用真空蒸镀的方法，镀上具有高、低折射系数的物质层。一般用锗（高折射系数）和一氧化硅（低折射系数）制作。也可用碲化铅和硫化锌作镀层，或用碲和岩盐作镀层。

干涉滤光片可以得到较窄的通带，其透过波长可以通过镀层材料的折射率、厚度及层次等加以调整。

③ 滤波气室与干涉滤光片性能比较

滤波气室：除干扰组分特征吸收波长处能全吸收外，其中心波长附近的波长能吸收一部分，其他波长全部通过，几乎不吸收。或者说它的通带较宽，因此检测器接收到光能大，即灵敏度高，成本低；其缺点是体积比干涉滤光片大，一般长50mm，特别是在微量分析器中因测量气室较长（300～1000mm），加上它就更长了，使仪器体积较大。在干扰大时，即干扰组分浓度高或与待测组分的特征吸收波长相距很长时，可采用滤波气室。如果两个特征吸收波长相距不是很近时，其滤波效果就不理想。就是说，其选择性较差。特别是干扰组分多时不宜采用滤波气室。

干涉滤光片：是窄带滤光片，通带很窄，国内产品的通带$\Delta\lambda$与特征吸收波长λ_0之比已达到≤0.07，所以说滤波效果很好。因为它可以只让被分析组分的光能通过，通带以外光能几乎全滤掉了。只要涂层不破坏，工作就是可靠的。又因结构简单，采用干涉滤光片取代滤波气室就能使仪器结构简化，长度缩小。一般在多组分干扰的分析器中采用干涉滤光片。

红外线分析器发展方向之一，是采用非选择性接受元件，这就需要单色光源。而普通光源配上干涉滤光片后，得到的光就近似于单色光源。因此，它的用途将越来越广。

（5）红外线气体分析仪的应用

下面介绍国内外应用红外线气体分析器的实例，供有关方面在选择分析仪器时作参考。

1）化工和石化中的应用

在合成氨的氮肥厂中，以半水煤气为原料气的工艺流程中，半水煤气的成分可采用常量CO_2分析器、CO分析器、CH_4分析器进行分析。变换出口可用常量CO分析器监测变换效率。碳化岗位可用常量CO_2分析器测量碳化塔出口的CO_2含量。进入合成塔的精炼气要严格控制CO和CO_2的浓度，防止合成塔内触媒中毒，必须采用CO和CO_2微量红外线气体分析器。合成塔进出口可用NH_3分析器，检查合成率的高低。用不同量程的CH_4分析器测量原料气中CH_4和循环气中的CH_4的含量，以便提高生产效率，确保设备和人身安全，降低成本，降低消耗，提高产品质量。

在其他石油化工生产中，例如环氧乙烷、发生炉煤气、甲醇合成、甲烷分裂、乙烯、乙炔、丙烯和氯乙烯等生产中以及天然气的质量测量，都广泛地采用红外线气体分析器。

2）控制热处理

大多数机械工业部门都有热处理工序，对钢质零件进行表面渗碳，使零件表面有较高的硬度以提高其耐磨性，而新的气体渗碳工艺过程中要严格测量或调节渗碳炉中 CO_2 的含量，以便控制零件表面的碳含量和渗碳深度，以提高零件表面的硬度和耐磨性。红外线气体分析器是最好的测量和控制仪表。

3）测定易燃易爆性气体混合物

当空气中含有某种气体的浓度达到某一范围（百分含量）时，将产生爆炸或一有火花就产生燃烧。如甲烷、乙烷、乙炔、乙烯、丙烯、甲醇、乙醇、丙酮、苯、汽油、煤气等均属易燃易爆气体（上述物质如是液体则指其蒸汽）。凡有上述气体的地方如厂房、仓库、船舱、缸区、油井等均属易燃易爆的危险场所，上述气体中绝大部分都可用红外线气体分析器对其浓度进行监视或报警，以确保生产和人身的安全。

4）控制燃烧效率

在现代化水泥生产中，水泥窑中燃烧效率的控制是非常重要的，需要用常量 CO_2 分析器和微量 CO 分析器对炉子的排出气体进行测量，为操作工人提供数据以便对鼓风速度、煤气量、炉料组分、温度、湿度等进行控制。

由于节能的要求，对 10 吨以上锅炉的燃烧情况，都可采用 CO 和 CO_2 红外线分析器进行监测和控制。

在冶金工业中，铁矿石中砷、铜、硫等杂质的含量必须控制在一定的浓度以下，否则炼出的钢铁质量会大大下降（产生热脆性和冷脆性），用氧化焙烧的方法可从铁矿石中除去砷、铜、硫等杂质，氧化焙烧炉中的燃烧情况可用 CO 分析器连续监测。

5）大气污染的测量

用红外线气体分析器可对大气中的 CO、CO_2、NH_3、SO_2、烃类及某些有毒气体的含量进行监测。如测量生产车间的 CO 的含量，当含量超过允许值时就发出报警信号。地铁或隧道中，由于机车发动机燃料的不完全燃烧而排出的 CO 和 NO 可用红外线气体分析器进行测量，防止中毒和爆炸，确保安全。锅炉废气中 SO_2、NO_x 的在线连续监测工作也可用红外线气体分析器进行测量。

6）原子能工业中的应用

在原子能发电站中，利用红外线气体分析器来测量反应堆循环气体中的水蒸气、CO 和 CO_2。CO 分析器用于监测 CO_2 反应堆冷却剂气体与反应堆芯石墨之间发生化学反应所产生的 CO。CO_2 分析器用于空气辐射安全物理监测。水蒸气分析器用于检查发生于传热介质与蒸汽增压装置的蒸汽回路之间的泄漏。

7）生物研究中的应用

利用红外线 CO_2 分析器研究作物生长情况，测量植物在白天进行光合作用时消耗 CO_2 和在夜间呼出 CO_2 的情况是加速选种过程的有效方法。林业科技人员用 CO_2 红外线分析器测量 CO_2 的变化，还可利用 CO_2 红外线分析器研究植物的合理密植和套种等。在覆盖栽培中，用红外线分析器测量薄膜棚里或其他形式的温室中的 CO_2 的浓度，进行二氧化碳施肥，这种方法已在水稻育秧和蔬菜生产中收到明显增产效果。此外，红外线 CO_2 分析器还应用在水果和蔬菜的贮藏中，例如在香蕉船舱中使用 CO_2 覆盖层来抑制香蕉的变坏；在现代化的苹果冷藏库中用红外线分析器测定并通过调节煤气的燃烧量实现对 CO_2 的浓度的测定和控制，使苹果贮藏一年后新鲜如故。

8）汽车废气的测量

用红外线气体分析器对汽车排气中的 CO、CO_2、HCl、SO_2 和 NO 的浓度进行测定。

采用的成套仪器如 FP6 型内燃机废气综合分析装置。

9）在医疗方面的应用

人体在呼吸过程中不断地吸收氧气通过身体的新陈代谢作用转变为 CO_2 呼出体外。健康人呼出的 CO_2 含量通常在 5%～6%，测量人体呼吸中 CO_2 的浓度，提供了一个关于肺换气效率的有用指标。这个指标对医生的临床诊断是很有用的。用一台切光频率为每分钟 25 次或 30 次的 0～10%的红外线 CO_2 分析器即可实现对人体呼吸的连续测量。该仪器反应速度快，它能跟踪每个呼吸循环所产生的 CO_2 浓度变化。

红外线气体分析器，在麻醉方面也有应用。典型的仪器测量范围有：0～25%乙醚，0～10%卤烷，0～10%氯仿等。

2.1.3.2 紫外吸收光谱气体分析仪

（1）测量原理

按频率、波长或能量的大小顺序，把电磁波排列起来，便成为一个电磁波谱，见图 2-23。从图中可以看出，不同波段的电磁波，产生的方法和引起的作用各不相同，因而出现了各种波谱分析方法。

波长	纳米(nm)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}	10^{9}
	微米(μm)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}
	埃(Å)①	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}	10^{9}	10^{10}
波段		γ射线		X射线		紫外光		可见光	红外光			微波		射频
谱型		γ射线(光)谱 莫斯鲍尔(波)谱		X射线(光)谱		真空紫外 近紫外 紫外吸收光谱		比色，可见吸收光谱	红外吸收光谱			顺磁共振；微波波谱		核磁共振波谱
跃迁类型		核反应		内层电子跃迁		外层电子跃迁			分子振动			分子转动；电子自旋；核自旋		
辐射源		原子反应堆；粒子加速器		X射线管		氢(或氘)灯或氙灯	钨灯		碳化硅热棒；涅恩斯特辉光管			速调管		电子振荡器
单色器		脉冲-高度签别器		晶体光栅		石英棱镜；光栅	玻璃棱镜；光栅滤光片		盐棱：LiF；NaCl；KBr；$CaBr_2$			单色光源		
检测器		盖革－弥勒管；闪烁计数器；半导体探测器				光电管；光电倍增管	光电池；光电管肉眼		温差电堆；测热辐射计；气动检测器			晶体二极管		二极管；三极管；晶体三极管
频率(Hz)		10^{20}	10^{19}	10^{18}	10^{17}	10^{16}	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^{9}	
波数(cm^{-1})		10^{10}	10^{9}	10^{8}	10^{7}	10^{6}	10^{5}	10^{4}	10^{3}	10^{2}	10	1	0.1	
能量(eV)		10^{6}	10^{5}	10^{4}	10^{3}	10^{2}	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	

①1Å=0.1nm。

图 2-23 电磁辐射波谱和各种波谱分析法一览表

吸收光谱法是基于物质对光的选择性吸收而建立的分析方法，包括原子吸收光谱法和分子吸收光谱法两类，紫外-可见分光光度法、红外吸收光谱法均属于分子吸收光谱分析法。

吸收光谱法所涉及的光谱名称、波长范围、量子跃迁类型和光学分析方法见表 2-6。

吸收光谱法波长范围、量子跃迁类型和光学分析方法　　表 2-6

光谱名称	波长范围	量子跃迁类型	光学分析方法
X 射线	0.01～10nm	K 和 L 层电子	X 射线光谱法
远紫外线	10～200nm	中层电子	真空紫外光度法
近紫外线	200～400nm	价电子	紫外光度法
可见光	400～780nm	价电子	比色及可见光度法
近红外线	0.78～2.5μm	分子振动	近红外光谱法
中红外线	2.5～25μm	分子振动	中红外光谱法
远红外线	25～1000μm	分子转动和低位振动	远红外光谱法
微波	1～1000mm	分子转动	微波光谱法
无线电波	1～1000m	核自旋	核磁共振光谱法

紫外吸收光谱技术用于测定紫外光区的光，对应电子能级跃迁所吸收的辐射能为 1～20eV，光谱位于紫外光波段 200～400nm；由于吸收的能量大于红外，因此相对于红外，更容易检测吸收的变化。

（2）紫外线气体分析仪分类

1）非分散紫外吸收分析仪

由于 CO_2 和 H_2O 在紫外光谱范围没有吸收，对于某些在红外光谱范围内 CO_2 和 H_2O 交叉干扰严重的气体组分，采用紫外吸收光谱法检测会取得更好的测量效果。

非分散紫外吸收最基本的原理也是利用光谱吸收的朗伯—比尔定律。

不分光紫外分析器（NDUV），系统主要由光源、滤镜、气体池、参考单元以及检测器组成，其结构示意图见图 2-24。紫外可见光发射器向接收器发射具有确定光谱的紫外光束，紫外光经过滤光片滤光后通过分束器分成两束光，其中一路投射到紫外参考探测器上，另外一路进入样品室被待测物质所吸收，吸收后的紫外光信号再投射到紫外探测器上。光强信号经探测器转化为电信号，再经模数转化后输入计算机进行处理，最后得出被检测区域内的气体浓度。

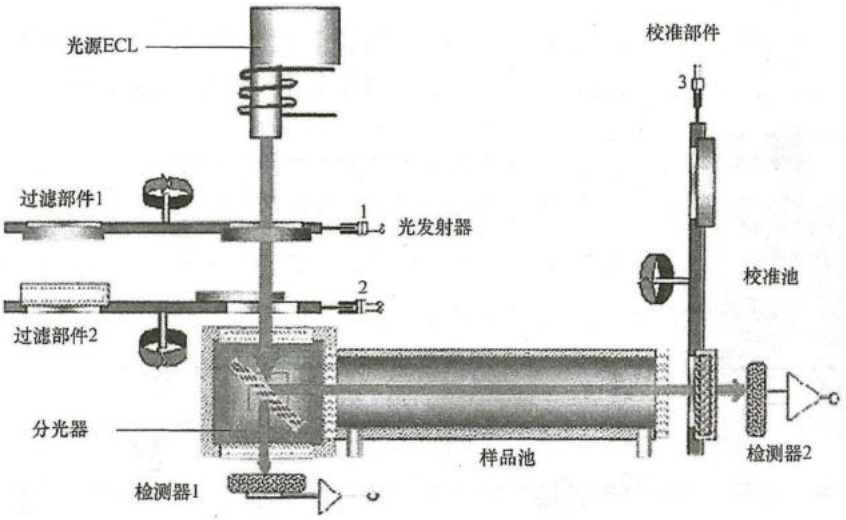


图 2-24　非分散紫外吸收分析仪原理图

以烟气中的 SO_2 测量为例，SO_2 气体吸收 185～315nm 区域的紫外光，吸收带的中心波长在 285nm，试验表明烟气中所含的 NO_2 在 285nm 也有吸收，由 NO_2 的吸收谱图可以看出，NO_2 在 285nm 与 578nm 有相等吸收，为了对 NO_2 的干扰进行补偿，可以在光路中设置一个中心波长 578nm 的带通滤光片，从而抵消 NO_2 对 285nm 紫外光吸收的影响。但是由于烟气中的 NO_2 浓度一般较低，且 SO_2 在 285nm 的吸收率比 NO_2 强，NO_2 的干扰影响基本不大。

不分光紫外分析器（NDUV）采用氘灯光源，光学部件设计成几何双光路形式，采用双光路结构能够减少由于光源引起的漂移。

2）紫外差分分析仪

差分吸收光谱法（DOAS）主要是利用吸收分子在紫外到可见光段的特征吸收来测量烟气中特征污染气体成分（NO_2、SO_2、Hg、NH_3 等）。差分吸收光谱技术是利用特征污染气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成分，并根据窄带吸收强度来推演气体的浓度，因此差分吸收光谱方法具有一些传统检测方法所无法比拟的优点。

DOAS 广泛应用于烟气监测领域，差分吸收光谱法的主要优点是可以在不受被测对象化学行为的干扰的情况下来测量它们的绝对浓度，可以通过分析几种气体在同一波段的重叠吸收光谱，来同时测定几种气体的浓度。

在测量燃煤电厂锅炉、各种工业窑炉等固定污染源排放的烟气组分时，由于烟气成分复杂，各种烟气成分对光均有不同的吸收作用，当监测某种气体成分时，其他组分的气体的吸收必然会对准确测量被测对象产生干扰作用，因此对于固定污染源的烟气排放监测，可通过式（2-12）计算。

$$I(\lambda TP)=I_0(\lambda)\exp\{-[\sum C_i\sigma_i(\lambda TP)+E_m(\lambda)+E_r(\lambda)]\cdot L\}+N(\lambda) \tag{2-12}$$

式中 $I(\lambda TP)$——考虑温度、压力影响的接收光强；

$\sigma_i(\lambda TP)$——考虑温度、压力影响的第 i 种气体的吸收截面；

C_i——第 i 种气体的浓度；

$E_m(\lambda)$——较大颗粒的米氏散射；

$E_r(\lambda)$——较小颗粒的瑞利散射；

$N(\lambda)$——光子噪声。

DOAS 方法的特点在于根据被测气体在所选波段上的频率特性，将吸收截面分成两部分，随波长快速变化的窄带吸收截面 σ_i' 和随波长缓慢变化的宽带吸收截面 $\sigma_i b$，即

$$\sigma_i=\sigma_i'+\sigma_i b \tag{2-13}$$

当仅考虑快变部分时，就可以消除气体分子及烟尘颗粒物的瑞利散射和米氏散射以及光强衰减等的影响，用 $I_0'(\lambda)$ 表示慢动部分吸收光强。则差分光学吸收度为：

$$D'=\ln[I_0'(\lambda)/I(\lambda)]=L\sum\sigma_i'(\lambda TP)\cdot C_i \tag{2-14}$$

在直接抽取式系统里，可以通过技术保证被测气体的温度、压力没有较大变化，就可以不考虑温度及压力的影响，建立方程组。

$$\begin{bmatrix}D'(\lambda_1)\\D'(\lambda_2)\\\vdots\\\vdots\\D'(\lambda_m)\end{bmatrix}=L\begin{bmatrix}\sigma_1'(\lambda_1)+\sigma_2'(\lambda_1)+K+\sigma_n'(\lambda_1)\\\sigma_1'(\lambda_2)+\sigma_2'(\lambda_2)+K+\sigma_n'(\lambda_2)\\\vdots\\\vdots\\\sigma_1'(\lambda_m)+\sigma_2'(\lambda_m)+K+\sigma_n'(\lambda_m)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_1\\C_2\\\vdots\\\vdots\\C_m\end{bmatrix} \tag{2-15}$$

$$D=A\cdot C \tag{2-16}$$

式中　D——差分吸光度矩阵；

A——为差分吸收截面矩阵；

C——为气体浓度矩阵。

差分吸光度可由测量值获得，差分吸收截面 A 可由实验室测量的吸收截面通过滤波计算获得，光程为定值。

紫外差分气体检测系统主要包括：光源发射器（氙灯）、光源接收器、分析气室、光纤、光谱仪和计算机等，见图 2-25。

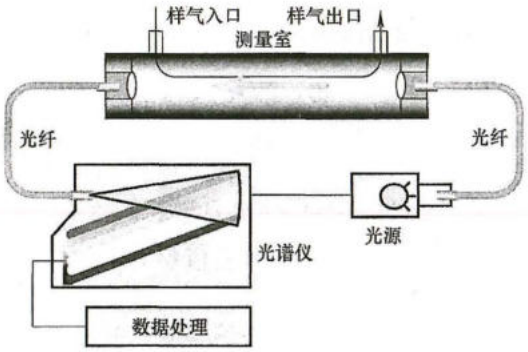


图 2-25　紫外差分气体检测系统技术原理图

基本原理为：紫外可见光发射器向接收器发射具有确定光谱的紫外光束汇聚进入光纤，通过光纤传输到气体室，紫外光经过光路中的样品室时被被测物质所吸收，吸收后的紫外光通过光纤传输到光谱仪，信号传送到光谱仪内经过光栅分光中后再投射到 CCD 阵列上，经 CCD 阵列转化为电信号，再经模数转化后输入计算机进行处理，最后获得气体的连续吸收光谱信息，从而检测出被检测区域内的气体浓度。

系统中采用 DOAS 算法（图 2-26）对连续吸收光谱进行处理，其核心思想是将吸收光谱分成快变化和慢变化两部分，利用快变化部分来反演气体的浓度。测量不受颗粒物和水分等因素的干扰，测量准确度高。

（3）应用工况选择

由于 CO_2 和 H_2O 在紫外光谱范围没有吸收，对于某些在红外光谱范围内 CO_2 和 H_2O 交叉干扰严重的气体组分，采用紫外吸收光谱法检测会取得更好的测量效果。由于紫外光谱不受水汽的影响，因此可以直接采用热湿系统对样气进行采样分析，而不必除去系统中的水蒸气，但是为防止样气出现冷凝，整个采样气路以及测量池都需要进行高温加热。

相对于 NDIR，NDUV 在烟气排放中 SO_2、NO_2 的连续在线监测应用中，具有较强的优势，采用 NDUV 方法不仅能获得更低的检测限，同时较好的避免烟气中 H_2O、CO_2 以及其他组分的干扰，因此将 NDUV 应用在烟气脱硝后，不需要转换器，即可对 NO_2 进行测量，从而减少了维修。由于 UV 光度计结构可以设计得非常紧凑，因此也有使用在汽车发动机上，对汽车排放尾气中 NO_2 进行测量。

紫外 DOAS 技术可消除烟尘、水汽、其他气体交叉干扰、光强度变化、仪器结构和器件变化等因素对测量结果的影响，有效地抑制了样气中颗粒物杂质和光源波动对测量的影响，测量准确、检测灵敏度高、长期稳定性好；此外还可获得多种被测气体组分的吸收光谱，然后利用差分吸收光谱技术对吸收光谱进行分析，支持多组分气体同时监测，特别适合在高湿、高尘、高腐蚀和复杂背景等恶劣工况下使用，可广泛应用于火力发电厂、各种工业

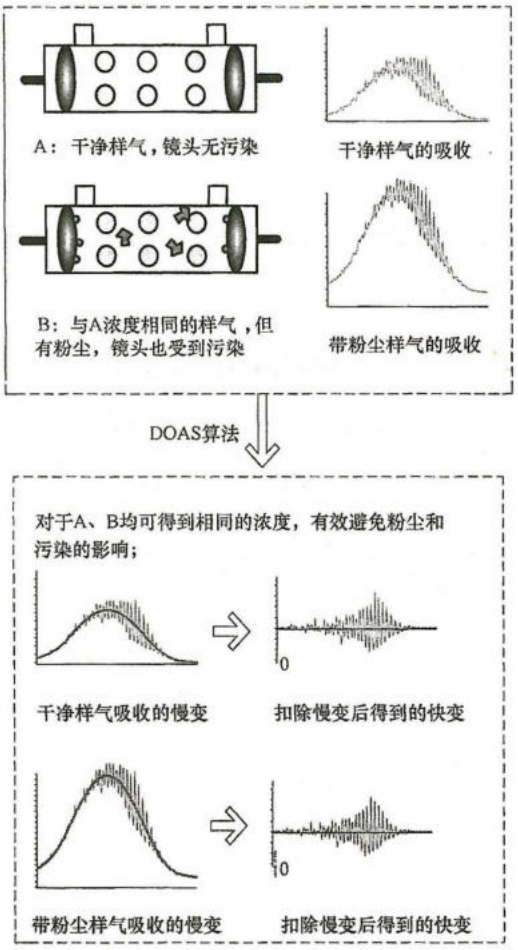


图 2-26 DOAS 算法原理图

窑炉/锅炉、化学工业、钢铁烧结/炼钢厂、水泥工业、垃圾焚化厂、石油工业等场合。基于以上特点，紫外 DOAS 技术也可以直接用在烟气排放原位式测量。

（4）在 CEMS 应用中存在的问题

排污废气中含有大量的粉尘、水汽和焦油，会严重污染测量室、堵塞过滤器。因此必须在预处理阶段将其去除。此外紫外波段光谱在空气、透镜、光纤中的损耗较大，导致传感器探测到的紫外波段的光谱能量偏低，影响系统的检测灵敏度，因此在光路设计、器件选取（包括透镜、光纤、传感器等）上就需要考虑如何提高微弱光探测能力、紫外短波的响应特性，高分辨率、低杂散光和短波紫外高响应能力。

排污废气在线监测中，往往需要同时监测多种组分气体的含量。但不同气体之间的吸收谱线会存在相互干扰，影响测量精度。需要从波段优选、算法设计等方面着手，扣除干扰气体的影响，提高测量精度。

相对于 CLD，NDUV 抗干扰能力要差，若烟气中含有的碳氢化合物浓度较高时，则容易对紫外光谱分析技术产生较大的影响，因此采用紫外光谱分析技术对烟气中污染物浓度进行测量时，应尽量避免在碳氢化合物浓度过高的场合使用，或者直接在样气进入测量池以前就将碳氢化合物除去。此外氘灯寿命较短是不争的事实，使得 NDUV 的广泛使用受到了限

制，为提高紫外灯的使用寿命，目前已有厂家采用无极放电灯作为紫外辐射光源。

差分吸收光谱法的一个关键是将测得的污染气体吸收光谱和标准气体吸收截面进行差分处理，得到差分光学吸收度和差分吸收截面。但遗憾的是，污染气体的标准差分吸收截面除了与波长有关外，还与压力和温度有关，其差分吸收度随温度升高峰值减小，谷值增大。由于燃煤电站锅炉等固定污染源烟气排放现场环境恶劣，温度变化频繁，污染气体的差分吸收光谱特性将会发生变化，直接应用差分吸收光谱技术很难准确测量污染气体的浓度，目前虽然很多厂家都采取了不同的经验公式来修正温度对测量结果的影响，但均不能给出很好的结果。

2.1.3.3　电化学法气体分析仪

（1）测量原理

电化学分析仪是根据所测量气体在气室内的化学反应所引起的离子量的变化或电流变化来测量气体成分和浓度。

为了提高选择性，防止测量电极表面沾污和保持电解液性能，一般采用隔膜结构。常用的电化学式分析仪有定电位电解式和伽伐尼电池式两种。

定电位电解式分析仪的工作原理是在电极上施加特定电位，被测气体在电极表面就产生电解作用，只要测量加在电极上的电位，即可确定被测气体特有的电解电位，从而使仪表具有选择识别被测气体的能力。

伽伐尼电池式分析仪是将透过隔膜而扩散到电解液中的被测气体电解，测量所形成的电解电流，就能确定被测气体的浓度。通过选择不同的电极材料和电解液来改变电极表面的内部电压从而实现对具有不同电解电位的气体的选择性。

1）定电位电解传感器的原理

常用于烟气测量便携式仪器的电化学传感器一般为定电位电解传感器。主要由电解槽、电解液和电极组成。传感器的3个电极分别称为敏感电极、参比电极、对电极，简称SRC。

传感器的工作原理：被测气体由进气孔通过渗透膜扩散到敏感电极表面，在敏感电极、电解液、对电极之间进行氧化反应。与此同时产生对应的极限扩散电流 i，在一定范围内其大小与样品气的浓度成正比。传感器结构原理图见图2-27。

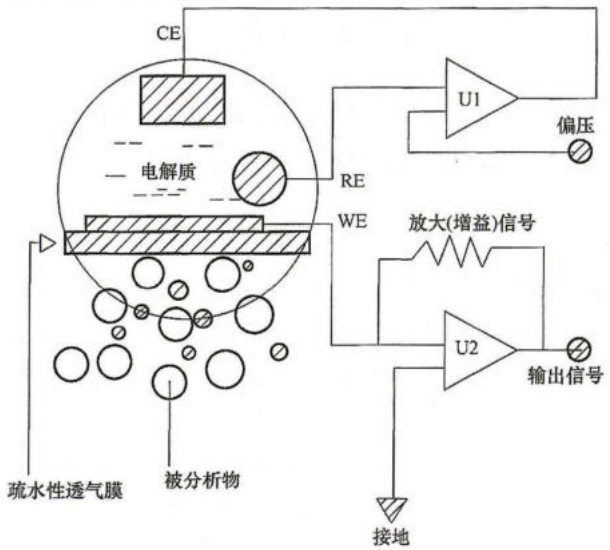


图2-27　定电位电解传感器结构原理图

2）定电位电解法气体分析仪的结构及原理

定电位电解法烟气分析仪主要由三部分组成：烟气预处理装置、气路系统和电路系统，如图 2-28 所示。

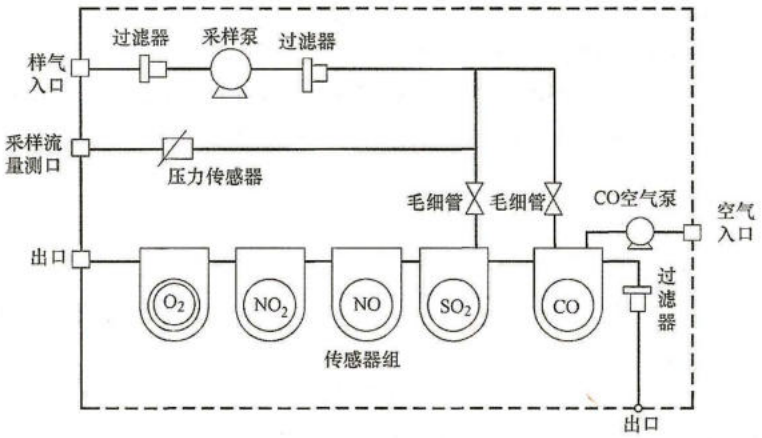


图 2-28 仪器气路结构原理示意图

由于烟道内的温度一般高于环境温度，样品气被采集出烟道后将会产生结露，结露水将对烟气中的 SO_2 产生吸附溶解损失并影响传感器的正常工作，因此分析仪的预处理装置要完成样品气的加热及烟尘颗粒物的过滤、冷凝和脱水工作。仪器内的气路完成经过预处理的样品的抽取和输送等功能。电路系统完成气电转换、信号放大、数据处理、数据显示打印和仪器工作状态控制等功能。

仪器通电后，泵启动，烟气通过烟尘过滤器滤除粗烟尘，过滤后的烟气经过滤器进入气水分离器，在气水分离器内水分与烟气分离，洁净的干烟气经过薄膜渗透进入传感器气室，在气室内扩散后从气室出口排出。

气室内扩散的烟气使传感器产生氧化-还原反应，传感器输出微安级的电流信号进入前置放大器后，在前置放大器的输出端形成 0～2000mV 范围内变化的 mV/ppm 模拟量定量比例值。该比例值信号送入 A/D 转换器，将模拟信号转换成单片机可识别的数字信号送入单片机后，按照单片机编写的程序对数据进行处理，并将处理后的测试数据显示、存储、打印。

仪器在测试采样工作时，现场诸多工况参数的输入采用人机对话的方式在仪器面板上按键键入，电路系统的驱动工作由单片机根据程序要求来触发。

（2）类型和特点

1）定电位电解法

定电位电解法测量烟道气中的 SO_2、NO_x、O_2 等多种气体，其基本原理如下：

烟道排气中的二氧化硫扩散通过电化学传感器的渗透膜，进入电解槽，在高于 SO_2 标准氧化电位的规定外加恒电位作用下，使电解液中吸收的 SO_2 发生氧化反应：

$$SO_2+2H_2O\rightarrow SO_4^{2-}+4H^++2e \tag{2-17}$$

与此同时产生对应极限扩散电流 i，在一定范围内其电流的大小与 SO_2 浓度成正比，即

$$i=\frac{Z\cdot F\cdot S\cdot D}{\delta}\cdot C \tag{2-18}$$

在确定的工作条件下，电子转移数 Z、法拉第常数 F、气体扩散面积 S、扩散常数 D

和扩散层厚度δ均为恒定常数。因此，测得极限电流i即与气体中二氧化硫（实际为电解槽溶液中的二氧化硫）浓度成正比，具有定量关系，即：

$$i \propto C \quad 或 \quad i=KC \tag{2-19}$$

通过测量库仑电池中极限电流i的变化，从而定量求出排气中二氧化硫浓度。

定电位电解法测定烟道中一氧化氮的原理如下：

一氧化氮气体进入电化学气敏传感器后，一氧化氮分子在恒电位工作电极上发生电催化氧化反应：

$$NO+2H_2O \rightarrow NO_3^- +4H^+ +3e^- \tag{2-20}$$

在对电极上空气中的氧分子发生电催化还原反应：

$$O_2+4H^+ +4e \rightarrow 2H_2O \tag{2-21}$$

上述电化学反应过程中，产生的极限扩散电流i，在一定范围内，其大小与一氧化氮浓度成正比，即式：

$$i=\frac{Z \cdot F \cdot S \cdot D}{\delta} \cdot C \tag{2-22}$$

在一定工作条件下，电位转移数Z、法拉第常数F、气体扩散面积S、扩散常数D和扩散层厚度δ均为常数，因此，测得的极限扩散电流i即与一氧化氮浓度C成正比。

定电位电解法仪器具有检测响应快、操作简单、灵敏度高、仪器轻便等优点，在污染源监测中得到广泛应用。

2）极谱法

其原理结构主要有三个部分（图2-29）：第一部分是提供可变外加电压的装置；第二部分是指示电压改变过程中进行电解时流过电解池电流变化的装置；第三部分是电解池。极谱分析与电解分析装置的不同之处在于两个电极。极谱分析使用的两个电极一般都是汞电极，其中一个是电极面积很小的滴汞电极，为工作电极；另一个是面积很大的汞电极，或电位恒定的饱和甘汞电极，为参比电极。极谱法是通过获得的电流—电压曲线即极谱波或极谱图来进行分析测定的。在外加电压还未达到被测物质的分解电压时，有一很小的电流通过电解池，此电流称之为残余电流i_r。电解开始后，随着外加电压增大，电流迅速增大，最后当外加电压增大到一定值时，电解电流不再增加，而达到一个极限电流i_1。i_1-i_r称之为极限扩散电流i_d，也叫波高。在一定条件下，波高与被测浓度成正比，$i_d=kc$这是极谱定量分析的基础，1934年尤考维奇导出了扩散电流方程式，即尤考维奇方程：

$$I_d=607nD^{1/2}m^{2/3}\tau^{1/6}c(25℃) \tag{2-23}$$

式中　I_d——平均极限扩散电流（μA）；

n——电极反应中的电子转移数；

D——被测物在溶液中的扩散系数（$cm^{-1} \cdot s^{-1}$）；

m——汞流速（$mg \cdot s^{-1}$）；

τ——滴汞周期（s）；

c——被测物浓度（$m \cdot mol/L$）。

从尤考维奇方程可知，影响极限扩散电流的主要因素有：毛细管特征（$m^{2/3}\tau^{1/6}$称为毛细管常数，它与汞柱压力的平方根成正比）、温度、滴汞电极电位和电解液组成。在进行极谱分析时，残余电流即杂质产生的电解电流和电容电流干扰测定，需要设法

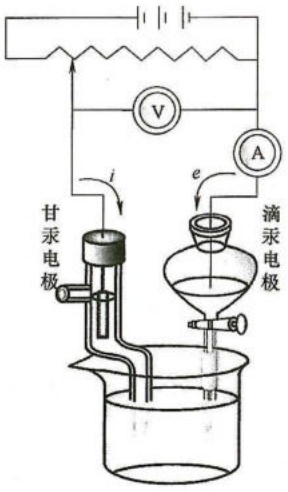


图2-29　极谱法原理图

消除，其实降低电容电流已成为极谱分析仪器发展的主流。迁移电流和极谱可分别通过加入大量的支持电解质和极大抑制剂（如表面活性剂）来消除。溶解氧在滴汞电极上还原，会产生两个极谱干扰测定，可通过惰性气体和加入不影响极谱分析的还原剂除氧。

在极谱电解过程中，由于控制反应速度的关键步骤不同，一般可将极谱波分成可逆波、不可逆波和动力波。

在极谱电解过程中，只有扩散速度最慢，其他过程都比较快。滴汞电极的电位与电极表面反应物的活度关系符合能斯特方程。其电解电流都是受扩散控制的，这样的极谱波为可逆波。此时，

$$E_{DME}=E_{1/2}2\lg\frac{i}{i_d-i}(25℃) \tag{2-24}$$

式中：E_{DME} 和 $E_{1/2}$ 分别为滴汞电极电位和半波电位；i 和 i_d 分别为电解电流和极限扩散电流。它是一个 E_{DME} 与 $\lg\frac{i}{i_d-i}$ 的线性方程，据此可用作图法求得 $E_{1/2}$ 和 n。不能简单地应用能斯特方程来表达其电极电位与电极表面反应物的活度关系的极谱波为不可逆波。

极谱电解过程受化学反应控制的极谱波为动力波。催化波是一种高灵敏的动力波，其电极反应与化学反应构成催化循环。与催化波机理不同，还有一种高灵敏的催化反应——极谱波（法），它是用极谱波法检测催化反应速度，从而测定催化剂浓度的极谱新方法。

① 分类

极谱法分为控制电位极谱法和控制电流极谱法两大类。在控制电位极谱法中，电极电位是被控制的激发信号，电流是被测定的响应信号。在控制电流极谱法中，电流是被控制的激发信号，电极电位是被测定的响应信号。控制电位极谱法包括直流极谱法、交流极谱法、单扫描极谱法、方波极谱法、脉冲极谱法等。控制电流极谱法有示波极谱法。此外还有极谱催化波、溶出伏安法。

a. 直流极谱法

又称恒电位极谱法。通过测定电解过程中得到电流—电位曲线来确定溶液中被测成分的浓度。其特点是电极电位改变的速率很慢。它是一种广泛应用的快速分析方法，适用于测定能在电极上还原或氧化的物质。

b. 交流极谱法

将一个小振幅（几到几十毫伏）的低频正弦电压叠加在直流极谱的直流电压上面，通过测量电解池的支流电流得到交流极谱波，峰电位等于直流极谱的半波电位 $E_{1/2}$，峰电流 i_p 与被测物质浓度成正比。

该法的特点是：(a) 交流极谱波呈峰形，灵敏度比直流极谱高，检测下限可达到 10^{-7}mol/L。(b) 分辨率高，可分辨峰电位相差 40mV 的相邻两极谱波。(c) 抗干扰能力强，前还原物质不干扰后还原物质的极谱波测量。(d) 叠加的交流电压使双电层迅速充放电，充电电流较大，限制了最低可检测浓度进一步降低。

c. 单扫描极谱法

在一个汞滴生长的后期，其面积基本保持恒定的时候，在电解池两电极上快速施加一脉冲电压，同时用示波器观察在一个汞滴上所产生的电流—电压曲线。

该法的特点是：(a) 极谱波呈峰形，灵敏度比直流极谱法高 1～2 个数量级，检测下限可达到 10^{-7}mol/L。(b) 分辨率高，抗干扰能力强。可分辨峰电位相差 50mV 的相邻两极谱波，前还原物质的浓度比后还原物质浓度大 100～1000 倍也不干扰测定。(c) 快速施加极

化电压，产生较大的充电电流，故需采取有效补偿充电电流的措施。（d）不可逆过程不出现极谱峰，减小以至完全消除了氧波的干扰。

d. 方波极谱法

在通常的缓慢改变的直流电压上面，叠加上一个低频率小振幅（≤50mV）的方形波电压，并在方波电压改变方向前的一瞬间记录通过电解池的交流电流成分。方波极谱波呈峰形，峰电位 E_p 和直流极谱的 $E_{1/2}$ 相同，峰电流与被测物质浓度成正比。

该法的特点是：（a）它是在充电电流充分衰减的时刻记录电流，极谱电流中没有充电电流，因此可以通过放大电流来提高灵敏度，检测下限可达到 10^{-8}～10^{-9}mol/L。（b）分辨率高，抗干扰能力强。可分辨峰电位相差 25mV 的相邻两极谱波，前还原物质的量为后还原物质的量 10^4 倍时，仍能有效地测定痕量的后还原物质。（c）氧波的峰电流很小，在分析含量较高的物质时，可以不需除氧。（d）为了减小时间常数，充分衰减充电电流，要求被测溶液内阻不大于 50Ω，支持电解质浓度不低于 0.2mol/L，因此要求试剂具有特别高的纯度。（e）毛细管噪声电流较大，限制了灵敏度的进一步提高。

e. 脉冲极谱法

在汞滴生长到一定面积时，在直流电压上面叠加一小振幅（10～100mV）的脉冲方波电压，并在方波后期测量脉冲电压所产生的电流。依脉冲方波电压施加方式不同，脉冲极谱法分为示差脉冲极谱和常规脉冲极谱。前者是直流线性扫描电压上叠加一个等幅方波脉冲，得到的极谱波呈峰形，后者施加的方波脉冲幅度是随时间线性增加的，得到的每个脉冲的电流-电压曲线与直流极谱的电流—电压曲线相似。

该法的特点是：（a）灵敏度高，在充分衰减充电电流 i_c 和毛细管噪声电流 i_N 的基础上放大法拉第电流，使检测下限可以达到 10^{-8}～10^{-9}mol/L。（b）分辨率好，抗干扰能力强。可分辨 $E_{1/2}$ 或 E_p 相差 25mV 的相邻两极谱波，前还原物质的量比被测物质的量高 5×10^4 倍也不干扰测定。（c）由于脉冲持续时间较长，使用较低浓度的支持电解质时仍可使 i_C 和 i_N 充分衰减，从而可降低空白值。（d）脉冲持续时间长，电极反应速度缓慢的不可逆反应，如许多有机化合物的电极反应，也可达到相当高的灵敏度，检测下限可以达到 10^{-8}mol/L。

f. 示波极谱法

一种控制电流极谱法，用示波器观察或记录极谱曲线。常用的极化电极是悬汞电极和汞膜电极，参比电极是镀汞银电极、汞池电极或钨电极。将 220V 交流正弦电压经高电阻 R（约 10^5～10^6Ω）调压至 2V 加到电解池上。在交流电压上叠加一可调直流电压，以在 0～2V 范围内提供一个固定的电位。交流电的高电压几乎全部落在高电阻上，通过电解池的交流电流的振幅是恒定的，主要是测定它的电流变化。示波管的垂直偏向板与两个电极相连，在水平偏向板上用锯齿波扫描。当扫描电压与交流电压同步和使用固定微电极时，荧光屏上出现稳定的电位时间曲线。根据记录方式不同，可以得到三种类型的电位曲线：电位-时间（E-t）曲线、电位-时间（E-t）曲线的微分曲线与示波极谱图曲线。支持电解质的交流 E-t 曲线具有正弦形状，被水平的恒定电位延滞而割短，当溶液中有电活性物质存在时，在曲线上相应于电极反应的电位处呈现分步的时间延滞，延滞的转折点电位等于直流极谱波的 $E_{1/2}$，延滞的长度取决于被测物质的浓度。E-t 曲线上的延滞在曲线上表现为切口，对于可逆反应，阳极和阴极切口是相对应的。切口的深度随被测物质浓度增大而加深，可用作定量分析，但灵敏度不高，检测下限只能到 10^{-5}mol/L。示波极谱法可鉴别电极上的吸附现象和电极反应的可逆性。

② 用途

极谱法可用来测定大多数金属离子、许多阴离子和有机化合物（如羰基、硝基、亚硝基化合物，过氧化物、环氧化物，硫醇和共轭双键化合物等）。此外，在电化学、界面化学、络合物化学和生物化学等方面都有着广泛的应用。随着技术的更新，在快速监测中，极谱法已经很少使用。

③ 特点

a. 适用范围广，氢在汞电极上的超电位很大，在酸性条件下－1.0V 还不被还原，作为阳极可至＋0.4V。

b. 可测定组分含量的范围宽。10^{-5}～10^{-2}mol/L 适宜作微量组分的分析。

c. 准确度高，重现性好。工作电极始终保持洁净，一般相对误差大约为±1%。

d. 选择性好，可实现连续测定。对析出电位相差约＞50mV 的各种金属离子，可还原为金属，极谱波不相互干扰。

e. 汞蒸气有毒，须注意通风，检查空气中含汞量。

④ 应用

a. 金属元素的测定：Cu、Pb、Cd、Zn、W、Mo、V、Se、Te 等元素几种金属离子的同时测定。

b. 有机物的测定：羰基、亚硝基、有机卤化物等。

c. 配位化合物的配位数和平衡常数的测定。

（3）应用工况选择

1）电化学方法仪器的使用温度范围在 0～40℃，高温烟气应先经过降温处理后才能测量。

2）一般采集含湿量高的烟气工况时或冬季采样时，需选用加热采样管，以保证烟气在吸收瓶前的采样管路系统中不结露。

3）排放废气中的氟化氢、硫化氢等浓度较高时，对 SO_2 电化学传感器测定值有干扰。

4）对于采用高炉煤气作燃料的钢铁厂冶炼烧结炉，由于废气排放中存在高浓度的 CO，会对 SO_2 电化学传感器产生正干扰值，在此种锅炉工况中电化学气体分析仪测量会产生误差，仪器需进行排气对所测量气体干扰进行校正。

（4）在 CEMS 应用中存在的问题

电化学法气体分析仪通常应用于工业锅炉 CEMS 的日常比对监测，目前有少量的 CEMS 仍用电化学法气体分析仪作系统测量气态污染物的主机。以 SO_2 电化学传感器为例，在仪器的日常应用中存在以下问题：

1）流量对仪器测量值的影响

根据电化学传感器的工作原理，抽取气体的流量越大，扩散到电解槽的 SO_2 分子越多，SO_2 的浓度就越高，反之，抽取气体的流量越小，扩散到电解槽的 SO_2 分子越少，SO_2 的浓度就越低。通常采样测量时要保证仪器抽取的烟气的流量与仪器标定时的流量一致并恒定，以减小采气流量变化对测量结果的影响。

2）冷凝水对仪器测量值的影响

冷凝水产生有两个原因，其一是由于烟气是经过湿法脱硫后所排出的，烟道内含湿量较高，当烟气被抽到仪器的管路中易发生冷凝产生冷凝水；其二是冬季烟气温度与环境温度温差较大，采样测量时采气管路中容易产生冷凝水。由于 SO_2 易溶于水，一部分气体就会被水吸收，造成监测结果偏低。一般对于这种情况采用带加热采样管的烟枪采样可减小冷凝水对测量结果的误差。

3）烟气中细微粉尘及水汽对仪器测量值的影响

电化学传感器的工作原理是被测气体分子通过渗透膜进入电解槽越多，浓度越高，如果被测气体中尘浓度和水汽较大，尘就容易附着在渗透膜的表面，影响其透气性，会使测量结果值偏低。

废气中的水汽容易在仪器传感器渗透膜表面冷凝，影响透气性能，使测定值偏低，因此对高湿度的气样进入传感器前需加无水氯化钙除水干燥管。

4）烟气温度对仪器传感器的影响

原则上，一般所测的烟气进入传感器的温度应低于40℃，这对保护传感器寿命是关键。

5）电化学传感器使用寿命对仪器测量值的影响

电化学传感器的寿命一般在1～2年，根据使用时间和工况，传感器信号随着时间的推移会衰减和漂移，影响测量结果。仪器开机时，一定要用清洁的空气校零。测量完毕后，不要立即关机，仪器必须在清洁空气保持运行时间5～10min，待仪器气体显示值降至10单位以下，保持仪器内部处于新鲜空气的环境，方可关机或停泵，否则，传感器容易“中毒”并加速传感器的损耗。

6）所测气体间的交叉干扰对仪器测量值的影响

传感器除对目标气体响应外，对其他气体也存在响应，具体见表2-7。

传感器对其气体的响应（单位：ppm）　　表2-7

气体(100ppm) 传感器响应	SO_2	NO	NO_2	CO	H_2S
SO_2	100	0	−125	<3	0(SO_2传感器带内置H_2S过滤器)

7）电化学传感器气体分析仪在使用中的注意事项：

① 保持电化学传感器电解槽的恒温或温度补偿。

② 在进入分析仪器前对污染源气体除尘和除水。

③ 进入传感器的气体温度应小于40℃。

④ 每次测量前应对分析仪器进行标定，压力不能过大。

⑤ 测量时的抽气流量应与标定时的流量一致。

⑥ 每次测量后应用清洁空气对传感器进行清洗。

⑦ 带有抗交叉干扰的电化学传感器气体分析仪，在使用前要进行交叉干扰标定（一般仪器出厂前已标定好，但用户重新标定时要注意）。

⑧ 电化学传感器气体分析仪应装有二氧化氮传感器，以便于计算烟气中二氧化氮对其他传感器的干扰。

⑨ 电化学传感器一般使用期限为一年，要及时更换以免影响采样。

2.1.3.4　分子发光分析技术

分子吸收外来能量时，分子的外层电子可能被激发而跃迁到更高的电子能级，这种处于激发态的分子是不稳定的，可以经由多种衰变途径而跃迁回基态。这些衰变的途径包括辐射跃迁过程和非辐射跃迁过程，辐射跃迁过程伴随的发光现象，称为分子发光。

分子发光分析技术成为近年来发展比较快的分析技术之一。分子发光分析技术是以分子发光作为检测手段的分析方法，其具有灵敏度高，选择性好，试样量少，操作简便等优点，已在生物医学、药学以及环境科学等方面被广泛应用。按分子激发的模式分为光致发光和化学发光或生物发光。如果分子通过吸收光能而被激发，所产生的发光称为光致发光。如果分

子是由化学反应的化学能或由生物体（经由体内的化学反应）释放出来的能量所激发，其发光分别称为化学反光或生物发光。

按分子激发态的类型分为荧光和磷光两种类型。分子荧光、磷光都属于光致发光。

荧光是光致发光的冷发光现象，当物质吸收了特征频率的入射光，就由原来的基态能级跃迁至电子激发态，并且立即激发出比激发波长长的出射光，一旦停止入射光，出射光的现象立即消失，此时所发射的光即是荧光。

磷光是一种缓慢光致发光的冷发光现象，当物质吸收了特征频率的光子，就由原来的基态能级跃迁至电子激发态，然后缓慢退激发并发出比激发波长长的出射光，一旦停止入射光，发光的现象持续存在，此时所发射的光即是磷光。

（1）分子荧光、磷光分析技术的应用领域和技术特点

荧光发射，在电子能量变化中不涉及电子自旋的改变，荧光的寿命较短，为 10^{-5}s；磷光发射，在电子能量变化中伴随电子自旋的改变，磷光的寿命较长，为微几秒，甚至更长。

荧光分析法目前主要用于无机物和有机物的定量分析。

有机物的应用非常广泛，能测定的有机物质有数百种之多，如酶和辅酶的荧光分析，农药和毒药的荧光分析，氨基酸和蛋白质的荧光分析，核酸的荧光分析。这些构成了目前荧光分析技术的主要内容。许多有机化合物在紫外线的照射下，所发荧光并不强或不发荧光，因此必须使用某些有机试剂，以便生成的产物在紫外线照射下能发射强的荧光。例如脂肪族有机化合物就是用间接方法测定的。

在紫外线照射下能直接发射荧光的化学元素并不很多，直接测定法主要包括硫和二氧化硫，所以对一些元素进行荧光分析时大部分采用间接测定法，这就是用有机试剂与被测定的元素组成络合物。这些络合物在紫外线照射下能发射出不同波长的荧光素，然后由荧光强度测定出该元素的含量。由于有机荧光试剂的品种繁多，用荧光分析可测定的元素有 60 多种。

磷光分析法主要用于有机化合物的测定，如稠环芳烃和石油产品的分析，农药、生物碱和植物生长激素的分析，药物和临床分析等。此外磷光分析技术也已应用于生物活性物质的化验及细胞生物学、生物化学等方面的研究。

分子荧光、磷光分析技术的特点如下：

1）灵敏度高：荧光分析是由试样所发生的荧光的强度来测定试样中荧光物质的含量。荧光分析的灵敏度与试样的浓度及入射光的强度有关。荧光分析的灵敏度高于一般的分光光度法，最低检出限比分光光度法低一个数量级以上，适合于痕量物质的检测。

2）选择性好：凡是会发生荧光的物质首先必须会吸收一定频率的光，但会吸收光的物质却不一定会产生荧光。对于某一给定波长及发光，产生荧光的物质发出的荧光的波长也不相同，只要控制荧光分光光度法中激发光和荧光的波长便可得到选择性良好的应用。

3）能够引起荧光的化学物质少，应用范围小。

4）大多数物质本身不会产生荧光，一些物质在加入某种试剂后能够产生荧光。

（2）紫外荧光分析仪

随着烟气超低排放的推进，烟气排放浓度呈数量级下降，有的厂商将使用了原配于稀释法的分析仪，通过适用性改进，使烟气无需稀释而是直接抽取就可以完成测量。其中紫外荧光分析仪用来测量其中的 SO_2 的浓度，化学发光分析仪用来测量 NO_x 浓度。其基本原理在稀释抽取式 CEMS 章节会详述。此章节仅分析其影响因素：

1）直接干扰

样气中碳氢化合物能淬灭发射的荧光，是发射荧光的浓度降低，引起测量误差。

紫外荧光分析仪一般通过在样品室之前设计一个特殊洗涤器，就可以除去样品气中的任何碳氢化合物来排除这些气体的干扰。

2）O_3 的紫外吸收

O_3 能在一个相对宽的光谱范围内吸收紫外光，将产生一个测量补偿，吸收了在样品室内 SO_2^* 衰减发出的紫外光。为了降低这种现象的发生，SO_2 浓度分析仪在 SO_2^* 荧光发生和 PMT 检测器之间的区域内，采用了一个非常短的光路，一般中间有一个窄带滤光片，并且在这个区域尽量密封，避免环境空气中 O_3 及颗粒物的干扰。

3）光污染

紫外荧光分析仪以测量光作为计算 SO_2 含量的方法，因此散射光很有可能成为另一个重要的干扰因素。仪器有几种方法排除该干扰。

样品室被设计成密不透光的，只接受激发紫外光源的光。

所有通向样品室的气路管是完全不透明的，阻止了光束从管壁进入样品室。

光学透镜可以除去一些与激发和衰减无关的波长。

4）环境空气的影响

紫外荧光分析仪应用到污染源测量中，工厂内的环境空气质量相对恶劣，SO_2、NO 的浓度要远高于周边地区，分析仪中的透镜、光学处理期间在紫外光源的照射，容易产生白色污染物污染镜片，为保证光学器件的正常工作，紫外荧光分析仪的光学系统须做密封处理。

5）反应温度的影响

温度对荧光的影响很大。温度降低会减少碰撞和非辐射失活的概率，因此会增加荧光强度。在紫外荧光分析仪中，一般将反应室温度恒定在 50℃。

（3）化学发光分析仪

1）影响因素分析

① 直接干扰

CO_2 分子的黏度使它们在临界流量孔径收集，造成系统流量不稳定。

样气气路中过滤器失效，颗粒物在限流管附近积聚，引起流量不足或波动，从而影响测量精度。

② 其他物质引起光子淬灭

CO_2、SO_2、NH_3、H_2O 是最重要的干扰源，CO_2、SO_2、NH_3、H_2O 分子的碰撞会引起光子淬灭，影响化学发光的光强，从而影响测量的准确度。表 2-8 列出了常见干扰源及预防措施。

气体干扰类型及预防措施　　表 2-8

气体	干扰类型	预防措施
CO_2	CO_2 分子的黏度使它们在临界流量孔径收集，造成系统流量不稳定	如果样气高浓度 CO_2（>0.5%）存在，需采用 NO、CO_2 混合标气进行校准，并且必须 CO_2 浓度值等同于样气中 CO_2 的浓度，来避免 CO_2 的干扰。 如果样气高浓度非常高，建议采用其他原理的产品
	CO_2 分子会阻止 NO_2^* 发出光子，引起光子淬灭，造成测量的 NO 偏低	
SO_2	部分 SO_X 分子与 O_3 发生反应，发出光子，使光强增大	采用光学高通滤波避免 SO_X 分子与 O_3 发生反应引起的测量误差

续表

气体	干扰类型	预防措施
SO_2	NH_3、O_2 和 H_2O 在 O_3 臭氧发生器中会反应形成 $(NH_3)2SO_4$、NH_3NO_2，甚至形成高腐蚀性的 HNO_3，这种白色沉淀物积聚在玻璃镜片上会引起测量的光强减弱，HNO_3 腐蚀镜片也会造成测量误差	样气中的硫酸铵、硝酸铵可以通过臭氧发生器与反应室间的空气洗涤器去除。 在臭氧发生器前的气路上，去除样气中的氨和水。
	SO_x 分子会阻止 NO_2^* 发出光子，引起光子淬灭，造成测量的 NO 偏低	如果高浓度 SO_x 存在，需要执行特殊的校准方案
H_2O	H_2O 分子会阻止 NO_2^* 发出光子，引起光子淬灭，造成测量的 NO 偏低	湿度过高的样气需要在反应室前增加湿度处理措施
	NH_3、O_2 和 H_2O 在 O_3 臭氧发生器中会反应形成 $(NH_3)_4SO_4$、NH_3NO_2，甚至形成高腐蚀性的 HNO_3，这种白色沉淀物积聚在玻璃镜片上会引起测量的光强减弱，HNO_3 腐蚀镜片也会造成测量误差	H_2O 可通过渗透管在样气中剔除
NH_3	NH_3 反应转化为 H_2O 和 NO，伴随 NO_2 转化成 NO 过程，部分 NH_3 也转化成 H_2O 和 NO，造成 NO 测量值偏高；过量 NH_3 会影响催化剂的效率，造成转化炉失效，同时腐蚀气路中的电磁阀	如果氨的浓度较高，在转化炉前，需要增加氨洗涤器
	NH_3、O_2 和 H_2O 在 O_3 臭氧发生器中会反应形成 $(NH_3)_4SO_4$、NH_3NO_2，甚至形成高腐蚀性的 HNO_3，这种白色沉淀物积聚在玻璃镜片上会引起测量的光强减弱，HNO_3 腐蚀镜片也会造成测量误差 HNO_3	加装 NH_3 洗涤器

NH_3是系统中最主要的干扰源，在钼转化炉将 NO_2 转化为 NO 的过程中，将部分的 NH_3 转化为 NO，造成 NO_x 的测量值偏高。

如果样气中的 NH_3 和 H_2O 的浓度值偏高，则需要在样气处理过程中增加氨、水剔除装置。

当 CO_2、SO_2 浓度较高时，采用特殊的校准或数据补偿算法，避免其对测量准确度的影响。

③ 光泄漏

检测器的敏感度曲线包括部分可见光谱，所以必须确保反应室密封。为保证这一点，所有气动管都是不透明的，反应室与检测器的连接部分采用密封圈密封。

2）故障分析

① 不能产生臭氧或臭氧发生浓度偏小

a. 臭氧进气过滤器堵塞，造成臭氧无法产生，从而导致 NO 分析仪无响应。

b. 干燥器漏气造成湿空气直接进入臭氧发生器，使臭氧浓度降低，引起仪表的非线性响应。

c. 臭氧发生器的紫外灯损坏或功率下降，造成不产生臭氧或臭氧浓度降低，造成 NO 分析仪无响应或产生低响应。

② NO_2 测量异常或 NO 的测量值高于 NO_x

a．NO_x 气路未标定。

b. NO_2 测定是通过钼炉转换器转化成 NO 进行测定，因此钼炉的转化效率就成为比较重要的一个因素，往往由于钼炉转换器的效率偏低而造成了测试的结果偏低。出现问题后监测钼转化炉的转化效率，一般其转化率必须维持在 96%～100%，如果超过这个范围则需要

更换钼炉转换器。

③ 标准浓度下，响应值偏低 20%以上

高通滤光片有白色沉积物或灰尘。

检查臭氧发生器的过滤器、光源、干燥器是否存在问题。

④ 零点不稳定、零点、跨点出现漂移

检查光电检测器的性能是否出现问题。

⑤ 采样泵泵膜损坏

更换采样泵前 O_3 洗涤器。O_3 洗涤器失效，导致排气中 NO_2 和 O_3 的浓度过高，NO_2 和 O_3 有较高的氧化作用。更换泵膜。

⑥ 采样流量不足

检查分析仪内的限流器是否堵塞。

检查样气路内是否有颗粒物沉积。

2.1.3.5　双池厚膜氧化锆传感器

传感器为双池厚膜氧化锆结构，采用氧泵电流原理，同时测量 NO_x 和 O_2 浓度。

（1）固体电解质

金属（例如铜和铝）中存在大量的自由电子和失去自由电子的空穴，接通电源后，金属中的自由电子按一定方向运动而导电，这种导电称为电子导电，因此金属叫作电子导体。熔融的盐和碱、碱和酸的溶液也能导电，这是由于熔体或溶液中发生电离，产生大量离子和空穴，这种导电称为离子导电，导电的熔体或溶液叫作离子导体，即电解质。电解质不仅限于熔体或溶液，而且还有固体电解质，如氧化锆（ZrO_2）固体电解质。

（2）氧化锆的导电原理

通常氧化锆固体电解质晶体由基体和稳定剂两种成分组成，基体是 ZrO_2，由它组成晶体骨架。稳定剂是掺入基体中的一种与基体氧化物价态不同的另一种氧化物，它具有稳定立方晶型和形成氧离子空穴双重作用，如掺入少量氧化钇（Y_2O_3），会导致晶体应力的变化，使高温下产生的 ZrO_2 立方体即使温度下降仍然维持稳定的晶体结构，同时在结晶过程中，钇离子进入 ZrO_2 的立方晶体中，置换了锆离子，由于 Zr 离子是+4 价，而 Y 离子是+3 价，置换后在晶体中产生了氧离子空穴，氧离子在空穴间迁移形成离子运动而导电，见图 2-30。

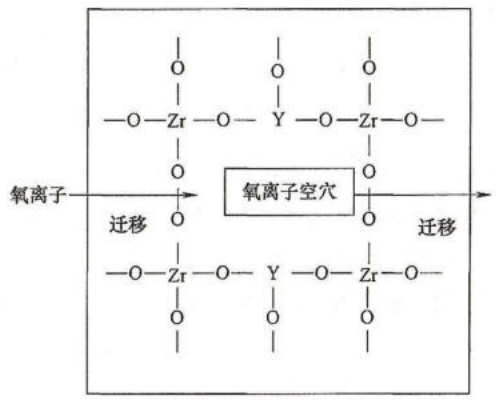


图 2-30　$ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ 晶体结构

因此 $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ 称为稳定化氧化锆，在高温时具有较好的氧离子导电性，对氧气具有较好的敏感性和选择性。

（3）氧浓差电池原理

在 ZrO_2 基片两面涂覆多孔铂电极，在高温下，当 ZrO_2 两侧氧浓度不同时，高浓度侧氧原子捕获铂电极（铂电极具有催化作用）两个电子变成氧离子。铂电极失去电子而带正电，成为浓差电池的正极。在正极发生还原反应：

$$O_2+4e \rightarrow 2O^{2-} \qquad (2\text{-}25)$$

氧离子进入电解质，由于氧浓度差的原因，氧离子在空穴间不断迁移，到达低浓度侧，释放出两个电子成为氧原子，并与其他氧原子结合成为氧分子。铂电极得到电子而带负电，成为浓差电池的负极。在负极发生氧化反应：

$$2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e \tag{2-26}$$

这样由于氧化锆基片两侧存在氧浓度差，在电极上产生了电荷的积累，从而在两极间建立了电场，在两极板间形成电势（电势又阻挡了氧离子的迁移，电势和迁移达到平衡）。

通常 ZrO_2 正极侧为参比空气，负极侧为待测气体，则氧浓差电势的大小可由能斯特公式计算得出：

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_0}{P_X} \tag{2-27}$$

式中 E——氧浓差电势（V）；

R——理想气体常数，为 8.3145J/(mol·K)；

T——热力学温度（K）；

n——一个氧分子输送的电子个数，$n=4$；

F——法拉第常数，为 96485C/mol；

P_0——参比气体氧气分压（atm）；

P_X——待测气体氧气分压（atm）。

原理见图 2-31。

氧浓差电池传感器的特点：

1）测量氧浓差电势，计算氧气浓度差，根据一侧的参比空气，计算出待测氧气浓度。

2）需要零点和量程两点校准，零点校准需要使用低浓度标准气。

3）通常传感器为管状结构。

（4）氧泵原理

在 ZrO_2 基片两面涂覆多孔铂电极，一侧电极上覆盖有扩散层（具有一定扩散阻尼）的封闭结构，两极间外加一定电压。

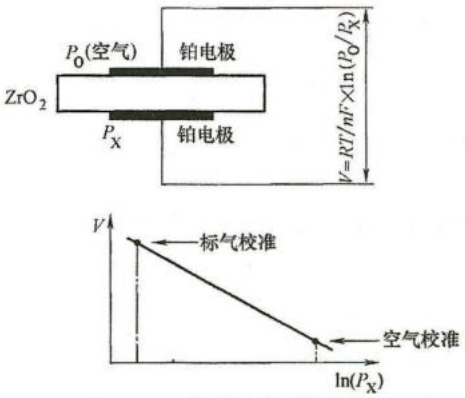


图 2-31 氧浓差电池原理图

在高温下，环境气氛中的氧气将通过扩散孔到达一侧电极，氧原子捕获铂电极（铂电极具有催化作用）两个电子变成氧离子，由于两极间外加一定电压，氧离子在空穴间不断迁移，从基片的阴极侧（连接电压负极）泵向阳极侧（连接电压正极），阴极发生还原反应：

$$O_2 + 4e \rightarrow 2O^{2-} \tag{2-28}$$

阳极发生氧化反应：

$$2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e \tag{2-29}$$

因此，氧气分子从基片一侧不断地流动到另一侧，这种作用称为氧泵原理，氧泵形成的氧离子电流称为氧泵电流。当外加电压逐渐从零增大时，电流最初随电压升高而增大，但由于受扩散阻尼限制的氧分子向阴极扩散速度的影响，扩散层内的氧分子全部被泵出（泵出和扩散达到平衡时），使得电流最终达到饱和，此时的电流称为极限电流，且在一定电压范围内不随外加电压的变化而变，其理论方程为：

$$I = \frac{nFD}{RT} \times \frac{S}{L}(P_X - P_O) \tag{2-30}$$

式中 I——氧泵电流（A）；

R——理想气体常数，为 8.3145J/(mol·K)；

T——热力学温度（K）；

n——一个氧分子输送的电子个数，$n=4$；

F——法拉第常数，为 96485C/mol；

D——扩散系数（m^2/s）；

S——扩散截面积（m^2）；

L——扩散距离（m）；

P_X——扩散层内的氧分压（atm）；

P_O——扩散层外的氧分压（atm）。

原理见图 2-32：

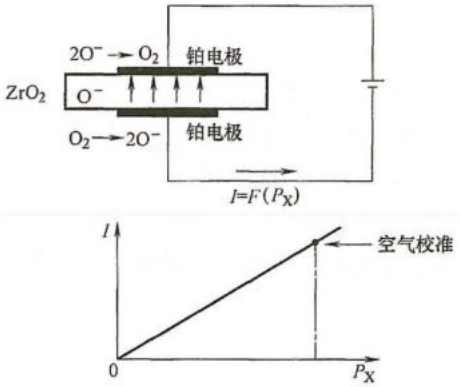


图 2-32　氧泵原理图

氧泵电流传感器特点：

1）通过氧泵电流来测量氧气浓度，电流与氧气浓度成正比，没有氧气就没有电流，因此没有零点漂移。

2）不需要低浓度标气校准，只需要空气一点校准。

3）通常传感器为片状结构，并带有扩散层（具有一定扩散阻尼）。

（5）NO_x/O_2 传感器结构

传感器的结构为双池多层厚膜氧化锆，见图 2-33。

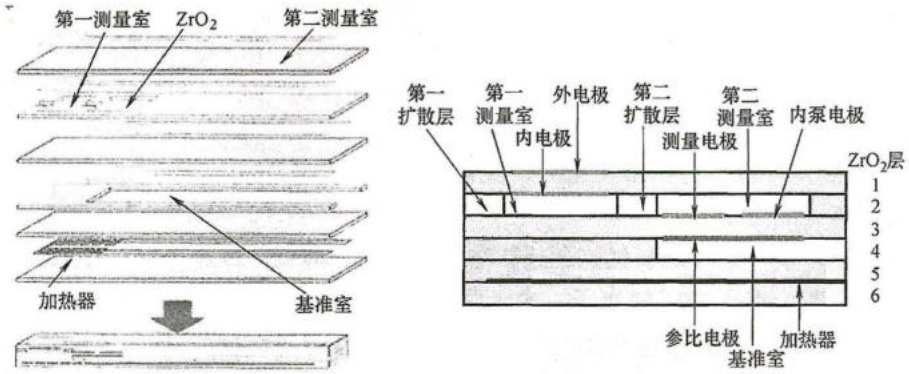


图 2-33　NO_x/O_2 传感器结构图

1）第一扩散层

第一扩散层连接第一测量室和外部被测气体，被测气体通过一定的扩散阻尼引入第一测量室。

2）第一测量室

一个内电极，形成在第一测量室 ZrO_2 层 1 的内表面，一个外电极，形成在 ZrO_2 层 1 的外表面，两电极和 ZrO_2 层 1 组成第一氧泵池。

3）第二扩散层

第二扩散层连接第一和第二测量室，被测气体通过一定的扩散阻尼进入第二测量室。

4）第二测量室

一个测量电极和内泵电极，形成在第二测量池 ZrO_2 层 3 的表面，参考电极形成在 ZrO_2 层 3 的相反表面，内泵电极、参考电极和 ZrO_2 层 3 组成第二氧泵池，测量电极、参

考电极和 ZrO_2 层 3 组成了氧传感池。

5）加热器

将传感器加热至 800℃。

（6）NO_x/O_2 传感器测量原理

1）被测气体通过具有特定扩散阻尼的第一扩散层进入第一测量室。

2）第一测量室内被测气体中的氧气被第一氧泵池抽出，其氧泵电流表示了氧气浓度，通过控制第一氧泵池外加电压，使其残留氧气浓度为 10ppm。同时 CO 被氧化为 CO_2，NO_2 被还原为 2NO，氧化所需的氧气和还原产生的氧气浓度水平为 ppm 级，对被测氧气的百分比浓度水平几乎没有影响。

3）被测气体随后通过具有特定扩散阻尼的第二扩散层进入第二测量室。

4）第二测量室内的氧传感池将残留的 10ppm 完全泵出，使测量室内为无氧状态，促成被测气体中的 NO 被还原，$2NO \rightarrow N_2 + O_2$，同时第二氧泵池不断抽出氧气，其氧泵电流代表了氧气浓度，间接表示了 NO 的浓度，因此可以通过测量氧泵电流来测量 NO。

5）第二测量室内的氧传感池，既有氧泵作用，将残留氧气泵出；又有与外界空气相通的基准室形成的浓差电势，其浓差电势用于控制第一氧泵池的外加电压，保证第一测量室残留氧气为 10ppm。

（7）测量 NO_x/O_2 系统结构

双池厚膜氧化锆法 NO_x/O_2 测量系统见图 2-34。

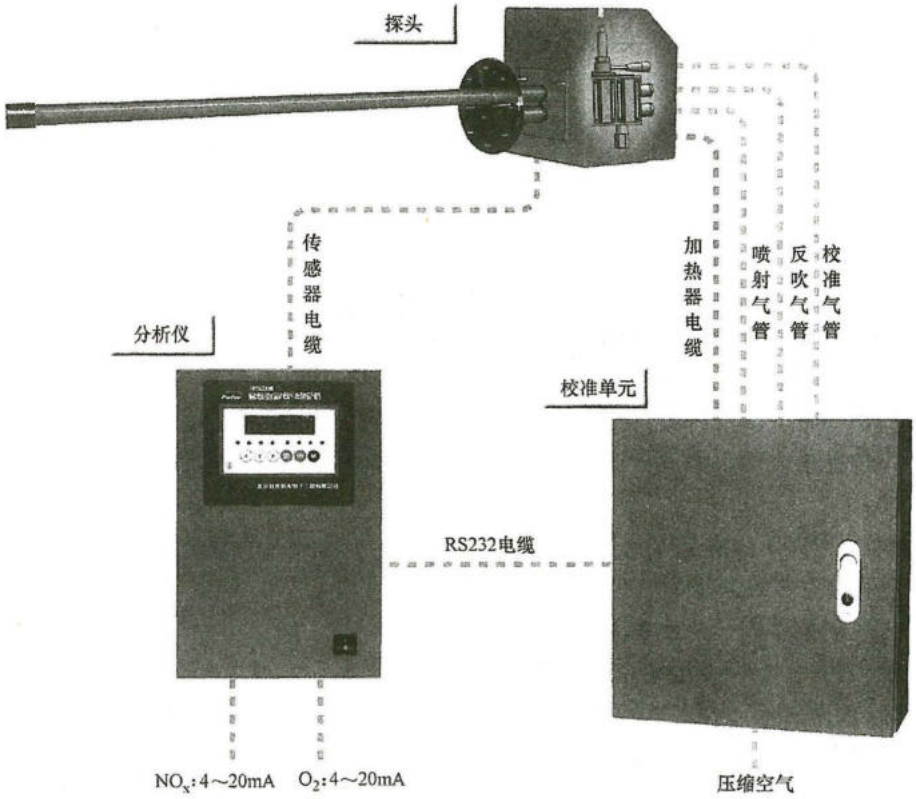


图 2-34 系统结构图

1）用途

① 用于污染物排放监测、脱硝控制和其他工业过程控制。

② 适用于固定污染源：燃煤锅炉、燃气锅炉、燃油锅炉、工业窑炉、金属冶炼炉和垃圾焚烧炉等。适用于移动污染源：汽车、轮船等。

2）特点

① 同时测量 NO_x 和 O_2。

② 直接测量烟气，无需抽气采样，结构简单，可靠性高，响应快速。

③ 经典的氧化锆传感器，配合喷射采样探头，特别适合燃煤锅炉高粉尘、高湿度、高腐蚀性的烟气条件。

3）功能

① 自动/手动校准功能：可以设定自动校准时间、自动校准周期和数据保持时间，也可以一键手动即时校准。

② 自动反吹功能：可以设定自动反吹时间、自动反吹周期和数据保持时间，也可以一键手动即时反吹。

③ 自动刷新功能：可以设定传感器自动刷新功能，包括自动刷新时间、自动刷新周期和数据保持时间。

2.1.4　安装调试要点

2.1.4.1　样品采集和传输

（1）取样探头

1）CEMS 取样点选择要求

烟气排放连续监测系统（CEMS）的取样点选择和安装要求，在国家环保行业标准已有明确规定。颗粒物/气态污染物/烟气参数等各子系统的取样点选择及安装的要求参见《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 的有关规定。

① CEMS 的取样点及安装要求

a. 取样点的选择应符合国家环保标准规定的要求，所选取烟道及取样点应位于气态污染物混合均匀的位置，该处测得的气态污染物浓度或排放速率能代表污染源的排放，在不影响参比方法取样前提下，尽可能靠近参比方法取样孔。

b. 所选择安装的烟道振动幅度尽可能小，测定路径不得有水滴和水雾出现，取样点探头安装应密封无泄漏。

c. CEMS 分析小屋的安装位置应在取样点烟道附近，尽量缩短烟气传输管线的长度。分析小屋应设置永久性电源及仪表空气源，内部环境及公共设施应能保证 CEMS 的正常运行条件要求。

d. 采样或监测平台应易于人员和监测仪器到达，当采样平台设置在离地面高度≥2m 的位置时，应有通往平台的斜梯（或 Z 字梯、旋梯），宽度应≥0.9m；当采样平台设置在离地面高度≥20m 的位置时，应有通往平台的升降梯。

e. 安装 CEMS 应可靠接地，防止强电场及电磁干扰，采取防雷击措施，以保证人身安全和仪器的运行安全。为室外的烟气 CEMS 装置提供掩蔽所，以便在任何天气条件下不影响烟气 CEMS 的运行，能够安全地进行维护。

② CEMS 取样点开孔位置的选择原则

a. 优先选择在垂直管段和烟道负压区域，测定位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。

b. 对于圆形烟道，颗粒物 CEMS 和流速 CMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方

向≥4倍烟道直径，以及距上述部件上游方向≥2倍烟道直径处；气态污染物CEMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向≥2倍烟道直径，以及距上述部件上游方向≥0.5倍烟道直径处。对于矩形烟道，应以当量直径计。

c. 在烟气CEMS监测断面下游应预留参比方法采样孔，采样孔数目及采样平台等按GB/T 16157要求确定。在互不影响测量的前提下，应尽量靠近。

d. 烟气CEMS不宜安装在烟道内烟气流速小于5m/s的位置（说明：测定颗粒物的参比方法是以S型皮托管测定烟气流速实现等速采样的，当流速在5m/s以下时，用S型皮托管测流速比较困难，测定结果准确度差。）

e. 点测量CEMS的测量点位应符合下列条件之一：

（a）颗粒物CEMS的测量点位离烟道壁的距离不小于烟道直径的30%，气态污染物CEMS、氧气CMS以及流速CMS的测量点位置距离烟道壁不小于1m。

（b）中心位于或接近烟道断面的矩心区。

（c）测量线长度大于或等于烟道断面直径或矩形烟道的边长。

2）CEMS电加热保温过滤取样探头

① CEMS的取样探头技术概述

取样式CEMS的样品处理系统，最常用的取样探头是电加热保温过滤取样探头。这主要由于CEMS监测技术应用最多的固定污染源是燃煤锅炉及各种工业窑炉的烟气排放连续监测，而燃煤锅炉及各种工业窑炉的烟气排放大多是负压或微正压，而且含有一定浓度的烟尘和水分。取样探头既要具有初步过滤的功能，又要保持在样品的露点之上，因此采用电加热过滤取样探头是最佳的选择。

例如：在燃煤锅炉烟气脱硫CEMS的样品取样处理系统中，烟气的工况条件一般是处于微正压或负压状态，需要采用抽取式分析，烟气的温度在脱硫前一般是在120～130℃，烟气的水露点在90℃左右，颗粒物含量较低。脱硫设备都是在烟气除尘设备之后，采用电除尘技术除尘后可达到100～200mg/m^3，采用布袋除尘技术可达到20～30mg/m^3。因此，烟气脱硫系统的冷干法抽取式CEMS，都采用电加热保温过滤取样探头，可以保证取样及初步过滤的过程中样品气保持在样品露点之上，不会有水分析出。电加热保温过滤取样探头对热湿法抽取式也同样适用。

由于脱硫与脱硝的样品工况条件不同，特别是脱硝后存在烟气温度高达300～400℃，烟气中的酸露点达到150℃左右，烟气中有微量的氨，易产生铵盐结晶，因此脱硝后的取样探头要采用特殊的设计技术。

另外还有一种采用除尘除湿一体化的取样探头技术，在取样探头处实现了样品气的除尘和除湿，使得样品气的传输及处理过程变得简化。它也是一种冷干法抽取式的样品处理系统，适用于易溶于水的微量样品气的分析。

② 电加热保温过滤取样探头的结构

取样探头将烟道中气体取出，由于烟气中含有大量的粉尘和腐蚀性气体，会导致探头被烟气中的颗粒物堵塞，特别是烟气含湿量高时，水蒸气可能冷凝，与颗粒物结合在一起形成块状物，更易使探头堵塞。为减少堵塞，在探头的一端安装过滤器。对于加热型烟尘过滤器的烟尘堆积，系统可在烟气采样器加装反吹功能。

过滤器装在烟道内探管头部的称为内置过滤器式探头，装在烟道外探管尾部的称为外置式过滤器式探头。内置过滤器式探头只能靠反吹方式进行吹洗，不便于取出清理，置于探管头部，其过滤孔径也不宜太小，以防微尘频繁堵塞。外置加热过滤器取样探头，过滤器装在

烟道外部与法兰连接的圆筒内，加热器被埋装在圆筒筒体内，或绕装在筒体外。目前应用广泛的是外置过滤器式探头，典型结构见图 2-35。

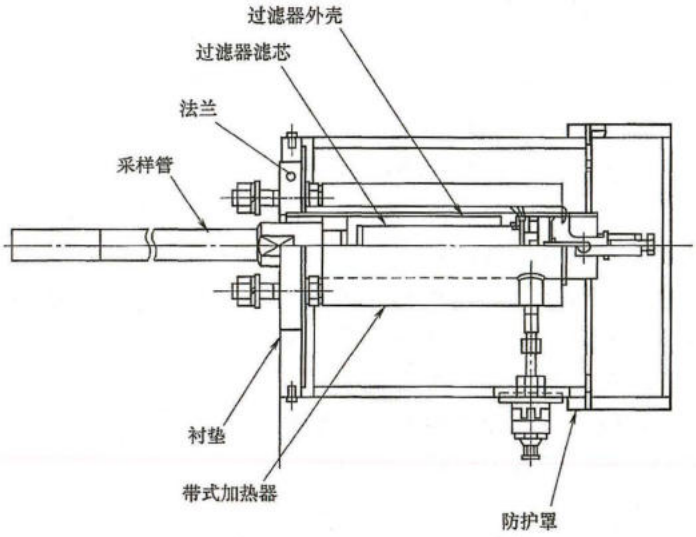


图 2-35　探头结构图

取样探头的过滤器通常采用碳化硅（SiC）、烧结不锈钢、烧结陶瓷、硼硅玻璃纤维等材料制成。无论采用哪类材料制成的过滤器，都应具有过滤精度高、过滤效果好和便于吹扫等特点。碳化硅（SiC）、陶瓷烧结材料制成的过滤器，应用于样品中含有磁性颗粒的环境下，过滤效果较为明显。烧结不锈钢过滤器是将尺寸大小在微米数量级的金属微粒压紧，置于高压和高温下制成。依靠施加的压力，金属微粒熔合并形成多孔性物质。烧结过滤器的精度一般可以达到过滤 3～5μm 粒径的颗粒物，有些系统使用的过滤器能够滤除小于 2μm 的颗粒物，但过滤器越精细，样品因气流阻力大，就越难于通过，这时就需要增大泵的抽吸力。

CEMS 烟气脱硫常用的电加热取样探头的过滤器的加热温度恒温范围一般是 0～180℃，温度控制一般在 150℃，探头过滤器一般采用陶瓷烧结过滤器或不锈钢烧结过滤器，过滤精度一般为 2～3μm。

外置加热过滤器式探头可从探头处校准，标准气从过滤器圆筒顶部引入，顶替烟气而充满过滤器和圆筒之间的环形空间。从探头处校准检查是探头到分析仪的整个系统进行的系统校准（外标法），可及时发现取样、样品处理过程中存在的问题。

国内外生产加热过滤器式取样探头的种类很多，取样探头的内部结构示意图参见图 2-36。

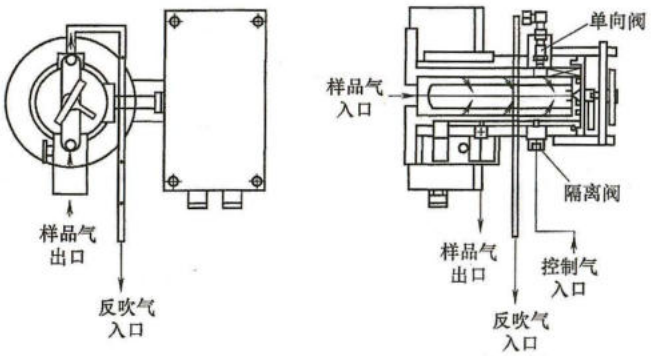


图 2-36　取样探头内部结构示意图

目前，国内系统集成商都自己生产配套加热过滤取样探头，各家公司产品的基本结构大同小异。但由于采用的过滤器技术及探头加热保温的技术差异，取样探头的工程应用效果也有较大差距。质量低劣的探头表现为易堵塞，易腐蚀，可靠性差，需要经常维护、清洗及更换过滤器。

③ 加热过滤取样探头的反吹扫

带反吹的取样探头系统的组成参见图 2-37。

任何一种抽取式加热过滤取样探头都可能存在过滤器堵塞问题。用高压气体对过滤器进行“反吹”可使堵塞风险减至最低，反吹气体一般使用 60～100psi（0.4～0.7MPa）干燥、洁净的仪表空气，反向（与烟气流动方向相反）吹扫过滤器。反吹采取脉冲方式更为有效，使用一个预先加压的储气罐，突然释放的高压气流可以将过滤器孔隙中的颗粒物吹扫出来。脉冲反吹周期按照设定要求反吹清洗过滤器的表面及内部管路。

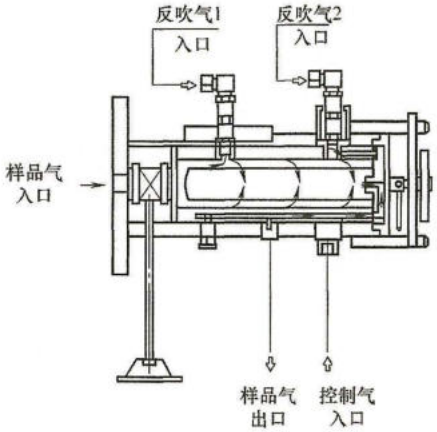


图 2-37 带反吹的取样探头系统的组成框图

带加热反吹系统的取样探头的系统流程图参见图 2-38。

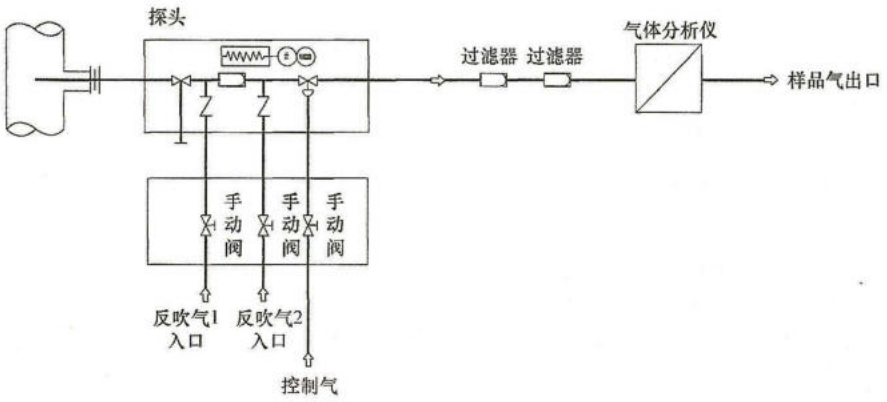


图 2-38 带加热反吹系统的取样探头的系统流程图

探头过滤器的反吹又分为从过滤器的外部反吹，以及从过滤器的内部反吹，目的是将过滤器内外表面附着的烟尘反吹回到烟道内，保持过滤器的畅通和除尘效率。

一般情况下，在含尘量不太大的情况下，探头的反吹时间间隔较长，大多数工厂出厂设置在 2h 反吹一次。如含尘量较大，则可以缩短反吹清洗周期；含尘量较少时，可以延长反吹周期。通过自动控制系统可以对反吹周期按照需要调整。在探头反吹期间，处理系统的抽气泵停止工作，仪器示值采取数据保持技术，保持在反吹前的数值，可以保持数据的连续性。

3）CEMS 脱硝装置的取样探头

烟气脱硝大多采用选择性还原工艺（SCR）脱硝，取样点的工况：样品温度约为 350℃，烟气的粉尘含量约在 20～30g/Nm^3。烟气工况条件属于高温、高粉尘、强腐蚀。

烟气脱硝采样探头的外形图参见图 2-39。烟气脱硝采样探头，探头加热保温的可调温度为 0～320℃，内部采样腔体以及采样探管材质为 316L，配备过滤精度为 2um 的 SS316L

过滤器，探头内部滤芯为陶瓷，并配有脱硝除氨罐和蠕动泵排液。

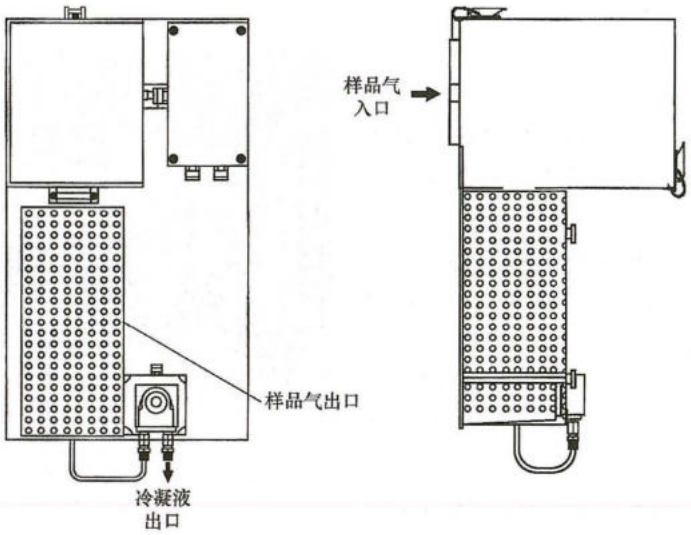


图 2-39　烟气脱硝采样探头的外形

4）带除湿功能的一体化采样探头系统

带除湿功能的一体化采样探头系统是指采样探头具有采样、除尘、除湿功能，除湿是采用渗透干燥管除去烟气中的水分；采样的烟气经过采样探头的除尘、除湿处理后是洁净、干燥的，无需采用加热的管线输送，非常适用于在脱硫后及垃圾焚烧炉的烟气采样处理。

湿法脱硫后的烟气检测具有高湿、低温、低浓度的特点，特别是在湿法脱硫装置脱硫后无 GGH 加热系统的烟气，其含湿量为 12%以上（烟气中可能含有液滴）、烟气温度为 55℃左右，烟气中 SO_2 含量仅在 20～50mg/m^3 范围内；采用加热管线传输及冷凝器除湿过程中，可能会因为 SO_2 被冷凝水吸收而造成较大测量误差。在垃圾焚烧炉的烟气分析中，烟气中的含水分高达 40%左右，被测的 SO_2、HCL、HF、NO_2 等又是可溶于水的气体，采用常规的加热保温传输及冷凝除湿技术有可能因冷凝水的吸收加大测量误差。

采用在取样探头处用渗透干燥管除去烟气中的水分，没有水溶性气体（如 SO_2、HCL、HF、NO_2）等损失问题，干燥后的烟气露点小于－20℃，含水分小于 1000ppm，又不需要采用加热传输管线，完全能满足分析检测的要求。

5）国内外典型的取样探头产品介绍

① ZLZT 型采样探头

ZLZT 取样器的外形参见图 2-40。

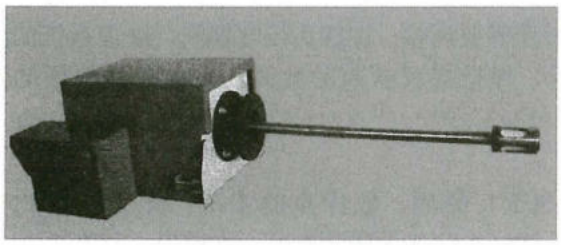


图 2-40　ZLZT 型采样探头

ZLZT 系列化的取样探头，过滤芯有 0.5μm 陶瓷滤芯及 316 不锈钢滤芯，过滤精度达到 0.5μm；探头采用电加热保温，基本型加热温度 150～180℃，脱硝采样器加热温度可达 300℃。

② SP3000-H/EX 系列电加热防爆取样探头

SP3000-H/EX 系列电加热防爆取样探头参见图 2-41，已通过 ATEX、CSA 和 FM 的防爆认证，适用于 0 区、1 区、2 区气体防

爆场所和 20 区、21 区、22 区粉尘防爆场所。可以根据具体需要增加预过滤、吹扫、校准和保护截断等选项。

（2）样品传输管线

1）样品传输基本要求

样品传输的基本要求是：样品在传输过程中保持样品被分析组分不失真，并满足分析系统的要求。

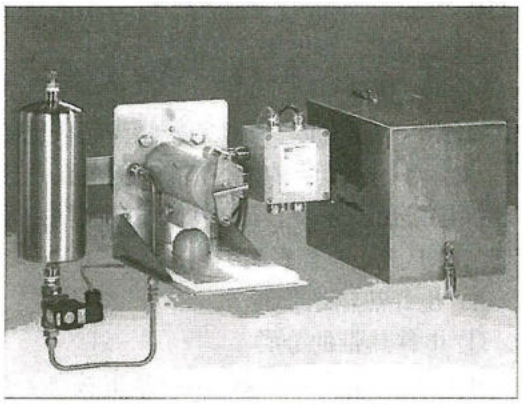


图 2-41 SP3000-H/EX 系列防爆电加热取样探头外形图

① 防止相变。在样品传输过程中，气态样品要保持为气态，冷/干法样品传输管线需要加热保温在烟气露点之上。

② 样品传输管线不得泄漏。以免样品外泄或环境空气侵入，造成分析误差及污染环境。

③ 样品传输管线应尽可能短。也就是要求取样点与分析柜的距离要尽量短，使得传输管线的容积尽可能小，样品流速尽可能快，样品传输的滞后时间一般应小于 30s，最大不宜超过 60s。

④ 对冷/干法 CEMS，样品传输管线的连接应特别注意电加热传输管线与取样探头的连接接头处和与分析柜内的除湿器接头处的加热与保温，防止在这些部位出现因局部温度降低产生冷凝水。

2）样品传输管线的要求

样品传输管线是将样品从取样探头传输到样品处理系统或分析仪的管线。冷/干法 CEMS 采用电加热样品传输管线，将被测烟气传送到分析柜内的样品处理冷凝除湿器入口。样品传输管线的全程要加热保温在烟气露点之上的温度。

在安装过程中，为防止采样伴热管堵塞，从取样探头到分析柜内除湿器入口的样品管线至少要倾斜 5°安装。因为加热时采样管会弯曲，应注意防止采样管出现凹陷，凹陷处可能发生冷凝，也要避免加热管路自身或其他管路纹在一起。施放样品传输管线时不要在地上拖拉，以免绝缘层划破。

保持一段很长的样品管线加热温度相同是困难的，烟气中水分或酸性气体特别容易在管道连接、保温不好的“冷点”处冷凝，将会加大对系统的腐蚀性。细小的颗粒物如果没能在探头充分滤除，与水气结合形成结垢，也可能造成管线堵塞。加热样品管线的金属伴热带被折断或烧断，找出断裂点也是困难的。样品管线还可能被烟气中的冷凝物，以及与之发生化学反应的酸性成分污染，被严重腐蚀而损坏。

加热样品管线的长度不宜超过 76m，从探头到分析柜的样品传输管线应尽量短。应避免管线中间出现松弛下垂，那里会成为冷凝液的收集点。还要防止加热样品管线自身搭接或与其他样品管线接触，以免出现过热点。

这种组合式的管缆，一般由样品管线、反吹管线、标气管线和电伴热带组成，也有仅包括一根样品管线，或样品管线加标气管线。热电偶元件沿管线按一定间隔设置，用于监视加热温度，当温度降低时发出报警信号。这种组合管缆，通常是定制的（按用户要求的规格、长度制作），价格较贵（以每米为单位报出）。

尽管许多材料对腐蚀性气体具有化学抵抗力，但目前大多数系统使用的样品管材是

PFA Teflon（meltable polytetrafluoroethylene，可溶性聚四氟乙烯）和316不锈钢材料。PFA Teflon具有优良的抗腐蚀性能，管壁吸附效应很小，在250℃时比PTFE有更好的机械强度（约2～3倍），且耐应力开裂性能优良，因而使用更为广泛，主要缺点是当温度接近250℃时会变软，即耐温性能较差。

通过提高样品管线温度，以避免冷凝和吸附的能力，有时会导致管线和伴热带的加速老化。此外，一些气体（如CO）能渗透聚合物材料的管壁，特别是在较高温度下其渗透力更强。目前，一种能将挥发性有机化合物的吸附效应降至最低的新技术已经开发出来，这就是玻璃涂层挠性不锈钢Tube管。这种熔融硅和不锈钢的结合物管材，当被加热到350℃时，可使气体从Tube管表面脱附。

3）电伴热输送管线

① 电伴热带的分类

电伴热系统中采用的电伴热带按加热控制方式可分为恒功率型电伴热带（constant wattage heating cable）、限功率型电伴热带（power-limiting heating cable）或称自限型（self-limiting heating cable）、自调控型电伴热带（self-regulating heating cable）和串联型电伴热带（Series heating cable）。

前三种均属于并联型电伴热带，它们是在两条平行的电源母线之间并联电热元件构成的。

样品传输管线的电伴热目前大多选用自调控电伴热带，一般无需配温控器。样品温度较高时（如CEMS系统的高温烟气样品）可采用限功率电伴热带，这种电伴热管缆，如果环境温度降低（例如在冬季降至0℃以下），它将维持在设定的最低操作温度；如果环境温度升高，它将不超过设定的最高操作温度，即将样品管线的温度限制在一个设定的范围之内。

恒功率电伴热带的优势是成本低，缺点是不具有自调温功能，容易出现过热。它主要用于工艺管道和设备的伴热，用于样品管线伴热时，必须配温控系统。

串联型电伴热带是一种由电缆芯线作发热体的伴热带，即在具有一定电阻的芯线上通以电流，芯线就发出热量，发热芯线有单芯和多芯两种，它主要用于长距离管道的伴热。

② 并联式样品传输管线工作原理及技术特点

并联式样品传输管线采用并联式电热带，此种电热带可避免串联式电热带在选用设计上的不便之处。

a. 自调控电伴热带

自调控电伴热带又称功率自调电伴热带，是一种具有正温度特性、可自调控的并联型电伴热带。自调控电伴热带由两条电源母线和在其间并联的导电塑料组成。所谓导电塑料，是在塑料中引入交叉联接的半导体矩阵制成，它是电伴热带中的加热元件。当被伴热物料温度升高时，导电塑料膨胀，电阻增大，输出功率减少；当物料温度降低时，导电塑料收缩，电阻减小，输出功率增加，即在不同的环境温度下会产生不同的热量，具有自行调控温度的功能。它可以任意剪切或加长，使用方便。

这种电伴热带适用于维持温度较低的场合，尤其适用于热损失计算困难的场合。其输出功率（10℃）有10W/m、16W/m、26W/m、33W/m、39W/m等几种，最高维持温度有65℃和121℃两种。所谓最高维持温度，是指电伴热系统能够连续保持被伴热物体的最高温度。

在线分析样品传输管线的电伴热大多数选用自调控电伴热带，无需配温控器，使用时启动电流为正常值的3～5倍，供电回路中的元器件和导线选型应满足启动电流的要求。

b. 恒功率电伴热带

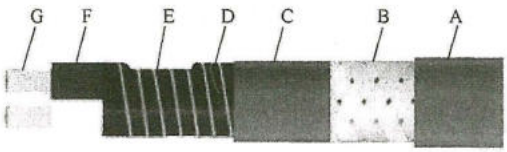
恒功率电伴热带也是一种并联型电伴热带。它有两根铜电源母线，在内绝缘层上缠绕镍镉高阻合金电热丝。将电热丝每隔一定距离（0.3～0.8m）与母线连接，形成并联电阻。母线通电后各并联电阻发热，形成一条连续的加热带，其单位长度输出的功率恒定，可以任意剪切或加长。

恒功率电伴热带是将两根相互平行的镀镍铜绞线包覆于氟化物绝缘层中，作为电源母线，并且在内绝缘层外缠绕铬合金电热丝，每隔一固定距离即将电热丝与导线焊接，形成一连续并联的电阻，当电源铜母线通电后，各并联电阻随之发热，即形成一连续发热的电热带。

恒功率电伴热带单位长度的发热量恒定，使用的电热带越长，输出的总功率越大。该电热带在现场能按实际需要长度任意剪切。此外，富有柔软性，可以方便地紧贴管道表面敷设。电热带外层的编织层不仅起着传热和散热作用，提高电热带的整体强度，同时还能作为安全接地线。恒功率电热带与温控器配合使用时，能较精确地维持管道内的介质温度。

并联式电热带又分为单相供电和三相供电方式。

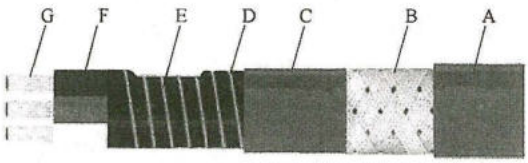
单相恒功率并联电热带的组成参见图 2-42。电源母线为两根平行绝缘铜线，在内绝缘层上缠绕电热丝，并将电热丝每隔一定距离即“发热节长”与母线连接，形成连续并联电阻，母线通电后，各并联电阻发热，形成一条连续的加热带。



A—外护套 FEP（特氟龙）；B—编织网；C—绝缘护套 FEP（特氟龙）；D—骨架层；
E—镍铬合金丝（发热丝）；F—芯线绝缘层 FEP；G—芯线（镀锡铜线）

图 2-42 单相并联式电伴热带的组成

三相并联式电伴热带是在单相并联电热带基础上发展的，其组成参见图 2-43。它采用 A，B，C 三根铜线作电源导线，外包电绝缘层，发热电阻丝均匀缠绕于三根电源导线绝缘层外。每隔一定间距将电阻丝与电源导线连接，形成发热电阻回路。发热电阻连接在整个电热带的长度上，分别依次为 AB 发热电阻，BC 发热电阻，CA 发热电阻，反复循环，形成一个连续的发热体。此种结构保持了电热带能任意切割，而每米发热量恒定。



A—外护套 FEP（特氟龙）；B—镀锡合金编织网；C—绝缘护套 FEP（特氟龙）；
D—骨架层；E—镍铬合金丝（发热丝）；F—芯线绝缘层 FEP；G—芯线（镀锡铜绞线）

图 2-43 三相并联式电伴热带的组成

c. 限功率电伴热带

限功率电伴热带也是一种并联型电伴热带，其结构与恒功率电伴热带相同，不同之处是它采用电阻合金加热丝，这种电热元件具有正温度系数特性，当被伴热物料温度升高时，可

以减少伴热带的功率输出。同自调控电伴热带相比，其调控范围较小，主要作用是将输出功率限制在一定范围之外，以防过热。

这种电伴热带适用于维持温度较高的场合，其输出功率（10℃时）有16W/m、33W/m、49W/m、66W/m等几种，最高维持温度有149℃和204℃两种。主要用于CEMS系统的取样管线，对高温烟气样品伴热保温，以防烟气中的水分在传输过程中冷凝析出。

③ 串联式样品传输管线工作原理及技术特点

串联式样品传输管线是一种由芯线做发热体的电伴热产品，即在具有一定电阻的芯线上通过电流，芯线就发出焦耳热，由于芯线单位长度的电阻和通过的电流，在整个长度上是相等的，不会如并联型电热带随着使用长度的增加造成尾端功率降低，特点是使用长度长，输出功率恒定，单位长度中发热量处处相等，适用于长距离管线的伴热保温，需定制，现场不可任意剪切。但此种电热带是依其长度的长短而改变其输电功率的。现场施工配管的实际长度往往与配管设计长度不同，因此在电热带敷设前，必须确实地对此电热带的输电功率与现场配管的实际长度认真核实。这是选择此种电热带的不便之处。

串联式电热带如一般的两条发热的电阻丝一样，在每条电阻线上包有两层聚四氟乙烯树脂（teflon-resin）绝缘材料，也可在其外围加不锈钢补强网。此种电热带绝缘性佳，且富有耐药品性及耐腐蚀性，本身重量轻，易于施工。

串联电伴热带在整个长度上是相等的，各处的发热量也就是相等的，不会如并联型电加热随着使用长度的增加造成尾端功率低，因此，它主要适用于长距离管线的伴热保温，用一个电源点供电。缺点是因为某一点的损坏导致整个电伴热系统无法正常工作。

④ 电伴热管缆

电伴热管缆（electric trace tubling）是一种将样品传输管、电伴热带、保温层和护套层装配在一起的组合管缆。电伴热管缆内的管道可以是单管、双管以及三根管道。单管是指仅有样品传输管，双管增加标准气管道，三根管道则可能增加探头反吹压缩空气管道。

电伴热管缆的功率设计是按照伴热温度要求进行设计，并选择相应的电伴热带及保温或恒温控制要求。电伴热管缆，省却了现场包覆保温施工的麻烦，防水、防潮、耐腐蚀性能均较好，可靠耐用。电伴热管缆，可根据厂家提供的选型样本选择，有时也需要通过计算加以核准和确认。

对电加热管线的性能检验可参照如下技术要求：

加热性能：加热管线接入温控单元通电，通电时间≤60min，加热管线应达到设定温度。分别测量加热管线首尾1.5m处温度，与设定温度差≤10%。测量加热管线表面温度，温度≤55℃。采用PT100测量。

气管性能：管路无堵塞，单根管路无泄漏。检测：在管线断电冷却后，一端通入0.4MPa的压缩空气，另一端有大量气体流出。封堵加热管线尾端，通入0.4MPa的压缩空气，记录压力表的示值是否有漂移。

2.1.4.2 预处理设备

（1）概述

完全抽取式气态污染物CEMS是直接抽取烟道中的烟气进行分析的系统，由于各种气体分析仪对样品气的洁净程度要求较高，所以采用完全抽取法对烟道气进行连续监测，必须配有一整套的样品处理系统，以满足气体分析仪的监测需求，对样品气的处理在系统中占了很大比重。

（2）完全抽取式 CEMS 样品处理系统的技术分析

完全抽取式气态污染物 CEMS（以下简称抽取式 CEMS）主要包括：冷干法抽取式 CEMS 和热湿法抽取式 CEMS，这两种抽取式 CEMS 样品处理系统的技术组成及特点分析如下：

冷干法抽取式 CEMS 的取样处理系统的技术特点，是样品经过取样处理后，保持在洁净、干燥接近常温的状态，被称为冷干法。冷干法分析系统属于“干基分析”，符合国家环保标准的规定，不需要从湿基状态转换。因此，冷干法抽取式 CEMS 是我国烟气排放 CEMS 的主流技术。

冷干法抽取式 CEMS 的取样处理系统主要包括：加热过滤取样探头、样品加热传输管线、样品除尘、除湿、取样泵以及压力、流量调节等基本功能部件。冷干法的取样处理系统中，最重要的是通过过滤除尘、冷凝除湿技术，使得被测量的样品能满足在线分析仪对样品分析的基本要求，即样品气要求洁净、干燥。样品除尘的一般要求：颗粒物小于 0.3μm，除湿的一般要求是样品气露点应达到 5℃左右，就可以满足常用在线分析仪的要求。

热湿法抽取式 CEMS 的样品处理系统的技术特点，是样品从取样处理到分析全过程，样品气都保持在样品原有的热湿状态，被称为热湿法。热湿法分析系统属于“湿基分析”。热湿法抽取式 CEMS 适用于有易溶于水的微量气体分析。

热湿法抽取式 CEMS 样品处理系统的取样探头及样品传输管线，与冷干法一样都必须采取加热保温在样品气的水露点之上。与冷干法样品处理系统的不同之处，是样品不需要除湿；但是，样品除尘、样品取样泵、样品压力调节以及在线分析仪的传感器或测量气室必须保持在高温的热湿状态，所采用的样品处理部件必须是耐高温的，如高温取样泵、高温除尘器、耐高温的调节阀、流量计等。由于要采用耐高温部件及高温在线分析仪，在必要时，如垃圾焚烧炉烟气 CEMS 等，一般选用热湿法抽取式 CEMS 技术方案。

完全抽取式 CEMS 的样品处理系统技术，是以冷干法抽取式 CEMS 的样品处理系统为主体进行的。热湿法与冷干法的抽取式 CEMS，取样及传输系统技术是相同的，热湿法除了不需要除湿技术外，其他除尘、取样泵、压力调节等主要部件需要采用耐高温部件。

（3）抽取式 CEMS 样品处理系统的基本要求与技术组成

抽取式 CEMS 的样品处理系统（以下简称样品处理系统）是指将一台或多台在线分析仪与一个或多个污染源排放点以及公用设施连接起来的系统，应满足在线分析仪在经济、合理、适度的维护周期内的正常工作。

样品处理系统要适应不同的污染源在线分析所提出的不同要求，通过优化技术解决方案，确保分析仪在最短滞后时间和最佳状态（温度、压力、清洁度、流速）内，获得代表性的分析样品，样品处理系统必须确保在线分析仪对样品气的分析条件要求。

CEMS 的在线分析仪对样品提出的基本要求是样品气要清洁、干燥和不失真，应达到或接近瓶装标准气的要求，一般分析仪要求样品气：颗粒物应＜0.3μm（10μg/m^3），样品气露点应＜5℃。样品气进入分析仪的温度、压力、流量应在分析仪的规定工作范围内。样品处理系统应去除样品中的干扰组分、腐蚀性等物质，满足在线分析仪的正常工作要求。

样品处理系统技术组成，通常是由取样、传输、除尘、除湿、除干扰物、压力及流量调节、系统流路、系统控制及公用工程等多元素有机集成的技术体系。

样品取样处理系统基本组成的技术体系框图参见图 2-44。主要包括取样部件（取样及传输）、样品处理部件、系统流路、系统控制，PLC 控制以及附属装置等主要部件。

样品处理系统是以样品进入分析柜或分析小屋前为分界点，样品从取样点到分析柜前的

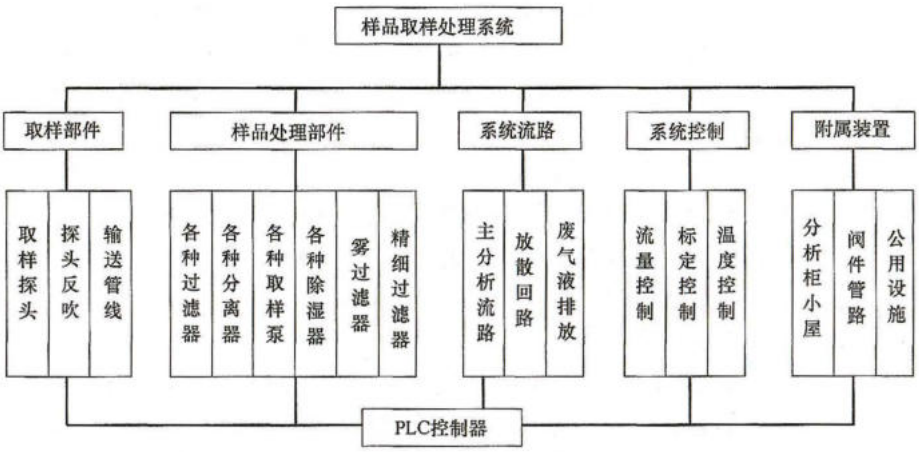


图 2-44　样品处理系统基本组成的技术体系框图

组成部分属于取样系统部分，大致包括取样探头、样品前处理以及样品传输等；样品进入分析柜或分析小屋到分析仪前的组成部分属于样品处理系统部分，主要包括除尘、除湿、压力与流量调节等，也包括废气、废液排放。

取样系统部分是将样品从工艺管线采集并送到分析柜，根据不同的工艺要求，有的需要在样品取样点对样品进行初步的前处理，例如：在取样点处设置对样品的减压、降温以及对样品的初步除尘过滤、探头加热保温和反吹防堵塞等功能。习惯上，将在取样点对样品进行的初步处理被称为样品前处理。样品取样前处理主要用于减轻样品主要处理部分的负担和使样品适宜于传输。通常在取样探头处设置前处理工作站或前处理柜，用于完成前处理功能。

样品处理系统部分的主要功能部件一般是与分析仪集成在分析柜或分析小屋内。样品进入分析柜或分析小屋的处理，包括：除尘过滤、精细过滤、冷凝除湿干燥、去除有害物质、取样泵（需要时）、压力及流量调节等，是为了向分析仪提供符合要求的样品。将分析仪前的样品处理称为预处理，分析仪后的样品处理称为后处理，后处理也称为样品处理。

样品处理系统部分也包括系统流路切换与系统控制部分。系统流路切换主要指系统内部的分析回路、标定回路、快速放散回路的切换。系统控制包括系统流程及工作状态的自动控制以及样品压力、温度、水分、流量等报警控制和安全泄压等功能。

另外，样品处理系统技术，除样品取样、处理两大部分外，也将在线分析安全、防护等附属部分，如：公用工程设施等纳入样品处理系统技术体系。

（4）样品处理系统的基本功能要求

样品处理系统的基本功能组成一般包括：样品提取、样品传输、样品处理、样品排放（废气、废液流统称废流）等。其中样品处理功能是指：除尘、除湿、泵及压力流量调节等。不是所有的样品处理系统都需要按照上述基本功能配置，要按照实际需要进行系统设计。

1）样品提取

从污染排放源的样品取样点提取所需样品流的功能称为样品提取，又称取样，或采样。

样品取样点位置的选择，应参照国家有关标准、技术规范的规定，以及工艺流程设计要求选定。所提取样品流，应具有代表性，能真实地体现源流体被分析对象的组成及性质。

应根据被测样品流的工艺参数、环境条件等，设计取样探头的功能。取样探头用于提取含有各种化学组分的过程源流体，是在不改变源流体的化学组分的情况下，完成对样品流的分离取样。有的取样探头在取样时，可实现初步的物理分离（惰性分离）功能。

流程工艺的样品大多含有水分及颗粒物等，被测样品中可能含有易溶于水的组分，样品中水分的析出，会造成对这些气体的吸收与化学反应，不仅会产生腐蚀性物质，还会影响分析准确性。因此，这类取样过程应采取加热保温，以保证样品温度在其露点之上，样品在全过程中不会产生气态水的凝结和探头堵塞。

2）样品传输

将样品流从取样点送到在线分析仪的功能称为样品传输。样品传输，习惯上是指从取样探头出口端，到分析柜的入口端或冷却除湿器的入口端。根据样品流特性，应采取对传输管线采用电伴热或蒸汽伴热以及温度控制措施。

样品传输的一般要求主要有：

① 传输滞后时间一般在20～30s，不得超过60s。要求分析仪至取样点的距离应尽可能短，样品取样传输系统的容积要尽可能小，样品流速尽可能快，以0.5～3.0m/s为宜。

② 在分析仪许可通过的流量下，如果滞后时间超过60s，应采用快速回路系统。

③ 传输管线从探头到分析仪的布管应尽量少弯曲，弯头和转角应尽量减少，死体积尽可能小。

④ 对含有冷凝液的气体样品，传输管线应保持一定坡度（>5°）向下倾斜，最低点靠近分析仪，并设有冷凝液收集罐。

⑤ 防止相变，在传输过程中，气体样品应完全保持气态，液体样品完全保持为液态。

⑥ 样品管线避免通过极端的温度变化区，它会引起样品条件无控制的变化。

⑦ 样品传输系统不得有泄漏，以免样品外泄或环境空气侵入。

3）样品处理

样品处理是将样品流除去或改变那些障碍组分和干扰组分。样品处理系统只改变样品流的物理和/或化学特性，而不改变其组分（除非这种改变是按照预知的方式进行），使之符合在线分析仪的控制要求。

样品处理系统的各功能部件以及由各种阀件、管件等组成的样品流路切换及压力流量调节系统，必须按照样品处理系统的流程图配置。

样品处理的基本功能是除尘、除湿，取样泵（按需要）及压力与流量调节。应根据样品流的工艺组分条件确定样品处理方案。对样品中高含尘及高含水的样品处理应采取多级处理方案。对样品流中特殊的障碍组分、干扰组分，如：样品中含有易溶于水或相互影响的组分、干扰组分的处理也要特别注意。

4）样品排放

样品排放系统是将在线分析仪出口端或样品处理系统某一点与排放点连接起来的系统。样品排放包括分析仪的废气排放，及旁通流（快速放散回路样品流）和样品处理过程的废液排放。应注意满足在线分析仪出口的废气对出口端的排放要求。

样品排放的功能要求是保持样品的废气、废液排放畅通及排放口的压力要稳定，不受外界环境的影响。

样品废气、废液的排放点可以是对大气排放的点、过程管路或容器的入口端、外部排放系统处理系统的入口端。分析系统排放的废气、废液会集中到排放总管，然后排放到大气环境中，称为集管排放。当在线分析仪对废气排放点的压力波动有要求时，应采取必要的措施，保证排放点的压力波动不影响仪器的分析结果。

有毒、有害、易燃、易爆的废气排放要特别注意安全排放，必要时要进行环保及安全处理后再排放。有回收利用价值的样品废气要返回到流程管道中，需要采取特别的措施，如回

流取样技术。

废液排放如：烟气经气溶胶过滤器去除的液滴及冷凝除湿器等排出的废液，要通过废液排放总管及时排到分析小屋的外部。特别寒冷地区的废液排放管路应采取保温措施，防止废液结冰堵塞排放管路。

排放样品回收也可使用机械方法使低压产品返回流程，低压产品可从旁路样品流和/或分析仪器出口的气流得到。典型样品回收是带有泵的容器，由容器的液位开关控制泵的启动。

5）样品处理系统的其他功能要求

① 分析系统内部的流路切换、控制

分析系统内部的流路切换、控制属于系统流程设计范围，按照分析流程的程序设计，通过自动或手动控制取样泵、各种电磁阀、切换阀、调节阀、流量计等，由 PLC 或其他控制系统实现流路切换自动控制功能。分析系统的内部流路包括：分析回路、标定回路、快速回路等。

分析回路是在样品除尘、除湿处理后，将样品送给一台或多台分析仪分析的样品流路。样品流路可以按照分析要求采取并行分析或串联分析回路设计。

标定回路是对在线分析仪进行标定的回路。采用标准气或其他标准物质通过切换阀，按照分析程序要求对分析仪进行自动或手动标定，称为“内标法”。

CEMS 要求从取样探头处通入标准气进行系统标定，标准气通过样品传输管缆，送到取样探头，再通过样品处理流程进入分析仪，称为“外标法”。

快速回路是指为加快样品流动以缩短样品传输滞后时间的管路，包括返回到工艺装置的快速循环回路和通往样品排放点的快速旁通回路。

② 公用设施的提供

系统公用设施的功能是为样品处理系统及分析仪等提供必要的工作条件，确保在线分析系统能适应被测流程工艺组分的检测要求及其工作环境的要求，满足系统的安全检测和安装环境的适应性。

系统的公用设施一般包括：供电、供气（包括压缩空气、标准气等辅助气体以及需要时提供加热蒸汽等）、供水（需要时供给冷却水等），并提供分析系统的安全及防护功能。

系统安全防护功能一般是将分析仪、样品处理以及系统供电、控制各部件集成在一个分析柜内或分析小屋内，并采取必要措施满足在线分析仪的工作条件要求。

③ 样品处理系统的性能监控

主要包括两个功能：

a. 按照分析流程的要求对样品处理系统设定的程序进行自动控制功能，包括流路切换、自动反吹、自动标定等。

b. 报警功能，对样品处理系统及分析仪的工作状态是否正常，通过采集的温度、压力、水分、流量等报警信号，判别系统是否工作正常。如出现异常状态，除报警外，同时采取必要的控制措施以保证系统部件不致损坏，系统运行不受影响。

④ 自动控制功能

CEMS 的样品处理系统监控大多通过 PLC 实现自动控制和信号采集、报警。PLC 具有对开关量及模拟量信号采集控制功能，通过设定程序自动控制分析流路的正常工作状态及故障报警等。PLC 控制各种电磁阀、切换阀、取样泵的工作，采集各种报警器的信号，实施对系统流路切换、系统反吹控制、系统自动标定等。例如：取样泵的进口压力检测，当探头

及系统管路堵塞，造成抽气负压超过取样泵负荷时，取样泵自动停止工作，保护取样泵不致因超负荷工作而损坏，同时也是管路或探头可能堵塞的报警，需要检查处理。

PLC不仅用于样品处理系统的监控，也包括对分析仪的监控及其信号的采集传输。PLC涉及对整个分析系统的监控，并与数据采集处理传输系统实现通信与控制。

(5) 样品处理系统的主要技术性能

1) 样品处理系统的共性技术指标

① 系统的滞后时间

样品处理系统的滞后时间是指样品从取样点传送到在线分析仪所经过的时间，又称样品传送滞后时间，即样品从取样点取出到得出分析结果的这段时间。

样品传送滞后时间＋分析仪的响应时间＝分析系统分析滞后时间

② 系统的渗透率（也称泄漏率、气密性）

在规定工作压力范围内，单位时间渗入（如大气）或漏出样品处理系统的流体量，表示样品处理系统的密封性能。

③ 系统可能引起的综合误差

样品处理后的样品流分析值和取样点被测组分分析值之间可能存在的浓度之差，称为系统综合误差。系统综合误差可能是由于系统内存在的吸附、稀释、渗透或样品流中被测组分的相互作用所引起的。

系统综合误差是考察样品经过取样处理后，是否存在失真及失真的程度。

系统综合误差的试验方法是：在规定条件下校准在线分析仪，在取样点处引入与源流体相似且被测组分浓度已知的试验流体，记录在线分析仪的示值，综合误差就是仪器的示值与已知浓度之差，用量程的百分比表示。

④ 系统安全指标

样品处理系统由各部件按照系统流程设计要求配置，系统部件包括各种电动控制部件、PLC控制系统以及系统的供电等。安全指标主要指对系统的电气绝缘及耐压等强制性安全指标，也包括：系统的接地、防静电、防雷击及抗电磁干扰等安全功能特性。

2) 样品处理系统的特有误差

样品取样处理的特有误差是指在样品处理过程中，样品的组成或含量可能会发生变化，这些变化会影响到测量结果，该影响可以通过计算、补偿或适当的校准得到修正或降低。

① 体积效应（富集效应）误差

体积效应又称富集效应，是指由于样品流在样品处理时被除去一些组分，导致样品流被测组分浓度升高的效应。例如：冷干法CEMS，样品处理系统的除湿功能是从含水分的烟气中除去水分。脱硫后净烟气的含水量达到15%～20%，垃圾焚烧炉电厂的烟气含水量甚至达到40%以上，系统除湿后，原有烟气中各组分的体积分量会发生变化。样品中气态水的体积分量去除后，会导致烟气中其他被测组分的浓度升高，从而带来系统分析误差。

在线分析仪测得的被测组分浓度，与在取样点处被测组分的浓度之间的误差，称为体积误差（又称富集误差）。体积误差通常可以通过计算修正，例如：冷干法CEMS除湿后带来的体积误差，受系统除湿的效率影响，除湿效果是定值，则为系统的固有误差，可以通过分析系统的计算或在线标定消除。

② 转换器效率误差

转换器是指改变流体中的一个或多个组分的化学成分的装置。转换器可以将样品中的障碍组分或干扰组分转换成不相干组分，或将待测组分转化为可测量组分。

由转换器产生的实际摩尔浓度与被转换的理想最大摩尔浓度之比被称为转换器效率。

例如：氮氧化物转化炉，将样品中的二氧化氮转化为一氧化氮检测，其转换效率的高低将影响测量结果，带来转换误差。通常转换器的转换效率在95%左右，并受到转换炉温度、催化剂的效率等因素影响，特别是催化剂接近失效时会产生明显的误差影响，因此在使用中要监测转换器的效率及其影响，但这又是十分困难的。

转换器误差受转换器效率的影响，如转换器效率是定值，则为系统的固有误差，可以通过分析系统的校正消除。

③ 其他误差

样品取样处理系统的特有误差还包括：吸收或吸附误差以及稀释法探头产生的样品稀释误差。例如烟气二氧化硫在样品冷凝除湿过程中，由于样品气与冷凝水的接触产生的吸收带来的误差。样品气在传输管道及其他部件中可能产生的管道吸附带来误差等。

（6）样品除尘技术及除尘过滤器

1）样品除尘要求

样品除尘主要指除去样品中的颗粒物，包括结晶物等。烟尘及粉尘统称为颗粒物，样品中含的颗粒物，习惯上也称为含尘量。颗粒物的粒度在100～10μm的称为粉尘，10～1μm的称为超细粉尘，小于1μm的称为特细粉尘。

工艺样品流体送入分析仪之前，需要对样品流进行过滤除尘，以除去样品流体中的残留颗粒物及冷却结晶物，满足分析仪对样品的洁净要求。分析仪对样品除尘的基本要求是小于0.3μm，部分精密分析仪对样品除尘的要求小于0.1μm。

样品流体中的颗粒物主要来自工艺过程的样品中残留的颗粒物，如烟气中的烟尘是不完全燃烧的产物，也可能来自于工艺催化剂、过程反应的副产品等，还有在工艺输送过程中由于温度变化而产生的冷凝物。

由于应用不同，样品流体中的颗粒物及冷凝物的过滤程度和质量区别较大，测量样品流体的pH值及流通电导率时，只需要将样品流体中的较大颗粒物除去即可。采用气相色谱仪、质谱仪，以及其他气体分析仪进行分析时，需要将样品流中的微小固态颗粒物除去，还要求气体样品必须干燥。

通常过滤除尘器的滤芯材料主要有不锈钢丝网、不锈钢粉末烧结、碳化硅及陶瓷粉末烧结、光学玻璃纤维或聚丙烯纤维材料等。

过滤除尘器按照滤芯结构形式，可大致分为单面过滤器、筒式深度过滤器。

按照过滤精度不同分为粗过滤器、细过滤器及精细过滤器。通常以100μm为界限，过滤孔径≥100μm的称为粗过滤器，<100μm的称为细过滤器，<0.5μm的称为精细过滤器。

过滤除尘器的特性通常用过滤精度及过滤范围表示，如：过滤精度为5μm，表示过滤器的平均孔径为5μm；过滤范围2～5μm，则表明5μm或大于5μm的颗粒将被阻止，而小于2μm的颗粒将可以通过过滤器。

采用滤网类滤芯的过滤器，则根据其网格大小进一步分类，网格是按每线性英寸的网眼数或金属网数来计算的。网格越细则过滤的颗粒物越小，过滤的精度越高。

另外过滤器的特性还包括对过滤精度的有效滤除率，即对某级别的颗粒物（如2μm颗粒物）所滤除的能力（如对2μm颗粒物可滤除99%）以及样品通过过滤器后的压降即气流阻力，相当于气阻，压降小表示透气率高、气阻小。

2）样品除尘技术

样品除尘技术是指采用各种物理方法除去样品中的颗粒物。

① 表面过滤器

表面粗过滤器又称单面过滤器，其滤芯大多采用金属滤网滤芯，如不锈钢系网，采用单芯或叠片型。叠片型是由一系列被已知厚度的金属隔片隔开的网格状滤片构成。此类叠片过滤器是按照网格的大小过滤颗粒物。

单面过滤器也有采用金属或陶瓷烧结的薄片型过滤芯，烧结的空隙大小决定过滤颗粒物的精度。单面过滤器的滤芯也有采用化学纤维材质或纸质的薄膜滤芯。

最常见的表面粗过滤器是单面金属滤网型，在应用现场可以吹洗和清洁，金属滤网可以做成折叠状，为大容量的样品流体提供非常大的过滤面积。表面过滤器大致分为以下几种：

a. 直通型表面过滤器

直通型表面过滤器用于在线粗过滤器，过滤器滤芯采用单面金属滤网型及金属或陶瓷烧结的薄片型过滤芯，适合于对颗粒物的粗过滤，包括聚集在滤芯入口表面的坚硬、难溶固体颗粒物。此种类型的过滤器芯在表面颗粒物堆积影响到正常过滤时，可拆下清洗后再用。

b. 自清扫表面过滤器（旁通型）

直通型表面过滤器的结构增加一个旁路，即一部分气流通过过滤器芯，另一部分气流不通过滤芯，而由旁路排出。自清扫过滤器采用旁通气流对聚集在滤芯表面上的颗粒物进行连续吹洗，滤芯表面的颗粒物随旁路气流带出过滤器。控制旁路气流的流动方式，要将旁路气流形成适当的湍流，以增强自清洗的效果。自清扫过滤器只有在样品压力较高的正压下，旁路流量较大时，才会有较好的自清洗效果。

c. 膜式过滤器

单面过滤器的滤芯采用滤膜进行过滤的，称为膜式过滤器。滤芯采用化学纤维制成的微孔塑料滤膜或采用化学定量过滤用的滤纸。滤膜的过滤精度很高，可以达到 0.1～0.5μm。因此，膜式过滤器主要用于样品进入分析仪前的精细过滤，过滤范围限制在 0.3μm 以下。

膜式过滤器的滤膜属于一次性用品，在滤膜表面充满了颗粒物或其他污染物或样品流量达不到要求时，需要维护更换，通常这类滤芯无法进行清洗。

② 深度过滤器

深度过滤器的滤芯通常采用圆筒状设计，也称为筒式过滤器。它不同于单面过滤器的滤芯，圆筒状的滤芯设计有较大的厚度，不仅在表面有过滤孔隙，在圆筒厚度内部也有过滤孔隙。样品从圆筒的表面需要经过一定的深度（厚度）过滤，即样品中颗粒物大于滤芯孔隙孔径的，要被滤芯表面及其滤芯厚度内部的孔隙深度过滤，只有小于孔隙的样品及颗粒物才能流出。深度过滤器的过滤效率大大高于单面过滤器的表面过滤。这种过滤器在吹扫清洗时，不仅要对滤芯表面吹扫，还要对滤芯内部吹扫清洗。

不同结构形式的筒式过滤器，参见图 2-45。

筒式深度过滤器的外壳常采用不锈钢材质或其他透明材料制成（塑料、硅硼酸耐热玻璃、玻璃）。筒式过滤器的结构设计使滤芯更换简便。

筒式过滤器的滤芯采用陶瓷粉末烧结（石英粉末、刚玉粉末等）、金属粉末烧结、不锈钢纤维、光学玻璃纤维或聚丙烯纤维材料等不同材料的滤芯。在烧结金属和陶瓷材料制成的滤芯中，由于烧结时所使用的金属微粒或陶瓷微粒的规格

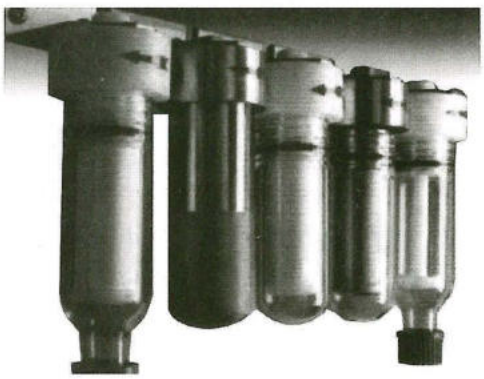


图 2-45 各种筒式过滤除尘器

和形态影响，在烧结时因为材料微粒的间隙使得滤芯形成了轮廓分明的筛孔型不间断网格，滤芯的孔径和分布受制造方法的严格限制。孔径因为所通过的微粒大小不同，而形成 0.5～100μm 的多种规格。

过滤除尘器滤芯的选择应根据样品流体的非测量成分及工况环境确定。如样品流体中含有磁性的铁粉类固体颗粒，就不适用金属粉末烧结类滤芯，磁性的固态颗粒附着在金属粉末滤芯上，常规的吹扫方式根本无法将其从滤芯上清除。陶瓷粉末烧结的滤芯应用范围更广泛。

筒式过滤除尘器也可以设计成有旁路结构或无旁路结构，分为直通式和旁通式两种，旁通式也具有自清洗功能。筒式过滤器的过滤孔径分布较宽，过滤孔径在 0.5～100μm 范围。

③ 气溶胶过滤器

气溶胶过滤器是一种聚集过滤器，采用筒形过滤元件，样品先进入过滤器内部，样品中悬浮粒子在通过过滤元件时被拦截，聚结成大的液滴，在液滴的重力作用下滴落到过滤器的底部，通过排液装置排出。

气溶胶过滤器不仅是一种颗粒物过滤器，也是一种样品中液态水雾的除湿器。

所谓气溶胶（aerosol）是指气体中的悬浮液体微粒，如烟雾、油雾、水雾等，其粒径小于 1μm，采用一般的过滤方法很难将其滤除。

气溶胶过滤器不仅能去除液态的悬浮液体微粒，也同时能除去微细的颗粒物。气溶胶过滤器通常安装在除湿器之前作为对样品中液态的液滴预过滤，也兼作对样品颗粒物的二级过滤：细过滤。气溶胶过滤器只能除液态水，不能除气态水。

CLF 系列气溶胶过滤器的结构，参见图 2-46。

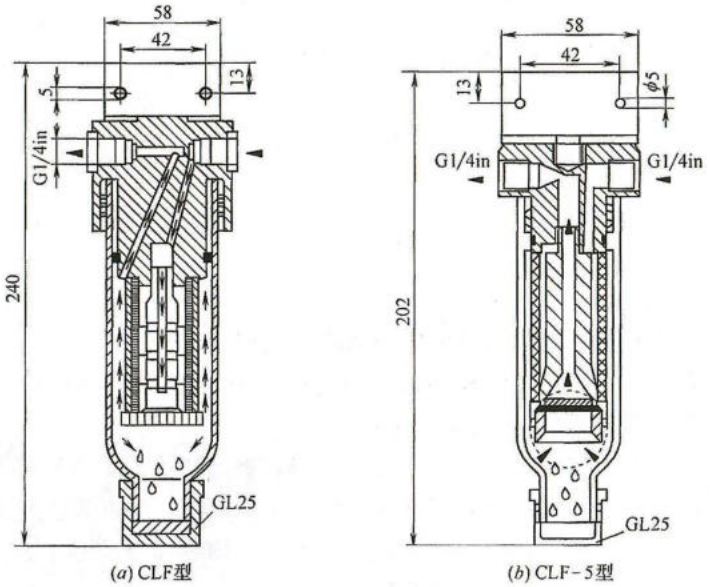


图 2-46　CLF 系列气溶胶过滤器

该过滤器适用于气体样品中各种类型气溶胶的过滤。气溶胶过滤器最有效的安装位置是在样品处理系统的下游，分析仪入口的流量计之前。样品在过滤器内的流动路径如图中箭头所示，过滤元件是两层压紧的超细纤维滤层，气样中的微小悬浮粒子在通过过滤元件时被拦截，聚结成液滴，在重力作用下垂直滴落到过滤器底部。过滤元件被流体饱和时仍能保持过滤效率，除非被固体粒子堵塞。过滤器的工作状态可以通过玻璃外壳直接观察，不需要打开

过滤器进行检查。分离出的酸性凝液可以打开 GL25 帽盖排出，或接装蠕动泵连续排出。使用中应注意防止酸性流体灼伤。

CLF-5 型气溶胶过滤器的技术数据如下：

样品温度：max+80℃；样品压力：0.2～2bar abs；样品流量：max 300NL/h；样品通过过滤器后的压降：1kPa；过滤效果：粒径大于 1μm 的微粒 99.99%被滤除。

具有疏水特性的除气溶胶元件，是一种具有纳米疏水特性的高效过滤元件，采用超微孔 SiC 高效过滤元件，具有纳米疏水特性，浸没水中 24h 以上，取出后也能正常使用。用作取样探头过滤器时，过滤精度 0.3μm，99%，用作小型凝集过滤器时，过滤精度 1μm，99%，1L/min 流量下，两者的气阻小于 120Pa。

另一种是具有疏水特性的超高效聚合过滤膜，过滤精度高达 0.3μm，99.99%（参考推定值 0.05μm，99%），气流阻力 120Pa（ϕ50mm，t=0.44mm，1L/min）拦阻各种液雾及气溶胶通过的能力和精度等同于过滤粉尘。

采用超高效聚合过滤膜研制的 LKP303A 型自清扫的膜式超高效过滤器参见图 2-47。气溶胶过滤器除过滤微细粉尘外，还能高效拦阻微细液雾和气溶胶通过，液雾凝结成雾滴并逐渐增大而滚落下来，被旁路气流带走。由于聚合过滤薄膜的纳米疏水特性，在样品含水量高及有液滴的条件下，过滤器也能无故障连续运行。

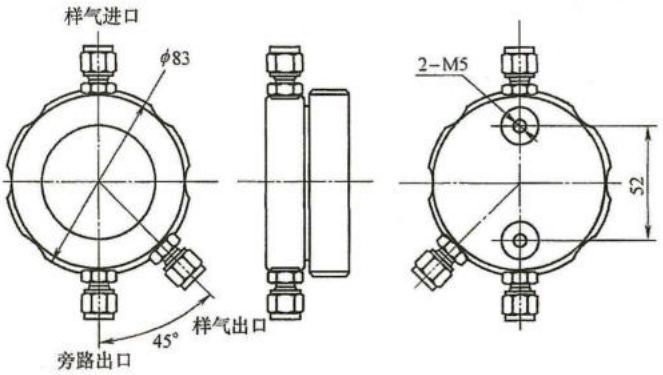


图 2-47 带旁路自清洗的膜式过滤器

④ 聚结薄膜组合过滤器

聚结薄膜组合过滤器由聚结器过滤器和薄膜过滤器两部分组成。

一种聚结薄膜组合过滤器的结构组成，参见图 2-48 左。聚结器过滤器位于下部，过滤元件采用烧结多孔材料，呈筒形；薄膜过滤器位于上部，过滤元件采用疏水性微孔 PTFE 薄膜。气体从入口进入被直接向下导入聚结过滤器，聚结过滤器将所有的颗粒物（包括固体和液体颗粒）捕获，不断将颗粒物由底部排液口排出。而后，样品向上流到薄膜过滤器的上游一侧，流经薄膜滤室后从下游一侧的旁通出口流出。薄膜位于滤室上方，经薄膜进一步滤除残留微小液体颗粒后的样品由顶部样品出口排出。

聚结薄膜组合过滤器的典型安装位置在分析仪或受其保护组件的上游，如图 2-48 右图所示。即使样品系统其他组件失灵，聚结薄膜组合过滤器照样可以对分析仪或组件提供保护。

3）过滤器材质

过滤器就其材质分类，主要由以下几种：

① 陶瓷过滤器

陶瓷材料是用天然或合成化合物经过成形和高温烧结制成的一类无机非金属材料。它具

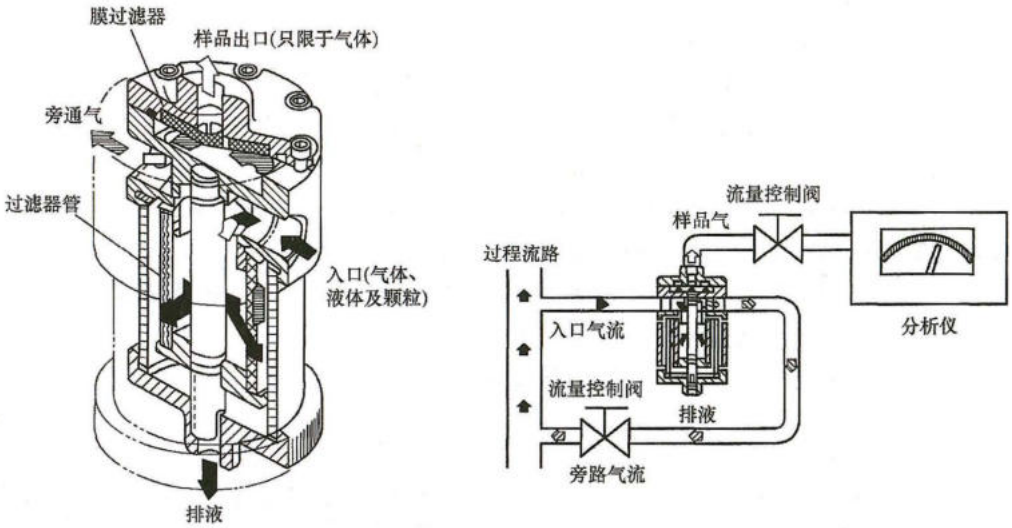


图 2-48　聚结薄膜组合过滤器及聚结薄膜组合过滤器的应用

有高熔点、高硬度、高耐磨性、耐氧化等优点。

陶瓷过滤器的位置处于样气处理系统中的其他设备之前。在样气有可能出现冷凝时，可采用环形发热器给陶瓷过滤器加热。

② 不锈钢过滤器

烧结金属由微米粒径的金属颗粒物在高温高压下压缩而成，金属形成的孔隙度与压力有关。烧结不锈钢能滤去 5～50μm 粒径的颗粒物。通常选择能过滤 10～20μm 粒径颗粒物的探头过滤器。有的系统使用的过滤器能够滤去粒径大于 1～2μm 的颗粒物，但气体通过细孔过滤器时比较困难，需要增加泵的抽力。

③ 膜式过滤器

膜式过滤器，用于滤除气体样品中的微小液滴或颗粒物。过滤元件是一种微孔薄膜，多用聚四氟乙烯材料制成。气体分子可以很容易通过薄膜的微孔。

膜式过滤器最小过滤孔径可达 0.01μm，操作压力最高可达 5000psi。

膜式过滤器一般使用在分析仪前做保护作用，只能更换不能进行清洗。

④ 纸质过滤器

纸质过滤器是一种结构简单、成本低廉、过滤效率可达到 90%以上的过滤器。材质是类似于化学上用的滤纸，可过滤达 0.2～0.3μm 的粉尘。定期应做预防性维护，只能更换不能进行清洗。

(7) 样品除湿器

采用冷凝除湿技术，一般可使样品露点降至 3～5℃。常用的冷凝除湿器主要有压缩机冷凝器和半导体冷凝器。

压缩机冷凝器（compressor cooler）又称为冷剂循环冷却器（refrigerant cooler），其工作原理和电冰箱完全相同。压缩机冷凝器主要用于湿度高、含水量较大的气体样品降温除水。压缩机冷凝器除湿效果最好，但价格较高。

半导体冷凝器（semiconductor cooler）根据帕尔帖热电效应原理工作，除湿效果较好，结构简单，价格便宜，适用于除湿要求不高，入口样品气温度不高的场合，半导体冷凝器一般不能用于防爆场所。

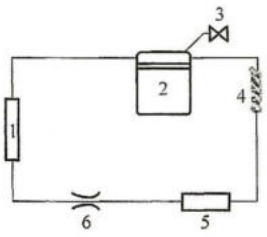
1）压缩机冷凝器

① 压缩机冷凝器的工作原理

压缩机冷凝器的制冷原理和电冰箱完全相同，工作可靠，制冷及冷却热交换的效果好。压缩机冷凝器允许入口样品温度最高可达180℃，入口样品露点90℃，样品流量达250L/h，输出样品温度3～5℃，输出样品露点接近5℃。

压缩机冷凝器的制冷原理如图2-49所示。制冷剂蒸气经压缩机压缩后，在冷凝器中液化放出热量，再进入干燥器脱除可能夹带的水分；毛细管的作用是产生一定的节流压差，保持入口前制冷剂的受压液化状态，使其在出口释放压力而膨胀汽化；制冷剂在汽化器中充分汽化并大量吸热，使与之热交换的样品冷却降温。

压缩机冷凝器的除湿装置示意图参见图2-50。



1—汽化器；2—压缩机；3—制冷剂补充阀
4—冷却盘管；5—干燥器；6—毛细管

图2-49 压缩机冷凝器的制冷原理图

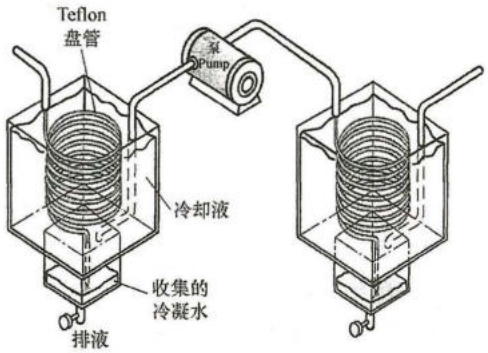


图2-50 压缩机冷凝器二级除湿装置

它是由一组放置在液体中的盘管组成的热交换器。盘管材料有玻璃、Kynar（聚偏二氟乙烯）和Teflon（聚四氟乙烯）等，液体可以是水或某种防冻液，有时也采用空气。这些液体由制冷系统冷却，为了避免样品气中的水分在盘管中冻结，液体的温度不允许低于35F（1.67℃）。水蒸气冷凝液由液体收集器皿中，用蠕动泵定期或连续排出。冷凝水通常采用自动方式排放。

增加一组冷却盘管热交换器，采用两级除湿可进一步降低水分含量。有效的措施是将样品泵置于两级冷却热交换器之间，第一级处于泵前，为负压，第二级处于泵后，为正压，气体在正压下比在真空下更容易冷凝。这是因为气体受压时，水分子从液体表面逃逸蒸发更为困难，增压会使气体的水分含量降得更低，比在负压或大气压下的冷却除湿效果更好。

② 压缩机冷凝器除湿的典型产品介绍

压缩机冷却除湿器是一种除湿效果好、性能可靠、性价比高的产品，国产在线分析系统已广泛应用。压缩机冷却除湿的热交换器有一组、两组、最多有四组，可满足各种除湿的要求。防爆场所使用时，应选择防爆型除湿器。常用除湿器产品介绍如下。

a. 除湿器系列产品（包括半导体除湿器）参见表2-9。

除湿器系列产品（包括半导体除湿器） 表2-9

半导体制冷	ECP1000	<180℃	3bar	150升/小时	0～7℃冷却器
	ECP2000	<180℃	3bar	2＊150升/小时	0～7℃冷却器
	ECP3000	<180℃	20bar	350升/小时	0～7℃冷却器
	ECP20-2	<180℃	3～20bar g	500升/小时	0～7℃冷却器

续表

压缩机制冷（无氟利昂）	ECM-1	<180℃	3～10bar g	250升/小时	小型冷却器
	ECM-2	<180℃	3～10bar g	2*150升/小时	小型冷却器
	ECC-1	<180℃	3～10bar g	350升/小时	超薄冷却器
	ECC-2	<180℃	3～10bar g	2*150升/小时	超薄冷却器
	ECC-1/2-EX	<180℃	3～10bar g	2*150升/小时	超薄防爆冷却器
	EC-1-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	1*250升/小时	450mm单路冷却器
	EC-2-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	2*250升/小时	450mm双路冷却器
	EC-3-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	3*250升/小时	450mm三路冷却器
	EC-4-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	4*250升/小时	450mm四路冷却器
	ECS-1-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	1*250升/小时	360mm单路冷却器
	ECS-1-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	2*250升/小时	360mm双路冷却器
	ECS-1-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	3*250升/小时	360mm三路冷却器
	ECS-1-G/PV/SS	<180℃	3～20bar g	4*250升/小时	360mm四路冷却器
	EC-EX-	<180℃	3～20bar g	1～4*250升/小时	防爆冷却器系列
	EC-30	<180℃	2.2～3bar g	90～250升/小时	－30℃超低温冷却

b. 气体冷凝除湿器产品。

冷凝器的主要技术性能指标如下：输出样品温度4℃±1℃（工厂设定）、输出样品露点≤5.0℃（在＋25℃环境温度下）、样品处理能力300NL/h、输入样品露点≤＋80℃、输入样品温度范围＋5℃≤T≤＋180℃、输入样品压力范围≤3bar、允许气流压差范围≤3mbar，热交换管材质：玻璃。

2）半导体冷凝器

半导体冷凝器又称热电冷却器。

半导体制冷器件的工作原理是基于帕尔帖原理，该效应是在1834年由J. A. C帕尔帖首先发现的，即利用当两种不同的导体A和B组成的电路且通过直流电时，在接头处除焦耳热以外还会释放出某种其他的热量，而另一个接头处则吸收热量。帕尔帖效应所引起的这种现象是可逆的，改变电流方向时，放热和吸热的接头也随之改变，吸收和放出的热量与电流强度I[A]成正比，与两种导体的性质及热端的温度有关，即：

$$Q_{ab}=I\pi_{ab} \tag{2-31}$$

π_{ab}称作导体A和B之间的相对帕尔帖系数，单位为[V]，π_{ab}为正值时，表示吸热，反之为放热，由于吸放热是可逆的，所以$\pi_{ab}=-\pi_{ab}$

帕尔帖系数的大小取决于构成闭合回路的材料的性质和接点温度，其数值可以由赛贝克系数α_{ab}[V. K-1]和接头处的绝对温度T[K]得出$\pi_{ab}=\alpha_{ab}T$与塞贝克效应相，帕尔帖系数也具有加和性，即：

$$Q_{ac}=Q_{ab}+Q_{bc}=(\pi_{ab}+\pi_{bc})I \tag{2-32}$$

因此绝对帕尔帖系数有$\pi_{ab}=\pi_a-\pi_b$

半导体冷凝器的除湿装置将一个撞击器（impinger，又称射流热交换器jet stream heat exchangers）装在吸热块中，吸热块与珀尔帖元件的冷端连接，珀尔帖元件的热端由一组散热片散热或用风扇将热量驱散。在这种撞击器中，样品气从中心管中流出，中心管被一圈真空护套管所环绕。样品气到达撞击器底部之前，湿度保持在露点以上（真空护套管起绝热作

用），在撞击器底部被迅速冷却。水蒸气在撞击器底部冷凝析出并被排除。气体折转向上流动，在到达出口之前被撞击器的冷壁进一步冷却。这种设计的独特之处在于气体在到达上部的出口（通往分析仪）之前，被置于护套管之外的中心管部分再度加热。

这种冷凝器的制冷效率取决于撞击器的表面积和长度、气体的流速、结构材料、环境空气温度和冷却面的温度。珀尔帖冷却器/撞击器冷凝系统的额定制冷量，可根据样品处理系统的实际需求选型。

由于不同的材料中不同的电子分布，材料的结合处存在小的电压差，结合处产生的电压与电池电压相抵抗就会发热，通过吸收外界的热能转换为电能使电流达到平衡，热量被吸收降低了外界的温度。在环境温度不高的情况下容易实现较低的制冷温度，在温度升高到35℃以后制冷效率直线降低。

半导体冷凝器的优点是：外形尺寸小，使用寿命长，工作可靠，维护简便，控制灵活方便，容易实现较低的制冷温度。缺点是制冷效率较低，适用于样品入口温度不高、除湿要求不高的场合。国产半导体冷凝除湿器的入口温度约在55℃。

半导体除湿器参见图2-51。

① 主要技术参数如下：

入口样气温度：≤55℃；

出口样气温度：3～4℃；

样气流量：≤3L/min；

冷却方式：帕尔帖效应制冷，强迫风散热；

样品通路：单路双级；

排液方式：重力排液加排液分流强制携带。



图2-51 半导体除湿器外形图

② 冷凝除湿器的主要技术要求

冷凝除湿器的主要技术要求与检测方法如下：

a. 冷凝器的制冷性能

从环境温度冷却到冷凝器的设定温度所需时间。室温下25±5℃冷却到设定温度（4℃），所需时间≤30min。

b. 冷凝器的稳定性能：

在室温下25±5℃，冷凝器达到工作温度时，冷凝器显示波动范围±1℃。

c. 冷凝器的脱水性能

在冷凝器入口通露点温度T_d为35℃、45℃、55℃的湿气，分别检测一级和二级冷凝器对应出口露点温度（一级露点T_{d1}和二级露点T_{d2}），每个测试点平稳后，至少测十个数据（每分钟记录一次数据）。流量分别选择2NL/min以及从0.5～5NL/min可选的其他流量。冷凝器出口露点≤5℃，露点波动范围<1℃，冷凝器的脱水率>90%。

露点检测时，先用压缩空气通入冷凝器吹扫，然后再设定高湿度发生器的露点值，发生稳定露点的湿气通入冷凝器入口。一般由低湿（T_d35℃）到高湿（T_d55℃）。

脱水率=[(脱水前烟气湿度值－脱水后烟气湿度值)/脱水前烟气湿度值]×100%

压缩机冷凝器的最高测试环境温度为50℃，半导体冷凝器的最高测试环境温度为45℃。

③ 冷凝器SO_2组分丢失率

测试要求：湿度15%条件下：

SO_2浓度≥250μmol/mol（715mg/m^3）时，SO_2丢失率≤5%

SO_2浓度<250μmol/mol（715mg/m^3）时，SO_2丢失率≤8%

SO_2 浓度＜50μmol/mol（143mg/m^3）时，SO_2 丢失量≤5μmol/mol（14mg/m^3）。

3）Nafion 管干燥器

Nafion 管干燥器（Nafion dryer）是一种除湿干燥装置，其原理见图 2-52，其结构见图 2-53。

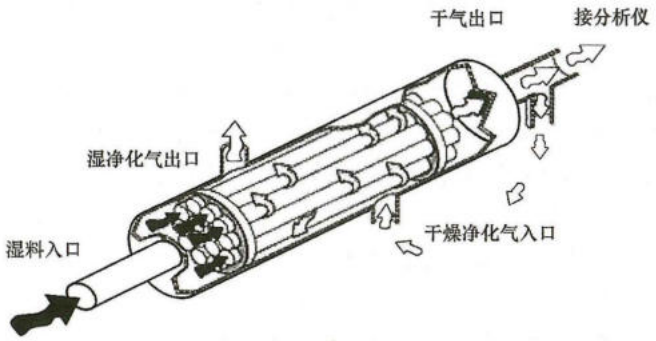


图 2-52　Nafion 管干燥器原理示意图

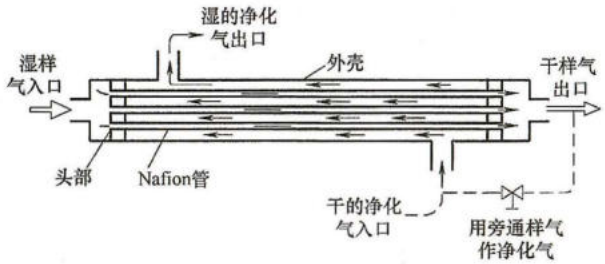


图 2-53　Nafion 管干燥器结构示意图

在一个不锈钢、聚丙烯或橡胶外壳中装有多根 Nafion 管，样品从管内流过，低露点的净化气从管外流过，样品的水分子穿过 Nafion 管半透膜被净化气带走，从而达到除湿目的。

清洁干空气在靠近干燥器样品气体的出口进入干燥器，干燥器被冷却，沿着干燥器的长度产生与样品气流逆向的温度梯度。由电子温度控制器控制和监控进入的清洁干空气的温度来维持温度梯度。清洁干空气流过干燥器，被加热到干燥器样品气体入口处预设温度。由于温度梯度使水蒸气快速地移出，降低了水气的露点。如果清洁干空气的温度下降到低于预设温度时，模块的加热器将调节温度保持清洁干空气达到预设温度。由铝制外套管将加热器的热量传递给干燥器管，清洁干空气沿着干燥器管流动，带走流量并被加热。热交换过程使清洁干空气的最终温度接近控制温度并和干燥管的温度梯度始终保持一致。

干燥器要除去蒸气态的水，必须避免薄膜与液态的水接触，如果液态水进入干燥器，除湿效率会降低，同时干燥器将出现故障。例如：液态水会造成干燥器发生扭结，受潮管的长度比干燥时的干燥管长度增长约 10%，干燥效率降低。加热干燥管，保证进入渗透干燥器的样品气体温度高于露点，防止样品气体中出现冷凝水，才能确保干燥管高效地工作。在湿气的交换过程中，产生向干燥管外输送纯净的湿气的推力，加快了湿气的交换，干燥管出口多余的净化样品干燥气体返回干燥器。随着干燥管的长度增加，干燥效率也增加，干燥效率还与样品气体入口的压力和清洁干空气的压力有关。增加干燥管的数量同样能提高干燥能力。

Nafion 管的干燥原理完全不同于多微孔材料的渗透管，渗透管基于气体分子的大小来迁移气体，而 Nafion 管的本身并没有孔，它是以水合作用的吸收为基础来进行工作的。水

合作用是一种与水的特殊的化学反应，它不吸收或传送其他化合物。

Nafion管中气体分子的迁移是以其对硫酸的化学亲和力为基础的。Nafion管是以Teflon（PTFE，聚四氟乙烯）为基体，在Teflon矩阵域内嵌入了大量的离子基—磺酸基制成的。磺酸基（$-SO_3H$）是硫酸（$HO-SO_2-OH$）分子中除去一个羟基（-OH）后残余的原子团（$-SO_2-OH$）。磺酸基很容易与烃基或卤素原子连接，聚四氟乙烯中引入磺酸基后，会增强其酸性和水溶性。由于磺酸基具有很高的亲水性，水分子一旦被吸收进入Nafion管壁，它就会从一个磺酸基向另一个磺酸基传递渗透，直到最终到达管的外壁，即水分子会全部穿过Nafion管到达管壁外的净化气中。这里的驱动力是水蒸气的分压，而不是样品的总压。事实上，即使Nafion管内的压力低于管外的压力，Nafion管依然能将气体进行干燥。关键在于是Nafion管内部的湿度大，还是外部的湿度大。如果Nafion管内气体所含的水分比管外气体所含的水分多（即具有更高的水汽分压），则水汽将会向外移动；反之，水汽则会向里移动（即充当加湿器）。

除了水分之外，任何与硫酸具有极强结合力的气体分子都会穿过Nafion管。碱和酸具有极强的结合力，但大多数碱在常温下都是固体，碱性气体主要是一部分含有氢氧基（-OH）或水（-H-OH）的有机碱醇（一般形式为R-OH）及NH_3（当NH_3中有水时就会形成氢氧化铵，即$NH_3+H_2O=NH_4OH$），它们能够穿过Nafion管。环境监测和过程分析中需要测量的大多数的气体，都无法穿过Nafion管，或者穿过速度相当慢。因此，当所损失的组分含量可以忽略不计时，可以用Nafion管干燥器来去除这些气流中的水分。

Nafion管干燥器除湿能力强。常温常压下，样气经Nafion管干燥后可达到的最大露点温度是−45℃，相当于含水量100μL/L。

Nafion管和聚四氟乙烯一样，具有极强的耐腐蚀性能，即使是氢氟酸或别的凝结酸，Nafion管都可以承受。耐温、耐压能力较好，Nafion管可以承受的最高温度为190℃，最高压力为1MPa。

4）其他除湿方法工作原理、特点及应用情况

其他除湿技术有惯性分离、过滤、水冷（可降至30℃或环境温度）、涡流管制冷（可降至−10℃或更低）等。

① 惯性分离

惯性分离包括利用离心作用进行分离的旋液分离器和利用重力作用进行分离的气液分离罐等。

将旋液分离器用作气液分离装置时，样品气会经由上悬流从旋风中脱离出来，残留液体或悬浮液滴经由下旋流从旋风中分离出来。通常需要在下旋流通路中设置一个节流孔，或者在旋风下旋流出口处安装一个针阀，以平衡下旋流/上旋流比。维持下旋流/上旋流为恒定比，从而维持旋液分离器的分离效率。

气液分离器用于分离样品中液滴，气样中液滴在重力作用下滴落从装置底部排出。

设计时应考虑其体积对样品传输时间滞后的影响。

② 过滤除湿

过滤除湿有聚结过滤器、旁通过滤器、膜式过滤器、纸质过滤器和监视（脱脂棉）过滤器等。前三种用于脱除液滴，后两种用于分析仪前的最后除湿。这些过滤器只能除去液态水，不能除去气态水，即不能降低样品的露点。

膜式过滤器又称薄膜过滤器，用于滤除气体样品中的微小液滴。气样通过膜式过滤器后，露点不会降低。膜式过滤器过滤孔径最小可达0.01μm。

聚结器也称凝结器，是一种能将样品中的微小液体颗粒聚集成大的液滴，在重力作用下将其分离出来的装置。聚结器中的分离元件是一种压紧的纤维填充层，通常采用玻璃纤维。当气样流经分离元件时，玻璃纤维拦截悬浮于气体中的微小液滴，液滴在重力作用下，向着纤维填充层的下部流动，在重力作用下滴落到聚结器的底部出口排出。聚结器能有效实现气雾状样品的气液分离。气样通过聚结器后，露点不会降低。

③ 涡流管制冷

涡旋管制冷技术一般可使样品露点降至－10℃或更低。涡旋管冷却器（vortextube cooler）根据涡旋制冷原理工作，对气源要求高（包括压力和质量），耗气量大，可应用于防爆场所。

涡流管冷却器是使用压缩气体在冷却器中产生涡流效应达到制冷目的的装置，工作原理示意图见图 2-54。

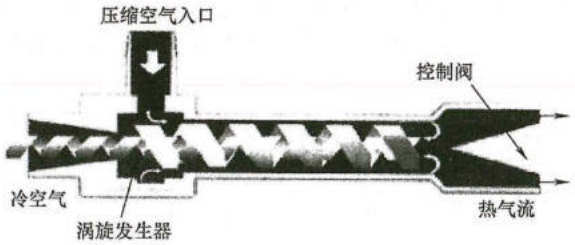


图 2-54　涡流管工作原理示意图

涡流管冷却器中，常温压缩空气经喷嘴沿切线方向喷入涡流发生器，由于切向喷嘴的作用，在涡流发生器中形成沿圆周方向以音速旋转前进的高速气流，顺涡旋管向左运动。热端装有控制阀，当气流到达热端时，外圈气流从控制阀阀芯周边排出，内圈气流受到阀芯的阻挡，反向折转沿涡旋管向右运动，由冷端出口排出。

运行时，必须将涡流管冷却器的控制阀调节适当，才能达到制冷的目的。当控制阀全关时，无制冷效应产生。当阀全开时，少许气体反从制冷端吸入，这时涡流管就变成了一个气体喷射器。当阀调节到一定位置时，压缩气体从冷端和热端流出一定的量，制冷温度也就一定。若用铂电阻检测冷却温度，通过简单电子线路来控制气源加入量，即可实现制冷温度的自动控制。

涡流管冷却器的结构简单，启动快，维护方便，但耗气量较大，可达 50～100L/min。采用较高气压时，气样的温度可降至－40～－10℃。在实际使用中，温度给定不能太低，一般设定在 1～5℃，使气样含水量降至 0.6%～0.8%即可。若低于 0℃以下时，冷凝出的水冻结会堵塞管道。

④ 水冷

水冷却器通过与冷却水的温度交换实现样品的降温，有列管式、盘管式、套管式几种结构类型。

⑤ 排水分离器自动排液

系统中采用排水分离器、滤雾器、排液器多级自动排液，大部分配合冷却器使用。

气体进入预处理后先用排液分离器冷却到机箱内部温度，使气体中的水分分离出来，再经过冷却器除湿，排液分离器及冷却器中产生的水分流入排液器，溢水排出。样品气体在经过滤雾器等后，通过电磁阀被“抽气泵”吸取。

这种方法主要属于惯性分离的一种，安装时应按照气路流程的先后顺序布置分离器的

高度。

⑥ 干燥剂吸收和吸附

吸收是指水分与干燥剂发生了化学反应变成另一种物质，这种干燥剂称为化学干燥剂。吸附是指水分被干燥剂（如分子筛）吸附，水分本身并未发生变化，这种干燥剂称为物理干燥剂。这种方法应当慎用，随着温度不同，干燥剂吸湿能力是变化的。

5）除湿技术应用

涡流管冷却器、压缩机冷却器和半导体冷却器主要用于湿度高、含水量较大的气体样品降温除水。其中以压缩机冷却器除湿效果最好，但价格较高。半导体冷却器难以用在防爆场所。涡流管冷却器对气源的要求高、耗气量大，可用于防爆场所。

Nafion 管干燥器由于没有机械部件，所以相比较制冷器有许多优点，如不使用制冷器避免了冷凝水与被测污染物接触，减少溶于水的污染物的损失。但 Nafion 管干燥器易被冷凝物的微粒或样品气体不正确地过滤所引入的颗粒物堵塞或形成盐的沉淀物而发生故障，通过加热干燥器进口一侧，可最大限度地减少液体的冷凝。用直径大的管能够解决颗粒物堵塞和沉淀的问题。

Nafion 管干燥器以水合作用的吸收为基础进行工作，具有除湿能力强、速度快、选择性好、耐腐蚀等优点，但它只能除去气态水而不能除去液态水。

抽取系统已经采用和适用了多种干燥器，例如安装在探头或靠近探头位置的圆柱形干燥器、聚合干燥器、喷射器瓶干燥器以及经常遇到临时设计的干燥器。CEMS 不用化学干燥器（如氯化钙、浓硫酸、硫酸钙等），由于要定期再生或更换干燥剂，因此，使用化学干燥剂会造成一些不必要的维护工作。用化学干燥剂必须要有充足的理由，证实不与被测气体发生反应或吸附被测气体。

6）冷凝液的排出

冷凝液的排出可根据实际选用适合的方法。

① 利用旁通气流排液

利用旁通气流将液体带走：安装一个针阀限制旁通流量，对压力进行调节。

② 利用自动浮子排液阀排液

在废液罐上设置浮子和开关阀，当液位引起浮子上升时打开阀门，使液体排出。此种方法适用于压力范围在 10～400psig 的情况，当压力高于 400psig 时不适用。

③ 手动排液

手动排液方法适用于压力较高的场合。对于经常需要手动排出的场合，可安装一个收集排液的外部储液罐。

④ 电磁阀自动排液

当排液管路为正压时，可考虑在管路中用电磁阀定期打开自动排液，一般使用在取样泵后排液管路中。电磁阀的材质应充分考虑样品气体和排出液体的腐蚀性。

⑤ 蠕动泵排液

蠕动泵主要通过小内径挠管来输送液体，适合对少量冷凝液连续自动排放，用于冷凝除湿器冷凝液自动排放，同时能阻止气体的排出，其输出不连续，脉动。

蠕动泵的泵头部仅由转子和泵室组成。转子和泵室之间是一根挠管，泵转子上间隔均匀的两个辊轴从转子向泵室方向挤压挠管，通过对泵的弹性输送软管交替进行挤压和释放来泵送流体。由于辊轴和泵室之间的管被连续挤压，所以每隔 30～60d 就需要对蠕动泵管进行预防性更换。冷凝物中的颗粒物会使蠕动泵管的维护间隔变短，所以蠕动泵在使用中，既要进

行日常预防性的维护（更换管），也要确保泄漏不会损坏样品处理的其他设备。

（8）样品取样泵

1）取样泵的分类及应用

样品处理系统中使用的泵，主要有：隔膜泵、喷射泵、蠕动泵等多种类型。

样品取样泵选用的基本原则是：要求与样品接触的泵的部件材料不能污染样品，不能影响分析仪对样品的准确分析。具体要求是泵送流量和泵送压力应符合分析仪的要求，环境空气不渗入泵体（指从旋转轴密封处），样品不受润滑油污染。因此，只有隔膜泵和喷射泵符合上述要求，它们常用于抽取式样品处理系统。

在线分析系统的样品取样泵优先推荐隔膜泵。某些有特殊要求的场合可使用喷射泵，例如：在防爆场合选用，或者在需要通过喷射泵的高温蒸汽对样品进行处理时选用。样品处理系统冷凝器的冷凝液排放，大多需要使用蠕动泵。其他取样泵如：离心泵、齿轮泵、叶片泵等，用于液态分析仪的取样处理场合。

泵的选用应符合使用要求，腐蚀性的样品应采用耐腐蚀泵，高温场合应采用耐高温泵，防爆场合必须采用防爆型取样泵。取样泵的选择与使用要求如下：

① 根据样品输送管线长度、规格、所需求的响应时间以及样品的压力、流量等，确定取样泵抽气量。在线分析系统的取样泵抽气量一般选用 4～6L/min。

② 取样泵的泵送流量，与取样泵的入口样品温度、压力有关，泵入口的负压不能超出泵的抽吸能力。

③ 气相样品的凝结水、含尘量会对泵的工作有影响，黏性液体（膨胀液、泥浆、水、碳氢化合物、树脂、橡胶、油漆及一些浆液）性能对泵内驱动装置也会有影响。

④ 取样泵泵头的材料选择，要求和样品直接接触的材料，要考虑化学兼容性、物理兼容性、耐腐蚀性能以及温度、压力的影响因素，选择合适泵头的材料及合适的泵电机，使它能和其安装位置的电气危险等级相匹配，并选择符合要求的取样泵。

⑤ 取样泵在使用中，应注意入口的样品气的含尘、含水、腐蚀性、样品温度及入口的负压等因素，不符合使用要求时，会造成取样泵损坏。

样品处理系统的隔膜泵、喷射泵及蠕动泵，都是容积式线性输出（计量）泵，它们都能在一个周期内精确地输送一定数量的流体。隔膜泵是往复泵的一个典型列子，其输出不连续，脉动也较大。主要用于输送相对距离较长、相对压力较低的气体，隔膜泵不能用于精确测量流量的场合。

2）隔膜泵

① 隔膜泵的原理及应用

隔膜泵由一个活塞和所属的柔软隔膜组成。隔膜是一个空腔板，在空腔的顶部有一个入口和出口。空腔可以由机加工性能好的金属或聚氟化合物树脂制成。泵中隔膜、入口阀及出口阀，都由外面包有一层弹性体（一层纯弹性体或一层碳氟化合物树脂）的薄金属制成。入口和出口阀在泵腔顶部入口和出口部位工作，这些阀，可以是挡板阀、提升阀或球形止回阀。这样，只要泵内与样品流体接触的部件，选用与工艺流体兼容的纯弹性体材料，就可以保证泵的无泄漏和防腐蚀性能。

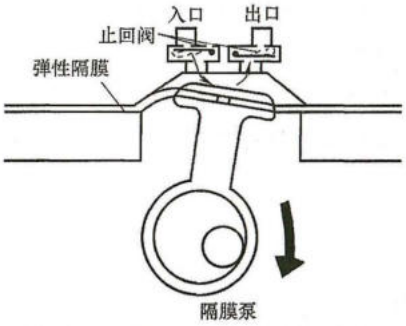


图 2-55　隔膜泵的传动结构原理图

隔膜泵的传动结构原理见图 2-55。

增加和减小泵腔的体积，通过入口和出口止回阀的定位，迫使样品只朝一个方向流动。泵腔体积的增加和减小是通过偏心轮驱动轴来完成，连接杆的驱动轴与隔膜底部连接。隔膜泵工作时，通过机械冲程活塞或由连接棒移动，使软隔膜扩张和收缩抽取气体。隔膜往复运动，以短脉冲方式移动气体，当隔膜向下运动时，空腔的体积变大，入口止回阀打开，出口止回阀关闭，允许工艺流体进入空腔。当隔膜向上运动时，空腔体积减小，入口止回阀关闭，出口止回阀打开，工艺流体从泵中排出。因为只有泵腔、隔膜和阀门与气体接触，气体被污染的可能性很小。

隔膜泵中的止回阀和泵壳可由许多不同的防腐材料制成，包括不锈钢、合金钢以及各种聚氟化合物树脂。隔膜大多为圆形，由软金属片、聚四氟乙烯、聚氨酯或其他合成橡胶制成。这类泵的维护量低，没有轴密封，需要定期对隔膜和止回阀进行更换。隔膜泵是无油泵，隔膜泵通过隔膜（采用柔性金属片、聚四氟乙烯、聚氨酯或其他弹性材料制成）将泵的机械传动部分和润滑系统与样品隔离开来，样品不会受到污染，选用合适的隔膜材料可解决腐蚀性问题。

隔膜泵可位于样品气体调节系统前，甚至在受热条件下运转，如果没有充分地过滤颗粒物，颗粒物将磨损隔膜泵的泵头，冷凝酸的化学腐蚀会损坏隔膜泵的泵头。泵在高速运转条件下，磨损将导致隔膜产生裂缝和磨穿。要提高泵的使用寿命，应充分地过滤气体除去颗粒物，泵受热也要适当，应位于调节系统之后。

隔膜泵的输出不连续，脉动比较大，需要周期性地对泵头部进行预防性维护。隔膜泵主要用于输送相对距离较长且相对背压较低的场合。隔膜泵不能用于精确测量流量的场合。

② 隔膜泵典型产品介绍

国内系统集成商常用的取样泵，主要有隔膜泵以及真空型电动泵。

隔膜泵型号及参数见表 2-10。隔膜泵的外形参见图 2-56。

隔膜泵型号及参数表 **表 2-10**

名称	型号	典型工作温度	典型工作压力	典型工作效率	说明
隔膜泵	MP47/MP47-Z	−30℃～+80℃	0.1～2.5bar abs.	6～17 升/分钟	分析隔膜泵
	MP47../EX	−30℃～+80℃	0.1～2.5bar abs.	6～17 升/分钟	防爆分析隔膜泵
	MP47/-Z/R	−30℃～+80℃	0.1～2.5bar abs.	6～17 升/分钟	流量调节分析隔膜泵
	MP47../D	−30℃～+80℃	0.1～2.5bar abs.	6～17 升/分钟	安全分析隔膜泵
	MP06/MP12	−20℃～+80℃	0.2～1.8bar abs.	5.5～11 升/分钟	分析隔膜泵
	MP26-H1	−20℃～+200℃	0.3～2.5bar abs.	10 升/分钟	电加热分析隔膜泵
	N3/5/9 KPE	5℃～40℃	0.5bar	3～9 升/分钟	隔膜泵
	N3/5/9 KP18	5℃～40℃	0.5bar	3～9 升/分钟	防护隔膜泵
	* 另有不同规格大流量(如:400 升,800 升,1200 升)抽气隔膜泵				

系统常用的隔膜泵的主要型号有：KNF 系列产品，如 N3/5/9 泵，其泵送流量为 3～9L/min，泵送压力 0.5bar；以及其他特殊应用的：MP47-EX 型防爆隔膜泵、N86KTE 耐腐型隔膜泵、N87TTE Ex 防爆型抽气泵等。

③ 泵的选型和使用

a. 泵的选型应注意如下事项：

泵的额定压力和流量，应当超过要求值的 50%左右为宜。

泵的振动会对分析系统产生不良影响，应采用独立支架和柔性接头加以隔离。

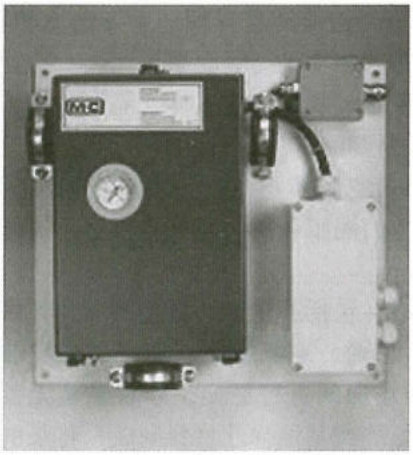


图 2-56　隔膜泵外形图

泵的作用引起的样品压力脉动可能会对分析仪及减压阀等带来有害影响，对于液样则需采用波纹管阻尼器。

b. 泵的使用

隔膜泵一般安装在样品处理系统除尘过滤器之后，能加热操作（如：高温型隔膜泵），应防止颗粒物的磨损和冷凝酸的腐蚀损害泵头。在需要含湿量大的场合，为了避免样品冷凝，必要时应考虑对泵头采取加热保温措施。隔膜泵大多安装在样品除尘的细过滤器（如气溶胶过滤器）之后，或者在除尘过滤器后。

隔膜泵的流量可采取下述方式控制：在泵的排出管线上安装一个节流阀，或者在泵的吸入阀和排出阀之间，并联一条带针形阀的旁路管线，也可以在泵后，设计旁路放散回路控制流量。使用节流阀控制流量的方案，当泵在低于满负荷的情况下运行，由于泵的入口供气流量不足，致使泵送流量低于满负荷值，泵送压力也随之降低，会使泵逆着一个较高的排放压力工作，如果供气流量出现波动，还会产生喘振现象，导致泵的使用寿命降低。因此，使用旁路的针形阀，控制流量或旁路放散回路的方案较为适用。

3）喷射泵（射流泵）

① 喷射泵的原理

喷射泵也称为射流泵，抽取原理是文丘里管原理。喷射泵又称为文丘里抽吸器，它是一种利用高速第二流体（水、空气或蒸汽，又称工作流体）在文丘里管中产生的低压把样品抽吸出来的装置。喷射泵原理参见图 2-57。

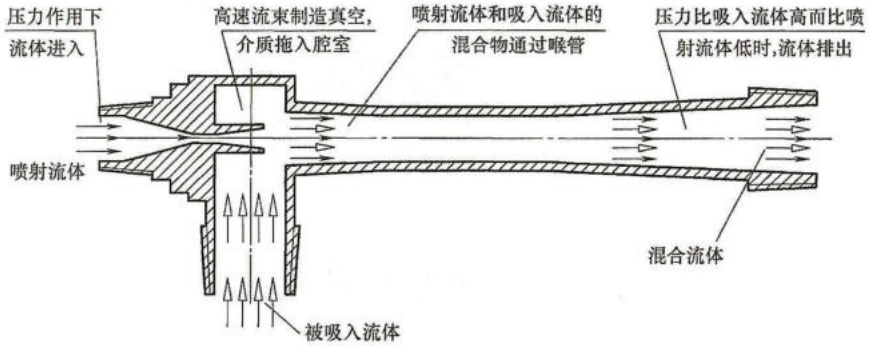


图 2-57　喷射泵原理示意图

喷射泵需要的喷射流体应具有高流率，以提供喷射所需要的驱动力，以便能通过已选定的喷射流体的连续使用来抵消最初的小量消耗。提供驱动力的喷射流体的压力和温度变化会影响喷射泵的性能。由于喷射泵一般采用铸件或固体材料（金属或树脂产品）制造而成，所以其可靠性较高。

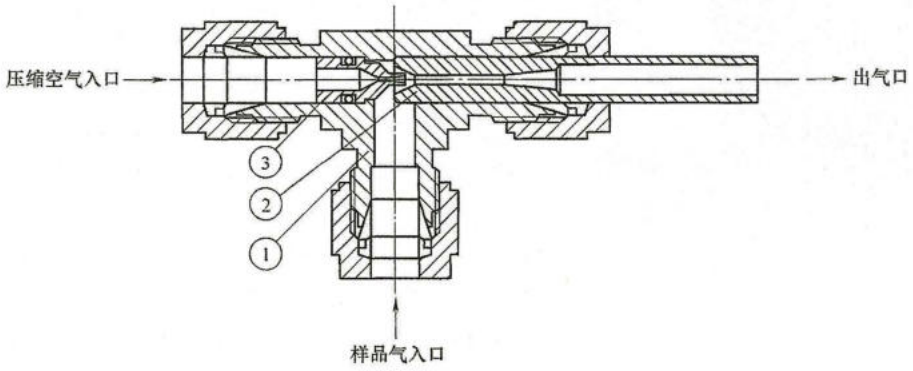
射流泵的设计比较简单，可作为探头内过滤器的一部分或安装在烟道外。射流泵抽取烟气通过安装在烟道外加热机箱中的内过滤器，通常可用一台隔膜泵，把经过过滤的样品气体抽入分析仪中，多余的样品气体在射流泵中与压缩空气混合，返回烟道或管道中。

喷射泵除了故障率相对较低以外，只要气相样品流中不含较大颗粒物或颗粒物含量较大，样品流压力和温度恒定，喷射泵都能提供一个比率已知及稳定的由喷射流和样品气组成

的混合流，以满足分析仪的流量要求。由于样品经过喷射泵后，与第二流体发生混合，形成混合流，喷射泵一般置于分析仪的出口之后。这样，分析仪前的流路是负压工作状态，分析仪前的样品管线和部件必须严格密封，以防环境空气被渗入。

② 喷射泵的结构与典型产品

压缩空气喷射泵原理参见图 2-58。



①—吸入室；②—扩压管；③—喷嘴

图 2-58 压缩空气喷射泵原理图

压缩空气喷射泵常置于分析仪的出口处作为取样动力源，被抽取的样品经过分析仪的传感器或气室后，与喷射泵的压缩空气混合后排出到大气或返回到烟道。

喷射泵的体积小，结构简单，材质可用不锈钢、工程塑料或聚四氟乙烯。最常用的喷射泵是以气体作为喷射流的喷射泵。

射流泵的结构外形参见图 2-59。射流泵的原理及性能曲线参见图 2-60。

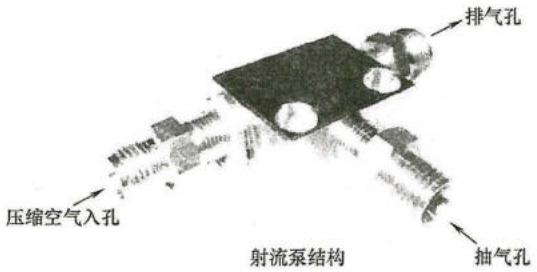


图 2-59 射流泵的原理、结构外形图

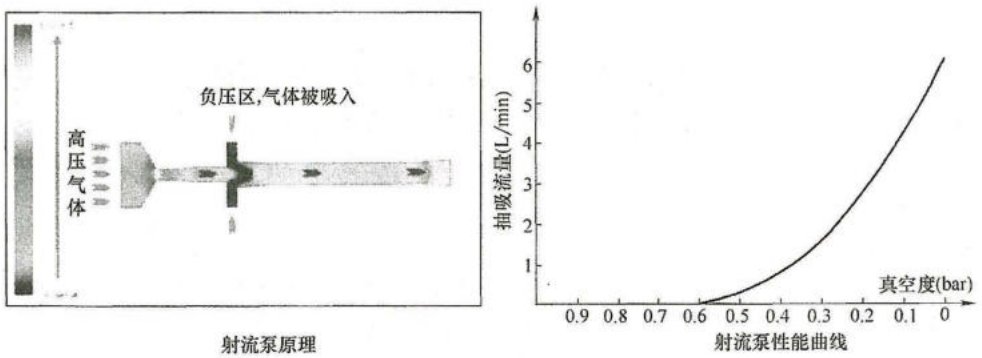


图 2-60 射流泵的原理及性能曲线

4）蠕动泵

蠕动泵主要用于气体分析系统中液体的排放，如样品冷却器下部的储液池中冷凝物的排放，外形结构参见图 2-61。

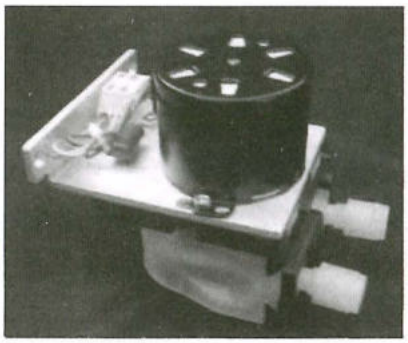


图 2-61　蠕动泵外形图

蠕动泵适用于输送液体，输出脉动，不连续。蠕动泵是通过小内径具有弹性的泵管来输送少量液体，包括浆液，都可以很容易地通过蠕动泵输送。蠕动泵输送液体主要靠一对辊轮转动，挤压泵室的蠕动泵管排出液体。长期、连续的挤压很容易造成泵管的损坏。一般要求每隔 30～60d 就要对蠕动泵的泵管进行预防性更换。如果液体中含有固体颗粒物，泵管的损耗将更加严重，预防性更换时间也变得更短。蠕动泵是系统中维护量最大的部件。

蠕动泵的泵头仅由转子和泵室两部分组成。转子和泵室之间是一根有弹性、耐腐蚀的泵管。泵转子上分布有间隔均匀的辊轮，从转子向泵室方向挤压泵管，这样处于辊轮和泵室之间的泵管中，就会产生一段段的液体，当新的一段液体从泵的一边进入到泵中时，前一段的液体就会从泵另一边的出口排出。

蠕动泵能提供流动速率非常稳定、体积小而精确的样品。蠕动泵常用于样品处理系统连续排出冷凝液。主要参数采用每分钟排出的液体体积，如连续排出量 mL/min，或用泵电机的每分钟转速等参数。常用的蠕动泵为：1～3mL/min，或 100mL/h。

蠕动泵的泵管，更换费用低，其驱动电机的更换费用也低。

（9）样品压力、流量调节技术

1）样品流量调节阀件

样品处理系统的阀件应用除从各种功能需要选用阀件外，阀件的选择应用还包括：各种手动阀、电动阀、气动阀及专用的阀件。

系统流程的自动控制中，常选用电动阀及气动阀。

电动阀件常用的有两位三通电磁阀、二通及三通电动球阀等。

气动阀大多用于防爆场所。电动阀在用于防爆场所时，需要选用防爆型电动阀。

高温样品处理系统中，应考虑阀件的耐高温性能，特别是密封件材质的选择。阀件的材质大多采用不锈钢、黄铜或碳钢等材质，需要耐腐蚀、耐磨损的场合选用 316 不锈钢材质。

① 球阀

球阀的阀芯呈球形，用于切断或接通样品流路。

样品处理系统中大量使用的是二通球阀和三通球阀，根据驱动方式，又可分为手动、气动、电动三种。此外，有时还在少数场合使用四通、五通、七通球阀。

图 2-62 是一种 CKD 的电动反吹球阀。



图 2-62　CKD 电动反吹球阀

② 旋塞阀

旋塞阀的阀芯呈圆柱形，作用同两通球阀，不同之处是它有全开、全关和节流（半开）三种开度。旋塞阀的结构如图 2-63 所示。

③ 稳流阀

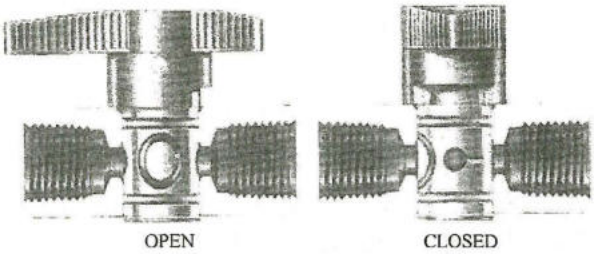
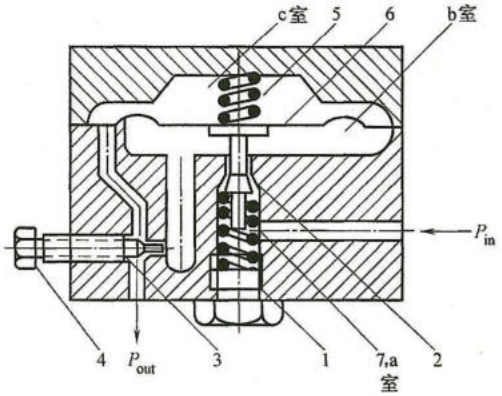


图 2-63 旋塞阀结构图

样品处理系统常采用稳流阀，用于稳定样品的流量和压力。稳流阀的结构有多种形式，它们都具有在输入压力或输入负载变化时，能自动保持输出流量基本恒定。图 2-64 是一种稳流阀的结构示意。

稳流阀是一种力平衡式压力调节器。输入压力为 P_{in} 的气体，进入稳流阀的 a 室，设其压力为 P_a，即 P_{in} 等于 P_a，经有倒立锥度的导向阀 2 进入 b 室，设其压力为 P_b。气体再经针形阀的阀针节流后分为两路，一路反馈进入 c 室，设其压力为 P_c，一路作为输出，压力为 P_{out}，显然 P_c 等于 P_{out}。



1—阀体；2—导阀；3—针形阀；4—针形阀手柄；
5—偏置弹簧 S1；6—聚四氟乙烯膜片；
7—支撑导阀弹簧 S2

图 2-64 稳流阀的结构示意图

在 b、c 室间有一面积为 S 的聚四氟乙烯膜片相隔。由于导向阀和膜片相连，作用在膜片导向阀的作用力为偏置弹簧 S_1 产生的 Fs_1 和支撑导向阀弹簧 S_2 产生的 Fs_2，由于 $Fs_1 > Fs_2$，导向阀保持一定开度。当针形阀关闭时，$P_c=0$，$Fs_2+P_bS>>Fs_1$，膜片上升带动导向阀上升，a、b 室通道被切断，进一步使输出无压力。调节针形阀手柄使针形阀针保持一定开度，设气体通过针形阀针的气阻为 R。封存在 b 室的气体一旦经针形阀流出后，作用在膜片上的弹簧力使导向阀下移，气样重新进入 b 室，经针形阀针后，一路反馈进入 c 室，一路作输出。这时，导向阀的位置取决于 Fs_1、Fs_2、P_bS、P_cS 的力平衡，由于 Fs_1、Fs_2、S 恒定，导向阀的位置取决于 b、c 两气室的压力 P_b、P_c，即取决于针形阀的压差 ΔP。

只要保持膜片两侧的压差 ΔP 不变，输出流量就能保持不变。因某种原因 P_{in} 增高时，通过一定开度的导向阀的气体流速加快，P_b 压力随着增高。由于输出的容积较大，压力来不及反馈至 c 室，膜片受到自下而上的力，破坏了原来的平衡，于是膜片上移，导致导向阀的开度变小，流速下降使 P_b 减小，从而保持 ΔP 差值不变。反之亦然，当输出负载变化时，导向阀自动跟踪，始终保持上式中的 ΔP 差值不变，使 Q 值不变。若需要改变输出流量时，通过针形阀手柄调节阀针的进和退，线性改变气体的流通截面，即线性改变 R 值大小，使输出流量 Q 呈线性变化。

稳流阀的稳流性能是有条件的，只有当输入压力变化不太大时，输出才具有高稳定性。因此，一般稳流阀需串接稳压阀或针形阀。

单向阀：又称止逆阀、止回阀，只允许样品单向流动，不能逆向流动。

针阀：阀芯呈圆锥形，主要用于微调样品流量和压力。

限流阀、限流孔板：限制样品流量不超过某一允许值，起安全保护作用。

2）样品流量控制与测量

① 样品流量控制

样品流量控制器是一种特殊形式的节流器。它在维持内部节流孔压降恒定的同时，使在线分析仪的样品流速也保持恒定。当控制器的压降保持稳定时，内部节流孔的尺寸设置不同值（或可调），可以在压力平衡后给分析仪的样品流速提供不同的设定值。

节流器的工作原理是对压力和流速已给定的过程流体，在流经给定的过程流体节流孔（精密孔、精密流量限制器，如红宝石或蓝宝石流量元件）时，就会产生一种声波，对于压力/流量/节流孔的任何设定，声波会将流经节流孔的流量限制在给定的最大流量。

精密流体节流器只用于对纯净气体或纯净流体的流量进行控制，流体要特别纯净。

低速流量控制器可采用一体化的转子流量计来设定流速（即流量），高速流量控制器则依靠其他系统元件来决定其流速。

② 样品流量测量

在线分析样品处理系统常用的流量测量是转子流量计，通过观察浮子在流量计所对应的刻度位置，来对体积流量进行直观测量。

转子流量计又称浮子流量计，常用在低体积流速的测量，锥形圆管材料有玻璃和金属两种，浮子材料有不锈钢、铜、铝、塑料及宝石等，浮子形状为典型的球形或带有锥形底的圆柱体。浮子材料的密度不同，可用于不同密度气体或流体的测量。

当气体或流体进入转子流量计时，浮子开始上升，直到浮子与锥形管内壁的空间大到气体刚好可以自由流动，浮子就不再上升，浮子所处的位置与锥形流量管上的刻度一一对应，据此可读出流量值。转子流量计受温度、压力变化的影响，只有在流量计出口压力与流量计标定时的压力相同时读数才是准确的。

样品系统中大多使用带针形阀的一体化浮子流量计，既可指示流量，也可调节流量。针形阀在流量计前后的位置很重要。在气体样品中，针形阀在流量计的入口，以防止流经浮子的介质压力降低形成悬浮小液滴；在液体样品中，针形阀在流量计的出口，以防止流经浮子的介质压力降低而形成气泡。转子流量计应垂直安装，流量计的精度取决于浮子悬浮在流量计锥形管中样品流的上升能力，浮子与锥形管的内壁要完全不接触。

带低流量报警接点的浮子流量计，当样品流量低于规定值时发出流量报警信号，以免分析仪发出错误的测量信号。其结构原理参见图 2-65。

能在高温、高压下指示流体流量的特殊转子流量计称为“铠装流量计”。流量计的锥形管是金属的，浮子带磁，与磁性流量管指示仪耦合。在浮子/指示仪耦合操作中基本上没有摩擦力，采用“铠装流量计”的样品流速比较可靠。

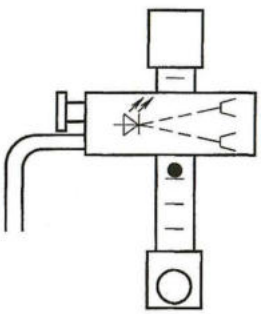


图 2-65　带低流量报警接点的浮子流量计

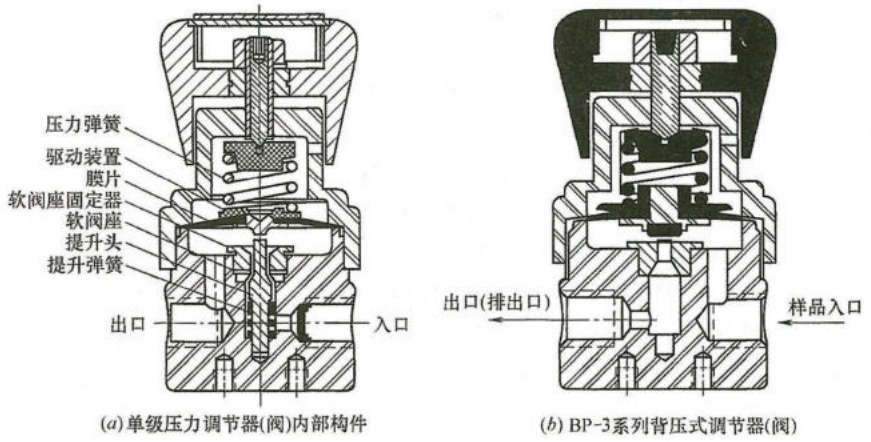
3）压力调节阀件

① 减压阀

压力调节阀也称为减压阀，是取样和样品处理系统中广泛使用的减压和压力调节部件。按照被调介质的相态，可分为气体减压阀和液体减压阀两类。

气体减压阀又有多种结构类型，如普通减压阀、高压减压阀、背压调节阀、双级减压阀、带蒸汽或电加热的减压阀等。国外生产

样品流路减压和调节的减压调节器（阀）和背压调节器（阀）的厂家很多，图 2-66 是单级压力调节阀及背压调节阀。



(a) 单级压力调节器(阀)内部构件　　(b) BP-3系列背压式调节器(阀)

图 2-66　单节压力调节阀及背压式调节阀示意图

② 稳压阀和稳压器

稳压阀的结构及工作原理和稳流阀的完全相同，稳流必须稳压，只有稳定了压力，流量才能稳定。鼓泡稳压器是常见的最简单的稳压装置，鼓泡稳压器俗称液封，结构简单。

③ 其他压力调节阀

气瓶减压调节阀，用于高压气瓶的减压调节阀分为单级压力调节器（阀）及双级压力调节器（阀）。双级气瓶压力调节阀的结构图参见图 2-67。

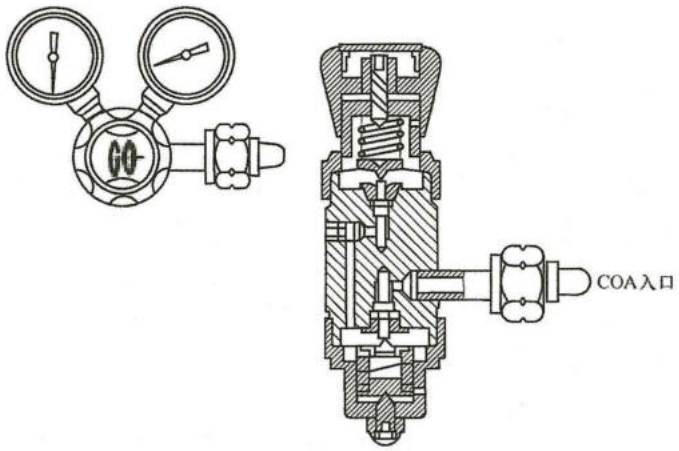


图 2-67　双级气瓶压力调节阀的结构图

泄压阀：又称为安全阀，用以保护分析仪和某些耐压能力有限的样品处理部件。

4）样品压力测量

样品压力测量主要用于样品流及辅助气体的压力测量，大多采用压力表测量，对一些需要精确测量的场合，可用压力传感器测量控制。

为保护取样泵的正常工作，泵入口的负压应在取样泵的工作压力范围内，当入口负压太大，超过承受范围，泵可能会损坏，如探头堵塞，泵入口负压会增大，在泵的入口前，用带电接点的真空压力表监测负压，设置报警点以保护泵。稀释法取样探头的零空气压力及稀释探头的真空压力也需要监测，以保证稀释探头的稀释比稳定。其他辅助气体的压力测量，包

括对仪表空气气源的压力测量、蒸汽压力的测量等，都需要采用压力表测量。

压力显示有绝对压力（psia 或 bara）、表压（psig 或 barg）及差压（psid 或 bard）。

其中绝对压力＝表压＋101325Pa　（101325Pa≈100kPa＝0.1MPa＝1barg）

常用的压力测量是各种压力表，测量氨气、氧气等介质压力应采用氨气、氧气压力表等专用压力表。测量强腐蚀性介质压力时，可选用隔膜压力表。带电接点的压力表见图 2-68。

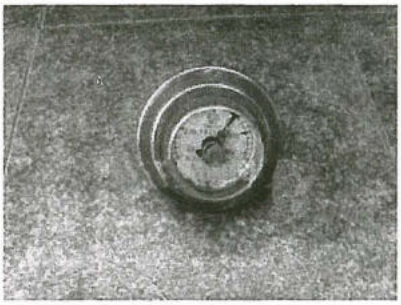


图 2-68　电接点压力表

（10）样品转换及有害物质处理技术

1）样品转换

对于复杂样品组分中的某一被测组分，当某种分析方法难以测定时，该组分可以采取已知的转换方式转换成可测量组分。

① 氮氧化物转换炉

排放源气态污染物中的 NO_x 通常包括 NO 及 NO_2，测定 NO 主要采用非分光红外气体分析仪或化学发光分析仪；测定 NO_2 时，要先将 NO_2 转换为 NO 测定，就需要采用氮氧化物转换炉。

红外分析仪测定通过氮氧化物转换炉后的烟气中 NO，测定结果就是以 NO 计的 NO 及 NO_2 总量，即 NO_x。化学发光分析仪采用双通道检测时，可分别测量 NO 及 NO_2，即一路测量 NO，另一路测量通过氮氧化物转换炉的 NO，实际结果是 NO 及 NO_2 总量即 NO_x，测量 NO_2 的含量，可由式（2-33）计算：

$$NO_2 = NO_x - NO \tag{2-33}$$

氮氧化物转换炉较多采用金属钼作催化剂，在高温下将 NO_2 催化还原为 NO，反应式如下：

$$3NO_2 + Mo \rightarrow 3NO + MoO_3 \tag{2-34}$$

钼转化炉的反应温度为 375±50℃，反应转化率≥96%。

钼在反应过程中会逐步消耗，转化率会逐步下降。在钼将耗尽时，转化率将急剧下降，这时钼需要再生或更换。钼催化剂经再生可反复使用，再生反应为：

$$3H_2 + MoO_3 \rightarrow Mo + 3H_2O \tag{2-35}$$

也有采用不锈钢转换炉的，不锈钢转换炉的工作温度为 650℃，转化效率也可以达到 95%。当烟气中有 NH_3 时，也会将其转化为 NO，干扰测定结果，而钼转化炉不会转化 NH_3。

② 催化反应转换器

测定脱硝装置出口的微量氨时，常采用直接法或间接法两种测量方式。直接法是采用激光光谱法原位测量，或采用原位紫外差分光谱法、高温型红外光谱法测定。由于被测样品的含水分及含尘量高，而微量氨的检测含量仅有 2～3ppm，很容易被样品中冷凝水吸收，分析难度较大。

间接法测量微量氨技术是在样品取样点，通过催化反应转换器，将样品中的微量氨定量氧化或还原，然后通过测定反应前后的 NO_x 浓度差值求出 NH_3 浓度的方法。

氧化法适用于样品中的氨浓度大于氮氧化物浓度时，将氨转换为氮氧化物测定。

化学反应为：

$$4NH_3 + 5O_2 = 4NO + 6H_2O \tag{2-36}$$

还原法适用于样品中的氮氧化物浓度大于氨浓度时，将氨还原为氮和水。

化学反应为：

$$4NO+4NH_3+O_2=4N_2+6H_2O \qquad (2\text{-}37)$$

催化反应转换器的催化剂常采用活性氧化钛（TiO_2）和添加活性金属元素材料构成。在用于脱硝烟气测微量氨时，采用还原法原理。因含有硫氧化物共存，催化剂添加了钒系化合物（V、V_2O_5）等材料，防止催化剂活性下降。催化剂制成蜂窝状，装填在催化剂反应管内，加热温度控制在350℃；催化反应器的催化剂效率一般可达到95%以上。

催化剂反应管安装在取样探头的探管后端，探管将样品分为两路，其中一部分样品通过催化反应器（NO_x— NH_3），一部分不通过反应器（NO_x），这两路气分别通过高灵敏度的化学发光法仪器测量 NO_x 差值，就能准确测定微量氨（同时还可测定 NO_x）。此种取样探头加催化反应器的处理方式被称为 TOP of Converter 的前处理转换器。

2）样品有害物质处理

排放源的烟气分析中含有害物质时，会影响分析系统的正常运转。当被测烟气中含有腐蚀性物质时，会腐蚀分析系统部件及管路，甚至会腐蚀损坏分析仪；当被测烟气中含有焦油、萘等易结晶物时，易堵塞分析系统管道；当被测烟气的背景气中含有干扰气体时，会引起分析仪检测误差增大。需要采取特殊的过滤或处理措施，除去有害物质。

① 采用过滤器去除有害物质

低含量有害组分及干扰组分可用吸附、吸收方法去除。可用的吸附材料参见表2-11。

可用的吸附材料 **表2-11**

吸附材料	可吸附的有害物质组分	对吸附材料有害的组分
活性炭	SO_2、CO_2、Cl、NH_3	溶剂或油品蒸气
硅胶	SO_2、CO_2、HCl、NH_3、C_nH_n、H_2O	水蒸气
氢氧化钙	SO_2、H_2O、Cl_2	CO_2
钠-钙	H_2O、Cl_2	CO_2、SO_2

采用吸附过滤器可去除微量有害组分，吸附过滤器结构参见图2-69。吸附过滤器的容积根据样气流量及有害组分及干扰组分的含量确定，小型的高度在100～200mm之间。样品由入口进入后，先沿狭窄流路向下流动，再转向上流动，样气与吸附剂充分接触，增强吸附效果，同时冷凝液滴直接滴落到过滤器底部。过滤器工作情况可通过透明玻璃外壳观察。

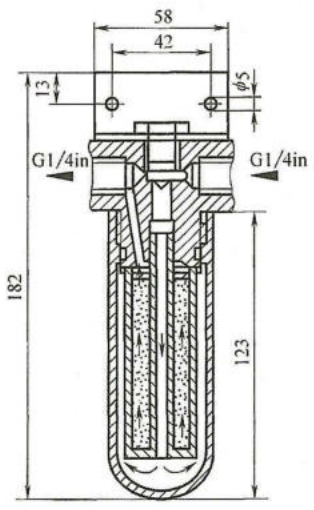


图2-69 吸附过滤器的结构示意图

② 专用硫过滤器

样品中含有有机硫化物如：硫醇、硫醚、二硫化物、多硫化物等情况时，可采用专用的硫过滤器脱除。如：被分析样品需要脱除微量硫化氢（硫化氢小于300ppm时）等气体时，可在脱硫器中装入浸渍硫酸铜（$CuSO_4$）的浮石管或无水硫酸铜脱硫剂（96% $CuSO_4$，2%MgO，2%石墨粉）可脱除硫化氢、二氧化硫及氨等腐蚀性气体。

3）样品系统防腐蚀材料选择

① 耐腐蚀性气体的金属材料选择

常见的腐蚀性气体有氨气、氯气、二氧化硫、三氧化硫、硫化氢、氟化物、氮氧化物等，特别是这些气体与水发生化学反应后产生极强的酸性物质，如氯气与水生成盐

酸和次氯酸、硫化物与水生成硫酸或稀硫酸、氟化物与水生成氢氟酸等，都将产生很严重的腐蚀。

样品处理系统的金属管材、接头、阀件及其他各种部件，与腐蚀性样品接触的材质大多可采用316不锈钢（Cr18Ni12Mo2Ti）。但在某些场合不锈钢也会被腐蚀，必须选择其他的耐腐蚀材质，例如钛合金。

② 样品处理系统部件常用的橡胶和塑料材料

样品处理部件的各种密封件、部分管材、抽吸泵、阀门、过滤器、容器等常采用塑料及橡胶材质。常用的塑料及橡胶材质，其耐腐蚀、耐温性能如下：

聚四氟乙烯（PTFE 、Teflon）具有优良的耐腐蚀和耐热性能，几乎可耐所有化学物质，耐温范围：－200～＋260℃，应用广泛。聚三氟氯乙烯（PCTFE、Kel-F）耐热及耐腐蚀性能稍低于PTFE，耐温范围：－195～＋200℃。聚全氟乙丙烯（FEP、F-46）耐腐蚀性能极好，耐温低于PTFE，耐温范围：－260～＋204℃。聚偏二氟乙烯（PVF2、Kynar）强度较高，耐磨损、耐腐蚀性能优良，耐温范围：－20～＋140℃。

可溶性聚四氟乙烯（PFA）由聚四氟乙烯与全氟乙丙烯按一定比例共聚而成。具有PTFE的各种优异性能，并具有良好的热塑性及机械强度。氟橡胶（Viton）耐温高，耐腐蚀性能优良，耐温范围－40～＋230℃。样品处理系统的密封圈，按长期使用的工作温度高低排序，依次为：氟橡胶包覆聚四氟乙烯、氟橡胶、硅橡胶、丁腈橡胶。

（11）样品处理系统的流程设计与自动控制技术

1）样品处理系统的流程设计要求

① 样品处理系统流程设计的依据

样品处理系统流程设计是依据CEMS在线分析项目技术协议书提出的系统解决技术方案，重点是所选择的在线分析仪对样品的要求以及样品条件。

样品条件，主要包括样品工况条件和环境条件。

样品工况条件主要包括：样品压力、温度、流量、含尘量、含水分、干扰组分、背景组分、被测组分及其要求；

环境条件包括：安装点的环境温度、压力、湿度、震动、电磁干扰、雷击等。

② 样品处理系统流程设计的基本要求

样品处理系统流程设计的基本要求是解决样品复杂工况条件下，如何通过流程设计保证样品取样、处理既不失真，又能满足仪器分析要求及满足客户样品条件要求，能长期安全、可靠工作，样品消耗量较少、系统各功能部件的集成应尽量简单、系统易于操作和维护等。

样品被分析的组分不失真，主要指样品取样、处理过程中，样品被分析组分不能产生吸收、吸附以及产生其他影响分析可靠、准确的影响误差。

在线分析仪对样品的要求，以在线气体分析仪器为例，要求样品气洁净、干燥，去除干扰组分的影响，满足在线分析实时分析的要求。

2）样品处理系统的流程设计技术

样品处理系统流程设计技术，主要包括：取样、传输、除尘、除湿、泵、压力及流量调节与控制技术等，上述的样品处理技术已经在相关章节给予了详细介绍。样品处理系统的流程设计是根据在线分析项目的不同要求，将适合样品条件的各个功能部件，按照系统要求进行流程优化设计和系统集成配置，实现个性化、专业化设计。

取样式在线分析系统的样品处理系统的流程设计，主要包括取样探头系统、样品传输、样品处理系统等设计；其中样品处理系统设计主要是除尘、除湿、除干扰物以及压力、流速

的调节等，取样泵是根据需要设计配置的。

系统流程设计包括相关的流路设计，如：多流路、多点取样、系统的分析回路、标定回路、快速放散回路、废气废液排放回路以及探头反吹回路等。

样品处理系统的流程设计技术，还包括流程的自动控制技术，通常对系统流程的自动控制采用 PLC 可编程控制器，按照系统流程设计要求，实现对样品处理各功能部件的控制，从而确保样品处理系统安全、可靠运行。

① 冷干法样品处理系统的流程设计技术

以冷干法抽取式 CEMS 的样品处理系统为例，典型的冷干法样品处理系统流程设计参见图 2-70。

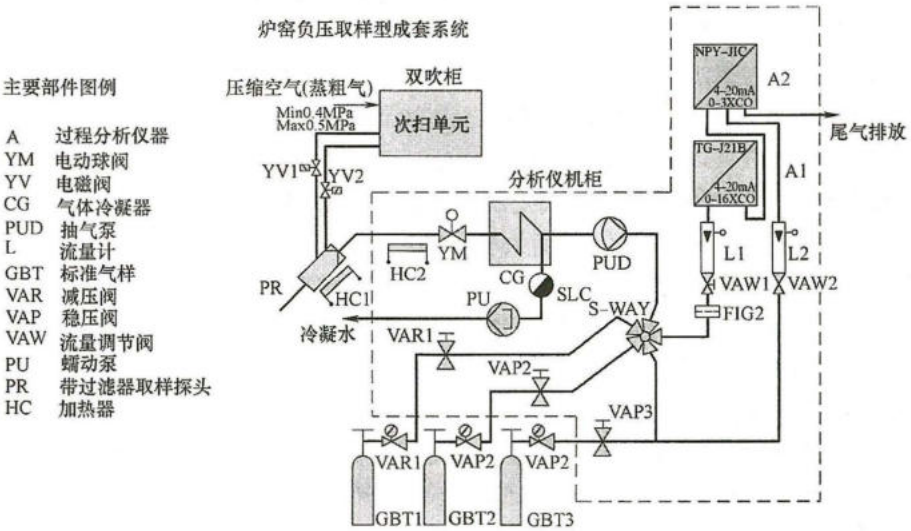


图 2-70 典型的冷干法样品处理系统流程图

取样探头：采用加热过滤形式，探头应加热保温，探头温控范围 0～180℃，探头内置粗过滤器，除尘精度一般为 2～3μm。内置过滤器采用陶瓷过滤器或不锈钢烧结过滤器，过滤器作为对烟气的粗过滤。过滤器外部采用电加热恒温控制，控温可以按需要调节，如控温在 150℃。探头的反吹采用自动反吹，反吹柜设在探头附近。

样品输送管线：采用电加热一体化管缆，直接送到分析柜的冷凝除湿器的入口，要求全程加热保温，例如保温在 110～120℃，确保样品在传输过程中样品的温度高于样品露点，全过程不会产生冷凝。

冷凝除湿器：按照样品含水量多少，采取一级或两级除湿，一级除湿可采用电子除湿器，或单路的压缩机式除湿器；二级除湿大多采取双路的压缩机除湿器，冷凝除湿的温度一般设定为 2～5℃。冷凝器在气路的相对高度一般应设置在低端，保证冷凝水直接顺利排出，防止在气路中留存。

排水：在预处理系统中，当需要在采样泵前排水时，由于泵前是负压，则需要使用蠕动泵。当需要在采样泵后排水时，由于泵后为正压，则使用蠕动泵排水、电磁阀自动排水、手动排水等方法均可以。

样品除尘：按照含尘量多少，采取一级或多级除尘，一般情况下，取样探头内设前级过滤器，在分析仪前设膜过滤器，其除尘过滤精度达到 0.1～0.3μm。如采取 3 级除尘，则在除湿器前设气溶胶过滤器，实现细过滤和除去样品中的酸雾滴。

抽气泵：通常烟道气的压力是负压或微正压，系统需要烟气压力选取合适取样泵抽取样气，冷/干法 CEMS 取样泵大多采用隔膜泵，要求耐腐蚀，抽气性能强，能满足分析系统对样气的流量要求。通常设置在除湿器后或两级除湿中间，取样流量约 3～5L/min。

② 样品处理系统的流路设计技术

样品处理系统的流路设计主要包括系统内部分析回路设计、系统标定回路、系统反吹回路等设计技术。

以冷/干法 CEMS 的样品处理流程为例，样品通过除尘、除湿处理后进入分析回路，系统分析回路设有流量、压力调节装置，保证分析仪对被测样品的压力流量要求。一般单台分析仪样品流量约 1L/min。根据被分析对象的要求，可选用的在线分析仪可以是多台仪器，多台仪器的供气大多采取并联模式，并满足各个分析仪对流量的要求。在线分析仪的模块化发展，已经实现一台仪器可同时完成多组分分析，例如：一台在线分析仪内可安装多个红外、热磁及电化学分析模块，实现 1～6 个多组分分析。因此，大多数分析系统的分析回路只有 1～2 台分析仪，每台分析仪设有流量、压力调节阀及流量计，确保分析仪所需要的流量。

系统标定回路通过切换阀、稳压阀及调节阀等管路、阀件，将标准气通入分析仪进行自动或手动标定，仪器标定从仪器入口通入标气。CEMS 标定按标准要求，必须从取样探头通入标气，称为系统标定。分析仪的自动标定，又分为仪器内设自动标定和仪器通入标准气自动标定，光学式分析仪在实现仪器内部标定时，可以采用标准气室或光学滤光片进行定标。有的专业标准提出，在线分析仪除自动标定外，必须定期（如每月、每季度等）采用标准气进行标定。系统标定一般通过系统的数据处理系统或 PLC 实现自动标定。

系统反吹回路，采取干净的仪表用压缩空气，通过 PLC 自动控制定时反吹。对加热过滤取样探头实行反吹时，必须采取加热脉冲式吹扫，例如：出厂时由 PLC 设定反吹周期为 8 小时，脉冲反吹为 3～5min，脉冲反吹的频次为 5×2s=10s，停 5s，可以根据现场情况调整探头反吹周期，在 1～24h 选择。必要时，反吹的仪表空气要经过预热，要保证在反吹时，不能降低取样探头的加热恒温温度。

快速放散回路，是为了加快系统分析速度，满足分析系统的响应时间要求，放散流量约 1.5～2L/min。废气废液排放回路，是通过排放总管后排出分析小屋，注意对毒害气体排放应经过处理。系统设有各种报警功能，如：湿度报警、流量报警及加热温度报警等功能。

③ 热湿法 CEMS 的分析流程设计

热湿法 CEMS 通常由高温型取样系统、高温型测量系统及分析机柜等组成。高温型取样系统包括带加热过滤器的高温取样探头、高温条件下运行的测量/反吹/校准阀件和电伴热烟气传输管线和反吹管线等。

高温测量系统现在使用的检测系统有两种：一种在分析仪前使用抽取泵，通常将高温型抽取泵、连接管道和高温分析仪器的传感器气室等安装在一个恒温柜中；一种在分析仪后设置射流泵，通过分析仪来抽取样气。

热湿法 CEMS 分析流程设计时应考虑分析仪的工作特性，确定所需的气量、加热温度等。

在用于烟气中含有 HCl、HF、NH_3 的微量检测时，要特别注意连接管道管壁的吸附性，即使采用 PTFE 材料的气路对 HCl、HF、NH_3 仍有吸附。

为防止灰尘在探头处沉降、积聚，将采样探头及过滤器堵塞，将经过缓冲的压缩空气引入进行大流量吹扫，可增加压缩空气程控反吹的设计，将过滤器和采样探头中停留的灰全部

吹回烟道中去。探头疏堵自动完成，维护量大幅减少、管道阻力平稳，可提高测量数据的精确度和保持稳定的系统快速响应。

3）样品处理系统的自动控制

在线分析系统常用规模较小的 PLC，其 I/O 点数比较少（几十点），功能要求不高。大多选用整体式、低档和小型的 PLC，如：S7-200，具有很好的性价比和广泛的应用业绩。

PLC 基本组成包括中央处理器（CPU）、存储器、输入/输出接口（缩写为 I/O，包括输入接口、输出接口、外部设备接口、扩展接口等）、外部设备编程器及电源模块组成。PLC 内部各组成单元之间通过电源总线、控制总线、地址总线和数据总线连接，外部则根据实际控制对象配置相应设备与控制装置构成 PLC 控制系统。

CEMS 的样品处理系统 PLC 自动控制，主要实现以下的功能：状态控制、流程控制、报警功能及信号采集。通过 PLC 实现分析系统的逻辑控制、数据采集、数据通信等功能。

① 系统状态监控包括取样分析工作状态、探头反吹状态、系统标定状态及系统故障状态的自动控制。

a. 系统处于取样分析工作状态时：抽气泵正常工作，从探头抽取烟气，经过传输管线、除尘、除湿处理及压力流量调节后送分析仪分析。

b. 系统处于探头反吹状态时：抽气泵停止工作，接通反吹电磁阀，压缩空气对探头实施脉冲反吹，反吹结束，抽气泵恢复工作，系统进入正常分析工作状态。反吹包括对探头的自动反吹或手动反吹控制等，按照用户工况条件，PLC 可以设定自动定时反吹周期及脉冲反吹时间。例如在出厂时，预设定反吹周期 8h，每次脉冲反吹周期 5min，采取循环 5×2s（10s）间断吹扫，再连续吹扫 5s。探头反吹按照流程要求，要进行探头过滤器的内部及外部反吹，确保将附着在探头过滤器内部及外表面的烟尘从探头管道吹回烟道内。

c. 系统处于标定状态时：按照手动或自动标定的要求，打开标准气瓶压力调节阀，切换阀门到标定位置，此时烟气经放散回路排出，标准气按照标定要求接通零气或量程气，按照标定回路要求进入分析仪进行标定，同时标定数据输入 PLC 保存。

d. 系统处于故障状态报警时：按照报警的类别不同对系统流程进行不同的处理，如由于探头堵塞、流量下降报警，将停止泵抽气，防止泵损坏。如湿度报警，样品气含水量增加，可能引起分析仪测量气室进水损坏，也必须停止泵工作。系统报警包括温度报警、压力报警、湿度报警、流量报警等系统故障报警，以及设定的分析测量值的报警等。

对故障报警，PLC 将报警传感器的开关量信号采集后送 DAS 进行处理，并控制各电磁阀及泵的工作状态。温度报警主要是对取样探头及传输管线的保温或恒温控制是否正常进行判定；压力报警主要是对泵前的负压判定，可判断探头堵塞的程度，如探头堵塞时，抽气泵长期工作会损坏电机；湿度报警可对系统的冷却除湿进行判定，当除湿器损坏时，样气水分增加，会造成流量计进水，甚至仪器测量气室进水损坏。PLC 在接受 DAS 指令后，会采取相应的保护措施。

② 信号采集传输 PLC 主要采集的模拟信号包括：颗粒物检测仪器的输出模拟信号、气体分析仪检测模拟信号（含 SO_2、NO_x、O_2）以及烟气参数检测模拟信号（烟气温度、压力、流速、含湿量）等。

2.1.4.3 分析仪

（1）红外吸收光谱气体分析仪

1）国产 Model 型 1080 红外线气体分析仪

① 简介

Model 型 1080 红外线气体分析仪可用于连续测量 CO、CO_2、CH_4、SO_2、NO 等气体浓度，可同时测量其中的一个或多个气体成分。Model 1080 红外线气体分析仪是一种多通道、多组分分析器。采用了世界先进的红外气体检测技术，具有优良的稳定性、选择性和高灵敏度，可以广泛用于锅炉、电厂烟道气、化工流程、石化工业、冶金工业等领域，也可以用于实验室分析。

② 仪器安装

a. Model 1080 红外线气体分析仪用于流程分析时应安装在尽可能靠近样气的位置，以减少滞后时间。

b. 仪器应避免安装在有强烈震动的地方，避免阳光直射。

c. 仪器应安装在环境清洁、通风良好的地方，环境温度为 0～40℃，相对湿度＜90%。

d. 本仪器为非防爆型电器设备，禁止在有爆炸危险的场所使用。

e. 采用盘架安装本仪器时，将仪器轻轻放入仪表盘开孔柜内，由下面安装板托起，并用 4 只 M5 的螺钉固定。

③ 仪器的启动

本仪器是智能仪器，接通电源，5 分钟预热后仪器已进行一次零点标定，处于测量状态，可正常使用（以 SO_2、O_2 为例）。CO_2 分析仪量程＜3% 的，仪器在预热系统调整期间，先通零点气，零点气必须选用洁净干空气。

仪器上电后屏幕显示如下：

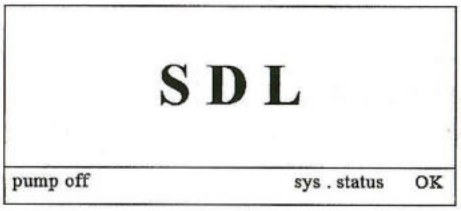


图 2-71　开机界面

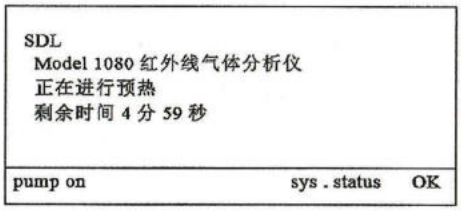


图 2-72　预热界面

预热结束后仪器进入测量。

屏幕显示如下：

仪器上电后 30min 自动调零一次，以后的调零时间及周期按主菜单的“自动调零设定”中的设定进行。

④ 菜单操作说明

按“ESC”退出测量，进入仪器主菜单：

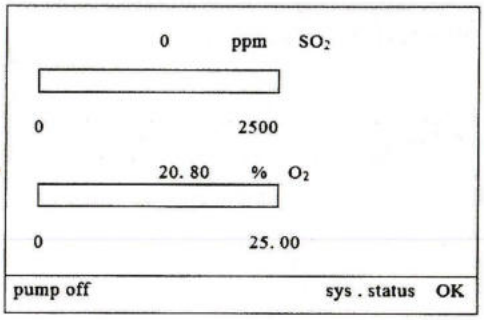


图 2-73　测量界面

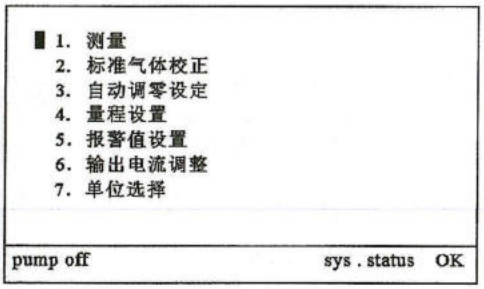


图 2-74　主菜单

a. “测量”状态

按“↑”或“↓”按键可移动光标，选择仪器状态，光标在1时，为测量位置状态，按“OK”键仪器进入测量状态。

屏幕显示被测参数的数值、单位及名称。左下角表示泵的开关的状态，右下角表示工作系统状态，正常时显示为“OK”。

在测量中泵状态为关时．按“PUMP”键，　则开泵抽取样气。此时若要关泵，按下“PUMP”键，则可关泵。

“CAL”为手动调零键，手动调零时仪器由“3 空气入口”抽进空气标定零点（即零点调整），时间为1min。（CO_2 仪器量程<0～3%，请先由“1 Inlet”通氮气再按“CAL”键）。

系统调整结束后，屏幕出现：

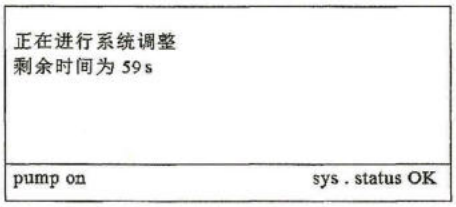


图 2-75　手动调零界面

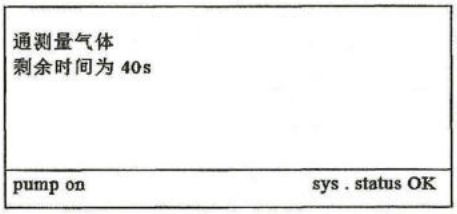


图 2-76　手动调零气体置换界面

通入测量气体40s后仍回到自动测量状态。

按“ESC”可返回到主菜单。

b. “标准气体校准”状态

仪器在出厂前已由制造厂进行过标定，用户使用中可以用标准气进行校准。

校准的准备工作：

标定前仪器要进行预热，预热时间不得少于2h；

将标准气连接到气体入口；

气体流量应保持在0.5～1.5L/min之间稳定数值。

其标定方法如下：

在上述主菜单中用“↑”或“↓”键将光标移至“2. 用标准气体进行校正”，按“OK”键。

（a）SO_2 标定

将光标移至“1. SO_2 标定”处，按“OK”键出现如下提示：

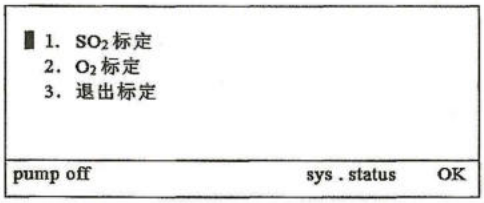


图 2-77　标准气体校正界面

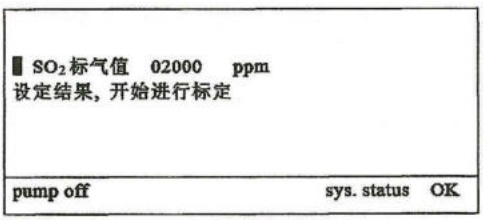


图 2-78　SO_2 标定设定界面

输入标气值，利用“↑”或“↓”键将光标移至“SO_2 标气设定值”处，按“OK”，光标将移至第一位数字，进行第一位数的设定。通过“↑”或“↓”按键选定所需数值，利用“→”键移至设定值的第二位数以此类推，直到最后一位数选择完毕。按“OK”键确认。并将光标移至“设定结束，开始进行标定”按“OK”键。

若此时已将标准气通入仪器“1 Inlet”入口，按“OK”键；

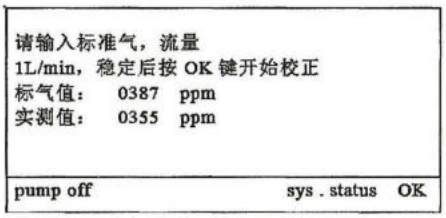


图 2-79　SO_2 标定预备界面

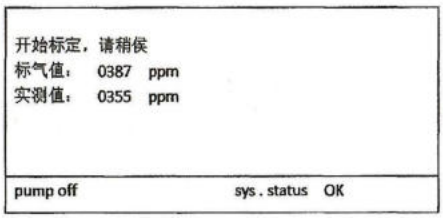


图 2-80　SO_2 标定启动界面

约 1min 后其中标气值与实测值相同则标定完成。

（b）O_2 标定

将光标移至“2. O_2 标定”前，按“OK”键并按照各项提示进行即可。

c. 退出

当各参量标定完成后，将光标移至“6. 退出”按下“OK”键则退出标定至主菜单。

d. 自动调零设定

在主菜单中将光标移至“3. 自动调零设定”前，按“OK”键。

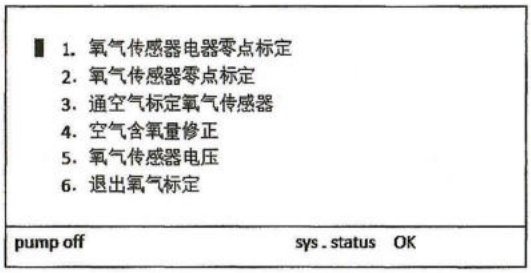


图 2-81　O_2 标定界面

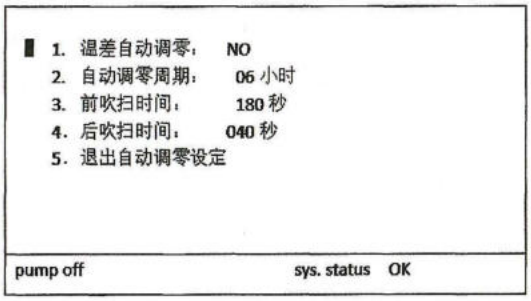


图 2-82　自动调零设定界面

自动调零周期：将光标移至“1.”自动调零周期”前，按“OK”键，通过“↑”或“↓”按键选定所需数值，利用“→”改变数值位数设定完毕按“OK”。

前吹扫时间、后吹扫时间设定方法同上。

退出自动调零设定：将光标移至“5. 退出自动调零设定”前，按“OK”键退出。

e. 量程设置

在主菜单中将光标移至“4. 量程设置”前，按“OK”。

SO_2 量程设置：

将光标移至“1. SO_2 量程设置”按“OK”则屏幕显示：

第一量程、第二量程及自动量程的选择：当光标在如上图行首时，按动“OK”键可进

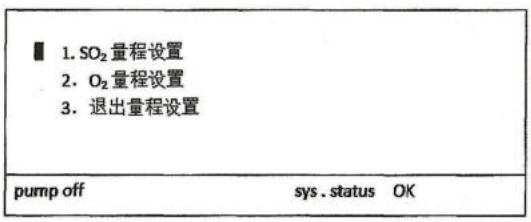


图 2-83　量程设置界面

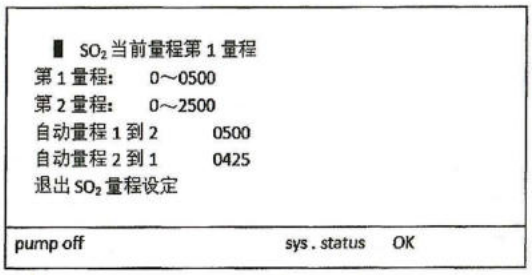


图 2-84　SO_2 量程设置界面

行第一量程、第二量程或自动量程切换的选择。按需要选择好量程。

f. 报警值设置

在主菜单中将光标移至“5. 报警值设置”前，按“OK”。

SO_2 报警值设置：将光标移至“1. SO_2 报警值设置”按“OK”则屏幕显示：

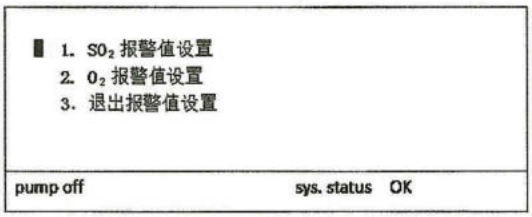


图 2-85 报警值设置界面



图 2-86 SO_2 报警值设置界面

其中数值选定方法请参见“4. 量程设置”。

g. 输出电流调整

该功能可对各路 4～20mA 信号进行调整。为接入各种负载（记录仪、控制器等）提供很大方便。在调整时，实际测量值不变。

在主菜单中，将光标移至“6. 输出电流调整”前，按“OK”键。

将光标移至“1 号模拟输出调整”按“OK”键。

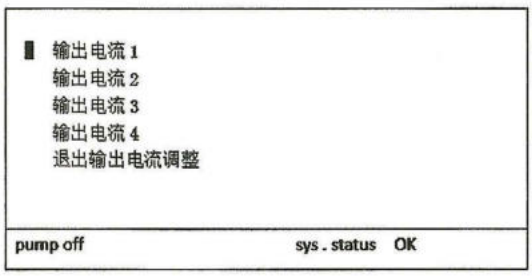


图 2-87 输出电流调整界面

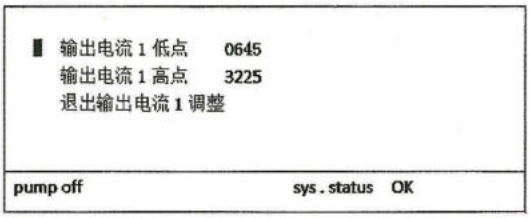


图 2-88 输出电流 1 调整界面

观察 1 路电流输出值，需调整时，选择其低或高点，通过“↑”或“↓”键进行调整。调整后将光标移至“退出输出电流 1 调整”前，按“OK”键，退出输出调整。其他各路输出的调整类同。

h. 单位选择

在主菜单将光标移至“7. 单位设置”前，按“OK”键。

将光标移至“1. SO_2 单位设置”按“OK”键则光标移至“ppm”处，按上或下键更改 SO_2 单位改为 mg/m^3，再按一次上或下键，单位重新为 ppm。再按一次“OK”键设置完成。

光标上下移动，使用相同的方法可以更改其他组分的单位（单位为%的不可以更改）。

i. O_2 传感器电压

在 O_2 标定界面，按“↑”或“↓”按键可移动光标至“5. O_2 传感器电压”，按“OK”键，可显示氧气传感器的电压值。

当显示电压低于 7 mV 时，表明应更换氧传感器。

此时按“ESC”键，将退回到主菜单。

注：仪器至少预热 30min 以后开始测量。因为只有经过这段时间后，仪器才具有好的稳定性。

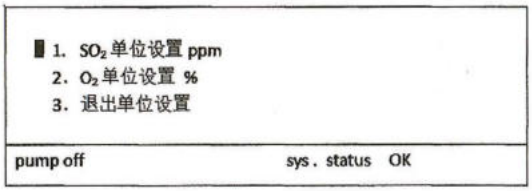


图 2-89　单位设置界面

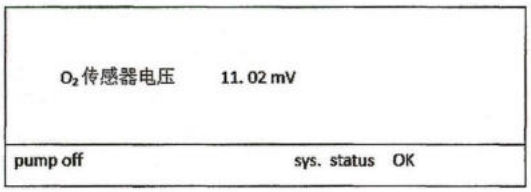


图 2-90　氧传感器电压显示界面

⑤ 仪器使用注意事项

a. 仪器 220V 供电，打开机壳会有危险的电压存在要谨防触电。

b. 被测气体或标准气是有毒、有害、爆炸性气体时，一定要将气排出室外，保证室内通风良好。

c. 仪器使用的电源插座必须接地良好。

d. 仪器显示屏的对比度由侧面主板左口端的 RW1 调节。

e. 经过一段时间以后，标准气体的精确度会下降，一旦超过了有效期标准气体不能再用于校正分析仪。

f. 仪器调零气流量可通过电磁泵上的分磁片上下移动进行调整（打开泵上方一字螺钉即可调节），此操作只适用于带电磁泵调零的仪表。

g. 仪器关键零部件为检测器、SDL 控制主板。

⑥ 仪器的维护

为了保证仪器的正常运行，用户须定期对仪器进行取样系统的检查和维护，这包括：

a. 定期对所有通气管和管接头检查，发现接头不严漏气，及时处理。

b. 每年对仪器的维护工作期间应检查仪器气路的密封性。

c. 对仪器内部气室入口端和出口端连接的安全过滤器的检查，发现过滤器污染要及时更换。

d. 仪器在使用过程中发现切光电机有噪声，则须更换电机，禁止向电机轴或轴承上加润滑剂。

e. 本仪器校正周期为半年。

2）ULTRAMAT 23 红外线气体分析仪

① 简介

ULTRAMAT 23 气体分析仪采用非分散红外法测量原理，一次能够测量四种气体组分，最多可同时测量三种红外敏感气体，例如：CO、CO_2、NO、SO_2、CH_4、R22（氟利昂 $CHClF_2$）以及采用电化学氧气测量单元测量 O_2。采用微流量检测器，具有反应快、灵敏度高等特点，可以广泛用于环境监测、石油化工、水泥工业等领域。

② 仪器安装

a. 将仪器轻轻放于机柜内，由下面安装板托起，用 4 只 M5 的螺钉固定。

b. 去除防尘帽，连接测量气路。

c. 连接 220V 电源线，连接 37 针通信线缆。

③ 仪器的启动

接通电源，30min 预热后仪器自动进行一次零点标定，处于测量状态，可正常使用（以 SO_2、O_2 为例）。仪器在预热系统调整期间，先通零点气，零点气一般使用干空气。

显示屏和输入面板如图 2-91 所示。

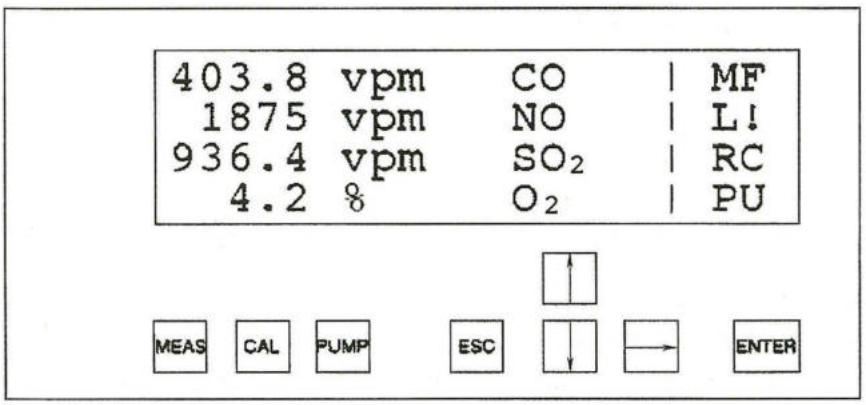


图 2-91 有显示屏和小键盘构成的输入面板

每行的最后两个位置是用来显示某些分析仪状态的，它们的含义如下：

M：维护请求

F：有故障

L：超过极限

!：故障已被记录在日志中并且不再存在

R：遥控控制

C：功能控制（分析仪被解码，或者通过 RS485 串行接口来连接，或者自标定，或者大约在预热模式进行到第 30min 时）

P：泵在运行

U：未编码

仪器上电后进入预热模式。

分析仪可以处于下列三种操作模式中的一种模式：

预热模式（Warm-up mode）

测量模式（Meas. mode）

或者输入模式（Input mode）

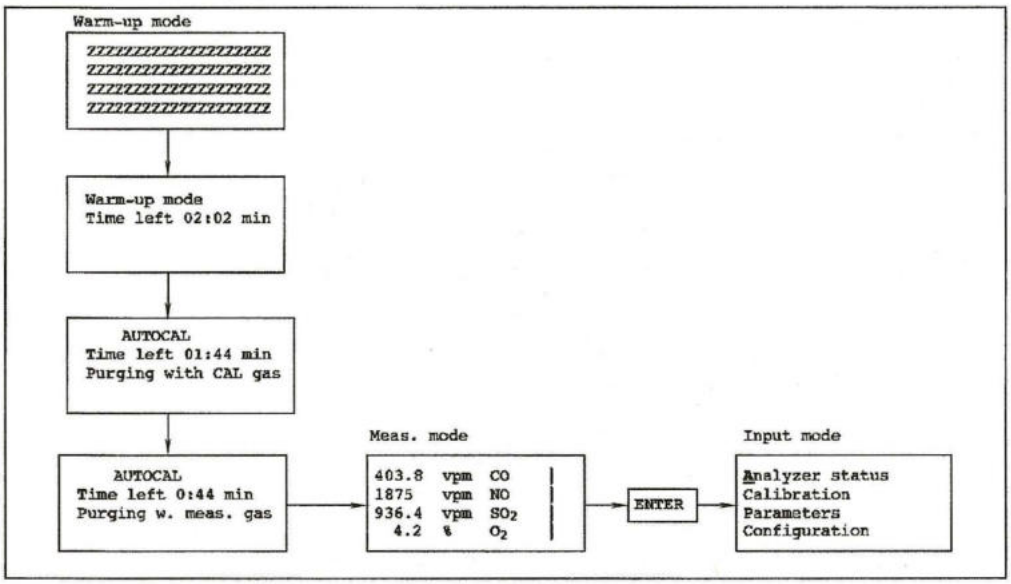


图 2-92 预热模式、测量模式、输入模式

接通电源之后，ULTRAMAT 23 会测试各显示元件。在该测试过程中，所有的元件同时点亮约 5s。

旁边的这个显示框会随后在剩余的预热时间里出现，剩余的预热时间以秒做倒计时到 00：00（min：s）

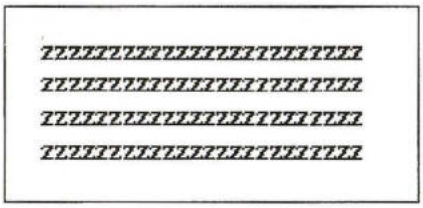


图 2-93　开机点亮屏幕界面

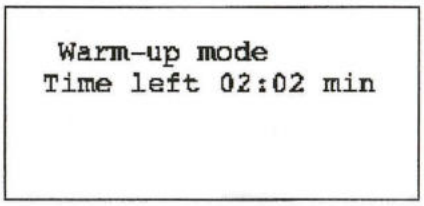


图 2-94　预热倒计时界面

在预热模式过程中，分析仪首先会进行自标定。自标定气体（氮气或者空气）的流量在底行中显示，标定的剩余时间在它上面显示，该标定不可中断。

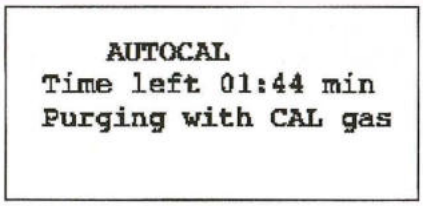


图 2-95　自标定界面

④ 测量模式

被测组分以及它们的数值、单位（mg/m^3）、vpm 或体积百分数在显示屏中同时输出。分析仪的状态发生一个改变时，相应的字母会出现在最后两列中（实例中出现的字母为“P”）。分析仪保持在测量模式下直到进行自动标定（自动、遥控控制或手动）或者直到手动将分析仪切换到输入模式时为止。

⑤ 菜单操作说明

按“ENTER”退出测量，进入仪器输入模式：

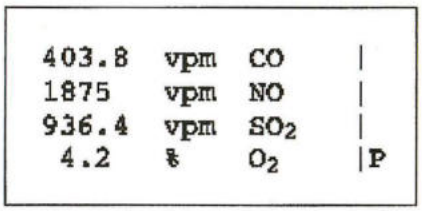


图 2-96　测量模式

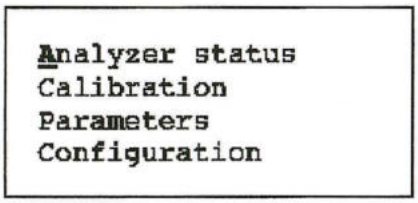


图 2-97　主菜单

a. Analyzer status \ Calibration \ Parameters \ Configuration 状态

按“↑”或“↓”按键可移动光标，选择相应的操作，按“OK”键仪器进入相应状态。

b. 量程修改操作（以 NO 为例）

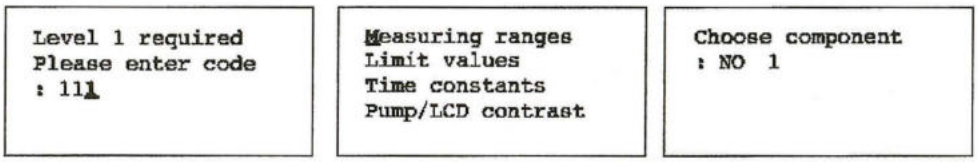


图 2-98　选择组分修改量程界面

c. 分析仪传感器状态查询

进入图 2-97 中第一项“Analyzer status”选项，选择“IR Diagnostic Values”可查看分

析仪相对应的诊断值。

d. 分析仪校准

仪器在出厂前已由制造厂家进行过标定。用户使用中用标准气进行校准。

校准的准备工作：

标定前仪器要进行预热，预热时间不得少于 2h。

将标准气连接到气体入口

气体流量应保持在 0.5～1.5L/min 的稳定数值

其标定方法如下：

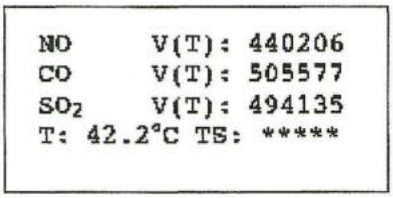


图 2-99 对应 IR 传感器的诊断值

在图 2-97 选项中选择“Calibration”，用“↑”或“↓”键将光标移至“Calibr. IR channels”，按“OK”键，进入标气值设定界面，选择相对应的组分，待仪器测量稳定后进行校准。

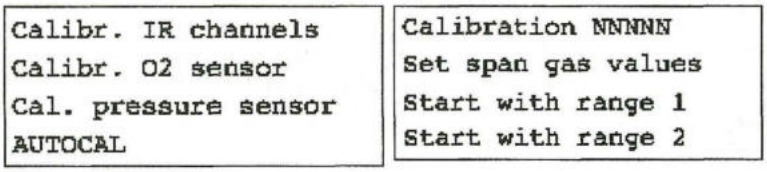


图 2-100 标定菜单

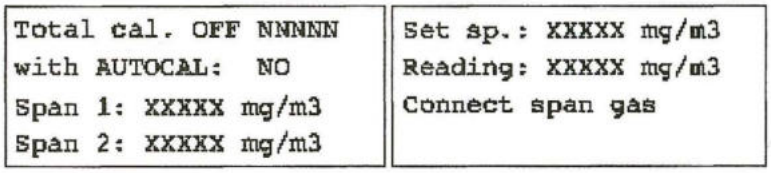


图 2-101 设定标气值等待测量稳定

⑥ 仪器使用注意事项

a. 仪器 220V 供电，仪器使用的电源插座必须接地良好。

b. 仪器环境温度一般要求为 0～40℃，且温度波动小。

c. 仪器排气需连接至室外，防止污染室内空气，同时干扰零点校准。

d. 样品气需经过除尘、除湿后方可进入仪器，防止污染气室。

e. 测量期间应保持进气流量稳定。

⑦ 仪器的维护

为了保证仪器的正常运行，用户须定期对仪器进行取样系统的检查和维护，主要包括以下内容：

a. 检查分析仪屏幕状态，发现“M”或“F”显示查看日志并恢复。

b. 检查安全过滤器，发现过滤器污染要及时更换。

c. 定期对所有通气管及接头进行检查，防止漏气。

d. 定期检查氧传感器电压，电压不足时更换。

3）EL3020 型非分散红外分析仪

EL3020-Uras26 是一款基于非分散红外吸收原理（NDIR）的分析仪，吸收的波长范围是 2.5～8μm。以气体对红外线辐射的吸收为基础的，通过测量相关波段红外线的衰减幅度

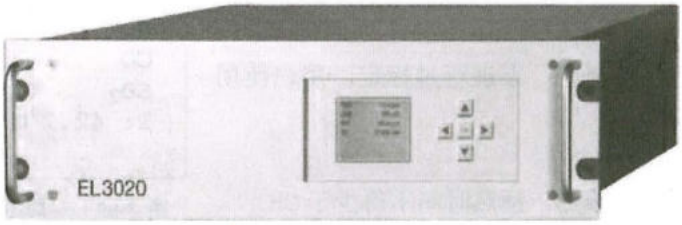


图 2-102　EL3000 分析仪

来测量相应气体的浓度，适用于在排放监测和工业过程应用中连续测量气体。

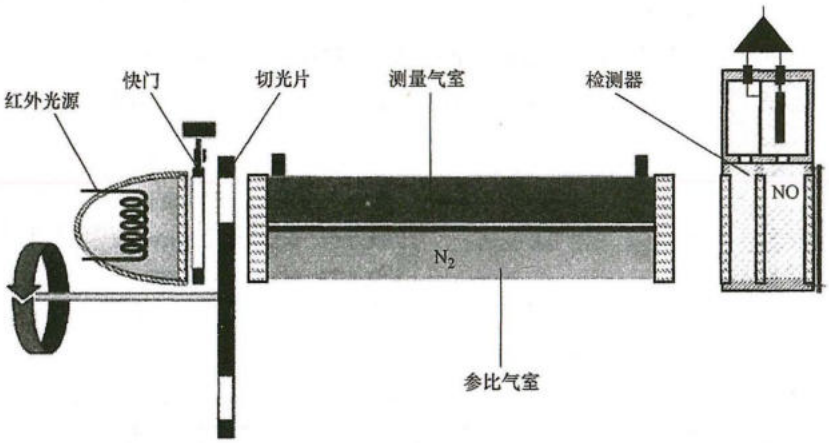


图 2-103　EL3020 红外分析仪工作机理

① 技术特点

a. 一台分析仪最多可以测量四种红外活性气体，常见的组分包括 SO_2、NO、CO、CO_2、CH_4、N_2O 等。

b. 分析仪采用充气式检测器，检测器充满了与所需测量组件相同的气体。这使检测器能够提供优于样品气体混合物中存在的其他气体的最佳灵敏度和高选择性，从而实现低检测限。

c. 分析仪的每个光路均采用测量气室和参比气室的双气室设计，参比气室密封高纯氮气、测量气室流通样气。双气室结构可以消除光源波动、光学和电子元器件变化引起的测量噪声，并实时修正光源强度，从而使分析仪抗干扰能力强，稳定性更高。

d. 分析仪光源为陶瓷光源，抛物面反射体，寿命长，密封隔爆。

e. 超低排放监测分析仪标配压力补偿和恒温模块。整个红外测量模块恒定在 55℃，极大地降低了温度和压力对测量的影响。

f. 超低排放监测分析仪标配内置调节池。调节池内部密封 SO_2、NO 标准气体，德国 TUV 认证超过十年无消耗不失效。分析仪本体不再需要外部钢瓶气以及频繁阀门开启，即可自动完成零点和量程校准，保证超低量程分析仪长期稳定不漂移。同时，还可免除对昂贵的标准气和减压阀的需求，降低了人工校验仪表可能导致的误差。

② 技术参数

a. 量程范围：

SO_2：0～25ppm 至 0～100vol%；NO：0～75ppm 至 0～100vol%；CO：0～100ppm

至0～100vol%；

CO_2：0～100ppm 至 0～100vol%；CH_4：0～100ppm 至 0～100vol%；N_2O：0～100ppm 至0～100vol%；

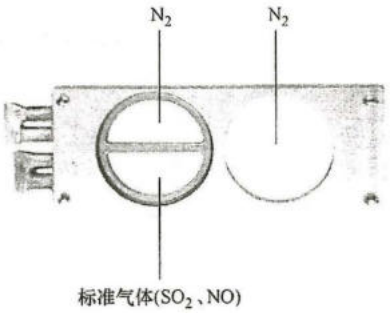


图 2-104 充气式内置调节池

b. 线性偏差：≤1%F. S.

c. 重复性：≤0.5%F. S.

d. 零点漂移：≤1%F. S. /周

e. 灵敏度漂移：≤1%测量值/周

f. 检测极限（4σ）：≤0.4%量程，当电子 T90 时间（静态/动态）=5/0 秒时

g. 响应时间：T90=2.5 秒，当测量池长度=175mm、样气流速=60l/h

h. 信号输出：4～20mA、DI/DO、RS232/485、Profibus、以太网

③ 分析仪开机调试

a. 检查安装情况。气体分析仪是否已安装稳固，所有气管，包括压力传感器是否已正确连接和安装。所有信号线和电源线是否已正确安装到位并连接稳妥，气体制备、校准和处置废气所需的所有设备是否均已正确连接并准备就绪。

b. 调试前吹扫。在启动气体分析仪和样气供气之前，必须吹扫样气气路。

吹扫气：　　氮气

吹扫进气管：　　吹扫气流速最高为 100L/h，持续时间约为 20s

c. 接通气体分析仪电源。系统导入过程中，屏幕将显示气体分析仪名称的软件版本号。启动阶段结束之后，显示屏将切换至测定值显示界面。检查气体分析仪的配置，如有必要进行更改。

d. 开机预热阶段结束后，气体分析仪即已准备就绪，可以执行测定。开机预热阶段持续时间约为 0.5～2h。

e. 待分析仪热机完成，运行稳定后（建议 24h），通入零气和标准气体，检查气体分析仪的校准情况。

f. 样气供气。

④ 分析仪操作

a. 在测量模式下，屏幕将显示每种样气成分的名称、测量值数值和测定值物理单位。如果样气成分名称出现正常显示和反白显示交替闪烁，则表示测量值超出了测量范围限值。

b. 状态图标


执行自动校准。


有一条处于激活状态的状态消息。


状态信号，“必须进行维护”处于激活状态。


状态信号，“故障”处于激活状态或者维护开关被设置为“开”位。


正在保存配置。该图标闪烁显示。当屏幕显示该图标时，切勿关闭气体分析仪电源！

⑤ 分析仪校准

为了保证分析仪的测量准确性，需要定期对分析仪进行校准，校准的方式分为自动和手动。

a. 手动校准操作如下：

必须在开机预热阶段结束后（建议稳定运行 24h 后），才能执行气体分析仪校准。

操作路径如下：▲ Operation（操作）▲ Calibration（校准）▲ Manual calibration（手动校准）

b. 零点校准

选择菜单项“零点/单点校准”。

选择单独的样气或“全部”。

检查零点设定值并根据需要进行设置。

输入零点参考气。

当测定值显示稳定后，启动校准。

保存校准或重复上述操作步骤 3。

c. 量程校准

选择菜单项“量程校准”。

选择样品组分。

检查终点设定值并根据需要进行设置。

输入量程气。

当测定值显示稳定后，启动校准。

保存校准或重复上述操作步骤 1。

⑥ 日常维护

a. 检查分析仪是否有报警信息，状态灯是否正常。当状态信息处于激活状态时，按下▼键，即可显示信息列表。

b. 检查分析仪样品压力及流量是否正常，过滤器是否污染，如发现过滤器污染，请及时更换，如短时间内频繁出现污染，除更换过滤器外，请检查前端预处理装置。

c. 检查分析仪样品出口是否通畅，如有凝液需及时排出。

d. 定期通入标气对分析仪进行检查或者标定，标定时观察漂移倍数是否过大。

e. 定期检查分析仪测量池是否污染，如有污染需用蒸馏水或酒精清洗。

4）红外吸收分析仪

① 简介

多模块化 S710 采用了单组分/多组分红外吸收法，电化学法等多种原理智能模块化的成熟产品，S710 前面板显示屏和操作按键组成，如图 2-105 所示。

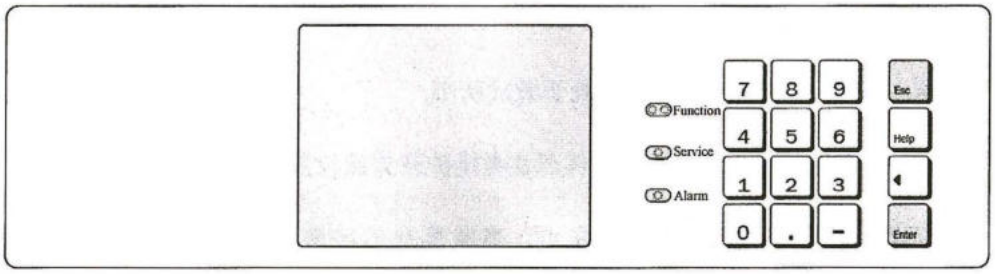
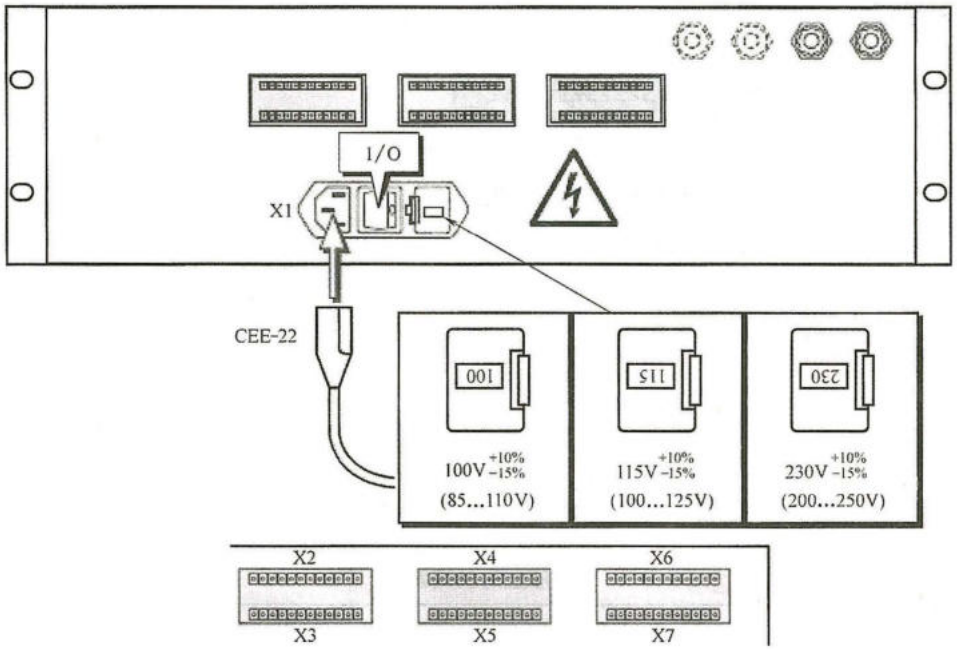


图 2-105　操作和显示

后面板和连接接口如图 2-106 所示。



后面板中的其他信号连接端子图

图 2-106 S710 电源连接，电源开关，信号连接

X1 是 POWER INPUT：电源线接口，控制分析仪的电源开关。

X2 是两组 RS232 通信接口，详见图 2-80 X2 端子接口。

X3，X6 是 TR1…TR8 8 个晶体管有源输出和 CI1…CI8 8 个控制光耦合输入。

X4，X5 是开关量输出，8 路无源继电器开关量输出，可编程为仪器故障，维护，报警以及测量值报警等输出。

X7 是测量值的模拟量输出，主要有 4 路模拟量 4～20mA DC 输出。可参见图 2-107 X 7

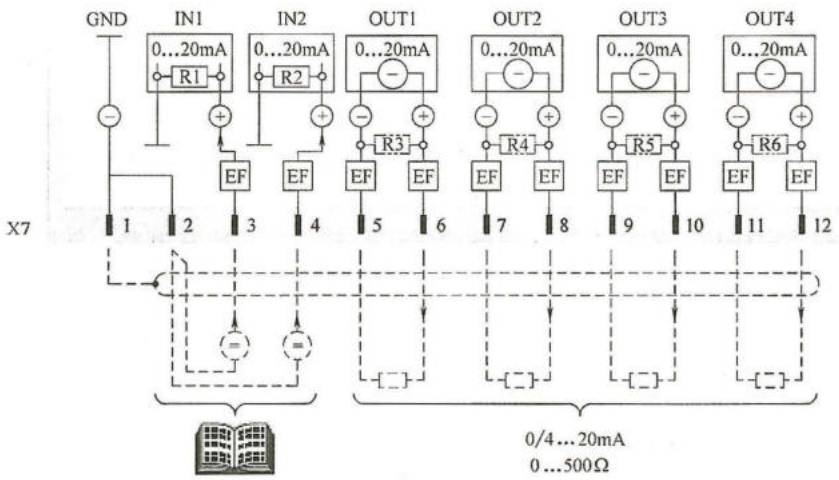


图 2-107 X7 插头端子图

插头端子图。对于连接端子，每一个 S710 插座有一个块作为机械代码。在插头上，匹配的边缘必须被清除。

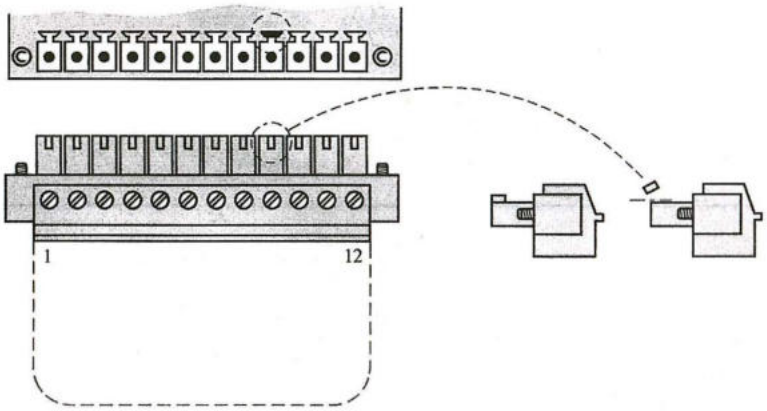


图 2-108　S710 插座图

插座上的机械编码　　表 2-12

插座	X2	X3	X4	X5	X6	X7
接点处保护块	2	3	4	5	6	7

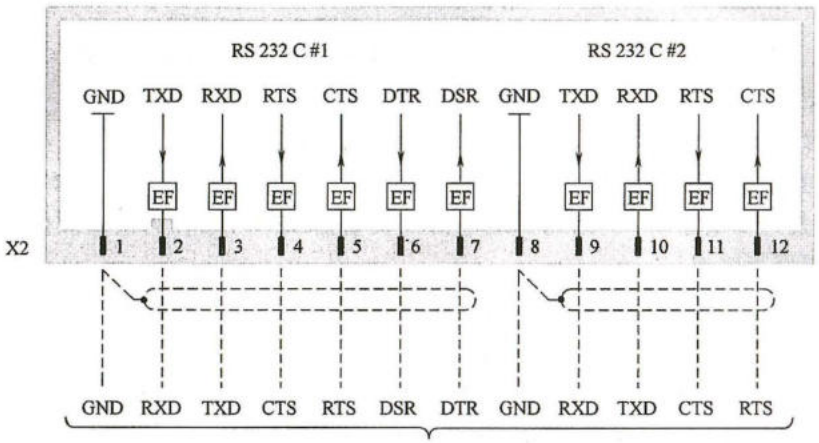


图 2-109　X2 端子接口

S710 后面板上标配有气体卡套接口，SAMPLE 为样气进口、OUTLET 为样气出口。

② 调试检查/准备

a. 设备安装完毕后，调试人员在设备调试运行前必须对所有电路、气路做仔细检查，确保 S710 设定的电压与主电源一致，气路检查无泄漏。

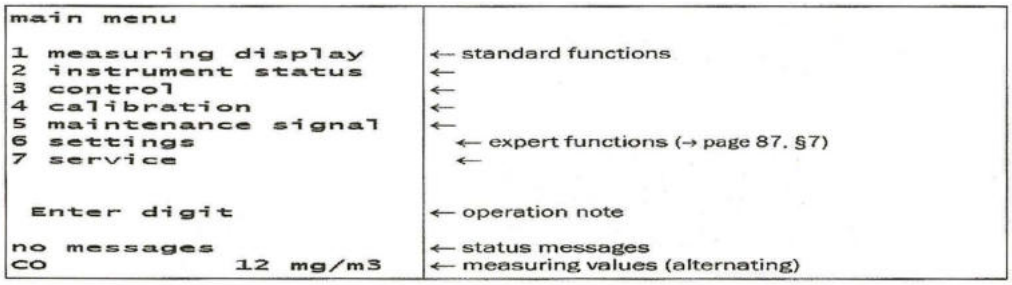
b. 打开电源分配箱的总电源，其次是机柜总电源空开，再依次打开分析仪、PLC、样气泵等各个设备的电源开关空开，最后打开分析仪后面的电源开关。

将仪器后面板的电源开关置于“ON”，微处理器先运行自检程序，如果自检未发现错误，将在最后一行显示“OK”。

c. 在内部运行温度没达到要求时，“Function”LED 灯呈红色（通电后至少 2min，状态信息，加热）等到“Function”发光二极管显示绿色，然后再等待 2h 以使内部温度稳定。

③ 分析仪设置

S710 通电并进入自检后，正常情况下会显示操作分析仪界面，如下主菜单：



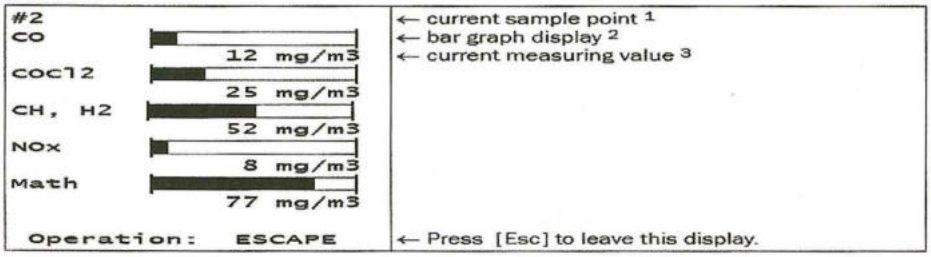


图 2-110 主界面

选择 main menu -> measuring display —> all components。

此时屏幕上显示如下：

④ 量程设置

测量值输出范围在出厂时就已经被设置，但是可以按需要修改。

如果仪器选有第二个输出范围，每个测量值输出有两个可以单独设置的输出范围，请遵守以下规定：

输出范围的起始值和满度值之差至少大于基本测量范围满度值的 10%。这个限制在相应的菜单中已自动定义设定，输出范围必须合理交叉，不允许出现空档。这些设置不能改变仪器的基本测量范围，输出范围 2 应符合基本测量范围。

a. 菜单 621（main menu →settings →measurement →meas. value outputs）

b. 选择所需的测量值输出（meas. value output）

c. 选择 output range 1 或 output range 2

d. 设置下列值：

begin value （起始值）	输出范围的起始值
end value （满度值）	输出范围的满度值
switch value* （转换值）	switch-up value(向上转换值)=仪器自动从输出范围 1 转换到输出范围 2 的测量值。一般这个转换值即是这个输出范围的满度值，但是您也可以选择显示的最大和最小值之间的一个值。
	switch-down value(向下转换值)=仪器自动从输出范围 2 转换到输出范围 1 的测量值。 向下转换值必须小于向上转换值。设置向下转换值应遵循以下原则：向上转换值和向下转换值之间的差异应远远大于仪器的测量精度。

例如，将 S710 的第一量程设置为：CO_2 量程 0%～20%，NO 量程 0～250 mg/m^3，O_2 量程 0～25%。

校准零点，通入 N_2 或仪表气，气流稳定 0.8L/min，等待大约 2min，待数值稳定后再操作。开始步骤：选择 main menu →calibration →manual procedure。

manual procedure zero gas 2 O_2　　0.00 CO_2　　0.00 NO　　0.00 Start zero calibration with ENTER! Back:　　ESCAPE	 ←预设的零点名义值(见 7.5.4) ← ← 1. 如果不是自动供给零点气，现在手动通入零点气。 2. 按[Enter]键开始内部程序
manual procedure zero gas 2 status:wait... O_2　　0.27Vol% CO_2　　−0.46ppm NO　　0.18mg/m^3 Please wait... Break:ESCAPE	 • 开始后，运行校准气体滞后时间(见 7.5.8)并显示 wait... • 然后测量实际值(measuring...)；等待已经设定的校准测量时间过去(见 7.5.9)。显示屏显示的是当前实际测量值。 一直等到屏幕上出现 End:ENTER

manual procedure zero gas 2 status:measuring... O_2　　0.31Vol% CO_2　　−0.44ppm NO　　0.11mg/m^3 End:　　ENTER Break:　　ESCAPE manual procedure zero gas 2 O_2　　1.77% CO_2　　−3.05% NO　　0.91% Save:ENTER	 按[Enter]键表明仪器接受显示的值作为真实的实际值并以此计算偏离名义值的差异，即漂移值。 您可以按[Esc]键取消校准 ←计算的零点漂移值 ← ← • 按[Enter]键后仪器将补偿这些漂移值*。 • 如果您不想接受这些值按[Esc]键(保留先前的零点校准数据)

* 最后一次漂移复位或最后校准后的总体（累计）漂移。

⑤ 量程校准

设置校准气的标称值。

a. 调用菜单 632（main menu→settings→calibration→nominal values）。

b. 选择零气与标准气。将显示当前设置，输入校准气的标称值。

> ⚠ 注意：可能的不正确校准
>
> ▶ 在进行灵敏度校准前您必须先进行零点校准，否则校准不正确。
>
> ▶ 测量组分 H_2O 的灵敏度校准需采取特殊的步骤

manual procedure 1 zero gas 1 2 zero gas 2 3 test gas 3 4 test gas 4 5 test gas 5 6 test gas 6 7 calibr. cuvette 8 auto. starts	• 选择与仪器内设定的名义值相同的校准气。如果您采用自动供给校准气体方式，那么必须可以获得这气体。 • 如果被校准的分析模块装有校准气室，您还可以选择 calibr. cuvette
manual procedure	其他步骤同零点校准一样。 但是需通入满度气*

校准完成：正确完成所有组分的零点和灵敏度校准后，仪器正确校准完毕。

为了返回到测量值显示：

a. 按“ESC”直到返回主菜单 main menu。

b. 选择所需要的 measuring display。

⑥ S710 维护检查事项

由于 S710 为在线监测设备，日常维护计划包括外观目检检查状态灯报警显示、过滤器（制冷器）污染情况、电器的连接、气路的气密性、日常校准等，不需要经常开机、关机，操作人员的工作主要是按照维护手册内容进行日常检查维护，对设备日常检查维护中要注意的几个要点作如下规定。

a. 正常情况开机通电前需要确认仪器供电电压是否与 S710 的电源选择相一致。通电后分析仪需至少预热 2h 后才能正常工作。如分析仪出现故障或掉电时，应先检查电源插头是否接好，信号线是否连接好，仪器的电源保险丝是否完好无损。必要时在 S710 的使用说明书中查找状态信息表（按照字母为序）逐条列有状态信息显示、含义、原因/分析说明和可能的处理方法。

b. 在目测检查时候，如发现流量计或分析仪后面的小过滤管中有水滴，应马上拔掉分析仪的进气管，使用干燥的 N_2 或仪表气吹扫所有的气体管路 10min 气路然后进行检查排除故障。任何时候，如发现冷凝器的排水口没有正常的气泡冒出，要及时检查调节，有故障要排除，例如：制冷器温度是否在 2～6℃，冷凝出的水是否由蠕动泵排至集液桶，积液桶是否溢满，制冷器的散热部分防尘过滤片是否堵塞，是否需要压缩空气吹扫清理。

c. S710 分析仪内部测量系统被加热到恒定的内部温度（S710 大约为 50℃）。因此冷凝不会发生在内部测量系统。然而随着分析仪关闭，内部温度下降，冷凝将可能出现在测量系统内部。这种情况不能发生，因为这将导致测量系统可能的损坏。因此，应该在分析仪关闭前使用中性干燥气体（例如，N_2）吹扫内部气体管路。

d. S710 分析仪或部件需要进行维护，将该部件的电源开关（或空开）断开，然后对其

进行维护或维修，严禁带电挪动或拆卸部件。在更换机柜里的部件时，需要注意机柜的各个电气接头，避免造成松动，脱落或接触，影响机柜及各设备的正常运行，拆卸部件前应断开气路部分，维修完成后，安装好气路并按要求进行泄漏气密性检查。

e. S710 分析仪建议每周校准一次。校准分析仪时，首先检查标气的标称值和失效期，气瓶的气体压力。标准气瓶的阀门启闭顺序为：先打开气瓶主阀（此时减压阀上的小针阀关闭），再缓慢打开减压阀，将二次表压调至 0.04～0.09MPa。连接标准气管时，注意各分析仪对应的气管，不要接错。各管路连接接头处不得有漏气现象。关闭标准气的顺序是：先关闭标准气瓶主阀，待减压阀上各表压力降至零后，再关闭二级减压阀。每次标点（零点或量程点）校准后，应及时关闭标准气体，以便校准下一个标点。校准分析仪时，注意各分析仪流量计的流量，气体流量控制在 0.8L/min。S710 具有自动零点调整功能，可由 PLC 定时控制通入空气校准进行零点校准，补偿零点飘移带来的数据失真。

f. 每当检查完 CEMS 系统气路部分后，应再检查气体分析仪后部的管路，把进气管和出气管接好（要分清楚各种气体的进气管和出气管与分析仪一一对应接好）。应每周检查样气冷凝液容器的液位，及时清理避免冷凝液溢出。检查仪器安装环境，避免强烈的机械振动，S710 应单独安装一个排气管路，避免样气出口处的气体背压有较大波动。

（2）紫外吸收光谱气体分析仪

1）紫外分析仪

① 简介

SGEP-300 分析仪采用紫外差分吸收法原理，分析仪前面板由全触控显示屏和抗腐蚀流量计组成，后面板接口见图 2-111。

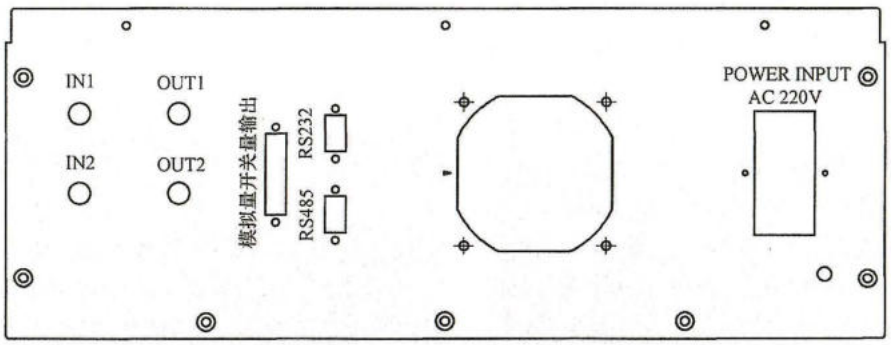


图 2-111　SGEP-300 分析仪

a. POWER INPUT：电源线接口，控制分析仪的电源开关。

b. RS485：DB9 公头、通信串口，其中第一脚为 485 _ A，第二脚为 485 _ B。

c. RS232：DB9 公头、通信串口，其中第二脚为 RXD（接收），第三脚为 TXD（发送），第五脚接地。

d. 气体接头：IN1 为自校准进气口、IN2 为样气进口、OUT1 为自校准气出口、OUT2 为样气出口。

e. DB25：母头，主要有 4 路模拟量 4～20mA 输出和 5 路开关量输出。

② 调试准备

a. 设备安装完毕后，调试人员在设备调试运行前必须对所有电路、气路做仔细检查，确保完好。

b. 打开电源分配箱的总电源，其次是机柜总电源，再依次打开工控机、分析仪、PLC等各个设备的电源开关，最后打开分析仪后面的电源开关。

c. 将仪器后面板的电源开关置于“ON”，经过20s左右的开机动画后屏幕上显示出测量画面，进行约30min的预热运行，仪器测量之前达到稳定状态需要30min。

③ 分析仪设置

产品上电后，等待产品第一次自校准完成后，操作分析仪界面，观察各按键是否可用。

a. 按“menu”键，观察界面显示是否进入到校准界面，分别按“下”、“上”和“左”、“右”观察界面上的选择条是否按调试方向跳动。

b. 调试至设置界面，选择单位设置界面，按“enter”，观察界面是否进入单位变换界面，若是则继续按“enter”，完成单位切换操作，按“esc”两次返回主界面，观察单位是否切换。

c. “量程设置”的内容，将产品的第一量程设置为：SO_2 量程0～100mg/m^3，NO量程0～100mg/m^3，O_2 量程0～25%。

d. 分析仪校准需在产品上电稳定后，并且完成两次上电自校准后方可进行，可在电流校准后进行。

e. 通入 N_2，气流稳定1.2L/min，等待3min，在标气浓度界面填入 SO_2 标气浓度0，点击“开始取样”，等待取样完成，默认采样时间为2min，取样完成的标志为填写的浓度值和采样值在对话框中显示出。

④ 零点校准

主界面设有【设置】、【信息】、【校准】、【状态】四个子功能键。

在菜单界面中选择【校准】按键进入该界面，【校准】选择界面中分别有【零点校准】、【满度校准】、【手动校准】、【多点校准】可供选择操作。



图2-112 主界面



图2-113 校准界面

在【校准】选择界面中，点击【零点校准】进入该界面。

通入零气后，通过选择【SO_2 校零】、【NO校零】、【O_2 校零】、【共同校零】，进行相关组分零点校准，点击【校准】后，会弹出校准确认界面，【确定】则开始校准，【取消】则不进行校准。

校准开始后左下角显示剩余的校准时间，可通过【取消校准】结束正在校准的动作。



图2-114 零点校准界面

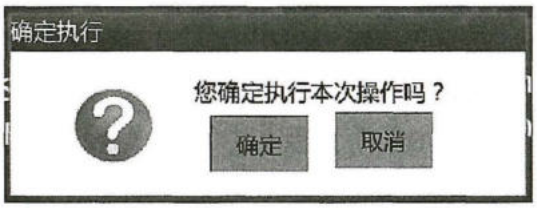


图 2-115　确定界面



图 2-116　取消校准界面

⑤ 满度校准

【满度校准】类似零点校准，由在校准界面中选择【满度校准】后进入该界面，【满度校准】分三个功能【SO_2 校准】、【NO 校准】、【O_2 校准】。

校准界面中有设定校准值和当前测量值显示，通入相关组分校准气体，选择该组分校准，开始进行该组分的【满度校准】。校准过程中有剩余时间显示，校准过程可取消校准操作。

注意：校准前先将校准浓度设定值调整至与标气浓度一致。

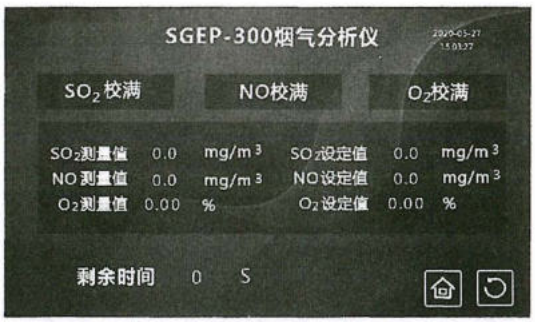


图 2-117　满度校准界面

⑥ 维护检查

由于此设备为在线监测设备，不需要经常开机、关机，操作人员的工作主要是日常检查维护，对设备日常检查维护中要注意的几个要点作如下规定：

a. 正常情况开机通电后，分析仪需一段时间预热后才能正常工作。如分析仪出现故障或掉电时，应先检查电源插头是否接好。信号线是否连接好。

b. 在任何时候，如发现流量计或分析仪后面的小过滤管中有水滴，应马上拔掉分析仪的进气管，进行检查排除故障。任何时候，如发现冷凝器的排水口没有正常的气泡冒出，要及时检查调节，有故障要排除。

c. 如分析仪或部件需要进行维护，则将该部件的电源开关（或空开）断开，然后对其进行维护或维修，严禁带电挪动或拆卸部件。在更换机柜里的部件时，需要注意机柜的各个电气接头，避免造成松动，脱落或接触，影响机柜及各设备的正常运行。

d. 分析仪应每周校准一次。校准分析仪时，标准气瓶的阀门启闭顺序为：先打开气瓶主阀（此时减压阀上的小针阀关闭），再缓慢打开减压阀，将二次表压调至 0.05～0.08MPa 连接标准气管时，注意各分析仪对应的气管，不要接错。各管路连接接头处不得有漏气现象。关闭标准气的顺序是：先关闭标准气瓶主阀，待减压阀上各表压力降至零后，再关闭减压阀和小针阀。每次标点（零点或量程点）校准后，应及时关闭标准气体，以便校准下一个标点。校准分析仪时，注意各分析仪流量计的流量，气体流量控制在 1L/min。

e. 每当检查完 CEMS 系统气路部分后，应再检查气体分析仪后部的管路，把进气管和出气管接好，（要分清楚各种气体的进气管和出气管与分析仪一一对应接好）。

2）MODEL 1080-UV 紫外烟气分析仪

① 简介

MODEL 1080-UV 分析仪主要测量 SO_2、NO、NO_2 和 O_2 等气体浓度，具有测量精度高、稳定性和可靠性高、响应时间快等特点。特别适用于抽取式超低排放 CEMS 系统。

分析仪主要用于以下场合：

烟气排放连续监测 CEMS（分析 SO_2、NO、NO_2、O_2）；

脱硫工艺监测（分析 SO_2、O_2）；

脱硝工艺监测（分析 NO、NO_2、O_2）；

化工、冶金烟气排放连续监测（分析 SO_2、NO、NO_2、O_2）；

垃圾焚烧烟气排放连续监测（分析 SO_2、NO、NO_2、O_2）。

分析仪的主要特点：

SO_2 和 NO 采用紫外差分光谱法，与传统的 NDIR 相比，测量精度理论上不受水分和粉尘影响、基本没有零点漂移。

使用高分辨率光谱仪进行光谱分析，光谱仪针对烟气分析进行了专门的性能优化。

仪器内部控制精度高，环境适应性好。

光源采用高稳定性的氘灯，仪器具有良好的稳定性。

无光学运动部件，无切光轮、滤光轮、干涉仪等光学运动部件，可靠性高。

模块化设计，光源、光谱仪、核心电路、气体室、氧传感器等采用模块化设计，可靠性高、可扩展性好、维护方便。

② 软件操作

本仪器采用按键组与显示屏组合。

a. 按键组

PUMP：泵开关键，预留键。

CAL：快速调零键，在测量状态下可直接转入调零状态，按调零键之前需确保仪器内通入洁净的空气或氮气，仪器自动识别。

ESC：返回键，同时也是进入菜单的按键。

箭头：游标控制键，控制上、下、右三个方向移动游标。

OK：确认键。

b. 测量界面

该界面下，显示 SO_2、NO 和 O_2 的测量浓度，显示屏下方状态条中会显示 M 标识，若显示 M1 或 M2 等其他标识，则仪器处于非测量状态。

c. 状态界面

显示跨度：为双量程仪表当前浓度处于哪一个跨度里，对应给出的状态信息，与 4～20mA 模拟量输出相关，分别对应所测量的几个组分。

光源能量：是判断光源效率的指标。

氧量电压：是氧传感器的实时电压值。

温度 1：光源基座温度。

温度 2：机箱温度。

温度 3：探测器温度。

d. 校准

校准操作需在分析仪稳定运行的情况进行，如无特殊说明本仪器需开机后至少预热 120min。

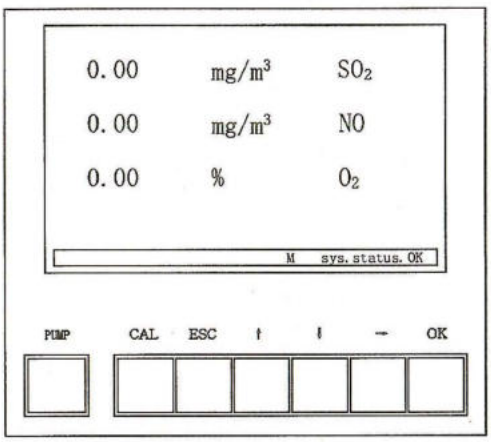


图 2-118　测量界面

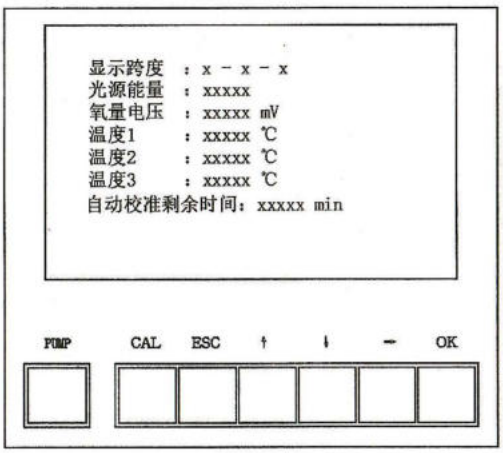


图 2-119　状态界面

(a) 零点校正

可采用两种方式进行零点校正，空气调零或氮气调零，仪表根据氧含量自动识别，只需确保通入的气体为洁净的空气或氮气即可，仪器调零前吹扫时间建议设置为 180s，不应低于 60s。

空气调零设置里面需将空气中氧含量写入，出厂默认为 20.95%。

氮气调零设置中需注意，设置样气是否参与调零，建议设置为否。

自动调零周期最小单位为 01h，最大为 24h，当不需要自动调零时，只需将周期设为 00 即可，需要手动调零时，在测量界面轻按“CAL”即可一键调零。

注意：调零过程中将流量调整到测量状态下流量，且仪器出气口不能憋压。

(b) 标气校正

进入校正菜单，选择校正组分，将标气值写入仪器，通入标准气体，将流量控制在样气测量状态时一致，按 OK 键，待读数稳定后，再次按确认键进行校正，通入标准气体时间不应小于 5min，建议为 7min。

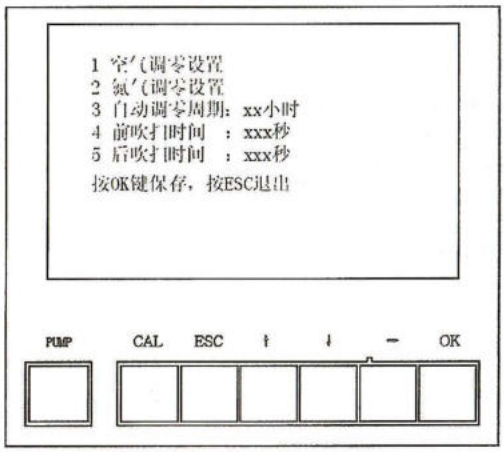


图 2-120　调零设置界面

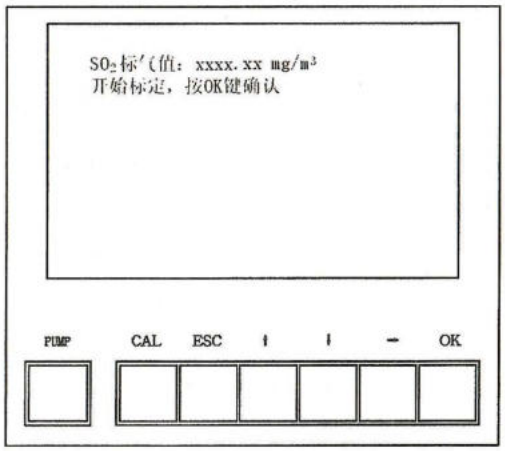


图 2-121　标气校正界面

e. 设置

(a) 通信设置

RS232&485：可分别设置 RS232 和 RS485 的波特率、设备地址、通信协议。

（b）模拟量输出通道设置

仪器共有 4 路模拟量输出通道，输出方式为 4～20mA 电流输出，图 2-122、图 2-123 为默认设置，可任意切换。

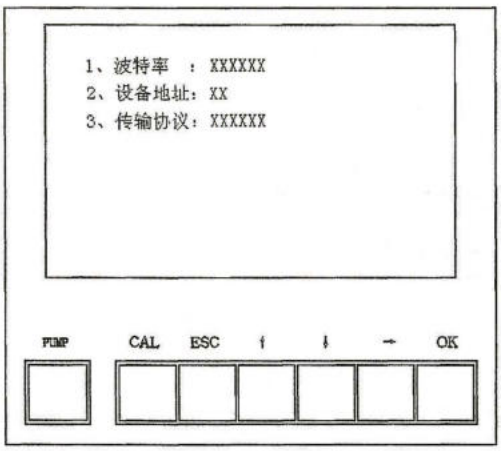


图 2-122 RS232&485 设置

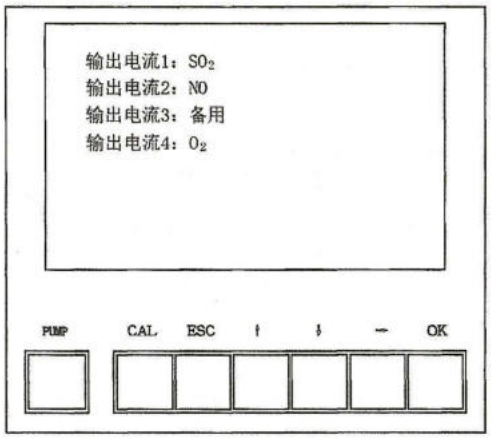


图 2-123 模拟量输出通道设置

（c）状态量输出继电器设置

仪器共有 8 路继电器输出通道，输出方式为干接点输出，触点容量不应大于 24VDC、1A，图 2-124 所示为默认设置，可任意切换。

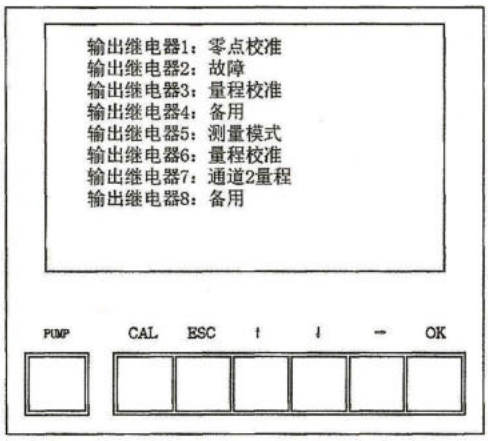


图 2-124 开关量输出设置

③ 接口说明

a. 背面板接口示意图

b. 接口定义说明

220VAC 100W：220 伏交流电，功率 100W。

IN：被测量气体进气口。

OUT：被测量气体出气口。

RS-232-1：通信接口，DB9（针），定义见表 2-13。

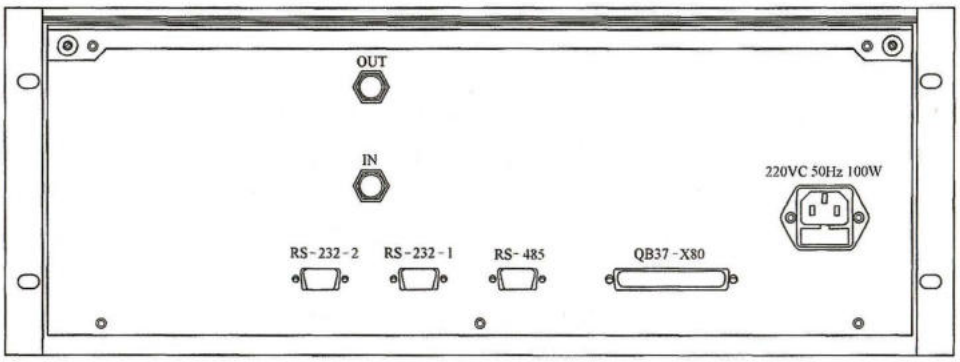


图 2-125　背面板接口示意图

RS-232-1 针脚定义　　表 2-13

引脚序号	定义
2	分析仪数据接收
3	分析仪数据发送
5	信号地

RS-232-2：调试接口（厂商专用）。

RS485：通信接口，DB9（针），定义见表 2-14。

RS485 针脚定义　　表 2-14

引脚序号	定义
3	A+
8	B−

串口配置：数据位 8bit，停止位 1bit，校验位无，波特率 9600。

协议类型：MODBUS。

④ 日常维护

a. 日常巡检

建议根据需要每天进行例行检查如下内容。

（a）检查流量计，查看样气流量是否在正常范围内，建议调节在（1.0±0.1）L/min 范围内。

（b）检查显示屏，查看显示屏是否正常显示。

（c）仪器状态检查，查看分析仪内部温度是否正常，温度 1≤65℃，温度 2≤45℃，温度 3≤45℃。

（d）测量数据检查，查看测量数据是否实时更新，是否稳定。

（e）检查氧量电压值，通空气状态下，低于 6mV 需更换氧电池。

（f）检查光源能量值，低于 100000，需根据实际情况清理测量池或窗片，若清理之后仍达不到 100000 建议更换光源。

b. 定期校准

建议每 1d 校准一次零点；建议每 15d 校准一次量程。

c. 气体池清理

根据实际情况最少每年清洁一次气体池（视工况而定），清理时先将气体池两端与光源以及光谱仪连接的部位拧开，拧掉气路接头，打开气体池固定压片。将气体池取出带到有拆装条件的场所进行拆解气体池，气体池两端的窗片需用无水酒精或丙酮清洗，注意要保护窗片不被划伤，禁止手指直接接触窗片两面，同时观察气体池内是否脏污，可将气体池放在酒精里浸泡，用脱脂棉擦拭内壁，根据实际情况确定浸泡时间及擦拭次数，擦净后再次放入洁净的无水酒精里浸泡半小时，取出后自然晾干后对气体池进行组装，建议更换密封胶圈，气体池装好后即可重新将气体池装入仪表。

注：清洗过程中需对仪器断电，拆解过程中不能动光谱仪和光源，复原设备后需对仪表重新上电预热 2h，然后重新对分析仪进行零点和量程校准操作！

3）AGA1000-UV 紫外气体分析仪（图 2-126）

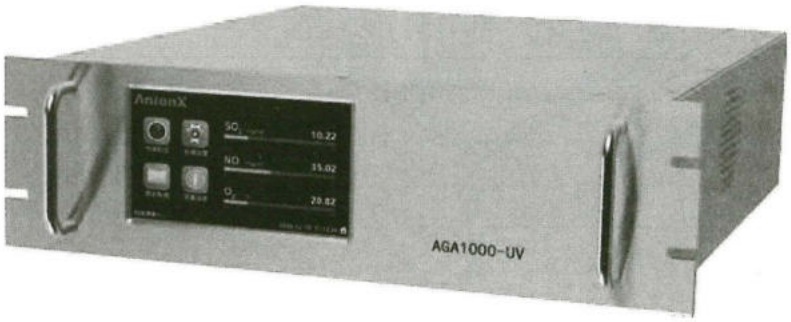


图 2-126 AGA1000-UV 紫外气体分析仪

① 简介

a. 用途

AGA1000-UV 气体分析仪是一款基于紫外差分（DOAS）原理、灵敏度极高的气态污染物浓度监测仪器，可以长期连续不间断地监测烟气中的 SO_2、NO、O_2 的浓度。

b. 特点

（a）维护简单、便捷。

（b）全触控操作方式，人机交互友好。

（c）在宽温度范围内，低零点漂移和量程漂移。

（d）对烟气湿度不敏感，露点以上即可长期正常工作。

（e）专利干扰抵消技术，SO_2、NO 的检出限低至 0.06mg /m^3；

（f）无光纤全空间耦合光路设计，解决紫外光纤老化问题，提高工作稳定性。

c. 主要技术参数

（a）SO_2、NO 量程：75～2000mg/m^3 可选配

（b）O_2 量程：25%

（c）示值误差：≤±1%F. S.

（d）重复性：≤0.3%

（e）零点漂移：≤±1%F. S.

（f）量程漂移：≤±1%F. S.

（g）电源：220V / 50Hz 500W

（h）工作温度：0～+40℃

(i) 重量：14kg

d. 构成

(a) AGA1000-UV 主要包括测量气室组件、加热器温控组件、显示控制单元和多个电子模块组成。电子模块主要包括电源模块、系统控制器、光源发射和采集模块、温控单元、接口扩展模块等（图 2-127）。

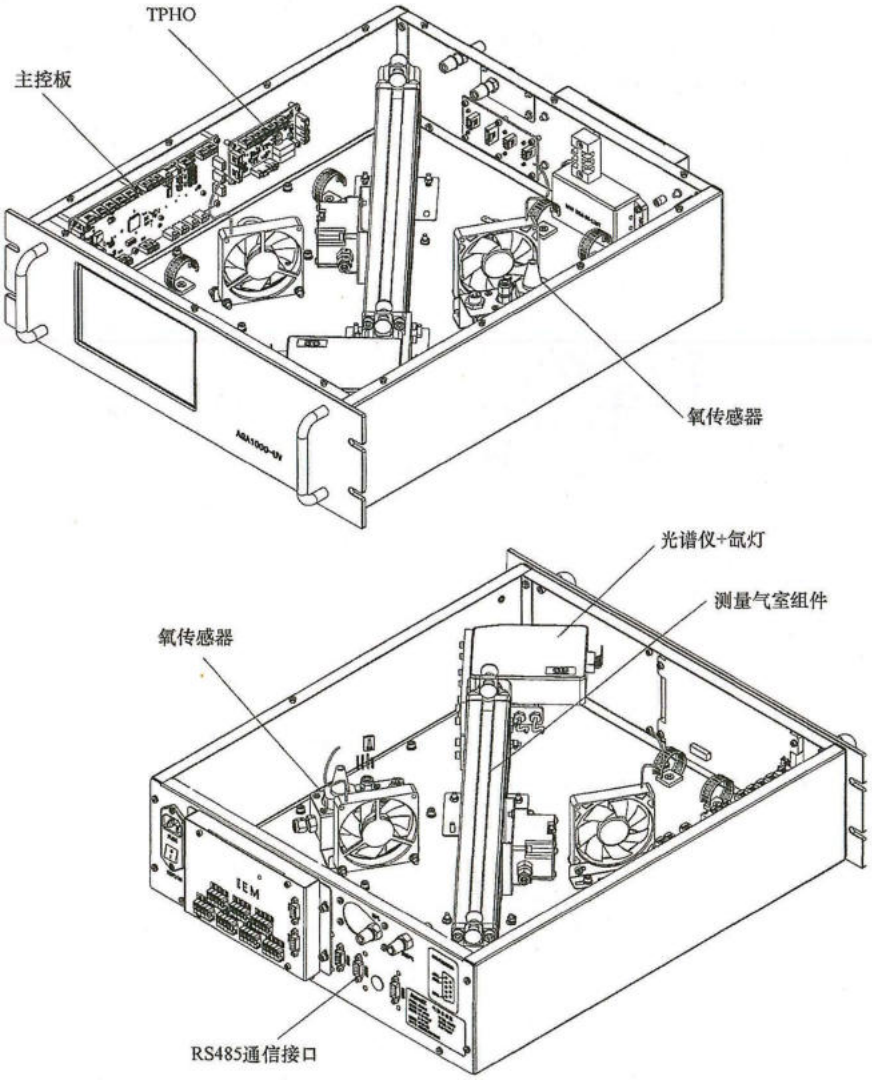


图 2-127　AGA1000-UV 紫外气体分析仪组成

(b) 后面板见图 2-128。

电源接口，控制分析仪的电源开关。

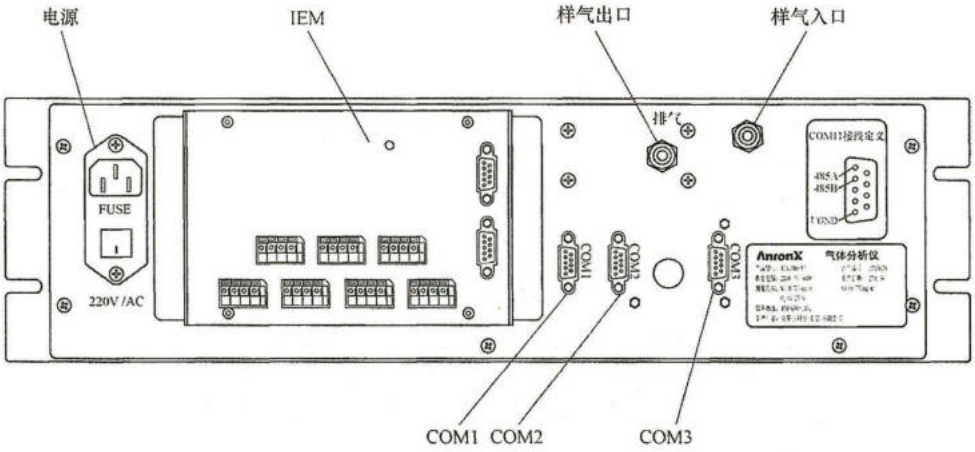
COM1/COM2/COM3：DB9 公头、RS485 通信串口，其中第一脚为 485_A，第二脚为 485_B。

气体接头：样气入口、样气出口。

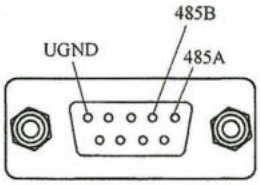
IEM：接口扩展模块，包括 5 路模拟量、5 路开关量输出。

② 安装

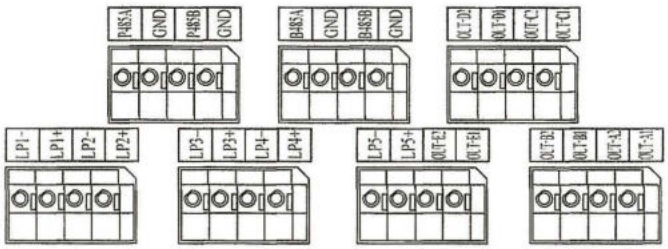
a. 供电电缆：供电要求为 220V/50Hz。仪器配电室与安装仪器的电源电缆应为带外护套



(a) AGA1000分析仪的后盖板



(b) COM1、COM2、COM3对外接口定义



(c) IEM对外接口定义

图 2-128 后面板示意图

的三芯电缆，3×0.75mm^2。将电源电缆接入图 2-128（a）中电源接口处，电源接口带规格为 250V 10A 的保险丝。请先确认电源开关按钮处于关闭状态（按钮上“|”为开，“○”为关)!

b. 气路连接：气体管路的接头为 ϕ6 快拧气咀，仪表进气口在图 2-128（a）中的“样气入口”位置，出气口在图 2-128（a）中的“样气出口”位置。禁止使用密封化合物密封气体连接处，进入分析仪的污染物可能损坏分析仪或导致错误读数。

c. 对外接口：分析仪可以支持多种对外信号接口，标准配置为 3 路 RS485 数字接口。可选配 IEM 模块，以支持 5 路电流环、5 路开关量输出。图 2-128（c）中的 IEM 模块的“LPX”代表 4～20mA 电流环输出，“OUT-XX”代表数字开关量输出。数字开关量为浮点双触点连接，最大接点容量 30V/1A。电流环和数字输出的信号映射关系可从 AGA1000 分析仪的接口配置获取。

③ 开机

a. 安装检查

(a) 气体分析仪安装稳固。

(b) 气体管路连接准确。

(c) 所有的信号、电源供给连接和放置正确。

(d) 选配 IEM 模块，应确保背板“COM3”与 IEM 模块的 DB9 通信接口可靠连接。

b. 通电

打开电源开关，此时可以看到分析仪前面板的 LCD 屏幕显示“系统初始化中，请稍等…”，大约 60s，切换到主界面。分析仪冷启动到正常测量输出大约需要 30min，1h 内达到最大精度。

c. 主界面显示说明

(a) 主界面分为标题栏、信息显示区域、功能按钮区域。标题栏主要显示仪表当前运行状态（如果分析仪有故障或报警，则显示相应代码）、进样流量、当前日期和时间信息。信息显示区域显示 SO_2、NO、O_2 测量值（图 2-129）。



图 2-129　主界面

(b) 测量单位切换

分析仪的 SO_2/NO 浓度单位可以在 mg/m^3 和 ppm 之间切换，系统上电后默认单位为 mg/m^3。通过点击测量数值后面的单位，可以完成 mg/m^3 与 ppm 的单位切换。

(c) 故障和报警提示

分析仪自动监测自身运行状态，当发生故障时，左上角会出现“设备故障”或者“设备报警”字样，标题栏中的左下角会显示故障代码“Exx”。

④ 标定

a. 点击主菜单界面中【气体标定】，进入标定界面，如图 2-130 所示，标定界面有【N_2】、【SO_2】、【NO】、【O_2】四个按钮。

b. 零点标定

(a) 点击按钮【N_2】进入“零点”标定界面，此操作将一次完成 SO_2、NO、O_2 三个组分的“零点”标定。

(b) 确认已通入 N_2，且界面显示数据稳定，点击【数据稳定】按钮，进入以下画面：开始标定数据采集，此时不要关闭气源！

(c) 采集标定数据大约需要 5s，采集完成后进入以下界面。

(d) 用户可以点击【保留】使本次“零点”标定生效，或点击【放弃】，放弃本次零点标定。



图 2-130 气体标定界面

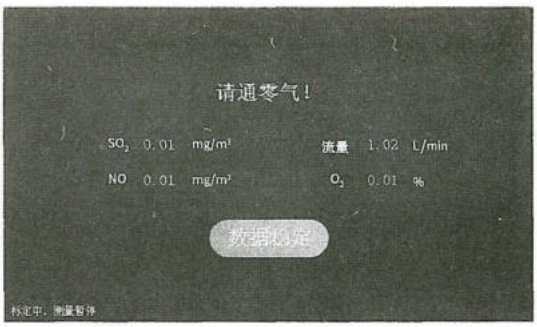


图 2-131 零点标定（一）

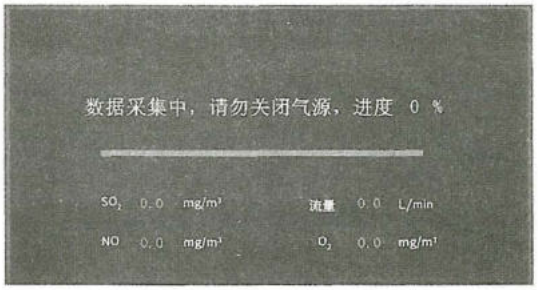


图 2-132 零点标定（二）

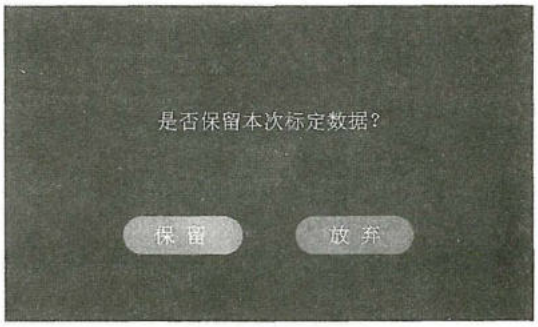


图 2-133 零点标定（三）

c. 量程标定

（a）点击按钮【SO_2】表示对“SO_2”进行量程标定。点击按钮【NO】表示对“NO”进行量程标定。点击按钮【O_2】表示对“O_2”进行量程标定。以“NO”量程标定为例，说明如下。

点击按钮【NO】进入“NO”标定界面，选择【开始标定】进入标定流程，点击【重选】按钮返回上一个界面，重新选择需要标定的组分（图 2-134）。

（b）点击【开始标定】，通入 NO 标气，进入 NO 标定流程，见图 2-135。

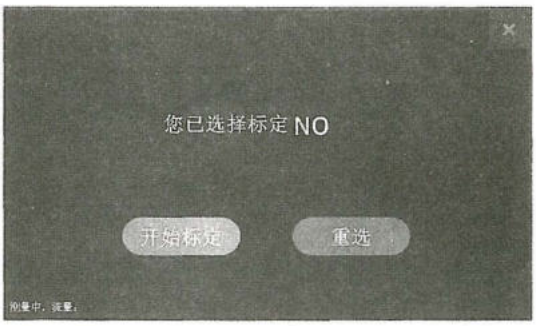


图 2-134 量程标定（一）

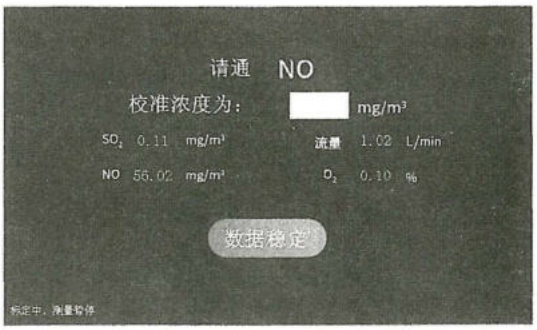


图 2-135 量程标定（二）

（c）输入 NO 标气浓度，观察 NO 数据稳定后，点击【数据稳定】按钮，进入图 2-136 所示界面。

（d）标定数据采集大约需要 5s，采集完成后进入图 2-137 所示界面。

（e）用户可以点击【保留】，使本次标定生效，或点击【放弃】，放弃本次标定。

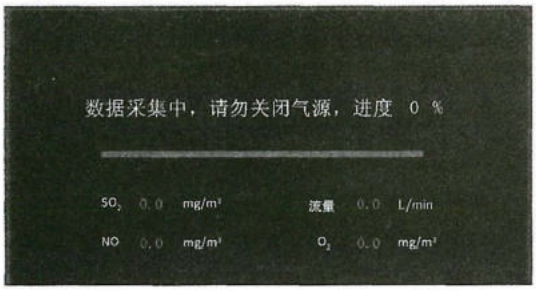


图 2-136　量程标定（三）

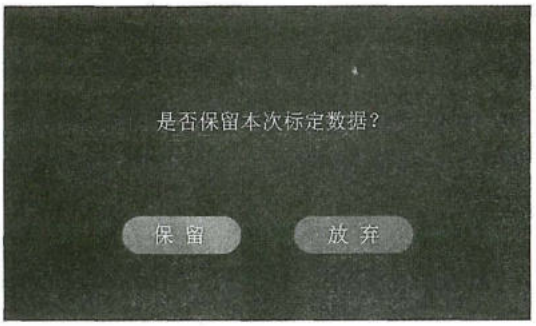


图 2-137　量程标定（四）

⑤ 气室维护

根据实际情况，每年最少清洁一次气室的窗口片，清洁操作如图 2-138 所示。

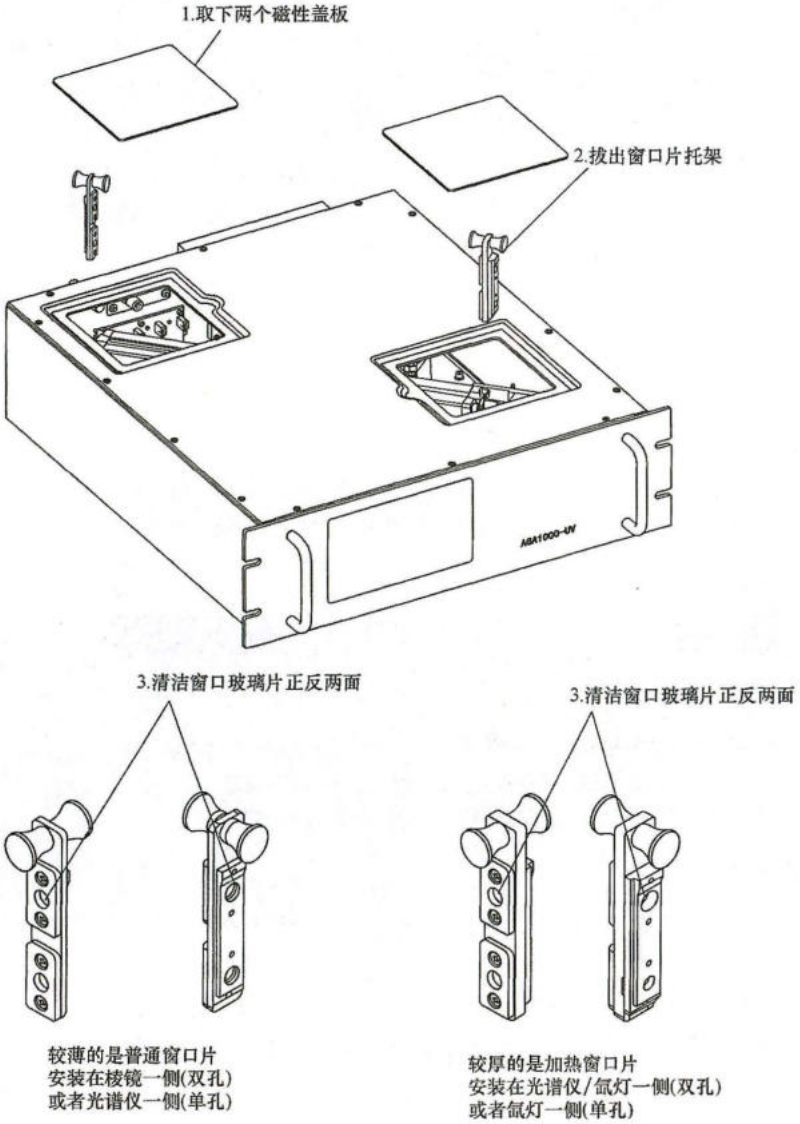


图 2-138　气室清洁操作示意图

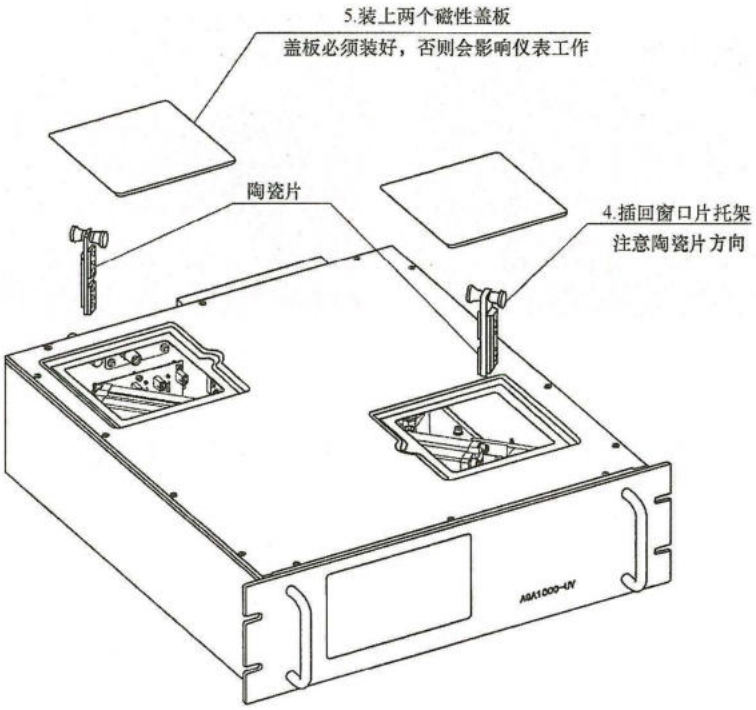
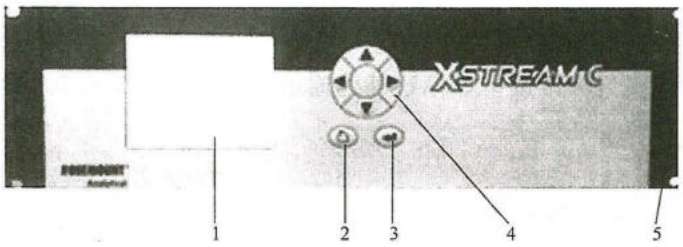


图 2-138 气室清洁操作示意图（续）

4）X-STREAM C 分析仪

① 简介

X-STREAM C 分析仪采用非分散紫外（测量 SO_2）、非分散红外（测量 NO）、电化学（测量 O_2）原理，分析仪前面板的显示及操作按键和后面板接口见图 2-139、图 2-140。



1—640×480 点阵数字显示屏；2—“测量”键；3—“回车”键；4—“方向”键（用于设置和选择菜单的 4 个箭头键）；5—标准架支架

图 2-139 X-STREAM C 分析仪前面板布局图

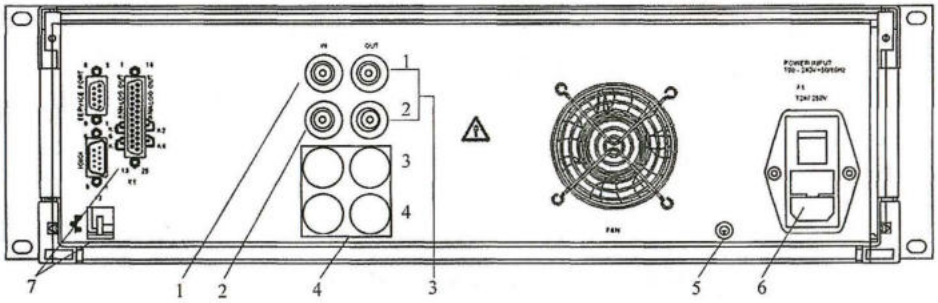
② 调试准备

a. 设备安装完毕后，调试人员在设备调试运行前必须对所有电路、气路做仔细检查，确保完好。

b. 打开电源分配箱的总电源，其次是机柜总电源，再依次打开工控机、预处理单元等各个设备的电源开关，最后打开分析仪后面的电源开关。

c. 在分析仪接通电源时，要进行一系列的内部自动测试，在测试过程中，前面板上的按键是不能操作的，而屏幕则倒计时显示自检过程。

d. 开机正常后屏幕上显示出测量画面，先进行 30～50min 的预热运行，在仪器达到稳



1—样气；2—空气；3—排空；4—扩展管道接头预留位置；5—接地螺栓；
6—电源接头；7—信号输入/输出接头（部分是选择项）

图 2-140　X-STREAM C 分析仪后面板布局图

定测量状态仍需要约 30min。

③ 检查分析仪设置

开始标定前，需要检查标准气并设置分析仪采用的标准气体浓度。

从测量屏幕开始，按 DOWN 键，打开 MAIN MENU，进入 SETUP-CALIBRATION 子菜单，然后直接进入 CALIBRATION GASES 菜单。在 SELECT COMPONENT 菜单，选择需要标定的通道，分别输入零点标定时使用零点气的浓度数值和输入量程标定时使用量程气的浓度数值。

标定操作前需确认标气连接正确，并保证标气的气体流量与系统采样烟气流量一致，稳定在 1L/min 左右。

④ 分析仪标定校准

从测量屏幕开始，按 DOWN 键，打开 MAIN MENU，进入 CONTROL 子菜单。

零点/满度校准：选择 ZERO CALIBRATION 或 SPAN CALIBRATION。在 SELECT COMPONENT 菜单，选择需要标定的通道。选择 START CALIBRATION 启动标定。标定完成后显示当前测量气体浓度。如标定其他通道，继续在 SELECT COMPONENT 菜单内选择对应通道后重复上述操作。

⑤ 维护检查

由于此设备为在线监测设备，不需要经常开机、关机，操作人员的工作主要是日常检查维护，对设备日常检查维护中要注意的几个要点作如下规定：

a. 正常情况开机通电后，分析仪需一段时间预热后才能正常工作。如分析仪出现故障或掉电时，应先检查电源插头是否接好、信号线是否连接好。

b. 在任何时候，如发现分析仪露点显示偏高或样气进口出现水汽或液态水，应马上拔掉分析仪的进气管，进行检查排除故障。

c. 如分析仪或部件需要进行维护，则将该部件的电源开关（或空开）断开，然后对其进行维护或维修，严禁带电挪动或拆卸部件。在更换机柜里的部件时，需要注意机柜的各个电气接头，避免造成松动，脱落或接触，影响机柜及各设备的正常运行。

d. 分析仪应每周校准一次。校准分析仪时，标准气瓶的阀门启闭顺序为：先打开气瓶主阀（此时减压阀上的小针阀关闭），再缓慢打开减压阀，将二次表压调至 0.05～0.1MPa。连接标准气气管时，注意与标定通道设置一致，不要接错。各管路连接接头处不得有漏气现象。关闭标准气的顺序是：先关闭标准气瓶主阀，待减压阀上各表压力降至零后，再关闭减

压阀和小针阀。每次标点（零点或量程点）校准后，应及时关闭标准气体，以便校准下一个标点。校准分析仪时，注意各分析仪流量计的流量，气体流量控制在1L/min。

e. 每当检查完CEMS系统气路部分后，还应再检查气体分析仪后部的排空管路，需保证通畅无堵塞。

5）OMA-2000紫外分析仪

① 简介

OMA-2000分析仪采用完全抽取热湿法紫外可见差分吸收光谱技术（UV-DOAS），主要应用于对各种固定污染源排放SO_2、NO_x（NO、NO_2）、O_2的在线监测，分析技术荣获国家科技进步二等奖。

OMA-2000分光光谱气体分析仪主要由光源、光谱仪、接口板和液晶显示模块等组成。主要实现SO_2、NO_x、O_2浓度的测量和显示以及通信功能。OMA-2000分析仪的外观见图2-141。

OMA-2000烟气分析仪的软件系统的操作面板为液晶触摸屏。液晶触摸屏显示气体分析的各种信息并用于完成所有用户操作，如设置报警参数、组分选择、环境温度、压力及系统标定等。



图2-141 OMA-2000分析仪外观图

② 界面

OMA-Monitor软件系统的用户程序所有界面均可分为四个部分：标题栏、模式切换按键（仪器级和组分级）、信息显示区和状态栏，如图2-142、表2-15所示。

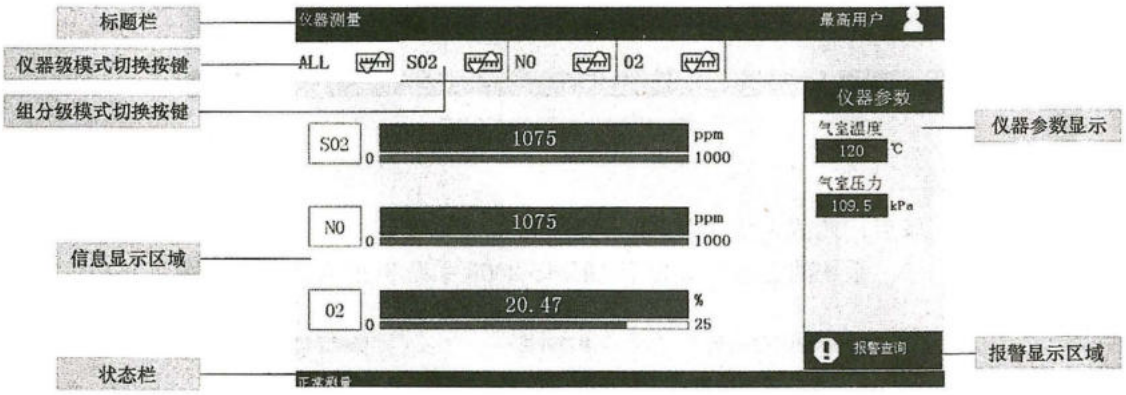


图2-142 OMA-2000烟气分析仪系统典型界面图

OMA-2000烟气分析仪系统界面含义 表2-15

名称	含义
标题栏	标题栏为所有界面共有，显示当前界面名称以及当前用户
仪器级模式切换按键	仪器级模式切换按键为所有界面共有，通过该按键可方便地在仪器测量和仪器管理界面间切换
组分级模式切换按键	组分级模式切换按键为所有界面共有，按键个数与仪器测量的气体测量组分数目相同。通过这些按键可方便地在气体测量和气体管理界面间切换

续表

名称	含　义
信息显示区域	不同界面信息显示区域的内容不同。当前界面为仪器测量界面时，显示所有组分的浓度数值；当前界面为仪器管理界面时，显示仪器的管理选项；当前界面为组分测量界面时，显示该组分气体的浓度数值和曲线等；当前界面为组分管理界面时，显示该组分气体的管理选项
状态栏	标题栏为所有界面共有，显示仪器状态以及当前日期

③ 仪器管理界面

当前显示主界面时，点击菜单会切换到仪器管理界面，该界面提供用户对软件进行配置、信息查询等功能，其子菜单，包括报警查询、参数设置、报警限值、密码管理、时间设定、温压校正、自动参数、通信设置、屏幕校准、GPDP设置、软件升级、日志查询、日志拷贝、内部测试14个子菜单（图2-143）。

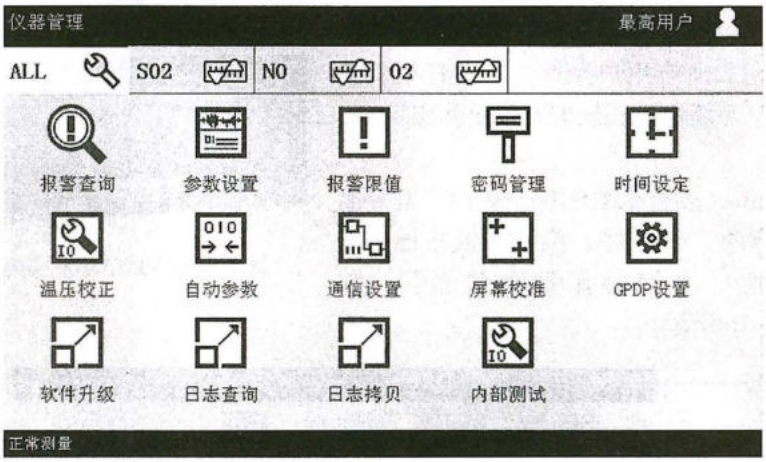


图2-143　仪器管理界面

④ 安装调试

设备安装完毕后，调试人员在设备调试运行前必须对所有电路、气路做仔细检查，确保完好。上电的顺序：系统的上电开关位于CEMS-2000系统机柜的前面板，图2-144是系统

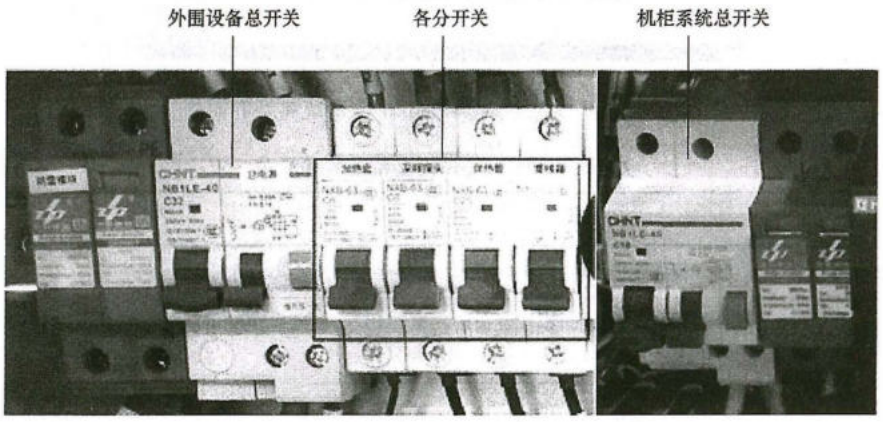


图2-144　上电开关局部图

上电开关的局部图，上电时，先打开机柜系统的总开关和外围设备的总开关，再依次打开各分开关。

打开仪器后面板的电源开关，仪器测量稳定时间需要 30min。

仪表开机后，需要完成设置参数的确认和运行前的校准。步骤如下：

a. 参数设置

【参数设置】子菜单用来配置光谱仪参数的光谱平均数、光源控制电压、打灯次数等，温度压力的气室温度的获取方式配置、P 向量及气室压力配置，读取光谱数据的光谱曲线，如图 2-145 所示。

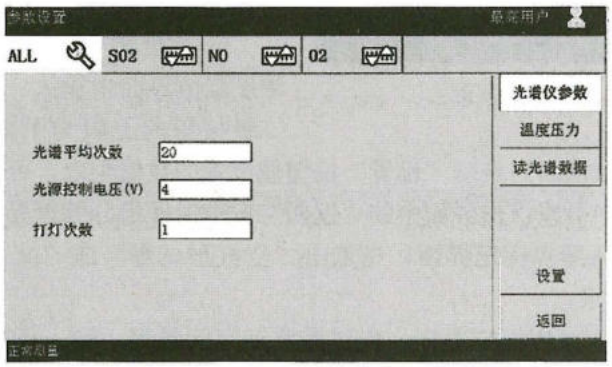


图 2-145 光谱仪参数

b. 自动参数设置

【自动参数】包括自动开关、周期设置、调零阀值等功能设置。自动开关画面可设置自动调零、自动标定是否开启或关闭，点击“设置”按钮则生效（图 2-146）。

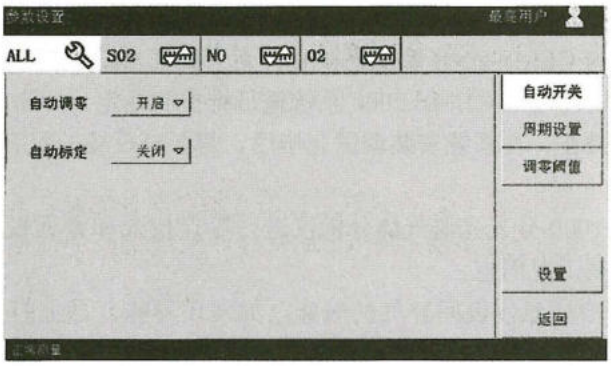


图 2-146 自动参数设置界面

【周期设置】设置自动调零周期、自动标定周期、通标气稳定时间、通样气稳定时间，点击“设置”周期间隔时间生效，如果自动调零或自动标定开启，则按照设定的周期循环执行。

【调零阀值】输入 SO_2、NO、O_2 的调零阀值，点击“设置”自动调零时生效。

⑤ 组分管理

在特定组分的测量界面中，点击这个组分的组分级模式切换按键，即可进入对应组分的组分管理界面。与仪器管理界面一样，根据当前不同系统分配的用户权限不同。管理员权限，所有仪器管理功能都对该用户开放，系统弹出如图 2-147 所示的组分管理界面。

组分管理主菜单中，共有 6 个子菜单供选择，分别是量程设置、浓度限值、零点标定、

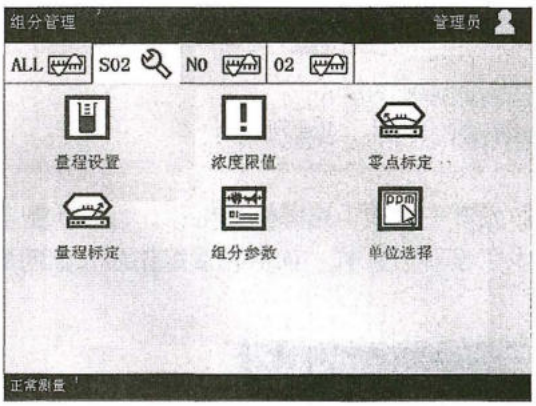


图 2-147　组分管理界面

量程标定、组分参数和单位选择。点击各键，可以进入组分管理的相应界面。

a. 量程设置：进入量程设置界面，可设置仪器测量范围。点击界面中的数字输入框即可输入量程的范围，输入设置数值后，用户需要点击“设置”按键以使设置生效，否则不启用该设置的数值。设置完毕后，用户可以点击界面中的“返回”按键返回组分管理界面。

b. 浓度限值：进入报警限值界面，在浓度限值界面中输入一级报警上限与下限，二级报警的上限与下限，点击“设置”按钮，即可生效。输入数值后，点击“设置”按键使设置的数值生效，否则不启用该设置的数值。设置完毕后，用户可以点击界面中的“返回”按键返回组分管理界面。

c. 零点标定：进入零点标定界面，先点击“空气预调零”或“N_2 预调零”。然后“确认调零”，等待调零结束。

d. 量程标定：进入量程标定界面，先选择要标定的量程，输入标气浓度，点击“预标定”，再点击确认标定，等待标定结束。

e. 组分参数：进入组分参数界面，包括校正参数、平均次数、标定浓度等功能，校正参数可查看零点，标定系数，不可修改。

f. 单位选择：进入单位选择界面，选择当前要显示的单位，点击“设置”按钮，即可生效。

⑥ 日常维护

OMA-2000 仪表为 CEMS-2000 系统的核心，为了保证 CEMS-2000 系统能长时间准确、可靠地工作，需要周期性地对 CEMS-2000 系统进行维护和标定。CEMS-2000 系统的维护都是一些简单的检查和操作，在系统安装调试完毕后，需要对现场的仪表操作工作人员进行详细培训。

a. 定期对 OMA-2000 分光光谱气体分析仪进行零点校准和量程校准，建议标定周期为一周，具体标定周期视工况而定。

b. 每天检查时，应注意仪表间空气的气味，如发现异味，马上打开门窗通风并检查管路是否泄漏，电器元件是否有过热和烧损现象。

c. 查看工控机、仪表、温度控制器等的读数是否正常，是否有故障指示信号；如不正常，首先检查工况是否变化，如工况没有变化，对仪器进行一次标定，如还不正常，请联系仪表厂商的客户服务部。

d. 检查工控机显示的烟道流量、温度、压力参数是否正常，管道是否漏水，如有异常要进行检查维护。

e. 检查仪表风压力是否正常，如果不正常，检查气路连接是否漏气。

f. 查看所有电磁阀是否正常动作，如果不动作或者动作异常，检查气路是否堵塞或者电磁阀是否损坏，如果损坏请停机，并及时更换电磁阀。

g. 查看预处理机柜中的风扇是否转动，打开机柜后门观察照明灯是否正常点亮，冷凝器风扇是否正常转动等。

6）SG1200/1250（图 2-148）

① 简介

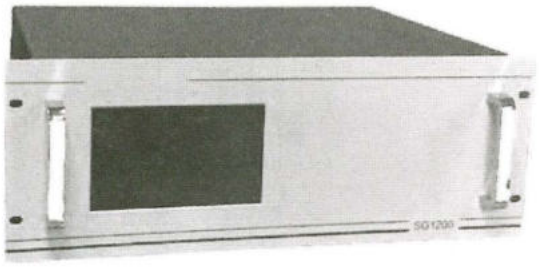


图 2-148 SG1200 分析仪

SG1200/1250 烟气分析仪基于多通道分析技术、差分吸收光谱算法、电化学分析法等多种成熟先进的分析技术，能够同时测量各种气体组分如 SO_2、NO_2、NO、O_2、NH_3 等烟气成分的浓度，并可根据用户需求增测其他的气体成分。

本仪器具有优良的稳定性、选择性、超低的检测限和高灵敏度，广泛应用于烟气排放监测系统、石化工业、冶金工业等过程气体的监测。

SG1250 性能指标见表 2-16。

SG1250 性能指标 **表 2-16**

序号	规格项目	规格 1	规格 2
1	测定成分	SO_2、NO	O_2、CO
2	测定原理	紫外差分光谱法	电化学法
3	测定范围	SO_2：0～45～8000mg/m^3 NO：0～45～3000mg/m^3 （可根据工况进行订制拓展）	O_2：0～25% CO：0～4000ppm （可根据工况进行订制拓展）
4	响应时间	＜40s	＜40s
5	重复性	0.5%	0.5%
6	线性误差	±1% F.S.	±1% F.S.
7	24h 零点漂移和量程漂移	±1% F.S.	±1% F.S.
8	一周零点漂移和量程漂移	±2% F.S.	±2% F.S.
9	进样流量变化的影响	±1% F.S.	±1% F.S.
10	环境温度变化的影响	环境温度在 15～35℃温度范围内变化，分析仪示值变化不超过：±2% F.S.	环境温度在 15～35℃温度范围内变化，分析仪示值变化不超过：±2% F.S.
11	供电电压变化的影响	供电电压变化±10%，分析仪示值变化不超过：±1% F.S.	供电电压变化±10%，分析仪示值变化不超过：±1% F.S.
12	干扰成分的影响	不受 CO、CO_2、CH_4、NH_3、HCl 的干扰影响	不受 CO、CO_2、CH_4、NH_3、HCl 的干扰影响
13	平行性	2% F.S.	1% F.S.

注：以上数据基于 SG1250 烟气分析仪于 2019 年在中国环境监测总站的实验室检测数据得出。

② 原理

a. 技术平台

光源发出紫外光经过聚焦进入光纤，通过光纤传输到气体分析室，穿过分析室时被样品气体吸收后，携带吸收信息的光通过光纤传输到分光及光谱采集模块，在内部经过光栅分光后，由阵列检测器将分光后的光信号转化为电信号，获得气体的连续吸收光谱信息（图 2-149）。

采用光纤传输大大提升了分析仪的灵活性和可维护性，可以实现只对气体分析室加热恒

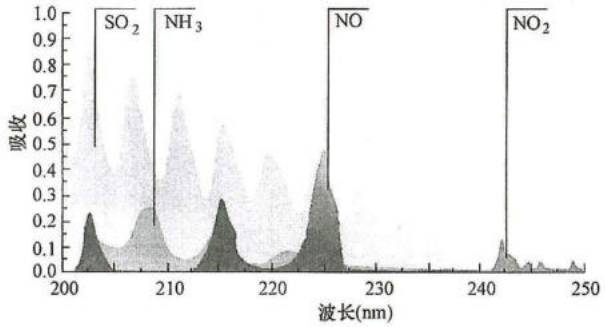


图 2-149　紫外波段气体吸收图

温而其他部分处于常温环境下工作。分析仪的光源采用脉冲氙灯，闪烁寿命超过 10^9 次，按每秒闪烁 3 次，可使用 10 年，特别适合 CEMS 系统长期连续监测需要。

分光系统采用光栅分光和低温度系数的材料加工制作，无机械运动部件，结构可靠，漂移小。

光电传感器使用薄型背照式紫外 CMOS 面阵传感器，具有优良的紫外响应能力，适合 SO_2、NO_x 的检测需要。

可进行选配长光程气体吸收池，有效吸收光程可扩展到 2～10m，并且保持较高的光学透过率和极低的气室死体积，使得 SG1250 能够在获得较高的检测限来满足超低烟气排放的检测要求，同时拥有较快的响应时间来满足实时测量的需求。

b. 分析原理

根据气体分子吸收的 Beer-Lambert 定律，光束穿过气体分析室中的样品气体，由于气体对光的吸收作用，光能量将发生衰减，被测气体在波长 λ 处对光强的吸收，可用以下公式准确描述：

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\exp\{-L[\sum_{i=1}^{m}\sigma_i(\lambda)C_i+\varepsilon(\lambda)]\} \tag{2-38}$$

式中　$I_0(\lambda)$——入射光在波长 λ 处相对强度；

$I(\lambda)$——出射光在波长 λ 处相对强度；

L——光程；

C_i——第 i 种气体浓度；

$\sigma_i(\lambda)$——第 i 种气体的吸收系数；

$\varepsilon(\lambda)$——粒子散射等因素导致的消光系数。

由上式可见，普通的算法根本无法区分光衰减是气体吸收引起的还是粒子散射等非吸收引起的，而差分吸收算法是将气体的吸收分解为两部分：$\sigma_i(\lambda)=\sigma_{i,r}(\lambda)+\sigma_{i,s}(\lambda)$，其中 $\sigma_{i,r}(\lambda)$ 是随波长快变化的部分，$\sigma_{i,s}(\lambda)$ 是随波长慢变化的部分，而粒子散射等因素导致的消光作用都是随波长缓慢变化的。显然，吸收中随波长快变化的部分只与气体吸收有关，对其进行相应的算法处理即可得气体浓度。

由于同种气体在不同光谱波段有不同的吸收，不同气体在同一光谱波段的吸收叠加作用，通过对连续光谱的分析，可以同时测量多种气体。烟气分析仪采用光栅对被测气体吸收后的光进行分光，使用 CCD 检测器将分光后的光信号转换成电信号，获得样品气的连续吸收光谱，采用差分吸收光谱的最小二乘法，实现了多种气体的同时测量。

③ 仪表功能

能同时测量多组气体的浓度，并实时显示在液晶屏上；

双量程自动切换；

浓度单位切换功能；

历史测量记录数据存储，趋势图显示功能；

标定和调零功能；

自动标定零点功能；

报警和故障管理；

多路模拟量、数字量信号输入输出；

支持 RS232 或 RS485、USB、4～20mA、开关量、TCP/IP（可选）联网通信，支持远程控制。

④ 仪器特点

可靠性高：采用寿命达 10 年的进口脉冲氙灯作光源，采用固化光谱仪，各个传感器模块无运动部件，可靠性高。

测量精度高、稳定性好：采用紫外 DOAS（差分光学吸收光谱）算法，测量结果不受烟尘、水分等因素干扰，测量准确度高；同时 DOAS 算法也消除了由仪器老化引起的误差，测量稳定性好；电化学法均为成熟测量技术，精确、可靠。

多种组分同时测量：通过对连续光谱的分析，可同时测量多种气体化学组分的浓度，具备高集成度和性价比。

高度智能化、数字化：内置多块高性能处理器，处理器间采用高速数据总线通信技术，各模块具备强大的数字化配置和监测功能；触摸屏式人机界面，操作简单、使用方便。

丰富的买方接口：提供丰富接口，可方便集成到各类控制和监测系统。可通过 RS485、RS232、4～20mA、开关量、TCP/IP 等通信方式组建无线或有线网络，为仪器的日常操作、维护和管理提供便利。

⑤ 安装场所

若单独使用 SG1250 时，在选择场所时请注意下列几点：

应尽量设置在气体采样点附近，这样可以避免由于导管过长而影响或延迟数据显示。

请注意避开直接受太阳、热源、锅炉等较强烈辐射的地方以及经常直接被风吹，受震动的场所。

请设置在周围空气环境中无腐蚀性气体、有机气体和粉尘的干净场所。

应尽量远离大电流的电源线，高压电线等容易产生干扰的地方，选定在有良好接地的场所。

本分析仪如安装在机箱、面板、架子等场合使用时，应注意周围温度不要超过 15～35℃，湿度应在 95%RH 范围内。

⑥ 电气连接

a. 典型连接

电气连接包括仪表供电、仪表接地、通信接口、GPRS 接口、数字量输出接口、数字量输入接口等。仪表测试的浓度信息可以通过通信接口与外部工控机、DCS 等连接，通信接口为 RS232、RS485、4～20mA、开关量、USB 或 RJ45 接口。典型的电气连接图见图 2-150。

b. 电源连接注意事项

安装时，检查当地电压与分析仪面板上规定的电压是否相符。

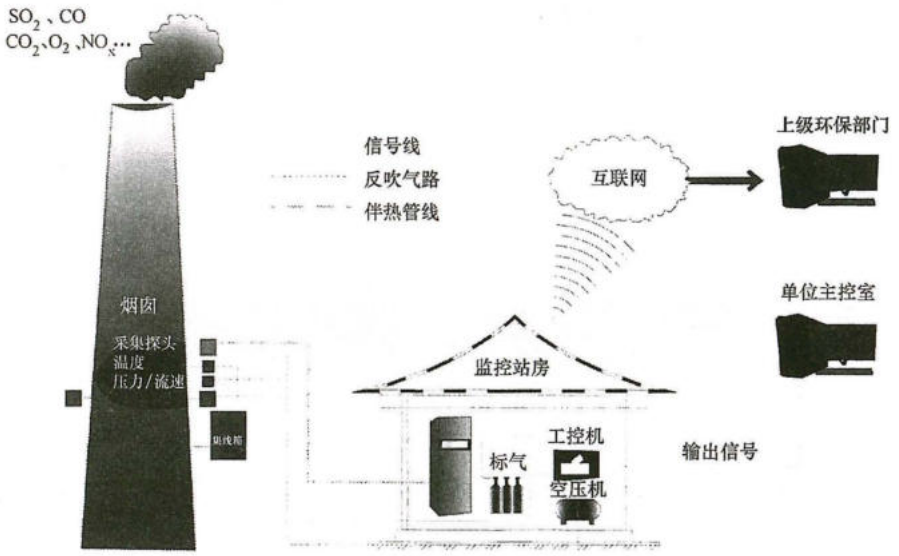


图 2-150　SG1250 在烟气连续监测系统中的应用

电源电缆必须经过根据 IEC60227 或 IEC60245 进行的测试，使用环境温度为：0～70℃。

电源电缆必须跟混合电缆（信号传输和控制电缆）分开走线。

分析仪通过插头连接电源，只有专业人员才能进行连接操作。插头导线截面积不小于 $1mm^2$，且火线必须连接到正确位置。

电源电缆不得接触温度高于 70℃的表面。

c. 信号电缆连接注意事项

使用数字量输出和输入接口时，请加入继电器进行隔离保护，保证仪表的数字接口不被意外情况损坏。

数字输入端口接内部光耦的输入，输入端断路代表逻辑低电平，输入端短路逻辑高电平，各通道相互独立、隔离。

d. 分析仪操作介绍

以 SG1200/1250 烟气分析仪界面为例，简单说明烟气分析仪操作的注意事项。

图 2-151 为主界面，在该界面能看到分析仪当前测量参数的实时显示值及系统时间。并且在该界面有进入不同菜单的按钮，我们可以通过权限密码登录后进行参数修改和执行标定零点和量程工作。

图 2-152 是分析仪的光谱参数界面，上标签 I 表示实时光谱，A 表示实时吸光度，B 表示背底暗电流光谱，D 表示标定零点光谱，A1 表示 SO_2 标定的吸光度图谱，A2 表示 NO 标定的吸光度图谱，A3 表示 NH_3 标定的吸光度图谱。

通过实时吸光光谱能判断系统的光强是否正常，以及光谱是否运行正常，这对售后进行机器运行状态分析十分有必要。通过对实时吸光度进行分析，能够初步定性的判断机器的测

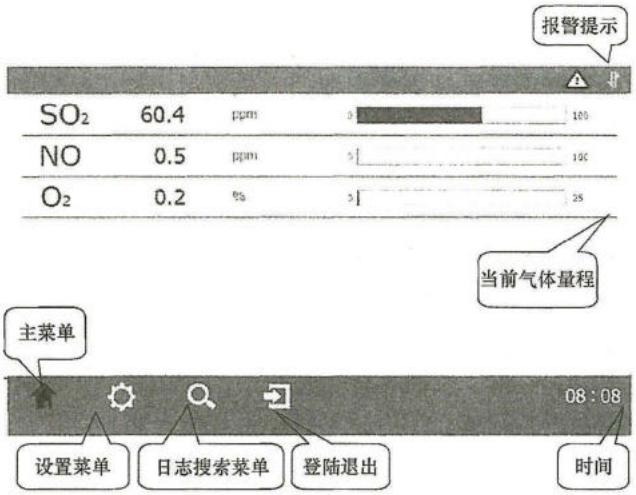


图 2-151 主界面

量值是否受到其他干扰气体的影响以及测量值是否准确等。通过对 D、A1、A2 和 A3 进行检查，能够判断机器是否标定正常。

当检查完系统设备是否运行正常后，运维人员可以进入标定界面进行零点和量程的标定。

进行零点标定，打开零气标定减压阀后，把系统打到维护模式，使机器进行全程标定状态，通气5min后，待示数稳定后，钩选光谱仪选项，然后点击开始，随后系统出现标定零点进度条进行零点标定状态（图 2-153）。

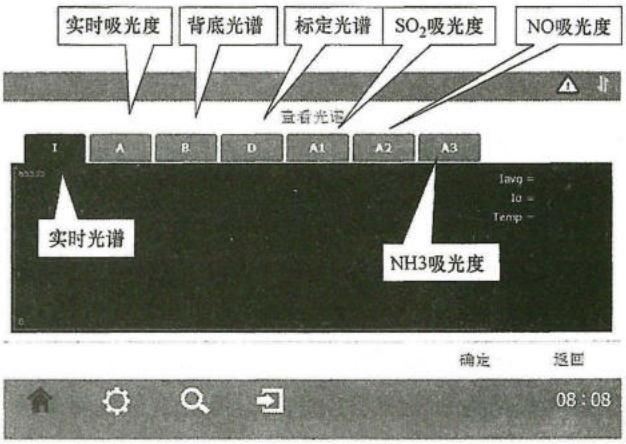


图 2-152 光谱参数界面

标定完零点后，随后我们进入量程标定界面，在该界面可以对分析的 SO_2、NO、O_2 等参数的量程进行标定，具体操作方法步骤和上面类似，填好需要标定参数的标气浓度后就可以执行量程标定了（图 2-154）。

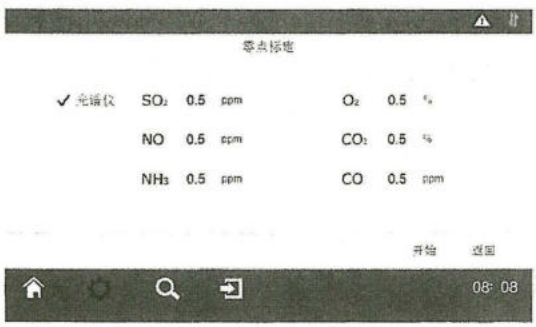


图 2-153 零点标定

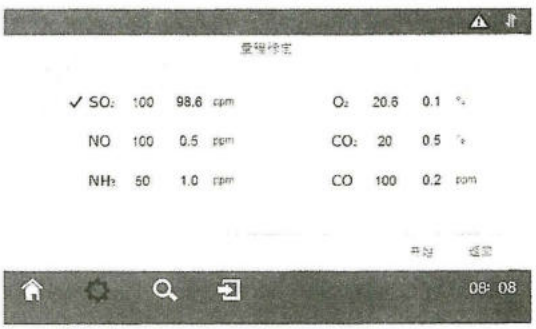


图 2-154 量程标定

运维人员在现场除了需要执行零点和量程标定操作外，一般还需要检查仪器日志状态，即仪器在上个运行周期内是否出现报警和故障，在日志搜索主菜单选项内可以进行任意时间的系统日志、报警和标定修正操作日志的查询。

气瓶存放及安全使用要求：

气瓶应存放在阴凉、干燥、远离热源的地点或气瓶间内。存放地点严禁明火，并保证良好的通风换气。氧气瓶、可燃气瓶与明火距离不得小于5m。

搬运气瓶要轻拿轻放，防止摔掷、敲击、滚滑或强烈震动。

气瓶应按规定定期做技术检验和耐压试验。各类气瓶的检验周期不得超过下列规定：盛装腐蚀性气体的气瓶，每两年检验一次；盛装一般性气体的气瓶，每三年检查一次；盛装惰性气体的气瓶，每五年检验一次。气瓶在使用过程中，发现有严重的腐蚀、损伤或对其安全可靠性有怀疑时，应提前进行检验。不得使用超期未检的气瓶。

高压气瓶的减压阀要专用，安装时螺口要上紧，不得漏气。开启高压气瓶时操作者应站在气瓶出口的侧面，动作要慢，以减少气流摩擦，防止产生静电。

氧气瓶及其专业工具严禁与油类接触，氧气瓶附近也不得有油类存在，绝对不能穿用沾有油脂的工作服、手套及油手操作，以防万一氧气冲出后发生燃烧甚至爆炸。

气瓶内气体不得全部用尽，必须留有一定压力的余气，称为剩余压力，简称余压。为了防止其他气体倒灌进去，使气瓶受到污染甚至发生事故。并且，气瓶充气前，配气单位对每只气瓶都要做余气检查，对没有余气的气瓶，要重新进行清洗抽空，万一疏忽，则会留下后患。

2.1.4.4　辅助设备

（1）冷凝装置冷凝水排放装置

冷凝装置冷凝水排放装置安装要求。CEMS冷凝器冷凝除水后的液态水分必须尽快排出仪器，否则滞留在冷凝装置内部的冷凝水量逐渐增多，将对测量结果甚至冷凝装置硬件造成严重损害。目前，CEMS冷凝水排放一般使用“蠕动泵”排水和容器收集统一排放两种方式，针对高湿的超低安装现场，建议采用蠕动泵排水方式。使用蠕动泵排水的仪器，其泵的质量和长期运行稳定性是此类仪器必须克服的难题。安装时应确保蠕动泵排水畅通，工作正常，且在日常运行中加强维护和耗材更换。使用容器统一收集处理的仪器应防止冷凝水收集容器长期使用滋生藻类等生物，造成排水开关堵塞。

（2）尾气排放装置

尾气排放装置安装要求。CEMS尾气排放管路应敷设合理规范，不应随意放置，确保尾气排放通畅，防止排放尾气污染周围环境（尤其是分析小屋内的环境）。对于高湿的超低安装现场，管路的敷设应同时考虑尾气冷凝导致冷凝水倒灌的问题，确保排放尾气中的冷凝水不会倒灌影响到仪器的正常运行。此外，如果在我国北方地区或冬季温度低于零度的地区使用CEMS，其尾气排放应配套加热或伴热装置，确保排放尾气中的水分不易结冰，造成尾气排放堵塞、排气不畅。最终导致系统内部压力不稳，影响样品分析数据的准确性。

（3）定时反吹装置

定时反吹装置安装要求。CEMS反吹装置是确保仪器设备在污染源恶劣的环境条件下长期稳定工作的重要保护设备。其安装应能够满足CEMS采样探头自动反吹清洁工作的气体压力需求。反吹频率及方式应依据污染源现场颗粒物的排放状况确定。反吹气应经过必要的出水和过滤的鉴定预处理，确保反吹过程对CEMS正常测量不会产生影响。

2.1.5 日常运营要点

2.1.5.1 日常运营内容

（1）周巡检

CEMS运维单位应根据标准和仪器使用说明中的相关要求制订巡检规程，并严格按照规程开展日常巡检工作并做好记录。日常巡检记录应包括检查项目、检查日期、被检项目的运行状态等内容，每次巡检应记录并归档。日常巡检间隔不超过7d，日常巡检规程应包括该系统的运行情况、监测仪器的工作状况、系统辅助设备的运行状况、系统校准工作等必检项目和记录以及仪器使用说明书中规定的其他检查项目和记录。

每周对所负责运营的污染源自动监控设备检查一次，检查内容包括：

1）检查颗粒物浓度、SO_2、NO、O_2、流速、压力、温度、湿度等读数。

2）若工控机有报警（故障、超标、超限等），检查报警产生原因。

3）工控机报警：根据显示数字的颜色判断“故障”“超限”“超量”等。

4）对所有通气管和管接头检查，发现接头漏气，应及时处理。

5）检查采样探头温度、冷凝器温度及排水情况、气源压力、样气流量等，当读数不正常时，检查原因。

6）经常对预处理箱内部和气体分析仪内部气室入口端和出口端连接的精细过滤器进行检查，发现污染立即更换。

7）在使用中发现颗粒物浓度传感器及气体分析仪切光器有噪声或运转不灵，则须更换切光器或用酒精清洗转轴，禁止向切光器转轴上加润滑剂。

8）检查工控机显示的烟道流量、温度、压力参数是否正常，仪表、温度控制器等的读数是否正常，是否有故障指示信号；如不正常，首先检查工况是否变化，如工况没有变化，对仪器进行一次标定。

9）查看所有电磁阀是否正常动作，如果不动作或者动作异常，检查气路是否堵塞或者电磁阀是否损坏，如果损坏请停机，并及时更换电磁阀。

10）检查时，应注意仪表间空气的气味，如发现异味，马上打开门窗通风并检查管路是否泄漏，电器元件是否有过热和烧损现象。

11）预处理装置包括冷凝装置、伴热管温度、流量、蠕动泵、抽气泵、气路及电气控制回路是否正常。

12）检查样气钢瓶气体是否过期和及时补灌新气体，合理配置气体浓度。

（2）月巡检

每个月检查规定了每隔一个月应该检查的项目：

1）检查颗粒物浓度传感器保护镜片是否清洁，检查仪器光路准直情况。

2）检查空气吹扫系统滤芯、压缩机或鼓风机、软管。

3）检查气源柜压缩机起动和停止周期是否正常，检查气源柜压力表指示在系统正常工作时是否在0.5～0.6MPa。

4）检查气源柜自动排水器是否按设定时间进行正常排水，定期排放压缩气罐冷凝水。

（3）季度检查

季度检查规定了每隔三个月应该检查的项目：

1）检查标气瓶压力和使用期限，当压力低于1MPa时需更换，标气有效日期过期需更换。

2）检查采样探头过滤器及其管路的积灰和凝水情况，采样系统重点检查采样探头、伴

热管、采样泵、气体管路、气体预处理（各过滤装置）、反吹系统等，尤其是探头的积灰情况和腐蚀情况以及管路的反吹及固定状况。

3）检查冷凝器的热交换器、泵的老化状态。

4）检查了冷凝器蠕动泵、泵管是否完好，有故障时应立即更换。

5）检查流速传感器测风杆是否需要更换，流速零点校准，废气流量监测设备主要检查皮托管积灰情况和腐蚀情况以及管路的反吹状况。

6）清扫仪器，特别是气源柜、工控机风扇及系统中的各电路板。

7）颗粒物零点和跨度校准。

8）湿度传感器零点和跨度校准。

2.1.5.2　日常维护保养

应根据CEMS说明书的要求对CEMS系统保养内容、保养周期或耗材更换周期等做出明确规定，每次保养情况应记录并归档。每次进行备件或材料更换时，更换的备件或材料的品名、规格、数量等应记录并归档。如更换有证标准物质或标准样品，还需记录新标准物质或标准样品的来源、有效期和浓度等信息。对日常巡检或维护保养中发现的故障或问题，系统管理维护人员应及时处理并记录。

现场巡检从取样探头到数据的最终输出，均应列入检查范围。

（1）设备整体运行情况

首先观察设备是否有故障报警、触摸伴热是否处在加热状态、冷凝器温控仪温度是否正常（4℃）、分析仪转子气流量是否正常（如1.0L/min左右）、蠕动泵是否正常运转、观察软件各参数是否跳变，对相应故障作出正确处理。

（2）检查设备的气密性

1）看分析仪气流量是否正常，主流分析仪通常在0.5～1L/min，如果超出范围，可以通过样气及旁路气流量计的针阀来进行调节；如果仅仅通过调整针阀已经不能满足流量的要求（流量太低）时，则表明气路中有堵塞的情况（一般情况下为取样探头的过滤器滤芯堵塞，此时需要更换探头滤芯）需要进行以下操作：

首先，排除气柜内气路是否通畅，从伴热管断开看气流量是否通畅，如气流量不通畅可能是采样泵有堵塞情况对其处理。其次，如果机柜内无堵塞情况接入采样管设备流量不足，可能是伴热管线与采样探头堵塞断开采样管，同时打开手动反吹，看是否有气从采样管反出，判断采样管堵塞，或从探头部分断开采样管，观察气流量是否正常也能判断采样管是否堵塞。再次，如果伴热无堵塞现象，造成堵塞原因是采样探头，拆开采样探头，更换或清理滤芯，做好探头O形圈与垫片的气密性。

2）查看机柜内气密性，堵塞采样看分析仪转子流量是否归零，如仍有气流量，首先排除蠕动泵是否有漏气现象，再排除采样泵泵膜是否破裂。

可能的泄漏原因及处理方法：

① 排水蠕动泵泵管损坏（蠕动泵泵管的寿命大约在1年）：拆下蠕动泵的进、出口的连接管路，逆时针方向扭动泵管卡子，拆下泵管进行检查，如果泵管损坏，更换泵管。

② 气路连接接头松动：检查连接接头螺母有无松动情况，如有，紧固螺母。

③ 堵住进气口、开泵，约30s左右的时间，样品气流量计的流量已经降至0.0L/min左右，则表示系统机柜内部无泄漏。

（3）检查各参数设置、原始信号的准确性

1）查看设备各参数量程、零点、系数、截面积是否正确，同时观察原始信号电流值变

化是否与实际生产工况、历史数据相符，作出相对应的检修。

2）检查历史数据的完整性。查看距上次巡检的历史数据分钟、小时、日数据是否完整连贯，如果有异常数据结合实际生产、设备运行情况作相对应的巡检记录。

3）检查数采仪工作是否正常。首先观察数采仪时间是否准确，其次观察数采仪采集数据是否有变动，与工控机数据是否一致，最后联系平台是否正常上传，询问传输各项数据实时、小时、日数据是否有缺失。

（4）检查空压机、气源是否正常

1）检查空压机是否正常能正常起停，压力是否足够，同时定期清除气罐内的积水。

① 检查空压机电源是否正常，检查空气开关是否合闸。

② 检查空压机压缩空气的压力是否小于0.5MPa。

③ 空压机排水，打开气缸下端的排水孔，排水结束后旋紧。推荐每2周进行一次。

2）压缩机供电220V正常，但无任何动作，首先考虑压缩机热保护，找到压缩机电机部分在侧边有一个黑色圆形的开关按下，如果压缩机仍无法正常工作，再考虑机头部分是否风叶卡住与机头连杆机构脱落。

3）压缩机一直处于打气状态，首先考虑气路漏气，关掉压缩机出气开关观察压缩机压力表是否降压，如降压的话检查罐上逆止阀、排水阀、马达针阀是否密封良好，如压力值不变，说明压缩机工作正常，再检查外部气管接头是否有漏气地方。

4）压缩机无漏气与电源输入正常无法工作，始终处于热保护状态，考虑压缩机针阀无法泄压，请检查针阀拆下清洗或更换。

（5）冷凝器的检查

1）正常情况下，温度控制器将显示实际的冷却温度，温度控制器出厂温度设置4℃，这个值不能低于+1℃，否则热交换管结冻；如果设置值高于环境温度，冷凝器将不工作。

2）当冷凝器表面灰尘较多时，需不定期用氮气或无水无油压缩空气对表面进行吹扫，否则影响制冷效果。

3）当热交换管产生腐蚀或内部污染时，需拆下热交换管进行更换或清洗工作。

（6）采样探头滤芯检查及更换

1）打开探头防护罩，拆下保温套，逆时针方向松开压紧螺钉，取出滤芯组件，握住滤芯组件，逆时针方向转动松开滤芯压紧件，拆掉滤芯。将滤芯组件表面的灰尘清理干净。

2）按照相反的步骤更换新的滤芯。

3）检查滤芯组件“O”形圈的情况，如果“O”形圈破损、变形，需要更换“O”形圈。

4）清理探头的密封端面。

5）按照滤芯组件的箭头标注方向安装滤芯组件，并拧紧压紧螺钉，装好保温套，盖好探头防护罩。

（7）伴热管的检查

1）观察采样管线，是否全程伴热。

2）用手触碰采样管线，感觉是否有温度异常偏低的部分。

3）检查采样管两端，恒功率伴热管是否预留1m伴热带。

4）检查探头加热温度，一般加热温度不低于150℃。

5）检查伴热管伴热温度（温度显示仪表在分析仪机柜内），一般伴热温度不低于150℃。

（8）流速仪检查

1）将流速传感器从烟道上拆下，清理法兰短管中和测量杆上的积灰。

2）定期手动进行反吹流速仪。

3）将流速采样杆保护套密封到采样杆前端，水平固定到烟道的情况下校准零点。

2.1.5.3 CEMS的校准

校准需要使用校准装置、标准物质或者其他辅助装置来进行。气态污染物CEMS在使用期间每周至少用标准气体校准一次仪器的零点和量程。

（1）SO_2、NO_X和O_2浓度校准

1）标气连接校准口并打开减压阀调至合适流量。

2）操作软件进入校准界面或点击机柜面板上的校准按钮。

3）启动零点校准程序，用零气置换分析仪管路中的样气，稳定后校准仪器零点。

4）切换至量程标准气体，稳定后校准仪器量程点。

（2）流速CEMS的校准

1）流速CEMS在使用期间至少每月校准一次。

2）流速的比对标定校正采用皮托管法作为参比方法，记录当前流速系数K_2值。

3）参比方法与CEMS同步进行，至少获得9个数据对。

4）计算参比方法数据平均值V_R与CEMS法数据平均值V_C。

5）计算流速系数：$K_2'=(V_R/V_C)\times K_2$。

（3）颗粒物CEMS的校准

颗粒物CEMS在使用期间每月至少用校准装置校准一次仪器的零点和跨度。

1）打开烟尘浓度主、副机固定搭扣，用酒精清洁主、副机光学镜片。

2）将主机外反射镜转下，校准零点。

3）主机内标准滤光片转下，校准仪器跨度。

4）重复步骤（2）、（3），将零点和跨度调整在规定误差范围内。

2.1.6 常见故障与处理

2.1.6.1 故障现象：温度数据为零或满量程

处理方法：检查24V电源是否送到信号隔离器（一种信号入端同时输出直流24V；一种没有24V输出）和温度传感器接线端子，如传感器有24V，在测量传感器PT100电阻值（对照表附后）如电阻值正常，可能为变送器故障（可进一步用万用表电流挡测量电流有无输出）如有电流输出，再到机柜内测量信号隔离器端子，确认信号是否送到隔离器，在测量信号隔离器下端接线端子是否有输出，若无输出则为信号隔离器故障。如有输出，在测量E1（231）模块上A+A⁻端子上电流，如有电流可确定为231模块故障。满量程一般为变送器故障。

注：在测量各个接点时注意接线是否牢固。

2.1.6.2 故障现象：压力数据为零或满量程

处理方法：首先从实际情况确定烟道属于正压还是负压区，再检查24V电源是否送到信号隔离器（一种信号入端同时输出直流24V；一种没有24V输出）和压力传感器接线端子，如传感器有24V，先清理传感器取样管是否堵塞然后在测量传感器输出电流，如无电流或满量程则为变送器故障，如有电流输出，再到机柜内测量信号隔离器端子，确认信号是否送到隔离器，在测量信号隔离器下端接线端子是否有输出，若无输出则为信号隔离器故障。如过有输出，在测量E1（231）模块上B+、B—端子上电流，如231模块上有电流可确定为231模块故障。

注：在测量各个接点时注意接线是否牢固。

2.1.6.3 流速故障现象

（1）流速数据为零或满量程

处理方法：检查24V电源是否送到信号隔离器（一种信号入端同时输出直流24V；一种没有24V输出）和流速传感器接线端子，如传感器有24V，检查皮拖管取压管是否堵塞或腐蚀，检查变送器与取压座之间的密封性，查看应变薄膜是否污染腐蚀。在测量传感器输出电流，把取样口堵死垂直放置标定零点，如无电流或满量程则为变送器故障，如有电流输出，再到机柜内测量信号隔离器端子，确认信号是否送到隔离器，在测量信号隔离器下端接线端子是否有输出，若无输出则为信号隔离器故障。如过有输出，在测量E2（231）模块上C+C⁻端子上电流，如231模块上有电流可确定为231模块故障。

（2）皮托管流速的标定

如果在停炉期间流速仍有数据或开炉数据与实际工况不相符，我们可以校准差压变送器零点，校准差压变速器最好在安装位置校准，首先拆出皮托管用堵头密封差压管，然后按原先安装位置固定后，用万用表打到电流挡测试差压变速器表头Test端，按下表头校零键持续5s以上，同时观察电流表是否到4mA，校零结束后取出密封套，随后正常安装。

注：在测量各个接点时注意接线是否牢固。

2.1.6.4 故障现象：湿度数据为零或满量程

湿度基本介绍：采用电容法三线制表，红色（+24V），黑色（-24V），黄色（温度电流输出+），蓝色（湿度电流输出）。

基本处理方法：检查24V电源是否送到信号隔离器和湿度传感器接线端子，如传感器有24V检查加热片是否加热、清理采样管滤芯是否堵塞，在测量变送器输出电流，如无电流则为变送器故障，如有电流输出，再到机柜内测量信号隔离器端子，确认信号是否送到隔离器，在测量信号隔离器下端接线端子是否有输出，若无输出则为信号隔离器故障。如果有输出，在测量E2（231）模块上D+D⁻端子上电流，如231模块上有电流可确定为231模块故障。

注：在测量各个接点时注意接线是否牢固。

2.1.6.5 故障现象：上位机软件上所有数据显示为零

处理方法：查看485模块及PLC模块供电是否正常，指示灯是否闪烁正常（绿灯闪烁正常，红灯闪烁故障），检查PLC插头是否连接可靠，查看软件里面com口设置是否与一体机后面的com口设置一致，检查协议是否与PLC协议一致。然后查看PLC有无报警指示灯。

2.1.6.6 故障现象：软件提示冷凝器高低报警

处理方法：先查看冷凝器开关是否送电，检查冷凝器工作是否正常，温控参数是否设置合理（下限报警、上限报警是否在2～6℃），如冷凝器工作正常参数设置正确，用万用表测量24V电源是否送到制冷器接线端子（测量时红表笔对制冷器4号端子，黑表笔对机柜内-24V），如制冷器端子有24V电压，则检查制冷器温控仪2对常开触点是否工作正常（检查温控接点到机壳端子接线是否牢固）。

2.1.6.7 故障现象：采样泵不工作

处理方法：先观察采样泵有无烧坏明显痕迹，断开采样泵电源线测量采样泵电阻，如电阻∞说明线圈断路，阻值为零说明线圈短路，在测两线与外壳电阻是否在∞，若不在∞说明采样泵坏。如若采样泵线圈无故障，则检查采样泵电源是否为额定工作电压。若不是，检查电气部分。

2.1.6.8 故障现象：仪表校准阀、系统校准阀、探头反吹阀、流速反吹阀不工作

处理方法：与上述采样泵，五通阀检查大致方法相同，在检测时分别对应继电器是否正常动作。

注：在测量各个接点时注意接线是否牢固。

2.1.6.9 空压机故障说明与维护

(1) 空压机供电 220V 正常，但无任何动作，首先考虑压缩机热保护，找到压缩机电机部分在侧边有一个黑色圆形的开关摁下，如果压缩机仍无法正常工作，在考虑机头部分是否风叶卡住与机头连杆机构脱落。

(2) 空压机一直处于打气状态，首先考虑气路漏气，关掉压缩机出气开关观察压缩机压力表是否降压，如降压的话检查罐上逆止阀、排水阀、马达针阀是否密封良好，如压力值不变，说明压缩机工作正常，在检查外部气管接头漏气地方。

(3) 空压机无漏气与电源输入正常无法工作，始终处于热保护状态，考虑压缩机针阀无法泄压，请检查针阀拆下清洗或更换。

2.1.6.10 冷凝器故障说明与维护

(1) 温度控制器无显示，则检查电源，检查电源插头是否松动。

(2) 不制冷，检查表面积灰是否严重，用压缩空气对表面进行吹扫；冷却剂泄漏，送冷凝器返厂检修。

(3) 温度控制器显示 S. ERR，测温电路或测温元件故障，送冷凝器返厂检修。

(4) 气流变小，气流受阻，清理和检查热交换管；冷凝管被冻住，关闭冷凝器，待温度升高或外部加热。

2.1.6.11 其他故障

(1) 分析仪出现数据较大的负漂，原因是零点不稳定，波动大导致。可能是管路中有水分，污染气室，用氮气标定零点。

(2) 分析仪测量不准确，光源可能老化。

(3) 氧高硫低，探头或者管路堵，清理探头和管路。

2.1.6.12 监测站房的日常管理

(1) 保持监测站房清洁、整齐、安静，与监测分析无关的人员和物品不得进入仪器间。

(2) 无关人员未经过批准不得随意进入监测站房，外来人员进入监测站房须经有关负责人许可，并由相关人员陪同。

(3) 监测站房内各种仪器、设备和工具应分类放置，妥善保管。

(4) 监测过程中产生的“三废”，必须按规定进行处理，不得随意排放、丢弃。

(5) 运营人员每次工作结束后必须打扫卫生，使用完毕后的仪器设备清理、清洁并恢复到原位。

(6) 监测站房发生意外事故时，迅速切断电源、水源等。立即采用有效措施，及时处理，并报告有关单位领导。

(7) 使用各种仪器及电、水、火等设施等，按使用规则进行操作，保证安全。

(8) 离开监测站房前，必须认真检查电源、水源、门窗，确保监测站房的安全。

2.1.7 典型应用案例

2.1.7.1 采样过程组分损失控制

样气进入分析仪之前，需进行过滤、除碳氢化合物处理。过滤可以过滤掉烟尘和样气传

输过程中形成的固态化合物，保护反应室免受污染。除碳氢化合物的作用主要是避免氢化合物引起的荧光淬灭现象，避免测量误差。

（1）反应室

为避免荧光强度受温度的影响，反应室温度一般稳定在50℃。

（2）采样系统

采样系统主要包括限流器、压力、流量的测试装置和采样泵。通过限流器将流量稳定到0.5～1L（不同分析仪所需流量不同），压力、流量用来监控分析仪的运行状况，出现问题时，报警。

（3）影响因素的分析

样气中碳氢化合物能淬灭发射的荧光，使发射荧光的浓度降低，引起测量误差。

紫外荧光分析仪一般通过在样品室之前设计一个特殊洗涤器，就可以除去样品气中的任何碳氢化合物来排除这些气体的干扰。

2.1.7.2 红外分析仪克服背景气干扰

如果样品气体中存在干扰气体，将产生宽带光谱干扰。

例如合成氨生产中要测量CO的含量，而在其背景气中含有N_2、H_2和CO_2等。其中因为N_2、H_2为同一原子结构的双原子气体，不能吸收1～25μm波段的红外线辐射能。但是，CO_2却与CO有着重叠的特征吸收波长区域，这就给CO含量的检测形成了明显的干扰。如图2-155上图所示。图中CO的特征吸收波长是a～c之间的波段，CO_2的特征吸收波长是d～b之间的波段，可见a～b之间的波段为二者所共同吸收。如此使得入射到检测器的红外线能量的减少，造成一定的测量误差，并且该误差的大小还会随着CO_2含量的变化而变化。因此，称CO_2为干扰气体（或叫干扰组分）。为了消除干扰部分的干扰，准确检测待测组分的浓度，可采取多种措施，如设置滤波气室或干涉滤光片，使这些干扰组分特征吸收波带的光在进入测量气室或检测器之前就被吸收掉，只让待测组分特征吸收波带的光通过。

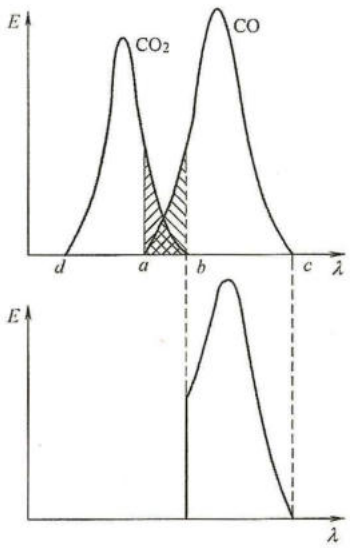


图2-155 干扰组分对待测组分吸收波段的影响

（1）设置滤波气室消除干扰

在滤波气室中充入干扰组分气体，当红外线先通过滤波气室时，干扰组分就按自身的特征吸收波长将这一波段范围内的红外线全部吸收掉。在滤波气室中充以CO_2和N_2，CO_2将d～b之间波长的红外线全部吸收掉，只剩下CO所能吸收的b～c波段，如图2-155下图所示。同时，在参比滤波气室中也充以CO_2和N_2，使另一束红外光束在通过参比气室后，干扰组分将所能吸收的红外线全部吸收掉。于是，进入检测室两侧的红外线能量的差值，就只有经过参比滤波气室后没有被待测组分吸收的红外线，与通过测量气室后被待测组分吸收后的红外线两者之差。此差值的大小与待测组分的含量多少成正比，从而有效地克服了背景气中干扰组分的影响。

（2）采用干涉滤光片消除干扰

采用干涉滤光片，将其作为测量气室和参比气室的窗口材料。因为这种干涉滤光片可以得到较窄的通带，其透过的波长可以通过镀层材料的折射率、厚度以及层次等加

以调整。上述的CO含量检测中、滤光片的通带可以得到比图2-155上图的b～c段还要窄。如此一来，两路红外线中能通过干涉滤光片的只有CO特征吸收峰波长4.65μm附近很窄的通带。干扰组分不能吸收这部分能量，故而不存在干扰问题。

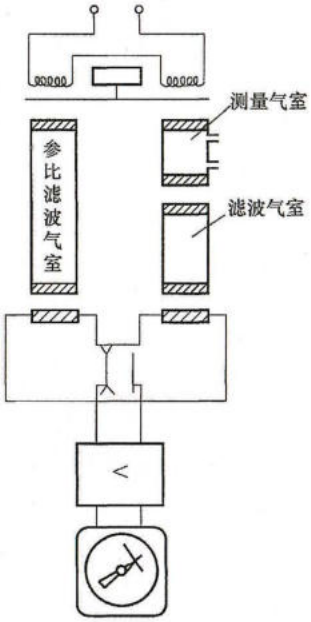


图2-156　设有滤波气室的红外分析仪

水分广泛存在于工艺气体中，生产状态的变化，预处理运行的变化，环境温度、压力的变化，都会使进入分析仪中的气样的含水量发生变化。水分在1～9μm波长范围内几乎有连续的吸收带，其吸收带和许多组分特征吸收波带重叠在一起。当两者的吸收波带重叠时，难以消除水分干扰带来的测量误差。

水蒸气在红外辐射波段有较宽的频谱范围分布导致红外法对水蒸气干扰比较敏感，如图2-157所示，水蒸气在SO_2、NO、CO、CO_2红外特征频谱上有分布，对此类组分的测量有一定影响。为了减少或降低水蒸气对待测组分的干扰，目前常用的方法是采用冷干系统对含湿样品气进行除湿脱水处理，以降低样品气中的水分。常用的办法是采用带温控系统的冷却器降温除水。也可采用气相过滤相关等方法克服。烟气中的SO_2、NO_x、CO、CO_2以及H_2O（气相）等都可采用红外吸收法进行测量，如果水分含量很高，且仪器本身不能克服水分的干扰，则SO_2测量可以考虑改用紫外吸收法（水在紫外光区没有吸收）。

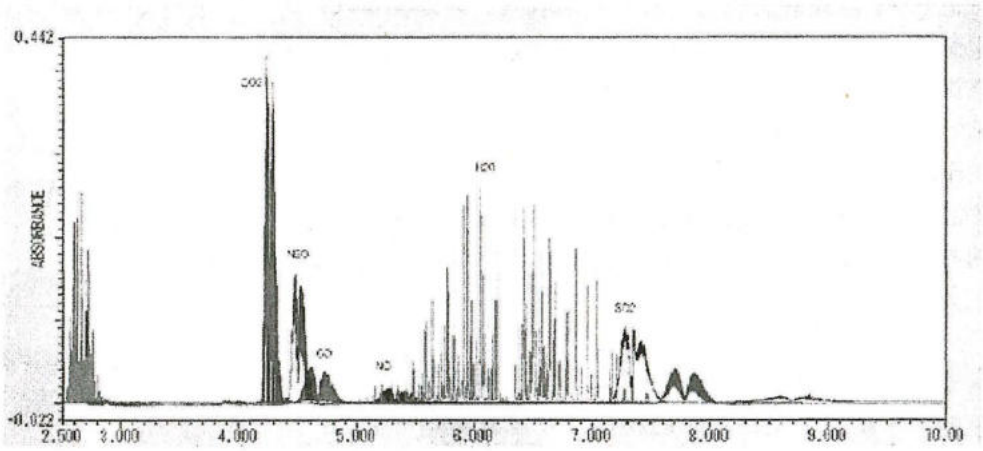


图2-157　气体红外吸收光谱图

除了水分干扰以外，碳氢化合物如焦化厂排放的气态污染物中存在未燃尽的CH_4、C_2H_6、C_2H_4等物质，对于SO_2的测量结果带来很大干扰。

减少组分之间的干扰或对分析技术的影响，可采用以下任何一种方法：

1）采用待测化合物的专用技术。

2）测量所有化合物的浓度或主要干扰化合物，对它们的存在进行修正。

3）分析前除去干扰组分。

4）采用模块化多组分分析仪，模块化多组分分析仪可以同时测量多种气体组分，因此可以通过计算消除不同组分之间的干扰测量。

2.1.7.3 紫外分析仪克服背景气干扰

紫外分析仪克服背景气干扰是指有效去除与待测组分特征吸收峰有交叉或重叠的其他组分的吸收峰，以提高待测组分的准确度。与燃煤锅炉或燃气锅炉比较，某些固定污染源排放的烟气成分较为复杂，如碳素厂、焦化厂、生物质发电厂，废气中除待测的 SO_2、NO_x 组分外，还存在大量其他成分的气体，如一氧化碳、硫化氢、氨气、甲烷、丙烷、苯、芳香族化合物及其他不饱和烃类。一氧化碳在紫外光谱波段，没有对应的吸收峰存在，因此利用紫外光谱原理的分析方法，能够有效地避免一氧化碳对二氧化硫测量值的干扰，但是对于硫化氢、氨气、甲烷、丙烷、苯、芳香族化合物及其他不饱和烃类等气体在 185～400nm 的紫外波段，与 SO_2 和 NO_x 的紫外吸收光谱存在重叠的情况，必然会对被测组分的准确测量造成干扰。

（1）案例 1

1）现象描述

山西省长治某氨法脱硫焦化厂，安装某厂家以紫外差分气体分析仪为核心部件的固定污染源在线监测系统，系统在实际的运行过程中存在 SO_2 测量值波动大，SO_2 测量值时而超出 100mg/m^3 排放限值，时而测量数据很低的情况，且 SO_2 测量值的变化与脱硫工艺上的喷氨量成正比。经过对在线监测系统 SO_2 测量值与脱硫工艺中喷氨量关系对比分析，理论上脱硫过程中的喷氨量应与 SO_2 排放成反比，即喷氨量越大，烟气中 SO_2 排放值应减少。在线监测系统中二氧化硫的实测值与实际工艺理论的结果完全不符合。

2）原因分析

利用便携式傅里叶红外分析仪现场测试，发现当喷氨量增大时，烟气中 NH_3 含量也在相应的增高，分析原因是在氨法脱硫工艺会造成 NH_3 溢出，溢出 NH_3 对紫外分析仪的 SO_2 测量值造成正干扰，导致 SO_2 测量值偏高，该现场安装 CEMS 系统为抽取式冷凝法系统，当烟气中存在氨逃逸的情况时，NH_3 作为一种弱碱性气体，极易溶于水，溢出的 NH_3 在经过在冷凝除水能够去除部分，但是存在残留的情况，当残留的 NH_3 进入分析仪，由于 NH_3 在紫外波段 200～230nm 有很强的吸收，与 SO_2 在该波段的吸收重叠，NH_3 与 SO_2 吸收截面见图 2-158，若紫外分析仪选用 200～230nm 进行 SO_2 浓度的反演，极易对 SO_2 测量造成影响。该厂安装的紫外差分分析仪正是用此波段进行浓度反演，且未消除 NH_3 与 SO_2 的交叉干扰，进而造成 SO_2 测量误差。

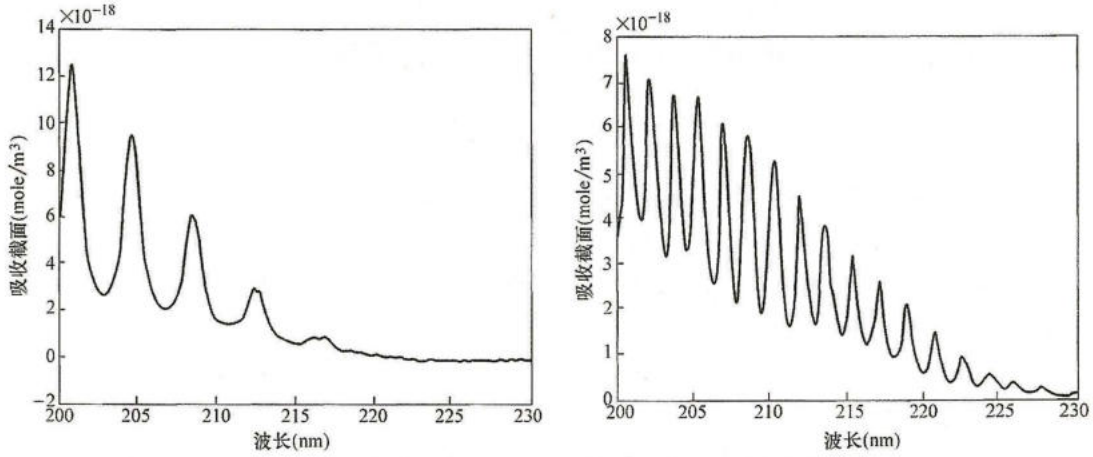


图 2-158 紫外波段 200～230nm 内 NH_3 与 SO_2 的吸收谱图

3）解决方案

① 在样品气进入分析仪之前去除干扰组分

在样品气进入分析仪之前，增加一级氨气过滤装置吸收残留 NH_3，减少 NH_3 对待测气体（即 SO_2）的干扰。经过上述处理后，SO_2 测量值较稳定，且测量值与脱硫工艺的理论值相吻合。该方法不仅可以解决背景气干扰问题，同时可以解决由于氨逃逸造成的铵盐结晶堵塞管路问题。

但是由于除氨过滤装置为化学反应吸收的原理，除氨效率与氨逃逸浓度成正比，过滤器的使用寿命受到限制，需定期更换过滤器填充物，后续的运营成本较高。

通过对现场设备的升级处理，该系统已稳定运行一年多，再未出现 SO_2 测量值频繁波动的现象，说明利用本方案能够有效消除烟气中氨逃逸对 SO_2 测量值的干扰。

② 结合干扰气和待测气体光谱库与特定软件算法去除干扰物质的干扰

紫外差分吸收光谱技术是依靠获取烟气复杂的吸收光谱曲线进行待测气的定性、定量分析，通过在分析仪的程序中预先存入相关干扰气及待测气的标准吸收谱图库，通过对不同浓度组分气体的光谱与预存的标准谱图库进行比较，利用专用的分析技术及光谱处理方法，去除干扰组分的吸收谱图，只留待测组分气的吸收谱，最后定量分析得到待测气体浓度。

该方法能够有效地消除所有背景气的干扰，但前提条件是需要利用便携式设备对废气成分进行分析，得到干扰组分的成分，将废气中所含干扰气体的标准光谱库存储在分析仪中。

③ 选取待测气紫外吸收波段避免与干扰物质重叠

对于 SO_2，在紫外波段的吸收主要集中在 200～230nm、280～320nm 两个波段，在 200～230nm 范围内，SO_2 的吸收截面高达 $1\times10^{-17}cm^2$，若选择此波段进行 SO_2 气体浓度推算，一定程度上可以满足测量精度高、检测限低的要求，但是该波段内有很多其他气体的吸收干扰，氨气、芳香族化合物等该波段都有很强的吸收，易对 SO_2 的准确测量产生干扰。对于 280～320nm 波段，其吸收截面次之，能达到 $1\times10^{-18}cm^2$，此波段受干扰物质相对 200～230nm 波段较少，且干扰峰较小，基本可忽略，其中 NH_3 在此波段不会对 SO_2 测量造成干扰，因此该方法在去除 NH_3 背景气干扰是个不错的选择，但是若选择该波段进行 SO_2 浓度反演，由于吸收截面较小，其检测限较高，测量精度会降低，可以通过加长吸收光程的方案解决。因此选取合适待测吸收波段，有利于去除背景气 NH_3 对仪器造成干扰。

（2）案例 2

1）现象描述

山西省太原市某焦化厂，安装上某厂家 CEMS 系统，分析仪为非分散紫外原理，仪表进行零点和满度校准后，在实际的分析过程中 SO_2 测量值偏大，通过冷凝器前端抽入 N_2，仪表 SO_2 测量值高达 $100mg/m^3$，长时间抽 N_2 后，SO_2 测量数据缓慢下降。重新恢复采样状态后，SO_2 数据会迅速升至 $140mg/m^3$，而红外法比对结果仅为 $15\sim30mg/m^3$，两者测量误差很大。为进一步分析误差来源，把分析仪表更换为某型紫外差分原理分析仪进行测试，SO_2 测量值同样高达几十至一百多毫克每立方米。

2）原因分析

通过对利用 SGEP-300 型仪表紫外光谱进行采集、分析，发现在紫外波段 200～400nm 内，出现了多个非 SO_2、NO、NH_3 三种气体的特征吸收峰，这些特征吸收峰与 SO_2、NO、

NH_3 特征吸收峰部分吸收峰发生重叠。由此判定紫外法测量误差来源于这些具有特征峰的物质。结合焦化厂生产工艺、产物等因素，定性出该类干扰物质为芳香族类化合物，部分该类化合物在紫外区 200～250nm 波段范围内会存在很强的吸收。对非分散紫外法和紫外差分法仪表都会造成背景气的干扰。图 2-159 为该焦化厂烟气紫外吸收谱图。

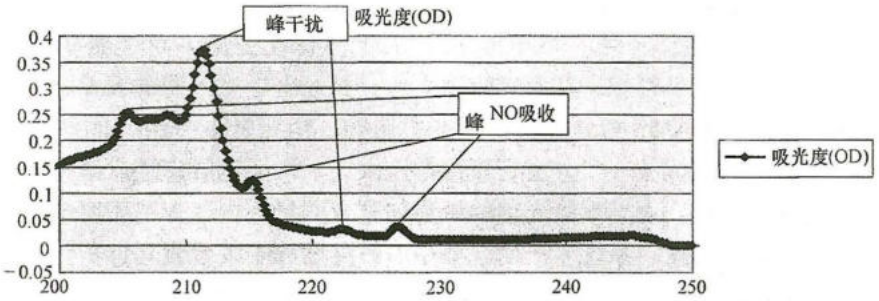


图 2-159 焦化厂烟气紫外吸收谱图

图中出现 3 个非常明显的非 SO_2、NO、NH_3 三种气体的特征吸收峰，分析认为是干扰物质造成的吸收，图中 SO_2 的特征曲线无法直观分辨，借助软件算法将其分离也仅为十几毫克每立方米。

3）处理办法

① 在样品气进入分析仪之前去除干扰组分

可通过在烟气预处理中增加在线除烃类装置，且该装置必须对 SO_2、NO_x、O_2 等不会造成任何影响。

② 选取待测气紫外吸收波段避免与干扰物质重叠

SGEP-300 型紫外差分分析仪，结合 SO_2 和 NO 反演波段的正确选取、气室光路的加长设计与独特的软件算法同步优化彻底解决芳香族化合物对测量数据的正干扰，同时利用本方案也能够消除对分析仪测量精度的影响，且能达到 0.1 mg/m^3 检测限低的技术指标。

通过对 SGEP-300 软件的升级、算法优化后，对上述焦化厂进行测试，测试数据较稳定，同时利用标准气现场进行全系统的零点漂移、量程漂移、示值误差验证，均满足 HJ 76-2017 标准，同时利用便携式傅里叶红外设备进行准确性比对，也满足 HJ 76—2017 标准，说明经过本方案能够彻底消除芳香族化合物对 SO_2 测量值的干扰。

SGEP-300 型紫外差分分析仪，如图 2-160 所示。

2.1.7.4 环境条件变化造成影响

抽取系统的分析仪通常放置在有温度控制的室内或机柜内。由于温度对 CEMS 分析仪性能的影响，日常校准时，仪器会产生校准误差。HJ 76 标准制定温度变化对分析仪影响的技术指标为，环境温度在 15～35℃ 范围内变化，分析仪的读数不超过±5%F. S.。

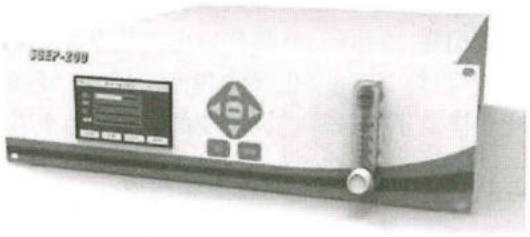


图 2-160 SGEP-300 型紫外差分分析仪

红外线分析仪检测过程需在恒定的温度下进行，环境温度发生变化将直接影响红外光源的稳定，影响红外辐射的强度，影响测量气室连续流动的气样密度，还将直接影响检测器的正常工作（检测器的输出阻抗下降）。如果温度太高超过正常状态，检测器的输出阻抗下降，导致仪器不能正常工作，甚至损坏检测器。

环境温度的变化对于 CEMS 的分析仪测量结果存在较大的影响，尤其是对于昼夜温差较大的区域，分析仪内部温度的昼夜差别依然存在。CEMS 的分析仪大多数采用温度修正的方法来解决因环境温度变化导致测量结果变化的问题。在分析仪器内部一般设有温控装置及超温保护电路。但是，这种方法只能解决部分问题，由温度所带来的误差不能完全消除。主要原因是，温度修正曲线只能针对使用 N_2 或者空气条件下（零气）的温度变化信号，对于其他气体浓度（如 20%、50%、100%F. S.）的气体修正公式不可能做全面的试验。因此，即使零点温度修正效果很好，在不同浓度下的计算也会带来不同的误差。

大气压力的变化对 CEMS 的分析仪也会产生影响，检测是在分析仪的样品测量室内进行的，由于采集的样品气体从一个分支管直接排入大气，样品测量室通常维持在环境大气压力下。在许多光谱技术中，由于测量光谱的压力加宽或测量室内气体的密度变化，测量对样品室的压力变化敏感。因此，系统生产商应根据海拔高度和安装位置对分析仪进行调节。

然而，修正海拔高度对测定的影响并不能够解决大气压日复一日的变化。大气压力在同一个地区、同一天都会有变化，大气压力的变化，对气样放空的流速有直接影响，会使气室中气样的密度发生变化，从而造成附加误差。对于中间量程（如测量范围 90%～100%）的红外分析仪，压力变化不但对灵敏度有影响，对“零点”也有影响。对一些微量分析或测量精确度要求很高的仪表，可增加大气压力补偿装置，使分析仪因大气压力变化引起的漂移减至最小。

2.1.7.5　NO_x 转换效率影响

NO_2 测定是通过钼炉转换器转化成 NO 进行测定，于是钼炉的转化效率就成了比较重要的一个因素，往往由于钼炉转换器的效率偏低而造成了测试的结果偏低。出现问题后监测钼转化炉的转化效率，一般其转化率必须维持在 96%～100%，如果超过这范围就需要更换钼炉转换器了。

2.2　稀释抽取式 CEMS

稀释抽取法（Dilution-Extractive）是使用无污染的清洁干燥空气稀释样气，使混合样气露点降低至环境温度以下，从而实现无需除水即可进行测量的一种抽取检测方法。

稀释抽取法是最早应用于环境空气连续监测的技术。20 世纪 60 年代，在美国开始尝试在环境空气分析仪的基础上，通过抽取污染源排放烟气并稀释至接近环境空气，然后由环境空气分析仪进行测量的方式监测排放源排放的气态污染物，稀释抽取法即由此产生。

我国在 20 世纪 90 年代以电力设备配套的形式在电厂污染排放监测领域引进了稀释抽取技术，经过多年的消化吸收和完善提高，目前已经实现了稀释抽取式 CEMS 整机的完全国产化，满足了排放源连续监测的需要，在污染源排放在线监测领域占据了一定的市场份额。

2.2.1　气态污染物 CEMS 基本组成

稀释抽取系统主要由稀释采样探头、非加热的样气传输管线、分析仪器等部分组成，其基本结构如图 2-161 所示。

其中，稀释采样探头抽取烟道烟气，利用干燥洁净的稀释气体对其进行稀释，使混合样气的露点温度降低至环境温度以下。

稀释抽取系统的正常工作的关键是保证恒定的稀释比，目前应用最广泛的恒流稀释技术是临界限流孔技术。临界限流孔（critical orifice）在几何尺寸上为一孔径远远大于孔长度的

孔板型结构，在CEMS中多采用耐热玻璃和陶瓷材质，前端有石英过滤棉过滤，经过陶瓷孔板到达限流孔出口（图2-162）。当限流孔两端存在一定压差时，气体通过限流孔的流速随着压差增大而增大，而当限流孔两端压差满足临界条件（临界压力比为0.53，即 $P_{下游压力}/P_{上游压力}=0.53$）时，气体通过限流孔的流速仅取决于气体分子流经限流孔时的振动速度（本地声速），这时流过临界限流孔的气体的质量流量将保持不变，与限流孔两端的压差变化无关。通过对临界限流孔设计不同的孔径，可得到相应的恒定气体流量。由于在临界状态下气体流经限流孔的流速为音速，因此临界限流孔又称为音速小孔或音响小孔[2]。

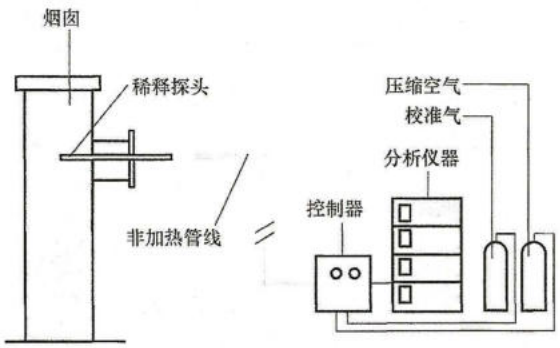


图2-161 稀释抽取系统构成

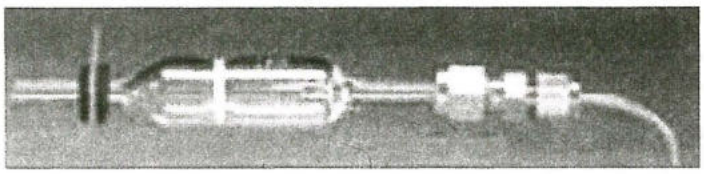


图2-162 临界限流孔

经过稀释后的混合样气，在稀释气体的压力下，通过样气管线输送至分析仪器进行检测。由于稀释后的样气露点温度要低于最低环境温度，因此稀释抽取系统中样气管线是非加热的，极大地降低了系统的复杂程度和维护的工作量。

分析仪器负责对样气中待测污染物的浓度进行测量。经过稀释后的混合样气的特性近似于环境大气，因此，稀释抽取式系统中采用与环境空气监测相同的分析技术和仪器进行测量，可以与环境空气分析仪器互换和互用。

稀释气体是稀释抽取系统的重要组成部分。稀释抽取系统所需的稀释气体必须是干燥、洁净、无油、无颗粒物以及无被测气体组分的，稀释气体中微小的干扰成分经过稀释比的放大，将会对测量结果造成显著的影响。通常由工厂或空气压缩机提供的压缩空气不能满足稀释抽取系统对稀释气体的要求，需要配置专门的空气净化系统（或零气发生装置），经过净化处理后方能用作系统的稀释气体。

2.2.2 气态污染物CEMS分类

根据稀释场所的不同，稀释采样系统分为（烟道）内稀释系统和（烟道）外稀释系统。

2.2.2.1 内稀释系统

内稀释系统在插入烟道或管道的探头内稀释烟气，如图2-163所示。

由于内稀释系统在烟道内把烟气稀释至露点低于当地最低环境温度，因此稀释样气可通过不加热的采样管输送到分析仪器，从而简化了气体输送系统。

2.2.2.2 外稀释系统

外稀释系统在烟道外稀释烟气，如图2-164所示。

如果在烟道外紧靠采样口处稀释烟气，可用不加热的采样管输送稀释样气至分析仪器；如果在远离烟道的CEMS机柜前端稀释样气时，则必须采用加热的采样管。

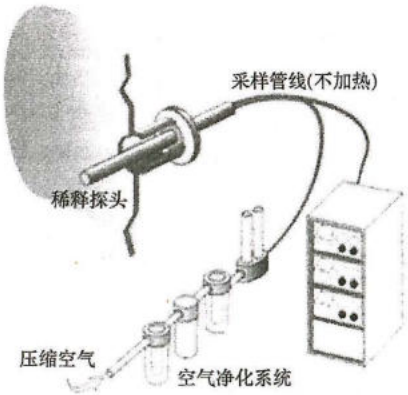


图 2-163　内稀释系统基本结构

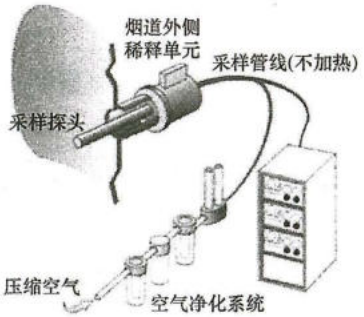


图 2-164　外稀释系统基本结构

相对于烟道内稀释系统，烟道外稀释系统更容易维护。另外，烟道外加热稀释部件，更容易保持稳定的温度，对于湿法净化装置后的烟气采样，更容易解决经常遇到的水滴和气溶胶冷凝问题，不过其成本相对于内稀释系统也有所提高。目前，主要采用的还是烟道内稀释采样系统。

2.2.3　气态污染物 CEMS 分析技术

分子吸收外来能量时，分子的外层电子可能被激发而跃迁到更高的电子能级，这种处于激发态的分子是不稳定的，可以经由多种衰变途径而跃迁回基态。这些衰变的途径包括辐射跃迁过程和非辐射跃迁过程，辐射跃迁过程伴随的发光现象，称为分子发光。

分子发光分析技术成为近年来发展比较快的分析技术之一。分子发光分析技术是以分子发光作为检测手段的分析方法，具有灵敏度高、选择性好、试样量少、操作简便等优点，已在生物医学、药学以及环境科学等方面被广泛应用。按分子激发的模式分为光致发光和化学发光或生物发光。如果分子通过吸收光能而被激发，所产生的发光称为光致发光。如果分子是由化学反应的化学能或由生物体（经由体内的化学反应）释放出来的能量所激发，其发光分别称为化学发光或生物发光。

按分子激发态的类型分为荧光和磷光两个类型。分子荧光、磷光都属于光致发光。

荧光是光致发光的冷发光现象，当物质吸收了特征频率的入射光，就由原来的基态能级跃迁至电子激发态，并且立即激发出比激发波长长的出射光，一旦停止入射光，出射光的现象立即消失，此时所发射的光即是荧光。

磷光是一种缓慢光致发光的冷发光现象，当物质吸收了特征频率的光子，就由原来的基态能级跃迁至电子激发态，然后缓慢退激发并发出比激发波长长的出射光，一旦停止入射光，发光的现象持续存在，此时所发射的光即是磷光。

2.2.3.1　SO_2 分析技术

在稀释抽取系统中，紫外荧光分析仪用来测量稀释气中的 SO_2 浓度。

（1）紫外荧光分析仪基本原理

紫外荧光法是基于分子发射光谱法。采用紫外灯照射在 SO_2 气体分子上，让它成为激发态的 SO_2，当激发态的 SO_2 分子返回到基态时，就会发射出荧光光子。

当 SO_2 分子被适当波长（190～230nm）的紫外光子撞击时，就保留了一些过剩的能量，能引起 SO_2 分子中的一个电子跃迁到一个更高的能量轨道。

$$SO_2 + h\upsilon_1 \rightarrow SO_2^*$$

SO_2 受到激发，成为激发态的 SO_2^* 以后，因为系统将寻求最低能量稳定状态，SO_2^* 分子很快回到它的基态，以荧光波长（240～420nm）光子的形式释放出过剩能量。

$$SO_2^* \rightarrow SO_2 + h\upsilon_2$$

实际应用中用 214nm 的紫外光激发，产生的荧光光子的中心波长为 330nm，用 220nm 的紫外光激发，产生的荧光光子的中心波长为 320nm。

在低湿度条件下，标准状态下浓度为 0～143mg/m^3 范围内时，荧光的强度与 SO_2 浓度呈线性关系。

（2）紫外荧光光强与 SO_2 度对应关系

根据紫外荧光法原理，荧光总光强（I）与 SO_2 浓度之间的关系可表示为下式。

$$I = k \times c \tag{2-39}$$

式中 I——表示荧光总光强；

c——表示 SO_2 样气浓度；

k——表示为一定物质、一定测定条件下的比例系数。

比例系数 k 一般与反应室的长度、温度、材料、SO_2 的吸收系数、空气分子质量、荧光的淬灭时间、荧光出口面积以及出口透镜的透过率等参数有关。当检测仪系统确定后，在稳定的条件下，这些参数也随之确定，此时 k 可视为常数。因此，式（2-39）表示的紫外荧光光强（I）与 SO_2 样气的浓度（c）呈线性关系，这是紫外荧光法进行定量检测的重要依据。

（3）紫外荧光分析仪组成

紫外分析仪主要包括光源系统（光源及光源预处理系统）、检测系统、样气预处理系统、反应室、采样系统。

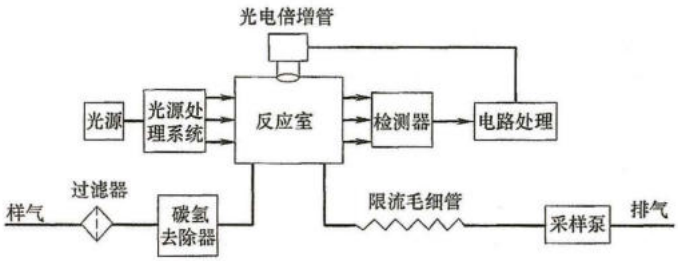


图 2-165 紫外分析仪原理图

1）光源及光源预处理系统

光源及光源预处理系统主要是通过聚焦、滤波等光学处理手段，处理掉对系统有影响的杂散光，满足 SO_2 激发荧光的条件。光源采用紫外光源。

市场上的紫外分析仪在光源及光源处理系统上，有两种技术路线：一种是紫外荧光分析仪，采用氙灯为光源，通过镜片组反射获得所需的激发波长；另一种采用锌灯为光源，采用滤光片让 213.8nm 的主共振线通过，获得激发波长。

紫外荧光分析仪采用氙灯作为光源，氙灯属于宽光谱的广角光源，波长覆盖 190～2000nm，实际激发 SO_2 发出荧光的是 220nm，为了设计要求，氙灯发出的光经透镜组聚焦后汇聚到镜片组，经过多次反射挑出波长 220nm 的紫外光进入反应室。设计的优点是氙灯的寿命较长，一般为 2 年的时间。

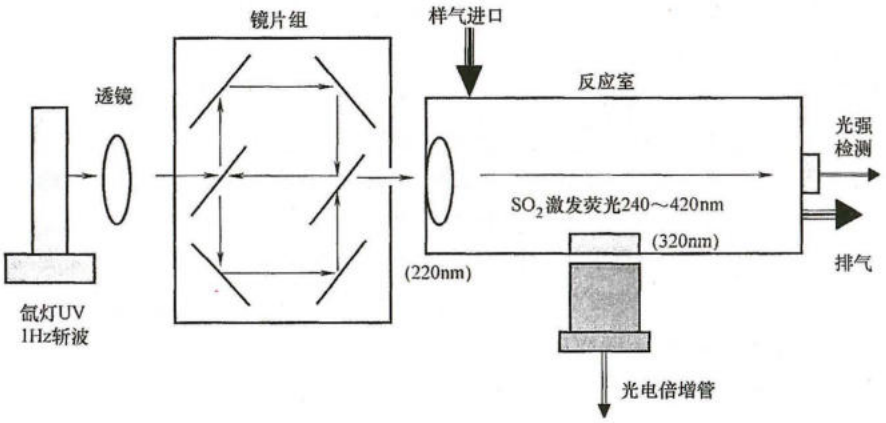


图 2-166　分析仪原理图

采用锌灯做光源，光源属于线状光源，通过工艺处理，只产生 214nm 单波长的光，通过窄带滤光片滤掉可能产生影响的杂散光，达到激发波长的要求。优点是光学系统简单，缺点是光源的寿命不超过一年。

2）检测系统

检测系统分为两部分：检测器和光电倍增管。

光源光强会随着光学系统的污染或时间逐步减小，影响激发的荧光光强，影响测量的样气浓度，一般采用光电二极管作为检测器检测光源光强的变换，建立光强变化与样气浓度的数据模型，对由于光源光强变化造成的测量误差进行补偿。

光电倍增管增益高和响应时间短，又由于它的输出电流和入射光子数成正比，所以它被广泛使用在弱光信号的测量中，其优点是测量精度高，可以测量比较暗弱的光信号，采用光电倍增管这类的弱电检测器进行荧光的检测，可以保证高的测量精度。在紫外荧光的测量中，主要选用荧光的主波长进行测量，所以在反应室与广电倍增管间应增加窄带滤光片。

3）样气预处理系统

样气进入分析仪之前，需进行过滤、除碳氢化合物处理。过滤可以过滤掉烟尘和样气传输过程中形成的固态化合物，保护反应室免受污染。除碳氢化合物的作用主要是避免氢化合物引起的荧光淬灭现象，避免测量误差。

4）反应室

为避免荧光强度受温度的影响，反应室温度一般稳定在 50℃。

5）采样系统

采样系统主要包括限流器、压力、流量的测试装置和采样泵。通过限流器将流量稳定到 0.5～1L/min（不同分析仪所需流量不同），压力、流量用来监控分析仪的运行状况，出现问题时报警。

2.2.3.2　NO_x 分析技术

化学发光分析法是分子发光光谱分析法中的一类，化学发光分析技术又称为冷光，它是在没有任何光、热或电场等激发的情况下由化学反应而产生的光辐射。

某些物质在进行化学反应时，由于吸收了反应时产生的化学能，使反应产物分子激发到激发态，受激分子由激发态跃迁回基态时以辐射形式发出一定波长的光。这种吸收化学能使分子发光的过程，称为化学发光。利用化学发光建立起来的分析方法称为化学发光分析法。化学发光也发生在某些生物体系内，称为生物发光。

在稀释抽取式 CEMS 中，NO_X 采用的分析原理是化学发光法。

（1）化学发光分析仪基本原理

NO 和 O_3 在一起发生碰撞发生化学反应，NO 吸收了大量的能量生成激发态的 NO_2^*，激发态的 NO_2^* 是一种不稳定态，它很快会回到基态，伴随着 NO_2^* 返回基态的过程，有大量能量需要释放，将产生 500～3000nm 的红外辐射，波峰大约在 1200nm。

在化学发光的原理中提到，在 NO 浓度较低的情况下，NO 和 O_3 发生化学反应发出的光与 NO 的浓度呈线性关系，NO 浓度越高，产生的光子越多，光的能量越强。采用带通滤光片选择 600～900nm 范围内的光，用近红外的光学检测器观测光学高通范围内化学发光辐射的总强度确定 NO 的浓度。

化学发光法的原理如下：

$$NO+O_3 \longrightarrow NO_2^* + O_2$$

$$NO_2^* \longrightarrow NO+hv$$

烟气中的氮氧化物主要包括 NO 和 NO_2，NO_2 不能与 O_3 发生化学发光反应，要检测样气中氮氧化物总量，需要把 NO_2 转化为 NO。常用的转化方法为金属还原法，即利用特定活泼度的金属在高温下与 NO_2 反应，夺取其中的一个 O 原子，使其还原为 NO。通常采用金属钼（Mo）作为还原剂，其反应式为：

$$3NO_2+Mo \xrightarrow{315℃} 3NO+MoO_3$$

（2）化学发光分析仪组成

化学发光分析主要包括臭氧发生单元、钼转化单元、反应室、检测单元、采样单元。

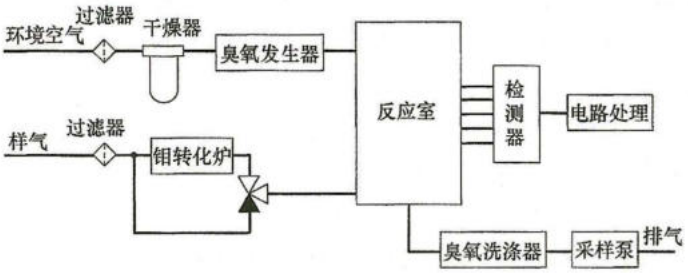


图 2-167　NO 化学发光法分析仪结构图

化学发光分析仪能同时检测 NO、NO_2 和 NO_X 三个组分。如图 2-167 所示，样气经过过滤器后分为两路，一路经过电磁阀组后直接通入反应室，实现 NO 测量，一路经过钼转化炉将 NO_2 转化为 NO，实现 NO_x 的测量，阀组实现两路测量的切换。NO_x 减去 NO 即为 NO_2 的测量值，从以上可以看出，NO_2 是计算值。

1）臭氧发生单元

为了最大程度的促进化学反应，分析仪需要在内部提供浓度大约在 3000～5000ppm 的臭氧。在 NO_x 化学发光分析仪中，产生臭氧气体采用环境空气，经过过滤、干燥后，进入石英管。用 UV 光照射石英管中的氧气产生 O_3，提供 O_3 的浓度超过反应所需要的臭氧浓度以确保 NO 完全转换成 NO_2。

2）钼转化单元

分析仪需要检测 NO_x，由于 NO_2 不与 O_3 产生化学反应，在转换炉中进行催化还原反应，生成 NO，再进入反应室分析。

催化剂容易受到 NH_3 的影响，Mo 与 NH_3 反应生成另外一种物质，造成钼转化炉失效。在样气中 NH_3 浓度比较高的情况下，会造成转化炉失效。

3）反应室

避免荧光强度受温度的影响，反应室温度一般稳定在 50℃。

4）采样系统

采样系统一般通过采样泵实现，因为排气中有臭氧的组分，O_3 具有超强的氧化性，会氧化采样泵的泵膜，所以在采样泵前必须有活性炭除 O_3 的装置。

5）光学检测器

大部分厂家的产品通过光电倍增管检测 NO 和 O_3 反应室的光强。光电倍增管（PMT）是一种具有极高灵敏度和超快时间响应的光探测器件。一个光电倍增管通常是一个包含各种专门设计的电极的真空管。光子进入光电倍增管冲击光电阴极，使它发出电子。这些电子被加速和放大，实现 10 次以上倍增，放大倍数可达到 $10^8 \sim 10^{10}$ 倍。最后，在高电位的阳极收集到放大了的光电流。输出电流和入射光子数成正比。整个过程时间约 10^{-8} s。

（3）化学发光分析技术应用领域和技术特点

化学发光分析技术广泛应用在环境监测、临床分析、生物化学等领域里，包括污染物测定、酶分析、免疫测定法和痕量金属分析等。例如，致癌物亚硝胺经热解后产生亚硝酰自由基 NO，后者与臭氧反应，产生激发态二氧化氮 NO_2^*，最后成为二氧化氮而发光，可用于亚硝胺的检测，灵敏度达亚 ppb 级；鲁米诺在某些氧化剂存在下的发光反应，可用于测定这些氧化剂；苯巴比妥与过氧化氢的反应为某些过渡金属及其他一些物质所催化，可用来测定这些起催化作用的物质。又如，用化学发光分析可测定腺嘌呤核苷三磷酸酯（ATP），许多酶催化的过程以 ATP 作为反应物或产物，借测量 ATP 可测定酶的活性。

化学发光分析技术特点：

高灵敏度：化学发光分析是试样由于化学反应所产生的光的强度来测定试样中物质的含量。此法具有高灵敏度和宽的动态范围（3～6 个数量级）、仪器简便和不存在空白等优点。

高选择性：化学发光与其他发光分析的本质区别是体系产生发光（光辐射）所吸收的能量来源不同。化学发光，必须具有一个产生可检信号的光辐射反应和一个可一次提供导致发光现象足够能量的单独反应步骤的化学反应，每种物质发生的反应不同，产生的光的波长不同，只要控制好化学反应，即能准确测量物质的浓度。

无光源，信噪比高，是一种有效的痕量分析方法。

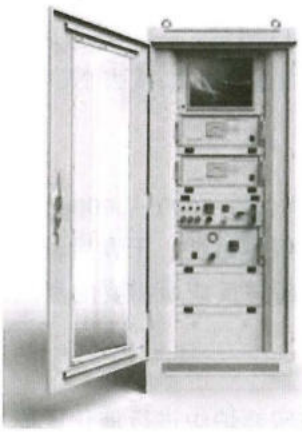


图 2-168　稀释法机柜系统外观图

由于不需要外来光源，减少或消除瑞利散射和拉曼散射，避免了背景光和杂散光的干扰，降低了噪声的影响，大大提高了信噪比。它作为一种有效的痕量分析方法，在材料科学、环境科学和生命科学等领域中具有广泛的应用前景。

2.2.4　安装调试要点

以国内某公司稀释法烟气连续监测系统为例，对稀释抽取式 CEMS 的安装调试要点进行说明，系统机柜如图 2-168 所示。

2.2.4.1　稀释探头

在安装采样探头之前，先检查采样探头的整体情况，

图 2-169 为采样探头。探头表面是否有损伤，电源线和温度线是否有破损，用万用表量温度传感器 DP-200 的每根线缆对外壳电阻，检查探头加热器的“L”、“N”之间的电阻是否在正常的范围内。如果一切正常，先指导用户焊接安装法兰。采样探头法兰焊接时，左右方向对中、尾部水平焊接。探头法兰焊接好后，法兰与管道壁连接处应作密封处理，这样可以防止空气进入管道从而影响系统检测的准确性。

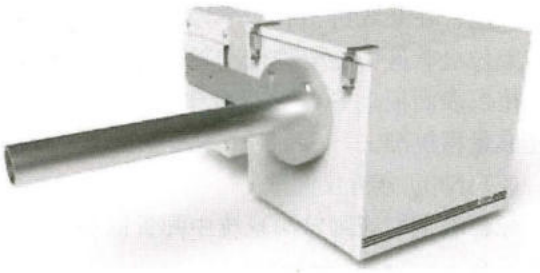


图 2-169 采样探头示意图

加热取样管与稀释采样探头的安装，将加热取样管与稀释采样探头法兰处对连，用螺钉紧锁。

稀释法采样探头由过滤器、音速小孔、小孔压力计等组成，稀释气通过氟管进入探头稀释样气后，输出至仪表内部。

DP-200 稀释探头的稀释气压力为 370～450kPa，稀释气压力可以通过系统机柜内控制面板上的精密减压阀控制。

安装过程中应确保音速小孔紧贴滤芯外部，必须做好温控措施，否则将会影响测量精度。

2.2.4.2 稀释气发生单元

零气发生器用于将压缩空气处理成无污染的清洁干空气。零气发生器如图 2-170 所示，用于去除压缩空气中的气态污染物（NO、NO_2、NH_3、SO_2、有机物等）获取无污染的压缩空气。



图 2-170 零气发生器外观图

稀释法系统对压缩空气的质量要求较高，现场压缩空气气源压力至少在 0.4～0.7MPa。现场提供的压缩空气往往质量不高，其中水分含量会发生变化，但是经过稀释气发生单元后稀释气露点应低于－30℃。

2.2.4.3 分析仪安装调试

（1）SO_2 分析仪调试

稀释法烟气连续监测系统中配置二氧化硫分析仪，如图 2-171 所示。

初次安装应该完成对 SO_2 分析仪调零和校准，确保仪表能正常运行。

调零：利用系统的稀释气作为零气进行校准，调整系统至维护状态，选择系统调零标定，通过上位机软件中的标定界面选择调零，启动调零，仪表自动进行零点标定，而后调整转子流量计流量为 3～5L/min，待分析仪表示值稳定在零点附近后点击确认校准即完成调零。

标定：在系统机柜底法兰盘连接满量程的 SO_2 标气，标气减压阀调节至 0.2～0.3MPa。通过上位机软件中的量程校准界面选择对 SO_2 校准，启动校准命令，仪表自动进行量程标定，待仪表面板上 SO_2 浓度趋于稳定后，在上位机软件校准界面输入标气浓度后，确认校准完成量程校准。

（2）NO_x 分析仪调试

稀释法烟气连续监测系统中配置氮氧化物分析仪，如图 2-172 所示。



图 2-171　SO_2 分析仪



图 2-172　NO_x 分析仪

初次安装应该完成对 NO_x 分析仪的调零和校准，确保仪表能正常运行。

调零：利用系统的稀释气作为零气进行校准，调整系统至维护状态，选择系统调零标定，通过上位机软件中的标定界面选择调零，启动调零，仪表自动进行零点标定，而后调整转子流量计流量为 3～5L/min，待仪表示值稳定在零点附近后点击确认校准即完成调零。

标定：在系统机柜底法兰盘连接满量程的 NO 标气，标气减压阀调节至 0.2～0.3MPa。通过上位机软件中的量程校准界面选择对 NO 校准，启动校准命令，仪表自动进行量程标定，待仪表面板上 NO 浓度趋于稳定后，在上位机软件校准界面输入标气浓度后，确认校准完成量程校准。

2.2.4.4　湿度仪调零

不同现场的压缩空气质量不一，并且不同系统的稀释气发生单元性能略有差异，这会导致稀释气的水分含量不同，为保证湿度测量准确需要对湿度仪进行调零。

2.2.5　日常运营要点

稀释抽取式 CEMS 日常运营内容如下：

（1）仪器定期校准，建议周期为 1 周。

（2）分析小屋的环境温度是否控制在 15～35℃范围内。

（3）定期查看系统压力、流量等参数是否异常，建议周期为 1 周。

（4）定期更换零气净化罐，建议周期为 12 个月。

（5）通过上位机，检查是否存在系统报警，找到报警信息对应的子系统进行维护。

（6）每天检查时，应注意仪表间空气的气味，如发现异味，马上打开门窗通风，并检查管路是否泄漏，电器元件是否有过热和烧损现象。

（7）检查工控机显示的烟道流量、温度、氧量、湿度、压力参数是否正常，如有异常要进行检查维护。

（8）检查压缩空气是否大量含水，如有的话请检查净化罐、过滤气路是否过滤失效。

（9）检查仪表风压力是否正常，如果不正常，检查气路连接是否漏气。

（10）查看预处理机柜中的风扇是否转动，打开机柜后门后，观察照明灯是否正常点亮。

（11）其他电气、仪表、设备的维护参照通用电气、仪表、设备维护规范进行。

2.2.6 常见故障及排除

常见的故障及处理方法见表 2-17、表 2-18。

稀释抽取式 CEMS 常见报警及处理方法　　表 2-17

报警信息	处理方法
暗电流异常	检查反应室压力是否正常。1 异常，检查外置泵是否工作正常；2 正常，对反应室清洁
样气流量异常	开机半小时后，如还有报警，检查反应室压力和采样压力。1 反应室压力异常，检查外置泵、气路气密性和压力板；2 采样压力异常，检查压力板
测量板中温度传感器故障	检查环境温度是否在 5～40℃之间，检查散热风扇是否正常运转
测量板中 PMT 电压异常	检查是否漏光，检测锌灯驱动电压是否为正常
温控异常	检查机箱温度
测量板中温度异常	检查机箱温度，检查 TEC 驱动电压
反应室温度异常	检查机箱温度
NO_x 的转化室温度异常	检查加热器连接情况，检查温度传感器
机箱温度异常	检查环境温度是否在 5～40℃之间，检查散热风扇是否正常运转
流量异常	检查泵是否正常工作，检查后面板样气进口是否堵塞，检查压力值
反应室压力异常	检查后面板样气进口是否堵塞，检查压力传感器
测量板未连接	检查通信线路、通信接口
校正异常	检查标准样气浓度符合要求，检查校正时间是否符合要求
采样压力异常	检查后面板样气进口是否堵塞，检查压力传感器
界面板与主板通信异常	检查通信线路、通信接口
继电器板通信异常	检查继电器板通信线路
数字板通信异常	检查数字板通信线路
低流量	检查后面板样气进口是否堵塞，检查压力
阀门驱动板通信异常	检查阀门驱动板通信线路

稀释抽取 CEMS 常见故障及处理方法　　表 2-18

常见问题	处理方法
探头不加热	1. 用万用表测量加热取样管的电阻是否正常；2. 检查加热取样管电源接线是否正确
音速小孔堵塞	将音速小孔拆下来，对音速小孔进行清洗
音速小孔下游压力达不到	1. 提高稀释射流泵的供气压力；2. 拆除稀释射流泵并进行清洗；3. 检查压力变送器是否正常
反吹不工作	1. 检查反吹电磁阀是否上电；2. 检查反吹控制阀是否打开
系统气源故障报警	1. 检查气源供气是否正常；2. 检查供气压力是否正常；3. 检查流路是否堵塞
稀释气流量达不到	1. 提高供气压力；2. 检查是否漏气
气路中有水	1. 检查除水过滤器是否有水；2. 检查空压机的自动排水阀是否正常；3. 检查净化罐除水自动排水是否正常
浓度超限报警	1. 检查是否进行标定；2. 检查报警限值是否正常；3. 检查工况是否变化

2.2.7 典型应用案例

2.2.7.1 稀释比影响因素及修正

烟气绝对压力、温度和气体密度（分子量）的变化，会对临界限流孔的流速造成影响，

从而影响稀释比，因此需要结合实际工况在现场对稀释比进行重新校准。标定方法是在工况条件下，通过动态校准方法，把标准气体通过校准气管线注入稀释探头顶端，稀释后进入分析仪进行测量，并计算实际稀释比。

当气体条件与最初校准得到稀释比 D_0 的条件不同时，需要对稀释比进行修正。稀释比 D 的修正公式（Jahnke and Marshall，1994）如式（2-40）所示。

$$D=1+\frac{(D_0-1)P_0\sqrt{(M)T}}{P\sqrt{(M_0)T_0}} \tag{2-40}$$

式中 D——稀释比；

D_0——最初校准稀释比；

P——实际压力，Pa；

P_0——初校准时气体压力，Pa；

M——气体实际分子量；

T——气体实际温度，℃；

M_0——初校准时气体分子量；

T_0——初校准时气体温度，℃。

压力对稀释比的影响是线性的，绝对压力增加 0.83kPa，则稀释比增大 1%左右。目前的很多稀释抽取 CEMS 系统都含有烟气压力补偿功能，在数据处理系统中编制了数据修正程序，提高数据的准确度。最典型的是用压力变化 0.86～1kPa 范围内的压力校准系数校准读数的变化，烟气压力补偿的一个经验公式如式（2-41）所示。

$$D=\frac{D_0}{1.0016+0.00291\Delta P} \tag{2-41}$$

式中 ΔP——D 与 D_0 的压力差。

温度对稀释比的影响是非线性的，温度下降 28℃，稀释比大约增加 1%左右。对于断续运行的设备，假设在停运期间（低温条件下）对稀释探头进行了校准，在运行期间温度升高了几百度，此时系统将会读出错误的测量值。由于温度变化对于稀释比的影响是非线性的，得到准确的温度校准系数十分困难。烟气温度补偿的一个经验公式如式（2-42）所示，

$$D=\frac{D_0}{0.99695+4.16\times10^{-7}(\Delta T)^2+1.87\times10^{-4}\Delta T} \tag{2-42}$$

式中 ΔT——温度变化值。

上式只适合于温度变化范围不大的情况下（低于 10℃）。对于温度变化较大的情况，采用温度校准公式修正的结果将存在较大偏差。此时，可采取烟道外稀释方法，保持稀释探头恒温，避免烟道内温度变化带来的影响。

由于样气达到恒流通过音速小孔的速度与样气密度有关，因此，稀释系统对样气分子量的变化比较敏感。当校准气体与样气的分子量存在较大差别时，测量结果将会存在偏差。举例来说，用单一组分气体（如 SO_2 和 N_2 或空气的混合气体）对 CEMS 系统进行校准，而实际烟气中组分复杂，如分子量较大的 CO_2 分子（分子量 44）。这种不同所造成的分子量差异将会使得测得的 SO_2 浓度存在偏差；而用多组分气体（SO_2、NO、CO_2 和 N_2 或空气的混合气体）进行校准后，测量误差将会有所减小。因此，在校准过程中，应尽可能使用与排放气体组成接近的校准气体进行 CEMS 系统校准，这样能更准确地测定污染物的排放量。

2.2.7.2 背景气中干扰组分影响

稀释气体对稀释探头的性能有很大的影响，大多数稀释系统用空气净化系统除去压缩气

体中微量的水、CO_2、CO 和其他污染物。如果稀释气体中含有 CEMS 测量的微量气体，在系统的分析仪器就会有响应。当用该稀释气体进行校准后，分析仪器的测量结果将会比实际值偏低。由于常用的稀释比是 50∶1～300∶1，受污染的空气很容易使得分析仪器产生响应。通常用工厂的高压仪表气体作为稀释气体，或系统专门安装空气压缩机。在空气压缩机或空气净化系统发生故障时，高品质的零空气钢瓶气体也可临时用作稀释气体。

烟气中夹带的水分一旦进入到稀释系统中会使得测量结果偏小，从而产生负偏差。如果水滴进入采样探头，然后蒸发，气体体积增大将降低气体污染物的浓度。如果水滴进入采样探头而没有蒸发，可溶气体能被水滴吸收从样品气流中被洗涤。同样，如果不充分地加热采样系统（与热的烟气接触的探头、采样管、阀和调节表），样品气体中的水气或酸雾会冷凝，冷凝的溶液会再洗涤可溶解气体，水滴或冷凝液体很可能腐蚀与系统接触的地方并造成泄漏。更严重的是，如果颗粒物进入系统，与液体混合产生泥浆堵塞系统。

2.3 原位测量式 CEMS

2.3.1 气态污染物 CEMS 基本组成

原位测量式气态污染物 CEMS 主要包括光学系统、测量和控制系统、数据采集和传输系统、校准单元、吹扫保护系统等部件，如图 2-173 所示。

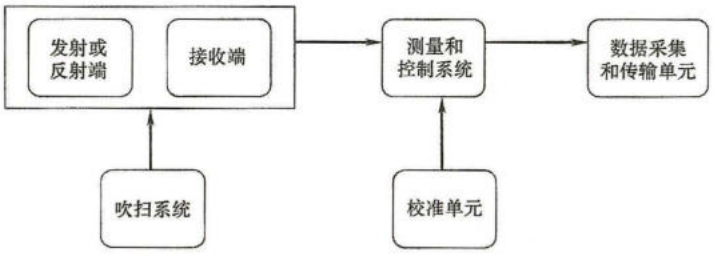


图 2-173 原位测量式气态污染物 CEMS 的基本结构组成

2.3.2 气态污染物 CEMS 基本分类

根据探头的构造不同可以分为内置式和外置式，根据光线是否两次穿过被测烟气可分为单光程和双光程，有采用探头和光谱仪紧凑相连的一体式结构，也有将探头和光谱仪分开的分体式结构，探头和光谱仪之间采用光纤进行光信号传输。

2.3.2.1 探头外置式

外置式探头由两部分组成，需要分别安装在烟道两侧，其中根据光路的不同又有单光路和双光路之分。单光路探头由反射端和接收端组成，双光路探头由发射接收端和反射端组成。这种排布方式的形成是因为紫外差分吸收光谱法应用于烟气测量的初期，仍沿用大气测量的基本光路结构，即光束的收发装置分离，将光路的发射端（主控制端）和接收端（发射端）分别安装于烟道两侧。这种光路排放方式对大气来说，具有简便、灵活等特点。但应用到烟气实时测量时则出现了许多问题，如在烟道两侧均需要架设平台供安装调试使用，成本较高。另外，两端需要精确对准，对安装基座的精度要求高，光路调试较为复杂、耗时。目前，这种测量结构仅少数几家公司的产品上仍在使用。

2.3.2.2　探头内置式

内置式探头将发射端和接收端安装于一体，其中根据光路的不同又有单光路和双光路之分。单光路内置式是将光源发射和接收端是相向放置；双光程内置式是将光源发射和接收端是同向放置，通过角发射镜将发射光沿原路折回，使光路调整方式由双端调整改变为单端调整，可实现光路在线调节和修正，简化了光路调整操作、降低了调整难度，同时还提高了测量稳定性，延长了探头工作寿命。

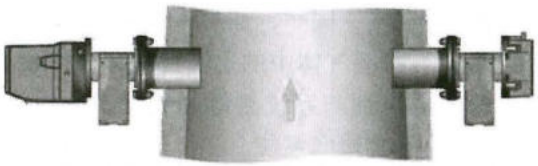


图 2-174　外置式探头

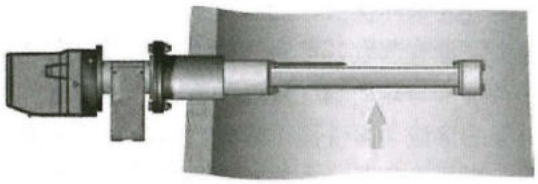


图 2-175　内置式探头

2.3.3　气态污染物 CEMS 分析技术

2.3.3.1　单波长法

单波长法选择待测污染物吸收曲线的峰值波长作为检测波长，通常适用于单组分的测量。如果一个物质有几个吸收峰，一般选择吸光度最大的波长进行定量分析。如果在最大吸收峰处其他组分也有一定的吸收，则考虑选择其他吸收峰进行定量分析，其中以选择波长较长的吸收峰为宜，因为一般情况下在短波长处其他组分的干扰较多，而在较长波长处，无色物质干扰较小或不干扰。

当测量厚度和入射光强一定的情况下，在最大吸收峰处气体浓度 C 可由式（2-43）来进行计算。

$$C=A/(K\cdot L)=\left(\ln\frac{I_0}{I_t}\right)/(K\cdot L) \tag{2-43}$$

式中　C——气体浓度；

A——吸光度；

K——介质的吸收系数；

L——辐射穿过介质的厚度；

I_0——入射光强；

I_t——吸收光强。

某一物质在给定波长处的 K 值为一常数，根据上式，便可由所测得的 I_t 计算出该物质的浓度。

2.3.3.2　双波长法

紫外双波长差分吸收原理见图 2-176。

双波长法利用选取的两波长处吸收系数差值与吸收度差值的比值来分析计算被测物质的浓度。选取实测吸收曲线上的两个波长 λ_1 和 λ_2，计算出被测物质吸收度在两波长的差值 $A(\lambda_1)-A(\lambda_2)$，然后根据标准吸收曲线上同样的两个波长，计算这两个波长处标准吸收系数的差值 $K(\lambda_1)-K(\lambda_2)$。比较吸收系数在两波长的差值 $K(\lambda_1)-K(\lambda_2)$ 和实测吸收度在两波长的差值 $A(\lambda_1)-A(\lambda_2)$ 计算出被测物质的浓度，如式（2-44）所示。

$$C=[A(\lambda_1)-A(\lambda_2)]/[(K(\lambda_1)-K(\lambda_2)]\cdot L \tag{2-44}$$

式中 C——气体浓度；

$A(\lambda_1)-A(\lambda_2)$——被测物质吸收度在两波长的差值；

$K(\lambda_1)-K(\lambda_2)$——比较吸收系数在两波长的差值；

L——光程长度。

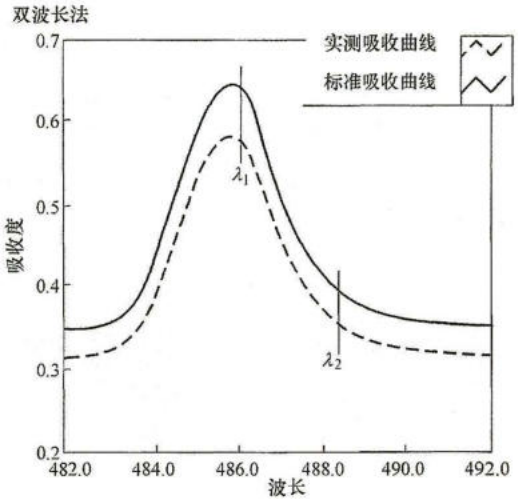


图 2-176 紫外双波长差分吸收原理图

2.3.3.3 差分光谱吸收法（DOAS）

差分吸收光谱法主要的优点是可以在不受被测对象化学行为干扰的情况下来测量到它们的绝对浓度，可以通过分析几种气体在同一波段的重叠吸收光谱来同时测定几种气体的浓度。

差分吸收光谱法的基础是朗伯-比尔定律，由光源发出强度为 $I_0(\lambda)$ 的入射光照射到被检测烟气区域，由于受到各组分气体吸收和烟尘散射，出射光强衰减为 $I(\lambda)$，$I(\lambda)$ 可由式（2-45）决定。

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\exp\left\{-L\left[\sum_{i=1}^{n}\sigma_i(\lambda)c_i+K_R(\lambda)+K_M(\lambda)\right]\right\} \tag{2-45}$$

式中 $\sigma_i(\lambda)c_i$——第 i 种气体的浓度和吸收截面，与波长有关；

$K_R(\lambda)$——气体分子瑞利散射引起的消光系数；

$K_M(\lambda)$——烟气颗粒米氏散射引起的消光系数；

L——光程长度。

测量得到 $I(\lambda)$ 后，只要有足够的数据点，对上式两边取对数后利用最小二乘法进行数据处理，就可以得出各种气体浓度 n_i 的值。

2.3.3.4 可调谐半导体激光吸收光谱法（TDLAS）

可调谐半导体激光吸收光谱技术（TDLAS）本质上是一种光谱吸收分析技术，利用了气体分子对特定波长激光的选择性吸收特点，分析激光吸收光强的变化来获得气体的浓度。它与传统红外光谱吸收技术的不同之处在于，半导体激光光谱宽度远小于气体吸收谱线的展宽（图 2-177）。因此，半导体激光吸收光谱技术是一种高分辨率的光谱吸收技术。

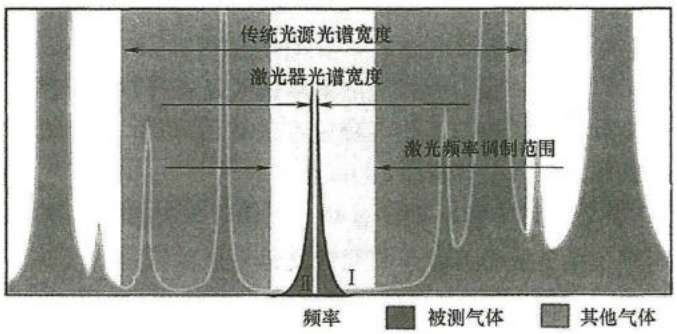


图 2-177 可调谐半导体激光吸收技术光谱宽度

2.3.4　安装测试要点

2.3.4.1　光学探头

光学探头是系统完成烟气光谱采样工作的关键部件。光学探头主要由发射系统和接收系统两大部分组成，包括光源、分束镜、反射镜、准直镜、零点校准镜、狭缝、光栅、角反射器和二极管阵列探测器（CCD）等。其中准直镜、零点校准镜、反射镜、分束镜位于光学室内，狭缝、光栅位于光谱仪内部，角反射器位于采样探头的最顶部（和探头一起放置在烟囱内部）。氘灯发出的光经过透镜汇集，再经过分束镜、反射镜、准直镜和前窗镜后进入烟道中，通过烟气吸收后经探头顶部的角反射器顺原路返回至分束镜处，经分束镜反射，由狭缝进入光谱仪，并由光栅分光，在光栅色散焦平面由二极管阵列探测器（CCD）接收。光学系统原理如图 2-178 所示。

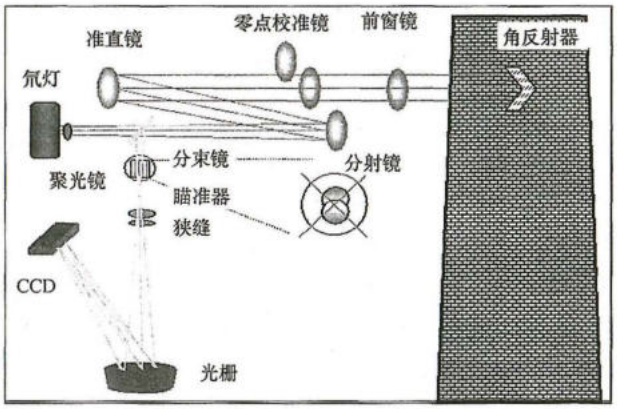


图 2-178　光学探头

（1）安装步骤

1）去除法兰覆盖物，将法兰孔清理干净；

2）连接风机气管到采样管外管入口处，上紧管夹；

3）打开风机，使其稳定工作；

4）将烟气在线监测仪的探头从法兰盘中插入烟囱（道）内；

5）将监测仪主机部分连接到探头上，扣上锁紧扣；

6）将主探头与法兰用四个螺钉锁紧；

7）按接线要求连接好相关线缆。

（2）调试步骤

1）检查线缆连接无误后设备通电运行，观察电源板、CPU 板、氘灯板指示灯是否点亮，如果有那一路指示灯不亮，应检查相应的电路连线是否开路或短路；通电正常运行十分钟后，查看光谱仪温度和光学探头温度是否稳定在设置值附近，如果温度不在设定范围内，应检查温控板、加热棒和传感器是否异常；

2）运行稳定后，积分时间设置为 200ms 时，光谱仪内光信号强度应在 25000～55000lx 范围内，不在此范围则应调整内部光路，直至内光信号强度满足测量要求；

3）运行稳定后，积分时间设置为 200ms 时，光谱仪外光信号强度应在 35000～65000lx 范围内，不在此范围则应调节三个调节螺杆，是信号增强直至外光信号强度满足测量要求；

4）在标定状态下，样品池信号强度应在 25000～55000lx 范围内，若样品池信号偏低，

在电机行程范围内可以微调光耦挡光片的位置使光强增加；若样品池信号偏高可以在样品池的角反射镜前加不同孔径的挡圈以减小光强。

注意事项：一般在一定的积分时间，使内外光信号强度均达到最大值即可。

2.3.4.2 测量和控制

分析仪的各个部件通过测量和控制系统组合成为有机的整体。测量和控制系统的实现涉及微弱信号检测、自动控制、软件工程以及电源变换等多项技术，系统原理框图如图 2-179 所示。单片机系统是核心，负责完成光谱采集和处理、仪器内部温度控制、光源控制和强度调整、检测电机控制以及和工控机的通信等工作。

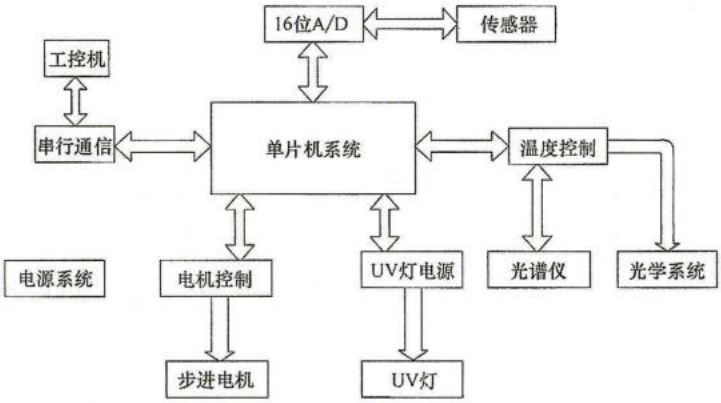


图 2-179 原位测量式分析仪结构示意图

（1）安装步骤

1）将各系统组成部件安装到位，并连接好线路。

2）检查设备是否运行正常。

（2）调试步骤

1）检查线缆连接无误后通电运行；

2）工控机仪表盘中流速、温度、大气压、静压显示数据应该和流速仪的显示在数值一致，否则应该调节流速仪中的电流校准设置，使得两者相一致；

3）工控机仪表盘中氧量显示数据应该和氧量仪的显示在数值一致，否则应该更换氧量仪表头；

4）工控机仪表盘中风机电流指针读数满足 1.0～2.0 的要求，如果数值偏大，应减少风机电流互感器上绕线的匝数，反之则增加风机电流互感器上的绕线的匝数，直至电流显示满足要求；

5）实时数据界面中状态显示正常，当关闭风机或氧量仪或流速仪后，应能显示系统故障，否则应该检查采集卡接线是否正确；

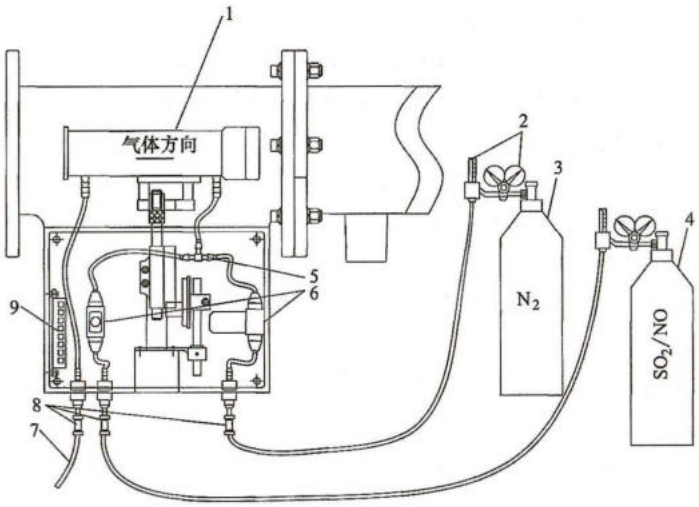
6）按要求完成系统参数和光谱仪参数设置。

2.3.4.3 校准单元

为保证设备测量的准确性，需定期对设备进行校准，根据操作方法不同，可分为自动校准和手工触发校准。不论自动校准还是手工触发校准，都必须做好准备工作，包括进行气路与管路连接、气密性检查等，连接方法如图 2-180 所示。

（1）连接和气密性检查步骤

1）将减压阀（带转子流量计）安装到标准气出口上，拧紧锁紧螺母。



1—样品池及机构部分；2—流量计及减压阀；3—零气；4—标气；5—PPR 三通；
6—电磁阀；7—排气管；8—快换接头；9—电机驱动

图 2-180　气路连接示意图

2）检查减压阀和转子流量计，确保其旋钮置于关闭状态。

3）打开气瓶阀门，看到压力指示针有指示后再迅速关闭气瓶阀门。

4）目视压力指示针，如果 5s 钟内指示针没有明显变化，说明减压阀部分密封良好，方可进行下一步操作。

5）按图示连接其他部分气体管路。

（2）自动校准

在“系统设置”栏有“标定时间间隔”和“标定参数（SO_2 标气浓度、NO 标气浓度、测量槽长度）”等和标定有关的参数设置，在“标定时间间隔”中可设置自动标定间隔为 0～24h，并根据实际情况设置 SO_2 标气浓度、NO 标气浓度、测量槽长度等参数，这样系统就可以根据设置自动进行校准。校准过程如下：

1）系统检测到校准时间后，由电机自动将内置的校准样品池升至光路中；

2）自动打开 NO 阀，通入 NO 气体，约 3min（时间与气路长度、流量因素等有关）后 NO 校准结束，仪器自动计算 NO 校准系数，并记录入库，然后关闭 NO 阀，NO 校准结束；

3）自动打开 SO_2 阀，约 3 分钟后 SO_2 校准结束，仪器自动计算 SO_2 校准系数，并记录入库，然后关闭 SO_2 阀，SO_2 校准结束；

4）自动打开 N_2 阀，自动清洗样品池；

5）样品池自动下降到光路外，自动校准结束。

注意事项：

1）在进行自动校准时，各标气瓶的气阀和减压阀应该是打开状态，否则会造成校准失败；

2）校准时应保证校准气体流量的稳定，一般要求为 0.4±0.02L/min，二级减压阀的压力保持在 0.1～0.2MPa，否则会对校准的准确性产生影响；

3）由于自动校准状态要求各标气瓶的减压阀长时间处于打开状态，因此会造成标准气泄漏，浪费严重，建议不采用全自动校准方式，而是根据需要采用手工触发校准的方式。

（3）手工触发校准

同样，在手工触发校准之前，需要正确填写“标定参数”，即设置 SO_2 标气浓度、NO

标气浓度、测量槽长度等参数。校准过程如下：

在“系统调试”界面，点击标定按钮，校准程序即被激活，仪器开始按照内置的自动校准流程执行自动校准，过程和自动校准中的校准过程完全相同。

推荐采用手工触发校准模式。

（4）数据处理

通入不同浓度标气，记录并按式（2-46）、式（2-47）计算出 A、B_1、B_2、B_3 四个校准系数：

标气浓度选择：

1）满量程 20%的标气

2）满量程 40%的标气

3）满量程 60%的标气

4）满量程 80%的标气

计算公式如下

$$C=C_1 \cdot R/L \tag{2-46}$$

$$C=A+B_1 \cdot X^3+B_2 \cdot X^2+B_3 \cdot X \tag{2-47}$$

式中 C——等效浓度；

C_1——标气浓度；

R——光程；

L——标气长度；

A、B_1、B_2、B_3——校准系数；

X——仪表响应值。

2.3.5 日常运营要点

2.3.5.1 现场巡视

（1）检查设备完整性（现场设备组件是否缺少）。

（2）检查设备损坏情况（设备有无明显损坏，设备工作是否正常，尤其是检查电源是否跳闸、风机工作是否正常）。

（3）检查设备使用环境条件（设备是否淋雨等）。

（4）检查设备运行状况（系统运行是否正常）。

（5）检查现场环境温度是否过高并检查空调运行状况。

2.3.5.2 设备清洁

（1）经常打扫现场，保持设备外观清洁。

（2）每三个月清洁主设备探头和角反射器表面的灰尘。

（3）每两个月清洗过滤器并更换空气过滤网。

（4）每个月清理工控机主板及机箱风扇滤网的灰尘。

（5）每半年清理一次皮托管和氧化锆探头的积灰。

（6）每三个月放空压缩机冷凝水。

（7）如果安装有空调应定期清理空调室内机和室外机散热片灰尘。

（8）定期的清洁工作根据现场的实际情况不同，周期会有所不同。

2.3.5.3 注意事项

由于主要部件为高精密度的光学仪器，因此对环境的要求较高。为保证仪器的正常工

作，在使用过程中应注意以下几点：

（1）净化风机是为防止插入烟道中的角反射镜受到污染而采取的保护措施，必须不间断工作。如果风机出现故障，请立刻切断主设备电源并拔出主设备探头；如果因故需断开电源，请先切断主设备电源并拔出主设备探头，然后再断开风机电源，以免镜片受到污染。

（2）如果仪器显示的测量值明显不正常，或者烟尘的示值明显偏高等情况，说明角反射镜受到污染，需要清洁，同时清洗或更换滤网。同样，在拔出探头后才能切断风机电源。

（3）当所监测的锅炉长时间停运时，可以停止整个系统的工作，必要时拔出监测仪探头，以保护角反射镜不受污染。

（4）为保证仪器的正常工作，监测仪室内空调设置为制冷状态并确保空调的正常运行。

2.3.6　常见故障及排除

原位测量式 CEMS 常见故障及排除　　表 2-19

序号	故障现象	可能的原因	对应的解决办法
1	通信不通，在工控机上出现“time out”提示，自检无法完成	工控机串口故障	BIOS 中 COM1、COM2 设置颠倒，重新设置
			串口损坏，需换其他串口或更换主板
		串口线连接问题	直接测量连接工控机和单片机的串口线是否导通，检查虚焊或断开处重新焊接
		单片机通信芯片坏	CPU 板指示灯状态不正常，需重新更换芯片
		监测仪电源故障	检查主机电源板各指示灯，各电源供电是否正常，找出故障所在（保险丝、变压器、接触不良、供电不正常等）并恢复
2	单片机冷复位	振动造成电路板或电源保险丝或其他部位接触不好	检查电路板、接线、接插件接触是否良好，插针是否损坏或松脱，并确保接触良好；保险丝与座接触是否良好，如松动需将保险丝座重新压紧，必要时更换保险丝座
		接插件氧化造成接触不好	更换接插件
		CCD 未连接牢靠或 CCD 故障	重新连接 CCD，或更换新的 CCD
		供电电源不正常	确定电源电压是否正常，此相电源上是否有大功率感性负荷如大功率电机等，换成质量好的电源
		现场静电干扰	现场可能是静电除尘，所有设备需可靠接地
3	出现光强弱提示，测量值为零	烟尘浓度太高（开炉或停炉时）	无需处理
		探头角反射镜或前窗镜受污染	清洁角反射镜或前窗镜
		氘灯老化	更换氘灯
		光学系统温度过高，CCD 噪声大	检查空调工作情况，保证空调工作正常
4	测量值为零或恒定不变	氘灯熄灭	灯老化，不能点亮，更换
			24V 电源坏或其保险丝熔断，更换
			氘灯板坏或其保险丝熔断，更换
		现场测量值超过了仪器设置的量程	检查“系统设置”中相关参数是否设置太低调整参数设置
		排放源停运	无需处理
		光信号太弱	参考第 3 项处理

续表

序号	故障现象	可能的原因	对应的解决办法
5	拨号无应答	现场停电	恢复供电
		电话线接触不好或线路故障	可检查电话线两端电压，正常为40V左右，检查线路
		MODEM故障	MODEM接触不好重插，或更换
		工控机死机	重新启动工控机
6	风机故障	风机坏或者风机信号故障	更换风机或者检查风机信号接线
7	工控机故障	显示器无显示：断电或工控机电源故障、死机，对外部操作无反应	恢复供电或修复工控机电源
			CPU风扇坏，内部过热死机，需更换风扇
			机箱风扇坏或风扇过滤网堵塞，内部过热死机，更换风扇或清洁过滤网
			主板金手指老化或接触不好，用酒精清洁后重新插牢
			内存条坏，更换内存条
			电子盘坏，更换电子盘
			主板坏，更换主板
			看门狗没有打开，需重新开机，并打开看门狗
		不停地自启动	与单片机通信有问题，解决通信问题
			MODEM故障，更换
			外界干扰，外壳接地

2.3.7 典型应用案例

2.3.7.1 背景气干扰影响

目前常用的工业脱硫方式有两种，石灰石脱硫和氨法脱硫。石灰石脱硫的主要实现形式是将石灰石粉末和煤进行混合，送入锅炉后，在燃烧期间发生化学反应，生产硫酸钙，硫酸钙随燃烧残余煤渣一起排出锅炉。由于硫酸钙以粉末的形式排出，因此它对于光谱测量只会造成光强的普遍下降，不会形成吸收特征，因此石灰石脱硫工艺对烟气的光谱测量基本没有影响。

而氨法脱硫是以氨为脱硫剂，与烟气中的 SO_2 发生气液相化学吸收反应而脱除 SO_2，其主要反应为：

$$2NH_3+SO_2+H_2O\longleftrightarrow(NH_4)_2SO_3$$

$$SO_2+(NH_4)_2SO_3+H_2O\longleftrightarrow 2NH_4HSO_3$$

$$NH_4HSO_3+NH_3\longleftrightarrow(NH_4)_2SO_3$$

副反应为：

$$(NH_4)_2SO_3+\frac{1}{2}O_2\longrightarrow(NH_4)_2SO_4$$

由于 NH_3 在NO反演波段上方存在高 NH_3 吸光峰，同样在 SO_2 区域也存在比较大的 NH_3 吸收峰，如图2-181所示。

其中蓝色为NO的吸收度光谱，黑色为 SO_2 的吸收度光谱，红色为 NH_3 的吸光度图谱。可以看到由于 NH_3 在 SO_2 与NO的反演波段均有重叠的吸收波段，因此待测气体中的 NH_3 对利用紫外波段分析 SO_2 与NO的设备会造成正干扰，有文献表明，当待测气中

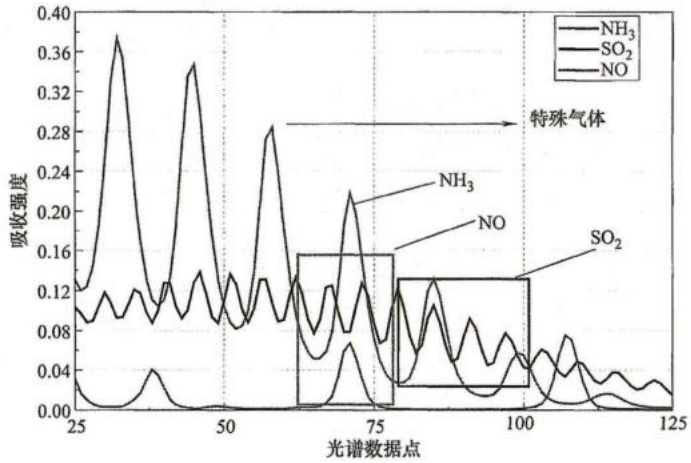


图 2-181　NH_3、SO_2、NO 光谱数据

$\rho(SO_2):\rho(NH_3)=1:1$ 时，基于 DOAS 方法测定 SO_2 的相对偏差达到 2.5%左右。为减少干扰，在烟气中含有干扰组分的现场，需要针对干扰组分的紫外吸收特征采用不同的反演算法以提高设备对待测组分的精确度。

某水泥厂干法水泥生产线采用高温氨法脱硫，由于高温氨法脱硫的喷氨量与生产工况相关，烟气出口氨浓度较高且波动较大，对基于 DOAS 方法测定 SO_2 的 CEMS 系统造成了较大干扰。通过优化反演算法，调整反演波段等手段有效地减轻了烟气中 NH_3 的干扰，取得了较好的监测效果。

2.3.7.2　振动影响及克服

振动对 DOAS 设备的影响来源于振动使光谱仪波长发生了漂移，影响仪器的稳定性和测量准确度。因此 DOAS 设备在设计安装时就应充分考虑到防震方面的需求。

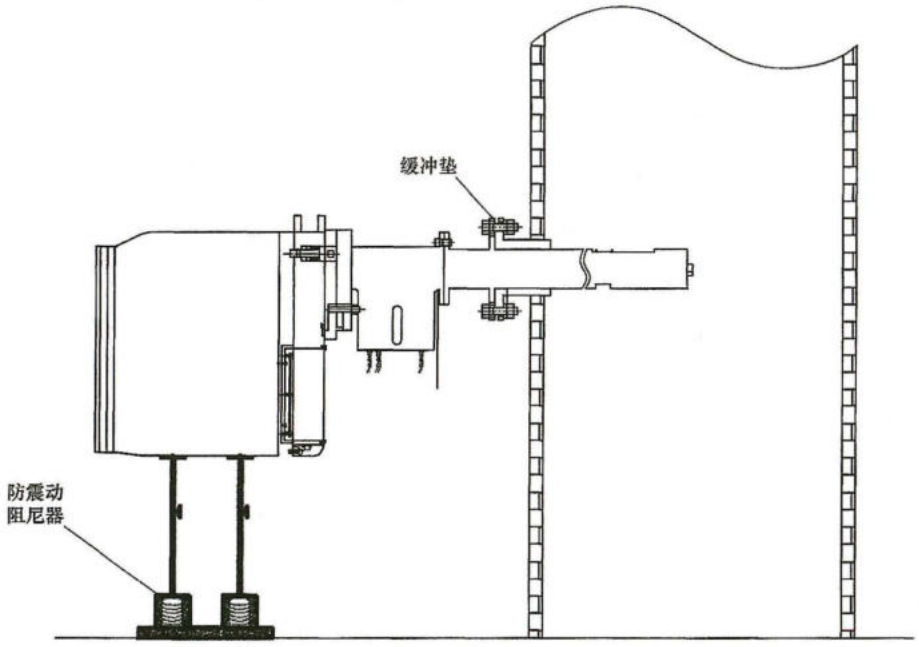


图 2-182　原位 DOAS 减震示意图

某钢铁厂总体振动较大，烟道结构较不稳定，原位 DOAS 设备平台处有明显的轻微振动感。按照一般要求安装的 DOAS 设备运行一段时间后会出现量程飘移等问题，影响正常监测。

为减轻振动对该现场原位 DOAS 设备的影响，针对该现场设计了一套防震装置，如图 2-182 所示。为减少烟道传导至设备的振动，在原位 DOAS 与烟道法兰的连接处加装缓冲垫，设备主机的支撑采用刚性弹簧防震阻尼器，使原位式设备能够适应振动较大的现场环境。

采用了这套防震措施后，该现场的原位式 DOAS 设备量程漂移情况得到了很大改善。除了做好防震措施外，定期对光谱仪进行波长校准是行之有效的方法之一。针对 DOAS 光谱仪波长校准，有较多见诸文献的研究报道：如利用氙灯位于 486.02nm 处的特征峰进行光谱仪波长自动校准，将待测气体实测的吸收截面与平移后的基准吸收截面进行相关度计算以消除波长偏移，等等。

第 3 章　垃圾焚烧 CEMS

3.1　垃圾焚烧 CEMS 监测技术

3.1.1　垃圾焚烧排放特点

垃圾焚烧是固废处理（包括电子固废、生活垃圾和医疗垃圾）很有效的途径，其资源化和减量化是十分明显的。如何有效地监测烟气中多种有毒、有害气体或固态污染物，从而减少它们对环境的二次污染是无害化重点解决的问题。国内生活垃圾所含的废弃物具有多样性，焚烧后排放烟气中气体组分的种类远比一般的燃煤、燃油固定污染源排放的种类复杂得多。显然，垃圾焚烧烟气监测的重要性和复杂性是很突出的。

由于我国目前还没有完全实现垃圾自主分类和前处理，这就造成了国内垃圾焚烧排放烟气具有显著的特殊性。

（1）水分浓度很高。生活垃圾焚烧炉尾气含水量很高。对于湿法除尘器其尾气含水量高达 60%，对于半干法除尘器，由于为了尽量减少二噁英的排放，往往采用喷石灰浆方法，由于石灰浆中含水量高于 30%，所以其烟气含水量也相当高。

（2）组分复杂。我国城市生活垃圾的组成一般包括：厨余、纸类、塑料、草木、织物、玻璃、金属及灰土等，在焚烧后排放的烟气中除了常规的 SO_2、NO、NO_2 等被检测组分以外，目前被检测到的成分还包括 CO、CO_2、HCl、HF、NH_3、CH_4、HCN、NH_3、N_2O、TOC、Hg 等，此外还有许多未知成分的高沸点化合物。

（3）被监测的污染物浓度差异极大。例如 CO_2 含量在 10%左右，而 HF 浓度通常在 10mg/m^3 以下。

（4）毒性和腐蚀性组分多，且具有很高的溶解度，如 SO_2、HCl、HF、NH_3 等成分，均比较易溶于水，从而造成强腐蚀性。

3.1.2　基本结构及分类

3.1.2.1　抽取式

抽取采样方式 CEMS 是将被测的烟气通过抽气泵从烟道中抽取出来，然后经过采样探头和管线传输到达分析仪进行分析，得到各成分的含量。其整体监测系统工作流程示意图如图 3-1 所示。

采样探头将烟气取样后，首先经蒸汽伴热或者电伴热，使采样烟气一直控制在露点温度以上，然后送至地面控制系统机柜，经预处理后进入分析仪器进行分析。这种方式一般在样气采集、传输、检测及排放的整个过程中都处于高温加热状态，使温度在露点之上进行测量；也有少数系统在采样探头处采用渗透脱水技术，脱水后的干烟气经传输管线到达分析仪进行分析测量，这种方式的局限在于不能监测烟气中的 NH_3。由于目前在垃圾焚烧烟气 CEMS 中使用抽取式方式不多，因此不再详细介绍。

由于垃圾焚烧烟道中烟气具有高温、高湿、高粉尘等特点，另外排气中的成分比较复

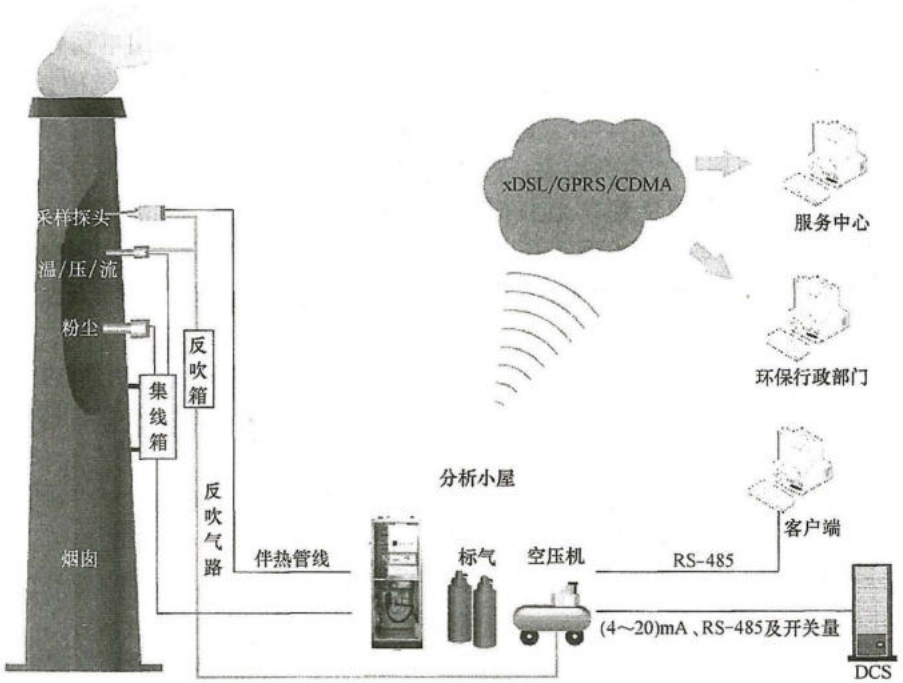
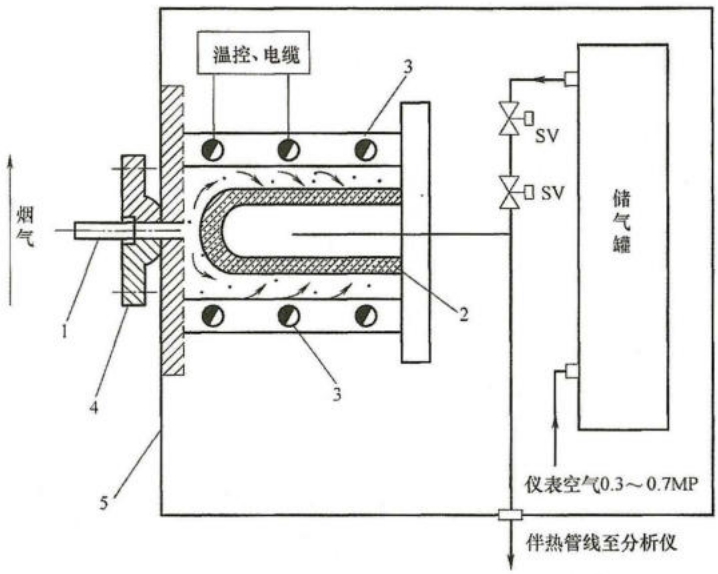


图 3-1 垃圾焚烧 CEMS 工作流程示意图

杂，有 SO_2、NO_x、粉尘、HF、CO、NH_3、HCl 等，其中的酸性气体遇水蒸气后会生成相应的酸附着在仪器采样管上，对采样单元造成腐蚀。烟气中的粉尘也会对后续的测量带来较大的影响，因此对烟气采样单元的要求较高。针对这些问题，需采用带过滤和反吹的可加热采样探头，其工作原理如图 3-2 所示。



1—采样杆；2—粉尘过滤器；3—电加热器；4—安装法兰；5—探头外壳

图 3-2 垃圾焚烧 CEMS 采样探头原理图

图 3-2 中采样探头是一种能自行加热并实施温控的采样装置，由连接法兰探头取样、过滤器、加热装置、温控器等组成。该装置与样品气接触的部分全部采用不锈钢材料加工而成，高温条件抗腐蚀性能力很强。在设计上将温控器与主体一体化设计，结构紧凑，操作方便。该装置除设有一个样气输出口外，还设有一个可复用的反吹口，其作用是用清洁的压缩空气，吹扫附在管筒过滤器表面的粉尘，将其吹扫回烟道内。为保证从取样点抽取样气过程中不出现样气冷凝现象，避免烟气组分损失，取样探头采用电加热的方式，加热温度为180℃。烟道中的烟气在采样泵的驱动下通过采样杆到达粉尘过滤器，经过粉尘过滤后的烟气通过伴热管线传输到后续预处理部分。图 3-2 中的储气罐用来对粉尘过滤器及采样杆部分进行反吹，防止采样管路发生堵塞。

伴热管线由 PTFE 样气传输管、加热电伴热带、保温材料和外防护层组成。为了防止样气在传输过程中的冷凝或吸附造成的损失，需要采用伴热管线对烟气传输的管道进行加热处理，通常需要加热到 180℃左右，其结构原理如图 3-3 所示。

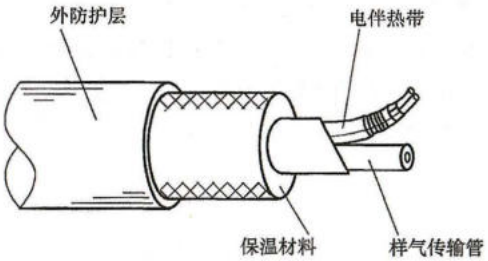


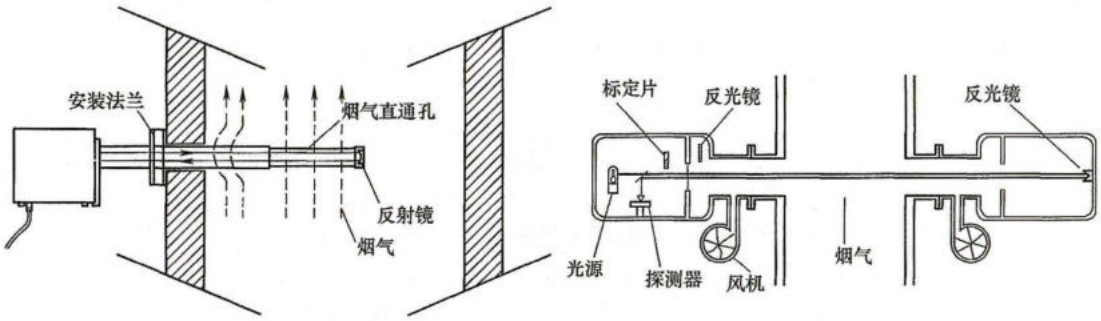
图 3-3　垃圾焚烧 CEMS 伴热管线示意图

完全抽取式的优点主要有：系统全高温采样测量，污染物理论上基本无损失；可以进行多组分的同时测量，尤其是针对垃圾焚烧的一些水溶性气体。

完全抽取式的不足主要有：系统长期在高温、高湿条件下运行，对系统各部件尤其是检测部件的耐腐蚀性等提出了较高的要求。

3.1.2.2　原位式

直接测量方式就是利用 SO_2 或 NO_X 等污染因子对红外光或紫外光的特征吸收，光线经不同波段的滤光片直接射入烟道（或烟囱），通过测量各自对应的光强衰减程度，根据朗伯-比尔（Lambert-Beer）原理可分析出污染物浓度。如内置式直接测量方式和外置式直接测量方式（图 3-4）。



(a) 内置式直接测量方式　　(b) 外置式直接测量方式

图 3-4　垃圾焚烧直接测量方式的示意图

两种直接测量方式相比，方式（a）易于安装，不需现场光学对准；方式（b）的测量更具代表性，且属于非接触测量。对于直接测量方式，其最大的优点就是不需要 CEMS 系统中的采样、传输和预处理的过程，可实现直接对烟气进行在线测量，不会造成待测污染物的任何损失和改变。但是其最难解决的问题就是在线校准问题。很显然，直接测量法仪器发出的光束是直接裸露于烟道中，而标气要覆盖光束时是永远无法充满烟道的。为此，人们也想

出不少代替标气的方法，比如使用滤光片或是充满一定浓度标准的内置标气盒插入光路中等方法，这些替代方法对直接测量式来讲有些是必需和有用的，但这些方式都是不充分的，是不能满足实际标定和校准要求的。美国 Part75 规范明确指出，气态污染物在线标定必须满足三点：一是 24h 自动标定一次；二是必须使用标准气体流动标定；三是必须全系统标校（不能有某个部分未经标气验证）。

据美国 EPA 消息，在 1999 年之前，还没有任何一种直接测量方式的 CEMS 能够满足上述相关规定并取得美国 EPA 的认证。直到 2000 年，英国某公司一款直接测量式 CEMS 通过了美国 EPA 的认证，该型号 CEMS 在流动标气在线校准方面进行了大胆创新。他们采用了内置式直接测量方式与外置式直接测量方式。

图 3-4（*a*）的内置式直接测量方式，其突破在于用烧结材料把原来的烟气进气开孔封闭起来，形成过滤网，从而在标定时，将标气通入用烧结材料制成的封闭腔体中，当标气充满腔体且流量稳定性形成微正压向烟道中扩散时，便可实现在线标定，但该产品本身在应用上存在一定的局限性，其一是烧结材料在较高浓度的烟尘条件下，例如颗粒物浓度达到 200mg/m^3 左右时，即使有每天定期的反吹，其在很短的一段时间内就会被颗粒物堵死导致烟气无法渗透进入相对封闭的腔体进行测量；其二是由于仪器相对封闭的腔体体积较大，通常远远大于抽取式的测量气室，因此其校准时对标气的消耗量和消耗速度就会很大，另外其校准的响应时间将会较长。无论如何，该产品还是为 In-situ 方式开辟了新的应用前景。近几年，随着机械技术的进步，一些校准的新技术也逐步出现，例如瑞典某公司外置直接测量式 CEMS 和我国某公司的内置式直接测量式 CEMS 仪器，他们均采取在光路中放置一定长度的流动标气校准池的方式实现流动标气等效校准，起初是手动校准目前已经能够实现自动完成。

直接测量方式 CEMS 的另一个必须解决的难题就是对光学镜面保护，尤其是内置直接测量式的角反射镜段，其长期处于烟道内高温、高湿、高尘的恶劣环境中，如果不能做好光学镜面的保护，即使测量再准确，很快镜面就会被颗粒物、水汽污染，这样测量就失败了；通常的保护方式是气幕吹扫，针对垃圾焚烧排放烟气的特殊性，其气幕吹扫的强度必须要加大；另外人工擦拭和清理光学镜面的频率也应该提高，确保测量准确可靠。垃圾焚烧 CEMS 两种测量方式的比较见表 3-1。

垃圾焚烧两种测量方式的对比 **表 3-1**

方法	完全抽取方式	直接测量方式
特征	抽取定量烟气，全程伴热处理后进分析仪测量	光束直接进入烟道或烟囱进行测量
主要优点	待测污染物理论上基本无损失；全系统校准校验操作方便，准确	不需要采样、传输和预处理的过程，不会造成待测污染物的任何损失和改变
主要难点	系统维护环节多，系统各部件尤其是检测部件的耐腐蚀性和使用寿命要求高	在线流动标气等效校准设计实现，光学镜面的有效气幕保护

3.1.3 常用分析技术

根据垃圾焚烧 CEMS 监测方式的不同，气态污染物连续监测系统主要分为直接测量式监测系统和抽取测量式监测系统。

3.1.3.1 直接测量式监测系统

直接测量式垃圾焚烧 CEMS 监测系统多数采用紫外差分吸收光谱（Differential Optical

Absorption Spectroscopy，DOAS）技术进行检测分析，一般采用外置式。它将烟道作为一个开放式的吸收池，对其中的气体进行实时连续的直接测量，不需要预处理系统，安装方便，维护量小，这种非接触式测量在有效的气幕保护条件下受烟道内烟尘和水雾的影响较小。其监测示意图如图 3-5 所示。

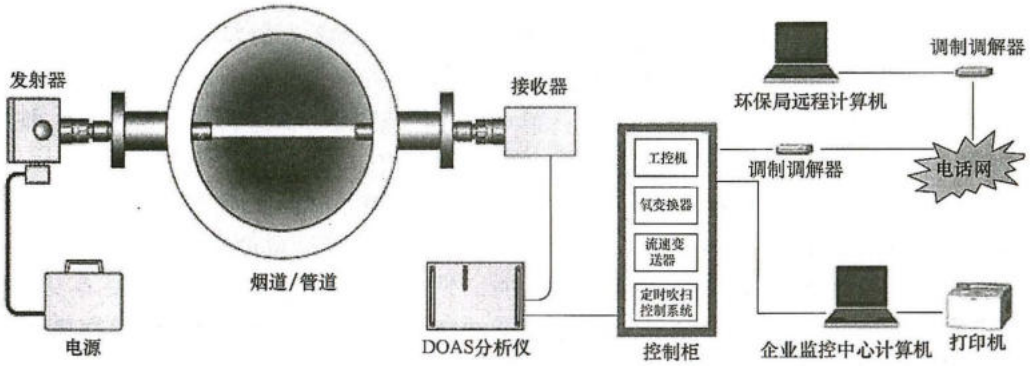


图 3-5 垃圾焚烧直接测量式 CEMS 监测系统

直接测量式监测系统通常包括光源发射器、光接收器以及 DOAS 分析仪。光源发射器发出的光经过准直后照射到烟道内，被烟道内的气体吸收后由光接收器接收并转化为电信号，经过 DOAS 分析仪分析处理后可得到有关被测气体的浓度信息，被数据采集和记录单元计算存储，然后经过控制柜中的有关通信模块可以上传到环保部门。

3.1.3.2 抽取测量式监测系统

抽取测量式监测系统通常包括取样单元、气体分析仪和排气、反吹等辅助单元。垃圾焚烧抽取测量式 CEMS 监测系统如图 3-6 所示。

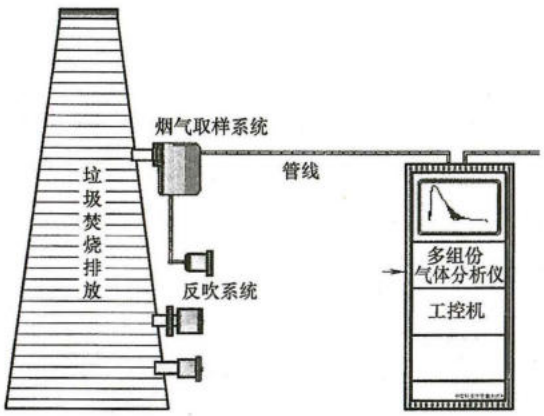


图 3-6 垃圾焚烧抽取测量式 CEMS 监测系统

（1）取样系统

对于垃圾焚烧热湿完全抽取式 CEMS，取样系统一般由配备加热过滤器的高温取样探头、高温条件下运行的测量/反吹/校准阀组件和高温伴热取样管线组成。高温取样和分析是抽取测量式垃圾焚烧 CEMS 的技术特点之一。分析过程中烟气处于高温（180℃ 以上）状态，以防 HCl、HF、NH_3 等易溶于水的气体与水结合形成腐蚀性溶液腐蚀采样分析系统，影响实际气体浓度检测。取样部分包括加热取样管和加热的过滤器部件，零气、标气和反吹气都是经过加热后才到达过滤器，防止标定或反吹时在探头出现冷凝。取样泵、过滤器和管线也都是在加热的高温下工作，高温取样和分析技术是得到准确测量结果的重要保证。所有与气体介质接触的部件，温度均高于烟气的（酸）露点温度，不会被烟气腐蚀。在取样过程中除了减少气体的粉尘浓度以外，其余的所有成分均保持不变。特别是没有水分损失，不仅可在需要时进行气态水的测量，同时避免了除水造成的测量误差和设备腐蚀。

（2）多组分气体分析仪

抽取测量式垃圾焚烧监测系统中的气体分析仪可以采用多组分非分散红外分析仪、傅里

叶变换红外分析仪以及紫外差分吸收（DOAS）气体分析仪等不同原理的分析仪器。

1）多组分非分散红外分析仪

多组分非分散红外分析仪采用了时间双波长法和气体滤波相关法两种技术，通过计算机程序控制，进行多波长扫描，对接收到的信号进行处理并计算出各种气体的浓度值。组分浓度测量依据朗伯-比尔定律：

$$A=\log I_0/I=e\times c\times d \tag{3-1}$$

式中 A——吸光度（被测气体吸收后光强度衰减）；

I——发射光强度；

I_0——测气体吸收后的光强度；

e——吸光系数，无量纲；

c——被测气体浓度，mol/L；

d——光程长度，cm。

在被测组分特征吸收波长处测量发射光强度和被测气体吸收后的光强度，由公式（3-1）计算出被测组分的浓度 c。

2）单光束双波长法

单光束双波长法的工作原理如图 3-7 所示。

测量滤光片和参比滤光片交替进入光路，选择光谱波长。测量滤光片的波长和被测气体的吸收波长一致，因此，当测量滤光片在光路中时，被测气体吸收红外能量。参比滤光片的波长与气体的吸收波长不同，参比滤光片位于光路时，被测气体对光能量没有吸收。检测器接收到的光强度信号，对于测量滤光片是 I，对于参比滤光片是 I_0。由吸收后的光强度 I 和非吸收光强度 I_0 计算吸光度 A，推导出被测组分的浓度。

3）气体滤波相关法

气体滤波相关法又称气体过滤相关红外法，其工作原理如图 3-8 所示。气体滤光池填充有高分压的被测组分气体。当气体滤光池进入光路时，测得参比信号 I_0，它与被测组分浓度无关；而当空气室进入光路时，测得测量信号，它与测量气室中被测组分浓度变化相关。为了准确测量被测组分的吸收波长，在测量光路中加入第二个滤波轮，干涉滤光片选择测量波长。由测量得到的 I 和 I_0 计算吸光度 A，推导出被测组分的浓度。

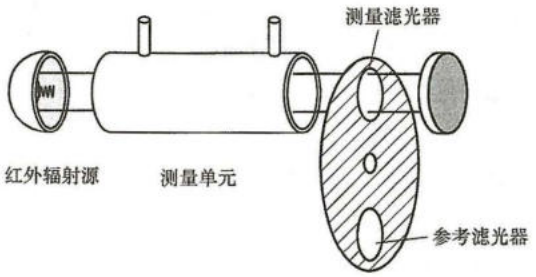


图 3-7 单光束双波长法原理图

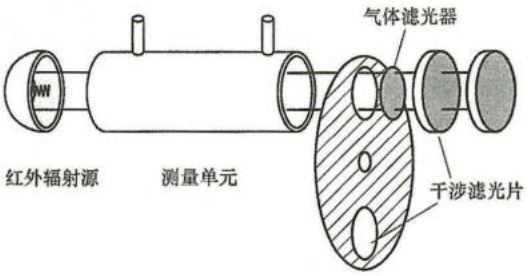


图 3-8 气体过滤相干红外法原理图

多组分红外分析仪结合了上面两种技术，装有两个滤光气室轮，总共最多可有多达 7～8 个滤光气室。一般情况下，测量滤光器室内封装高浓度待测标气；使用一个测量滤光气室和一个参比滤光片气室或使用一个测量滤光片和一个气体滤波气室可测量一个组分，一块旋光轮最多可同时测量 7～8 个组分。干扰组分浓度在最终的测量结果中可以扣除。滤光气室的位置由内部处理器控制，在一次测量过程中可以对各组分多次扫描，以提高信噪比。由切

光轮完成光束信号的射频模式化。测量过程中可同时应用单光束双波长法和气体滤波相关法。

多组分测量系统将单光束双波长和气体滤波相关技术结合起来，只需要一个气室和一个数据处理系统，具有很高的光度测量精度和稳定性，同时降低了成本，减少了维护量。

4）傅里叶变换红外分析仪

在红外 3～5μm、8～12μm 有特征吸收光谱的分子都可以采用傅里叶变换红外的方法对其浓度进行探测。FTIR 光谱仪系统的工作原理如图 3-9 和图 3-10 所示，其核心部分是迈克尔逊（Michelson）干涉仪。从光源发出的红外光，经光束分离器分为两束，分别经定镜和动镜反射后到达检测器并产生干涉现象。当动镜、定镜到达检测器的光程差为 l/2 的偶数倍时，相干光相互叠加，其强度有最大值；当光程差为 l/2 的奇数倍时，相干光相互抵消，其强度有最小值，当连续改变动镜的位置时，可在检测器得到一个干涉强度对光程差和红外光频率的函数图。光谱分析可以采用各种算法，基本算法是对吸收光谱和实验室参考光谱进行最小二乘拟合，参考光谱最好采用同样的光谱仪在相同分辨率条件下对标准浓度气体测量得到的光谱。

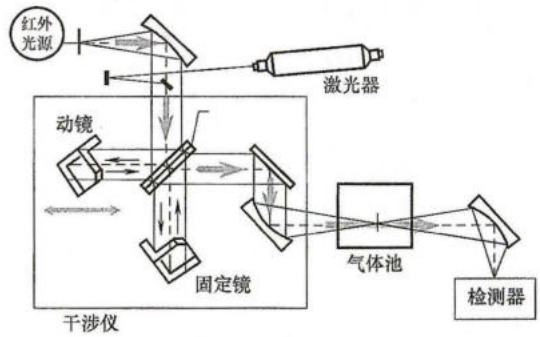


图 3-9　傅里叶变换红外分析仪结构简图

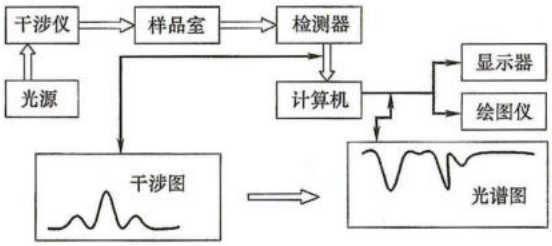


图 3-10　傅里叶变化红外分析仪工作流程图

在实际检测时，采样探头将采集到的烟气由伴热管线输送至气体池，实时采集高温条件下的烟气红外光谱，通过与多种污染气体的红外标准谱进行光谱数据拟合分析，实现垃圾焚烧产生的多组分污染气体浓度的实时定量反演，监测组分可据实际情况需要进行扩充。

FTIR 多组分分析仪特点：

① 宽谱分析、测量组分多。就垃圾焚烧烟气中气态污染物排放监测而言，可分析 SO_2、NO、NO_2、N_2O、CO、CO_2、HCl、HF、NH_3、CH_4、H_2O 等气体组分。对以油和天然气作辅助燃料的垃圾焚烧烟气排放监测，还可增加部分 VOC 组分分析。

② 湿法分析，系统气体管路全部处于 180℃状态下工作。

③ 较宽的动态测量范围和较低的检测限。

为了提高监测数据的使用效率，要求 CEMS 测量数据转换成干烟气条件下的排放浓度。

5）紫外差分吸收（DOAS）气体分析仪

差分吸收光谱技术是一种光谱监测技术，其基本原理是利用空气中气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成分，并根据窄带吸收强度来推演出微量气体的浓度。凭借其低廉且简单的设备装置和出色的监测能力，DOAS 技术在大气监测领域内在国外已经被广泛应用。DOAS 技术主要是以大气中的痕量污染气体对紫外和可见光波段的特征吸收光谱为基础，通过特征吸收光谱鉴别大气污染气体的类型和浓度，因此适用于在该波段有特征吸收的气体分子。

DOAS 方法原理的吸收光强度遵守 Lambert-Beer 吸收定律，同时要考虑散射对测量的

影响，如考虑瑞利散射（Rayleigh）、米氏散射（Mie）的影响。为了消除 Rayleigh 散射和 Mie 散射等的影响，在数学上通常采用滤波技术，将包含在大气吸收光谱中由分子吸收引起的光谱变化分离出来。这种数学上的处理是基于：由 Rayleigh 散射和 Mie 散射等引起的光学厚度的变化随波长缓慢变化，而由分子吸收特性引起的光学厚度的变化随波长快速变化。为此将散射引起的光谱变化称为“宽带”光谱（低频部分），将分子吸收引起的光谱变化称为“窄带”光谱（高频部分）。计算过程中使用高通滤波器将随波长快速变化的“窄带”光谱分离出来，被分离出来的分子吸收光谱用参考光谱进行拟合来计算出存在于被测大气中的光吸收物质的浓度，这就是差分吸收光谱法的基本原理。基于 DOAS 原理的气体分析仪气体检测如图 3-11 所示。

光源发出的紫外光汇聚进入光纤，通过光纤传输到气体室，穿过气室时经被测气体吸收后，通过光纤传输到光谱仪。在光谱仪内部经过光栅分光，由阵列传感器将分光后的光信号转换为电信号，获得气体的连续吸收光谱信息。

其核心是将吸收光谱分成快变化和慢变化两部分，利用快变化部分来反演气体的浓度。测量不受颗粒物和水分等因素的干扰，测量准确度高。

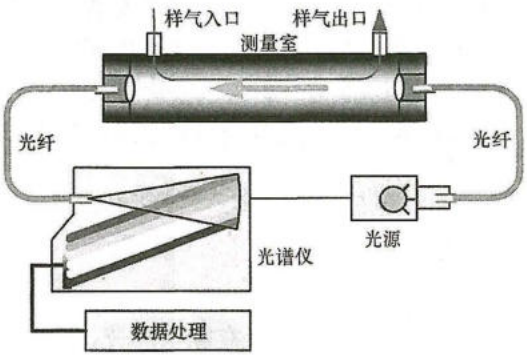


图 3-11 紫外差分吸收气体分析仪原理图

其主要优点有：

① 可以在很大程度上消除光源衰减、灰尘或水汽干扰的影响，因为这些因素造成的影响为光谱的慢变化，在差分处理后可以自动消除。

② 可同时对多种污染成分进行测量，只要在光源发出的光谱范围内有吸收，原则上都可以进行检测。同时可根据用户要求选择需要测量的气体。

3.2 安装调试要点

垃圾焚烧锅炉装机容量一般都不大，因此垃圾焚烧排放烟气排放量不大，烟道/烟囱尺寸直径一般为 1.8～2m，直管段一般符合相关标准的要求，排放口相对比较规范。

3.2.1 样品采集和传输

全程高温（热湿式）的加热部件，如取样探杆、取样探头、伴热管线、测量腔体，加热温度要控制在 180℃以上，避免冷点出现造成吸附。系统要具备温度可查、可记录、可报警功能。

传输管线的要求：由于垃圾焚烧排放尾气中含有污染物成分复杂，气体黏性较强，在气体传输过程中容易造成吸附、黏附的损失，需采用不易吸附材质的管线。例如：样品传输使用不锈钢管的伴热管线就比 FPA 材质的伴热管线吸附率高。

全程标定管：由于 CEMS 系统的全程标准管不是连续使用，虽然柜内安装有截止阀，但是另外连接探头一端与高温烟气接触，因此容易形成“冷凝水”滞留管中，如图 3-12 所示。

标定管内滞留的液态水，在标定时会造成 HCl、CO 的溶解和吸附，造成全程标定误

差。因此应保证标定管气体形成流通，避免液态水的形成。

尾气布管要求：由于全程高温（热湿式），没有冷凝除水环节，所以尾气排放管会有液态水形成，因此排气管走向需要低于仪表排放口，防止冷凝水回流到仪表测量池。如图 3-13 所示。

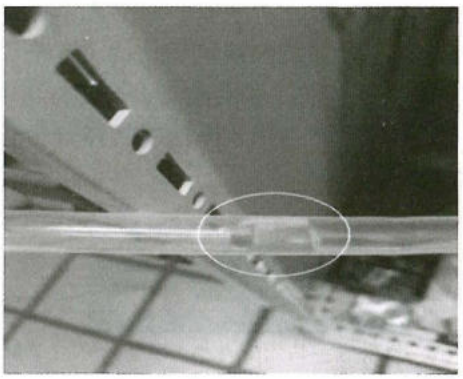


图 3-12 标定管内积水

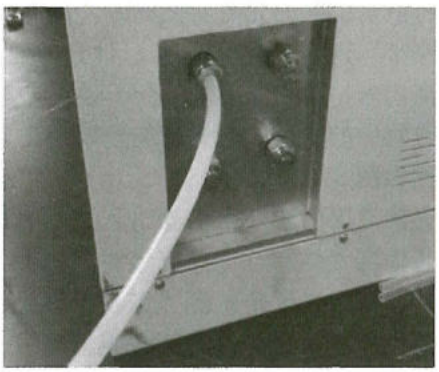


图 3-13 仪表尾气排放管走向

3.2.2 预处理设备

热湿式预处理由于没有除水环节，只有除尘要求，主要包括探杆前置过滤器、取样探头腔体过滤器。分析仪表内置过滤器，保证样气在进入仪表前过滤级别<2μm。

3.2.3 分析仪安装调试

分析仪测量池由于采用高温法，加热温度都在 180℃以上，所以保证 CEMS 机柜的温度（配置机柜空调）以及 CEMS 监测小屋的室温尤为重要。

3.2.4 辅助设备

全程高温（热湿式）使用射流气和反吹仪表气的预处理，净化气体应经过适当预处理，确保其不影响测量结果，特别是反吹的除水效果，防止水气对污染物的吸附或溶解。

3.3 日常运营要点

下面以某公司设备为例，对抽取式基于傅里叶红外技术的垃圾焚烧 CEMS 的日常运营内容及常见故障及排查进行举例说明。

3.3.1 周期巡检、维护

分析小屋及设备维护日常维护与周期维护内容请参照表 3-2，烟气分析系统的维护（预处理、FTIR 分析仪）日常维护与周期维护内容请参照表 3-3。

3.3.2 分析仪表维护保养

3.3.2.1 更换光谱仪窗片

光谱仪基本模块有两个端口：一个是红外光的入口，一个是红外光的出口。红外光从出口处进入到测量模块，在测量模块内与待分析样气相互作用后，红外光再经过入口返回到光

谱仪。入口和出口都采用抗腐蚀的镜片，并镀高透膜，现场使用一段时间后，窗口片会出现透过率下降现象或者镜面污染现象，此时需要更换窗口片。

分析小屋及设备维护日常维护与周期维护内容　　表 3-2

例行检查维护内容	建议频次
检查分析小屋，应注意仪表间空气的气味，如发现异味，马上打开门窗通风并检查管路是否泄漏，电器元件是否有过热和烧损现象	1 天/次
查看预处理机柜中的风扇是否转动，打开机柜后门观察照明灯是否正常点亮	1 星期/次
检查仪表风压力是否正常，确保无水、无油；如果不正常，检查气路连接是否漏气	1 星期/次
消除设备表面积灰，检查设备密封情况，看设备内是否有灰尘、积水现象	1 月/次
参照通用电气、仪表、设备维护规范进行小屋内电气、仪表、设备的维护工作	2 星期/次

烟气分析系统的维护（预处理、FTIR 分析仪）日常维护与周期维护内容　　表 3-3

例行检查维护内容	建议频次
每周查看光谱，确保光谱能量不低于阈值	1 星期/次
每月在上位机软件中检查分析仪的温湿度，温湿度不超过阈值	1 月/次
加热盒内部二级过滤器维护，打开加热盒，取出二级过滤滤芯，用高压气体吹扫其表面，清洁后再放回加热盒内	1 月/次
定期打开烟气采样探头的外壳，抽出过滤器滤芯，检查滤芯是否堵塞，如果堵塞滤芯应及时更换、消洗。消除探头内部堆积的灰尘，注意避免灰尘进入采样管 检查反吹箱是否按照规定的时间定时反吹。检查反吹气源的压力是否达到要求的压力	1 月/次
检查仪表风和射流泵压力读数，确保仪表风压力读数满足要求	1 月/次
检查温控器设置是否正确、读数是否正常，伴热线、加热盒和采样探头保温是否完好，加热是否正常	1 星期/次
检查工控机软件显示的测量数据，FTIR 气体分析仪工作状态，有无报警信号	1 星期/次
检查气路是否堵塞、积水、漏气或者电磁阀是否损坏，如果损坏请停机，并及时更换电磁阀	1 星期/次
每周对采样探头进行一次手动反吹	1 星期/次
每周对 FTIR 气体分析仪进行零点标定，每个月对量程进行标定，如果测量值无异常，建议标定周期为 3 个月	1 星期/次

3.3.2.2　更换气室镜组

FTIR 分析仪中通常采取长光程气室用于对气态污染物进行探测，气室内含反射镜组用于对光谱仪发出的光进行多次反射，实现较长的吸收光程。垃圾焚烧现场较为恶劣，所以分析仪气室的镜组，由于现场条件、使用寿命、设备维护不到位等原因往往会出现腐蚀，导致分析仪能量下降。当分析仪能量低于阈值（调零状态下）时，需对气室镜组进行更换。

3.4　常见故障及排除

垃圾焚烧 CEMS 傅里叶方法常见的故障及处理方法如表 3-4 所示。

垃圾焚烧 CEMS 傅里叶方法常见报警及处理方法　　表 3-4

报警说明	解决方法
浓度上限报警	测量值超过预设报警限额，重新设定报警限可以消除报警
浓度下限报警	测量值超过预设报警限额，重新设定报警限可以消除报警
光谱仪异常报警	检查光谱仪连接线是否正常，尝试重新连接后重启
PLC 异常报警	检查 PLC 连接串口显示是否正常，尝试重新插拔连接线或更换串口线
加热盒温度报警	系统断电，检查温度传感器及其连线情况
探头温度报警	系统断电，检查温度传感器及其连线情况
伴热管线 1 温度报警	系统断电，检查温度传感器及其连线情况
伴热管模块温度报警、机柜内伴热管线温度报警	系统断电，检查温度传感器及其连线情况
气体室温度报警	系统断电，检查温度传感器及其连线情况
仪表风报警、仪表风压力不足报警	仪表风压力不足，检查仪表风压力
气路堵塞报警、压力报警	气路堵塞，检查系统气路

3.5　典型应用案例

3.5.1　湿度测量准确性对干基换算影响

由于排放标准规定污染物浓度为干基浓度，热湿式测量的污染物监测因子是“湿基”，所以需要根据测量的烟气湿度换算污染物监测因子的“干基值”。

污染物干基浓度和湿基浓度转换按公式可按公式（3-2）计算：

$$C_{干}=\frac{C_{湿}}{1-X_{SW}} \tag{3-2}$$

式中　$C_{干}$——污染物干基浓度，mg/m^3（$\mu mol/mol$）；

$C_{湿}$——污染物湿基浓度，mg/m^3（$\mu mol/mol$）；

X_{SW}——烟气绝对湿度（又称水分含量），%。

从公式中可以看到湿度测量偏差对干基浓度影响较大。

3.5.2　背景气中干扰影响

通过配气仪，分配不同浓度的“干扰成分气体”通入分析仪，根据“干扰成分气体”对“测量成分”的干扰进行补偿修正，以消除背景气中的“干扰成分”的影响。

第 4 章　挥发性有机物 CEMS

4.1　挥发性有机物 CEMS 监测技术

4.1.1　基本分类

固定污染源废气挥发性有机物（VOCs）在线监测的污染物对象通常包含两大类，即 VOCs 排放总量监测和 VOCs 组分监测。

4.1.2　总量监测

固定污染源废气 VOCs 排放总量在线监测比组分监测更为简单和快速，在污染源 VOCs 排放量大，特别是排放 VOCs 特征污染源已知的情况下，VOCs 排放总量监测能起到较好的污染监管控制效果。不同国家或标准用于评价 VOCs 总量的指标名称和定义有所不同，通常包括总有机碳（TOC）、总挥发性有机物（TVOC）、总碳氢化合物（THC）、非甲烷总烃（NMHC）等。不同名称与特定的检测方法相关，需要进行区分，并在实际应用中根据环境管理需要和在线监测能力进行选择。

总有机碳（total organic carbon，TOC）是指气体中的以有机物形式存在的碳浓度，是欧洲常用的 VOCs 总体浓度表示方法。总挥发性有机物（total VOCs，TVOC）的定义视具体方法或标准而定。一种情况是用指定的 VOCs 当量浓度表示 VOCs 的总量，如以苯、甲苯或丙烷计；另一种情况则是表示指定范围的单个 VOCs 浓度的总和，其本质上仍属于 VOCs 组分的监测。总碳氢化合物（total hydrocarbon，THC）也称总烃，是指气体在气相色谱仪的氢火焰离子化检测器（FID）上有响应的气态有机化合物的总和。非甲烷总烃（non-methane hydrocarbons），指氢火焰离子化检测器上有响应的除甲烷外的其他气态有机化合物的总和，除另有说明，结果以碳计，由于甲烷在大气有机化合物中占 70%～80%，又不参与光化学反应，对环境的影响小，且自然环境中因生物代谢所产生的甲烷远大于人为排放。因此，各国对 VOCs 的排放监测和控制通常排除甲烷。

4.1.3　总量监测分析技术

国内外 VOCs 总量在线监测技术主要有：氢火焰离子化检测器（FID）、光离子化检测器（PID）、催化氧化红外分析（NDIR）、气相色谱（GC-FID）及气相色谱（GC-FID/PID/MSD）等，VOCs 总量在线监测技术如表 4-1 所示。

常见固定污染源废气 VOCs 在线监测仪器总量分析技术　　表 4-1

序号	分析技术	监测对象	技术特点与应用
1	氢火焰离子化检测器（FID）	THC、TVOC、NMHC	对碳氢有机物响应十分灵敏，线性范围宽、稳定性强、结构简单、使用维护方便，广泛用于 VOCs 总量监测；烟气中氧气、水分及含氮、氧或卤素原子的有机物会对测试造成干扰

续表

序号	分析技术	监测对象	技术特点与应用
2	光离子化检测器(PID)	THC、TVOC	检测器体积小巧，无需辅助气，常作为现场便携仪器使用：主要用于室内环境监测、应急监测、污染源追踪等方面TVOC含量监测分析；PID能检测响应的VOCs种类和所使用的紫外灯能量有关，不同化合物响应系数不同，一些短链烷烃响应极低甚至无法检测
3	催化氧化红外分析(NDIR)	THC	技术稳定性和灵敏度不高，易受共存干扰物的影响，由于在催化氧化过程中会存在催化剂中毒、转化不完全、转化效率低等问题，实际应用中不多见
4	气相色谱GC-FID/PID/MSD	THC、TVOC、NMHC、VOCs	检测灵敏度高，选择性强。可监测TVOC、NMHC及VOCs的个别特殊因子，配PID、MSD检测器可同时分析VOCs的多组分

4.1.4　组分监测

VOCs的主要成分包括烃类、卤代烃、芳香烃、氧烃和氮烃等。固定污染源废气VOCs排放组分在线监测主要适用于固定污染源排放VOCs种类繁杂，或者是个别排放特征污染物排放浓度高、危害较大以及一些特殊行业排放VOCs种类未知等情况。不同行业排放的特征污染物种类不同，其主要的监测分析技术基本上来源于实验室检测方法，相关监测方法见表4-2、表4-3。通过采样方式、色谱主机等系统优化和现场适用性改进将实验室检测技术实现污染源现场的在线测量。现场VOCs污染物的监测分析种类与实验室分析的目标污染物种类可以达到基本相同。

我国标准体系中固定污染源排放VOCs(单独污染物)的相关监测方法　　表4-2

污染物	标准号	标准名称	采样方法
酚类	HJ/T 32—1999	固定污染源排气中酚类化合物的测定　4-氨基安替比林分光光度法	吸收液
甲醇	HJ/T 33—1999	固定污染源排气中甲醇的测定　气相色谱法	注射器
氯乙烯	HJ/T 34—1999	固定污染源排气中氯乙烯的测定　气相色谱法	注射器
乙醛	HJ/T 35—1999	固定污染源排气中乙醛的测定气　相色谱法	吸收液
丙烯醛	HJ/T 36—1999	固定污染源排气中丙烯醛的测定　气相色谱法	注射器
丙烯腈	HJ/T 37—1999	固定污染源排气中丙烯腈的测定　气相色谱法	吸附管(活性炭)
氯苯类	HJ/T 39—1999	固定污染源排气中氯苯类的测定　气相色谱法	吸附管(特殊吸附剂)
	HJ/T 66—2001	大气固定污染源　氯苯类化合物的测定　气相色谱法	吸附管(特殊吸附剂)

我国标准体系中固定污染源排放VOCs(多种污染物)的相关监测方法　　表4-3

污染物	标准号	标准名称	采样方法
24种 苯、甲苯、二甲苯(邻、间、对)、乙苯、苯乙烯	HJ 734—2014	固定污染源废气　挥发性有机物的测定　固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法	吸附管
61种 苯、甲苯、二甲苯(邻、间、对)、乙苯、苯乙烯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯	HJ 732—2014	固定污染源废气　挥发性有机物的采样　气袋法	气袋法

续表

污染物	标准号	标准名称	采样方法
14种 氯甲烷、氯乙烯、溴甲烷、溴乙烷、氯丙烯、二氯甲烷、氯丁二烯、三氯甲烷、四氯化碳等	HJ 1006—2018	固定污染源废气挥发性卤代烃的测定 气袋采样-气相色谱法 HJ 1006—2018	气袋法

4.1.5 组分监测分析技术

VOCs组分监测常用的分析技术主要包括气相色谱（GC-FID/PID/MSD）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）、差分吸收光谱（DOAS）、离子迁移谱（IMS）、可调谐激光吸收光谱（TDLAS）、质子转移反应质谱（PTR-MS）等，具体应用监测对象和技术特点如表4-4所示。

常见固定污染源废气VOCs在线监测仪器组分分析技术　　表4-4

序号	分析技术	应用监测对象	技术特点分析
1	气相色谱 GC-FID/PID/MSD	THC、TVOC、 NMHC、VOCs	检测灵敏度高，选择性强。可监测TVOC、NMHC及VOCs的个别特殊因子，配PID、MSD检测器可同时分析VOCs的多组分
2	傅里叶变换红外光谱(FTIR)	VOCs多组分	检测技术成熟，检测VOCs种类较多，可同时分析多个组分；现场测量检测周期短，响应时间快；但其检测分析的灵敏度一般较色谱技术低，且光学器件维护成本高，维护量较大
3	差分吸收光谱 (DOAS)	VOCs组分 (苯系物)	检测技术成熟，可同时分析多个组分；一般现场采取非接触式直接连续测量，无需预处理，保证气体不失真，响应时间很快，可实现测量光路区域内的在线监测；但其检测分析的灵敏度一般较色谱技术低，检测VOCs种类有限，目前主要是苯、甲苯等苯系物
4	离子迁移谱 (IMS)	VOCs单组分	检测灵敏度高，相比于质谱技术不需要真空系统，仪器结构简单、成本较低，可测量浓度低、腐蚀性高的气体，但该技术特异性差，可测量VOCs种类有限，干扰化合物较多，目前IMS作为便携式监测仪在应急监测、食品安全监测等领域有所应用
5	可调谐激光吸收光谱(TDLAS)	CH_4等	检测灵敏度高，选择性强，干扰很小。现场采取非接触式直接连续测量，无需预处理，保证气体不失真，响应时间很快，实时性强，可实现测量光路区域内在线监测，该技术单一光源一般只能完成单一组分测量
6	质子转移反应 质谱(PTR-MS)	VOCs单组分	在环境、生物、医疗健康、公共安全等领域发挥着重要作用，为痕量VOCs的快速定量检测提供了高灵敏度技术手段，其优点是速度快，可以实现在线监测，高灵敏度，采用软电离原理。谱图简洁，便于识别，定量测量不需要定标，但价格昂贵，需要专人维护

4.1.6　系统结构

污染源 NMHC-CEMS 由样品采集和传输装置、预处理设备、分析仪器、数据采集和传输设备以及其他辅助设备等组成（图 4-1）。

系统测量废气中非甲烷总烃浓度（或 VOCs 组分浓度）、废气参数（温度、压力、流速或流量、湿度等），对于含氧量参与污染物折算浓度计算的要同时测量含氧量，同时计算废气中污染物排放速率和排放量，显示和打印各种参数、图表，并通过数据、图文等方式传输至管理部门。

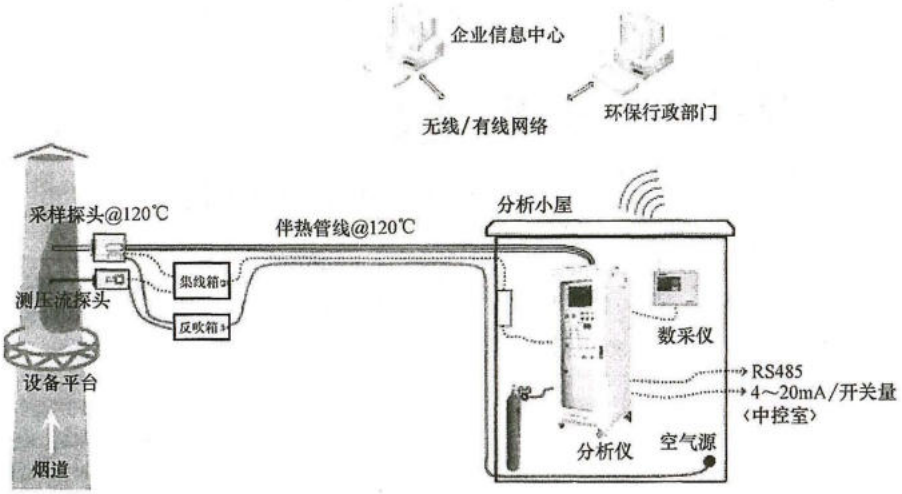


图 4-1　非甲烷总烃在监测系统安装示意图

4.1.6.1　样品采集和传输装置

烟气采集采用完全抽取的采样方式，探头安装按照国家规范，安装在管道（或烟囱）的适当位置，伴热管线按照国家规范，采集管道中的烟气进入分析仪器。分析主流路由采样泵不间断采样，确保样气处于实时更新的状态，有效提高了系统响应时间。

伴热管线是由一组耐腐蚀、低吸附的高分子导管辅以伴热带以及补偿线缆组成内芯，外加保温层和屏蔽层，最后敷以阻燃聚乙烯（PE）保护外套复合而成。伴热管线具有电加热伴热功能，可以保证采样管内维持一定的温度。在现场实际应用中，从采样探头、采样管线至整个分析过程全程加热温度≥120℃，从而尽可能保证设备采集到的烟气与烟囱中的气体浓度保持一致，防止 VOCs 成分冷凝，最终确保监测系统连续、无损失采集样气。

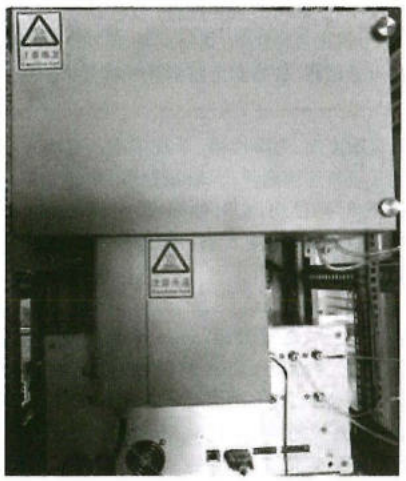


图 4-2　预处理图片

4.1.6.2　预处理设备

预处理设备主要包括样品过滤器、调节针阀、切换球阀等器件。在气体样品进入分析仪之前设置 0.5～2μm 精细过滤器，减少样气中粉尘对测量数据的影响，确保设备能够长期、可靠地运行。

4.1.6.3　分析仪器

采用气相色谱仪（GC-FID 原理）对采集的污染源废气样品进行测量分析，气相色谱仪主要由柱箱、气

体流量控制系统、电路控制检测系统及、检测器专用工作站等组成。

（1）GC-FID 基本原理

基于气相色谱-氢火焰离子化检测器（GC-FID）技术，样气经不同分离管柱分离后，待测有机物组分依次被送入 FID 检测器，在氢火焰中被电离成带正电荷的离子和电子，其产生的微电流经由信号放大器输出，对电流信号进行检测和记录即可得到相应的谱图。

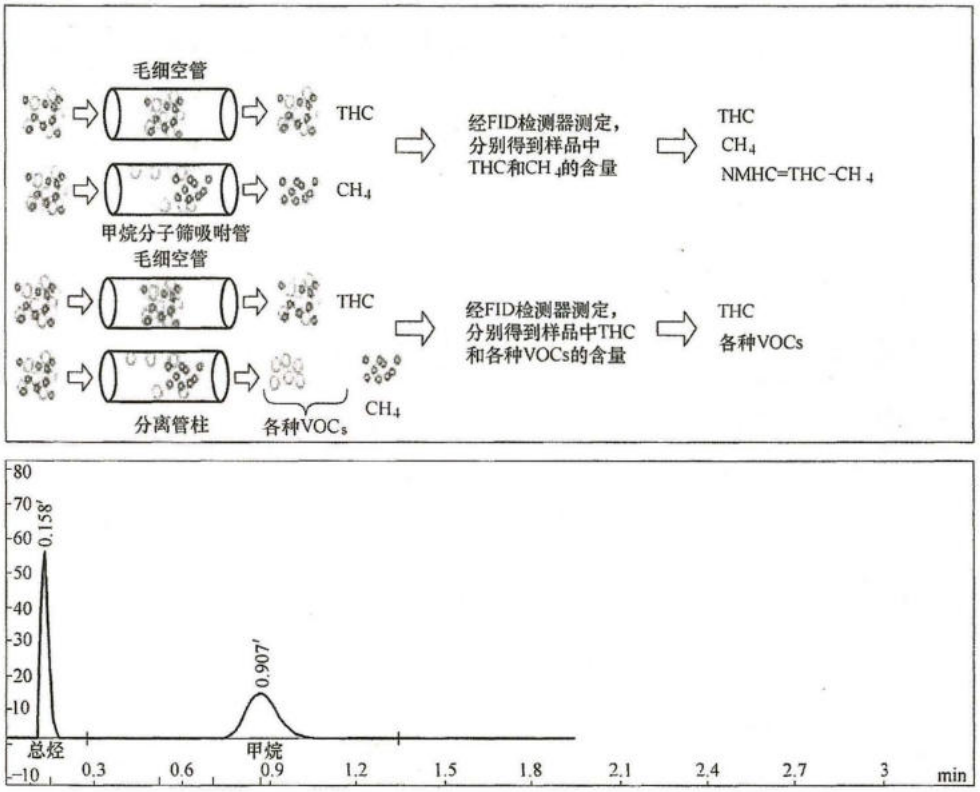


图 4-3 非甲烷总烃谱图

（2）氢火焰离子化检测器（FID）原理

VOCs 样气被连续注入 FID 检测器中，在氢气和空气燃烧的火焰中被电离成正负离子，在极化电压形成的电场中，正负离子向各自相反的电极移动，从而产生微弱的电流信号。这些信号由收集极收集，经过微电流放大器放大后，再输送到色谱数据处理系统。FID 检测器属于质量型检测器，不仅具有灵敏度高、线性范围宽的特点，而且对操作条件变化相对不敏感，稳定性好，是气相色谱仪中应用最广泛的检测器之一。有些物质在 FID 检测器中响应值很小或者没有响应，如卤代硅烷、永久性气体、CO、CO_2、NH_3、CS_2、CO_2、CCl_4 等，检测这些物质时不要用 FID 检测器。

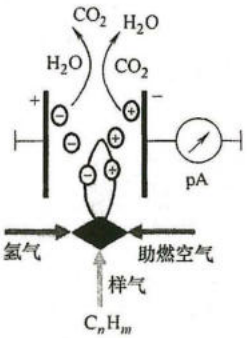


图 4-4 氢火焰离子化检测器（FID）示意图

4.1.6.4 *数据采集和传输设备*

数据采集和传输设备用于采集、处理和存储监测数据，并能按中心计算机指令传输监测数据和设备工作状态信息。具备显示实时、设置系统时间，查询历史数据等功能。

4.1.6.5 辅助设备

辅助设备包括氢气、空气、载气、标准气体、尾气排放装置等。系统尾气排放管路应规范铺设；氢气源连接管路应使用不锈钢材质；氢气纯度大于99.999%，载气（氮气）纯度大于99.999%，其他具体要求见表4-5。

气源要求 表4-5

气源要求	
载气	N_2>99.999%,0.4～0.5MPa
燃气	H_2>99.999%,0.3～0.4MPa
助燃气	Air,干燥、无油、除烃,0.4～0.5MPa
压缩空气	Air,干燥、无油,0.4～0.6MPa
标准气体	市售有证标准气体,不确定度≤2%

4.2 非甲烷总烃CEMS安装调试要点

4.2.1 样品采集和传输设备

4.2.1.1 采样探头

采样探头安装要求：

采样探头应安装牢固，不会随气流发生抖动。为避免污染物堵塞取样管路，采样探头内部应设置过滤器，通常采用陶瓷过滤器或者钛合金过滤器。探头安装方向应沿着气流放下向下倾斜5°～10°（图4-5），保证在采样探头管路中出现的冷凝水可以尽快排出，减少采样探头的腐蚀，提高使用寿命。采样探头应有加热功能，一般通过电子温控器控制，通常保证采样探头内腔恒温在120～150℃，且温度值能够在机柜或软件中显示查询。采样探头应具备定时吹扫功能，防止过滤器被灰尘堵塞，延长过滤器的使用寿命。采样探头应具备标准气体全程校准功能，以消除系统校正误差。

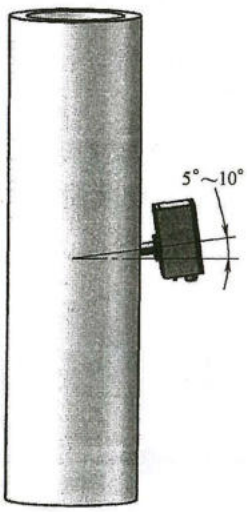


图4-5 采样探头安装示意图

4.2.1.2 气体传输伴热管线

气体传输伴热管线敷设要求：

从探头到分析仪的整条采样管线的铺设应采用桥架或穿管等方式，保证整条管线具有良好的支撑。管线应向下倾斜度≥5°，防止管线内积水，在每隔4～5m处装线卡箍。管线走向不得向上倾斜和出现“U”形或“V”形的敷设方式，这种敷设方式一旦出现管线加热不均匀或加热失效则容易形成冷凝水囤积，短期会造成被测气体损失，测力值偏低，长期则会使采样管线堵塞。用于固定伴热管线的外部卡箍应防止对伴热管线长期造成损害，导致管线加热不均匀或断裂腐蚀等。

当使用伴热管线时应具备稳定、均匀加热和保温的功能；其设置加热温度≥120℃，且应高于烟气露点温度10℃以上，其实际温度值应能够在机柜或系统软件中显示查询。

伴热管线内气体传输管线（一般为聚四氟乙烯管或不锈钢管）应至少为2根，一根用于样品气体的采集传输，另一根用于标准气体的全程校准。采样探头和伴热管线必须同时具备完成全程校准的功能要求，全程校准过程

如图 4-6 所示，应确保标准气体通过采样探头后被采样泵由样品气体传输管路抽入分析仪，完成全程校准。

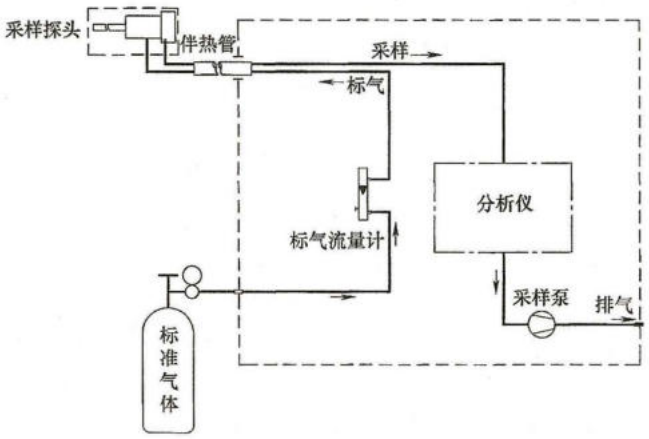


图 4-6 全程校准过程示意图

4.2.1.3 采样泵

采样泵安装要求：

采样泵应保障采样流量准确可靠，且不论负载增加多少，采样流量都应保持相对稳定。采样泵一般采用真空隔膜泵或者射流泵，使用采样泵时需要选用能够耐腐蚀膜片及泵体；射流泵则需要加热，以保证射流泵的入口不会有冷凝水，导致射流泵堵塞和腐蚀。

4.2.2 预处理设备

4.2.2.1 过滤器

过滤器安装要求：

过滤器是 NMHC-CEMS 系统的重要组成部分，也是主要耗材。NMHC-CEMS 系统的过滤器通常使用陶瓷滤芯、不锈钢滤芯或者钛合金滤芯，一般安装在采样探头末端，用于过滤烟气中的颗粒物，以避免颗粒物堵塞采样管路和污染分析仪，通常过滤器的滤芯的孔隙不大于 2μm。对于烟气中颗粒物浓度较大的现场可以设置多级过滤，过滤精度应沿采样气流方向逐级增高。

因过滤器需要定期更换，所以其应安装在相对方便拆卸的位置。过滤器的更换周期需视现场工况而定，一般更换周期不超过 6 个月，对于烟气中颗粒物浓度较大的现场应适当缩短更换周期。

4.2.2.2 电控系统

电控系统安装要求：

电控系统由控制器（PLC 或其他类似功能的设备）、执行部件和控制软件组成，用于实现温度控制、测量、反吹、校准、维护等工作流程。为方便维护和维修，电控系统的各个部件、线路均应设置明确的标识；内部线路布置应合理，便于查找及维护。

4.2.3 分析仪安装调试

4.2.3.1 分析仪安装

（1）分析仪安装场地要求

分析仪应安装在无磁场干扰、无腐蚀性气体、无强烈或持续振动的场合，且仪器周围无

障碍物，房间有一定的排风条件。仪器放置的工作面应坚固、稳定可靠。

（2）电源要求

分析仪电源采用220VAC（210VAC～230VAC），正常启动最大1000VA，连续使用为500VA。通常仪器能在电网电压波动±10%之内正常工作，但是为了确保仪器在高性能下工作，要求电网电压波动要小于±5%、频率变化小于±1Hz和瞬间波动不超过±5V。

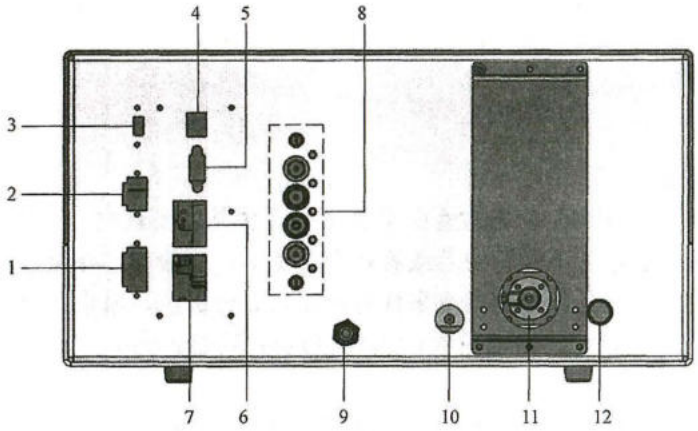
（3）环境要求

除特别指定外，正常应用情况下室内温度应保持在15～30℃，且温度恒定。建议不要在温度变化高于5℃/h的室内环境下使用，否则可能得不到稳定的保留时间，进而影响仪器性能。要避免把仪器安装在空调、暖气附近或风扇直吹的地方，避免安装在阳光直射的地方。

仪器一般能在相对湿度小于90%RH的情况下正常工作，使用时应避免由于湿度和温差太大，在仪器上形成露珠或由于维修不当引起绝缘电阻（强度）减小，致使漏电流增加。为确保仪器安全和正常工作，环境相对湿度应小于60%RH。

4.2.3.2　分析仪管路连接

用管路把分析仪所需气体连接到仪器后面板（图4-7）。选择气体管线应小心谨慎，因为外部接入的大部分管线是由塑料材料制成的，例如PTFE，即使在常温状态亦会挥发出有机物蒸气，这些蒸气有时会渗透到永久气体中。为了得到更好的测量效果，建议最好使用事先清洁过的GC级铜或不锈钢。如果已经使用其他材料，管线应尽可能短。



序号	名称	功能
1	仪器电源接口	接入外置电源线
2	伴热管电源接口	接入外置伴热管电源线
3	伴热管PT100接口	测量伴热管温度
4	ENET网口	接入外部网络
5	RS232	232输出
6	485、模拟量输出、输入	进行485通信和模拟量输入输出
7	继电器控制端口	继电器输入输出控制
8	不同管路接口	接入不同类型气体管路
9	泵出口	采样管排气口
10	标气和零气出口	用于分析仪标定调零
11	样气入口	接入样气管路
12	真空发生器连接口	使用真空发生器作为采样动力

图4-7　VM-1700-N分析仪后视图

4.2.3.3 分析仪调试

(1) 仪器启动

在安装完毕后，则可开始仪器首次运行调试。分析仪的启动一般按下列步骤操作：

1) 打开分析仪电源开关，待系统启动后，分析仪应用程序自动开始运行。

2) 查看应用程序主界面是否有报警信息，若有报警信息需及时处理进行解决。简单的诊断测试后，分析仪进入预热阶段。仪器需要大约 20min 达到操作温度。

3) 在仪器预热过程中，H_2 流量为零，调节阀处于大气压状态，采样泵未启动。

4) 当 FID 温度接近设定时，采样泵开始工作。

5) 当设定温度达到平衡后，点火程序会自动启动，氢气和空气流量执行点火氢空比（氢气流量为 50mL/min，空气流量为 300mL/min）。

6) FID 点火成功后仪器自动循环运行，氢气和空气流量执行工作氢空比（氢气流量为 30mL/min，空气流量为 300mL/min）。

(2) 现场调试

NMHC-CEMS 在现场安装运行以后，在接受验收前，应进行技术性能指标的调试检测调试检测的技术指标包括：

1) 分析周期

分析周期指 NMHC-CEMS 连续运行时给出两组测量结果之间的时间间隔，连续 3 天共测量 3 次，每日分析周期都应符合表 2 的要求。

2) 24h 漂移

待测系统运行稳定后，通入零气，记录零点稳定示值为 Z_0；然后通入量程标气，记录稳定示值 S_0。通气结束后，待测系统连续运行 24h（期间不允许任何校准和维护）后分别通入同一浓度零气和量程标气重复上述操作，并分别记录稳定后示值。按公式（4-1）～公式（4-4）计算待测系统的 24h 零点漂移 Z_d 和 24h 量程漂移 S_d，然后可对待测系统进行零点和量程校准（如果不校准可将本次零点和量程测量值作为 NMHC-CEMS 运行 24h 后零点和量程漂移测试的初始值 Z_0 和 S_0）。重复上述测试 7 次，全部 24h 零点漂移值 Z_d 和 24h 量程漂移 S_d 均应符合表 4-5 的要求。

$$\Delta Z_n = Z_n - Z_c \tag{4-1}$$

$$Z_{dn} = \frac{\Delta Z_n}{R} \times 100\% \tag{4-2}$$

式中 Z_{dn}——待测系统 24h 零点漂移，%；

Z_0——待测系统通入零点气体的初始测量值，mg/m^3；

Z_n——待测系统运行 24h 后通入零点气体的测量值，mg/m^3；

ΔZ_n——待测系统运行 24h 后的零点变化值，mg/m^3；

R——待测系统满量程值，mg/m^3；

n——测试序号，($n=1\sim7$)。

$$\Delta S_n = S_n - S_0 \tag{4-3}$$

$$S_{dn} = \frac{\Delta S_n}{R} \times 100\% \tag{4-4}$$

式中 S_{dn}——待测系统 24h 零点漂移，%；

S_0——待测系统通入零点气体的初始测量值，mg/m^3；

S_n——待测系统运行 24h 后通入零点气体的测量值，mg/m³；

ΔS_n——待测系统运行 24h 后的零点变化值，mg/m³。

3）准确度

① 当分析周期、24h 漂移检测通过后，可进行准确度检测。

② 待测 NMHC-CEMS 运行稳定后，分别进行零点和量程校准。

③ 待测 NMHC-CEMS 与参比测试方法同步对现场排放非甲烷总烃进行测量，由数据采集器连续记录测量值至参比方法测试结束。

④ 取同一时间区间内（一般为 2～3 倍分析周期）参比方法与 NMHC-CEMS 测量结果平均值组成一个数据对，确保参比方法与 NMHC-CEMS 测量数据在同一条件下（废气温度、压力、湿度等，一般取标态干基浓度）。

⑤ 每天获取至少 9 组以上数据对，用于准确度计算。

⑥ 当参比方法测量非甲烷总烃浓度平均值＜50mg/m³ 时，计算全部数据对 NMHC-CEMS 与参比方法测量数据平均值的绝对误差的绝对值，应符合表 4-6 的要求。

⑦ 当参比方法测量非甲烷总烃浓度平均值≥50mg/m³ 时，按公式（4-5）～公式（4-10）计算相对准确度，结果应符合表 4-6 的要求。

$$RA=\frac{|\overline{d}|+|cc|}{RM}\times 100\% \tag{4-5}$$

式中 RA——相对准确度，%；

RM——参比方法全部数据对测量结果的平均值，mg/m³；

$\overline{d}$——待测系统与参比方法测量各数据对差的平均值，mg/m³；

cc——置信系数，mg/m³。

$$\overline{RM}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}RM_i \tag{4-6}$$

式中 RM_i——第 i 个数据对中的参比方法测量值，mg/m³；

i——数据对的序号（i=1～n）；

n——数据对的个数（n≥9）。

$$\overline{d}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_i \tag{4-7}$$

$$d_i=RM_i-CEMS_i \tag{4-8}$$

式中 d_i——每个数据对参比方法与 NMHC-CEMS 同时间段内测量值之差，mg/m³；

$CEMS_i$——第 i 个数据对中的 NMHC-CEMS 测量值，mg/m³。

注：在计算数据对差的和时，保留数据差值的正、负号。

$$cc=\pm t_{f,0.95}\frac{S_d}{\sqrt{n}} \tag{4-9}$$

式中 $\pm t_{f,0.95}$——统计常数，由表 4-5 查得，$f=n-1$；

S_d——NMHC-CEMS 与参比方法测量各数据对差的标准偏差，mg/m³；

$$S_d=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\overline{d})^2}{n-1}} \tag{4-10}$$

计算置信区间和允许区间参数表 表 4-6

f	t_f	v_f	n	$u_{n'}$
8	2.306	1.7110	8	1.233
9	2.262	1.6452	9	1.214
1	2.228	1.5931	1	1.208
1	2.201	1.5506	1	1.203
1	2.179	1.5153	1	1.199
1	2.160	1.4854	1	1.195
1	2.145	1.4597	1	1.192
1	2.131	1.4373	1	1.189
1	2.120	1.4176	1	1.187
1	2.110	1.4001	1	1.185
1	2.101	1.3845	1	1.183
1	2.093	1.3704	1	1.181
2	2.086	1.3576	2	1.179
2	2.060	1.3081	2	1.173
3	2.042	1.2737	3	1.170
3	2.030	1.2482	3	1.167
4	2.021	1.2284	4	1.165
4	2.014	1.2125	4	1.163
5	2.009	1.1993	5	1.162

固定污染源废气 NMHC-CEMS 调试检测技术指标要求 表 4-7

检测项目	技术指标要求
分析周期	≤3min
24h 漂移	±3% F.S.
准确度	当参比方法测量非甲烷总烃浓度的平均值： (1)小于 50mg/m³时，绝对误差≤20mg/m³。 (2)大于等于 50mg/m³ 且小于 500mg/m³时，相对准确度≤40%。 (3)大于等于 500mg/m³时，相对准确度≤35%。

4.2.4 辅助设备安装

4.2.4.1 氢气发生器

(1) 氢气发生器作用

因非甲烷总烃分析仪采用的是 FID 检测器，所以 FID 检测器需要使用氢气和零级空气来进行 FID 检测器点火或维持火焰。FID 检测器需要纯度不低于 99.99%的氢气作为维持火焰的燃烧气体，可以采用氢气发生器或者高纯度的瓶装氢气。因使用瓶装氢气需定期更换，存放较为危险，一般优先使用氢气发生器。

（2）氢气发生器工作原理

氢气发生器的工作原理是以氢氧化钾溶液作为电解液，通过电解而获得氢气。氢氧化钾是强电解质，在水溶液中能全部离解成带正电荷的钾离子和带负电荷的氢氧根离子。由于溶液中有大量的离子存在，当直流电作用下，溶液中正负离子分别向两极移动，在电解池内阴极产生氢气，阳极产生氧气，氢气通过阴极出口进入气水分离器、冷凝分离器后，再进入到过滤器中，经吸附净化从出气口源源不断地输出。

（3）氢气发生器的安装要求

氢气发生器所产生的氢气纯度应不小于99.999%，产生的氢气流量和压力需满足FID检测器点火或维持火焰燃烧的需要；氢气发生器需要用蒸馏水或者去离子水作为电解液的溶液，并且需要定期给补充；若氢气发生器与其他带电设备供电安装在密闭空间内，应增加可燃气体探测器，在可燃气体探测器报警时能联动关闭内部仪表的总电源，以免发生氢气泄漏而造成火灾危险；氢气发生器内部的过滤器及吸附剂应按照要求定期更换，避免因过滤吸附装置失效导致产生的氢气纯度不够，进而影响FID检测器测量。

4.2.4.2 零级空气发生器

（1）零级空气发生器的作用

零级空气发生器为非甲烷总烃的FID检测器提供纯净的助燃气体，满足FID检测器维持火焰的需要。因空气中含有少量的烃类，所以这些烃类进入分析仪会干扰FID检测器的测量，零级空气发生器的作用是去除空气中的烃类，提供纯净的助燃气。

（2）零级空气发生器的工作原理

零级空气发生器采用外部提供的无油无水压缩空气（宜为仪表气），通过除烃模块和精密稳压系统再进入过滤器内进行二次吸附净化，即可输出高纯净的压缩空气工仪表使用。

（3）零级空气发生器的安装要求

零级空气发生器的烃类去除率应>98%，且去除后总烃含量<0.1ppm；其产生的纯净空气的压力和流量应满足FID检测器点火或维持火焰燃烧的需要；零级空气发生器内部的过滤器及吸附剂需定期更换，避免因过滤吸附装置失效导致产生的空气纯度不足。

4.2.4.3 尾气排放装置

尾气排放装置安装要求：

尾气排放装置的管路应规范敷设，由于分析仪排放的尾气均为有害气体，不应随意排放，防止排放的尾气污染周围环境或者影响周围安全，尤其不能排放在分析小屋内。

若设备安装在我国北方地区和其他冬季温度低于零度的地区，应增加尾气排放伴热装置，以确保排放的尾气温度高于冰点，不会造成尾气排放管路因结冰导致气路堵塞、排气不畅，进而影响分析仪测量。

4.2.4.4 定时反吹装置

定时反吹装置安装要求：

定时反吹装置是确保仪器设备在恶劣的污染源排放环境条件下长期稳定工作的重要保护设备，保证采样探头和样品传输管线不会被颗粒物所堵塞，从而引起设备故障、测量数据不准。

定时反吹装置的安装应满足采样探头或伴热管线清洁吹扫所需的压力和流量要求；反吹气源一般应为仪表气（参照《仪表供气设计规范》HG/T 20510—2014的要求）或增加过滤、除水、除油装置能达到仪表气要求的压缩空气，确保反吹过程不会影响或损害设备；反吹频率与反吹方式应根据现场颗粒物的浓度和采样探头污染速率而定，通常反吹频率不大于24小时，反吹方式为脉冲反吹。

4.3 VOC 组分 CEMS 安装调试要点

固定污染源废气 VOCs 排放组分在线监测主要适用于固定污染源排放 VOCs 种类繁杂，或者是个别排放特征污染物排放浓度高、危害较大以及一些特殊行业排放 VOCs 种类未知等情况。其主要的监测分析技术基本上来源于实验室检测方法，通过系统优化和现场适用性改进将实验室检测技术实现污染源现场的在线测量。现场 VOCs 污染物的监测分析种类与实验室分析的目标污染物种类可以达到基本相同。近年来随着在线监测技术的迅速发展，各种类型的 VOCs 在线监测仪器已进入实际应用领域，在 VOCs 污染状况的长期监控分析中发挥了重要的作用。

4.3.1 气相色谱法

用于多组分 VOCs 监测的在线气相色谱类似于实验室色谱方法的改造和集成。这类技术主要通过采样和预处理系统的改进，实现了自动化采样和连续自动进样分析。在线色谱仪器已具备较成熟的技术，配置不同的多种检测器如氢火焰离子化监测器（FID）、光离子化检测器（PID）以及质谱检测器（MSD），可同时分析多个 VOCs 不同组分，灵敏度与准确性与传统的实验室气相色谱法相当，成本适中，实时性较强，已逐步在我国得到了推广应用。

4.3.1.1 气相色谱法的原理

气相色谱（GC）是一种分离技术。实际工作中要分析的样品往往是复杂基体中的多组分混合物，对含有未知组分的样品，首先必须将其分离，然后才能对有关组分进行进一步的分析。混合物的分离是基于组分的物理化学性质的差异，GC 主要是利用物质的沸点、极性及吸附性质的差异来实现混合物的分离。

待分析样品被惰性气体（即载气，一般是 N_2、He 等）带入色谱柱，由于样品中各组分的沸点、极性或吸附性能不同，每种组分都倾向于在流动相和固定相之间形成分配或吸附平衡。但由于载气是流动的，这种平衡实际上很难建立起来，也正是由于载气的流动，使样品组分在运动中进行反复多次的分配或吸附/解附，结果在载气中分配浓度大的组分先流出色谱柱，而在固定相中分配浓度大的组分后流出。当组分流出色谱柱后，立即进入检测器，检测器能够将样品组分的存在与否转变为电信号，而电信号的大小与被测组分的量或浓度成比例，当将这些信号放大并记录下来时就形成了色谱图，原理如图 4-8 所示。

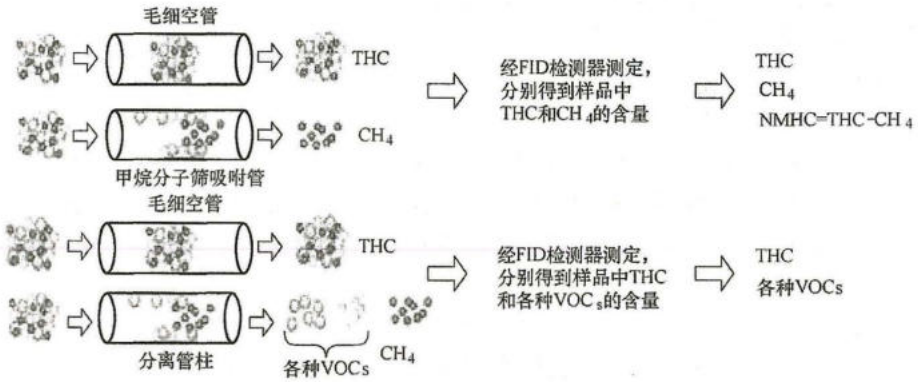


图 4-8 GC-FID 基本原理

4.3.1.2　气相色谱仪的基本构成

国内外有许多厂家推出了 VOCs 在线色谱分析仪，如荷兰某公司的 GC955 系列，法国某公司的 GC866 系列以及国内某公司推出的 VOC-100、FID-500 系列等。各厂家产品的功能多样，性能有些许差异，在线色谱分析的具体实现方式不尽相同，但是核心原理和整体构架是一致的，常规的系统组成如图 4-9 所示。

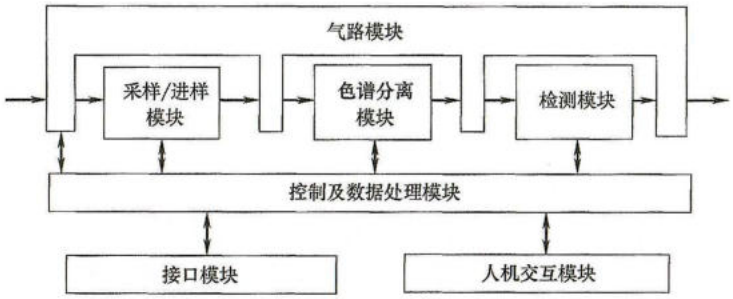


图 4-9　多组分 VOCs 在线色谱分析仪系统组成图

（1）采样/进样模块

采样/进样模块中的采样泵使待测气体经由气路模块进入其中，实现定量采样。在气路模块的驱动、转换、连接等作用下，采集的样品通过分离模块中的色谱柱进行分离，而后各组分依次进入检测模块，得到检测信号响应后排出系统。控制与数据处理模块负责监控仪器在各种运行状态下器件的动作，同时采集处理流量、温度和检测信号等数据，对异常数据作出反馈。

对于污染源在线监测，由于污染物的浓度相对都比较高（ppm 级别），直接用定量环采样即可；而针对污染物浓度偏低的环境空气在线监测场合（ppb 级别），往往就需要使用“冷阱”技术了，即在线吸附解析模块。以常州某公司的在线吸附解析模块为例，模块本身即具有加热和制冷功能，填好填料的吸附解析管也在模块内，通过 MFC、小型真空泵和 PLC 等外围设备的配套工作，即可在气相色谱仪内完成完整的样品吸附解析及分析工作。

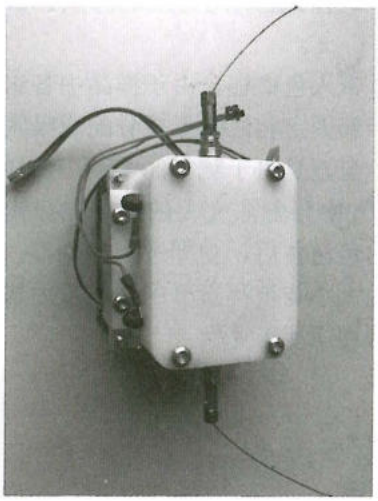
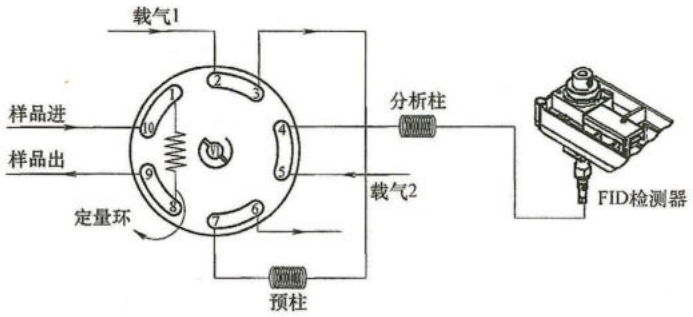


图 4-10　吸附解析模块

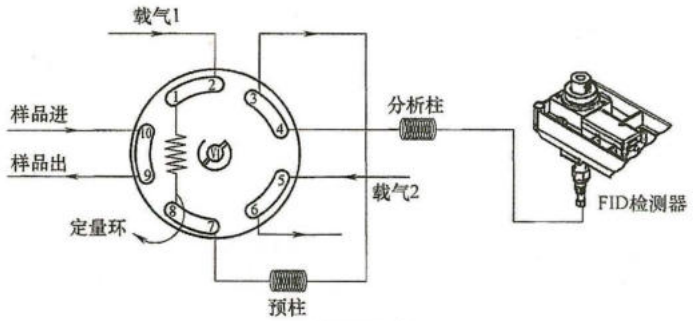
（2）色谱分离模块

以最常见的污染源在线色谱仪的色谱分离模块为例，在线色谱分析仪相比于实验室分析的最大优势在于其时效性，可以在较短的周期内实现样品的采集、进样和分析，更准确地反映样品气中待测物的实时浓度变化。这就要求系统实现高度的集成化，把原本分立的各个步骤及所需的工具整合至一个系统中；同时需要对分析流程进行优化，提高时间利用率，压缩分析周期至合理的时间范围。为实现上述目的，各厂商普遍采用了阀切技术，以常州某公司的 PGC-80/80Plus 款在线气相色谱仪的阀图为例，图 4-11 所示为其阀切技术原理。

十通阀是反吹法气路模块的关键。如图 4-11 所示，当十通阀处于状态 A 时，定量环和外部样品气连通，外部采样泵可将待测样品抽入定量环中，完成平衡后（恒压进样式），十通阀切换到 B 状态，定量环和色谱柱（预柱和分析柱）相连，载气 1 携带定量环内的样品



(a) 十通阀状态A



(b) 十通阀状态B

图 4-11 多组分 VOCs 在线色谱分析仪阀切技术气路原理示意图

进入色谱柱；在目标物质全部进入主分离柱后，十通阀再次切换回 A 状态，分析物依然在主分离柱中逐渐分离，并最终被检测器检测，此时定量环内正在刷新着实时的样品。当这个分析循环结束时，无需等待采样，即可立即进入下一个循环。常规监测因子，如非甲烷总烃，分析时长为 1 分钟，苯系物根据具体的因子，分析时长为 2～15 分钟。而在环境空气监测场合，由于吸附样品的时间较长，一般环境空气的分析时长为 10～60 分钟。

在图 4-11 中，常规的单色谱柱被拆分为预柱和分析柱两个部分，预柱短，分析柱长，分别与十通阀的不同接口连接。在十通阀的 B 状态，预柱可以使低沸点的分析物和一些高沸点的杂质得到适当的分离，当待测的低沸点化合物全部进入分析柱后，十通阀切换至 A 状态，载气 2 将仍留在预柱中的高沸点杂质反吹出去。这种反吹色谱技术不仅节省下了高沸点杂质流出色谱柱的时间，同时也避免了杂质对分析柱的污染，延长了色谱柱的使用寿命。此反吹技术在定量环和吸附解析模块场合都适用。

由于色谱分离本身需要一段时间，在线色谱对 VOCs 的响应速度介于传统实验室色谱法和光谱方法之间（通常为几分钟到一小时），但仪器的稳定性、结果的可靠性均优于其他在线方法。

（3）检测器模块

检测器模块通常为小型化的氢火焰离子化检测器（FID）和光离子化检测器（PID），也可配置质谱检测器（MSD）。PID 可以满足大部分 VOCs 的检测需求，灵敏度比 FID 检测器高 1～2 个数量级，检测限可达 ppt 级，但其也存在以下缺点：PID 对于整个 VOCs 监测来说，能监测的因子组分范围较窄；FID 可用于在 PID 中无响应的部分 VOCs 的检测分析；质谱检测器则可应用于组分多、成分复杂的痕量 VOCs 检测分析以及一些未知成分 VOCs 样品的定性分析等。

1）氢火焰离子化检测器（FID）

氢火焰离子化检测器（FID）对碳氢有机物响应十分灵敏，线性范围宽，稳定性强，而且结构简单、使用维护方便，已广泛应用于 VOCs 总量的监测，这一方法也被许多国外标准所采纳，如欧洲标准 EN 12619 以及美国标准 EPA Method 25A 等。

FID 基本原理如图 4-12 所示。试样和燃气氢气混合从喷嘴进入检测器，助燃气空气从四周导入，被测组分在氢火焰中燃烧解离成正负离子，在外加电场中，正负离子向各自相反的电极移动，形成的离子流被收集极收集、输出，经电路放大，便获得可测量的电信号。该信号的大小通常与被测组分的含量呈比例关系。FID 对几乎所有的有机物都有响应，只是对不同有机化合物响应的比例系数不同。通过校准确定比例系数，即可对未知浓度的样品进行定量。在测量多组分气体时，FID 无法分辨其中各组分的信息，得到的是以校准气体（如苯、甲苯）或碳质量为当量的总碳氢化合物含量。

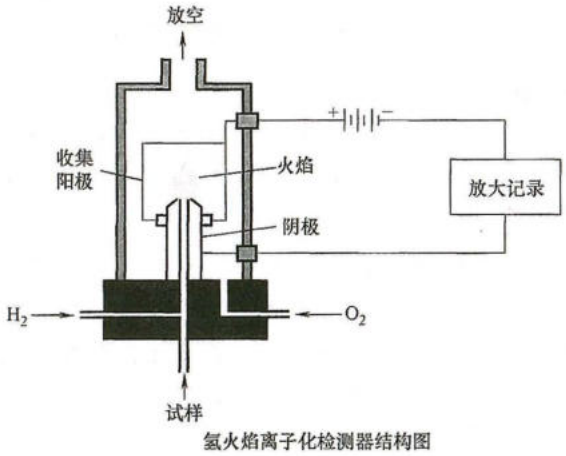


图 4-12　氢火焰离子化检测器结构示意图

烟气中的氧气对 FID 分析仪的零点和量程值会产生影响，必须用含有不同浓度的氧的混合校准气体确定样品气体中氧气的影响程度，由于排放气体中的含氧量总会与一系列不同含氧量的校准气体中的某一含氧量相近，因而能够消除排放气体中氧含量的影响。

为了防止热态湿烟气在 FID 分析仪中冷凝，通常会采用干燥样品气流或对整个分析系统加热等方式，保证 FID 分析的准确性。

FID 分析仪也可以测量非甲烷总烃含量，原理通常是在测定总烃含量之后，使样气通过另一个连接催化氧化转化炉的管路再到达检测器，样气中的非甲烷烃在转化炉中全被氧化成 CO_2，只有甲烷到达 FID 被检测，由此得到甲烷含量。总烃与甲烷含量之差即为非甲烷总烃的含量。

2）光离子化检测器（PID）

PID 由于体积小巧、无需辅助气体，是一种常用于便携式 TVOC 分析的检测器。其分析原理如图 4-13 所示。

PID 的核心部分是真空紫外灯和光离子化室。真空紫外灯产生特定能量的紫外光，将进入光离子化室内的气体中电离能低于紫外光能量的化合物分子电离成带正电的离子和带负电的电子。离子化室内的极化极和收集极之间有一电场，用于收集离子化后气体的正负电荷并将其转化为可被检测的微电流信号，该微电流信号与气体浓度成正比，经过放大和信号处理

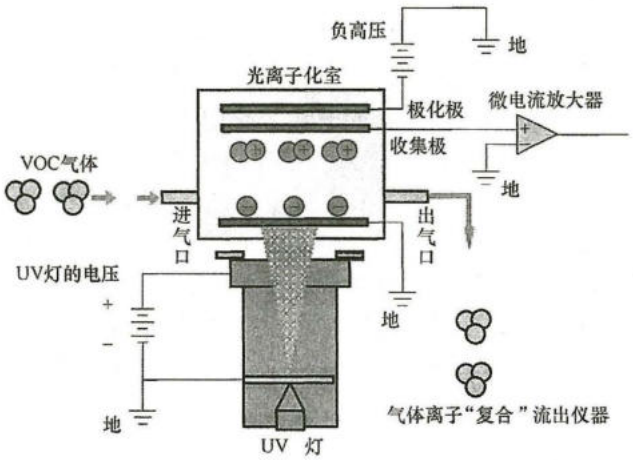


图 4-13 PID检测器分析原理示意图

后，即可实现气体浓度的测量。

PID能检测的物质种类和所使用的紫外灯光能量有关，通常便携式TVOC分析仪配备的光能量为10.6eV的紫外灯，已经能使大多数有机物和部分无机气体电离。

与FID类似，PID对不同化合物的响应系数也不同，信号值为所有组分的总响应，结果通常表示为指定VOC的当量浓度（类似以苯或甲苯计）。然而PID的响应特征和FID又有很大区别，它对大部分不饱和烃和卤代烃的响应灵敏度远高于FID，而对一些在FID中有良好响应的短链烷烃响应极低甚至无法检测，至今仍没有PID可以检测分析甲烷。

总的来说，PID响应的规律性、分析的稳定性均不及FID，这可能是现行检测标准中很少采用PID测量总挥发性有机物的原因。目前，PID检测器主要用于室内环境监测、应急监测、危险/泄漏气体预警、污染源追踪中TVOC含量的粗略估计计算等。

（4）接口模块与人际交互模块

接口电路模块通过4～20mA、RS485/232、网口以及GPRS实现该色谱仪与其他仪器或外部设备之间的数据及状态信息传输，实现同步的远程数据传输、高浓度报警和运行状态监控。人机交互模块通过显示屏和集成在色谱仪内部的工控机，方便工作人员在现场查看并处理数据，对色谱仪进行控制和维护。

4.3.1.3 气相色谱法VOC组分CEMS的安装调试要点

为规范环保现场工程师对烟气VOC设备的安装和调试，现场技术支持工程师必须参加公司的三级安全教育，还必须根据岗位特点，再进行生产技能和安全技术培训，并取得安全上岗证方可开展现场安装工作；进用户现场前需要参加用户安全管理部门的安全培训或主动了解安装要求，方可进入工程现场；进用户现场前需要了解用户的产品结构、危险区域、自觉遵守相关安全生产规章制度和劳动纪律，不违章作业；进入现场后必须佩戴防护用品，按安全操作规范进行工程实施；VOC分析小屋必须配备排风扇，防止氢气发生器泄露，爆炸的可能；如现场发现不符合安全规范的则必须立即停止施工，并向上级部门报告。

VOC现场安装调试主要参照标准：《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ75—2017。

（1）VOC采样探头及配套设备安装要点

1）采样点位选择

①优先选择垂直管段和烟道负压区域，垂直烟囱优先选择在烟囱的1/3处。

②对于颗粒物CEMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于4倍直径，和距上述部件上游不小于2倍直径处。

③对于气态污染物CEMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于2倍直径，和距上述部件上游不小于0.5倍直径处。

④对矩形烟道，其当量直径为：$D=2AB/(A+B)$，式中A、B为管道边长。

⑤环保验收对比孔应在烟气采样孔断面下游约0.5m处预留。

⑥当开孔位置无法以上要求时，测量点开孔需要由客户和环保检测部门共同确定。

2）平台部件安装要求

①采样探头法兰焊接时左右方向对中，尾部水平向上5°左右焊接。

②探头伸入管道长度一般以管道壁与法兰盘之间距离15～20cm为参考标准。

③采样探头和安装法兰之间充分密封。

3）电缆和气管安装要求

① 伴热管敷设原则是逐级降低，弯曲圆弧半径不能小于0.5m。

② 从采样探头开始，伴热管应以不小于5°的坡度向下倾斜至分析小屋。

③ 伴热管需要穿镀锌管或者桥架进行敷设，桥架弯头角度必须大于120°。

④ 伴热管进分析小屋之前必须作防水处理。

⑤ 伴热管安装需要预留1m，在端部加装防爆终端接头。

⑥ 根据工程安装包内相关资料确定各电源线、信号线的规格和长度，确定反吹气管、电伴热管的长度。

⑦ 电缆和气管应有效固定在桥架或线管中，走线不能太紧，防止热胀冷缩把线拉断，电伴热管应牢固可靠的固定或吊装在靠固的支架、物体、预埋件上。

⑧ 对每个接线端子穿上线号、压好接线鼻，以便后期查线维护。

⑨ 电缆铺设周围不能有干扰源存在。

⑩ 平台上信号线铺设必须要有保护套管（如金属软管）。

⑪ 电源电缆线和信号电缆线需分开走线。

⑫ 电缆走线需美观、整洁、扎带固定牢固。

⑬ 平台至仪表之间的电缆铺设必须要有保护措施（如桥架）。

⑭ 整个系统必须要有接地措施。

⑮ 各个部件有接地端子的都要求接地。

⑯ 按照系统安装指南要求对电缆和气管进行铺设安装。

（2）分析小屋的安装要点

1）考虑机柜的前后左右与墙壁要留有一定空间，保证能打开各自柜门，便于安装维护。

2）考虑机柜的摆放位置及考虑伴热管所需的安装长度及圆弧半径。

3）现场空压机出来的管路必须用无吸附无挥发气体的管子（如：PTFE，PFA，不锈钢）。

4）空气净化器需安装上自动定时排水阀，安装完成后先设置60min排水一次，排水间隔时间为3秒，可以根据仪表风调节，完成后需用测试按钮测试是否工作正常。

5）标气瓶需要制作支架来固定标气瓶，也可采用卡箍或软链拴住方式，或采用其他更安全牢靠的办法来固定标气瓶，如图4-14所示。

（3）VOC主系统安装调试要点

1）VOC主分析仪表安装调试要点

系统所有仪表安装结束、接线完毕，检查系统接线正确后，方可上电进行调试。

① 电源要求

仪器运行标准电压为220 V AC（210～230V AC），正常启动最大500W，连续使用为300W。通常仪器能在电网电压波动±10%之内正常工作，但是为了确保仪器在高性能下工作，最好电网电压波动要小于±5%、频率变化小于±1Hz和瞬间波动不超过±5V。

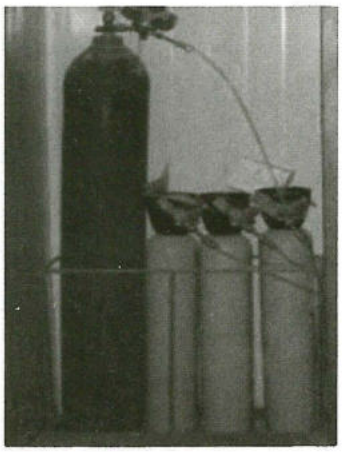


图4-14 标气瓶固定示意图

② 室内温度

a. 仪表应安装在带有空调的市内，室内温度控制在5～35℃。但从保证仪器良好性能考虑和操作安全讲，推荐使用温度15～28℃为好。

b. 建议不能在温度变化高于5℃/h的室内环境下使用，否则，可能得不到稳定的保留时间，进而影响化合物的定性定量。要避免把仪器安装在空调、暖气附近或风扇直吹的地方，避免安装在阳光直射的地方。

③ 相对湿度

环境相对湿度必须控制在20%～90%。一般仪器能在相对湿度小于90%的情况下正常工作，使用时应避免由于湿度和温差太大，在仪器上形成露珠或由于维修不当引起绝缘电阻（强度）减小，致使漏电流增加。为确保仪器安全和正常工作，建议环境相对湿度最好不要超过60%。

④ 减压阀

a. 钢瓶减压阀必须达到气相色谱的要求：必须无尘，不会吸附或排出碳氢化合物。

b. 对于载气、氢气和空气，可使用镀镍带钢膜的黄铜减压阀。

⑤ 载气

a. 载气气压在350～500kPa，推荐采用400kPa，当端口压力小于300kPa时，仪器可能无法正常工作。

b. 载气可选用零级空气或者氮气。

c. 如使用零级空气作为载气，则甲烷柱和总烃柱均无氧峰出现，无需进行氧峰扣除。

d. 如使用氮气作为载气，则甲烷柱和总烃柱均需进行氧峰扣除。

e. 除指定外，所使用的氮气必须达到气相色谱的质量要求（5.0个标准或更高）。一般建议在满足分析要求的前提下，尽可能选用纯度较高的气体。这样不但会提高仪器的灵敏度，而且会延长色谱柱和整台仪器（气路控制部件、气体过滤器等）的寿命。

⑥ 校准气体

校准气体通过1/8″不锈钢管、铜管、FEP或PTFE管，连接到校准气体入口。校准气的气压要求稳定在300kPa，标气打开前应采用保压法进行检漏，以免消耗过快。对于校准气体，必须选用高质量钢膜的不锈钢减压阀，且不同校准气体减压阀不可混用。

2）零气发生器（图4-15）

① 客户提供仪表风

进零气发生器AQMS-100的仪表风压力必须要大于0.4MPa且小于0.5MPa，且仪表风

是干燥、洁净的。排水口针阀需打开，氧化剂与活性炭 6 个月更换一次。



图 4-15　零气发生器

② 若客户不提供仪表风

零气发生器用自己配套的空压机（图 4-16），注意电子定时排水阀必须要接，同时需按 TEST 进行测试，设置成 30 分钟排水一次，每次排水 2 秒，同时排水的针阀需打开。



图 4-16　空压机

3）氢气发生器（图 4-17）

① 加电解液

取出随机所带氢氧化钾（优级纯）一瓶（100g）倒入电解液桶，然后加入 1000mL 蒸馏水或去离子水，充分搅拌：

a. 加电解液时应观察前面板液位管，既不要高于上限液位也不能低于下限液位，电解液液位管，液位需在上下限之间，大概 1～2 个星期加一次纯净水，6 个月更换一次电解液。

b. 加完 1000mL 电解液后，如发现液位管内无显示，可轻轻晃动机箱，使电解液进入液位显示管内，每次加水尽量靠近加到液位上限。

c. 电解液如不小心溅落在机箱上或工作台时应迅速用湿布擦拭干净，以免污损机箱。

② 氢气发生器自检（不要与色谱仪联机）

氢气发生器在与色谱仪联机前必须通过自检，主要是检验通过运输后仪器系统工作是否正常，若有问题应将故障排除或打电话求助。

自检方法如下：

a. 打开仪器电源开关，红灯亮同时电解制氢绿灯亮，观察电解池筒内电解液开始产生气泡。

b. 检查排空阀是否关紧，检查氢气出气口螺母是否拧紧，检查过滤器上盖是否拧紧，确保仪器有良好的密封性。

c. 观察氢气流量显示应在 500～550；力表指针开始缓慢上升，2～3min 可达到 0.4MPa 左右处（备注：仪器刚启动时流量显示有可能低于 500，但预热 20min 后即可正常）。

d. 当压力指示上升到 0.4MPa 时，流量显示由 500 左右逐渐降至 000，证明仪器整机密封性良好，系统正常，到此氢气发生器自检合格。

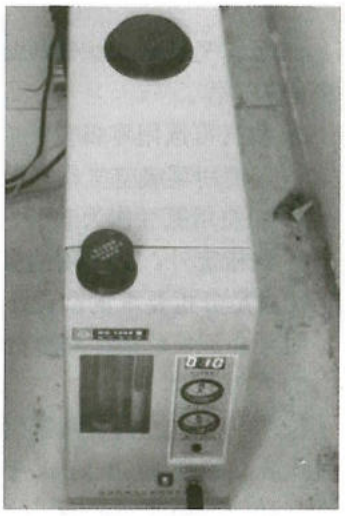


图 4-17　氢气发生器

③ 系统检漏

连上分析仪后，不打开分析仪软件，用上述同样方法进行操作检漏，如果流量逐渐降为000，说明管路气密封良好，否则管路漏气情况，需进行排查漏电。

④ 电解液的补充及更换

a. 氢气发生器所用电解液对水质有严格要求，需用去离子水或二次蒸馏水。如用其他水配置的电解液则会严重影响产氢质量。

b. 电解液的正确配比为 1∶10，即 100g 氢氧化钾（优级纯）与 1000mL 去离子水或二次蒸馏水进行配比。

c. 电解液液位管设在仪器前面板，液位管上设有二道红线，上红线为上限水位线，下红线为下限水位线。加液时既不能高于上限水位线，也不能低于下限水位线。如电解液长期处在下限水位以下或无液状态下工作，则会严重损坏仪器。

d. 仪器在长期使用过程中，电解液因蒸发而逐渐减少，当电解液接近下限（下红线）时，应及时补充蒸馏水。

备注：如果每次按配比补液，则会使电解液浓度增大，严重时将造成仪器中液路或气路堵塞，而导致仪器不能正常工作。

e. 当仪器运行很长一段时间之后（大概 1 年），并观察到电解液变得非常浑浊时，则需按配比重新更换电解液，其方法如下：

（a）关闭仪器电源开关。

（b）打开储液筒上盖，用吸耳球（随机带）将电解液从储液筒内吸出。

（c）倒入 500mL 蒸馏水进行冲洗后吸出倒掉。

（d）将新配置的电解液倒入储液筒内，盖好上盖即可。

备注：每次加液时，需要小心，若电解液溅在机箱上或工作台时应及时用湿布擦拭干净，以免污损。

⑤ 与分析仪的连接

氢气发生器与分析仪的连接接头处需用卡圈连接，确保密封。

4.3.2 傅里叶红外法

基于傅里叶红外法的 VOCs 组分 CEMS 系统安装要求，参照《固定污染源废气非甲烷总烃连续监测系统技术要求及检测方法》HJ 1013—2018，对于样品采集与传输单元，预处理单元，数据采集和传输设备要求等。但是针对 FTIR 原理的 CEMS 系统在分析仪及辅助设备与其他原理有差异，具体的要求如下：

（1）分析仪要求

1）分析仪测量池温度控制在 120℃以上，确保高沸点的组分不出现冷凝。

2）利用高纯氮气或者氮气发生器对分析仪进行零点标定和吹扫。

（2）辅助设备要求

1）FTIR 原理的 CEMS 系统尾气排放管路应敷设规范，不应随意放置，防止排放尾气污染周围环境。

2）当室外环境温度低于 0℃时，CEMS 尾气排放装置应能确保排放尾气中的水分不冷凝累积甚至结冰，不会造成尾气排放管路堵塞和排气不畅，必要时应配套加热或伴热装置、气液分离装置等设施。

3）应配备定期自动反吹装置，用以定期对样品采集装置等其他测量部件进行反吹，避免出现由于颗粒物等累积造成的堵塞状况。反吹过程应对测量不会产生影响。

4）机柜内应具备良好的散热装置，确保机柜内的温度符合系统正常工作温度；应配备照明设备，便于日常维护和检查。

（3）校准功能要求

1）应能用手动和或自动方式进行校准。

2）应具备固定的和便于操作的标准气体全系统校准功能。

3）校准时应尽量使用与样气组分比例一致的标气来校准。

4.4 日常运营要点

4.4.1 运营要点

4.4.1.1 日常维护

（1）检查监测房内各类设备布线牌类整洁，保持室内清洁。

（2）检查巡检记录是否填写完整。

（3）检查分析仪小屋空调是否开启，室内温度保持在20℃～30℃，排风扇是否正常运行。

（4）检查伴热管温度和采样探头温度是否在设定值±5℃。

（5）检查零气发生器出口压力是否在0.45MPa±0.05MPa。

（6）检查分析仪有无报警。

（7）检查氢气发生器电解液液位是否在上下限之间，应及时补充纯净水，控制压力在0.2～0.4MPa。

（8）检查冷凝器温度是否在4.0℃±1.0℃，蠕动泵是否有正常排水，冷凝水桶是否定期倒掉。

（9）检查工控机数据通信是否正常。

4.4.1.2 定期维护

（1）每隔1个月清理工控机和分析仪散热风扇表面的灰尘。

（2）每隔2个月更换氢气发生器变色硅胶（蓝色变成粉红色为失效），每隔6个月按配比重新更换电解液。

（3）氢气发生器每周加一次纯净水，确保液位在上下限之间，观察氢气流量变化(20±10)。

（4）每隔6个月更换零气发生器的活性炭和NO氧化剂。

（5）每隔1周检查仪表风气源，确保无油、无水。

（6）每隔3个月清洗压缩机的空气过滤器、机柜内部过滤器和探头过滤器。

（7）泵管每6个月更换一次。

（8）每隔1个月对分析仪进行标定。如测空气谱线正常，可以放宽到3个月标定一次。

（9）每年检查仪表的硬盘空间是否大于5G，如不足可以将前期数据拷贝出来。

4.4.2 常见故障与排除

4.4.2.1 预处理腐蚀问题

问题描述：

（1）采样探头腔体内出现腐蚀。

（2）伴热管线内不锈钢管进口处有腐蚀的小孔，与伴热管线内不锈钢管出口相连的二级

过滤器里面有黑丝锈迹的粉末，如图 4-18 所示。

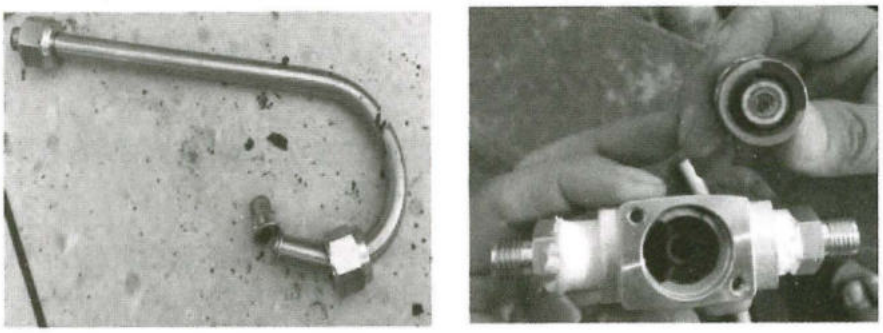


图 4-18 预处理的腐蚀

原因分析：

将黑丝锈迹的粉末样品进行分析确认是 316SS 材质。探头加热温度 140℃，与探头相连的伴热管内的不锈钢管约 10cm 处没有进行保温，烟气中水分和酸性物质在此处冷凝将不锈钢管腐蚀。

解决方法：

将探头温度升至 180℃，确保经过探头后的烟气中没有冷凝水。探头与伴热管线相连处用保温棉进行保温，确保不会有水分冷凝。将伴热管线中的不锈钢管更换成氟塑料管，防止不锈钢管被腐蚀。

4.4.2.2 VOCs 伴热管挥发问题

VOCs 设备主要监测物为甲烷、非甲烷总烃及苯系物等有机物，对伴热管线要求在加热采样的过程中不能存在挥发性有机物，否则会影响数据偏差，但目前市面上所有国产四氟管材料在加热采样过程中均会存在挥发性有机物。

普通四氟型伴热管具有耐腐蚀、耐高低温、安装方便等优点，但容易产生有机物等杂质的挥发，导致测量误差。

不锈钢管型伴热管虽无挥发物产生，但安装困难，导电性强导致安全性低，不宜使用在防爆场所，且不耐腐蚀，不宜长期使用。

聚光科技特制四氟材料伴热管：选用特制四氟材料（PTFE），该材料在伴热管加热采样过程中无挥发性有机物释放，保证了 VOCs 正常运行，同时能满足耐腐蚀性、安装弯曲、绝缘性问题。

效果：普通 PTFE 在生产过程中会添加溶剂油，溶剂油是有机物产生的主要来源，生产完毕后，该溶剂油仍有部分残留在四氟管内部，随着加热会慢慢释放；而特制四氟材料在生产过程中重新选择了材料配方和改性材料，生产工艺中加入了高温程序，在生产成型后，该材料内含的溶剂油基本挥发完毕，从而达到无有机物挥发的效果。

4.5 喷涂行业总量和组分监测应用案例

CEMS-V100 型污染源挥发性有机物在线监测系统由采样系统、烟气参数采集系统、分析系统、气源系统等组成。该系统性能稳定可靠、结构紧凑、集成化程度高。可测量废气中非甲烷总烃（NMHC）、苯系物（BTEX）、VOC 特征因子等多种挥发性有机物。另外根据现场工况需求，仪器提供定制化防腐采样探头、防爆采样探头以及防爆分析仪等。

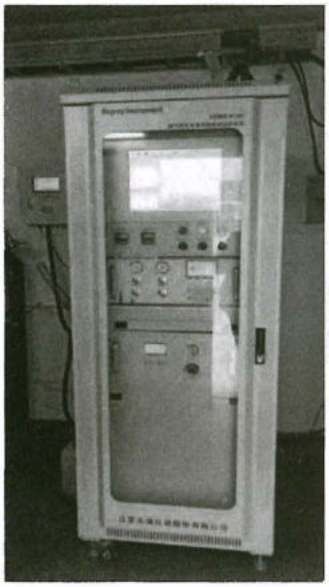


图 4-19　CEMS-V100 污染源挥发性有机物在线监测系统现场安装图

主要技术参数如下：重复性：RSD≤2%；线性误差：≤±2%F.S；零点漂移：≤±2%F.S/24h；量程漂移：≤±1%F.S/24h；进样流量变化：±2%F.S；准确度：≤3%（标气）。

4.5.1　污染源挥发性有机物在线监测系统在扬州某喷涂企业的应用

扬州市某喷涂企业，该企业主要对生产的集装箱、物流装备、专用车进行室内喷漆作业，治理末端工艺为沸石转轮＋催化氧化。废气主要来源于喷涂、干燥过程，所排放的污染物主要为：喷涂时产生的漆雾和有机溶剂以及干燥挥发时产生的有机溶剂，其主要的污染物为非甲烷总烃、二甲苯、苯、甲苯。污染源挥发性有机物在线监测系统安装在生产车间总排口，共计 5 套，该系统测量原理为气相色谱-氢火焰离子化检测器技术（GC-FID）。以非甲烷总烃作为挥发性有机物综合性控制指标，苯系物作为特征污染物，污染物分析色谱图见图 4-20。

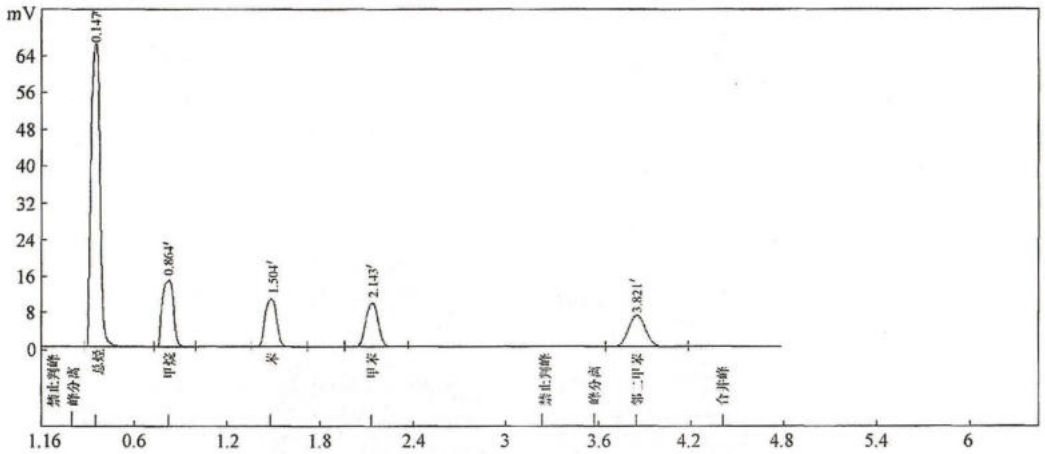


图 4-20　非甲烷总烃、苯、甲苯、二甲苯色谱图

现场由于现场烟温低、烟气湿度大，皮托管外部结构腐蚀严重，甚至出现了穿孔现象如图 4-21 所示。经过初步优化将皮托管材质改为 316 不锈钢，并在外部喷涂耐温聚四氟乙烯

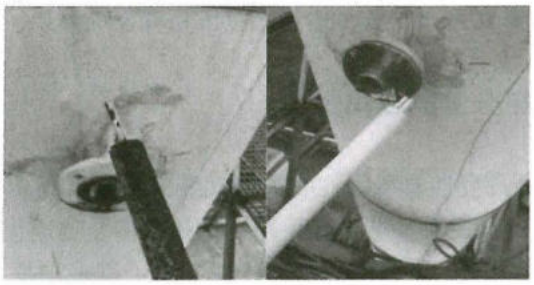


图 4-21　扬州某喷涂厂皮托管腐蚀问题

防腐层，在现场试运行一段时间后，效果不佳，皮托管外部结构仍然存在腐蚀现象。最后，将皮托管材质换为聚四氟乙烯材质，皮托管在现场使用半年后，没有发现腐蚀现象。

4.5.2 案例

主要技术参数如下：

重复性：≤1%；

线性误差：不超过±2%F.S；

零点漂移：不超过±1%F.S/24h；

量程漂移：不超过±2%F.S/24h；

进样流量变化：不超过±0.5%F.S；

氧气的影响：不超过±1%F.S。

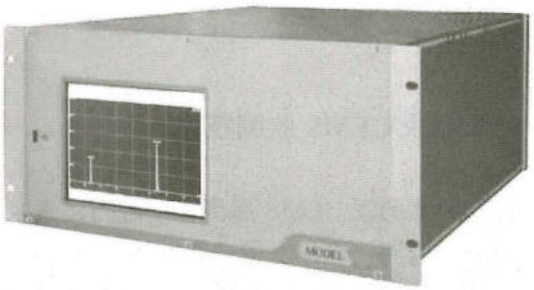


图 4-22 MODEL 6000 色谱仪

江西省某大型有机硅生产企业，该企业主要生产有机硅单体及有机硅下游产品，治理末端采用焚烧炉燃烧和喷淋处理。废气主要来源于有机硅单体分馏冷凝过程，所排放的污染物主要为非甲烷总烃，其监测的污染物为非甲烷总烃、苯、甲苯、二甲苯。生产车间总排口安装 SCS-900VI 型挥发性有机物在线监测系统，该系统使用 MODEL 6000 色谱仪（图 4-22），测量原理为气相色谱-氢火焰离子化检测器技术（GC-FID）。

现场烟温低、烟气湿度大，色谱排气后气体出现冷凝，堵塞后端接头，导致排气不畅，见图 4-23。经分析是由于废气经高温燃烧后再经喷淋处理，废气含水量较高，废气烟温为 37℃，经全程 120℃伴热测量后，废气排出色谱，处于 26℃室温下，降温后出现水和污染物的冷凝导致。经过优化将色谱后端管路采用自限温伴热带进行保温处理，废气排入储液罐。经半个月运行，色谱后端再无堵塞问题。

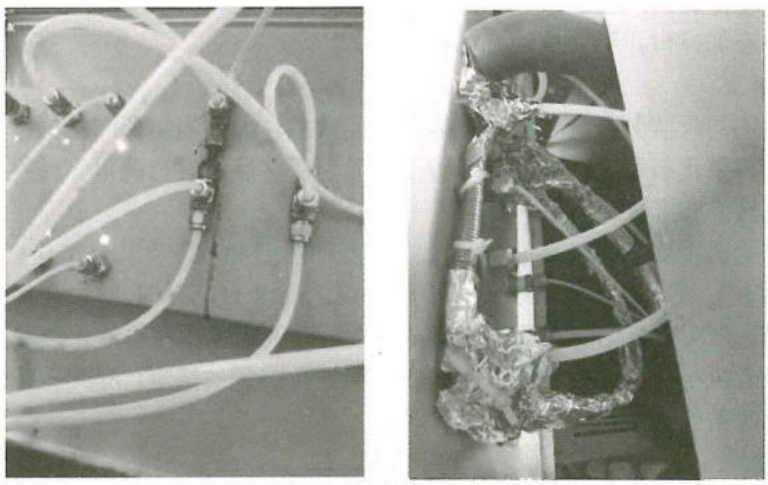


图 4-23 江西某有机硅生产厂出现的尾气冷凝问题

第 5 章　气态汞 CEMS

5.1　气态汞 CEMS 监测技术

现有技术的汞 CEMS 都是直接监测元素汞，而氧化态汞则通过转化系统还原成元素汞的形态进行监测。理论上颗粒态的汞也可以被转化，但由于管线传输及烟尘等颗粒物的潜在干扰，使实际操作有很大的困难；而且烟气中颗粒态汞易通过除尘工艺脱除掉，而气态汞则会随气体排入大气环境中形成环境污染。现阶段的汞 CEMS 中包括颗粒物过滤子系统（在此过程中颗粒态汞也会被过滤），因此通常意义的总汞连续监测其实只是针对气态总汞的排放浓度和排放量进行自动连续监测。

5.1.1　基本结构及分类

固定污染源烟气中气态汞排放连续在线监测系统（Hg-CEMS）的组成包括采样系统（采样探头、加热系统、过滤器等），转换装置，传输系统，汞分析仪，校准单元，数据采集及传输单元等。

5.1.1.1　采样系统

取样方法通常分为稀释抽取采样法和直接抽取采样法。采样探头材质可采用不锈钢或涂覆石英的镍基合金 C276 等。部件加热可达 250℃。探头内过滤器有效去除烟气中的颗粒物避免对 Hg-CEMS 分析仪测量造成影响。Hg-CEMS 可配置稀释探头或配置惯性分离探头。采样探头具备动态加标口，可完成动态加标测试。

5.1.1.2　转换装置

目前广泛使用的汞监测分析方法均只能分析元素汞，因此当需要测量样品中总汞时，必须利用转换装置将氧化态汞（二价态汞）转换为元素汞，然后进行测量。转换方法有高温裂解转换、热催化转换和湿式化学法转换等。

高温裂解转化法主要是将采集的烟气温度升温加热到 800℃及以上，甚至达到 1000℃，这时烟气中的 $HgCl_2$ 受高温作用，会发生裂解反应，生成 Hg 及 Cl_2，配合稀释采样可有效防止还原后的 Hg 再次被氧化的问题。使用高温裂解转换装置和高温催化装置一样，一般安装在探头内部或者机柜内，在安装调试时需要确保转化装置的温度大于等于 800℃，使之达到离子态汞转换的条件。

5.1.1.3　传输系统

气体传输系统指连接取样探头、转换器、样品处理设备和分析仪的气体传输伴热管线，伴热管内应同时包覆有反吹气管（用于清洁探头）和校准气管。烟气经过采样探头采样，经转换装置进行转化，然后通过伴热管线将样气直接输送到分析仪的前处理部分，伴热管线一般加热恒温至 180℃。由于 Hg^{2+}（如 $HgCl_2$）易溶于水，且 Hg^{2+}、Hg^0 均易被吸附，伴热管线应采用特氟龙等材料，有效防止汞的吸附及管道腐蚀的发生。不同系统的样气预处理单元差别较大，有些系统先经过气水分离器，将样气的温度降至室温，除水后样气体经过二

次过滤器过滤后进入分析仪单元分析；有些则是在高温不脱水的情况下通过二级过滤后直接进入分析单元进行分析。

为了防止烟气中烟气汞在传输过程的损失对测量结果的影响，其传输管道需要进行全程伴热处理，伴热管截面如图 5-1 所示。

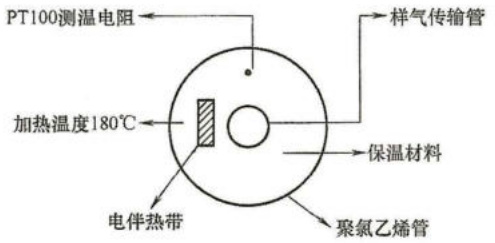


图 5-1 伴热管线截面示意图

5.1.1.4 汞分析仪

Hg-CEMS 分析仪器一般测量的是元素汞，汞的监测分析方法主要包括冷蒸气原子吸收光谱法（CVAAS）、冷蒸气原子荧光法（CVAFS）、金汞齐富集 CVAAS 和 CVAFS 法、塞曼分光 CVAAS、差分吸收光谱法（DOAS）等。

5.1.1.5 校准单元

分析仪校准方式有两种：一种是使用元素汞标准气体。汞标气制备技术要求较高，据了解仅有美国的个别公司具备生产能力，因此其价格比较昂贵，且汞标气的有效使用寿命较短（一般最多 6 个月），购买周期长；这对在线监测设备来说不仅成本太高，而且使用很不方便。另一种则是利用元素汞和离子汞发生校准装置。元素汞发生器一般是利用汞在恒温（精确到 0.01℃）条件下的饱和蒸汽稀释的原理进行不同浓度汞标准气体的配制发生；常见的离子汞发生器是利用高纯的 $HgCl_2$ 液体定量抽取后高温雾化，与高纯氮气混合配制不同浓度的离子汞标准气体，然后通过转换装置转换成 Hg^0，实现对分析仪表和系统进行校准；也有特殊的 $HgCl_2$ 发生器是通过元素 Hg 与氯气 Cl_2 直接发生化学反应生成 $HgCl_2$ 来完成离子汞的发生校准。

使用汞发生器的校准方式由于其操作方便、稳定可靠且成本较低，目前在各种 Hg-CEMS 仪器中应用较多，只是有些仪器仅配置了离子汞发生器，有些仪器元素汞和离子汞发生器都有配置。

5.1.1.6 数据采集及传输单元

数据采集系统是连续排放监测系统的数据核心，实现数据采集、存储、传输，形成报表等功能，并将监测数据上传到生态环境部门的监控平台。

5.1.2 常用分析技术

目前固定污染源烟气汞分析方法原理均是对元素汞进行测量，常用的汞的监测分析方法主要有：冷蒸气原子吸收光谱法（cold vapor atomic absorption spectrometry，CVAAS）、冷蒸气原子荧光法（cold atomic fluorescence spectrometry，CVAFS）、塞曼分光原子吸收光谱法（zeeman atomic absorption spectrometry，ZAAS）和紫外差分吸收光谱法（UV differential optical absorption spectroscopy，UV-DOAS）。

5.1.2.1 冷蒸气原子吸收光谱法（CVAAS）

原子吸收光谱（AAS）是基于自由原子吸收光辐射的一种元素定量分析方法。即被测元素的基态原子对由光源发出的该原子的特征性窄频辐射产生共振吸收，其吸光度在一定浓度范围内与蒸气相中被测元素的基态原子浓度成正比。

AAS 是目前痕量汞分析应用最广泛的检测方法之一，尤其是冷蒸气原子吸收分光光谱法（CVAAS），它极大地提高了汞测量分析的灵敏度，是目前汞分析中主要和普及的方法之一。CVAAS 是通过汞灯光线强度的减弱来检测汞的浓度。入射光源是汞灯，当分析样气

中的汞离子还原成自由原子时，由于蒸气相中的基态原子在汞特征电磁辐射 253.7nm 波长处的吸收，汞灯强度的减弱和样品中汞的浓度满足正比例关系。其典型结构为：汞放电灯通过吸收池，利用光电倍增管或光谱仪连续监测透射光强。CVAAS 法测量原理如图 5-2 所示。

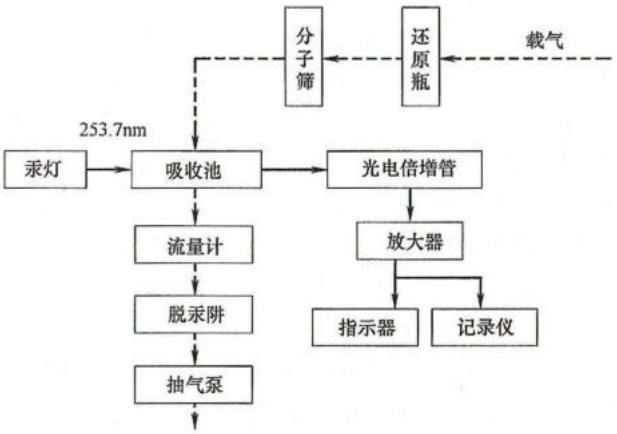


图 5-2 冷原子吸收光谱法测汞工作原理示意图

5.1.2.2 冷蒸气原子荧光光谱法（CVAFS）

原子荧光光谱（AFS）的基本原理是基态原子（一般蒸气状态）吸收合适的特定频率的辐射而被激发至高能态，由高能态回到基态时，会发射出特征波长的荧光，而荧光强度在一定范围内与汞的浓度成正比。通过测量待测元素的原子蒸气在辐射能激发下产生的荧光发射强度，来确定待测元素含量的方法。

冷蒸气原子荧光光谱法（CVAFS）测汞采用汞灯作为辐射源，当汞蒸气通过样品池时，样品中的汞原子接受由低压汞灯发出波长为 253.7nm 的激发光照射，基态汞原子被激发到高能态，当返回到基态时辐射出荧光，由光电倍增管测量产生的荧光强度，通过计算得到汞的浓度，其测量原理如图 5-3 所示。

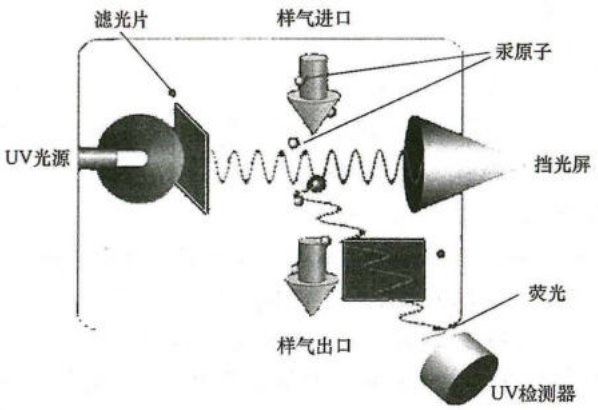


图 5-3 冷原子荧光法测汞工作原理示意图

CVAFS 监测分析方法前端可以采用金膜富集齐化汞，形成金汞齐，解附后被载气（氩气）带入检测单元，检测单元中的汞原子被脉冲汞放电灯激发出荧光，荧光强度被光电倍增管监测。激发态汞原子与无关质点如 O_2、CO_2、CO 和 N_2 等碰撞，会发生能量传递而造成

荧光猝灭，从而导致汞的测量灵敏度降低。相比而言，CVAFS 法比 CVAAS 法灵敏度高，但仪器不够普及。

5.1.2.3 塞曼分光原子吸收光谱法（ZAAS）

（1）塞曼效应原理和模式

塞曼效应校准是 1896 年荷兰物理学家塞曼（P. Zeeman）发现的。塞曼效应是指在磁场作用下，原子发射线或吸收线发生分裂和偏振化，其实质是原子内部能级发生裂解。从不同方向观察塞曼效应是不同的，对于正常塞曼效应，垂直于磁场方向观察到 3 条具有线偏振的谱线，谱线的波数分别为 $\nu+\Delta\nu$，ν，$\nu-\Delta\nu$，其中 $\Delta\nu$ 称为塞曼分裂的裂矩，$\Delta\nu$ 与磁场的磁感应强度成正比。位于中间波数未变化的谱线，其电向量的振动方向平行于磁场方向，称为 π 成分。其他两条谱线的波数变化分别为 $+\Delta\nu$ 及 $-\Delta\nu$，其电向量的振动方向垂直于磁场方向，称为 $\sigma^{\pm}$ 成分。垂直于磁场方向所观察到的现象称为横向塞曼效应。平行于磁场方向观察到波数分别为 $\nu+\Delta\nu$ 和 $\nu-\Delta\nu$ 的两条圆偏振光，前者沿顺时针方向偏振，后者沿反时针方向偏振。平行于磁场方向所观察到的现象称为纵向塞曼效应。

1969 年由普尔格（M. Prugger）和托尔格（R. Torg）提出塞曼效应校正背景法。塞曼效应应用于原子吸收光谱仪，磁场可以有不同的调制与排列方式。利用塞曼效应校正背景从原理上可分为光源调制法与吸收线调制法两类，每一类又可细分为四种不同的模式，共有 8 种不同的调制模式，见表 5-1。

塞曼效应校正背景的调制模式　　表 5-1

调制方法	光束方向平行于磁场	光束方向垂直于磁场
光源调制法	（Ⅰ）$\sigma^{\pm}$ 旋转检偏器调制模式	（Ⅲ）π、$\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式
	（Ⅱ）无偏振和 $\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式	（Ⅳ）无偏振和 π、$\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式
吸收线调制法	（Ⅰ）$\sigma^{\pm}$ 旋转检偏器调制模式	（Ⅲ）π、$\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式
	（Ⅱ）无偏振和 $\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式	（Ⅳ）无偏振和 π、$\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制模式

注：光源调制法又称直接塞曼调制法；吸收线调制法又称反塞曼调制法。

（2）塞曼效应校正背景的方法

1）无偏振和 $\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制法

这种校正背景的方法是在原子化器上加一交变磁场，光源发射光束方向平行于磁场，观测的是纵向塞曼效应信号，检测不到 π 组分。当不通电时，与通常的原子吸收光谱分析一样，光源发射线既为分析原子吸收，又为背景吸收，测定的吸光度是两者的吸光度之和。

2）π、$\sigma^{\pm}$ 偏振交替调制法

此种校正背景法又称旋转检偏器调制 π 线法，是在原子化器上施加一永久磁场，光源发射光束方向垂直于磁场方向，检测的是横向塞曼效应信号。在磁场作用下，共振吸收线分裂为 π 与 $\sigma^{\pm}$ 组分，用旋转检偏器将 π 和 $\sigma^{\pm}$ 两相互垂直的线偏振发射线通过组分分开，π 组分平行于磁场方向，$\sigma^{\pm}$ 组分垂直于磁场方向。光源的共振发射线通过旋转检偏器变为偏振光，频率和传播方向未变，同一时刻平行于磁场方向的偏振组分通过原子化器，与共振吸收线的 π 组分方向一致，π 组分与背景对其产生吸收，测定分析原子与背景吸收的总吸光度。紧接着在另一时刻垂直于磁场方向的偏振组分通过原子化器，与共振吸收线的 π 组分波长相同，因为光的吸收是矢量关系，偏振方向不同的 π 组分对其不产生吸收，而背景吸收与发射偏振化方向无关，仍对其产生吸收，测得背景吸收的吸光度。

（3）塞曼冷原子吸收技术

塞曼冷原子吸收技术：光源（汞灯）放置在恒磁体 H 内，汞的共振线 $\lambda=253.7$nm 分裂成三个极化的塞曼组分（π，σ^-，σ^+）。当光线沿磁场方向传播时，只有 σ 组分到达检测器。其中只有 σ^- 落入汞的吸收线轮廓内，σ^+ 落在吸收轮廓外。当样品池中不存在汞蒸气时，到达检测器的 σ 组分光强度相等。当样品池中存在汞蒸气时，σ 组分光强度的差值随汞蒸气浓度的增加而增加。σ 组分被偏振调制器分离。σ 组分的光谱位移显著小于分子吸收带和光谱散射的宽度，背景吸收在 σ 组分上的吸收是等量的，分析仪读取 σ 组分的差值，直接扣除背景干扰。其原理如图 5-4 所示。

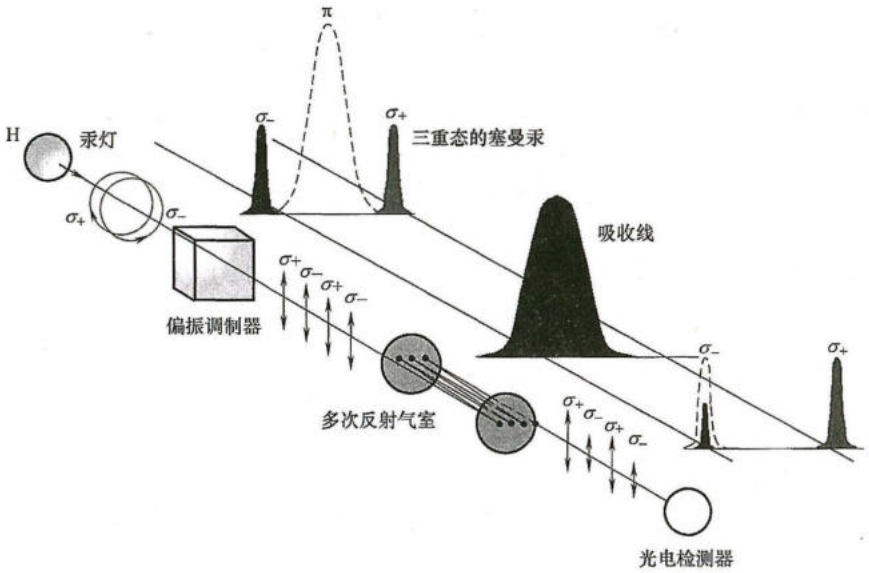


图 5-4 塞曼冷原子吸收测汞原理图

5.1.2.4 紫外差分吸收光谱法

DOAS 技术主要是以大气中的痕量污染气体对紫外和可见光波段的特征吸收光谱为基础，通过特征吸收光谱鉴别大气污染气体的类型和浓度，因此适用于在该波段有特征吸收的气体分子。

DOAS 是基于痕量气体分子的窄带吸收特征的检测。吸收的光强度遵守 Lambert-Beer 吸收定律，同时要考虑散射对测量的影响，如考虑瑞利散射（Rayleigh）、米散射（Mie）的影响。

各种气体在不同的光谱波段都具有自己的特征吸收光谱，比如元素汞 Hg^0 在 253.7nm 附近有很强的吸收。紫外差分吸收光谱法基本原理见图 5-5。

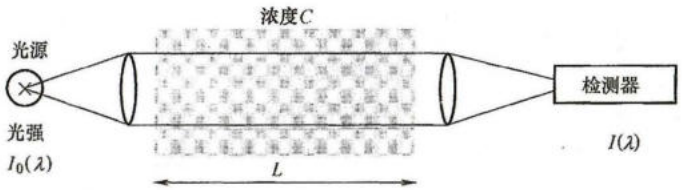


图 5-5 测量气体吸收光谱基本原理

由于在实际测量烟气时，烟道内成分复杂，各种烟气成分对光均有不同的吸收作用，当监测某种气体成分时，其他组分的气体的吸收必然会对准确测量被测对象产生干扰作用。

差分吸收光谱法采用的是分子的窄波段吸收技术，不是在某一个波长上测量总的光吸收

强度，而是在一定的波长间隔内利用差分吸收原理进行测量。这样最大限度减少各种因素如被测试样中颗粒物、水蒸气以及光谱传送等对分析结果的影响。

其原理如图 5-6 所示。

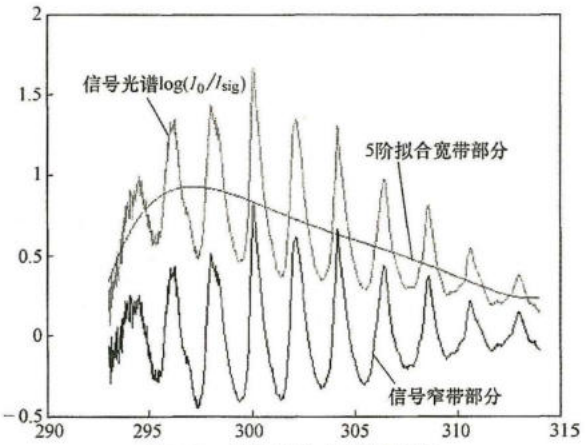


图 5-6 差分吸收光谱原理图

差分吸收光谱连续监测系统工作流程：高功率氙弧发射光源发射紫外可见光，然后经过凸透镜扩散为能量均匀的平行光束通过充满被测试试样的测量室，在测量室的另一端利用另一个凸透镜将接受光谱聚焦，由于气体分子作用，接受光谱与发射光谱相比产生能量损失，这样可以用紫外可见光谱仪将被吸收后的光谱进行采集。

5.2 气态汞 CEMS 安装调试要点

Hg-CEMS 的安装与常规 CEMS 要求大部分相同，需要注意一些安装细节及注意事项存在一定差异。

5.2.1 采样位置的要求

应优先选择在垂直管段烟道和烟道负压区域的总排气口。测定位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。对于气态污染物，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于 2 倍烟道直径，以及距上述部件上游方向不小于 0.5 倍烟道直径处。对于矩形烟道，其当量直径 $D=2AB/(A+B)$，式中 A、B 为边长。当安装位置不能满足上述要求时，应尽可能选择在气流稳定的断面，但安装位置前直管段的长度必须大于安装位置后直管段的长度。

检修平台应有足够的工作面积使工作人员安全、方便地操作。平台面积应不小于 1.5m^2，平台外边缘到管道外壁的距离不得小于 1300mm，护栏高度不得小于 1200mm（图 5-7、图 5-8）。

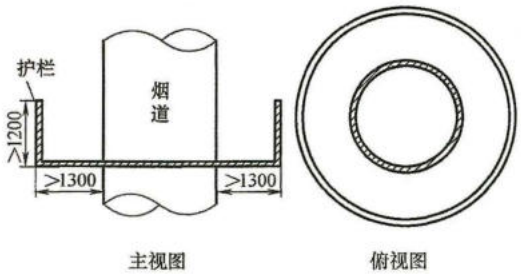


图 5-7 适应烟囱的检修平台

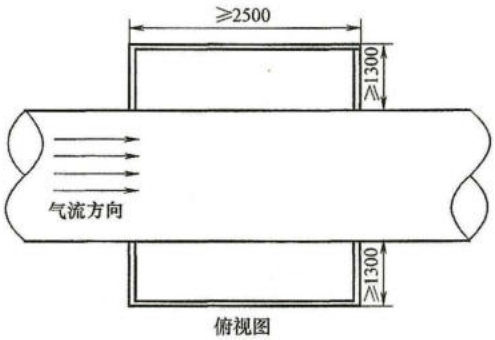


图 5-8 适应烟道的检修平台

在 Hg-CEMS 监测断面下游应预留参比方法采样孔，采样孔数目及采样平台按《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB/T 16157—1996 要求确定，以供参比方法测试使用。在互不影响测量的前提下，应尽可能靠近。

5.2.2 采样探头的安装和调试

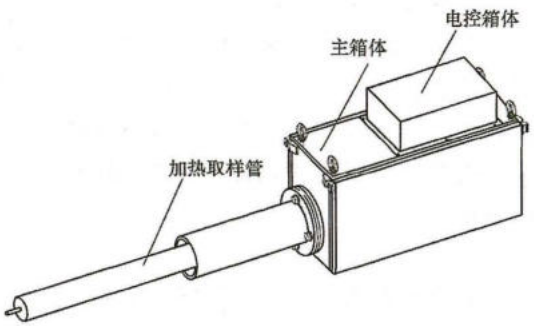


图 5-9 加热取样管与采样探头

首先检查探头表面是否有损伤，电源线和温度线是否有破损，用万用表量温度传感器的每根线缆对外壳电阻是否正常，分别检查探头加热器的“L”“N”和汞价态转换器加热器两端电阻是否满足要求。

如果一切正常，先指导用户焊接安装法兰。采样探头法兰焊接时，左右方向对中、尾部水平或稍向下倾斜焊接。探头法兰焊接好后，法兰与管道壁连接处应作密封处理，这样可以防止空气进入管道从而影响 Hg-CEMS 系统检测的准确性。

采样探头是系统采样部分的重要组成部分。在采样探头调试过程中，主要有反吹调试、加热功能调试、主回路流量测试几个方面的调试，调试过程如下：

5.2.2.1 反吹调试

探头反吹一般分为主回路反吹和过滤器反吹。切换相应吹扫功能，检查电磁阀状态及气路变化情况是否符合设计要求。

5.2.2.2 加热功能调试

Hg-CEMS 预处理系统加热部分主要有采样探头加热、取样管加热和汞价态转换器加热。全部上电，并设定温度观察加热情况，在说明书规定时间内加热到设定温度即合格。

5.2.2.3 主回路流量测试

在系统维护挡时，观察主回路流量，其流量很小几乎为零。将系统由维护档打到运行挡时，满足系统设计流量即为合格。

5.2.3 气体传输系统的安装和调试

5.2.3.1 伴热管的安装

伴热管安装主要包括伴热管的敷设、伴热管电源及气路连接等工作。

敷设位置：平台上的采样探头到分析小屋的预处理机柜。

敷设要求：伴热管敷设原则是逐级降低，弯曲圆弧半径不能小于 0.5m（这样有利于烟气在自身重力和采样泵的抽力作用下，从采样探头较快速进入预处理机柜进行检测，从而缩短系统响应时间、提高检测的准确性）。从采样探头开始，伴热管应以不小于 5°的坡度向下倾斜至分析小屋，应采用桥架或穿管等方式，保证整条管线有良好支撑。如果伴热管放入桥架敷设，桥架弯头角度必须大于 120°，否则会导致伴热管弯折，增加采样阻力。

5.2.3.2 伴热管的调试

伴热管的调试主要包括伴热管的密封性检查和伴热效果测试。

（1）伴热管密封性检查

采样管路必须做到不漏气，否则测量的 Hg 浓度值会失真。连接时确认伴热管探头端及机柜端各接头连接牢靠，且管路裸露处无明显破损和弯折情况。供气伴热管线线主要用于探头反吹和主回路采样供气，探头反吹管路在维护状态下只要不漏气就可判断此管路气密性良好。采样伴热管线主要用于输送总汞样气、元素汞样气、元素汞标气和离子汞标气。此管路判断时需要将一端堵住，另一端接上压力表，然后通入压缩空气，断开气源，观察压力表压力是否降低，具体为 5 分钟内其压力衰减不得高于 0.02MPa；符合要求则证明伴热管不漏气，否则伴热管漏气，需更换。

（2）伴热效果测试

连续在线监测系统是采用全程伴热的方式测量烟气中 Hg 浓度的，因此伴热管线伴热效果的好坏关系到预处理的加热效果以及系统的正常工作。应全程保证伴热管设定温度大于 160℃。

5.2.4 分析仪安装调试

5.2.4.1 开箱清点

仪器到货后，用户首先应按仪器装箱单清点货物。清点时特别注意品名、型号、数量等是否与装箱单上相符，相符后再根据各自的包装情况开箱进一步清点。

5.2.4.2 电路连接

将电源线的一端连接至仪器的供电插座，另一端连接至 220V 插座。连接前检查当地的电压，频率是否在仪器铭牌的范围之内。

5.2.4.3 信号连接

将信号线连接在分析仪通信接口处，并将通信线另一端连接在 PLC、工控机或其他数据采集端，即完成信号的连接。要注意系统采用的数字量或模拟量采集方式，并注意线序。需要确认通信方式是 RS232、RS485 或是以太网，并在开机后对分析仪进行相应设置。

5.2.4.4 开机调试

检查供电电源是否为 AC(220±22)V/50Hz 交流供电，如符合仪器用电要求，按下列步骤通电检查：

（1）打开电源开关，主界面程序开始运行。

（2）启动后，需对分析仪进行预热以使仪器达到稳定的工作状态。预热完成后，查看主界面是否有报警信息，若无报警信息则仪器可正常测量，若有报警信息参照相关说明进行解决。

（3）设置量程、测量单位、通信方式、通信参数等相关配置信息，完成数据采集工作。

5.2.5 校准单元

5.2.5.1 开箱清点

仪器到货后，用户首先应按仪器装箱单清点货物。清点时特别注意品名、型号、数量等是否与装箱单上相符，相符后再根据各自的包装情况开箱进一步清点。

用户开箱清点前，应检查仪器的外包装情况是否良好。如发现损坏，请务必保存好已损货物，向厂商联系并解决。

5.2.5.2 气路连接

在气路连接上要与分析仪表进行连接。

5.2.5.3 气源要求

对供气及排空有一定的要求，如下所述：

（1）供气必须是干燥的（露点应不大于－20℃）。

（2）供气的压力需要保持足够压力（大于 0.2MPa），并且能够提供足够的流量。

5.2.5.4 排空要求

仪器的废气排空需要使用管线接到大气中排放，仪器的配气排空需要排放到操作室外部。

5.2.5.5 气路连接方法

元素汞标气由内部的恒温室产生，设置相应的温度就可以产生不同浓度的标气，所以只要将仪表后面板的对应接口连接到分析仪表和系统中就可以。

5.2.5.6 电路连接

将电源线的一端连接至仪器的供电插座，另一端连接至 220V 插座。连接前检查当地的电压，频率是否在仪器铭牌的范围之内。

5.2.5.7 开机调试

检查供电电源是否为 220（1±10%）VAC/50Hz 交流供电，如符合仪器用电要求，按下列步骤通电检查：

（1）打开电源开关，主界面程序开始运行。

（2）启动后，需进行预热以使仪器达到稳定的工作状态预热完成后，查看主界面是否有报警信息，若无报警信息则仪器可以正常测量；若有报警信息参照相关说明进行解决。

5.3 日常运营要点

汞 CEMS 运维单位应根据使用说明书和相关标准的要求编制仪器运行管理规程，确定系统运行操作人员和管理维护人员的工作职责。运维人员应当熟练掌握烟气汞排放连续监测仪器设备的原理、使用和维护方法。汞 CEMS 日常运营管理包括以下方面：

5.3.1 日常巡检

汞 CEMS 运维单位应根据相关标准和仪器说明书中的相关要求制定巡检规程，并严格按照规程开展日常巡检工作并做好记录。日常巡检记录应包括检查项目、检查日期、被检项目的运行状态等内容，每次巡检应记录并归档。汞 CEMS 日常巡检工作不超过 7d。

5.3.1 日常维护保养

应根据汞 CEMS 说明书的要求对汞 CEMS 系统保养内容、保养周期或耗材更换周期等做出明确规定，每次保养情况应记录并归档。每次进行备件或材料更换时，其品名、规格、数量等应记录并归档。如更换有证标准物质或标准样品，还需记录新标准物质或标准样品的来源、有效期和浓度等信息。对日常巡检或维护保养中发现的故障或问题，系统管理维护人员应及时处理并记录。

5.3.3 汞 CEMS 的校准和校验

5.3.3.1 定期校准

汞 CEMS 运行过程中的定期校准是质量保证中的一项重要工作，定期校准应做到：

（1）具有自动校准功能的汞 CEMS 每 24h 至少自动校准一次仪器零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

（2）无自动校准功能的汞 CEMS 每 15d 至少校准一次仪器零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

（3）汞 CEMS 每 3 个月至少进行一次全系统的校准，要求零气和汞标准气从站房发出，经采样探头末端与样品气体通过的路径（包括采样管路、汞转换器、过滤器、洗涤器、调节器、汞分析仪等）一致，进行零点和量程漂移、示值误差、转换效率和系统响应时间的检测。

5.3.3.2 定期校验

汞 CEMS 投入使用后，燃料、脱汞工艺的变化、水分的影响、安装点的振动等都会对测量结果的准确性产生影响。定期校验应做到：有自动校准功能的测试单元每 6 个月至少做一次校验，没有自动校准功能的测试单元每 3 个月至少做一次校验；校验用参比方法和汞 CEMS 同时段数据进行比对，按照相关标准执行。

5.4 常见故障及排除

汞 CEMS 长期运行且运行环境相对恶劣，现场污染源的排放状况也在不断变化波动，因此，出现常见故障是不可避免的。当汞分析仪出现故障时，例如测量值长期偏差无法有效校准、分析仪检测部件漏气或进水等，应及时联系分析仪生产厂家进行维修或更换以排除故障。这样一方面使系统迅速正常运行，另一方面保护汞 CEMS 各部件尤其是核心分析仪不会因为某些长期故障造成彻底损毁，带来更大的损失。

5.4.1 完全抽取式 CEMS 系统常见故障

完全抽取式汞 CEMS 系统常见故障、系统现象和原因及简要维护排除方法见表 5-2。

完全抽取式 CEMS 系统常见故障 **表 5-2**

序号	故障点	现象	原因	简要维修
1	采样探头	抽气量不足、抽气困难	采样管或过滤滤芯反吹不及时或反吹压缩机故障导致堵塞	疏通或更换采样探管
2	采样管路	污染物测量值低，氧气量升高	采样管、接头、阀门等腐蚀、断裂导致漏气	查找漏点，更换部件
3	加热系统	采样加热温度达不到设置要求	加热系统有短路或断路情况、保温不够导致加热失效	查找断点，更换部件
4	采样泵	采样系统正常时采样流量下降	采样泵被腐蚀或长期使用导致抽气能力下降	更换采样泵膜片等部件
5	除水冷凝系统	冷凝温度显著升高达不到设置要求	冷凝液泄露或失效导致冷凝除水失效，长期分析仪损坏	更换冷凝部件，检查分析仪
6	过滤部件	过滤器滤芯变色，污染物测量值偏低	过滤部件长期无人维护保养	更换过滤滤芯，重新校准系统
7	冷凝排水系统	冷凝水排放不畅，无法排出	蠕动泵管老化或接反、转轴腐蚀破坏，长期分析仪损坏	更换排水部件，检查分析仪
8	排气系统	进气流量不稳，排放尾气不通畅	排水管路堵塞或水汽冷冻结冰	疏通排气管或排气管路加热保温
9	汞转化单元	阀路切换前后汞测量值无变化	温度过低或催化剂材料失效	检查加热温度、更换催化剂

5.4.2 稀释抽取式 CEMS 系统常见故障

稀释抽取式汞 CEMS 系统常见故障、系统现象和原因及简要维护排除方法见表 5-3。

稀释抽取式汞 CEMS 系统常见故障 表 5-3

序号	故障点	现象	原因	简要维修
1	采样探头	抽气量不足、抽气困难	采样管或过滤滤芯反吹不及时或反吹压缩机故障导致堵塞	疏通或更换采样探管
2	稀释探头控制器	稀释比例不准确、测量值有偏差	稀释探头磨损导致探头限流孔等部件损坏或控制器不稳定	查找稀释探头损坏点，测试控制器
3	采样泵	采样系统正常时采样流量下降	采样泵被腐蚀或长期使用导致抽气能力下降	更换采样泵膜片等部件
4	过滤部件	过滤器滤芯变色，污染物测量值偏低	过滤部件长期无人维护保养	更换过滤滤芯，重新校准系统
5	稀释气零气预处理系统	零气质量无法保证或不稳定，测量值有偏差	预处理各个环节不够或维护不及时达不到要求，零气质量不好	查找维护零气预处理各个环节
6	排气系统	进气流量不稳，排放尾气不通畅	排水管路堵塞或水汽冷冻结冰	疏通排气管或排气管路加热保温

5.5 典型应用案例

5.5.1 背景气干扰组分对汞测量影响

烟气中成分复杂，常见成分包括 SO_2、NO_x、CO_2、CO、HCl、O_2、H_2O、N_2 等。对于汞 CEMS 系统每个干扰气体（或混合气）总体干扰响应必须不超过 3%校准量程，或者所有干扰气体绝对平均差之和不超过 0.3μg/m³。

下面分别介绍 SCS-900Hg 系统和 CEMS-2000BHg 系统的解决方案。

5.5.1.1 SCS-900Hg 型汞 CEMS

SCS-900Hg 型汞 CEMS 采用直接抽取式紫外吸收原理，分析仪及系统结构组成如图 5-10、图 5-11 所示。

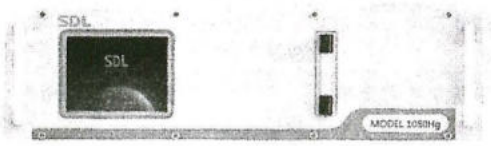


图 5-10 SCS-900Hg 分析仪

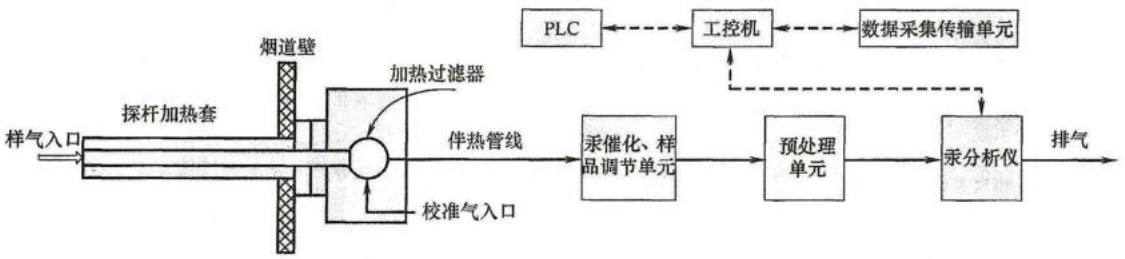


图 5-11 直接抽取式汞 CEMS 系统流路图

消除背景气干扰措施有：

（1）汞催化、样品调节单元

该部件功能有：

1）将烟气中的氧化态汞（Hg^{2+}）通过化学法还原反应成元素态汞（Hg），该过程不存在逆变现象，转换效率远大于95%。

2）反应消耗掉样气中酸性物质，如NO_x、HCl、Cl_2、SO_2等，消除该成分对汞分析仪干扰可能。结构与原理如图5-12所示。

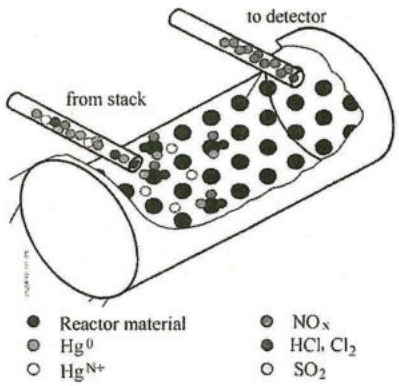


图5-12 汞催化剂反应机理

（2）预处理单元

烟气中的湿度对光学原理分析仪普遍存在干扰，其吸收范围跨度大，在253.7nm波长处同样存在干扰，因此在样气进入汞分析仪之前，需对其进行脱水处理。系统预处理中有样气脱水装置，用冷凝一级除水、干燥剂二级除水相结合，有效避免了水分对测量结果的影响，满足相关标准要求。

（3）汞分析仪

紫外光源发出的光通过一个狭缝快门抵达测量室和参比室，光电二极管测量到吸收汞蒸气后光强的变化（在波长253.7nm处），依据朗伯-比尔定律（Lambert-Beer law）可计算出相应的汞浓度。

图5-13箭头表示了样气流经光度计的方向。样气先进入测量室，在汞被吸附后再流入参比室。利用这种方式的优点是采样气既通过测量室又经过参比室，在进入参比室前，大部分的汞被有选择性地过滤吸收。例如，在用单一测量光路光度计分析时，在SO_2浓度为$50mg/m^3$时，就可能致使汞浓度测量值偏高。在极端情况下，由于SO_2等组分的干扰，有可能会显示出一个随机的测量值，实际上汞并不存在。当SO_2达到$500mg/m^3$时才会对测量结果有交叉干扰，此时应采用SO_2过滤器除掉SO_2。

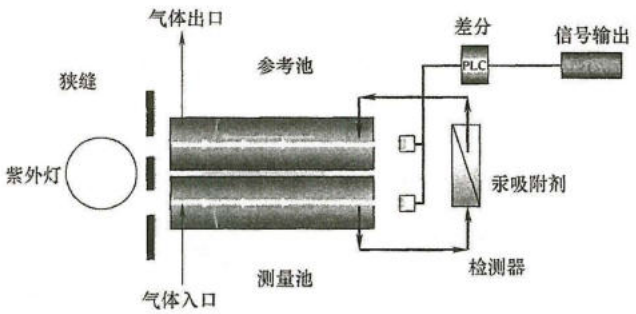


图5-13 差分技术的气态汞检测示意图

基于抗干扰措施对系统进行若干气体干扰测试，抗干扰效果良好。测试结果如表5-4所示。

特定标准物质干扰测试数据表 表5-4

干扰气体	标准气浓度	测试平均值（$\mu g/m^3$）	Ui（量程为$100\mu g/m^3$）
O_2	21%	0	0
H_2O	20%	0.24	0.24%

续表

干扰气体	标准气浓度	测试平均值(μg/m³)	Ui(量程为 100μg/m³)
CO	300mg/m³	0.02	0.02%
CO_2	599.1ppm	0.02	0.02%
CH_4	50ppm	0.01	0.01%
NO	300mg/m³	0.01	0.01%
SO_2	1000mg/m³	0.01	0.01%
HCl	200mg/m³	0.09	0.09%

5.5.1.2 CEMS-2000BHg 型汞 CEMS

(1) 使用有效的方法扣除背景光影响

可以使用双光束池以及塞曼背景校正的方法（如图 5-14 和图 5-15 所示），使用双光束池，其中一路用于通入烟气，另一路经除汞设备处理后通入另一个气体室，两个气体室的信号差即为汞的信号值，进一步即可计算得出烟气中汞的浓度。

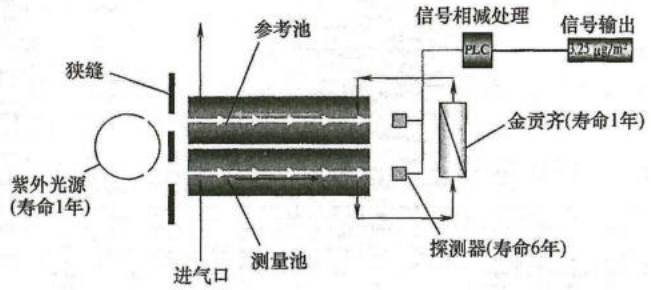


图 5-14 吸收光路图

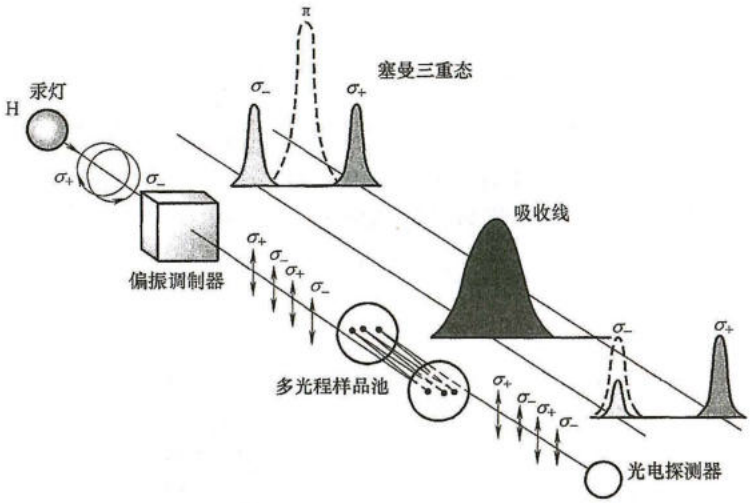


图 5-15 系统检测光路图

(2) 使用捕汞装置富集和热解消除背景影响

可以采用先富集再热解的方法去除其他成分的干扰影响。由于选用的富集材料能够富集烟气中的汞，而其他成分可正常通过，因此在进行解析时就只剩下待测的汞而没有其他的干

扰气体。

（3）使用冷原子荧光光谱法进行检测

采用冷原子荧光光谱法进行检测，由于只有 Hg 能激发产生一定的荧光信号，因此从检测方法上可以有效地避免烟气中其他气体成分的影响。

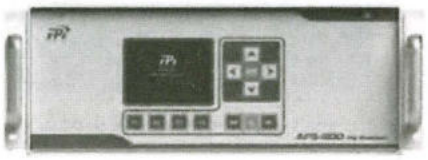


图 5-16 AFS-200 汞分析仪

图 5-17 为使用 CEMS-2000 B Hg 系统所做的干扰测试，在通过配气工装产生 8μg 的汞标气和 2000ppm 的 SO_2 和 50ppm 的 NO_2 气体混合，混合后的气体对于汞标气的检测影响误差极小（干扰影响分别为 0.775%和 0.15%）。可以看出使用冷原子荧光光谱法可以有效地避免烟气中 NO_2 和 SO_2 的干扰影响，从而提供精确的测量。

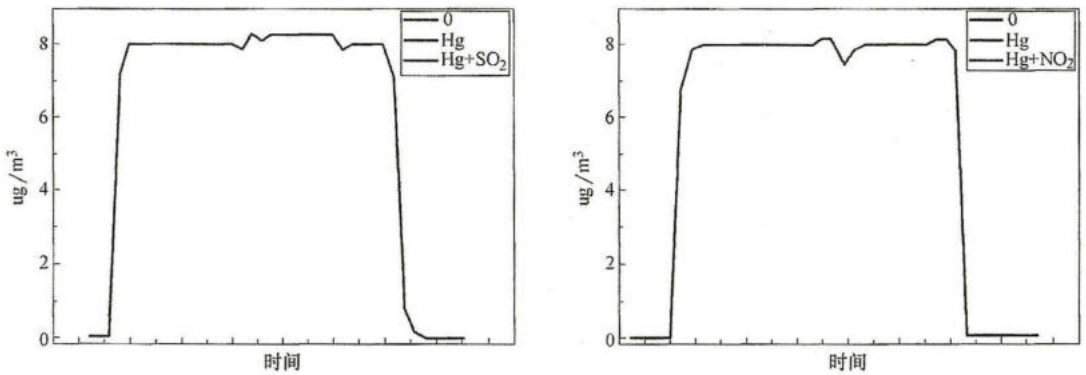


图 5-17 SO_2 和 NO_2 的干扰测量曲线

5.5.2 气态汞发生器及校准控制

5.5.2.1 气态汞发生器

气态汞发生器可发生元素汞标准气和二价汞标准气，通常二价汞标准气为 $HgCl_2$ 校准气体。元素汞校准气体，可使用能溯源的元素汞发生器，包括渗透法及化学还原法；$HgCl_2$ 校准气体可使用能溯源的元素汞发生器与 Cl_2 或盐酸溶液在 $HgCl_2$ 发生模块中生成 $HgCl_2$ 校准气，或使用 $HgCl_2$ 发生器将液态 $HgCl_2$ 气化后生成 $HgCl_2$ 标准气体。发生原理及主机如图 5-18、图 5-19、图 5.20 所示。

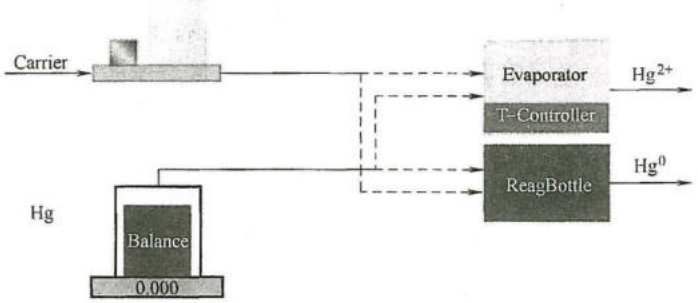


图 5-18 汞发生原理



图 5-19 SDL205 元素汞发生器主机图



图 5-20 CAL-200 元素汞标定源外观图

5.5.2.2 校准控制

元素汞标气发生器和离子汞标准气发生器准确性验证，采样方法及质控参照 30B 方法，分别进行低浓度气体（L）、中浓度气体（M）、高浓度气体（H）的验证。每个浓度水平的标气，至少重复采集 3 个样品，计算 3 个样品的平均值，比较吸附管方法测得的平均汞浓度值和元素汞发生器的溯源点的浓度值进行比较，可以接受的误差范围是小于元素汞发生器溯源点浓度值的±5%，或者绝对误差≤0.5μg/m^3，两者取大；可以接受的误差范围是小于离子汞发生器标称值的±10%，或者绝对误差≤1μg/m^3，两者取大。

采用溯源现场汞标气发生器（Field Reference Generator，简称 FR）验证待测烟气汞在线监测系统中的汞标气发生器（User Generator，简称 U），需要将二者产生的汞标气依次输入到现场汞分析仪进行测试并记录其测值。被验证的汞标气发生器的输出浓度和溯源现场汞标气发生器的溯源点相近，一般要求选取的浓度点偏差在 30%或者 0.5μg/m^3（两者取最严格）以内。

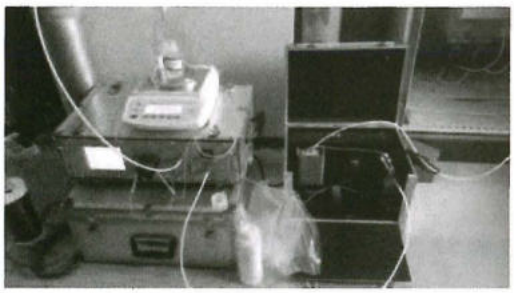


图 5-21 汞标准气发生器



图 5-22 30B 标准取样器

5.5.3 低浓度汞测量

近年来，我国污染源脱硫脱硝等污染治理设施逐步广泛使用，且污染源颗粒物浓度越来越低，尽管这些措施不是针对汞的排放，但是或多或少都对烟气脱汞起到了正面的作用（尤其是湿法脱硫和布袋除尘）。这导致我国真实的污染源汞排放情况没有国外预测的严重；燃煤电厂、垃圾焚烧等行业烟气中汞的典型排放浓度比 SO_2、NO_x 等低几个数量级，通常只有几个 μg/m^3，甚至零点几个 μg/m^3；因此与 SO_2/NO_x-CEMS 相比而言，汞分析仪器需要具备更高的灵敏度和更低的检测限。针对这一难题可以采用如下三种技术解决方案。

5.5.3.1 增加有效的检测光程长度

对于使用吸收光谱技术的汞分析仪，因吸收强度与被测气体的浓度和有效光程成正比，所以可以通过增加有效光程的方法来增强吸收强度，从而提高检测灵敏度和降低检测限。一般使用气体室多次回返的方案，如图 5-23 所示，让光在气体室多次回返达到增加光程的效

果。但这种方法灵敏度的增加有限，且气体室构造比较复杂。

5.5.3.2 采用捕汞装置富集

对于低浓度烟气汞的测量可以采用先富集再释放检测的方法来提高检测灵敏度和降低检出限。将抽取出来的被测烟气首先通过一个汞富集装置（一般为金汞齐），烟气中的汞被富集而其他烟气成分通过；富集一段时间后，再通过加热的方法使得富集的汞释放出来，此时富集汞的量可以达到分析仪的检测限，如图 5-24 所示。该方法检测的灵敏度和富集的时间成正比，对汞富集时间越长则检测灵敏度越高，检测限越低。但这种方法不足之处在于因汞的富集，所以无法进行实时测量。

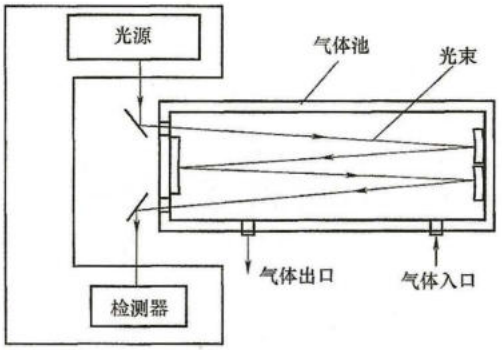


图 5-23 基于 White Cell 原理的多次反射光路示意图

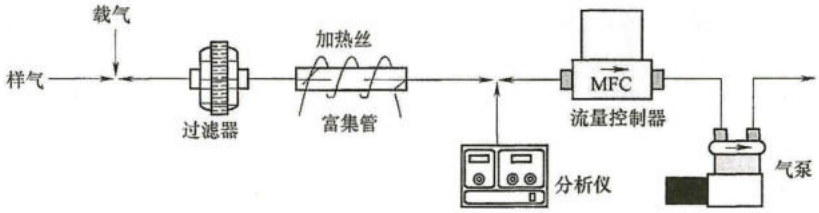


图 5-24 富集装置富集解吸检测过程示意图

5.5.3.3 采用更高灵敏度的监测分析方案

冷原子荧光光谱法利用汞灯光源激发汞蒸气产生共振荧光，其后用光电倍增管捕捉放大其荧光信号，原理如图 5-25 所示，荧光光谱法的监测灵敏度高于冷原子吸收法 1～2 个数量级，因此可以更加精准有效地测量低浓度的烟气汞。相对于增加有效光程长度和富集汞而言，这种方法可以有效地提高检测精度，做到实时检测。

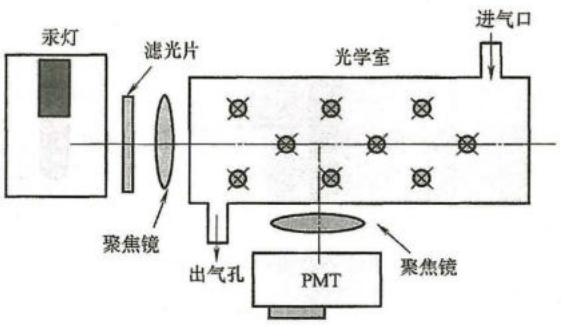


图 5-25 汞分析仪原理示意图

目前来说使用冷原子荧光光谱法普遍具有较低的检测限，且都能做到实时在线测量。

烟气汞在线监测系统（SCS-900Hg）检出限可达 0.05μg/m^3，24 小时零点漂移和量程漂移均小于 1μg/m^3，能够完全满足固定污染现场监测要求，其自主开发的便携式汞分析仪（MODEL3080Hg）检出限可达 0.1μg/m^3，应用于污染源现场快速检测（比对监测与应急

监测），是现有标准方法的有效补充，已接受火电厂、汞冶炼厂、火葬场、垃圾焚烧厂等现场考验，运行良好。如图 5-26、图 5-27 所示。



图 5-26 SCS-900Hg 烟气汞在线监测系统图



图 5-27 MODEL3080Hg 便携式烟气汞分析仪

第 6 章　氨 CEMS

6.1　氨监测技术

6.1.1　应用概况

氨 CEMS 主要应用于监测脱硝工艺出口烟气中的氨含量。监测 SCR 出口的氨逃逸量具有重要意义。在脱硝过程中氨的消耗量与 NO_x 总量的化学计量比达到 0.8～1.2，因此控制氨的注入量非常重要；氨的注入量既要保证有足够的 NH_3 与 NO_x 反应，以降低 NO_x 的排放量，满足污染源排放要求，又要避免向烟气中注入过量的 NH_3，注入过量的氨不仅会增加腐蚀，缩短 SCR 催化剂寿命，还会污染烟尘，增加在空气预热器中的氨盐沉积，并增加向大气的 NH_3 排放。由于 NH_3、H_2O 和 SO_3/SO_2 的反应将主要形成硫酸氢胺（ABS），其熔点为 147℃，易在设备表面形成液态悬浮颗粒；ABS 在温度降低时，会吸收烟气中的水分，形成腐蚀性溶液。在温度较低的催化剂表面，烟气中 ABS 会堵塞催化剂，造成催化剂失活，增加反应器的压损。在烟气经过空气预热器时，在温度较低的热交换表面会形成 ABS，并产生沉积，导致压降，降低空气预热器的效率。根据有关报告，对 SCR 出口的氨逃逸量进行监测并控制在 2～3μmol/mol，可延长空气预热器的检修周期，可见氨逃逸量的精确测量与控制对延长催化剂更换及空气预热器检修周期有重要意义。

由于在 SCR 反应器出口检测氨逃逸量（图 6-1），存在烟气温度高（300～400℃）、湿度大（水汽达饱和）、颗粒物浓度高（20～25g/Nm³）等恶劣问题，以及 ABS 易结露等问题，

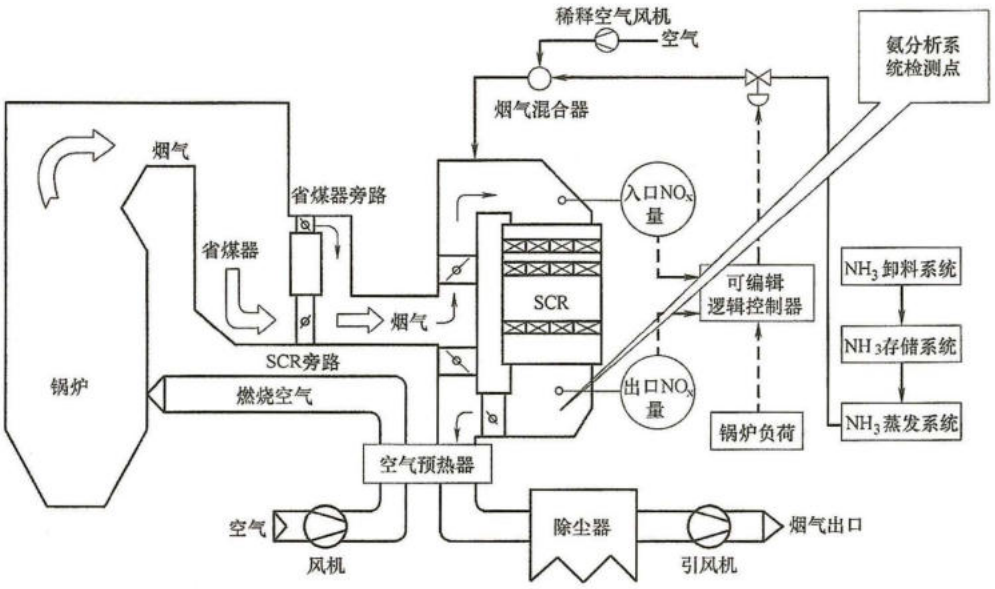


图 6-1　SCR 脱硝工艺及检测点

使氨的微量分析难度增大。如何确保烟气取样中 NH_3 测量浓度是真实的、具有代表性的，成为非常重要的问题。

对氨逃逸量的监测，主要采用的方法是激光抽取测量法、激光原位测量法、催化还原-化学发光法以及傅里叶变换红外光谱法等。

6.1.2 基本结构及分类

氨逃逸在线监测系统按采样方式可以分为两类：一类是抽取法，将烟气从烟道中抽取处理进行监测分析；另一类是原位测量法，将测量分析单元安装在烟道上直接对烟气进行监测分析。

6.1.2.1 抽取法氨在线监测系统结构组成

抽取法氨在线监测系统结构一般由 4 个部分组成：取样与样气处理单元、电气控制单元、仪表分析单元、样气传输单元。

（1）取样与样气处理单元

取样与样气处理单元主要包括：取样探管、过滤组件、气动阀、射流泵、加热器等。

用于氨监测的取样探头及传输管线必须采用高温型。同时应注意对探头的反吹，反吹压缩空气应预加热，严防在反吹时将探头的局部降温。通常有两种方案，一种是反吹压缩空气源在取样探头现场处，增加前级反吹的空气预热处理箱（包括反吹控制阀）将反吹压缩空气预热；另一种方案是压缩空气源在分析柜或分析小屋处，通过加热传输管线送到探头处，此时反吹空气已经预热。

氨监测的样品处理除尘设计，应采取多级除尘方案。一般的取样探头都设一级粗过滤器，采用陶瓷或不锈钢粉末冶金过滤器，过滤精度为 2～3μm。由于氨气取样点的含尘量高达 20～25g/Nm^3，因此高温探头最好设有两级过滤，在直接伸入烟道的探头处设一级前置过滤器，滤除烟气中的大部分粉尘颗粒，当反吹时，直接吹进工艺管道，不会堵塞探头；在取样探头的外部应设有外置加热保温的陶瓷过滤器进行二级过滤，保证其过滤精度达到小于 2μm。烟气的后续除尘还要经过气溶胶过滤器及精细过滤器进一步除去烟气的细小颗粒物及液滴。最后在进入分析器前经过膜式过滤器，过滤精度可达到 0.2～0.3μm。

（2）电气控制单元

电气控制单元主要包括：PLC、继电器、温控器、电磁阀等。

（3）仪表分析单元

仪表分析单元主要包括：发射单元、接收单元、气体室、加热器等。

6.1.2.2 原位测量法氨在线监测系统结构组成

原位测量法氨在线监测系统结构一般由 4 个部分组成：发射/接收器、光纤、仪表分析单元、辅助系统。

（1）发射/接收器

进行氨气检测的激光光束自发射器发出，经被测气体被部分吸收，之后衰减的光会被接收器检测到，并反馈到气体分析仪。通常发射/接收器分为两类：一类本身不发射、接收光，光束由分析仪经光纤传输到发射器，接收器接收激光后再返回分析仪，由分析仪进行检测计算并输出检测数据；另外一类本身带有发射、接收装置，光信号检测结果通过信号电缆传输到分析仪得到检测数据。

（2）光纤

连接发射/接收器与分析仪，实现激光束的传输。

（3）仪表分析单元

对光信号衰减进行检测分析，输出氨气检测结果。

（4）辅助系统

氨逃逸检测系统多安装在 SCR 脱硝工点位，烟气温度一般在 400℃作业，为保护检测设备，需要配备吹扫系统形成气幕屏蔽，防止高温烟气对设备的损坏。

6.1.3 常用分析技术

脱硝出口的净烟气测量中，除测量氮氧化物外还需要测量微量的氨逃逸量，在测量氨逃逸量的技术中，微量氨（小于 3μmol/mol）的测量难度较大又易溶于水，测量微量氨的技术主要包括：激光吸收光谱法、催化还原-化学发光法或热湿傅里叶变换红外光谱分析技术。

6.1.3.1 激光吸收光谱技术

可调谐激光分析微量氨系统通过对气体的特征吸收光谱来测定气体成分浓度。将气体吸收谱线按波长展开，可发现不同气体的吸收在某些特定波长产生，其吸收峰被称为该气体的特征吸收谱线。由于选择的可调谐激光光谱的宽度远小于被测气体的特征吸收谱线的宽度，通过选择激光波长接近于待测成分的某吸收谱线，对可调谐激光二极管采取改变激励电流或温度，可使激光波长被调谐实现涵盖所选的波长范围，包含吸收谱线；当激光波长等于被测气体的特征吸收波长时，激光将被吸收，其吸收程度可从接收信号分析得到，图 6-2 为激光光谱测量的原理图。将激光测量信号与处理单元的参比信号相比，即可计算得到待测气体的浓度。

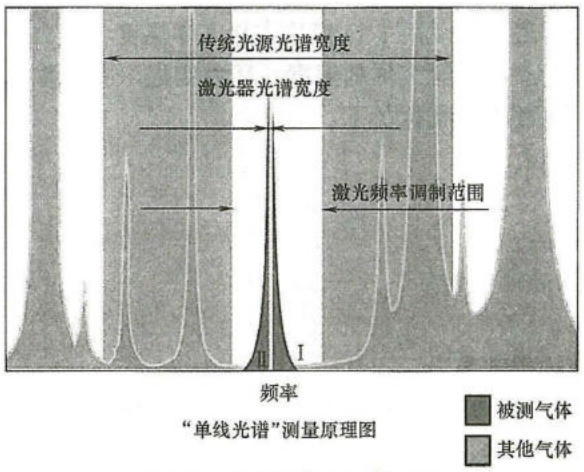


图 6-2 激光光谱测量原理图

可调谐激光分析微量氨是基于对在近红外线波段 NH_3 的特征吸收光谱来测定氨的浓度。在近红外线波段 NH_3 及 H_2O 的吸收谱如图 6-3 所示。

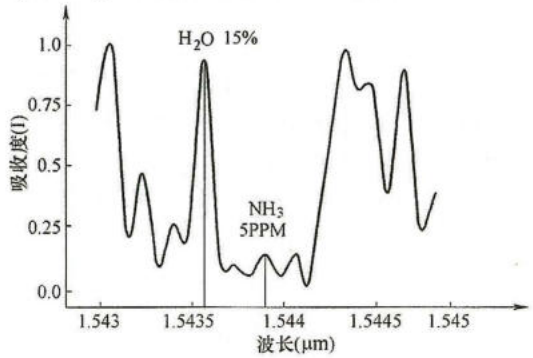


图 6-3 近红外波段 NH_3 和 H_2O 的吸收谱图

激光吸收光谱技术根据采样的方式又可以分为抽取式激光吸收光谱法和原位式激光吸收光谱法。

表 6-1 为抽取式与原位式采样分析方法的特点。

激光吸收光谱技术分类 **表 6-1**

激光吸收光谱法	原位	在反应器出口烟道两侧安装分析仪，使激光束对穿烟气，利用 NH_3 对光束的光谱吸收测量气体浓度	(1)烟气中粉尘高，分析仪器只能在烟道侧角安装，导致测量不具代表性。 (2)侧角安装光程小，同时高温下 NH_3 吸收小，探测精度降低。 (3)标定非常困难，准确性不易保证。 (4)烟气内粉尘浓度的变换会导致测量浓度波动变大，精度降低
	抽取	将烟气抽取出，除尘后用激光吸收光谱分析仪测量，烟气传输全程伴热	(1)不受水分干扰，无需除水，测量准确性高。 (2)避免烟气中粉尘对分析的影响，环境适应性高。 (3)可以随时通标气验证，准确性有保障

(1) 抽取式激光吸收光谱法

抽取式激光吸收光谱法仪器主要由发射单元、光学模块和接受单元三部分组成。发射单元包括激光器模块、光学模块、分析控制模块、I/O 模块及人机界面；光学模块由准直透镜和光学视窗组成，负责激光器的驱动、光谱数据分析、人机交互和 I/O 输出；接收单元包括光电传感器、信号处理电路和光学模块（包括准直透镜和光学视窗组成）等。

为实现高精度测量，发射单元的 I/O 模块支持气体温度、压力测量输出的 4～20mA 信号，激光分析仪通过实时获取被测气体的温度、压力变化，进行高精度的光谱分析测量。

激光气体分析仪的主要技术指标如下：

测量气体种类：NH_3；

标定周期：6 个月；

线性误差：≤±1ppm；

量程漂移：≤±1ppm/6 个月；

零点漂移：可忽略。

(2) 原位激光气体光谱技术

采用原位式激光气体分析检测微量氨的优点是无需采样和预处理，通过原位测量氨，没有样品取样及传输带来的影响，也不存在转换器的转换效率问题。采用激光分析原位测量微量氨，激光穿过烟道测量分析是线测量，而抽取式取样分析是点测量。相比之下，线测量更具有代表性，更能反映烟气中 NH_3 浓度的真实性。在国外检测 SCR 出口的氨逃逸量，采用激光分析原位测量法的居多。

激光分析微量氨的原位测量仪器安装在 SCR 出口，SCR 处于锅炉省煤器出口的高尘段，分析测量系统大多直接安装在测量点附近的高达数十米的钢质平台上。由于激光原位测量仪器的发射、接收探头直接安装在烟道壁上，易受到钢制烟道壁的振动，或钢制烟道受温度变化发生应变等环境因素的影响，可能会带来对仪器测量结果的不利影响，产生测量不稳定或不应有的指示漂移。另外，在烟尘及液滴含量较高时，长时间会对光窗产生污染，对激光测量光束的透射光强造成衰减，还可能影响激光透射光到接收探头光电池的信号，严重时会影响测量结果的准确性。

原位激光分析仪按照安装及连接形式基本分为以下类型：

1) 烟道两侧对装的非光纤传输型

原位激光分析仪的发射与接收头分别安装在烟道两侧，可调谐激光二极管直接安装在发

射头。不采用光纤传输信号，直接测量分析。此类仪器分析只能分析一种组分，测量一个测量烟道须安装一套发射、接收器及控制器；也有的在智能化探头上直接显示测量结果，无需控制器。

2）烟道两侧对装的光纤传输型

可调谐二极管激光光源内置在分析仪的控制器内，通过光纤技术传送到发射头发出激光光束，接收信号由光纤再送到控制器，属于光纤传输型。此类激光分析仪，一个控制器可以带 1～6 个发射/接收探头。如 LDS6 可以带 1～3 个发射/接收探头。

3）烟道单侧安装的原位分析

原位激光分析仪的发射与接收器集成安装在烟道单侧，如 Sick Maihak GM700 激光气体分析系统具有单侧安装探头，属于单侧原位安装型。探头伸入烟道内，其中探管的一段作为被测气体扩散的气室，探头末端有反射镜将吸收光强信号送到接收器。有的设有渗透保护管，可以通标气校正。

在国外，燃煤电厂 SCR 工艺已经广泛采用激光气体分析仪原位测量微量氨；目前国内燃煤电厂 SCR 工艺测量微量氨所应用的半导体激光气体分析仪产品主要有：LGA-4100 系列、LDS6、GM700、ICOS、Laser GasII 系列等。

① LDS6 激光气体分析仪

测量原理与外形结构参见图 6-4 所示，该仪器激光光源安装在控制器内，通过光纤技术可以实现一个控制器带 3 个测量探头。LDS 可调谐二极管激光分析仪，已经成熟应用于国外 SCR 作微量氨的原位测量。LDS 系统主要由中央处理单元、激光发射和接收探头、复合光缆与回路光缆等组成。复合光缆由光纤和低压传输电缆（24V）组成，连接探头和中央处理单元。

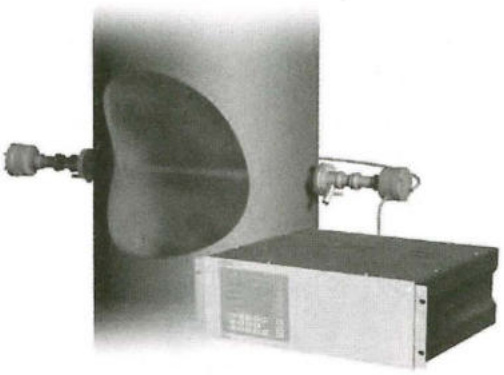


图 6-4 LDS6 激光气体分析仪测量示意图

中央处理单元包括操作控制面板、显示、处理器、激光源，内置参比池和输入/输出点，控制处理器最多可控制三个采样点。发射与接收探头分别安装在被测烟道的两侧，发射探头由光缆接头传输发出激光，接收探头通过光电检测器接收被吸收后的激光信号，并转化为电信号，通过电缆输出到中央处理器，进行信号处理；探头的光学部件采取正压空气保护。本系统采用可调谐二极管为激光光源，激光光源安装在中央处理器机柜内，通过光缆传输到各发射探头。激光光源发出的光被分成 5 路。第一路经过内置参比池并被检测，该参比信号被用于进行自标定和系统零点确定；第二路激光用于确定激光强度，并向处理单元报告激光源数据；第三到第五路激光，经光缆传输到各发射探头，进行成分浓度测定。

发射探头发出的激光光谱被烟道的待测气体吸收，接收探头则检测激光吸收信号，并经光电转换和信号处理，变为电信号由电缆送回中央处理器处理。经测量通道吸收谱的计算，得到所测成分浓度。测量条件变化，如含尘量增加、光学部件受到污染等，系统可通过处理单元进行补偿。

LDS6 NH_3 分析仪主要性能指标如下：

分析方式：激光光谱吸收；

采样方式：原位测量；
测量范围：（0～10×10^{-6}）ppm；
通道数量：2个；
激光级别：Class1，对眼睛无害；
校准方法：内置校准回路，不需外部校准；
响应时间：<1秒；
线性偏差：≤1% F.S.；
精度：≤1% F.S. 或2%测量值；
零点漂移：忽略；
量程漂移：忽略；
激光光源寿命：10年。

近期也开发了新的激光原位安装分析仪：SITRANS SL包含一对传感器、一对发射器和接收器。整个分析仪器安装在发射器和接收器中，它们之间使用一根电缆连接（外形结构参见图6-5）。另一根电缆从接收器接出来，连接电源和客户界面。接收器有一个本地用户界面（LUI），这个界面通过一个红外远程控制来操作。

② LasIR R系列激光气体分析仪

LasIR R系列激光气体分析仪如图6-6所示，由于采用的激光器功率较大，具有特色的光束设计，有较强的抗颗粒物、液滴影响和抗震动漂移能力，在微量氨的监测已得到较好应用。另外，它还具有抽取式检测池，也采用光纤技术，检测池具有多次发射，最长达55m光程。

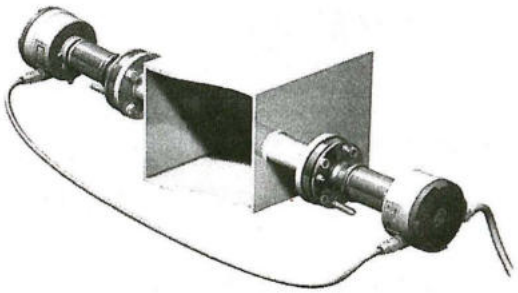


图6-5 SITRANS SL激光气体分析仪测量示意图

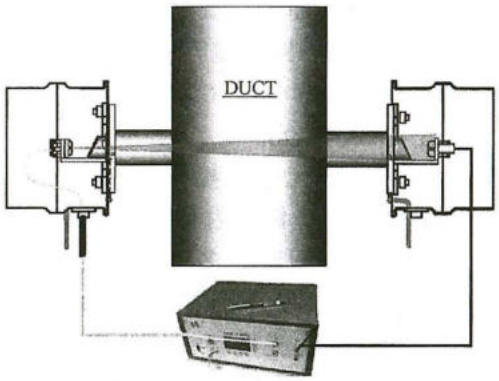


图6-6 LasIR R系列激光气体分析仪

6.1.3.2 间接催化剂还原-化学发光法的技术介绍

ENDA-C2000分析仪采用交替流动调制方式-化学发光法，利用非催化剂通道和催化剂通道的NO_x浓度差通过交替流动调制方式，只使用一个化学发光分析检测，并通过计算获取NH_3浓度。其测量范围为0～10ppm。

图6-7是ENDA-C2000间接催化剂还原-化学发光法NH_3分析仪测量原理图。

间接催化剂还原-化学发光法测量微量NH_3的测量原理，是在样品取样探头上设置催化剂通道及非催化剂通道，催化剂通道的反应器将样品中的NH_3定量还原，再通过化学发光法NO_x分析仪测定两个通道的NO_x浓度差值，即可计算出微量NH_3浓度值。其中包含非催化剂通道（NO_x）和还原催化剂通道（NO_x-NH_3）。催化还原的化学反应与脱硝原理相同。

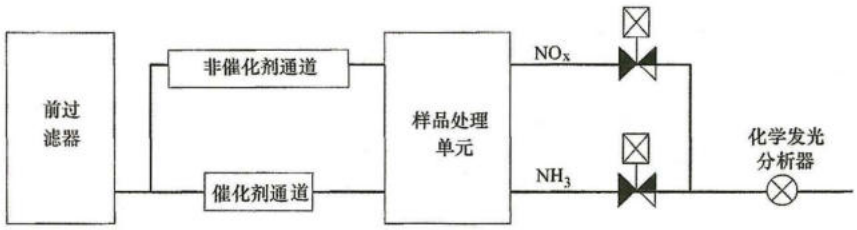


图 6-7 间接催化剂还原-化学发光法 NH_3 分析仪的测量原理图

$$4NO+4NH_3+O_2 \longrightarrow 4N_2+6H_2O$$

图 6-8 是该仪器采用的样气温度低于 350℃的取样探头的前处理结构图。由采样管、探头前过滤器、催化剂、反吹型过滤网及反吹系统等构成。

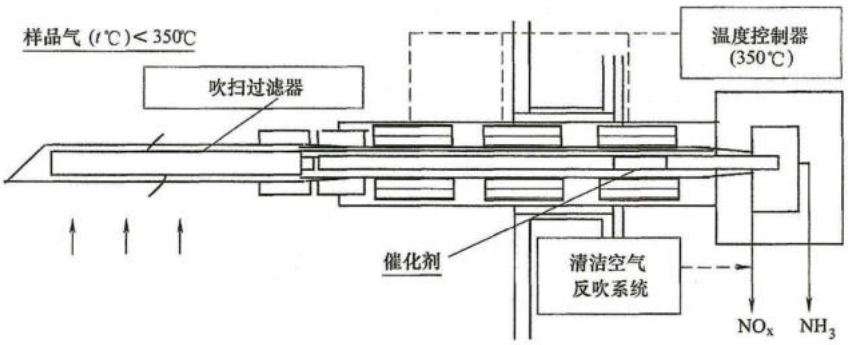


图 6-8 ENDA-C2000 带反吹的加热取样探头

通过使用与脱硝装置所使用同种类的催化剂（组成蜂窝状结构），确保了使用寿命和性能。取样探头的前处理装置将样气温度设定为 350℃，并通过采用过滤加反吹系统来有效提高取样探头耐久性。

6.1.3.3 热湿式傅里叶变换红外光谱检测技术介绍

热湿式傅里叶变换红外光谱（FTIR）可以用来检测多组分，包括气态污染物，如 SO_2、NO、NO_2、NH_3、HCl 等，也可用于检测脱硝 NO、NO_2、NH_3 等，但由于价格较贵，目前在脱硝的应用还不多。

FTIR 由取样处理、傅里叶变换红外分析仪和数据采集处理系统等部分组成。

取样处理部分由高温取样探头、加热取样输气管线及气体处理单元等组成。气体处理单元包括：高温泵、高温切换阀、二次过滤器和流量计，所有部件均安装在恒温在 180℃的机箱内。其中高温采样泵可从烟道中抽取烟气，烟气经二次过滤器再过滤，除去超细烟尘，流量计对烟气流量进行监视。傅里叶变换红外分析仪测量原理如图 6-9 所示，烟气测量光谱如图 6-10 所示。

傅里叶变换红外分析仪由宽带红外光源、干涉计、加热样品池、检测器和计算机控制单元、数据采集和处理单元 6 个部分组成。其中：

红外光源：采用目前 FTIR 中最常用的陶瓷 SiC 光源，温度 1200℃，抗振、宽谱、寿命长。

干涉计：采用卡洛斯（Carousel）干涉计，是一种新型旋转式干涉计，其结构紧凑、稳定性高、抗振动，不受环境温度和压力变化的影响，适合于检测微量浓度和宽频响应。

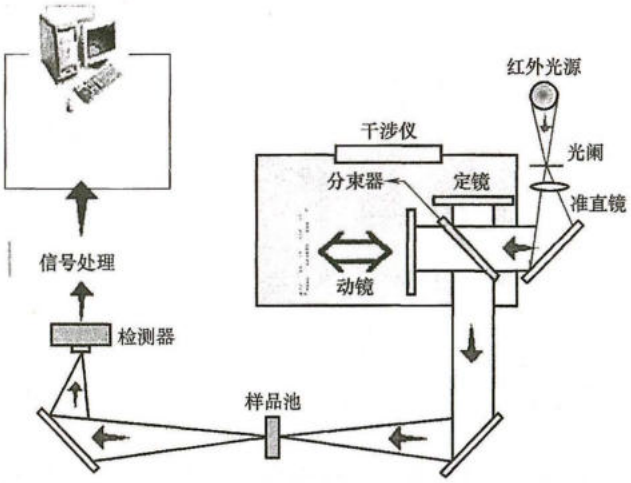


图 6-9 傅里叶变换红外分析仪测量原理图

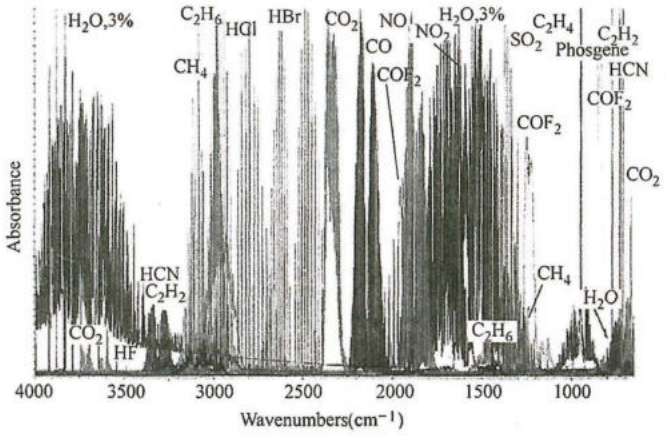


图 6-10 傅里叶变换红外法燃煤电厂烟气测量光谱图

加热样品池：双板定曲率镀金镜面反射样品池，多光通道，总长可达 7.0m，体积 1.07L，窗口材料为 BaF_2，极耐腐蚀，样品池恒温在 180℃。

检测器：响应时间 0.001～0.1s，宽带响应 600～4200cm^{-1}，稳定性好。对红外光很敏感，吸收红外辐射改变热电子运动，从而引起电阻的变化。

计算机控制单元：包括微处理器、前置放大器、主讯号放大器、模数转换器、电子带通过滤器和供电单元。微处理器控制整个分析过程进行傅里叶变换和利用数据库中标准谱图对讯号进行分析、锁定。

数据采集和处理单元：工控机、显示器、打印机和系统软件 4 个部分。用于控制整个 FTIR 系统的操作，如取样、反吹、零点校准等；监视 FTIR 系统的运行状态，并给出状态信号；数据采集和处理：对气态污染物如 NO、NO_2、NH_3 等分析数据以及烟气流量、烟尘温度、压力、O_2 含量等的讯号进行采集处理和存贮，并按有关规范的要求和格式打印报告。输出（4～20）mA 信号，具有与 DCS 通信的功能。

6.2 安装调试要点

氨监测系统，按取样方法划分，主要包括抽取法测量、原位对穿测量，不同方法安装调

试方法不尽相同。

6.2.1 抽取法氨监测系统安装调试要点

6.2.1.1 测量点位的选取

选取测量点位的时候要尽量考虑烟道截面均匀并且比较有代表性的点位进行测量。一般遵循以下原则：

（1）能充分反应被测气体浓度的位置。

（2）安装位置不漏风。

（3）便于操作维护的位置。

（4）探杆一般深入烟道直径的 1/3～1/2 处。

6.2.1.2 系统预处理

抽取法氨监测系统利用采样探头将一部分烟道气体抽出，进入传感器进行测量。为了减少在抽取过程中氨的损失，需要注意：

（1）尽量缩短采样管线的长度。

（2）样气传输全程温度在 180℃以上。

（3）气路气密性检查，无漏气。

6.2.1.3 系统校准

抽取法氨监测系统可以使用零气和标气进行校准，系统需要进行定期的零点和量程校准，以保证测量结果准确，校准时需注意：

（1）标气与零气所走气路应与样气相同。

（2）标气与零气的流量应大于采样流量。

6.2.2 原位对穿式系统调试要点

6.2.2.1 测量点位的选取

原位对穿式系统的测量点位在选取的时候，除了要满足抽取法系统遵循的原则，还需要注意：

（1）尽量选取烟道内粉尘少，烟道壁震动小的地方。

（2）优先考虑烟道中间位置对穿，如果无法满足再考虑斜角安装等安装方式。

（3）发射端和接收端尽可能水平安装，避免竖直安装，导致下端设备进粉尘，污染镜片。

6.2.2.2 探头支撑

由于法兰及发射和接收端自身很重且烟道钢板高温会变形，因此要给法兰做支撑，尽可能把支撑物连到钢梁柱上，这样比较牢固。

6.2.2.3 光纤铺设

一般原位测量系统的主机与发射端，发射端与接收端需要使用光纤进行连接。在铺设光纤时需要全程铺设桥架，临近探头处可做短距离裸露。还需注意：

（1）铺设光纤时，不允许拆除原厂光纤两端保护套。

（2）光纤不能折，一定要大弧度地铺设安装。

（3）铺设到位后，两端的保护套卸下后，固定塞要保留，因发射端及接收端光纤的固定要使用。

6.2.2.4 对光

原位对穿式系统的精准度主要依赖于发射端和接收端对光的精准度，所以在使用过程中需要对光，对光时应小心操作，避免光纤出现折断破损。

6.2.3 数据采集传输

系统安装完调试完后，将测量数据通过电流4～20mA信号或者数字通信（RS485）等方式接入到DCS或其他系统。现场电缆铺设时应注意：

（1）信号电缆及通信电缆必须使用屏蔽电缆。

（2）预留一路备用电缆，用于系统故障分析。

6.3 日常运营要点

抽取法与原位测量法监测系统结构不同，主要运营内容也有较大差异。

6.3.1 抽取法氨监测系统日常运营内容

日常维护对于保持和提高系统的运行效率和使用寿命至关重要，抽取法氨监测系统日常维护项目主要有以下几方面：

（1）检查仪表风压力是否正常，如果不正常，检查气路连接是否漏气。

（2）每天检查时，应注意仪表间空气的气味，如发现异味，马上打开门窗通风并检查管路是否泄漏，电器元件是否有过热和烧损现象。

（3）查看仪表、温度控制器等的读数是否正常，是否有故障指示信号。如不正常，首先检查工况是否变化，如工况没有变化，对仪器进行一次标定，如还不正常，请联系公司的技术支持部门。

（4）查看所有电磁阀是否正常动作，如果不动作或者动作异常，检查气路是否堵塞或者电磁阀是否损坏，如果损坏请停机，并及时更换电磁阀。

（5）为保证整个分析系统的可靠运行，主要的维护工作只限于观察气路是否堵塞和气路中的过滤部件是否堵塞，如粉尘过滤器、采样探头及内部气体流路管线等。需定时清除粉尘或采样探头过滤芯。

（6）在正常运行过程中，必须定时进行流量检查，确保分析仪器有相应的分析流量。

（7）其他电气、仪表、设备的维护参照通用电气、仪表、设备维护规范进行。

6.3.2 原位法氨监测系统日常运营内容

原位测量法氨监测系统直接安装在烟道上，其运营内容主要有以下几个方面：

（1）检查光学镜头是否洁净，保障光路通畅。

（2）检查光学透过率，保障说明书规定的最低值。透过率偏低，首先需要确定光路是否因为震动导致偏移。

（3）检查分析仪是否存在故障报警等信息。

（4）检查仪表风系统是否正常，保障光幕可以正常保护发射/接收器。

（5）根据仪器特点及说明书要求，需要重点检查的内容。

6.4 常见故障及排除

6.4.1 预处理堵塞问题

（1）取样泵堵塞：拆开取样泵，用水清洗，并用仪表空气吹干。

（2）管路堵塞：用清水浸泡再用仪表空气吹干，反复几次直至管路清洗干净。

6.4.2 仪表问题

（1）透过率低：需要判定导致透过率低的原因（主要有粉尘污染、腐蚀、凝结水雾、光路形变等），再根据具体原因具体解决。

（2）粉尘污染主要是检查前端过滤器是否存在漏粉。

（3）腐蚀主要是吹扫气流量太小，无法正常保护透镜。

（4）凝结水雾主要是气体室加热温度不均匀，两端温度太低。

（5）光路形变，主要是气体室长期在高温环境下，可能出现形变。

6.4.3 例行维护

（1）根据分析仪表要求标定周期进行零点和量程标定。

（2）每月对采样头滤芯进行检查，如污染严重，要进行清洗或更换（采样滤芯可用仪表风清洗，可重复使用）。

6.4.4 故障和报警

当系统有故障发生时，分析仪表在浓度超标或有故障发生时发出报警，并显示报警码，提醒操作人员能及时对系统进行维护，确保系统的安全稳定运行。

6.5 典型应用案例：脱硝后逃逸氨监测应用

脱硝后氨逃逸监测点的工况条件很恶劣，存在高温、高尘（大多数现场高达 20g/Nm^3 以上），同时存在高湿及高腐蚀，对分析技术的要求是低浓度氮氧化物及微量氨逃逸量的在线分析。由于 SCR 催化剂是在高温下工作（最高达 450℃），烟气与氨水的混合在催化反应后生成 N_2 和 H_2O，因此净烟气中的含水量也较高，腐蚀性也较高，微量氨逃逸量要求控制在 3μmol/mol 左右，而微量氨又是极易溶于水的，这对抽取法取样处理系统提出了严格的要求。

6.5.1 氨逃逸监测应用案例一

为解决高温、高尘环境下的监测问题，SCS-900LS 氨逃逸监测系统（图 6-11）采用了三级过滤方案，即在采样探杆头部、尾部及探头内部都装有高精度粉尘过滤器，能够在高达 1000g/m^3 浓度颗粒物工况下直接测量，同时系统设计有定时反吹功能，以满足脱硝工艺后高粉尘、高温度工况下的逃逸氨测量要求。其技术特点如下：

（1）单侧安装不受烟道震动影响

系统采用抽取法取样，被测气体从烟道内抽出后进入测量池检测，不受烟道震动影响。

（2）自动零点校准和手动量程校准保证测量准确度

系统定时进行零点校准，定期进行手动量程校准，可抑制零点和量程漂移，保证测量准确度。

（3）采用 TDLAS 技术，具有高分辨率、测量速度快等特点，同时超强的抗干扰能力，不受背景气体影响。

某电厂 2 号锅炉 A 侧烟道采用 SCNR 和 SCR 串联的脱硝工艺，逃逸氨浓度较低，通常

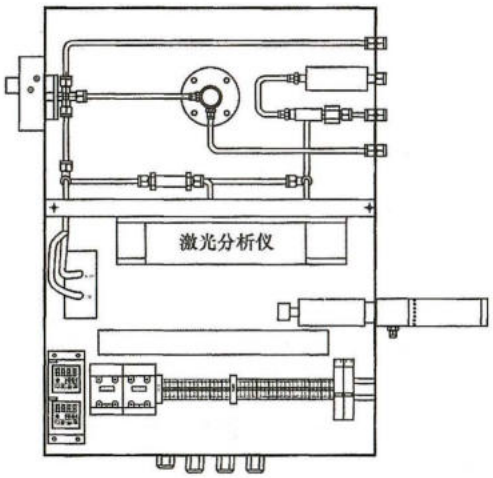


图 6-11 SCS-900LS 氨逃逸监测系统

小于 3μmol/mol。通过加大喷氨量观察氨逃逸浓度变化情况，可以看到排放口 NO_x 浓度和逃逸氨浓度的数据相关性（图 6-12），在增加喷按量为原有 1 倍的情况下，NO_x 浓度显著下降。

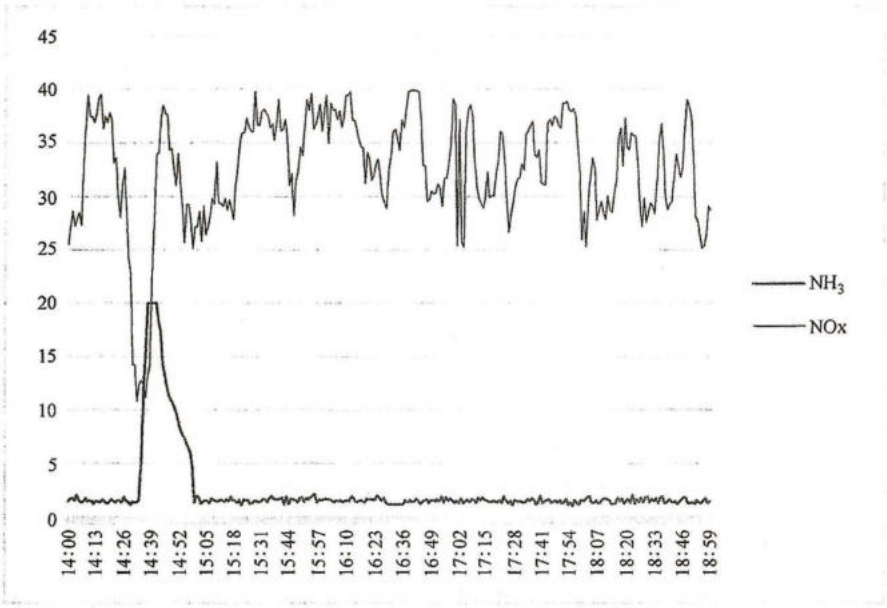


图 6-12 某电厂 2 号锅炉 A 侧烟道喷氨测试数据图

6.5.2 氨逃逸监测应用案例二

脱硝工况中烟气含粉尘量较大，单纯采用多级高精度过滤的方式，容易造成过滤滤芯频繁堵塞，维护周期短。LGA-5500 激光气体分析仪（图 6-13、图 6-14）采样探头采用初级过滤＋气体室气幕吹扫保护方式：探头先粗级过滤（精度为 5μm），同时定期进行探头内外反吹，防止探头滤芯堵塞。气体室采用气幕吹扫保护，在气体室两端的玻片实时采用吹扫气吹

扫隔离保护，防止样气中的粉尘污染玻片，影响正常仪表测量。

系统采用环形射流泵进行采样，采样的流量在 20L/min 以上，可以避免采样管路对氨气的吸附影响，保证系统正常测量；环形射流泵自身孔径较大，可以防自身堵塞；大流量的采样可提高系统的反应时间。系统全程采用高温伴热（大于 220℃），防止氨与样气中的 SO_3 生成铵盐，导致样气失真，同时避免生成的氨盐堵塞系统流路。

激光光谱分析技术方案参见图 6-6。



图 6-13 LGA-5500 微量氨在线分析仪组成

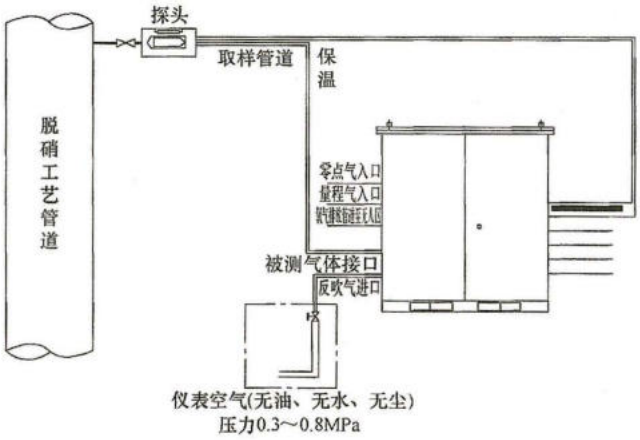


图 6-14 TDLAS 技术用于脱硝 NH3 逃逸监测的在线分析方案

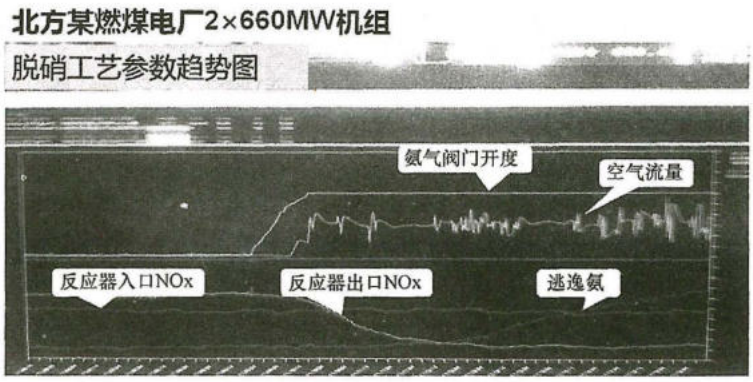


图 6-15 LGA-5500 在北方某电厂的运行情况图

图 6-15 为 LGA-5500 微量氨连续在线监测系统在北方某电厂的运行情况图，其中当喷氨量（绿色）加大时，反应器出口的 NO_x（蓝线）的浓度逐渐降低，与此同步逃逸氨浓度（青线）逐渐升高。

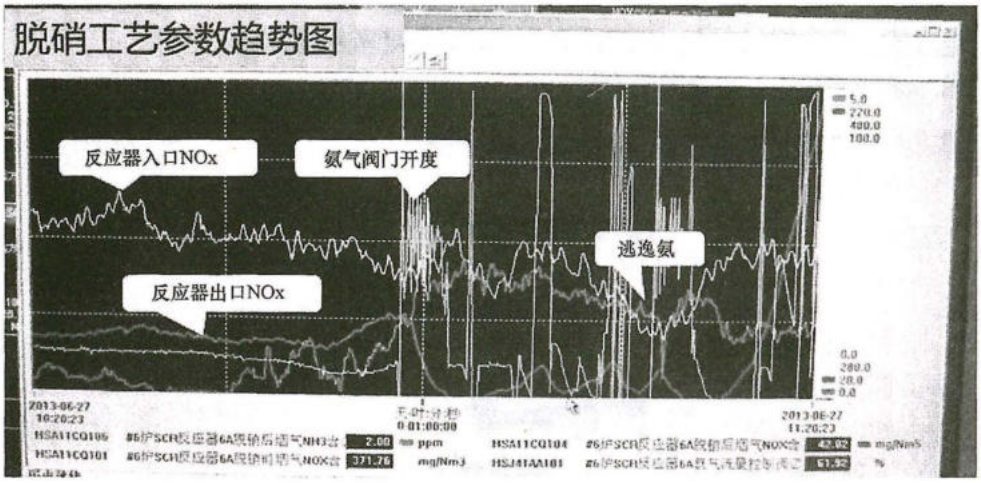


图 6-16　LGA-5500 产品在某电厂的工艺参数趋势图

图 6-16 为 LGA-5500 微量氨连续在线监测系统在南方某电厂的运行情况图，其中当喷氨量（浅蓝色）加大，反应器出口的 NO_x（深蓝色）的浓度逐渐降低，与此同步逃逸氨浓度（红线）逐渐升高。

第二篇　颗粒物 CEMS

第 7 章　原位式颗粒物 CEMS

雾霾让人们对颗粒物导致的空气污染有了最为直观的感受，颗粒物已经成为我国城市大气污染的首要污染物，其主要来源为工业废气、城市扬尘、移动载体尾气等排放输出，其中以固定烟囱排放的烟气颗粒物最为严重。颗粒物 CEMS 系统可以实时有效地监测污染源排放是否符合现行国家标准，对排放浓度和排放总量进行监督、控制，从而客观评价除尘净化装置及污染防治设施的性能和运行情况，为环境质量管理、评估和决策提供科学依据。

随着技术进步和国家对污染物排放控制要求越来越严格，出现了一些新的高效除尘净化工艺，经过这些新工艺处理后，污染物排放浓度大大降低，这对颗粒物 CEMS 系统提出了新的挑战，低浓度、超低浓度污染物连续在线监测已经成为未来发展的主流方向。近十年来，应用在我国固定污染源烟气排放烟气颗粒物在线监测上的方法主要有原位式的光透射法、光散射法、接触电荷转移法等，以及抽取式的光散射法、β 射线法等。其中以高灵敏度、实时性好、能很好适应低浓度、超低浓度监测的光散射法颗粒物监测仪应用最为广泛。

原位式颗粒物 CEMS，其“原位”的含义是对处于烟道内部的颗粒物进行直接测量。适用于烟道内湿度不高、无冷凝结露的非饱和烟气颗粒物监测。

7.1　监测技术

近十年来，随着科学技术的不断发展，颗粒物测量技术得到了较大的发展，目前用于固定污染源排放颗粒物连续监测的原位式仪器主要有光透射法、光散射法、接触电荷转移法等。具体选择哪种测量方法的仪器需要综合考虑安装场合、除尘工艺、运行工况，具体涉及颗粒物浓度范围、颗粒物特性（成分、粒径分布、组分、是否带电）、烟气参数（温度、压力、流量、湿度）、烟气腐蚀性、现场振动、烟道直径、安装点位等多个因素。

7.1.1　光透射法

烟尘颗粒物一般呈现为多孔的不规则形状，由于燃烧过程和除尘过程的影响，实际的烟尘排放或监测口烟尘颗粒的粒径分布是各有不同的，大多数排放口烟尘颗粒的粒径范围在 0～20μm。无论自然状态的颗粒还是烟尘颗粒一般是带电的，其荷电的大小取决于温度、比表面积、含水量及与摩擦碰撞相关的速度等，同时还与颗粒物的物理化学成分及结构相关。

光透射法通过测量光穿过含颗粒物气流后的光强损失，建立手工采样法测定的颗粒物浓度与光强度损失关系的方法测定颗粒物浓度，该方法是早期普遍采用的颗粒物监测方法。

7.1.1.1　测量原理

光透射法是基于朗伯-比尔定律测定烟气中颗粒物浓度的一种方法。朗伯-比尔定律最基本的要求有两点，一是光源为准直单色光，它在理想传输路径上光强没有损失，二是待测路径上介质分布均匀且具有相同单位长度的光衰减系数 α。为此，入射光强 I_0，穿过长度为 L 的均匀介质后，其光强 I 满足：

$$I = I_0 e^{-\alpha L} \tag{7-1}$$

式中 I——光强，cd；

I_0——入射光强，cd；

e——自然系数；

α——光衰减系数；

L——介质长度，m。

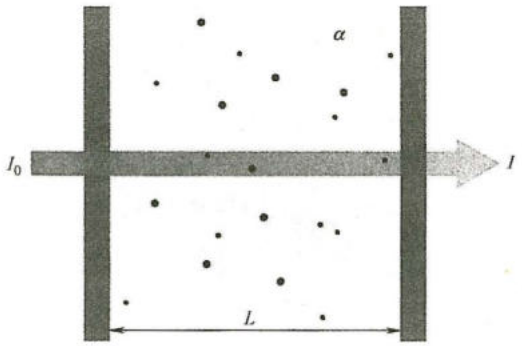


图 7-1 朗伯-比尔定律光透射法

在测量路径上，颗粒物分布均匀、成分和光学特性稳定的情况下，其光衰减系数 α 由颗粒物的光吸收、散射特性决定，且与颗粒物质量浓度 C 成正比，$\alpha=kC$：光强度变化可近似认为符合朗伯-比尔定律：

$$I=I_0 e^{-kCL} \tag{7-2}$$

$$C=\ln(I_0/I)/(kL) \tag{7-3}$$

式中 I——光强，cd；

I_0——入射光强，cd；

e——自然系数；

L——介质长度，m；

C——颗粒物浓度，mg/m^3；

k——比例系数；

ln——自然对数。

上式即为光透射法测定颗粒物浓度的基本公式。在具体工程实现中，I_0、I 可实时测量得到。设备安装后，测量路径长度 L 确定不变，可合并到系数 k 中。而 k 用手工采样法测定的颗粒物浓度标定得到。

7.1.1.2 仪器结构和特点

采用光透射法的仪器有单光程和双光程两种类型的系统。两者的区别在于前者的光源和检测器分别安装在烟道的两侧，后者的光源和检测器安装在烟道一侧，光源发出的光通过安装在烟道另一侧的反射镜反射到探测器中，这种方法增加了光程，可以提高仪器的灵敏度。

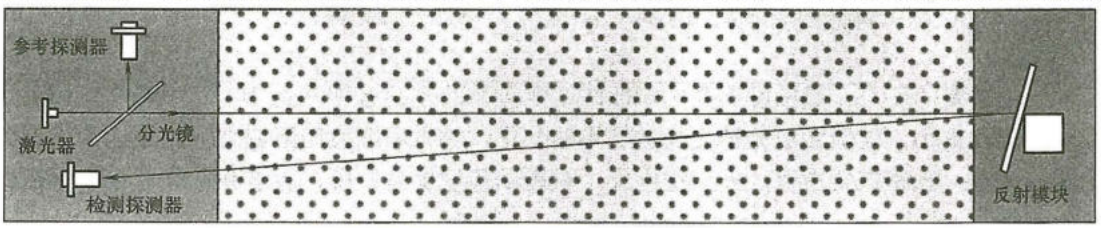


图 7-2 双光程光透射法

现以双光程仪器为例，对光透射法仪器的结构进行介绍。

仪器由激光器、分光镜、反射模块、参考探测器、检测探测器组成。激光器发射的特定波长的光被分光镜分成反射和透射两束光。反射光到达参考探测器，探测器探测到的光强记为 I_0，透射光穿过含粉尘烟道后被安装在对侧的反射模块反射后到达检测探测器，光强记为 I，通过手工比对测试标定，即可按照透射法颗粒物浓度计算公式计算出颗粒物浓度。图 7-3、图 7-4 为 LDM-100 的实物照片和安装要素图。

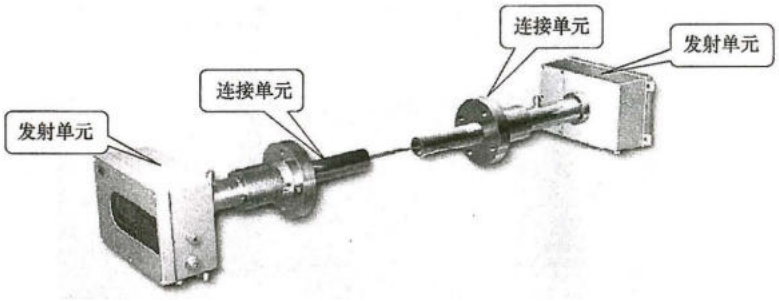


图 7-3　LDM-100 实物图

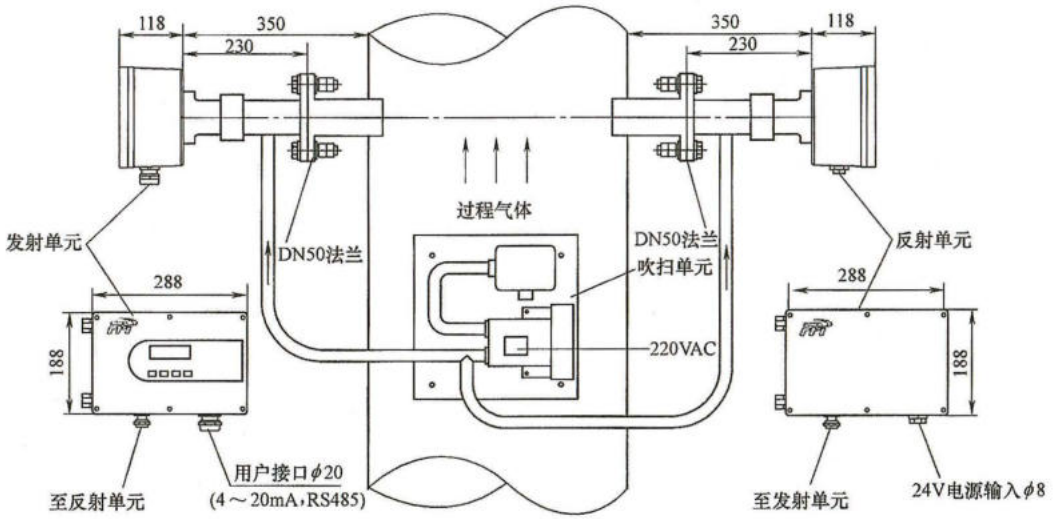


图 7-4　LDM-100 安装要素图

与其他方法相比，透射法颗粒物监测仪得到的是测量路径上颗粒物的平均浓度，属于线测量，颗粒物在检测断面上分层比较严重时其测定结果比点测量设备要好。受限于检测探测器的动态范围，光透射法的灵敏度要低一些。因此适用于烟道直径大、粉尘浓度高（大于 300mg/m^3）、粉尘粒径和组分变化不大、湿度低的场所，如水泥厂、电厂等行业颗粒物浓度的监测。

该法主要的不足：灵敏度不高，对低浓度颗粒物的光透过率接近 100%，透射光相对于入射光变化很小，仪器无法分辨光强这么小的变化，导致系统检出限偏高。此外，因仪器分置烟道两侧、光路需要准直，安装难度大，对震动环境更是敏感，零点和量程标定也是需要考虑的问题。

7.1.2 光散射法

针对当前颗粒物排放浓度往低浓度、超低浓度发展的趋势，传统的光透射式颗粒物浓度监测装置因其灵敏度及安装要求高等不足，已经很难满足目前的监测要求。针对这种状况，高灵敏度的光散射法应运而生，越来越多地被应用于烟气颗粒物浓度监测中。

7.1.2.1 颗粒物的光散射特性

光照射颗粒物时，会产生反射、折射，同时激发颗粒物表面、内部偶极子产生二次波辐射，这些波相互叠加，形成把入射光向四面八方散射的现象，统称为颗粒物的光散射（图 7-5）。

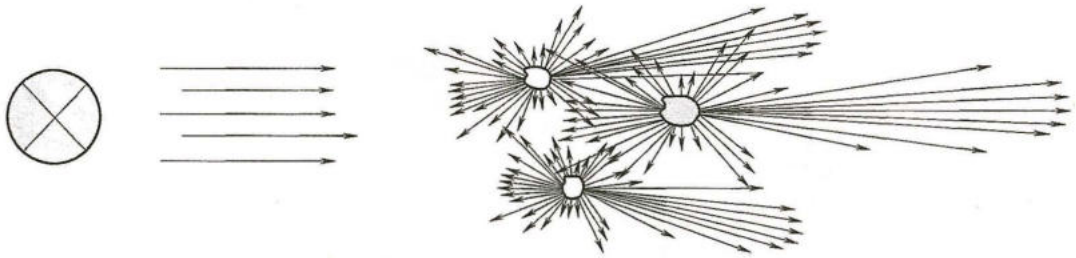


图 7-5 颗粒物的光散射

烟气中颗粒物粒径范围一般在 0.1～10μm，当入射光波长范围在 400～800nm 时，对这样的粒径/波长比，其散射光强度可用 Mie 散射理论描述。对理想光滑的球形颗粒，Mie 散射理论可以得出在单色平行光照射下麦克斯韦方程的精确解。由吴金雷等人的研究给出了折射率 1.54、粒径 2μm、单个球形颗粒受波长 635nm 单色光源照射时，不同散射角对应的理论计算结果（图 7-6）。可以看出，散射光在各个方向均有分布，不同方向的散射光强度不同，前向散射高于后散射光强约 1～2 个数量级，这也是前散射仪器的灵敏度明显优于后散射仪器的主要原因。

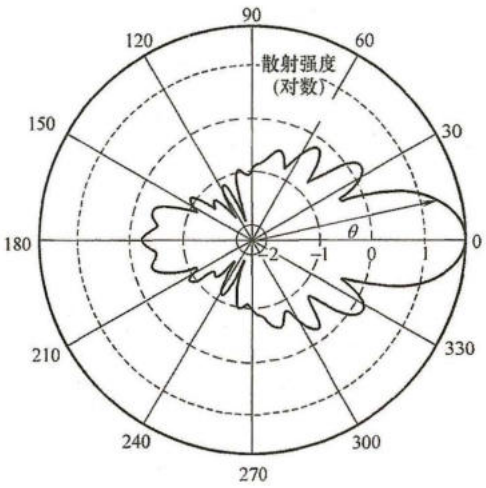


图 7-6 散射光强与方向的关系

实际工程中，颗粒物并非理想的光滑球形粒子，同等质量、不同形状、不同组分的颗粒物所呈现的光散射特性并不相同，而且差异很大。但不规则形状粒子光散射特性的理论分析太过复杂，目前还只能用球形粒子近似，这种近似导致光散射法对相同质量、不同属性的颗粒物的测定会产生较大的误差。为了提高测量精度，工程上需要针对具体排放源的颗粒物属性，用手工采样重量法的测定结果对散射法的测定结果进行比对校正。

7.1.2.2 测量原理

按照检测的散射光角度的不同可分为前向散射、后向散射和边向散射三种类型，目前在烟道颗粒物在线监测中使用最多的是前向散射和后向散射类型。

光散射法测量原理是将一束光线射入待测烟气中，激光束与烟尘颗粒相互作用产生散射，散射光的强弱与烟尘的散射截面成正比，当烟尘浓度升高时，烟尘的散射截面积成比例增大，散射光增强，通过测量散射光的强弱，可以得到烟尘中烟尘颗粒物的浓度。需要注意

的是，光散射法会受到颗粒物特性的影响，如粒径、颜色和透光度等，需要将原始光强和通过采样称重法比对得到的系数进行计算后得到 mg/m^3 的浓度值。

后散射法是接收器与激光器在同一侧的测量方法（图 7-7）。使用这种测量方法需要特别注意的是烟道壁反射问题，如果调整不当，光源的光束与对面烟道壁相交时的反射信号进入探测器会严重影响仪器的工作。对于小直径烟囱尤其要注意这个问题，并且随着烟道壁污染或粉尘结块日益严重，传感器的精度也会下降。

为了解决上述问题，有些品牌的后散射粉尘仪使用了双检测器技术，利用光线和检测器之间的夹角，实现一个检测器只接收背景光强，一个检测器接收背景光和颗粒物散射光之和，通过相减计算得到准确的颗粒物散射光强，从而实现高精度准确测量（图 7-8）。

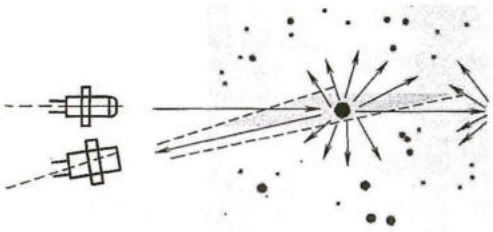


图 7-7 后散射光路示意图

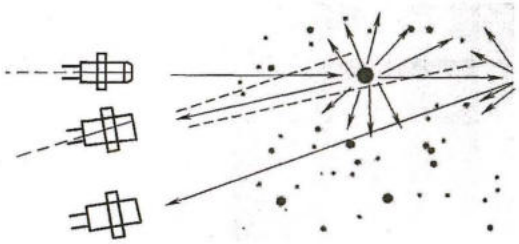
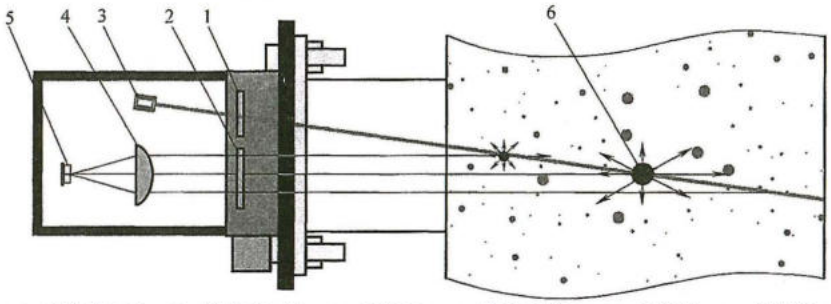


图 7-8 双检测器后散射光路示意图

7.1.2.3 仪器结构和特点

（1）后向散射仪器

LSS2004/LSS2014 系列产品属于后向散射仪器，其光学系统主要由光源、挡尘镜片、聚光透镜组成。光路示意如图 7-9 所示。高稳定调制激光信号穿越烟道，照射烟尘粒子，被照射的烟尘粒子反射激光信号，反射的信号强度与烟尘浓度成正变化。通过检测烟尘反射的微弱光信号，即可计算出烟道烟尘的浓度。



1—发射窗口片；2—接收窗口片；3—光源 P_0；4—聚焦透镜 L；5—探测器；6—颗粒物

图 7-9 后散射仪器光路示意图

激光源输出功率为 Po，经窗口镜片衰减 K_1 后照射浓度为 C 的烟尘颗粒，如果烟尘颗粒的等效散射系数为 K_2（该系数与烟尘颗粒的组分、结构形状、颜色、姿态相关），烟尘散射的功率为 $Po\times K_1\times K_2\times C$，穿过窗口镜片后的功率为 $(Po\times K_1\times K_2\times C)\times K_1$，再经过汇聚增益为 K_3 的透镜 L，接收到的散射光功率 Pr 为：

$$Pr=Po\times K_1\times K_2\times C\times K_1\times K_3=C/A \tag{7-4}$$

式中 Pr——散射光功率，mW；

Po——输入光功率，mW；

K_1——窗口镜片衰减系数；

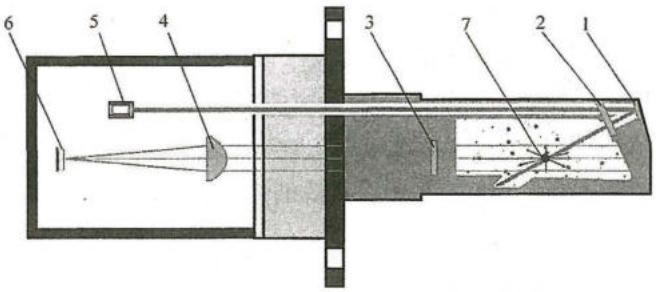
K_2——烟尘颗粒的等效散射系数；

K_3——透镜汇聚增益系数；

C——烟尘颗粒浓度，mg/m^3；

A——参考浓度系数。其中，系数 A 可通过手工采样法测定的颗粒物浓度标定得到，从而根据检测到的 Pr 可计算出烟尘浓度值 C。

(2) 前向散射仪器



1—反射镜；2—发射窗口片；3—接收窗口片；4—聚焦透镜；5—光源；6—探测器；7—颗粒物

图 7-10 前散射仪器光路示意图

前向散射仪器的光学系统如图 7-10 所示，主要由光源、反射镜 G_1、发射窗口片 G_2、接收窗口片 G_3 与聚光透镜组成。

激光源输出功率为 Po，经反射镜衰减 K_1 和发射窗口片衰减 K_2 后照射浓度为 C 的烟尘颗粒，如果烟尘颗粒的等效散射系数为 K_3（该系数与烟尘颗粒的组分、结构形状、颜色、姿态相关），烟尘颗粒散射的功率为 $Po\times K_1\times K_2\times K_3\times C$，这部分光穿过接收窗口片后衰减 K_4，经聚焦增益为 K_5 的透镜后，探测器接收到的散射光功率 Pr 为：

$$Pr=Po\times K_1\times K_2\times K_3\times C\times K_4\times K_5=C/A \tag{7-5}$$

式中 Pr——散射光功率，mW；

Po——输入光功率，mW；

K_1——反射镜 G_1 衰减系数；

K_2——发射窗口片 G_2 衰减系数；

K_3——烟尘颗粒的等效散射系数；

K_4——接收窗口片衰减系数；

K_5——透镜汇聚增益系数；

C——烟尘颗粒浓度，mg/m^3；

A——参考浓度系数。

其中，系数 A 可通过手工采样法测定的颗粒物浓度标定得出，从而根据检测到的 Pr 计算出烟尘浓度值 C。

光散射法利用颗粒物对光的散射作用检测颗粒物浓度，灵敏度高，动态范围大，低浓度场所应用较多。光散射法一般为探头式，安装在烟道单侧即可，不需要准直等，安装方便；一般具备自动零点和量程校准功能；灵敏度高，最低量程可以做到 0～5mg/m^3，适合在低浓度的小直径烟道上使用。

与光透射法相比，光散射法在减少对颗粒物粒径分布和颗粒物折射系数的依赖性方面有较大改善，但是水滴对测量精度影响较大。三种散射法相比较，在一定的颗粒物粒径范围内，前散射法对颗粒物的粒径和折射系数的变化敏感度最小，边向散射最敏感。此外，高粉尘烟道中，散射光的衰减较高，测量的非线性增加，影响测量精度；因此该方法适合粉尘浓度低、粉尘粒径和组分变化不大且湿度低的场所。

7.2　安装调试要点

7.2.1　安装

7.2.1.1　位置选择

选择正确的安装位置是仪器有效运行的前提，安装位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位，设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于 $4D$（D 为烟道直径）和距上述部件上游方向不小于 $2D$ 处。当安装位置不能满足上述要求时，应尽可能选择在气流相对稳定的断面，但安装位置前管段的长度必须大于后管段的长度，且应选择烟气流速大于 5m/s 的位置。正确安装位置如图 7-11 所示。

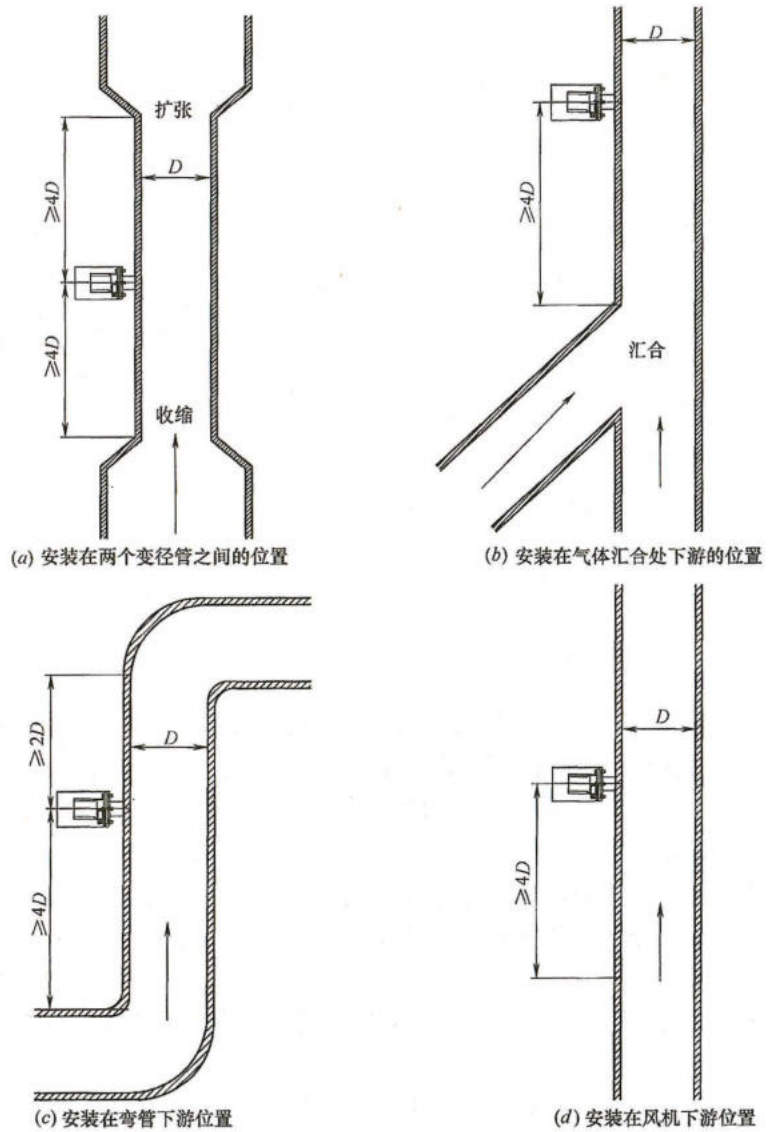


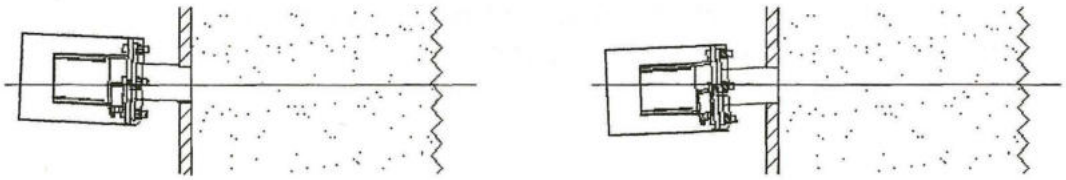
图 7-11　安装位置示意图

同时，安装位置避免存在腐蚀性、有毒有害气体；安装位置与安装、维护通道应该安全、易于到达；信号线的排布应远离其他电磁设备，避免相互干扰；为了抗雷电、浪涌等干扰的冲击，安装点附近需设置接地电阻不大于10Ω的保护地。

7.2.1.2 预埋法兰

烟道上需要事先开孔，固定预埋法兰，注意通径、法兰螺栓孔心距与仪器相关参数的匹配。以LSS2004/LSS2014系列为例，预埋法兰通径100mm、孔心距130mm。

安装后的设备与烟道连接口应稍微向下倾斜2°～5°。切忌向上倾斜，以避免仪器入口冷凝、积水，影响测量的精度甚至造成仪器的损坏。



(a) 向下倾斜　　(b) 向上倾斜

图7-12 预埋法兰焊接角度示意图

7.2.1.3 吹扫气

吹扫气为仪器提供洁净的保护气，用于防止光学窗口镜片污染。LSS2014提供两种保护气接口（分别为压缩空气、高压风机），用户可根据安装现场气源配置情况选配。

吹扫气的温度不宜过低，特别是在冬季，因待测烟气含有水汽，吹扫气覆盖区域与烟气混合可能会导致吹扫区域凝露而形成水雾，这会严重影响测量结果。所以对冬季环境温度低的使用场景，强烈建议加装吹扫气加热装置，确保过滤后洁净吹扫气的温度维持在烟气露点温度10℃以上。

7.2.1.4 接线

仪表间与安装地点的控制电缆，应选择带外护套的多芯电缆，线缆型号规格、详细接线说明参见仪器的安装使用说明书相关内容。

7.2.2 调试

7.2.2.1 确定仪器光程

选择好安装位置后，根据安装点的烟道内径来确定仪器的光程。光程确定原则为激光束与接收区域的水平交点距离安装侧烟道内壁距离不小于烟道直径的30%。当烟道或烟囱内径小于1.5m时，为避免对面烟道壁对激光的反射干扰测量数据，需加配光阱。

7.2.2.2 上电常规检查

安装完毕，按照产品使用说明书检查接线无误后即可通电，执行以下检查：

(1) 激光输出是否正常，工作模式切换是否正常，模式切换指示是否正常，吹扫气是否正常。

(2) 定性检查：从安装法兰取下仪器主机，将激光束指向由近往远，仪器电流环输出值应能出现4～20mA。

(3) 设置仪器在“零点”模式，仪器输出值应符合产品技术规格中关于“零点”的要求。

(4) 设置仪器在“量程”模式，仪器输出值应符合产品技术规格中关于“量程”的

要求；

(5) 设置仪器在“工作”模式，在无颗粒物排放期间，记录该测量值，该值为背景干扰，应从测量值中扣除。

7.2.2.3 相关校准

(1) 完成上电常规检查项目以后，仪器开始168h连续运行。

(2) 仪器连续正常工作168h以后，进入72h调试检测阶段，在此期间，用手工采样重量法的测定结果对仪器的测定结果进行校准，获取一元线性方程 K、B 值，将仪器输出值从无量纲的散射光强度转换为单位为 mg/m^3 的颗粒物浓度。

(3) 特别提示：颗粒物污染物与气态污染物连续在线监测相比，最大的难点在于不存在与被监测点排放属性完全相同的标准颗粒用于对仪器进行标定和校准，实验室所做任何校准只是模拟某种典型情况，与实际现场相差可能会很大。因此，相关校准只能在安装现场对利用实际排放的颗粒物，按照《固定污染源烟气（SO_2、NOx、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017的附录A第A.3条进行，其得到的一元线性回归方程的斜率 K 取值区间，将远大于气态污染物利用标准气体校准得到斜率 K 的取值区间。

7.3 日常运营要点

仪器运营应由经过培训、具备运营上岗资质的仪器操作者负责，原位式仪器相对简单，在日常运营中主要关注以下几点：

(1) 查看近几天仪器测量结果，测量值应与工况有强相关、符合逻辑的趋势变化。

(2) 检查窗口镜片是否被污染，若有污染需要清洁。

(3) 定期更换吹扫过滤器，确保吹扫气洁净。

(4) 检查窗口镜片是否存在冷凝积水印记，若存在，需要配置吹扫气加热装置。

(5) 电路功能检查：仪器应能在“零点、量程、工作”模式之间任意切换。

7.4 典型应用案例

截至目前，后散射法产品在实际应用中占有绝大多数安装量，其次是前散射法产品、透射法产品；电荷法测尘仪一般用于除尘工艺控制，几乎不用于环保运维管理的排放口。在十三五实施超低排放改造之前，量程选择大多为200～500mg/m^3，典型代表产品是LSS2004型颗粒物测量仪。超低排放改造后，开始安装前散射抽取式颗粒物测量仪，由于抽取式测量成本较高，部分不饱和烟气工况条件则仍然选用量程为20～50mg/m^3的原位式超低后散射或前散射产品。

7.4.1 后散射法

7.4.1.1 产品简介

以LSS2004系列产品烟尘仪为例，主机如图7-13所示，直接安装在烟道焊接的预埋法兰即可，输出4～20mA或RS485信号，接入数采仪或仪表间CEMS系统数据采集器。

颗粒物监测仪运维的主要工作是零点和满量程校准。原位旋钮式校准，校准器为仪器不可分割的一部分，开盖后旋钮转到不同的位置对应工作、零点、满量程3种模式；较早的仪器是翻盖插入式，校准器需要运维人员妥善保管，校准时需携带校准器及内六角扳子进行操

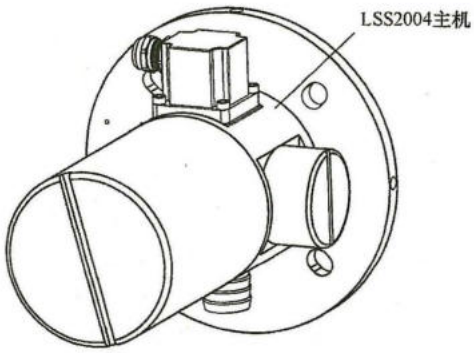


图 7-13 LSS2004 外形图

作。最早的仪器则需要从法兰上拆下仪器主机，再插入校准器，目前保有数量非常少。

翻盖插入式校准方式，请注意以下几点：

插入校准器时，操作人员注意操作的一致性，确保重复性良好，避免机械误差。

校准时请首先检查校准器及仪器的窗口镜片是否洁净，如果有积尘请先清洁。

校准器是光学器件，应装入包装盒妥善保存在干净的环境，避免污染或丢失。

防爆型号 LSS2004-EX 除主机以外，加配防爆箱，如图 7-14 所示。

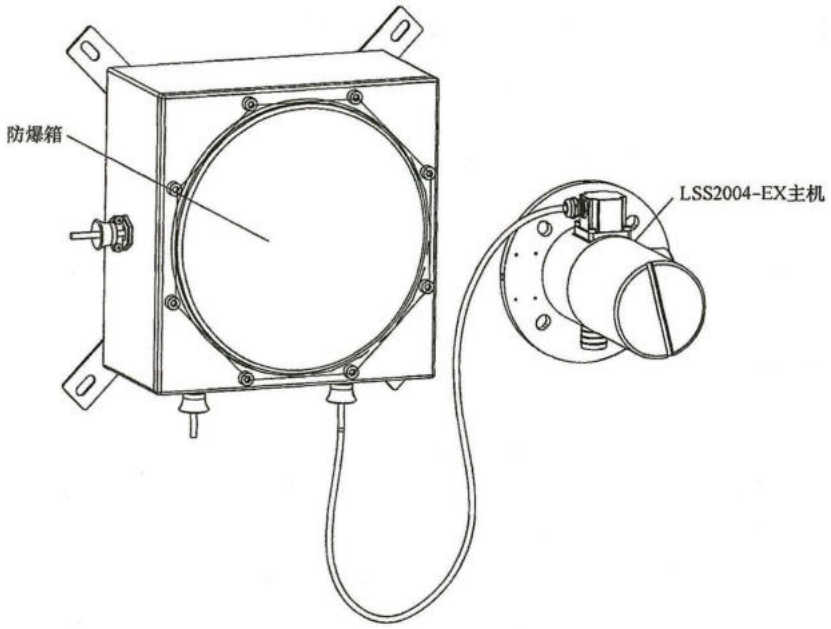


图 7-14 LSS2004-EX 外形图

LSS2004 主要技术指标如下：

测量性能：

测量范围：(0～100、500、1000、2000) mg/m^3，可设定；

零点漂移：±2%F. S. /24h；

量程漂移：±2%F. S. /24h；

示值误差：±15%（称重法）；

响应时间：≤10s。

电源要求：

直流：24V/0.3A（LSS2004）；

交流：220V±10%（LSS2004-EX）。

LSS2014为超低量程原位式后散射烟尘仪，测量范围0～20mg/m^3，采用自动校准方式，同时提供手机APP进行手动零点和量程校准。

LSS2014系统由主机、接口扩展单元两个部分组成，如图7-15所示。

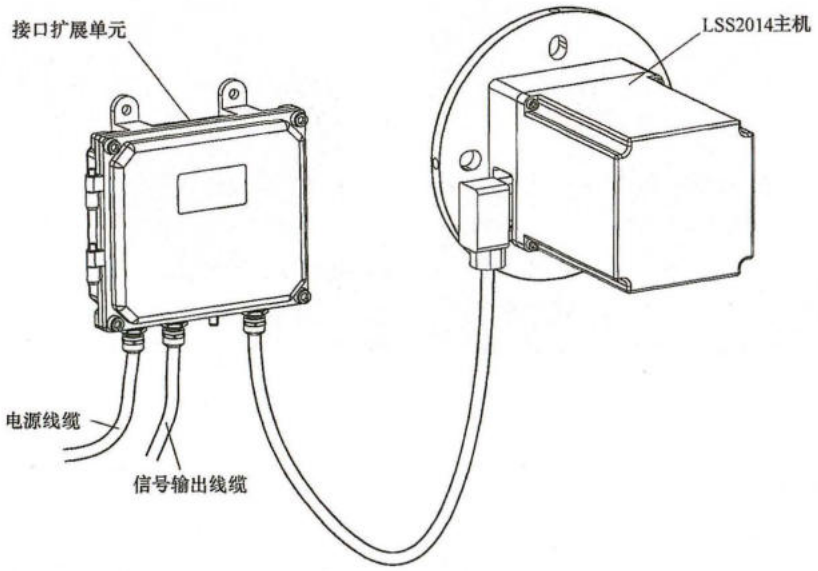


图7-15 LSS2014外形图

接口扩展单元完成为LSS2014主机供电、数据采集和用户接口功能。

吹扫系统为仪器提供保护气，用于防止光学窗口镜片被污染。LSS2014提供2种保护气接口（分别为压缩空气、高压风机），用户可根据安装现场气源配置情况选配。

吹扫气的温度不宜过低。例如：吹扫气温度为0℃，测量区待测烟气为高温、含湿烟气，吹扫气覆盖区域与烟气混合可能会导致吹扫区域出现凝露而形成水雾，严重影响测量准确性和稳定性。为了保证测量高温气体时数据的准确性和稳定性，对冬季环境温度低于0℃的安装使用场景，强烈建议加装加热吹扫气装置，如GH100气体加热单元。

7.4.1.2 典型应用

对于光学仪表，吹扫系统的正常运行极为关键。良好的吹扫系统在仪器的窗口形成气幕，避免镜片被烟道烟气污染、保持光路的畅通，同时可保护仪器免遭烟道烟气热侵蚀，延长使用寿命。吹扫系统应保持24h工作，以减缓光学元件被污染的速度。维护注意事项：①检查连接软管是否牢固，无松脱，无积水/油、积尘现象；②检查空气过滤器的工作状态，定期清洁或更换过滤器，保证足够的清洁气。

（1）反吹气压力不足

某钢厂，现场环境恶劣，现场为正压烟道，烟气中含有腐蚀性气体；由于反吹气压力不足，无法形成保护气幕，导致窗口镜片被严重腐蚀，对测量造成干扰（图7-16）。

解决办法：增加反吹气压力。

该现场因正压较大，现场除压缩空气提供仪器的反吹气以外，另外加装了反吹法兰，增加了一台高压风机，形成两级反吹系统。整改后，测量数据可真实反映现场工况。

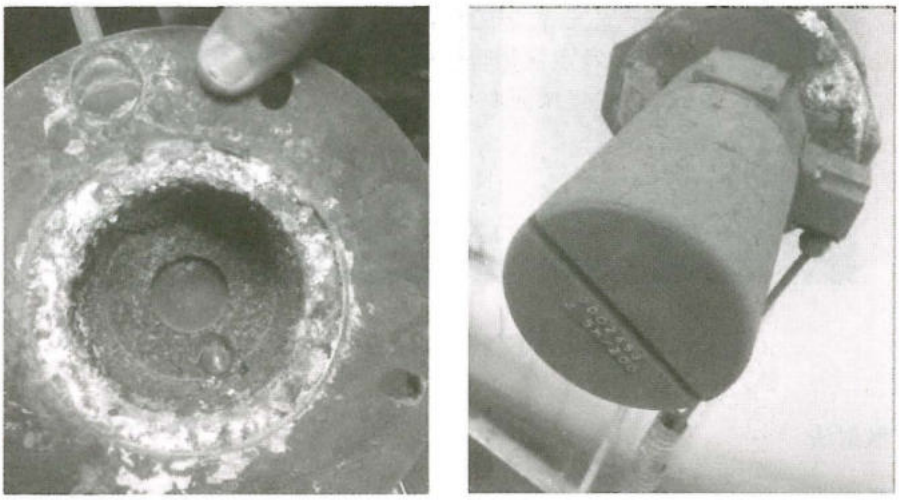


图 7-16 烟气含有腐蚀性气体、反吹气量不足导致镜片腐蚀

(2) 反吹气含油含水

某热电厂，由于反吹气中含油含水，造成镜片污染，测量数据偏大超标（图 7-17）。

解决办法：加装了油水分离器对反吹气除油除水。整改后，测量数据可真实反映现场工况。

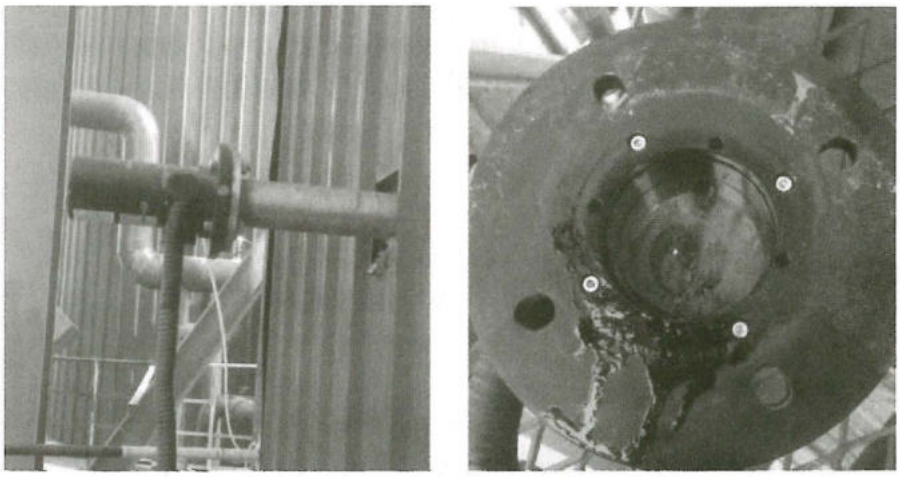


图 7-17 反吹气中含油含水造成的镜片污染

(3) 反吹管弯折导致反吹不足，镜片污染

某垃圾综合处理中心，垃圾焚烧布袋除尘现场反馈测量值满量程，现场检查发现反吹气管弯折，反吹气量严重不足，无法形成保护气幕导致镜片污染（图 7-18），现场清洁镜片后，固定反吹气管保持气流通畅，仪器测量稳定正常。

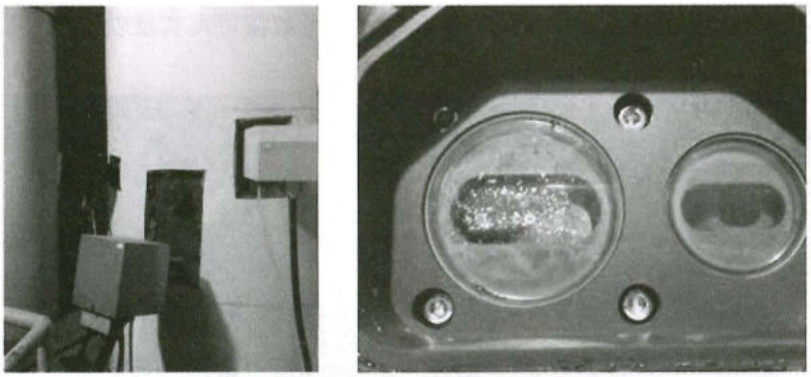


图 7-18　反吹气管弯折导致镜片污染

7.4.2　前散射法

7.4.2.1　产品简介

LFS200 超低量程原位式前散射烟尘仪，测量范围最小可到 0～20mg/m^3。LFS200 适用于特别小的烟道，当烟囱或烟道内径小于 0.8m，烟道内会产生复杂的杂散光干扰，建议选择前向散射烟尘仪产品。前散射法的粉尘仪测量区域为探头中间的空隙区域，测量区域比较小，应安装在颗粒物分布均匀流速稳定的区域。为保证仪器长时间稳定工作，需使用反吹气吹扫，保障烟气不进入粉尘仪内部。

7.4.2.2　典型应用

北京某药厂烟气总排口建在车间房顶，烟气自生产车间被收集入烟道内，总排口前端安装除尘工艺，随后排放入大气。现场烟囱直径 0.3m，高度 0.4m，烟囱材质为钢制。排放点位不满足前 4D 后 2D 的要求，开孔后无法焊接法兰，烟囱的银色内壁也会对测量造成干扰。

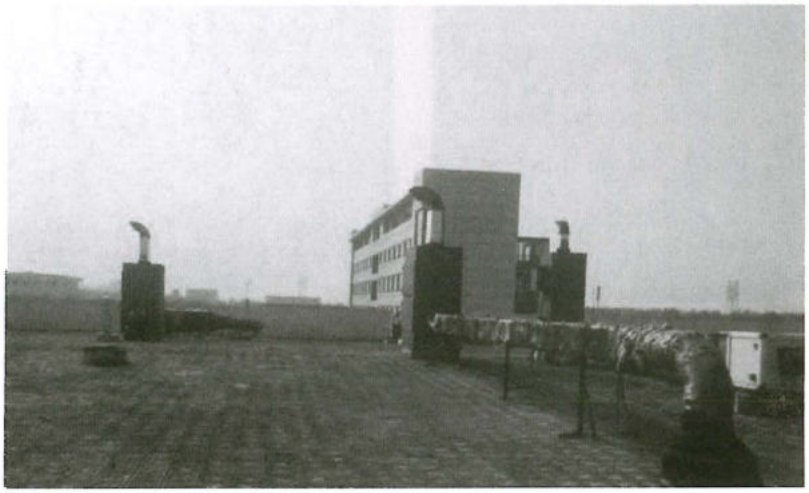


图 7-19　北京某药厂烟气总排口

对现场进行改造（图 7-20）：烟囱增加高度与厚度，满足前 4D 后 2D 的要求，开孔后

可牢固焊接预埋法兰，涂刷深色的防腐涂层，最大程度减少杂散光的干扰。安装完成后，测量数据稳定，能够有效反映出现场工况变化。

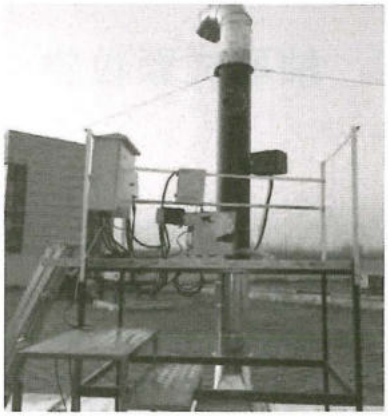


图 7-20 烟囱现场改造

第 8 章　抽取式颗粒物 CEMS

8.1　监测技术

针对湿法脱硫后的饱和湿烟气应用场合，原位式颗粒物监测仪器已经不再适用。抽取式颗粒物 CEMS 系统应运而生。针对饱和湿烟气测量问题，目前最常用的解决方法是将烟气从烟道抽取出来后，通过加热或稀释的方法将饱和湿烟气维持在露点温度以上，使被测烟气不含液态水雾，然后再采用光散射方法或 β 射线方法进行颗粒物浓度的测量。特别适合低浓度、超低浓度烟气颗粒物的连续在线监测。

8.1.1　光散射法（直抽法）

8.1.1.1　系统结构

抽取式颗粒物测量仪一般以前散射法颗粒物测量仪作为核心主机，配套将湿烟气处理成非饱和烟气的抽气加热系统。LFS1000-MO/LFS800 由一体化探头 MP、综合处理单元 IPU、风机单元 FU 构成，如图 8-1 所示。

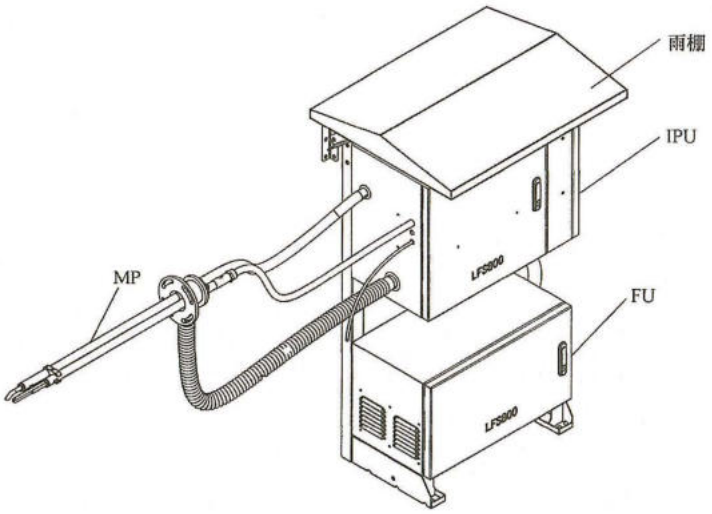


图 8-1　LFS800 外形结构

一体化探头 MP，组合烟道流速测试、颗粒物采样功能，是等速采样的保障。MP 安装于被测烟道上，直接抽取采样烟道内的含尘饱和湿烟气送往 IPU。

IPU 通过内部电控单元完成对饱和湿烟气的等速采样、加热、颗粒物浓度测量等功能；IPU 主要由电控单元、差压传感器、进气阀、出气阀、射流泵、温度传感器、激光分析模组、温压流模块构成。

FU 由空气过滤器、风机构成，为 IPU 单元提供一定压力、流量的洁净气体。

系统组成如图 8-2 所示。

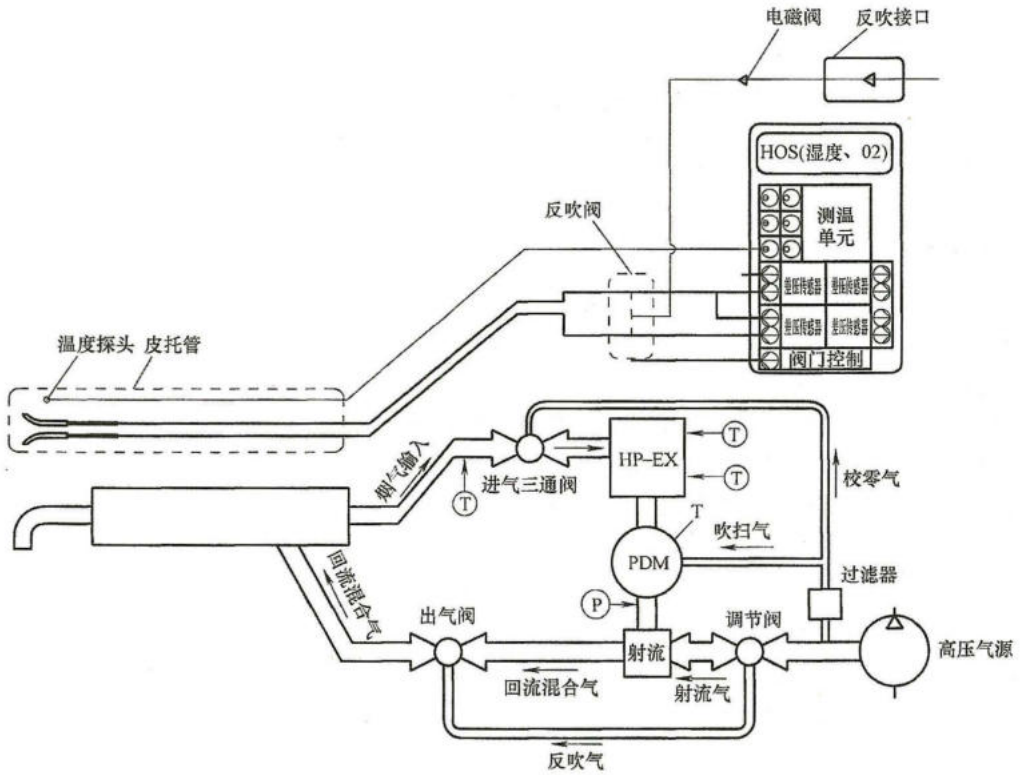


图 8-2 直接抽取法工作原理图

8.1.1.2 特点

(1) 采用多种先进技术，包括相关噪声对消技术、亚微瓦级激光发射功率稳定技术、极低噪声 TIA、干扰控制与信号完整性设计和抗恶劣环境设计技术等，提供快速、可靠和准确的测量值。

(2) 超低量程，超高灵敏度，最小量程（0～5）mg/m^3，最低检出限 $0.01mg/m^3$。

(3) 直接抽取，设备简单，没有稀释误差。

(4) 测速、采样一体化探头，实时跟踪烟道流速，完美实现等速采样。

(5) 饱和湿烟气传输过程进行连续加热恒温，确保被测烟气温度远高于其露点温度，有效防止烟气冷凝产生的测量误差和对取样回路的腐蚀。

(6) 高可靠、小体积、大扭矩进气阀和出气阀，确保在强污染环境的可靠运行。

(7) 采用可控射流抽取技术，安装简单、不易堵塞、结构紧凑、抗恶劣环境、维护量小。

(8) 独有设备自诊断功能，及时给出故障和参数异常提示。

(9) 断电后利用备用电池供电，关闭阀门，隔离烟道与仪器，有效保护仪器内部机构。

8.1.2 光散射法（稀释法）

8.1.2.1 系统结构

稀释抽取法前散射粉尘仪主要分为两大部分，即稀释取样测量模块和控制显示模块。

取样测量模块通过安装法兰，直接安装在烟道上。主要由玻璃纤维增强塑料防雨罩、探

杆、取样管喷嘴及其检测系统和温度、流量检测装置等组成。

控制模块主要由防水机柜、电气安装板、显示面板、高压风机、空气过滤器组件、等速调节执行器、连接电缆等组成。控制模块具有参数设置、控制设备加热、状态切换、信号采集、信号计算及输出等功能。

8.1.2.2　特点

稀释抽取法湿法粉尘仪是一个高度敏感的连续测量系统，采用抽取法，稀释加热，根据光散射原理测量粉尘浓度。

粉尘仪中的稀释抽取法指的是在被测烟气受到光学传感器测量之前将烟气和高温洁净空气混合，按照一定比例进行稀释的采样方法。通过射流泵将含尘含湿烟气抽进取样探杆，在探杆前端与高温稀释气混合，经过探杆全程加热迅速升至设定温度（高于烟气露点）。该采样方法可把烟气的腐蚀性和湿度迅速降低，当烟气进入测量腔时，烟气温度高于露点，避免采样过程中堵塞污染管路和光学测量时的水雾干扰。烟气稀释装置还可利用原稀释用高温洁净气间断性的对探头和管路进行反吹，减少人工维护量和等速采样干扰。在处于反吹自清洁的状态时，同时控制粉尘传感器进入自动在线零点及满量程校验状态，保障传感器测量精度。取样管路上的球阀能够进行测量和反吹自清洁状态的切换，控制周期可以设定，并且在设备断电后，备用电源会启动并让球阀切换到反吹清洁状态阻断烟气进入稀释抽取测量模块。稀释加热管路中添加等速采样调节阀，当外界流速信号接入控制模块后，通过采样流量控制实现采样流速与外界流速一致的功能。高温混合气进入测量室，由高精度粉尘测量传感器进行测量，并得到原始散射光信号（图 8-3）。

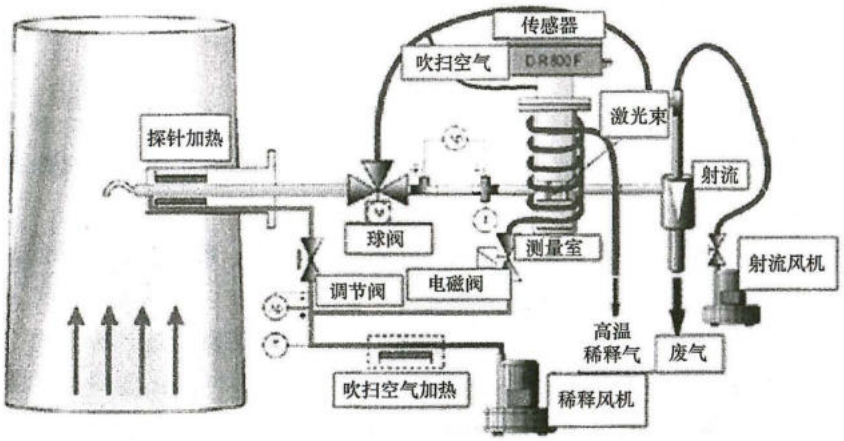


图 8-3　稀释抽取法工作原理图

原始散射光信号（Cal signal，散射光强度）通过公式计算为原烟气粉尘浓度，计算方法为将原始光强信号根据稀释气与抽取烟气比例换算后代入粉尘校准公式进行计算，因此数学关系如下：

$$C_{i\cdot B}=\left[\frac{Cal\cdot F}{F-C\cdot F_D}\right]+D \tag{8-1}$$

式中　$C_{i\cdot B}$——粉尘浓度，mg/m^3；

Cal——测量信号，V；

F，F_D——体积流量，m^3/h；

D——粉尘校准常数；

C——设备校准常数。

8.1.3 β射线法

8.1.3.1 测量原理

β射线是从核素放射性衰变中释放出来的高速电子流，电离本领小，穿透能力大。天然放射系列放出的β粒子能量在0～4Mev。

β射线方法工作原理是通过β射线衰减量，测量采样期间增加的颗粒物质量。当β射线通过介质时，β粒子与介质中的电子相互碰撞损失能量而被吸收。在低能条件下，吸收程度取决于介质的质量，与颗粒物粒径、成分、颜色及分散状态无关。被测烟气被采样泵吸入至采样管，经过滤膜后排出。颗粒物沉积在采样滤膜上，当β射线通过沉积颗粒物的滤膜时发生能量衰减，通过对衰减的β射线能量测定，可以计算出颗粒物的浓度。

β射线法颗粒物CEMS就是利用β射线衰减原理。颗粒物在线分析仪将烟气以等速采样的方式采入系统中，使烟气中的颗粒物沉积在监测滤纸上，通过左右移动滤纸带监测采样前后的β通过滤纸的β射线离子数，经过分析处理后获得烟气中的颗粒物浓度。

颗粒物质量浓度按式（8-2）计算：

$$C=-\frac{S}{\mu V}\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{8-2}$$

式中 I_0——单位时间内β射线穿过空白滤纸的粒子数；

I——单位时间内β射线穿过采样后滤纸的粒子数；

μ——质量衰减系数，cm^2/mg；

C——质量浓度，mg/m^3；

S——滤纸表面采样尘斑面积，cm^2；

V——采样气体体积，m^3。

8.1.3.2 仪器结构和特点

（1）基本结构

β射线法颗粒物CEMS主要由颗粒物稀释采样系统、光散射颗粒物监测系统、β射线监测系统、供气系统数据采集与仪器控制系统等组成。β射线法颗粒物CEMS整体结构如图8-4所示。

系统整体工作流程：通过颗粒物采样系统的采样嘴、全程高温采样探头、供气系统、流量控制单元，对样气进行等速采样。抽取样气，使其经过光散射监测系统，检测通过气室的样气浓度实时测试出烟气中颗粒物浓度。同时，β射线检测模块也进行采样、捕集、传动和分析，样气中的颗粒物被采集放置于14Cβ射线源和G-M计数器之间的滤纸上，探测器检测β射线通过滤纸后的强度，经过控制模块、数据采集模块对获得数据进行分析处理，得到烟气中的颗粒物浓度值，并用β射线检测单元的浓度校准光散射模块检测的浓度。

（2）技术特点

1）采用β射线动态校准技术，对散射测量值校准因子进行实时修正，保证光散射测量数据的实时性和准确性，解决了高湿环境下低浓度烟气颗粒物在线监测的准确性和实时性问题，同时解决了颗粒物粒径、成分、颜色及分散状态对测量数据影响的问题。

2）采用全程高温加热技术，实现了样气完全汽化，防止采样探头堵塞，减小烟气中水分对颗粒物测量的影响。

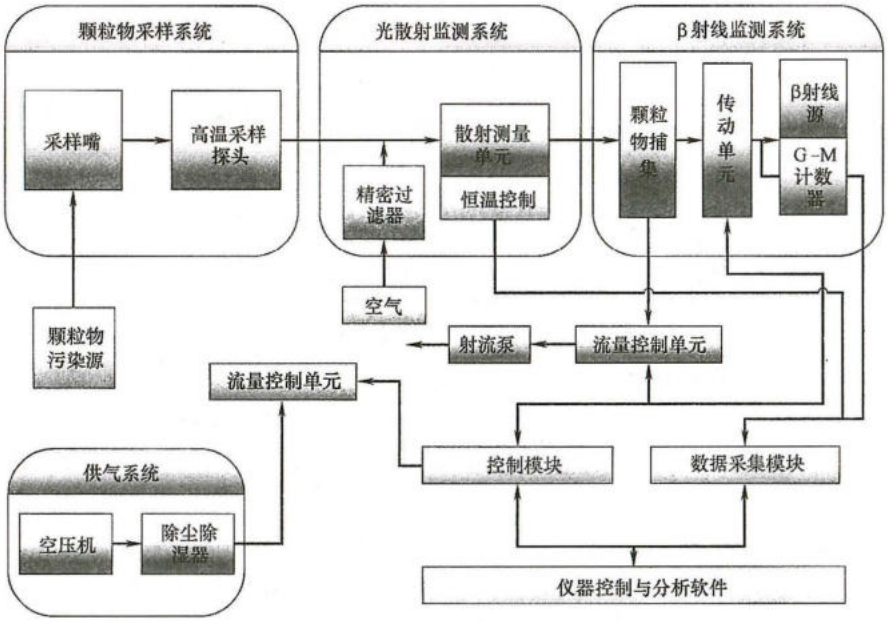


图 8-4　β射线法颗粒物 CEMS 整体结构图

3）采用等速采样技术，获得具有代表性的样品，避免了由于采样引起的测量误差。

8.2　安装调试要点

8.2.1　光散射法（直抽法）

8.2.1.1　安装准备

选择正确的安装位置是可靠、有效运行的前提，请参照《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75－2017 第 7 条要求。LFS800 开孔直径需大于 86mm，测量探头的法兰片螺栓孔心距 130mm。在焊接预埋法兰时需要与水平面平行。采样探头的采样口和皮托管的全压口对准气流。

8.2.1.2　供电

配电室给 LF800 独立供电的空气开关≥20A，电压 220VAC 50Hz。配电容量不小于 3kW。动力电缆应符合产品相关技术要求，对单相供电，配电室至安装点位的距离＜100m，采用带外护套的三芯电缆，规格国标 2.5mm^2。配电室至安装点位的距离≥100m，采用带外护套的三芯电缆，规格国标 4mm^2。

信号线缆应符合相关要求，采用带外护套的双绞屏蔽线，规格 0.5～1.0mm^2。

内部防雷地线接触良好，现场安装时需将机箱外壳可靠接地，若接地效果不佳会导致设备重要电子元器件损坏。对于防爆场合可选择 LFS800 防爆型号。通过一个 RS485 安全栅将 LFS800 的 485 信号接至安全区。接入防爆箱线缆线径的要求 7～12mm^2，避免“失爆”。

8.2.1.3　压缩气源

压缩气压力 0.35～0.6MPa，供气流量不小于 10m^3/h。压缩气应保证洁净、无水、无油，压缩气源必须永远处于开启状态，即使工厂停电。仪器自身配备 ϕ8 快插气咀，通过 ϕ8

气管与压缩气源相连即可。

如现场压缩气源品质无法保证无水、无油，需前端增加过滤装置，以免损坏设备。

8.2.1.4 安装工作清单

安装工作清单 表 8-1

处理事项	要点/步骤/清单	检查项目	完成/合格打√ 异常情况备注
查看现场准备情况	开箱检验	按装箱单清点，检查配件是否齐全	
	外观检查	各部件是否完好	
	法兰焊接/开孔	法兰垂直焊接，高度 300～500mm	
		法兰没入烟道至白线位置，螺丝孔□形分布	
		法兰高于开孔标准，需架高仪器并制作安全操作平台	
	仪器吊装	平稳吊装，无磕碰	
	线缆铺设	电源线建议使用 4mm² 三芯电缆	
		信号线使用双绞屏蔽线，线路无接头	
	供电准备	220V、16A 以上	
	反吹气管	平台提供 8mm 反吹气管	
	反吹气要求	0.3～0.6MPa，无水无油的洁净气体	
仪器组装	接地情况	有效接地，接地电阻＜4Ω	
	安装探头	注意采样弯头方向，加石棉垫，螺丝紧固	
	根据探头位置固定机柜	柜子门正常开启，便于维护	
	安装导气管和温度传感器	波纹护管套	
	反吹气管接入 TPM	压力正常，气体洁净	
	安装进、出气管	进/出气管平滑顺畅	
仪器接线	安装雨棚/探头防雨罩	螺栓紧固	
	电源线	线头压实，地线有效接地	

8.2.1.5 调试工作清单

调试工作清单 表 8-2

处理事项	要点/步骤/清单	内容	正常打钩 异常备注说明
确认安装情况	线路连接完毕	电源线、信号线紧固	
	管路连接完毕	机箱和探头连接，反吹气接入 TPM	
检查项目	上电前检查电压正常	电压正常，220V±10%	
	电脑启动正常	屏幕正常，程序自动启动	
	本地调试模式检查启停情况	加热器启停正常	
		进、出气电磁阀开合正常	
		风机启停正常	
	信号输出正常	4～20mA，RS485	
	运行参数正常	加热器温度 180～220℃、测量室温度 150℃、差压＞100Pa、激光电流＜29mA、激光功率指示 75	

续表

处理事项	要点/步骤/清单	内容	正常打钩 异常备注说明
检查项目	烟气参数正常	流速、温度、压力均接近经验值	
	工作状态切换正常	零点、量程、工作三个状态	
	对空测试正常	抽空气，抽烟气数值变化	
	断电重启正常	断电后能自动重启	
调试项目	零点	零点值	
	满量程	满量程参考值	
	对空校零	加装过滤器	
	颗粒物属性	根据经验值设定	
	标定系数/偏移系数	默认 1，应根据参比结果设定	
	速度场系数	默认 1，应根据参比结果设定	
	平滑时间	根据数据情况调整	
	反吹间隔/时间	默认间隔 5 小时反吹 6 分钟	

8.2.2 光散射法（稀释法）

8.2.2.1 安装

（1）安全注意

抽取式粉尘仪是一种电子测量装置。该仪器在运输过程中必须应有必要的保护，应有防水防潮保护，运输过程中需注意设备朝向，不可翻转、剧烈震动或碰撞。设备需安装在烟道上，必要时需使用适当的起重装置卸载。起重升降装置的负载能力和吊装位置的地面承重必须达到交付设备总重量的安全要求。设备内有大功率电器时，避免通电时直接接触电路部分。设备中的加热部分和风机等设备表面可能造成烫伤，注意等待设备断电冷却后再开展维修、清洗或修理工作。非防爆认证的设备不能安装在防爆区域，也不能在区域内使用有爆炸风险的工具。注意设备可能造成的压伤，撞伤风险。

（2）选择测量点和平台建设

抽取式粉尘仪要将取样杆伸入到烟道内将被测烟气抽入到设备中，采样口一般直径为6～12cm。为保证采样口附近有粉尘通过并且采样分析后的数据具有代表性，必须确保采样位置满足《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 第 7.1.1.7 条的所有要求。安装抽取式粉尘仪时必须考虑平台尺寸是否满足安装需求和维护需求。一般需根据厂家提供的尺寸要求进行施工，或保证设备安装后上下前后间距可以满足人工维护需求，确保可以进行开门、拆卸、安装和清理等工作。户外平台应安装必要防护措施，满足现场维护安全要求，并且不能在设备安装完成后改造和拆除平台。

（3）法兰的安装要求

在焊接法兰前，应与厂家确认烟道壁的厚度，确保设备需求的法兰尺寸和设备的承重要求。若检测的是有毒有害气体，则应预留烟气回路口法兰。焊接法兰时，最好和水平面成向上 2°～5°的角度，防止冷凝水或雨水流向设备安装方向（图 8-5）。

（4）设备安装的注意事项

设备开封时，应首先查看并收好产品说明书和合格证等文件，一般在机柜内随货发送。设备安装到现场时，如果设备没有断电气路截断保护，应首先保证吹扫风正常运行后再将采

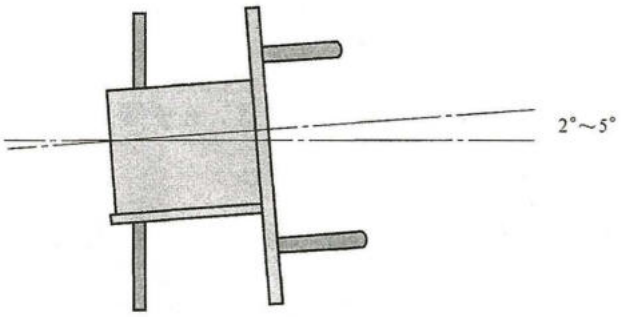


图 8-5 焊接法兰角度示意图

样探杆插入到烟道内部。插入探杆前，应注意采样管路的气路结构要尽量避免直角弯角或U形结构，并防止运行时可能被踩踏和碰撞。采样探杆插入烟道时，测量头的取样喷嘴必须对准烟气的流动方向，因此插入取样探杆在烟道前，需确认检查烟气的流动方向，并在必要时改变探嘴方向。测量探杆的探嘴方向必须与气体流动的方向相反。插入的最适宜深度是探嘴位于烟道直径的1/3处或2/3处。

探杆安装完毕后应检查设备电路部分及气路部分是否也按照厂家要求正确安装。检查电源和信号线连接正确，需要注意的是，为实现等速采样功能需接入现场流速信号。检查整体气路中是否存在漏气现象，管路接头处是否连接并拧紧，若设备有现场压缩空气接入，需检查气体压力和洁净度是否达标。检查完毕后，方可打开设备电源。

8.2.2.2 调试

设备安装完毕并启动后，首先应确认设备状态。在刚启动电源时，设备可能并不会立刻进入测量抽取状态，而是需要等待一定的预热时间。需注意设备的各项参数是否到达指标，如气体流量、采样速度和加热温度等。若长时间设备无法进入测量状态或报警，应联系厂家询问指导意见。设备进入正常测量状态后，确认设备外壳盖板安装正确并盖紧，防止出现漏水漏雨等现象。以上内容确认无误后设备开始168小时连续运行。

168小时后粉尘仪连续稳定运行后进入设备开始72小时调试检测，根据现场手工称重比对得到的数据设定粉尘仪的计算系数，即一元线性回归方程的斜率和截距，将设备的测定显示值修正到与手工采样参比方法一致的颗粒物浓度（mg/m^3）。一旦斜率和截距输入完毕并开始环保验收，不可调节传感器任何内部参数，避免引起环保数据造假风险。

8.2.3 β射线法

8.2.3.1 安装条件

（1）环境温度：(25～55)℃。

（2）环境湿度：相对湿度在85%以下。

（3）大气压：在（95～106）kPa压力下。

（4）电源要求：(220±20) V AC、(50±0.5) Hz。

（5）气源要求：仪用压缩空气，压力大于0.4MPa。

8.2.3.2 安装要点

正确的安装位置是仪器稳定、可靠运行的基本保证，为确保采样具有代表性，采样点的选择应满足《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017、《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GBT 16157—1996的规定。优先选择垂直管端，优先

选择在烟囱上。安装位置的选择应同时考虑易于维护、仪器工作在环境条件较好，为了便于颗粒物与流速参比方法的校验和比对监测，颗粒物 CEMS 不宜安装在烟道内烟气流速＜5m/s 的位置。

同时，为了便于与参比方法采样作参比试验等，在安装点应考虑有对应的参比方法采样孔。

具体安装位置一般应满足下面条件：

(1) 在水平烟道的直管段外侧壁，同时距烟道底部 1/3 烟道高度处；或在垂直烟道的直管段侧壁，同时距烟道后壁 1/3 烟道厚度处。

(2) 烟道内没有影响正常采样的障碍物。

(3) 烟气流速和灰尘颗粒具有代表性的部位。

(4) 烟道外具有安装测量装置和正常使用操作的空间。

(5) 取样点距离平台高度以 1.2～1.5m 为宜。

8.2.3.3 调试要点

安装完成后即可进行仪器调试，主要调试内容如下：

(1) 纸带安装是否正确，纸带应安装于检测器的上下腔中间，放射源 14C 应穿过滤纸进入检测器中。

(2) 测试气密性。

(3) 检查各加热部件加热是否正常。

(4) 启动仪器进行测量，对比 β 射线测量值与光散射测量值的偏差。

(5) 按照《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 的方法进行手工对比测试。

8.3 日常运营要点

8.3.1 直抽法

运营应由经过培训、具备运营资质的仪器操作者负责，日常运营中主要关注以下几点：

(1) 检查进气阀、出气阀是否能够正常开启与闭合。

(2) 仪器抽取经过精密过滤的空气，以检查设备零点。

(3) 检查测量池工作温度是否符合产品技术要求，确保被测区域无冷凝水雾。

(4) 检查加热器工作温度与测量池之间的温度差，加热器堵塞会导致温差过大。

(5) 检查测速支路是否正常工作。

(6) 检查抽取流量是否符合等速采样要求。

(7) 检查设备反吹功能是否正常。

(8) 根据现场空气洁净程度，定期更换风机过滤器。

(9) 检查窗口片是否被污染，若有污染需要清洁。

(10) 根据安装现场空气的洁净程度，定期更换镜片吹扫气路的精密过滤器。

(11) 查看近几天仪器测量结果，测量值应与工况有强相关、符合逻辑的变化。

8.3.2 稀释法

抽取式粉尘仪的日常运营中，主要需要注意的有气体流量、流速、加热温度、传感器污

染度和耗材状态。建议现场储备一定量的设备耗材和清扫工具，以便可以及时更换耗材和清理设备。

定期检查设备流量，若发现设备流量变小，应检查采样探杆、探嘴、管路和射流泵等是否发生堵塞，及时清理。定期检查插入烟道内的采样探杆和探嘴是否磨损腐蚀，密封圈是否破损碎裂导致设备漏气。

若设备出现采样烟气温度无法加热到设定值，应检查加热设备的电阻和密封性，若出现破损或短路应及时联系厂家更换。维修维护加热设备时，需注意避免烫伤和触电，建议断开加热设备电源，等待设备冷却后再开始工作。

若设备中的传感器不具有自动校准功能，则需定期手动校准传感器。具有自动校准功能的传感器需注意检查污染度。传感器应根据污染度情况做清理工作，并检查吹扫风是否正常工作。使用专业工具或洁净气吹扫镜片表面，并注意清理光陷等关键部件。清理后传感器应做自动或手动校准。若清理后传感器污染度无法下降，则应返回厂家进行维修并重新进行传感器校准工作，现场设备确保使用同款传感器进行替代。现场维护结束后都要再次确认设备各项参数回到指标以内，并确认外壳盖板盖紧密封没有破损。

如果现场工况发生较大变化需要修改设备中的一元线性回归方程的斜率和截距，应在重新做完手工比对后根据计算结果修改。维护人员应保持设备上锁，避免无关人员修改设备参数或数据。厂家不得将厂家级密码泄露给现场人员，避免环保数据造假风险。

8.3.3 β射线法

8.3.3.1 日常巡检

日常巡检的主要内容如下：

(1) 查看仪器报警记录，了解仪器的运行情况。

(2) 检查仪器内部管路是否有冷凝水出现的情况，如出现冷凝水则查找原因，是否有加热部件出现加热不正常的情况。

(3) 检查仪器的气密性，必须保证仪器的气密性良好。

(4) 查看滤带的使用情况，如剩余纸带较少则更换纸带。

(5) 检查管路是否有堵塞情况，如发现堵塞则进行清理。

(6) 用压缩空气反吹清洗采样管道。

(7) 检查各加热部件的加热情况是否正常，如发现不正常则需立即处理。

(8) 检查压缩气供气情况是否正常。

(9) 检查光散射系统中镜头是否存在被污染的情况，如出现污染需将镜头擦洗干净。

8.3.3.2 定期维护

定期对仪器进行维护可有效保障仪器良好运行，定期维护主要内容如下：

(1) 每月清洗一次采样探头，确保采样探头不出现堵塞情况。

(2) 每月清洗光散射系统中的镜头，确保镜头不出现污染情况。

(3) 每月对仪器进行一次校准，确保仪器的准确度。

(4) 每半年更换一次精密过滤器，防止过滤器出现堵塞。

(5) 每年更换一次仪器内部管路，防止内部管路出现堵塞情况。

8.4 典型应用案例

超低排放改造工艺一般采用湿法脱硫、湿法除尘等方法，处理后的烟气颗粒物浓度低，

烟气湿度大，含水量高，使用原位式烟尘仪产品会受到凝结水汽的干扰，测得的信号大多为水汽，因此必须安装抽取式颗粒物测量仪。由于其复杂的预处理系统，成本较高，安装维护也比原位式颗粒物测量仪复杂。

8.4.1 直接抽取测量（前散射）

8.4.1.1 仪器选型问题

山东某热力厂，该现场前端工艺为湿法脱硫、布袋除尘。烟气中水汽含量高，原来安装的LSS2004型后散射烟尘仪产品受到水汽的干扰，数据异常波动，时常出现满量程情况，现场检查发现安装点所处烟道内部湿度大、有明显潮湿雾气，液态雾滴反光强烈，直测式后散射烟尘仪不适用。更换抽取式烟尘仪后测量数据稳定在5mg/m^{3}左右，与手工参比数据接近能反映安装点位实际烟尘浓度。

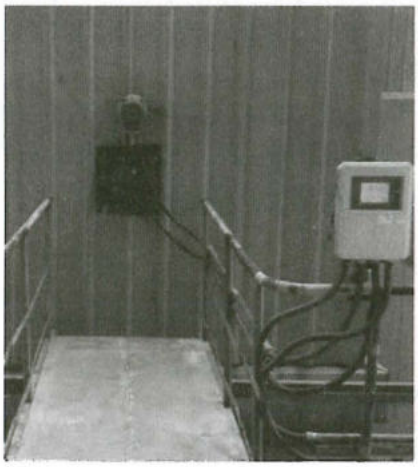
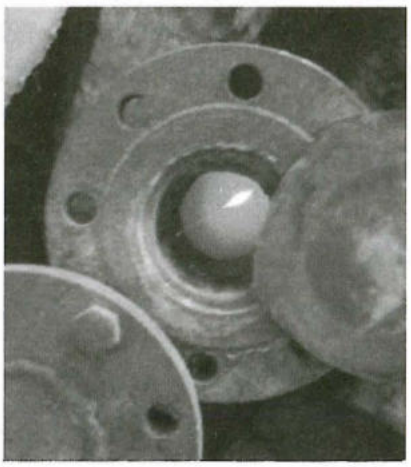



图 8-6 LSS某热力厂后散射烟尘仪安装现场图

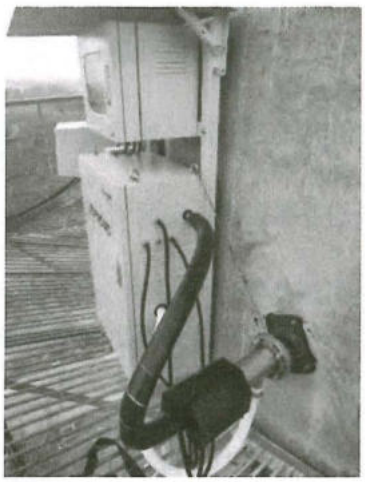


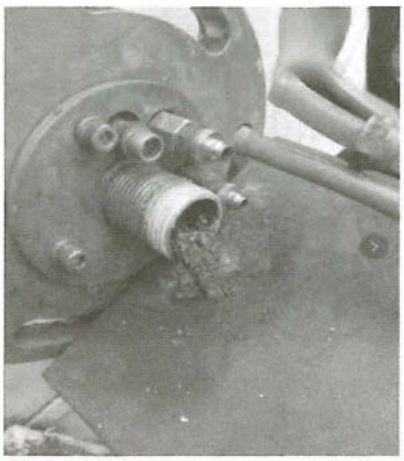
图 8-7 更换为抽取式烟尘仪

8.4.1.2 维护不及时问题

山东某碳素厂，碳素行业的烟气中含有较高的焦油成分，易在采样探头位置附着，且附着力较强，长时间不清理会导致采样探头堵塞，此时仪器故障现象为温度超限故障。这是因

为探头堵塞后，导致气路不畅，测量池温度无法到达目标温度（150℃），加热器会持续加热，加热器温度达到320℃后出现温度超限报警。

解决办法：类似碳素、炭黑等行业，如使用抽取式烟尘仪产品，需要缩短维护周期，如工况恶劣，建议每周对探头采样口进行清理。可以使用水冲洗探头或者使用工具清理。



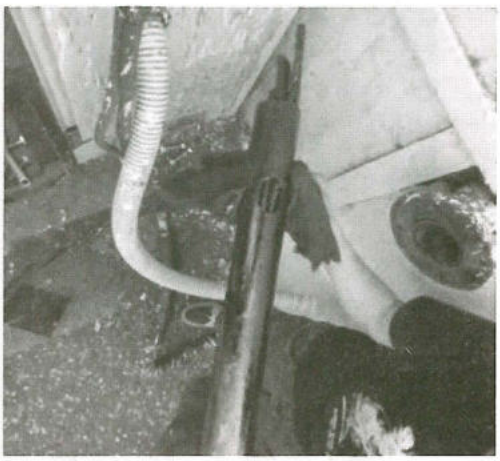


图 8-8 碳素厂探头堵塞

河北某焦化厂现场使用氨法脱硫，烟气中含有氨盐，易在气路中附着堆积，由于现场维护不及时，导致仪器内部测量池堵塞；此时仪器故障现象为温度超限。这是因为探头堵塞后，导致气路不畅，测量池温度无法到达目标温度（150℃），加热器会持续加热，加热器温度达到320℃后出现温度超限报警。

解决办法：类似焦化厂等行业，如使用抽取式烟尘仪产品，需要缩短维护周期，如工况恶劣，建议每2周对气路进行清理。可以使用镜头布沾酒精清洁测量池。

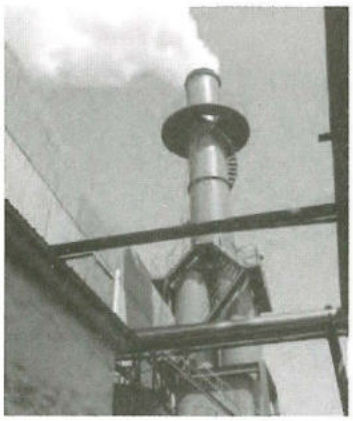


图 8-9 某焦化厂排放现场





图 8-10 气路铵盐堆积，测量池堵塞

8.4.1.3 气路不通畅问题

山东某垃圾焚烧发电有限公司，垃圾焚烧布袋除尘后，现场反馈烟尘测量值偏小，频繁出现温度超限报警。现场检查发现由于平台空间狭小，现场维护时挪动机柜导致进气管弯折变形，造成气路不通畅导致无法抽取烟气。更换进气管并根据现场情况对气管进行热塑形以保持进气气路通畅。

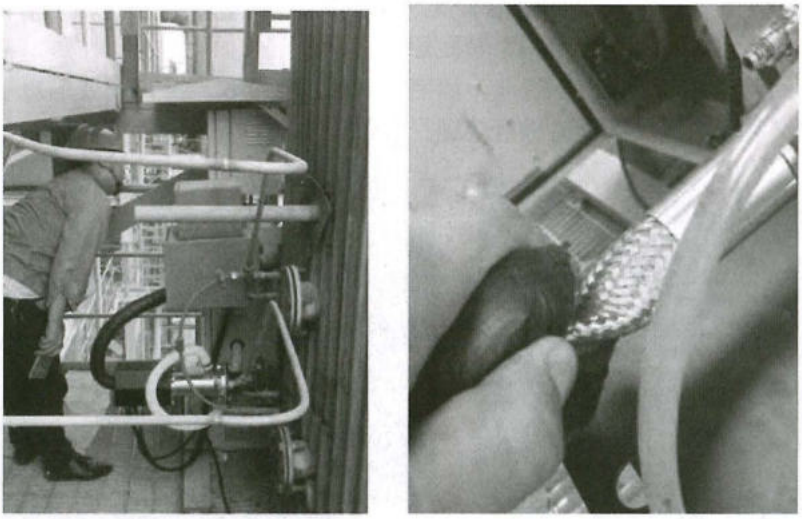


图 8-11　平台过小，抽取式烟尘仪管路弯折导致气路不通畅

8.4.1.4　脱硫导致二次扬尘

河北衡水某能源有限公司，采取石灰石-石膏脱硫、布袋除尘工艺，现场烟尘数据偶尔波动至满量程（20mg/m^3）。现场检查发现 SO_2 数据与烟尘数据呈反相关关系，检查发现现场脱硫投料装置运行不良，脱硫剂投入量忽大忽小，部分脱硫剂未被除雾器回收进入排放烟气造成烟尘数据异常上升。现场维修稳定脱硫剂投料后数据稳定、正常。

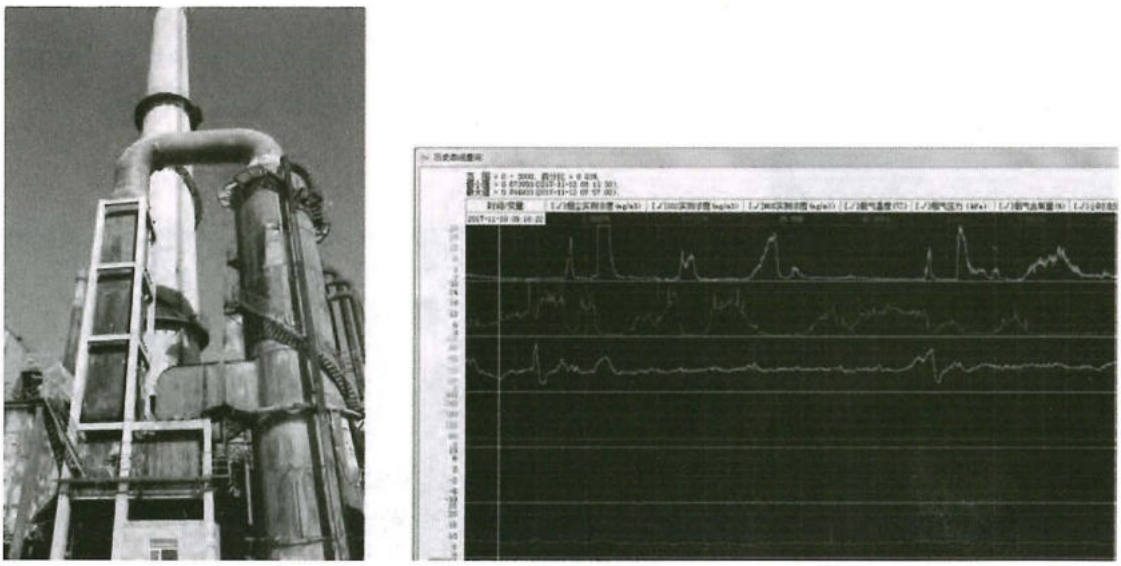


图 8-12　河北衡水某能源公司，脱硫导致烟气烟尘数据异常

8.4.2　稀释抽取测量（前散射）

石家庄某焦化有限公司成立于 1995 年，拥有炼焦（设计能力 100 万吨/年）、洗煤（设计能力 220 万吨/年）、化产回收（LNG、CNG）、物流、房地产 5 个经济实体，职工 1200 余人，固定资产 4.35 亿元。主要产品：一二三级冶金焦（热强度均在 62 以上）、洗精煤（热强度 55 以上）、硫酸铵、硫膏、LNG、CNG 等。

主营煤化工产业线，该产业线上多个工艺段有废气排放，需上传至石家庄市环保局。

安装点位为该厂焦炉烟气最终排放口，为脱硫后净烟气。安装位置、安装测点及中控画面如图 8-13 所示。



图 8-13 石家庄某焦化公司安装现场图与中控画面

现场安装点位在脱硫后的烟囱排放口，安装位置满足 HJ 75 和 HJ 76 的安装点位要求，拥有前四后二的当量直管段。安装点位参数如下。

烟囱现场参数：

(1) 环境温度：−16～40℃。

(2) 烟气压力：−277.16Pa。

(3) 烟气温度：160～190℃。

(4) 烟气湿度：12%～20%。

(5) 烟气流速：0.6～3.3m/s。

(6) 体积流量：平均 20～22Nm^3/h，最大 24.8Nm^3/h。

(7) 粉尘浓度：3～6mg/m^3。

(8) SO_2 浓度：0.134～0.78mg/m^3。

(9) NO_x 浓度：20～40mg/m^3。

(10) 粉尘浓度量程要求：0～50mg/m^3。

(11) 环保监测要求上限：＜10mg/m^3，河北石家庄地区执行超低排放标准。

(12) 安装目的：实时监测、检测焦炉烟囱排放烟气的粉尘颗粒物浓度。

(13) 现场供电：220V。

(14) 现场无防雨措施。

(15) 焦炉烟道气流程简介：

焦炉烟道气→干法移动床式脱硫→SCR 脱硝→余热回收锅炉→主引风机→烟囱排放至大气。

(16) 烟囱方向：垂直。

(17) 烟囱材质：混凝土浇筑＋高炉渣隔热层＋耐火砖。

(18) 烟囱壁厚：400（混凝土层）＋100（高炉渣隔热层）＋120（耐火砖）。

(19) 烟囱直径：9770mm（外径）×8530mm（内径）×125000mm（高）。

(20) 烟囱平台：已安装，位置高度 20.8m，开口距平台 1000mm。

(21) 安装法兰：已安装，*DN*100，碳钢。

经过工况对比，针对现场做出稀释抽取式粉尘仪 SBF800 的定制化方案。提供开孔图纸和安装注意事项。法兰和设备达到现场后指导焊接及安装，并在启动前进行初期调试，实现设备开机运行稳定。现场人员经过培训后，根据第三方比对数据设定线性回归方程系数，顺利通过现场验收，项目结束并完成环保上传，数据测量状态满足现场需求。

在设备转运维运行过程中，无设备故障，也没有数据问题咨询过厂家。电话回访提醒业主更换滤芯，使用清扫工具，业主表示设备运行状态良好。第二年回访时获得业主的称赞，设备测量数据稳定，满足要求。

8.4.3 光散射+β射线

8.4.3.1 颗粒物特性对光散射干扰及克服

不同的现场颗粒物的特性（粒径、成分、颜色及分散状态）不同，光散射易受颗粒物浓度的干扰，造成测量数据不准确、容易受工况干扰等问题。采用β射线法进行校准有效地解决了此问题，减小了颗粒物粒径、成分、颜色及分散状态不同造成的干扰。

仪器具有实验室参比校准和β射线校准两种模式，在仪器安装完成后需根据《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 的标准要求进行参比校准，β射线校准即对实时浓度进行校准。

仪器内部计算按式（8-3）计算：

$$y=a_1\times x+b_1 \tag{8-3}$$

式中 y——仪器测得的颗粒物浓度；

a_1——校准斜率；

b_1——校准截距；

x——光散射系统测得的实时颗粒物浓度。

参比校准过程按照《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 进行。为保证测量结果的代表性，参比试验要有高、中、低三种浓度，需调节工况来实现。

仪器具有实验室参比校准和β射线校准两种模式：实验室参比校准由现场采样，实验室烘干称重确定颗粒物浓度。

β射线校准的原理是光散射检测的同时进行β射线检测，用β射线测得的值对光散射的测量值进行校准，具体实施如下：

(1) 仪器启动时先对空气进行采样，光散射检测系统和β射线检测系统分别测得空气中颗粒物的浓度值，以此浓度值数据为低浓度校准数据对。

(2) 抽取烟气，光散射检测系统和β射线检测系统分别测得烟气中颗粒物的浓度值，以此浓度值数据作为中浓度校准点数据对。

(3) 调节锅炉工况，提高烟尘排放浓度到规定限值的 80%，抽取烟气，光散射检测系统和β射线检测系统分别测得烟气中颗粒物的浓度值，以此浓度值数据作为高浓度校准点数据对。

(4) 根据低、中、高浓度数据对计算出β射线校准的斜率 a_1 和截距 b_1，从而实现β射线校准。

按照 HJ 75—2017 的检测方法进行相关校准计算，并按国标的计算方法计算出线性相关

系数，从而得到比对线性校准曲线斜率 a_1 和手工比对线性校准曲线截距 b_1。

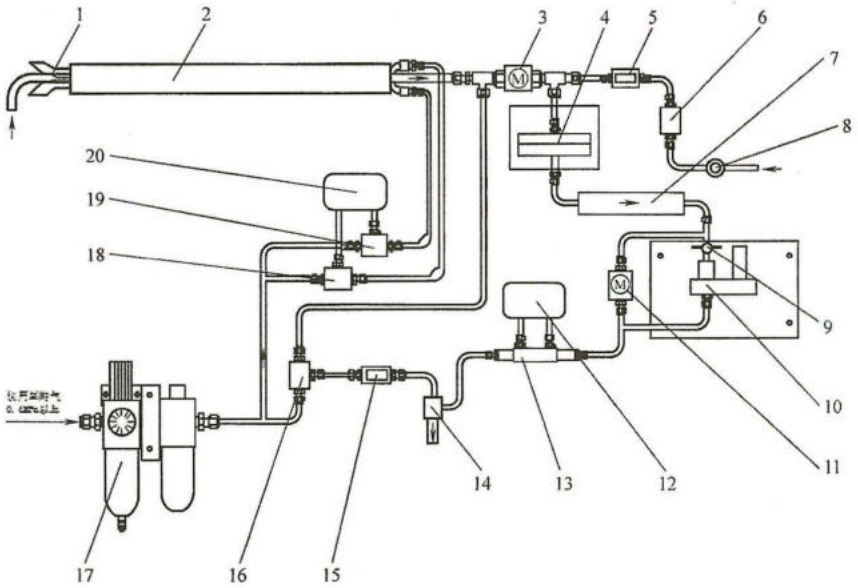
在仪器的运行过程中，当光散射系统测量值与β射线测量值差距较大（>5mg/m^3）时，系统抽取空气对仪器进行核查。如空气测量值相差较小则判断为烟气中颗粒物特性发生变化或烟道工况发生变化，可对光散射值进行β射线校准后进行测量；如空气测量值相差较大则可能是光散射测量系统出现故障，需对设备进行维护。

使用β射线检测对光散射检测进行校准有效地克服了颗粒物的粒径、成分、颜色及分散状态对光散射检测的干扰，并对测量数据进行了有效性判断。

8.4.3.2 等速采样的实现

为了获得具有代表性的样品，在颗粒物分析仪测量的整个采样过程中需进行等速采样，即含尘烟气进入采样嘴的速度与烟道内该点的烟气速度相等。当测定点烟气速度小于烟气进入采样嘴的速度时，测定的烟尘浓度值偏低；当测定点烟气速度大于烟气进入采样嘴的速度时，测定的烟尘浓度值偏高。

仪器流程图如图 8-14 所示。



1—皮托管；2—高温采样探头；3—反吹截止阀；4—前散颗粒物模块组件；5—气体预热器；6—标零阀；7—伴热管线；8—精密过滤器；9—手动球阀；10—β射线法颗粒物组件；11—电动球阀；12—差压变送器；13—文丘里管；14—射流泵；15—比例调节阀；16—反吹阀；17—气动两联件；18—皮托管负压端电磁阀；19—皮托管正压端电磁阀；20—差压变送器

图 8-14 β射线法颗粒物 CEMS 流程示意图

等速采样实施步骤：

（1）根据“1—皮托管”和“20—差压变送器”测得烟气流速 V_0。

（2）根据测得烟气流速（V_0）与采样嘴直径（d）计算出等速采样所需流量 L_0。

（3）“13—文丘里管”和“12—差压变送器”实时测量系统采样流量 L_1。

（4）调节等“15—比例调节阀”的开度改变射流泵的供气压力使其系统采样流量 L_1 与等速采样所需流量 L_0 相等，从而实现等速采样。

8.4.3.3 高湿度烟气干扰及克服

目前，湿式电除尘和湿法脱硫等新工艺的广泛采用，产生了烟气温度低、湿度高的现

象。烟气温度低、湿度高容易凝结到采样管道中，造成管道堵塞，并且烟气中的水汽对光散射测量有严重的干扰，水汽凝结在β射线检测的滤纸上也会对β射线测量带来干扰。

仪器采用高温汽化技术去除了湿度对测量数据的影响，同时有效解决采样管道堵塞的问题。采样探头、光散射检测系统、β射线检测系统、仪器内部管道均进行高温加热，使烟气中水分急速汽化，避免系统中出现冷凝情况。

第 9 章　可凝结颗粒物 CEMS

9.1　可凝结颗粒物测试技术

9.1.1　定义和成分特性

9.1.1.1　可凝结颗粒物的定义

根据对大气颗粒物的贡献，固定污染源排放的颗粒物分为两种，一种是直接排放到大气中的一次颗粒物，另一种是通过复杂的大气物理化学过程生成的二次颗粒物，它们排放到大气中通常以气态形式存在，如 SO_2、NO_x 和 VOC 等。

一次颗粒物又可分为一次固态颗粒物和一次凝聚颗粒物。前者直接以固态形式排出，依据美国环境保护署（Environment Protection Agency，简称 EPA）固定污染源颗粒物采样方法，该类颗粒物在采样温度状态下可以被过滤介质捕集，因此，又称其为可过滤颗粒物（Filterable Particulate Matter，简称 FPM）。后者烟气温度状态下以气体排出，在烟羽的稀释和冷却过程中凝结成固体，依据美国 EPA 固定污染源颗粒物采样方法，该类颗粒物在采样温度状态下无法被过滤介质捕集，后续由稀释气稀释冷却后再由过滤介质捕集，因此，又称其为可凝结颗粒物（Condensable Particulate Matter，简称 CPM）。

美国 EPA 给出了可凝结颗粒物的定义：固定污染源排气中在采样位置处烟道温度状况下呈现为气态，离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结为液态或固态的颗粒物。

可凝结颗粒物通常以冷凝核的形式存在，空气动力学直径小于 1μm，属于“微细颗粒物”（Fine Particulate Matter），在烟道内呈气态；因此，相应的除尘设备，不管是静电还是布袋除尘器对其都无能为力，也可穿透传统的颗粒物监测方法（GB/T 16157—1996，US EPA 方法 5 或者方法 17）要求使用的过滤介质。

9.1.1.2　可凝结颗粒物在总颗粒物中的占比

固定污染源向环境空气中排放的颗粒物总量，即总颗粒物（Total Particulate Matter，简称 TPM），是可过滤颗粒物（FPM）与可凝结颗粒物（CPM）的排放量之和，固定污染源排放到环境空气中总颗粒物的构成示意，如图 9-1 所示。

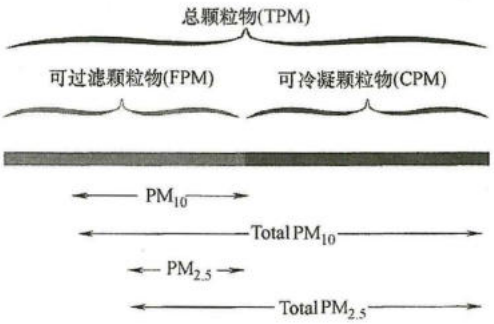


图 9-1　固定污染源排放环境空气中总颗粒物的构成示意图

图 9-1 中，TPM 为 FPM 和 CPM 之和，FPM 指我国现有颗粒物测试方法采集到的颗粒物质，CPM 指烟道温度状况下在采样位置处为气态；我国现有颗粒物测试方法尚不能采集到空气动力学直径小于 1μm 的颗粒物，但离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结成为液态或固态的颗粒物质。PM_{10}：FPM 中空气动力学

直径小于10μm的颗粒物质；Total PM_{10}：总 PM_{10}，PM_{10} 与 CPM 量之和。$PM_{2.5}$：FPM 中空气动力学直径小于 2.5μm 的颗粒物质；Total $PM_{2.5}$：总 $PM_{2.5}$，$PM_{2.5}$ 与 CPM 量之和。注意，图中各成分比例为示意图，并不代表真实情况，实际比例与燃料种类、燃烧方式及除尘设施等因素有关。

根据国外的相关研究，对燃煤锅炉排气进行测试，燃煤源排放结果进行了归纳，其中 CPM 占总颗粒物量平均值的 49%（范围 12%～92%），FPM 占总颗粒物量平均值的 51%（范围 8%～88%）。这意味着燃煤固定污染源的 CPM 排放量基本与 FPM 处于相同水平，不容忽视。此外，由于可凝结颗粒物是环境空气中 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和气溶胶物质的重要前体物，属于空气动力学直径小于 1μm 的细颗粒物，在 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 中占据的份额比较大，也是特定气象条件下雾霾形成的重要成分，可凝结颗粒物排放量的测定有利于测算和分析完整固定污染源排放到环境空气中的颗粒物总量和成分分布。

9.1.1.3 可凝结颗粒物的成分特性

可凝结颗粒物的主要成分可分为水溶性无机成分和半挥发性有机成分。可凝结颗粒物中水溶性无机成分主要由水溶性阳离子和水溶性阴离子构成，可凝结颗粒物中除了水溶性离子之外，还有相当比例的有机成分。

（1）水溶性阳离子成分分析

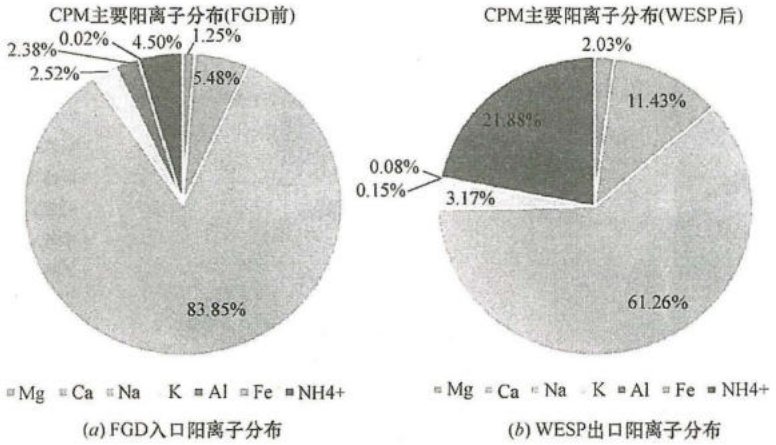
燃煤烟气中飞灰中的金属矿物质元素的主要存在形式为石英（SiO_2）、高岭石（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）、黄铁矿（$FeS_2$）、方解石（$CaCO_3$）、伊利石（$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$）、$NaAlSi_3O_8$ 等；其中 Al、Fe 和 Ca 主要以固体氧化物的形式存在于烟气中的颗粒物中。而 Na 元素在煤中以矿物质钠、水溶性钠、有机钠等多种形式存在，在燃烧过程中被水分带到煤颗粒表面挥发，当燃烧过程中温度升高时，大部分主要以 Na 单质的形式气化，蒸汽在向外扩散的过程中遇氧发生反应，生成 Na_2O 并与烟气中的 SO_2、P_4O_6、HCl 等反应生成 Na_2SO_4、NaCl、Na_3PO_4，以及钠的硅酸盐或氯酸盐等，并冷凝形成亚微米级颗粒物。这些 Na 的化合物易溶于水并与水发生反应，因此在测试过程中，烟气中的 Na 与降温冷凝生成的雾滴发生反应变为 Na^+ 离子，而 Al_2O_3、Fe_2O_3 等成分多存在于 1μm 以上的大粒径颗粒物中，且溶解度很低，在 HCl、HF 等酸性气体存在时会有部分溶解，但远远低于 Na^+ 离子浓度。因此，可凝结颗粒物中测得的 Na^+ 离子含量最高。

在燃煤电厂的 SNCR+SCR 脱硝系统运行过程中会有氨逃逸现象，若逃逸氨浓度高于 5ppm，长期运行的情况下会导致催化剂中毒。采用氨作为还原剂脱除烟气中 NO_x 的同时，随着烟气在温度下降，烟气中的氨会与 SO_2、SO_3、HCl 等酸性气体发生反应，成为可凝结颗粒物的一部分，因此铵根离子（NH_4^+）是可凝结颗粒的重要组成部分。

国内有学者研究了可凝结颗粒物中的水溶性阳离子分布情况，如图 9-2 所示。比较湿式静电除尘器（简称 WESP）出口和脱硫塔（简称 FGD）入口可凝结颗粒物中，占比最高的阳离子组成主要为 Na^+、Ca^+、NH_4^+。对比不同样品中阳离子比例的变化，与脱硫塔前样品相比，经过脱硫塔和湿式静电除尘器后 CPM 中，Na^+ 的占比从 83.85%降至 61.26%，Ca^{2+} 离子占比从 5.48%提高至 11.43%，NH_4^+ 离子占比从 4.5%提高至 21.88%。

（2）水溶性阴离子成分分析

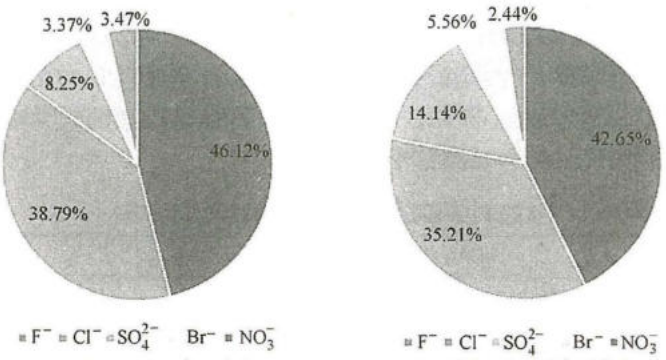
F 和 Cl 是高挥发性元素，在燃烧过程中极易从煤中释放形成氟化物和氯化物，以气态 HF、HCl 为主，有研究表明，煤中的 F、Cl 的释放率为 96.6%以上。煤中的有机氟结合在碳氢键上，极易在燃烧中的高温环境下与 H 元素形成 HF，无机氟以离子形式附着于颗粒物中，高温下与 H_2O 反应生成 HF。煤中的 Cl 元素多以无机形式存在，如 NaCl、$CaCl_2$ 等，



(a) FGD入口阳离子分布　　(b) WESP出口阳离子分布

图 9-2　可凝结颗粒物水溶性阳离子分布百分比

高温受热易产生 HCl，占烟气中总氟和总氯的比例为 90%以上。高温烟从降温冷凝过程中，烟气中的 HF 和 HCl 极易溶于水，并与相变冷凝产生的雾滴发生一系列化学反应，最终烟气中气态氟化物、氯化物转移至可凝结颗粒物中，因此，在可凝结颗粒物的阴离子中占很高比例。



(a) FGD入口阴离子分布　　(b) WESP出口阴离子分布

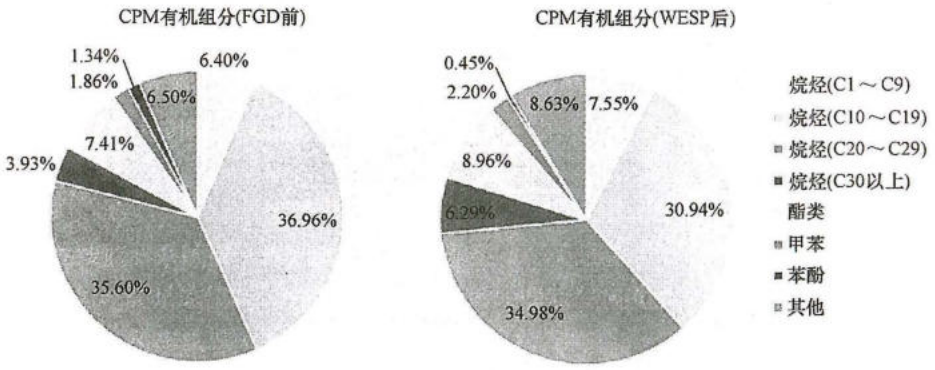
图 9-3　可凝结颗粒物水溶性阴离子分布百分比

国内有学者研究了可凝结颗粒物中的水溶性阴离子分布情况，如图 9-3 所示。比较 WESP 出口和 FGD 入口可凝结颗粒中阴离子所占比例，F^-、Cl^-、NO_3^- 占比有所下降，其中 F^- 的占比从 46.12%降至 42.65%，Cl^- 的占比从 38.79%降至 35.21%。而 SO_4^{2-} 离子占比从 8.25%提高至 14.14%，Br^- 占比从 3.37%提高至 5.56%。

（3）有机成分分析

相关研究表明，可凝结颗粒物中有机组分可占可凝结颗粒物总质量的 45%以上检测到的物质主要有烷烃、酯类、甲苯、苯酚等有机物。测试结果可以看到，样品中的主要有机组分为烷烃类，从 C8 至 C40 均有分布，且各组分占比差异不明显；在酯类中，主要有烷烃酯、芳香酯、硫代酯等；其他类物质主要包括有机酸、醇类、硫醇类、多环芳烃等有机物。

可凝结颗粒物有机成分分布情况如图 9-4 所示，测得的有机组分以烷烃为主，在 FGD 入口样品和 WESP 出口样品中的峰面积比例分别占 82.89%和 79.77%。烷烃中，主要组分为 C10-C19 和 C20-C29 的烷烃，C30 以上的烷烃只分别占 3.93%和 6.29%。



(*a*) FGD入口有机成分分布　　(*b*) WESP出口有机成分分布

图 9-4　可凝结颗粒物有机成分分布百分比

9.1.2　国内外 CPM 测试方法现状

固定污染源排放的一次颗粒物中可凝结颗粒物含量测定对于了解污染源对环境空气总颗粒物的贡献、制定污染控制措施和排放标准十分重要。

美国 EPA 对于 FPM 与 CPM 均规定了相应的测试方法，如表 9-1 所示。方法 5（固定污染源颗粒物排放量的测定）及方法 17（固定污染源颗粒物排放量的测定）测定的是 FPM；方法 201［PM_{10} 排放量的测定（废气再循环程序）］与方法 201 A［PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放量的测定（恒定采样率）］测定的是 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$；方法 202（固定污染源颗粒物排放量的冲击冷凝法测量）测定的是 CPM；CTM 039［稀释采样法测量 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放量（恒定采样率）］使用稀释采样方法测定 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$。

美国 EPA 固定污染源颗粒物测试方法汇总　　表 9-1

EPA 标准号	EPA 方法名称	方法原理
方法 5	固定污染源颗粒物排放的测定	烟道外过滤法
方法 17	固定污染源颗粒物排放的测定	烟道内过滤法
方法 201 /201A	固定污染源排放 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的测定	直接采样法
方法 202	固定污染源可凝结颗粒物排放的测定	冲击冷凝法(简称冷凝法)
CTM 039	稀释采样法测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放	稀释采样法(简称稀释法)

表 9-1 中方法 5 与方法 17 均测量可过滤颗粒物，所不同的是方法 5 中滤膜位于烟道之外，使用加热组件保持其处于高温（120℃）环境中，方法 17 测量可过滤颗粒物将滤膜放置于烟道之内。方法 201 /201 A 使用直接采样方法测定固定源颗粒物中 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的排放，方法 202 则专门针对可凝结颗粒物采用冲击冷凝法测量，CTM 039 使用稀释采样方法测定 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$。

美国 EPA 方法 202——可凝结颗粒物测试方法，如图 9-5 所示。烟气经等速采样通过滤膜后进入冰水浴的冲击瓶，前三个冲击瓶内装有 100mL 去离子水，用来收集烟气中的可凝结颗粒物，最后一个冲击瓶内装有固定量的硅胶，以保护抽气泵及计算烟气含湿量。采样结束后，使用氮气以 20L/min 的流量吹扫冲击瓶 1h，脱除去离子水中溶解的 SO_2，消除其对结果造成的干扰。吹脱完毕后，将冲击瓶内的溶液转移至指定容器中，用二氯甲烷萃取出有机组分，常温常压下在通风橱内自然风干，恒重后称量得到可凝结颗粒物有机组分的量，

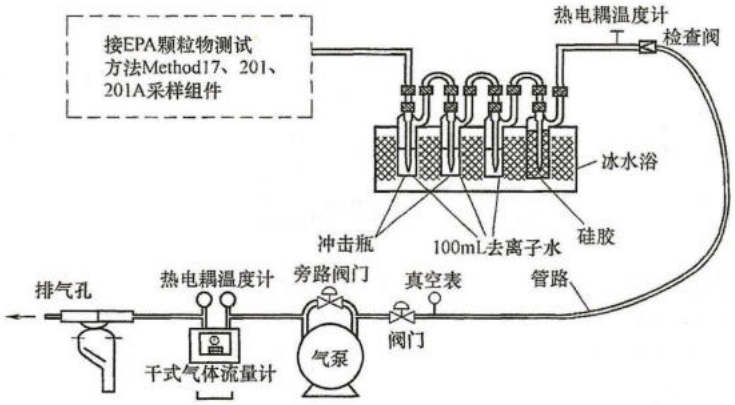


图 9-5 美国 EPA 方法 202——可凝结颗粒物测试方法示意图

萃取余液在烘箱内烘干，经处理恒重后称量得到可凝结颗粒物无机组分的量。两者之和即为可凝结颗粒物的质量，除以标干状态下的采样体积即得到烟气中可凝结颗粒物的质量浓度。此测试方法存在 SO_2 等污染物溶解并转化为 H_2SO_4 和硫酸盐，造成测得的可凝结颗粒物偏高的问题。

EPA CTM-039 测试方法采用稀释采样方法，模拟高温烟气从排口出来与实际大气的混合过程，稀释后采集的颗粒既包括可过滤颗粒（FPM）也包括可凝结颗粒物（CPM），最为接近固定污染源排放颗粒物在环境中的真实状态。

我国涉及固定源颗粒物测定的国家及行业标准为 1996 年 3 月颁布的《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB/T 16157—1996 以及 2008 年 3 月实施的《固定源废气监测技术规范》HJ/T 397—2007。它们都与美国 EPA 方法 17 类似，实质上只可实现对 FPM 的测定，而非总颗粒物（TPM）。

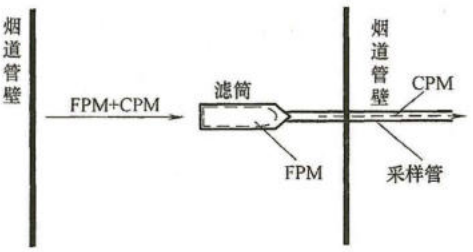


图 9-6 我国现有固定污染源颗粒物测试方法示意图

如图 9-6 所示，按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》的要求，将滤筒放置于烟道之内，因而工作温度等同于烟道温度，经等速采样仍为气态的可凝结颗粒物直接穿过过滤介质，待温度降低后在环境中凝结为颗粒物，滤筒上捕获的组分为可过滤颗粒物，采样结束后将滤筒送至实验室烘干称量，这意味着针对固定源颗粒物的排放，我国标准中仅测量可过滤颗粒物，尚不能测量烟道温度工况下以气态形式存在的可凝结颗粒物。

对于固定污染源排放颗粒物，美国 EPA 拥有较为系统的测试体系，可全面反映固定污染源颗粒物的排放状况，与 EPA 相比，我国固定污染源颗粒物的测试方法则较为单一，主要表现在：

（1）我国缺少固定污染源颗粒物 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的测试和分析方法。

（2）我国固定污染源测试方法仅关注烟道内状况下可过滤颗粒物，无法实现固定污染源 CPM 的测定。

（3）我国固定污染源颗粒物测试方法为直接采样法，对稀释采样方法并未进行规定。

9.1.3　稀释采样法

9.1.3.1　测量原理

为了避免水汽干扰和采样代表性，模拟烟气排放大气环境过程，便于细颗粒物采样及其化学分析，国内外研究者往往采用稀释采样法测定可凝结颗粒物。

稀释采样法可以模拟烟气排放到大气中的稀释、冷却、凝结等物理化学过程，所捕集的颗粒物可近似认为是固定污染源排放的一次颗粒物，包括一次固态颗粒物 FPM 和一次凝结颗粒物 CPM。

稀释采样法的基本原理是基于稀释降温冷凝过程得到可凝结颗粒物的测试方法，如图 9-7 所示。在固定污染源烟道内等速采样烟气，在旋风分离器处以恒速采样以去除大颗粒物，在高温环境下采集可过滤颗粒物，然后将高温烟气通过混气锥等构成的稀释通道，用洁净空气进行混合稀释，并冷却至大气环境温度，稀释冷却后的采样气体进入烟气滞留室，在烟气滞留室内停留一段时间，使烟气与稀释气按一定稀释比充分混合，完成可凝结颗粒物在滞留室内凝结、成长，最后由采集装置捕集到沉积在滤膜上的颗粒物，滤膜上捕集的是总颗粒物，对总颗粒物和可过滤颗粒物的质量分别称量，得到可凝结颗粒物的质量，最后通过记录采样气体流量和计算总体积，得出烟气中可凝结颗粒物的质量浓度。

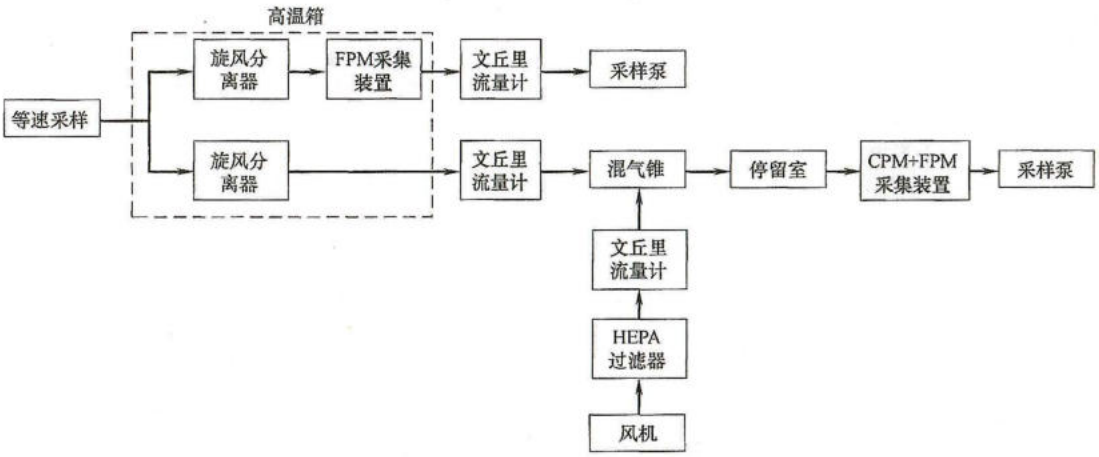


图 9-7　稀释采样法 CPM 测量原理示意图

由于高温烟气稀释冷却至大气环境温度，许多在烟气条件下不能采用的过滤材料（如 Teflon 等）也可采用，可应用大气颗粒物的采样方法对颗粒物的化学组成进行全方位的分析，也适应于大气条件的颗粒物在线测量。

9.1.3.2　系统构成

稀释法可凝结颗粒物测量系统结构示意如图 9-8 所示。稀释法可凝结颗粒物测量系统包括采样装置、FPM 测量装置、TPM 测量装置以及烘干称量装置等部分。烟气经过高温采样探头后，以平行采样方式将采样气路分为两路，一路用来实现可过滤颗粒物的测量，另一路用来完成总颗粒物的测量。

采样装置由高温采样探头、温控模块、皮托管及流速测量模块构成。主要作用是测量烟道内烟气流速，实现等速采样。高温采样探头采用全程加热，避免烟气采样过程中出现冷凝水，吸附颗粒物，影响测量结果。

FPM 测量装置由 $PM_{2.5}$ 旋风分离器、FPM 采集装置、高温箱、文丘里流量计以及采样

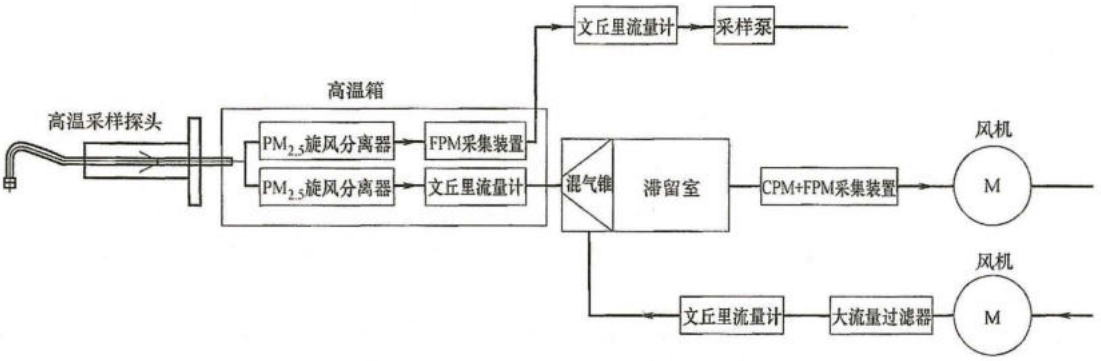


图 9-8 稀释法可凝结颗粒物测量系统结构示意图

泵构成，主要作用是完成可过滤颗粒物（FPM）的收集。

TPM 测量装置由 $PM_{2.5}$ 旋风分离器、高温箱、文丘里流量计、大流量文丘里流量计、稀释混气装置、滞留室、FPM+CPM 采集装置、采样风机、稀释风机以及大流量过滤器等构成，主要作用是完成总颗粒物（FPM+CPM）的收集。

称量装置由干燥器、精密电子天平等构成，主要作用是将颗粒物做烘干处理，并称量得颗粒物的质量。

9.1.3.3 工作流程

系统的工作流程分为：FPM 采样、TPM 稀释采样以及称量等部分，如图 9-8 所示。

（1）FPM 采样流程

1）烟气进入高温箱内的 $PM_{2.5}$ 旋风分离器，分离去除粒径大于 2.5μm 的大颗粒物。

2）通过调整文丘里流量计的采样流量，实现 10L/min 恒定流速采样。

3）记录采样烟气累计流量，计算出采样体积。

4）通过 FPM 采集装置，完成粒径大于 2.5μm 的颗粒物分离去除，粒径小于等于 2.5μm 的可过滤颗粒物过滤收集。

（2）TPM 稀释采样流程

1）烟气进入高温箱内的 $PM_{2.5}$ 旋风分离器，分离去除粒径大于 2.5μm 的颗粒物。

2）通过大流量文丘里流量计测量并控制稀释风机的稀释流量，实时调整采样流量，使之能够等速跟踪烟气流量。

3）通过文丘里流量计记录采样烟气累计流量，计算出采样体积。

4）由混气锥完成采样气和稀释气的混气并进入滞留室，在滞留室内与稀释气按设定稀释比混合，模拟烟气排放大气环境过程，达到相应温度和湿度要求，使可凝结颗粒物在滞留室内凝结、成长。

5）通过 FPM+CPM 采集装置，完成粒径小于等于 2.5μm 的总颗粒物过滤收集。

（3）称重流程

1）每次采样前，滤膜准备步骤如下：

① 将空白滤膜放入干燥器中常温（20±5℃），常压条件下干燥至少 24h。

② 将每个空白滤膜（或每个装有空白滤膜的滤膜盒）每隔至少 6h 称重一次，至重量稳定（重量变化≤0.05mg），记录空白滤膜重量至精确度最接近的 0.01mg。

③ 称重时每个空白滤膜暴露在空气中的时间应小于 2min，或者将空白滤膜置于烘箱中（120℃）烘干 2～3h，置于干燥器中 2h，使其干燥至室温。

④ 待空白滤膜完全干燥后，使其置于精度为 0.01mg 以上的电子天平称重，称量 3 次取平均值即为空白滤膜质量。

2）每次采样后，采样滤膜的处理步骤如下：

① 将采样滤膜放入干燥器中常温（20±5℃），常压条件下干燥至少 24h。

② 将每个采样滤膜每隔至少 6h 称重一次，至重量稳定（重量变化≤0.05mg），记录采样滤膜重量至精确度最接近的 0.01mg。

③ 称重时每个采样滤膜（或每个装有采样滤膜的滤膜盒）暴露在空气中的时间应小于 2min。对于采集可过滤颗粒物的采样滤膜，可将滤膜置于烘箱中（120℃）烘干 2～3h，置于干燥器中 2h，使其干燥至室温。

④ 待采样滤膜完全干燥后，使其置于精度为 0.01mg 以上的电子天平称重，称量 3 次取平均值即为采样滤膜质量。

3）可凝结颗粒物质量浓度计算方法如下：

① 在分别对 FPM 和 TPM 采样后的采集滤纸装置称重后，分别比较滤膜采样前后称重得到重量差，得到 $PM_{2.5}$ 可过滤颗粒物（FPM）和粒径小于等于 2.5μm 的总颗粒物的质量（FPM+CPM）。

② 比较滤膜采样前后重量差可折算颗粒物浓度。可凝结颗粒物浓度为 CPM+FPM 滤膜与 FMP 滤膜质量的差值折算得到，或使用串联法连接测试仪器直接采样得到 CPM 滤膜。

4）计算 FPM 和 TPM 采样的质量差值，折算得到可凝结颗粒物（CPM）的质量，根据 CPM 烟气的采样总体积得到 CPM 的质量浓度。

9.1.4 控制冷凝法

9.1.4.1 测量原理

控制冷凝法类似于美国 EPA 方法 202 测量标准，烟气经等速采样通过滤膜后，经过恒温水浴的螺旋冷凝管进入水浴中的冲击瓶，实现采样烟气的快速冷凝，并由冲击瓶后的过滤膜装置实现烟气中可凝结颗粒物的收集。

基本测量原理是：烟道内含尘烟气通过高温采样探头进行等速采样，首先，在高温箱内由滤膜装置捕集烟气中的可过滤颗粒物，高温箱内滤膜后端监控气体温度，保证此阶段的烟气不产生凝结。其次，去除了可过滤颗粒物的烟气进入恒温水浴的螺旋冷凝管，螺旋冷凝管通过水浴箱内液体进行温度控制。然后，冷凝后烟气在进入 2 级冲击瓶，进一步冲击冷凝，产生可凝结颗粒物。最后，由滤膜装置捕集最新形成的烟气可过滤颗粒物。采样结束后，将冲击瓶内的溶液萃取出有机组分，在常温常压下自然风干，称量得到可凝结颗粒物有机组分的量；萃取余液经烘干处理后，称量得到可凝结颗粒物无机组分的质量。两者之和即为可凝结颗粒物的质量，除以标干状态下的采样体积即得到烟气中可凝结颗粒物的质量浓度。

9.1.4.2 系统构成

冷凝法可凝结颗粒物测量系统主要由采样装置、颗粒物冷凝收集装置、采样控制装置以及称量装置等组成，如图 9-9 所示。

采样装置包括等速流量测量模块、高温加热器、高温采样探头、石英采样管、高温箱、高温滤膜装置等构成；等速流量测量流模块通过 S 形皮托管、差压变送器和热电阻测量烟道内烟气正向和反向的烟气差压和温度，计算得到烟气流速；高温加热器采用可更换式加热带，方便现场维护，加热温度 120～180℃可调；高温箱内装有滤膜夹，加热可恒温 120℃。高温滤膜装置捕集烟气中的可过滤颗粒物。

颗粒物冷凝收集装置包括螺旋冷凝管、冲击瓶、水浴装置、温控器、循环泵、滤膜装置等；水浴装置采用半导体恒温技术，通过高精度全自动智能 PID 双向功率控制系统，无触点电子控温，实时调整输出功率，升降温自动转换，可达到任意温度点的精确控制，通常的水浴控制温度为 30℃。滤膜装置捕集烟气中的可凝结颗粒物。

采样控制装置包括差压变送器、采样真空泵、质量流量计、电气控制部分等。采样真空泵最大空载采样流量 50L/min，可满足现场采样要求；质量流量计测量范围 0～20L/min，并具有自动调节流量功能，结合等速流量测量模块测出的烟气流速和采样嘴内径，可实现实时等速采样。

称量装置包括萃取装置、烘干装置以及精密电子天平等。萃取装置将冲击瓶内的溶液转移至指定容器中，用二氯甲烷完成有机组分的萃取。烘干装置以及精密电子天平分别实现可凝结颗粒物中有机组分和无机组分的烘干和质量称量。

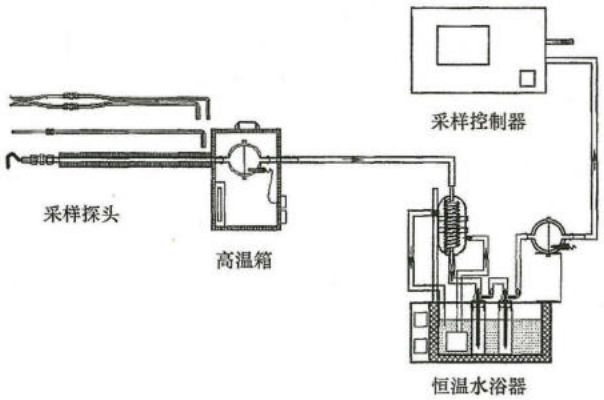


图 9-9 控制冷凝法可凝结颗粒物测量系统结构示意图

9.1.4.3 工作流程

冷凝法可凝结颗粒物测量系统的工作流程分为：恒温水浴装置预热启动流程、采样装置预热启动流程、系统参数设置流程、管线连接流程、系统采样启动流程以及称量流程等部分。

（1）恒温水浴装置预热启动流程

1）将恒温水浴装置放置在采样点附近合适位置，摆放水平、稳固且无阳光直射，仪器四周应有足够散热空间，严禁封堵散热孔。

2）安装恒温水浴装置支架，在支架上固定好螺旋冷凝管，连接恒温水浴器和螺旋冷凝管循环水接口，螺旋冷凝管和管路应有保温措施。

3）启动恒温水浴装置电源，在水槽内加适量冷凝水，待螺旋冷凝管内充满水后，在水槽内放置冲击瓶，酌情缓慢倒入适量循环水，应避免循环水溢出水槽。

4）设定水浴温度，启动恒温开关，仪器运行。

注：仪器最佳使用环境为温度 5～25℃，湿度＜60%（无结露），过低、过高、潮湿的周围环境会直接影响仪器的使用性能及可靠性。

（2）采样装置预热启动流程

1）采样探头安装示意图，如图 9-10 所示。安装采样探头前，先确定烟气流向，然后固定采样嘴和皮托管朝向正面气流方向。

2）根据不同采样方式，选择滤膜夹安装方式，如图 9-11 所示。

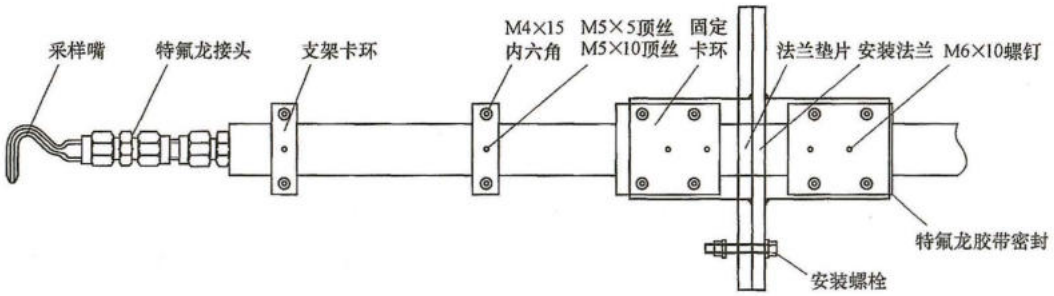


图 9-10　采样探头的安装示意图

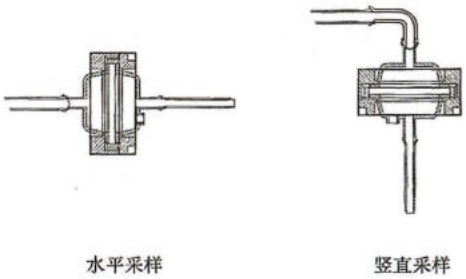


图 9-11　不同采样方式的滤膜安装示意图

3）拧开高温箱堵头，将石英采样管（带加热带、温度探头）小心放入采样探头中，拧紧采样探头前端特氟龙接头；连接采样探头温控接头和加热接头；拧回高温箱堵头，高温箱内安装滤膜夹，球头用球头夹加紧固定，安装时注意安装顺序，先将转接头伸出高温箱，再安装滤膜夹；连接滤膜夹温控接头。

（注意：接头由上至下依次为滤膜夹温控、采样探头加热、采样探头温控，切忌不可插错）

4）连接高温箱与采样控制器的电缆，连接采样控制器电源线。启动采样控制器，采样探头和高温箱启动预热。

（3）系统参数设置流程

设置系统采样点、采样周期、采样嘴直径等相关参数，皮托管系数、采样探头加热温度、高温箱加热温度等部分参数为系统默认值，如需更改，可在用户登录后更改。

（4）管线连接流程

按照系统流程，依次连接系统管路；连接皮托管管路；安装采样嘴（必要时可拆卸皮托管方便安装）；连接烟气温度、水浴温度、水浴后滤膜夹温度的信号线。

（5）系统采样启动流程

系统预热 30min，各部位达到设定温度，预热结束。将采样探头放入烟囱内，用螺栓固定在烟囱法兰上，启动采样。

（6）称量流程

采样结束后，使用氮气以 20L/min 的流量吹扫冲击瓶 1h，脱除去离子水中溶解的 SO_2，消除其对结果造成的干扰。吹脱完毕后，将冲击瓶内的溶液转移至指定容器中，用二氯甲烷完成有机组分的萃取，常温常压下在通风橱内自然风干，恒重后称量得到可凝结颗粒物有机组分的量，萃取余液在干燥箱内烘干，经处理恒重后称量得到可凝结颗粒物无机组分的量。两者之和即为可凝结颗粒物的质量，除以标干状态下的采样体积，即得到烟气中可凝结颗粒物的质量浓度。

9.2　安装调试要点

本节以稀释法可凝结颗粒物测量系统为例，介绍系统的安装及调试要点。

9.2.1 系统安装

9.2.1.1 基本要求

可凝结颗粒物测量系统的设备安装可以在运行单位设备正常工作期间实施。系统的采样方式为水平采样，不建议采用垂直采样方式。要求烟囱上采样法兰不小于 *DN*65 规格，为方便安装，法兰距离平台水平面的距离以高于 0.5m 但低于 1.2m 为宜。

可凝结颗粒物测量系统的所有安装操作应符合运行单位的有关安全生产规范的要求。

9.2.1.2 采样点的确定

取样点选取在除尘器之后的烟道上，具体安装位置一般应满足下面条件：

(1) 烟气温度小于 370℃。

(2) 在水平烟道的直管段外侧壁，同时距烟道底部 1/3 烟道高度处；或在垂直烟道的直管段侧壁，同时距烟道后壁 1/3 烟道厚度处。

(3) 烟道内没有影响正常采样的障碍物。

(4) 烟气流速和灰尘颗粒具有代表性的部位。

(5) 烟道外具有安装测量装置和正常使用操作的空间。

9.2.1.3 系统安装

(1) 将采样探头和高温箱用 4 个 M12×50 的螺栓连接固定，将高温箱和滞留室用卡箍连接，卡箍中间加垫片密封。

(2) 将采样探头用固定法兰固定在烟囱法兰上，将高温箱上的钢丝拉长固定在上方烟道上合适位置，调整钢丝长度，保证整体结构无明显晃动。

(3) 将 FPM 采集装置安装在高温箱内的 $PM_{2.5}$ 旋风器下游，管路与采样控制单元连接。

(4) 将 CPM 采集装置安装在滞留室下游，将采样风机进风口与 CPM 采样装置出气口用管路连接。

(5) 将稀释气风机出风口、大流量过滤器、大流量文丘里流量计依次用管路连接，最后连接在混气锥的旁路上。

9.2.2 系统调试

9.2.2.1 系统基本操作

将采样探头、高温箱和滞留室组装在一起，风机、采样泵等用管理连接，将仪器固定在烟囱法兰上。

在设备安装好后，开机前需确认以下几点：

(1) 采样探头前端是否安装采样嘴，记下采样嘴型号，开机后在系统参数设置中设置对应参数。

(2) 确认采样嘴是否正对气流方向。

(3) 采集滤纸是否已经进行干燥处理并已经称重、标号。

检查完成后，设备即可开机运行，系统自动启动预热，仪器即进入“主界面”，可进入“参数设置”界面进行参数设置，一般采样探头和高温箱设置温度为 120℃。在“主界面”可随时查看仪器的运行状态。

9.2.2.2　系统调试界面

（1）系统主界面（图 9-12）

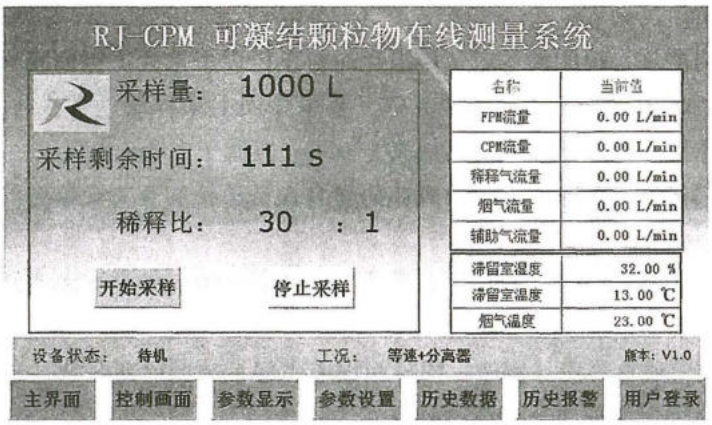


图 9-12　可凝结颗粒物测量系统主界面

“采样量”显示仪器的当次采样烟气体积。操作人员可在“参数设置”画面上设定。

“采样剩余时间”显示仪器的当次采样烟气时间，直到零系统会自动停止采集。采样剩余时间是系统根据参数设定后自动计算出来的，当操作人员点击“开始采样”后，系统自动完成倒计时，直到采样停止。

“设备状态”显示仪器的当前状态，设备状态共四种，分别为“预热”“待机”“采样”“故障”。

“工况”显示仪器的当前工艺、工况共 5 种，分别为“等速＋分离器”“等速＋过滤器”“非等速＋分离器”“非等速＋过滤器”“维护”。在开始采样前，操作人员须根据实际工况要求设定好工况种类，然后再操作“开始采样”按钮。

（2）用户登录界面（图 9-13）

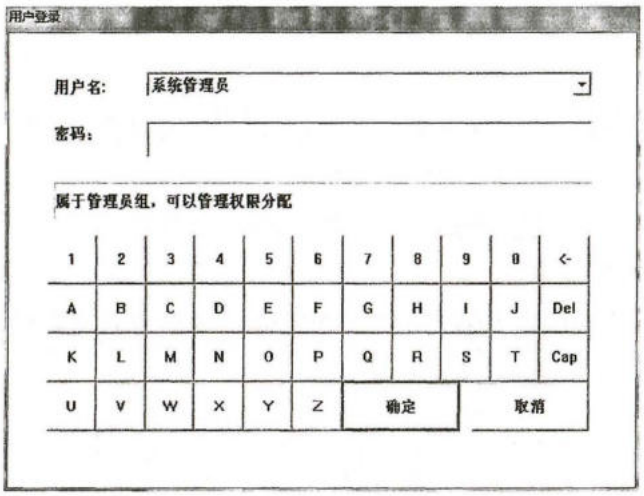


图 9-13　用户登录界面

操作人员必须经系统管理员授权才能控制设备、进行参数设置、数据导出、故障复位等操作，否则只能以访客的身份浏览画面。对于已经授权的操作人员，必须牢记自己的密码，否则不能正常操作设备。

（3）系统监控界面（图 9-14）

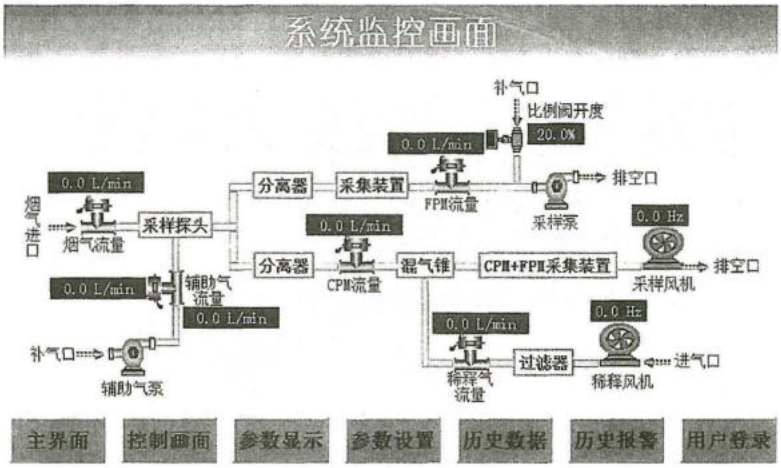


图 9-14 系统监控界面

在系统处于“待机”状态下，选择“工况”为维护时，可对辅助气泵、采样泵、采样风机、稀释风机进行“启/停”操作。可对辅助气流量在 0～20L/min 的范围内进行设定，可对比例阀开度在 0～100%的范围内进行设定，可对采样、稀释风机运行频率 0～50Hz 的范围内进行设定。从而可以在维护工况时调试设备。

(4) 参数显示界面（图 9-15）



名 称	当前值	名 称	当前值	名称	当前值
滞留室湿度	32 %	稀释气流量	0.00 L/min	FPM动压	0.00 kPa
滞留室温度	13.00 ℃	烟气流量	0.00 L/min	采样风机频率	0.0 Hz
烟气温度	23.0 ℃	皮托管动压	0.00 kPa	稀释风机频率	0.0 Hz
FPM温度	3.0 ℃	皮托管静压	0.00 kPa	比例阀开度	20.0 %
FPM流量	0.00 L/min	稀释气动压	0.00 kPa	辅助气流量	0.0 L/min
CPM流量	0.00 L/min	CPM动压	0.00 kPa		

图 9-15 参数显示界面

集中显示现场采集的数据，如压力、温度、湿度、流量等。

(5) 参数设置界面（图 9-16）



名 称	设定值	名称	设 定 值
稀释比例	30	稀释气斜率	1.00
采样量	1000 L	稀释气截距	0.00
采样嘴直径	4 mm	烟气斜率	1.00
稀释气设定值	200L/min	烟气截距	0.00
滞留室湿度	70 %	CPM温度	100 ℃
滞留室温度	42 ℃	稀释气温度	100 ℃

图 9-16 参数设置界面

在得到系统管理员的授权情况下，根据现场工况设置参数设置界面上的各项参数。

（6）历史数据界面（图 9-17）

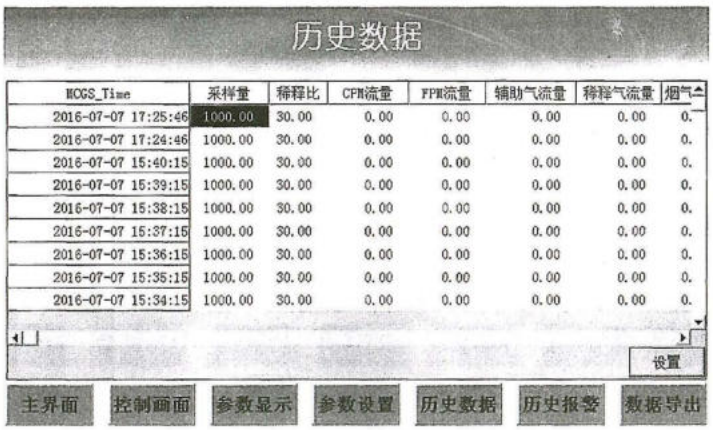


图 9-17　历史数据界面

历史数据界面显示已测量的各时间点的数据，存储时间约为 6 个月。

（7）数据导出界面（图 9-18）

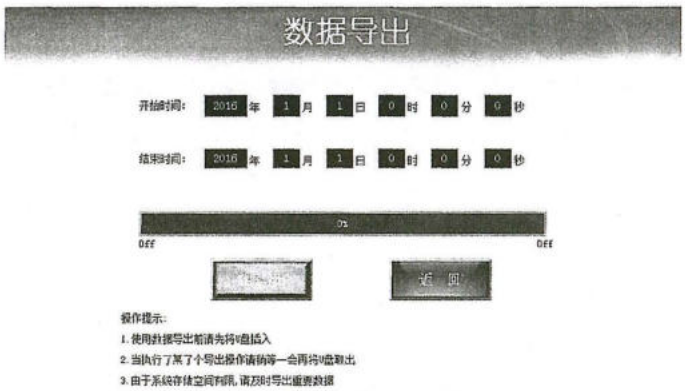


图 9-18　数据导出界面

操作人员先确定 U 盘已经连接好，然后设定导出数据的开始时间和结束时间。在准备工作做完后点击“数据导出”按钮，等进度条显示完成后，可在 U 盘下看到一个“dtl. csv”的文件，在电脑上用 Office 软件可以浏览文件中的数据。

（8）历史报警界面（图 9-19）



图 9-19　历史报警界面

历史报警界面显示仪器的历史报警情况。在现场报警信息解除后，点击“报警复位”按钮。

9.3 日常运营要点

本节以稀释法可凝结颗粒物测量系统为例，介绍系统的日常运营要点。

9.3.1 日常维护

仪器日常维护，主要内容如下：

（1）查看仪器报警记录，了解仪器的运行情况。

（2）定期清理采样探头、$PM_{2.5}$ 旋风分离器、混气锥、滞留室。

（3）检查仪器的气密性。

（4）查看滤纸的使用情况，如滤纸数量较少需提前采购。

（5）检查大流量过滤器使用情况，如果对通气量有影响需及时更换。

9.3.2 故障处理

9.3.2.1 采样探头和高温箱温度报警

采样探头和高温箱温度出现报警，可能为两种情况：

（1）温度未达到设定温度。出现此情况，需检查是否为加热装置故障。

（2）温度远高于设定温度。出现此情况，需检查是否为温度控制器故障。

9.3.2.2 $PM_{2.5}$ 旋风分离器流量报警

采样探头和高温箱温度出现报警，可能为以下几种情况：

（1）采样嘴堵塞，造成进气量减小。

（2）辅助气流量计故障，造成采气量不足或增大。

（3）采样风机或采样泵故障，采气量不足。

（4）$PM_{2.5}$ 旋风分离器内积尘较多，造成气流减小。

（5）文丘里流量计组件故障，需检查文丘里流量计对应的差压变送器、压力变送器和温度传感器。

9.3.2.3 滞留管温度或湿度报警

出现滞留管温度或湿度报警，可能是因为烟气温度或者湿度过高，加大稀释比即可解决此问题。

9.3.2.4 稀释气流量报警

出现稀释气流量报警，可能为以下几种情况：

（1）稀释风机故障，造成进气量减小。

（2）大流量过滤器堵塞，造成进气量减小。

（3）文丘里流量计组件故障，需检查文丘里流量计对应的差压变送器、压力变送器和温度传感器。

第三篇　烟气参数和数据采集

第 10 章　含氧量 CMS

10.1　监测技术

在线监测燃烧过程排放的烟气中的含氧量，主要目的是实现锅炉燃烧过程的节能控制，控制空气过剩系数在合理范围内。燃煤锅炉的含氧量监测，通常在锅炉的两侧烟道各安装一台氧化锆氧分析仪检测锅炉燃烧的含氧量，测点的温度在 650℃左右，也可以在高温烟道安装氧化锆氧分析仪，在 750～950℃的取样点需要采用高温氧化锆氧分析仪。燃烧锅炉的省煤器出口的烟气中含氧量的典型浓度值为 2%～5%。

在烟气污染物排放监测中，采用氧分析仪监测脱硫设备前后的含氧量，是为了防止设备的漏风造成对污染物排放的稀释，为了统一污染物排放监测的要求，需对污染物浓度使用过剩空气系数进行修正。CEMS 分别在脱硫前、后烟道监测氧气的含氧量，是为了检查锅炉燃烧后的各种设备、管道的漏风，实际上由于锅炉燃烧设备的泄漏，脱硫前的烟气含氧量已经达到 6%～8%；脱硫后监测含氧量是对脱硫过程设备泄漏率的检测，防止由于设备泄漏对烟气污染物排放浓度的稀释，以确保获得污染物排放的真实含量。

通过实时监测排放烟气的含氧量（或二氧化碳含量），计算实测的空气过剩系数，并用于将污染物排放浓度折算成在规定空气过剩系数下的排放质量浓度。

对烟气的含氧量实时监测，还可以利用实时监测烟气的含氧量，通过采用烟气的干氧和湿氧的实时监测，可以计算烟气的含湿量。在美国采用烟气的干湿氧计算烟气含湿量的监测方法应用比较普遍。主要是由于烟气含水分量比较高，脱硫及脱硝烟气的温度高达 130～300℃，被测烟气中又含有二氧化硫等腐蚀性气体，一般的湿度传感器不能承受高温及腐蚀的恶劣环境条件。而氧化锆氧分析器具有耐高温、耐腐蚀的特点，适用于烟气通过干湿氧的计算测量烟气的含湿量。

烟气含氧量在线监测技术主要有氧化锆氧分析器（插入式及抽取式）、燃料电池式氧分析器及顺磁式氧分析器等，激光光谱法也可以用于特殊情况下的含氧量检测，如石油化工 FCC 的烟气中含氧量的测量。

燃煤锅炉烟气监测在 650℃左右，大多采用插入式氧化锆氧分析器直接测量。如果在锅炉燃烧的高温段（750℃以上）监测含氧量，则需要采用高温型氧化锆氧分析仪，或采用抽吸式氧化锆氧分析仪，通过取样探头将高温烟气抽出后进行测量；也可以采用燃料电池式或顺磁式氧分析器分析含氧量。抽取式 CEMS 中，对烟气含氧量检测通常采用直插式氧化锆氧分析器测量氧，也可以在多组分分析仪中增加电化学氧模块测量氧。

10.1.1　氧化锆

氧化锆氧分析仪分为直插式氧化锆氧分析仪和抽取式氧化锆氧分析仪。利用氧化锆材料添加一定量的稳定剂后，通过高温烧成，在一定温度下成为氧离子固体电解质。在该材料两侧焙烧上铂电极，一侧通气样，另一侧通空气。当两侧氧分压不同时，两电极间产生浓差电

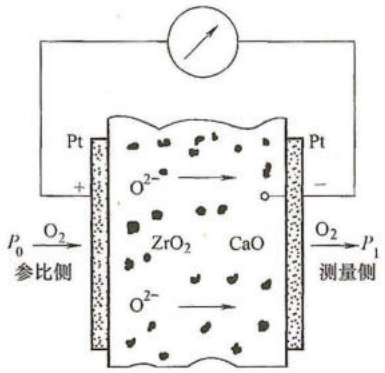


图 10-1　氧化锆氧分析仪的测量原理

动势，构成氧浓差电池。

氧化锆氧分析仪的测量原理如图 10-1 所示，在一片高致密的氧化锆固体电解质的两侧，用烧结的方法制成几微米到几十微米厚的多孔铂层作为电极，再在电极上焊上铂丝作为引线，就构成了氧浓差电池，如果电池左侧通入参比气体（空气），其氧分压为 P_0，电池右侧通入被测气体，其氧分压为 P_1（未知）。

设 $P_0 > P_1$，在高温下（650～850℃），氧就会从分压大的 P_0 侧向分压小的 P_1 侧扩散，这种扩散，不是氧分子透过氧化锆从 P_0 侧到 P_1 侧，而是氧分子离解成氧离子后通过氧化锆的过程。在 750℃左右的高温中，在铂电极的催化作用下，在电池的 P_0 侧发生还原反应，一个氧分子从铂电极取得 4 个电子，变成两个氧离子（O^{2-}）进入电解质，即

$$O_2(P_0)+4e \longrightarrow 2O^{2-} \tag{10-1}$$

P_0 侧的铂电极由于大量给出电子而带正电，成为氧浓差电池的正极或阳极。

这些氧离子进入电解质后，通过晶体中的空穴向前运动到达右侧的铂电极，在电池的 P_1 侧发生氧化反应，氧离子在铂电极上释放电子并结合成氧分子析出，即

$$2O^{2-} \longrightarrow O_2(P_1)+4e \tag{10-2}$$

P_1 侧的铂电极由于大量得到电子而带负电，成为氧浓差电池的负极或阴极。

这样在两个电极上由于正负电荷的堆积而形成一个电势，称之为氧浓差电动势。当用导线将两个电极连成电路时，负极上的电子就会通过外电路流到正极，再供给氧分子形成氧离子，电路中就有电流通过。

与磁性氧分析仪比较，氧化锆氧氧分析仪具有结构简单、反应迅速和维护工作量小等特点，广泛用于连续监测锅炉或窑炉内气体中的含氧量。

测量范围：0～5%，0～10%，0～21%，0～25%，测量精度 0.1%。

10.1.2　燃料电池式

燃料电池是原电池的一种，原电池氧分析仪的电化学反应可以自发进行，不需要外部供电，样品气中的氧和阳极的氧化反应生成阳极的氧化物，类似于氧的燃烧反应，所以这类原电池也被称为“燃料电池”。

燃料电池式氧分析仪可以测量微量氧，也可以测量常量氧。燃料电池根据采用的电解质是液体电解液，还是固体电解质（糊状电解液），分为液体燃料电池和固体燃料电池。在液体燃料电池中，根据电解液的性质又分为碱性液体燃料电池和酸性液体燃料电池。

碱性液体燃料电池，由银电极＋铅阳极＋KOH 碱性电解液组成。适用于一般场合测量微量氧和常量氧；当被测气体中含有酸性成分（如 CO_2、H_2S、Cl_2、SO_2、NO_x 等）时，会与碱性电解液起中和反应，并对银电极有腐蚀作用，造成电解池性能衰变、灵敏度下降、响应时间变慢，不适用于含酸性成分的气体测量。

碱性燃料电池氧传感器的工作原理结构见图 10-2。

被测气体经过渗透膜“可以渗透气体的聚四氟乙烯（PTFE）膜”进入薄电解质层，气样中的氧进行下述电化学反应：

银电极：

$$O_2+2H_2O+4e^-\longrightarrow 4OH^- \qquad (10\text{-}3)$$

铅电极：

$$2Pb+4OH^-\longrightarrow 2PbO+2H_2O+4e^- \qquad (10\text{-}4)$$

电池的综合反应：

$$O_2+2Pb\longrightarrow 2PbO \qquad (10\text{-}5)$$

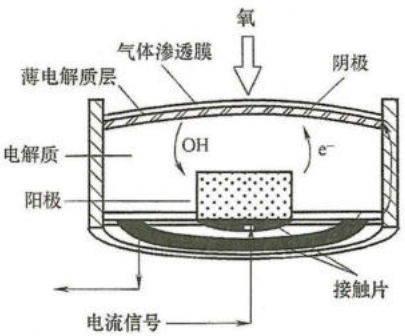


图 10-2 碱性燃料电池氧传感器的工作原理结构

主要性能指标（以 300T/300P 型电化学氧分析器为例介绍）：

（1）测量量程：微量 0～5ppm、0～10ppm、0～100ppm、0～1000ppm。

（2）常量：0～1%、0～5%、0～25%。

（3）检测灵敏度：0.01×10^{-6}。

（4）重复性误差：±1%F. S. 或±0. 1ppm。

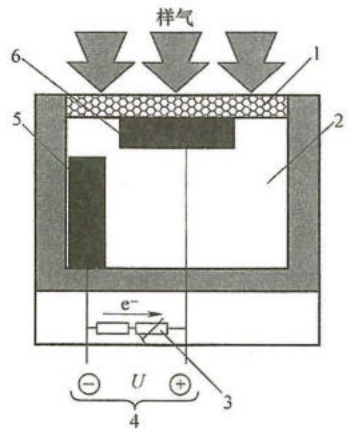
（5）工作压力：≤0. 1MPa。

（6）工作温度：0～50℃。

（7）供电：24V DC。

（8）燃料电池寿命：通常为一年。

酸性液体燃料电池，由金阴极＋铅阳极（或石墨阳极等）＋醋酸电解液组成，酸性燃料电池氧传感器的工作原理结构见图 10-3。



1—FEP 制成的氧扩散膜；2—电解液（乙酸）；3—用于补偿的热名电阻和负载电阻；4—外电路信号输出；5—石墨阳极；6—金阴极

图 10-3 酸性燃料电池氧传感器的工作原理结构

该燃料电池电解液为醋酸（乙酸，CH_3COOH）溶液，可表示为：阴极 Au | CH_3COOH | C 阳极。被测气体中的氧分子通过 FEP（聚全氟乙丙烯）氧扩散膜进入燃料电池，在电极上发生如下反应：

金阴极：

$$O_2+2H_2O+4e^-\longrightarrow 4OH^- \qquad (10\text{-}6)$$

石墨阳极：

$$C+4OH^-\longrightarrow CO_2+2H_2O+4e^- \qquad (10\text{-}7)$$

电池的综合反应：

$$O_2+C\longrightarrow CO_2 \qquad (10\text{-}8)$$

反应生成的电流与含氧量成正比。该电池适用于被测气体中有酸性成分的场合，例如烟道气的分析，不适用含碱性成分（如 NH_3 等）的气体测量。只能测常量氧，不能用于微量氧测量。

10.1.3 顺磁式

10.1.3.1 热磁式

氧受磁场吸引的顺磁性比其他气体强许多，当顺磁性气体在不均匀磁场中，且具有温度梯度时，就会形成气体对流，这种现象称为热磁电流，或称为磁风。磁风的强弱由混合气体中氧量多少而决定的。通过把混合气体中的含氧量的变化转换成热磁对流的变化，再转换成电阻的变化，测量电阻的变化，就可得到氧的百分含量。

热磁式氧分析仪按照热磁对流的特点分为内对流热磁式氧分析仪和外对流热磁式氧分析

仪，他们的工作原理均是基于热刺对流产生的热磁效应。

内对流热磁式氧分析仪，内对流式检测器，热磁对流在热敏元件组件（中间通道管）内部进行，热敏组件与被测气体是隔绝的，通过薄壁石英玻璃管进行热交换，因此不会与样品气发生任何化学反应，也不会受到样品气的玷污和侵蚀。但热量传递受到一定影响，增加了测量滞后时间，灵敏度也相对较低，另外要求检测器处于水平工作位置。工作原理见图 10-4。

外对流热磁式氧分析仪，外对流式检测器，热磁对流在热敏组件外部进行，其热敏组件与被测气体直接接触换热，测量滞后小，灵敏度高，输出线性好。通常采用双桥结构，能有效补偿样气压力、环境温度等干扰影响。但结构复杂，制造困难。工作原理见图 10-5。

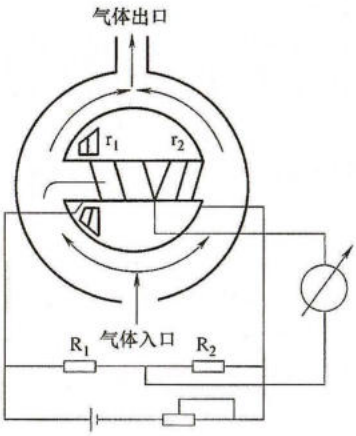


图 10-4　内对流热磁式氧分析仪工作原理示意图

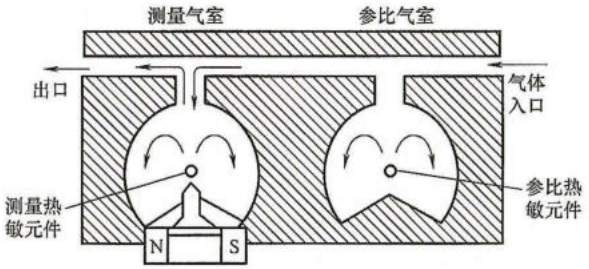
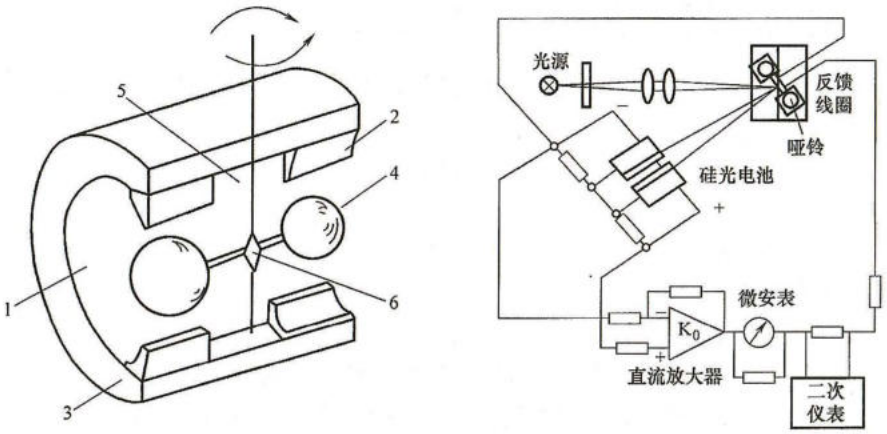


图 10-5　外对流热磁式氧分析仪工作原理示意图

10.1.3.2　*磁力式*

磁力机械式氧分析器，也是利用氧的顺磁性而设计的。磁力机械式氧分析器检测部件结构及原理示意见图 10-6。



1—密闭气室；2,3—磁极；4—空心球体；5—弹性金属带；6—反射镜

图 10-6　磁力机械式氧分析器检测部件结构及原理示意图

在一个密闭的气室中，装有两对不均匀磁场的磁极 2 和 3，它们的磁场强度梯度正好相反。两个空心球体 4（内充纯净的氮气或氩气）置于两对磁极的间隙中，空心球之间通过连杆连接在一起，形状类似哑铃。连杆用弹性金属带 5 固定在气室壳体上，这样哑铃只能以金

属带为轴转动而不能上下移动。

在连杆与金属带交点处装一平面反射镜 6，被测样气由入口进入气室后就充满了气室。两个空心球被样气所包围，被测样气的含氧量不同，受到磁场的作用力 F_M 就不同。如果两个空心球体积相同，则受到的力大小相等、方向相反，对于中心支撑点金属带而言，它受到的是一个力偶 M_M 的作用，这个力偶促使哑铃以金属带为轴心偏转，该力偶矩为：

$$M_M = F_M \times 2R_P \tag{10-9}$$

式中 R_P——球体中心至金属带的垂直距离（哑铃的力臂）。

在哑铃做角位移的同时，金属带会产生一个抵抗哑铃偏转的复位力矩以平衡 M_M，被测样气中的含氧量不同，旋转力矩和复位力矩的平衡位置不同，也就是哑铃的偏转角度 Φ 不同，这样哑铃偏转角度 Φ 的大小，就反映了被测气体中含氧量的多少。

对哑铃偏转角度 Φ 的测量，大多是采用光电系统来完成的，由光源发出的光投射在平面反射镜上，反射镜再把光束反射到两个光电元件（如硅光电池）上。在被测样气不含氧时，空心球处于磁场的中间位置，此时平面反射镜将光源发出的光束均衡地反射在两个光电元件上，两个光电元件接收的光能相等，一般两个光电元件采用差动方式连接，因此，光电组件输出为零，仪表最终输出也为零。

当被测样气中有氧存在时，氧分子受磁场吸引，沿磁场强度梯度方向形成氧分压差，其大小随含氧量不同而异，该压力差驱动空心球移出磁场中心位置，于是哑铃偏转一个角度，反射镜随之偏转，反射出的光束也随之偏移，这时，两个光电元件接收到的光能量出现差值，光电组件有毫伏电压信号输出。被测气体中含氧量越高，光电组件输出信号越大。该信号经反馈放大镜放大作为仪表输出。

为了改善仪器的输出特性，有的在空心球的外围环绕一匝金属线圈，如图 10-7 所示。该金属线圈在电路上接收输出电流的反馈，对哑铃产生一个附加复位力矩，从而使哑铃的偏转角度 Φ 大大减小。

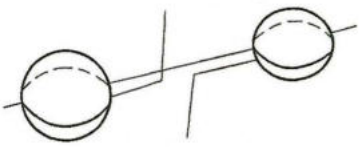


图 10-7 空心球外围环绕一匝金属线圈

10.1.3.3 磁压式

磁压力式氧分析器是指采用被测气体在磁场作用下压力的变化量来测量含氧量的一类仪器。测量原理如下。被测气体经入磁场后，在磁场作用下气体的压力将发生变化，只是气体在磁场内和无磁场空间存在着压力差。

$$\Delta P = 1/2\mu_0 H^2 k \tag{10-10}$$

式中 ΔP——压差；

μ_0——真空导磁率；

H——磁场强度；

k——被测气体的体积磁化率。

由上式可知压差 ΔP 与磁场强度 H 的平方及被测气体的体积磁化率 k 均成正比。在同一磁场中，同时引入两种磁化率不同的气体，那么两种气体同样存在着压力差，这个压力差与两种气体磁化率的差值也同样存在正比关系。

$$\Delta P = 1/2\mu_0 H^2 (k_m - k_r) \tag{10-11}$$

式中 k_m——被测气体的体积磁化率；

k_r——参比气体的体积磁化率。

当分析器结构与参比气体确定后 μ_0、H、k_r 均为已知量，k_m 与 ΔP 有着严格的线性关

系。由于被测混合气体的体积磁化率基本上取决于被测气体中氧的磁化率及其体积分数。

$$k_m \approx k_1 c_1 \tag{10-12}$$

式中　k_1——被测混合气体中氧的体积磁化率；

c_1——被测混合气体中氧的体积分数。

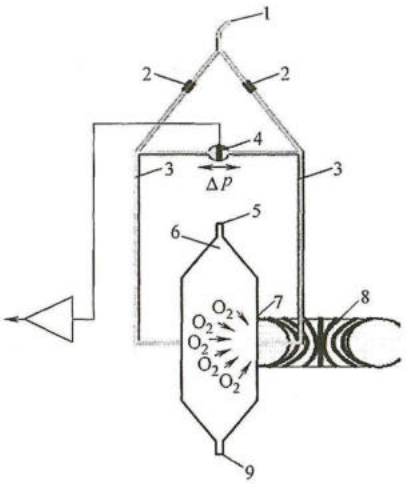
由此可以得到磁压力式氧分析器的测量原理如下：

$$\Delta P = 1/2\mu_0 H^2 (k_1 c_1 - k_r) \tag{10-13}$$

磁压力式氧分析器中，被测混合气体中氧的体积分数与压差 ΔP 有线性关系，测量室中被测气体的压力变化量被传递到磁场外部的检测器中转换为电信号。目前使用的检测器主要有微流量检测器和薄膜电容检测器等。

（1）采用微流量检测器的磁压力式氧分析器

磁压力式氧分析仪产品介绍，采用微流量检测器的磁压力式氧分析器。以 OXYMAT61 型为例，介绍磁压式氧分析仪的测量原理如图 10-8 所示。



1—参比气入口；2—限流器；3—参比气通道；4—测量信号的微流量传感器；5—样气入口；6—样气室；7—顺磁测量效应；8—磁通量密度和可变的电磁体；9—样气和参比气出口

图 10-8　OXYMAT61 测量原理图

在不均匀磁场中，氧分子由于其顺磁性，会朝着磁场力增强的方向移动。当氧气浓度不同的两种气体在同一磁场中相遇时，它们之间将会产生一个压力差。OXYMAT61 型仪器的通道中，参比气体（N_2、O_2 或者是空气）由入口经两个限流器，从双通道进入样气室中；样品气从入口进入样品气室，并与参比气相遇。当电磁铁通电励磁时，周围形成不均匀磁场，样品气中氧分子被吸引，朝磁场强度较大的右侧运动，进入顺磁测量效应区；由于参比气与样品气两种气体的氧浓度不同，在磁场相遇时会产生压力差，使得顺磁测量效应区的气体压力高于参比气设定的压力，此压力差 ΔP 与氧气浓度成比例关系，并使得参比气的双通道中间相连的微流量传感器的通道产生一个气流；微流量传感器测得该气流并将它转变为一个电信号。当样品气的含氧量与参比气含氧量相同时，或电磁铁去磁时，由于不存在压力差，在微流量传感器的通道中没有气流，输出电信号为零。因此，采取一定频率的通断电流，对电磁铁反复励磁和去磁，便可在测量桥路中得到交流波动信号，信号强度与样品气中的含氧量成正比。

微流量传感器中有两个被加热到 120℃的镍格删电阻，和两个辅助电阻组成惠斯通电桥，脉冲气流会导致镍格栅的电阻发生改变，这就会导致生成一个取决于样品气中氧浓度大小的电桥偏移量。采用微流量传感器检测压差 ΔP 的方法具有显著的优点，因为流量传感器是位于参比气流中的，所以测量不会受到样品气热导率、温度或内部摩擦的影响；流量传感器与样品气没有直接的接触，不受样品气中腐蚀性气体的影响，因而具有高度的防腐蚀性。通过改变磁场的强度，使背景气流影响减小，因此仪器摆放方向对测量没有影响。由于样品气室是直接置于样气路中并且体积小，所以磁压式氧分析仪的响应时间非常短。

磁压式氧分析仪的性能指标如：测量误差及稳定性都比较好，如 O61 的线性误差为±1%F. S.，重复性误差为±0. 5%F. S.，稳定性可达到±0. 5%F. S. /月。

磁压力式氧分析器大多可达到如下性能指标：

1）测量范围：（0～1%）O_2、（0～100%）O_2。

2）线性偏差：<±1%F. S.。

3）重复性误差：<±1%F. S.。

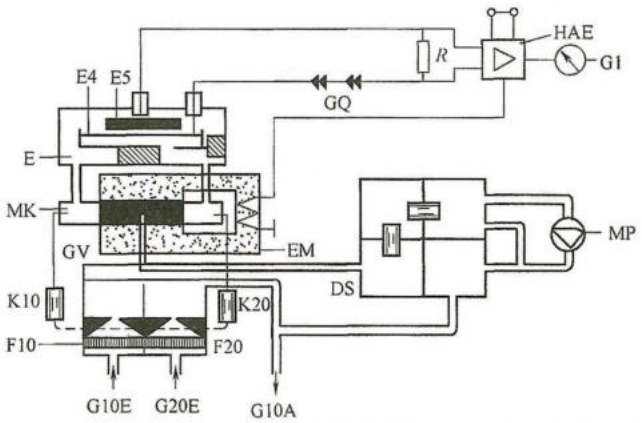
4）零点漂移：<±1%F. S. /7 天。

5）量程漂移：<±1%F. S. /7 天。

6）响应时间：2. 5～4s。

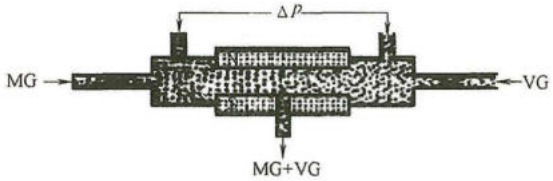
（2）采用薄膜电容检测器的磁压力式氧分析器

CY-101 型（引进 H&B Magnos4G）测量原理如图 10-9 所示。



G10E — 参比气入口；G20E — 测量气入口；GV — 气体分配器；F10，F20 — 过滤片；K10，K20 — 毛细管；MK — 测量池；EM — 电磁铁线圈；E — 接收器；E4 — 钛膜电极；E5 — 固定电极；HAE — 供电电源和电子电路；GQ — 直流电源；R — 高阻；G1 — 机箱显示表头；DS — 缓冲器；MP — 膜片泵；G10A — 混合气出口

(*a*) 工作原理流程



Δ*p* — 压差；MG — 测量气体；VG — 参比气体；MG+VG — 混合气体

(*b*) 测量气室工作原理

图 10-9　薄膜电容检测器磁压力式氧分析器的测量原理图

工作原理流程图中，参比气和测量气分别经入口 G10E 和 G20E 进入气体分配器 GV，由气体分配器内的过滤片 F10 和 F20 进行保护型过滤，极少一部分参比气和测量气分别经毛细管 K10 和 K20 进入测量池 MK，大部分气体从出口 G10A 排出仪器外，这样可使得进入测量池的气体压力、流量保持稳定和平衡。

测量气室工作原理图中，参比气 VG 和测量气 MG 相对进入测量池中的磁隙中，在膜片泵 MP 的抽吸作用下，MG＋VG 混合气体经测量池底部的中间出口进入缓冲器 DS 中，然后从出口 G10A 排出。

磁隙位于电磁铁线圈 EM 的中间，当 EM 通入 12. 5Hz 的交流电流时，便在磁隙周围产生相同频率的磁场，两种气体通过磁场时，由于氧的顺磁性而使气体中的氧分压发生变化，

气体中的氧浓度与压力的变化呈线性关系。当两者氧浓度相同时，两种气体间就不存在压差，这就是仪器零点；当两者氧浓度不同时，两种气体间就会产生一压差 ΔP，此压差传递到接收器 E 中的钛膜电极 E4 的两侧，使薄膜电容器的钛膜电极（可动电极）产生偏移，薄膜电容器的电容量发生变化，将压差信号转换成与之成比例的电信号，经电子电路 HAE 放大处理输出信号并由显示表 G1 显示含氧量。

10.1.4　极限电流型氧化锆传感器

极限电流型氧化锆传感器利用陶瓷氧化锆的氧泵原理进行工作（图 10-10），即传感器的阴极一侧的小孔对流入气体的限制作用。所谓氧泵原理即在高温条件下被测气氛中的氧气被氧化锆传感器电极催化电离成氧离子，此时在氧化锆的阳极和阴极施加一个工作电压提供一个电场驱动氧离子从阴极通过氧化锆到阳极形成氧离子电流。

当被测气氛中的氧浓度一定时，氧化锆传感器输出的电流值不再随外加电压的增加而增加，而是达到某一恒定值，这个恒定电流值称作该氧浓度的极限电流值，我们称作第一极限电流值。根据这个工作原理，当被测气氛中含有水蒸气后，通过提高外加的工作电压，这时水蒸气在高温条件下也被电离成氧离子。同理当被测气氛中的水蒸气浓度一定时，氧化锆传感器输出一个恒定电流值，称作第二极限电流值。

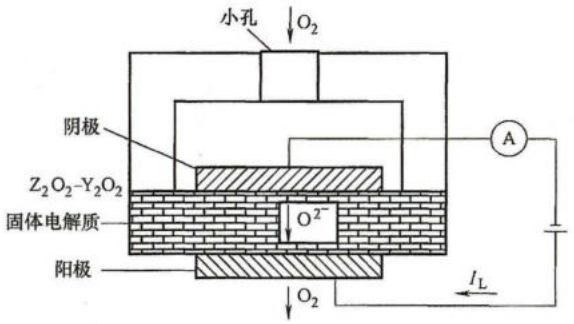


图 10-10　极限电流型氧化锆传感器工作原理示意图

极限电流与外加电压的关系曲线如图 10-11 所示。

在含有水蒸气条件下传感器输出极限电流的关系曲线如图 10-12 所示。

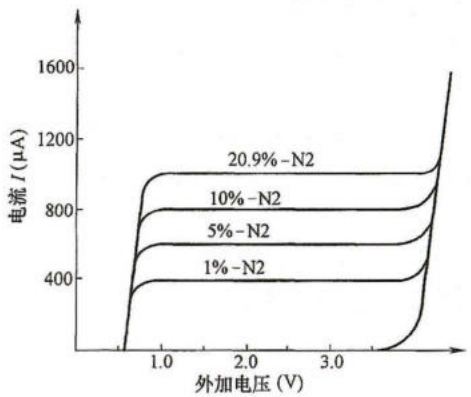


图 10-11　极限电流与外加电压的关系曲线图

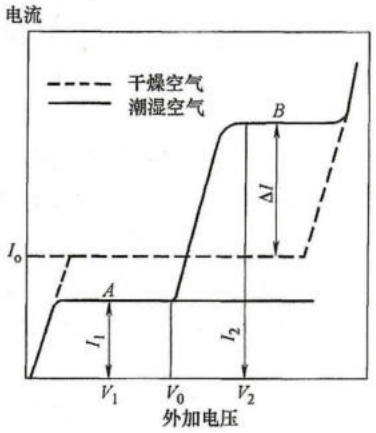


图 10-12　在含有水蒸气条件下传感器输出极限电流的关系曲线图

在传感器阴极和阳极的反应如下：

阴极侧：

$$O_2+4e^-\longrightarrow 2O^{2-} \tag{10-14}$$

$$H_2O+2e^-\longrightarrow H_2+O^{2-} \tag{10-15}$$

阳极侧：

$$O^{2-}\longrightarrow 1/2O_2+2e^- \tag{10-16}$$

按照传感器的气体扩孔限制 Ficks 法则，在假定氧的扩散系数与水蒸气的扩散系数相等的情况下，第一极限电流 I_1 与第二极限电流 I_2 分别由下式表示：

$$I_1=\{-4FDSP/(RTL)\}\ln(1-P_{O_2}/P) \tag{10-17}$$

$$I_2=\{-4FDSP/(RTL)\}\{(1+P_{H_2O}/2P_{O_2})\} \tag{10-18}$$

$$P_{O_2}=0.21(P-P_{H_2O}) \tag{10-19}$$

式中 F——为法拉第常数；

D——为混合气体分子的扩散系数；

S——为扩散孔的面积；

P——为混合气体总压压强；

P_{O_2}——氧分压压强；

P_{H_2O}——水蒸气分压压强；

R——是气体常数；

T——是绝对温度；

L——是气体扩散孔的长度；

0.21——为空气中氧气含量。

10.2 安装调试要点

10.2.1 氧化锆

10.2.1.1 直插式

根据氧化锆探头结构形式和安装方式的不同，可把氧化锆氧分析器分为直插式和抽吸式两类，就使用数量而言，目前大量使用的是直插式氧化锆氧分析器。

直插式氧化锆氧分析器，将探头直接插入烟道中进行分析，直插式探头有以下几种类型。

(1) 中、低温直插式氧化锆探头：这种探头适用于烟气温度 0～650℃（最佳烟气温度 350～550℃）的场合，探头中自带加热炉，主要用于火电厂锅炉、6～20t/h 工业炉等，是目前国内用量最大的一种探头。

(2) 高温直插式氧化锆探头：这种探头本身不带加热炉，靠高温烟气加热，适用于 700～900℃的烟气测量，主要用于电厂、石化厂等高温烟气分析场合。

10.2.1.2 抽取式

这类分析器的氧化锆探头安装在烟道壁或炉壁之外，将烟气抽出后再进行分析。其主要用于以下两种场合。

(1) 用于烟气温度 700～1400℃的场合

例如：钢铁厂的有些加热炉烟气温度高达900～1400℃，这种场合不能采用直插式探头进行测量，而是将高温烟气从炉内引出，散热后温度降低，再流过恒温的氧化锆探头就可以获得满意的结果。

如前所述，高温直插式氧化锆探头可用于700～900℃的烟气测量，但当燃烧系统不稳定时，这种探头易受烟气温度波动和高温烟气的影响，使其应用受到一定限制。这种场合也可采用抽吸式氧化锆氧分析器进行测量，从而避免高温烟气对探头的影响。

(2) 用于燃气炉

直插式氧化锆氧分析器可用于燃煤炉、燃油炉，但不适用于燃气炉。这是由于采用天然气等气体燃料的炉子，烟道气中往往含有少量的可燃性气体，如H_2、CO、CH_4等。氧化锆探头的工作温度在750℃左右，在高温条件下，由于铂电极的催化作用，烟气中的氧会和这些气体成分发生氧化反应而耗氧，使测得的含氧量偏低。当燃烧不正常、烟气中可燃性气体含量较高时，与高温氧化锆探头接触甚至可能发生起火、爆炸等危险。

10.2.2 燃料电池

10.2.2.1 碱性燃料电池氧传感器

碱性液体燃料电池由银电极＋铅阳极＋KOH碱性电解液组成。适用于一般场合测量微量氧和常量氧；当被测气体中含有酸性成分（如CO_2、H_2S、Cl_2、SO_2、NOx等）时，会与碱性电解液起中和反应，并对银电极有腐蚀作用，造成电解池性能衰变、灵敏度下降、响应时间变慢，不适用于含酸性成分的气体测量。

10.2.2.2 酸性燃料电池氧传感器

该电池适用于被测气体中有酸性成分的场合，例如烟道气的分析，不适用含碱性成分（如NH_3等）的气体测量。只能测常量氧，不能用于微量氧测量。

10.2.3 顺磁氧

10.2.3.1 磁力机械式氧分析器使用注意事项

磁力机械式氧分析器基于对磁化率的直接测量，像氧化氮等一些强顺磁性气体会对测量带来严重干扰，所以应将这些干扰组分除掉。此外，一些较强逆磁性气体也会引起不容忽视的测量误差，如氙（Xe）等，若气样中有含量较多的这类气体时，也应予以清除或对测量结果采取修正措施。

氧气的体积磁化率是压力、温度的函数，气样压力、温度的变化以及环境温度的变化，都会对测量结果带来影响。因此，必须稳定气样的压力，使其符合调校仪表时的压力值。环境温度及整个检测部件均应工作在设计的温度范围内，一般来说，各种型号的磁力机械式氧分析器均带有温度控制系统，以保证检测部件在恒温条件下工作。

无论是短时间的剧烈振动，还是轻微的持续振动，都会削弱磁性材料的磁场强度，因此，该类仪器多将检测部件的敏感部分安装在防振装置中。同时，仪器安装位置也应避开振源并采取适当的防振措施。另外，任何电气线路不允许穿过这些敏感部分，以防电磁干扰和振动干扰。

10.2.3.2 磁压式氧分析器使用注意事项

磁压式氧分析器的优点是背景组分对测量的影响很小，因此适用于测量组分比较复杂又含有腐蚀性气体的样品条件下测量含氧量；但是磁压式氧分析仪需要使用参比气，参比气可以根据测量范围不同，分别采用N_2、O_2和空气，当测量下限为0%O_2时，采用N_2作参比

气；当测量上限是100%O_2时，用O_2作参比气；当测量范围在20.95%O_2附近时，采用空气做参比气。由于参比气的流量一般都较小，例如：O61的参比气流量一般保持在5～10mL/min，小于0.6L/h；对一个容量40L，充装压力10MPa高压气瓶，可以使用10个月左右。国内使用的进口磁压式氧分析仪大多是O61型氧分析仪，国内主要有CY-101型，以及Oxyser-6N型磁压式氧分析器。Oxyser-6N型的工作原理与O61及CY-101的均不同，属于磁压-温度效应型，性能指标也差不多。

10.2.4 极限电流型氧化锆传感器

极限电流型氧传感器的优点是测试精度高、响应时间快，能应用于500℃以下的环境中，可以在CEMS环境中使用。但传感器遇到冷凝水极易损坏，所以对于安装环境要求较高，使用位置及预处理环节需充分避免冷凝水形成。

10.3 日常运营要点

10.3.1 氧化锆

（1）如果有在高温下与氧反应的可燃气体或者腐蚀氧化锆元件的气体存在，测定结果会有误差。

（2）仪器使用的环境条件，应按照说明书的要求执行。

（3）一般传感器使用寿命1年，当超过使用寿命后传感器可能失效，应及时更换。在高原地区按照当地空气含氧量数值标定。

（4）仪器的标定、校准及技术指标按相关标准执行。

10.3.2 燃料电池

（1）当被测气体中含有Cl_2、H_2S、HF时，对传感器有损坏和干扰测量，应避免使用。

（2）仪器使用的环境条件，应按照说明书的要求执行。

（3）一般传感器使用寿命1～2年，当在清洁环境空气中测量含氧量小于20.9%时，传感器可能失效，应及时更换。在高原地区按照当地空气含氧量数值标定。

（4）仪器使用中要防止排气口堵塞，造成传感器损坏。

（5）仪器的标定、校准及技术指标按相关标准执行。

10.3.3 顺磁氧

（1）仪器使用的环境条件，应按照说明书要求执行。

（2）严格按照仪器使用说明书的要求使用、维护和保养仪器。

（3）仪器启动后，必须充分预热，再进行仪器的校准和测定，否则影响测定的准确度。

（4）仪器一般用高纯氮气调零；在测量浓度接近空气的情况下，可用新鲜的空气进行仪器终点校准。

（5）必须保证通入仪器的气体是经过预处理的气体，以保证仪器的测量精度和使用寿命。

（6）仪器可在实验室对采集袋中气体进行气体的测定，也可以在现场进行连续的测量。对于一些仪器，甚至可以进行无人值守的全自动测量、校准、数据传输等。

（7）用采集样气注入仪器进行分析时，一定要确保采集的气体具有代表性，采集量一般为500mL。为了保证分析的准确性，采集气体后应尽快分析。

（8）仪器的标定、校准及技术指标按相关标准执行。

（9）降低使用过程中可能出现的附加误差，如样气的温度变化、压力变化、流量变化、背景成分变化、预处理系统引起的误差以及标准气体的组成带来的测量误差等。

10.3.4　极限电流型氧化锆传感器

（1）仪器使用的环境条件，应按照说明书要求执行。

（2）严格按照仪器使用说明书的要求使用、维护和保养仪器。

（3）仪器启动后，必须充分预热，再进行仪器的校准和测定，否则影响测定的准确度。

（4）仪器一般用新鲜环境空气校准，在通入环境空气的情况下，可进行仪器低点校准，确保仪器测量准确；定期进行实验室校准工作。

（5）必须保证通入仪器的气体是经过预处理的气体，以保证仪器的测量精度和使用寿命。

10.4　典型应用案例：酸性液体燃料电池

酸性液体燃料电池由金阴极＋铅阳极（或石墨阳极等）＋醋酸电解液组成，酸性燃料电池氧传感器的工作原理结构参见图10-13。

该燃料电池电解液为醋酸（乙酸，CH_3COOH）溶液，可表示为：阴极 Au ｜ CH3COOH ｜ C 阳极，被测气体中的氧分子通过FEP（聚全氟乙丙烯）氧扩散膜进入燃料电池，在电极上发生如下反应：

金阴极：

$$O_2+2H_2O+4e\longrightarrow 4OH^- \qquad (10\text{-}20)$$

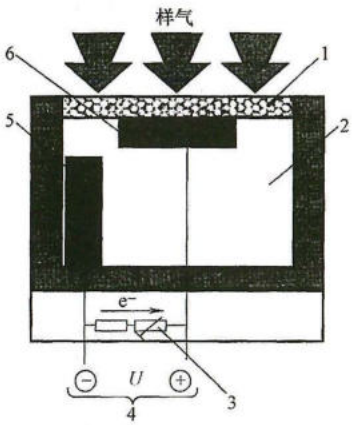
石墨阳极：

$$C+4OH^-\longrightarrow CO_2+2H_2O+4e \qquad (10\text{-}21)$$

电池的综合反应：

$$O_2+C\longrightarrow CO_2 \qquad (10\text{-}22)$$

反应生成的电流与含氧量成正比。该电池适用于被测气体中有酸性成分的场合，例如烟道气的分析，不适用含碱性成分（如 NH_3 等）的气体测量。只能测常量氧，不能用于微量氧测量。



1—FEP制成的氧扩散膜；2—电解液（乙酸）；3—用于补偿的热敏电阻和负载电阻；4—外电路信号输出；5—石墨阳极；6—金阴极

图10-13　酸性燃料电池氧传感器的工作原理结构

火电厂行业，在脱硫、脱硝出入口监测点位（脱硝出口氨逃逸监测达标情况下），普遍采用氧电池传感器（酸性燃料电池氧传感器）进行氧量监测。通过抽取样气经预处理后进入仪表内部的氧电池传感器进行测量，极大地减少了工况烟气成分干扰，成本低、寿命长。

OXY-11型和OXY-12型氧传感器（酸性燃料电池氧传感器）在火电行业累计应用已达到万套以上，是典型的成功应用案例。

第 11 章　烟气流速 CMS

11.1　监测技术

在 CEMS 的排放总量计算中，涉及烟气流量的测量，烟气流量值是总量排放计算的重要参数。烟气流量监测的本质是烟气流速测量，根据烟气流速的测定和烟道横截面积可求得烟气的实际流量，因此烟气流量测量也称为烟气流速测量。

烟气流速的测量方法有压差法、超声波法、光闪烁法、热平衡法、靶式流量计法、红外线法等。烟气流速的测量又分为点测量和线测量，点测量是指在烟道或管道某一点上或沿着等于或小于断面直径 10%的路径上的测量；线测量是指沿着大于烟道或管道断面直径 10%的路径上的测量。

无论是点测量或线测量都需要将测量点和测量线的烟气流速转换为测量断面的烟气流速，并通过建立流速测量与参比方法测量烟气平均流速的关系，即速度场系数或线性相关，实现将烟气点、线烟气平均流速转换为测量断面的烟气平均流速。

目前国内 CEMS 常用的是压差法、超声波法。压差法测量流速简单方便，市场应用范围较广，但在低流速场合测量误差较大；超声波测量法的测量精度较高，价格较贵，对于监测要求较高的 CEMS，可配套这种仪器。其中，压差法是点式测量、超声波法是线式测量。相对而言，线式测量比点式测量具有代表性，两者都要转换为对烟道断面的烟气平均流速测量与所测量的烟道横截面积相乘，并计算出实际的湿烟气流量，再根据其他参数计算出标准状态下的干烟气流量。

11.1.1　皮托管法

皮托管法属于压差法中最为常见的一种方式。其中 S 形皮托管流速仪应用最为普遍，其测量原理如下：

S 形皮托管由两根管组成，在测量端的两根管子头部开有大小相等方向相反的开口，一根管的开口面向气流方向测量全压，另一根管的开口背向气流方向测量静压。

采用斜管微压计或微差压变送器测量两根管的压力之差，即得到烟气动压（动压＝全压－静压），烟气动压的平方根和流速成正比。

S 形皮托管的结构见图 11-1。它是由两根相同的金属管并联组成，测量端有方向相反的

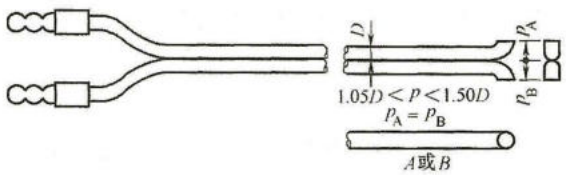


图 11-1　S 形皮托管结构

两个开口，面向气流的开口测全压，背向气流的开口测静压，S形皮托管的测压孔较大，不易被烟尘堵塞，其修正系数为 K_p，正常范围为 0.81～0.86。

皮托管测速法的烟气流速 V_s 计算如下：

$$V_s=K_p\sqrt{\frac{2P_d}{\rho_s}}=128.9K_p\sqrt{\frac{(273+t_s)P_t}{M_s(P_a+P_s)}} \tag{11-1}$$

式中 V_s——烟气流速，m/s；

K_p——皮托管修正系数；

P_d——烟气动压，Pa；

ρ_s——烟气密度，kg/m^3；

T_s——烟气温度，℃；

M_s——烟气分子量，kg/kmol；

P_a——大气压力，Pa；

P_s——烟气静压，Pa。

烟气流速仪的在线测量，通常将皮托管与热电阻温度计组成一体化探头，并采用微差压变送器监测压力。检测信号传输至测量控制器并将烟气分子量 M_s 的估计值代入烟气流速 V_s 的计算公式，就可以方便地计算出烟气流速 V_s。

由于皮托管流速仪测量方法简单、可靠，探头安装及维护方便，价格也较便宜，已经广泛应用于烟气 CEMS。皮托管法实际测定的最小压差约为 5Pa，能够测量烟气的最低流速约为 2～3m/s，因此皮托管法流速仪适用于在烟气流速大于 5m/s 以上场合，否则影响烟气流速测量的准确性。

阿牛巴皮托管也是皮托管法的改进型，管上开有 4 个或 4 个以上的孔，面对气流方向的高压测孔和背向气流方向的低压测孔分别测量全压和静压，该方法同样属于压差法原理。

11.1.2 多点差压法

矩阵式烟气流速测量系统采用多点式差压测量方式，在同一烟道截面在代表性区域布设多个探头测量烟气流量，输出流速代表断面平均流速、烟气温度和压力，可大大提高烟气流速测量的代表性和准确性，有效解决因烟囱或烟道内流场分布不均而导致监测断面流速测量不准确的难题。

该方法尤其适用于短烟道烟气流速测不准的实际问题，短烟道内流场分布非常复杂，且极不均匀，传统的单点流速测量方法很难反映烟道断面的平均流速。在代表性区域进行多个布点式差压监测，其测量值真正代表整个断面流速。

11.1.3 超声波法

烟气流速测量中使用的超声波流量计均采用时间差法。时差法超声波流量计的测量原理是：超声波在流体中的传播速度，顺流方向和逆流方向是不一样的，其传播的时间差与流速成正比。测得发射器和接收器在两个方向的传播时间差即可求得流速。

经典的超声波流量计是在烟囱或烟道的两侧各安装一个超声换能器，即发射/接收超声传感器，角度为 30°～60°。仪器的发射器同时发出频率为 50kHz 的超声波脉冲信号，仪器的接收器分别接受另一侧发射器发射的超声波脉冲信号，两个发射接收器之间的距离为 L。发射器把电信号转换成声脉冲信号，接收器把声脉冲信号转换为电信号。发射器发出的超声波脉冲信号顺气流到达接收器的时间与逆气流到达另一个接收器的时间的差，与气流的流速

有关。超声波法测量烟气流速的原理参见图 11-2。

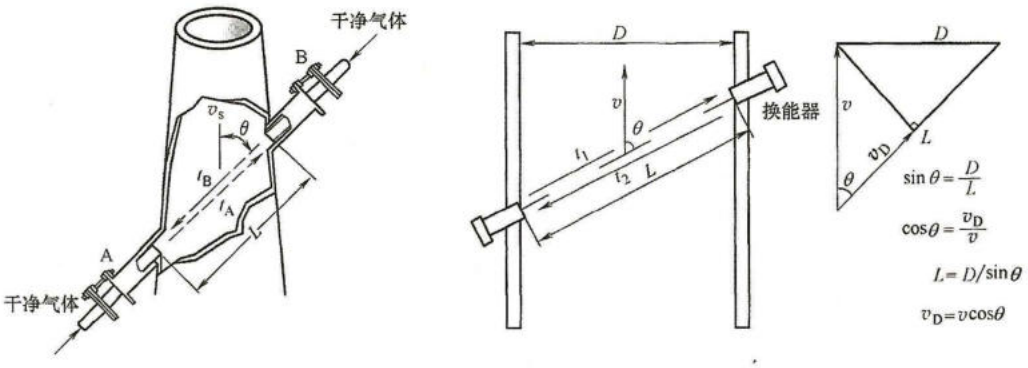


图 11-2 时差法超声波流量计测量原理示意图

如图 11-2 所示，超声波在顺流方向的传播时间 t_1 为

$$t_1=\frac{L}{c+v_P}=\frac{D/\sin\theta}{c+v\cos\theta} \tag{11-2}$$

超声波在逆流方向的传播时间 t_2 为

$$t_1=\frac{L}{c-v_P}=\frac{D/\sin\theta}{c-v\cos\theta} \tag{11-3}$$

式中 D——管道内径，mm；

L——超声波声程，mm；

c——静止流体中的声速，m/s；

v——管道内流体流速，m/s；

v_p——流体流速 v 在声道方向上的速度分量，m/s；

θ——超声波传播方向和流体流动方向的夹角，°。

由上式可得：

$$c=\frac{D/\sin\theta}{t_1}-v\cos\theta \tag{11-4}$$

$$c=\frac{D/\sin\theta}{t_2}+v\cos\theta \tag{11-5}$$

经转换后可得：

$$\frac{D/\sin\theta}{t_1}-v\cos\theta=\frac{D/\sin\theta}{t_2}-v\cos\theta \tag{11-6}$$

$$v=\frac{D(t_2-t_1)}{2t_1t_2\sin\theta\cos\theta}=\frac{D(t_2-t_1)}{t_1t_2\sin2\theta} \tag{11-7}$$

由于 $\theta=45°$，$2\theta=90°$，所以 $\sin2\theta=1$，则上式可化为：

$$v=\frac{D(t_2-t_1)}{t_1t_2} \tag{11-8}$$

上式就是时差法超声波流量计测量流体流速的公式。

声音在被测介质中的传播速度和被测介质的温度、压力有关。温度越高，压力越大，声音传播得越快，反之则越慢。其中声速受温度的影响较大，且声速的温度系数不是常数。目前的超声波流量计产品都具有实时温度、压力自动补偿功能，当被测流体的温度、压力变化时，对流量计的指示影响很小，故可以看作对测量示值不产生影响。超声波法能够测量低至 0.03m/s 的烟气流速。

11.1.4　光闪烁法

光闪烁法已经用于测定大气的风速。该方法用于测定烟气流速的基本原理是基于烟道或管道中烟气的紊流常以涡流形式存在。在不同的涡流中，气体的温度不一样，某些较热、某些冷，此种温度差即可表示出气流的强度。

当气流的温度改变时，它的密度也改变，同时也改变了对光的折射率。当光穿过冷热不同的涡流时，由于气流对光的折射率不同，光波相位发生了不规则的改变，就像隔着火炉看对面的景象会发生扭曲的现象一样。不同相位光波干涉的结果，也引起光强度的闪烁。像星光的闪烁，其实也就是受到大气紊流的干扰所致。当一束圆形的光经过紊流的干扰后即形成不规则的明暗区，并随时闪动。可用光学仪测量这种闪动，从而推算出光源发射器与接收器之间气流的平均流速。

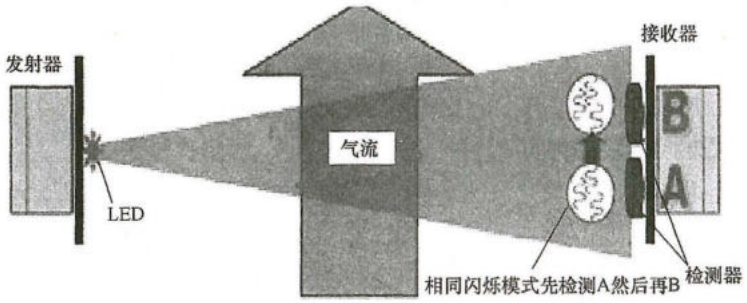


图 11-3　利用光闪烁技术检测平均风速的模型图

根据泰勒冻结湍流假设理论，在很短时间内并具有明显风速情况下，涡流穿过一束光时可近似认为形状不变，并且光径上不同位置涡流产生的闪烁不相关。如图 11-3 所示，不同温度涡流被速度为 v 的气流吹动穿过光束，引起了光强度闪动变化。图中 Transmitter（简称 TX）是发射器，Receiver（简称 RX）为接收器。接收器内配置两个在流动方向上相距为 r 的探测器，探测器检测光强闪动变化并转换成电信号。如果把涡流看成是流体中的流动标识点，记录流动标识点经过这两个探测器所用时间 t 即可以计算出流速 $v=r/t$。流动标识点不是人为的，而是流动本身光传输特性不均匀所形成的光斑以及由流体温度或密度变化造成折射率的不均匀分布、气溶胶或污染体散射吸收的空间时间变化形成的图形。因此这两个探测器接收到的光强服从统计规律，即是随时间变化的随机信号，系统的对数振幅（光强）闪烁协方差函数如式（11-9）。

$$C_X(\rho,\tau)=0.132\pi^2k^2\int_0^L \mathrm{d}z C_n^2(z)\int_0^\infty \mathrm{d}K K^{-\frac{8}{3}}\sin^2\left[\frac{K^2z(L-z)}{2kL}\right]$$
$$\times J_0\left[K\left|\rho\frac{z}{L}v(2)\tau\right|\right]\times\left[\frac{2J_1\left(\frac{KD_rz}{2L}\right)}{\frac{KD_rz}{2L}}\right]^2\left\{\frac{2J_1\left[\frac{KD_t}{2}\left(1-\frac{z}{L}\right)\right]}{\frac{KD_t}{2}\left(1-\frac{z}{L}\right)}\right\}^2 \tag{11-9}$$

式中　τ——延迟时间，s；

v——流速，m/s；

C_n^2——路径综合折射湍流指数，在这里假设 C_n^2 沿着光径是均匀的；

D_r、D_t——发射器和接收器圆孔直径，mm；

r——两个探测器的间距，mm；

J_0——第一类零阶；

J_1——一阶贝塞尔函数。

由系统的对数振幅（光强）闪烁协方差函数曲线顶点的延迟时间 t 即可推算出涡流移动的速度即风速，如图 11-4 所示。

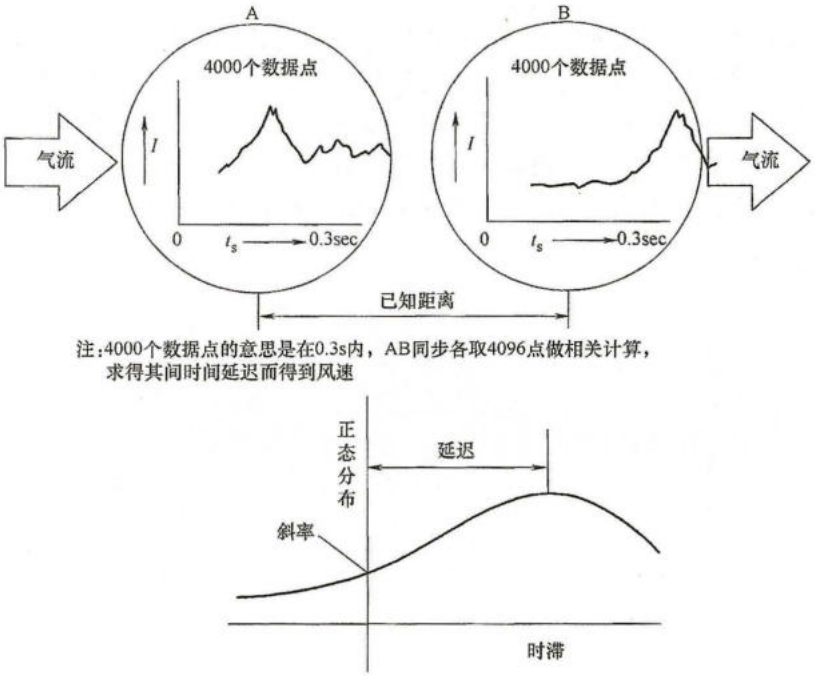


图 11-4 归一化协方差函数示意图，常用峰值延迟来测量图形的漂移速度

11.2 安装调试要点

依照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 和《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》HJ 76—2017 要求。

11.2.1 安装测点位置基本要求

环境温度变化较小，振动幅度较小，不受电磁辐射干扰，安装位置稳定、牢固，优先选择垂直管段和烟道负压区域。

测点位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。对于圆形烟道，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向≥4 倍烟道直径，以及距上述部件上游方向≥2 倍烟道直径处。对于矩形烟道，应以当量直径计，其当量直径计算。

$$D=\frac{2AB}{(A+B)} \tag{11-10}$$

式中 D——当量直径；

A、B——边长。

烟气流速 CMS 的测量装置如需要伸入烟道或烟囱内部，测点位置尽量靠近烟道或烟囱

内中心位置，测点至烟道内壁距离应≥1/3 当量直径。

11.2.2 调试过程基本要求

烟气流速 CEMS 现场检测的技术要求分为初检期间的速度场系数及复检期间流速测量的准确性要求。

速度场系数是指通过烟道或管道断面烟气的参比方法平均流速与相同时间区间内通过同一断面或非同一断面中某一固定点或测定线的烟气平均流速的比值，测量精密度应≤5%。

流速测量的准确性按照速度相对误差要求：当参比方法测定流速＞10m/s 时，速度相对误差不超过±10%；当参比方法测定流速≤10m/s 时，速度相对误差不超过±12%。

调试过程注意系统数据采集软件量程应与设备流速量程对应一致。

11.2.3 皮托管法流速 CMS 安装与调试

S 形皮托管的结构与安装示意图参见图 11-5。

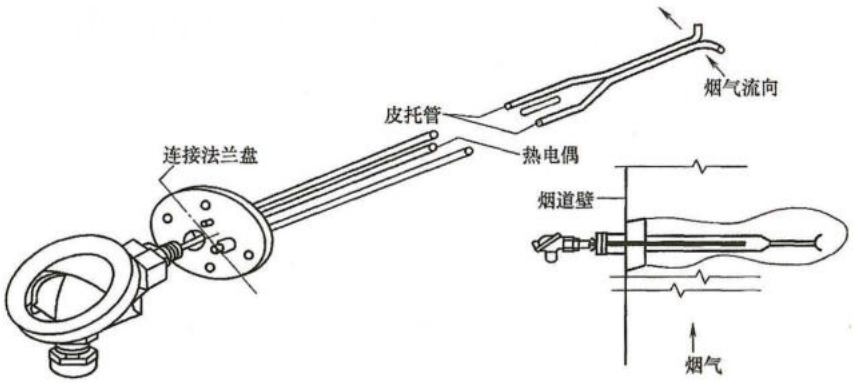


图 11-5 S 形皮托管的结构与安装示意图

S 形皮托管只能测量烟道内某一点的流速，而烟道内的烟气流场分布大多呈层流分布，因此皮托管的测量点必须选择在具有代表性、烟气流场必须稳定的测量点，避开涡流位置。

烟道上的对装法兰盘焊接牢靠、不出现歪斜，保证设备安装后位置正常，避免安装偏差导致设备测量产生误差。

测压孔（全压）开口面与烟气流动方向垂直，否则测量的压差会存在误差，从而导致流速出现偏差。流速偏差的大小，一定程度上取决于气流方向与测压孔（全压）开口面的角度。

皮托管的长度不宜过长，一般控制在 2m 之内，防止测量管抖动或长期使用后测量管可能发生形变，造成测压孔与烟气流动方向出现垂直角度偏差，不利于设备流速准确测量和后期维护。

烟气中含有 SO_2、NOx 等腐蚀性气体，在低温条件下烟气中水汽冷凝成水形成酸液，为防止皮托管因腐蚀发生断裂，建议采用 316 不锈钢等材质，如特殊恶劣工况可在表面增加防腐喷涂或防腐材料护套，进一步增强其防腐性能。

设备通电运行前需确认设备供电电源及接线方式，避免供电故障导致设备损坏。反吹装置等辅助设备需确认连接是否正常，保证设备正常可靠运行。

11.2.4 多点差压法流速 CMS 安装与调试

多点差压法流速 CMS 目前主要包括两种形式，一种是采用烟道多组皮托管多点布置测量的方式，如图 11-6 所示；另外一种是采用烟道内布置网格化多点管道测量的方式，如图 11-7 和图 11-8 所示。多点差压法流速 CMS 一般由 3 组及 3 组以上多点流速测量子单元构成，最终输出断面平均流速。

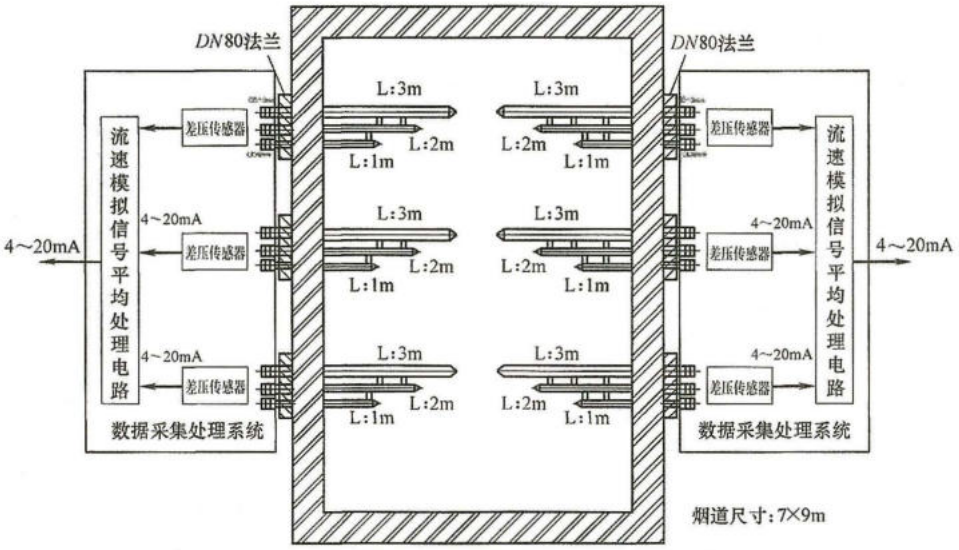


图 11-6 多组皮托管矩阵式烟气流速测量系统布点示意图

图 11-6 中所示，多组皮托管矩阵式烟气流速测量系统采样一般由 3 组不同的背靠背皮托管组成，为了防止振动对流速测量的影响，3 组皮托管之间采用钢管焊接在一起，增强其防振能力。

多点皮托管安装时动压端必须正对于烟气流向，静压端背对烟气流向。

烟气中含有 SO_2、NO_x 等腐蚀性气体，在低温条件下烟气中水汽冷凝成水形成酸液，为防止皮托管因腐蚀发生断裂，采用 316 不锈钢等材质，并在表面采用特殊喷涂防腐工艺，增强其防腐性能。

设备通电运行前需确认设备供电电源及接线方式，避免供电故障导致设备损坏。反吹装置等辅助设备需确认连接是否正常，保证设备正常可靠运行。

图 11-7 和图 11-8 所示，网格化多点管道矩阵流速测量装置分为水平式和垂直式两种，分别对应不同方向的管道，不能交换使用。

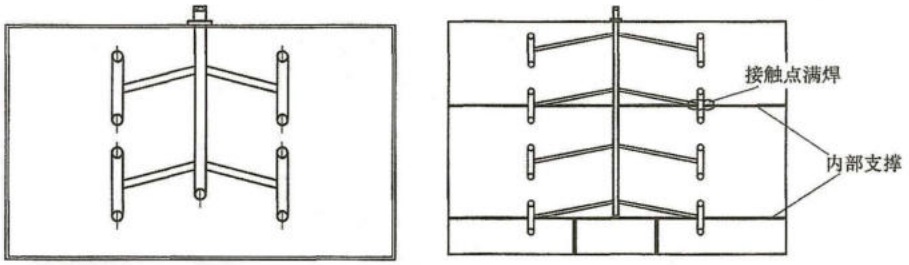


图 11-7 多点管道矩阵流速测量装置水平位置安装示意图

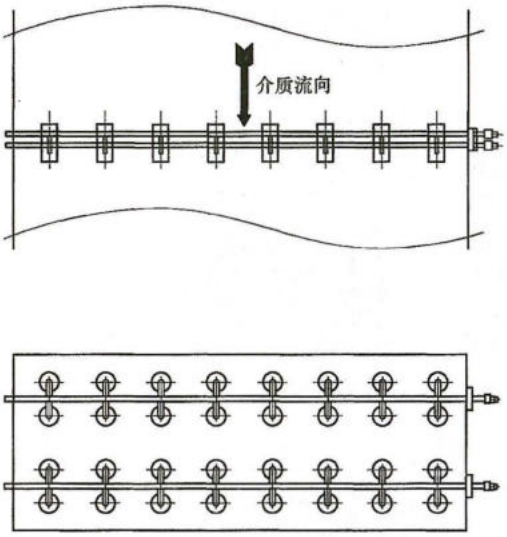


图 11-8　多点管道矩阵流速测量装置垂直位置安装示意图

安装和调试过程中调整装置接头方向使流体介质流向于装置接头标识的箭头指向一致，斜剖口侧在迎风面上使其装置平面垂直于管道横截面，保证各个取压点正对迎风面，取得准确有效的压力信号。

对于特大管道多点矩阵测量装置的安装需要焊接内部支撑架，防止晃动。

需要注意差压变送器位置必须高于多点矩阵测量装置探头安装位置，导压管路走向从低到高，避免产生积水，影响测量。

11.2.5　超声波法流速 CMS 安装与调试

如图 11-9 所示，超声波法流量计安装在烟道或烟囱两侧，必须保证发射器和接收器在同一直线上，安装角度稍微有点偏差将显著影响测量的准确性。测量单元传感器安装典型夹角为 30°～60°，水平或垂直方向。

测量位置出现涡流、轴流都会影响流速测定，安装位置应避开这样的测点。

测量单元传感器、运算单元与辅助使用部件，包括吹扫风机等，是否可靠安装固定。设备通电运行前需确认设备供电电源及接线方式，避免供电故障导致设备损坏。

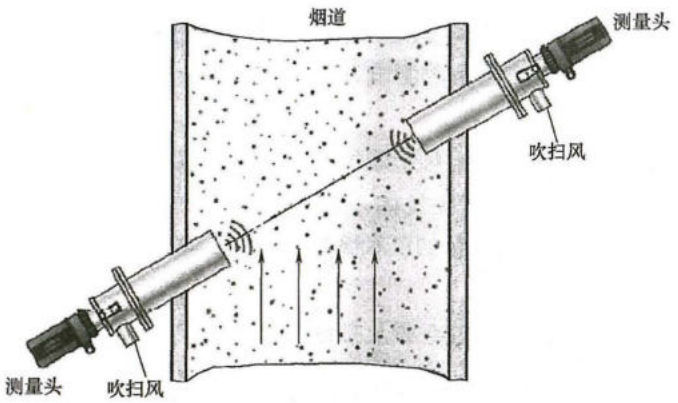


图 11-9　超声波法流速仪安装示意图

11.2.6　光闪烁法流速 CMS 安装与调试

发射的光束具有一定的波束角，设备发射器和接收器对准，避免剧烈波动的管道测点。安装完毕后，发射单元内置光束方向进行局部微调，如图 11-10 所示。设备通电运行前需确认设备供电电源及接线方式，避免供电故障导致设备损坏。

对发射器和接收器镜片进行加热温控，防止玻璃结雾，或者采用吹扫气定期吹扫。

水平烟道和垂直烟道安装示意如图 11-11 所示。

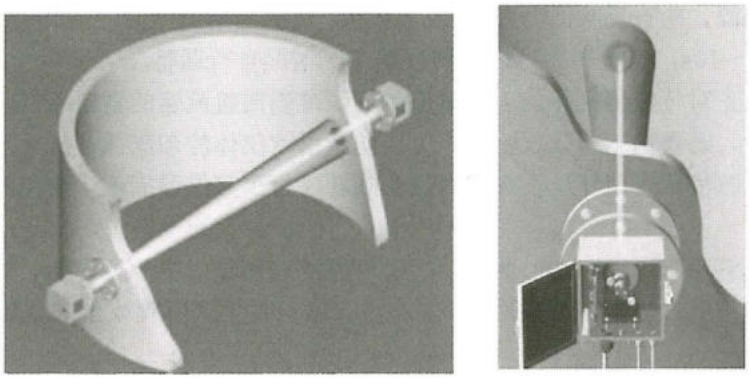


图 11-10 光闪烁法安装与调试示意图

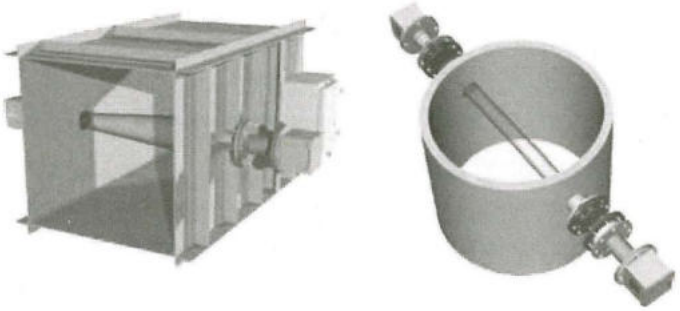


图 11-11 光闪烁法（水平和垂直烟道）安装示意图

11.3 日常运营要点

依照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017，烟气流速 CMS 的日常维护注意事项主要如下：

建议每周至少查看一次流速数据是否异常。

建议每周至少检查一次仪用气的压力及反吹情况。

建议每月至少检查一次仪用气源过滤装置污染情况。

建议每月至少检查一次设备整体是否有漏雨、设备受潮现象。

建议每月至少检查一次设备的堵塞、污染或腐蚀情况。

建议具有自动校零功能设备的校准周期不超过 24 小时，无自动校零功能设备的校准周期建议不超过 1 个月。

建议每月至少检查一次设备的零点漂移或绝对误差，零点漂移不超过±3%或绝对误差不超过±0.9m/s。

建议至少每季度进行一次零点、满度的校准校验，校验采用参比方法和 CEMS 同时段数据进行比对，必要时设备需返厂校准校验。

严格按照国家法律法规及相关规范，进行设备日常维护和记录登记工作，如出现设备数据失真问题需及时与设备厂家联系解决。

11.3.1 皮托管法日常运营维护

皮托管法流速仪通常都对探头采取反吹方式进行防尘、防堵及防腐蚀等维护。反吹采用

洁净压缩空气气源，检查反吹压力 0.4～0.8MPa，反吹周期出厂时一般预设定为 12h 一次，反吹持续时间 5～10s，反吹周期可以根据现场工况情况自行调整。

保持皮托管正对气流测压孔的表面清洁是保证准确测量流速的重要条件。反吹时要注意反吹压力及时间，既要达到有效反吹效果又要防止反吹气体冷却皮托管探头，造成烟气冷凝产生腐蚀。在少数极寒天气环境下需要对反吹气源进行加热保温措施，避免出现皮托管结冰堵塞问题。

特别是皮托管用于湿法除尘、脱硫出口的烟气流速测量，由于烟温低、烟气湿度大，需要对皮托管增加耐腐蚀措施，如采用耐腐蚀材料 SS316L 不锈钢管或外表面喷涂耐温的聚四氟乙烯防腐层。

11.3.2 多点差压法日常运营维护

多组皮托管矩阵式烟气流速测量系统同样采用自动反吹方式，有效防止脱硫后烟气湿度大，残余飞溅石膏对探测孔堵塞，延长运行维护周期。

皮托管选用特殊材料和防腐工艺，有效防止在低温条件下烟气水分冷凝，与 SO_2、NO_x 等腐蚀性气体形成酸液造成管壁腐蚀。

为了避免反吹气源因传输管路延长造成压力衰减，反吹气源压力保证在 0.4～0.8MPa，通过设备控制单元来实现每一组皮托管单独轮流反吹，以达到最佳反吹效果。

11.3.3 超声波法日常运营维护

检查各测量部件是否有任何外观损伤或未固定牢靠。

检查吹扫保护气管路是否有损坏或接头处是否有松动，吹扫保护气过滤器污损状态。

检查测量单元传感器状态指示灯状态是否出现报警。

11.3.4 光闪烁法日常运营维护

光闪烁法既可测定烟气流速也能测定烟气不透明度。

检查光信号强度，引起的因素有光源老化、接收单元灵敏度下降、光学件表面的灰尘和介于发射装置和接收单元之间光路内的大颗粒物等因素。

由于仪器安装在烟道上，应能在较高的环境温度下正常工作，安装位置的振动造成仪器光路准直的变化是必须注意的问题。

通过提供自动增益补偿外界因素引起的损失。在与烟气接触的光学窗与烟气之间形成空气幕，防止烟气的污染，需要定期进行预防性维护、清洁光学镜面。

11.4 典型应用案例

11.4.1 皮托管流速仪产品简介

11.4.1.1 标准版流速仪

皮托管法流速仪产品 VPT511NF，其产品外形与内部结构参见图 11-12。该仪器采用一体化、紧凑型组合式设计，能同时测量烟气流速、压力、温度。仪器具有自动反吹、自动零点校准和速度场系数设定等功能，较好地解决了烟气流速测量中面对高温、高粉尘、高腐蚀和流场紊乱等造成的磨损、堵塞、腐蚀等技术难题。

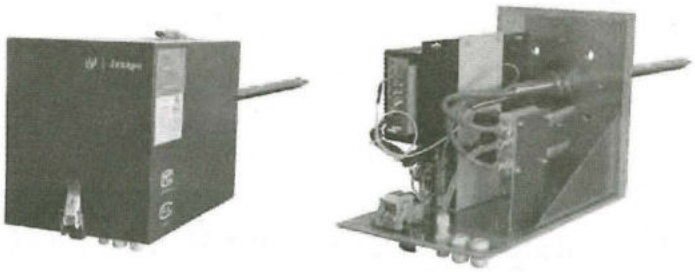


图 11-12 VPT511NF 产品外形与内部结构图

主要技术参数如下：

烟气流速测量范围：0～40m/s（低于 2.5m/s 不推荐使用）。

测量误差：当流速 10＜V≤40m/s 时，相对误差不超过±10%；当流速 5≤V≤10m/s 时，相对误差不超过±12%。

分辨率：0.1m/s。

响应时间：≤20s。

烟气温度测量范围：0～300℃，示值偏差：≤±3℃。

烟气压力测量范围：－2500～＋2500Pa，线性误差≤±1%。

（1）安装测点问题

山西忻州某热电厂设备安装测点位置如图 11-13 所示。现场烟道直径 3m 左右，安装测点位置距离上游烟道弯头部位距离约 4m，距离下游烟道弯头位置约 2m，不符合测点安装位置要求规范，由于流场分布极其不均，现场实测流速出现 2～30m/s 的大范围波动。建议现场重新选取测点位置，按照要求选取正常测点后，数据相对稳定，实测流速约为 10m/s。

（2）反吹气源问题

内蒙古某热电厂安装设备运行后反馈流速偏低仅为 2m/s，且数据波动较大。现场检查发现皮托管内出现堵塞情况，堆积大量黑色污染物质，如图 11-14 所示，进一步排查发现由于设备未接入反吹气源，导致反吹功能未能正常进行维护工作。鉴于现场工况较为恶劣，恢复反吹功能，并将设备反吹周期缩短，把反吹气源接入后，设备运行正常，实测流速在 20m/s 左右。



图 11-13 山西忻州某热电厂设备安装测点位置图片

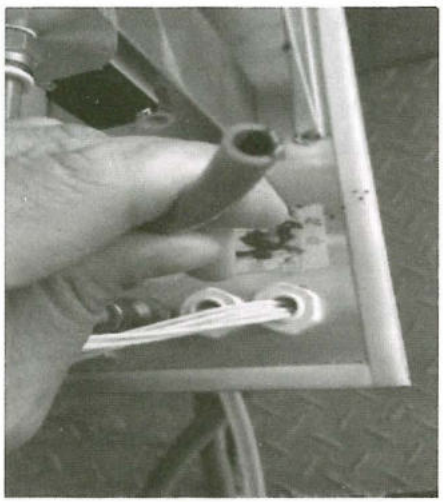


图 11-14 内蒙古某热电厂设备污染物堵塞图片

内蒙古某热电厂安装设备运行后反馈实测流速为0m/s。现场检查发现皮托管内已经结冰堵塞，差压变送器内部出现积水，如图11-15所示。由于北方现场冬季寒冷，反吹气源未经过有效过滤，残存少量水分，在极寒天气环境下冷凝结冰，导致设备异常。针对此种极寒现场，除了反吹气源正常过滤之外，还需要进一步增加反吹管路的加热保温工作。

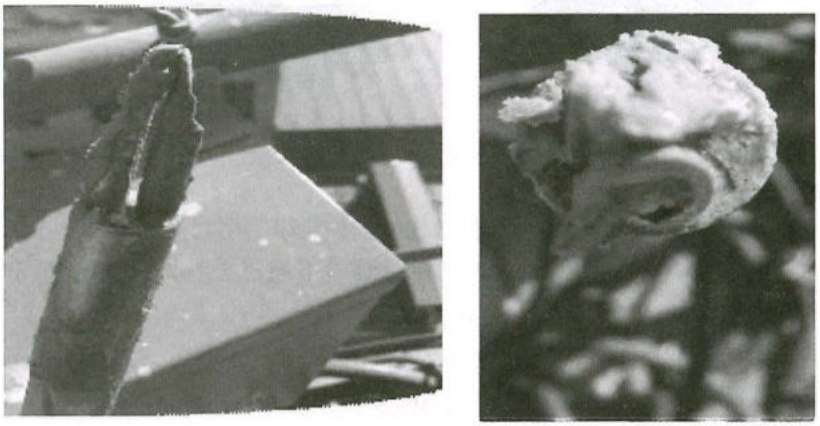


图11-15　内蒙古某热电厂设备结冰堵塞图片

（3）腐蚀问题

山东威海某电厂反馈设备测量数据偏差较大。现场检查发现，由于排放烟道内烟温低、烟气湿度大，导致皮托管外部结构腐蚀严重，甚至出现了穿孔现象，如图11-16所示。需要对皮托管进一步增加耐腐蚀措施，例如在皮托管外部再喷涂耐温聚四氟乙烯防腐层或是增加聚四氟乙烯防腐护套，保证设备现场运行的稳定性。



图11-16　山东威海某电厂设备腐蚀图片

11.4.1.2　*微型流速仪*

采用高度集成化设计方法开发的微型流速仪产品VPT511NF-S，具有体积小、重量轻的特点。其产品外形与内部结构参见图11-17。由于部分应用现场的烟道或烟囱直径较小，一般不大于1m，且烟道或烟囱外壁薄，承受设备重量能力不足，导致现场不便于安装设备体积和重量较大的流速仪，影响设备长期稳定运行和后期维护。

主要技术参数如下：

烟气流速测量范围：0～40m/s（低于2.5m/s不推荐使用）；

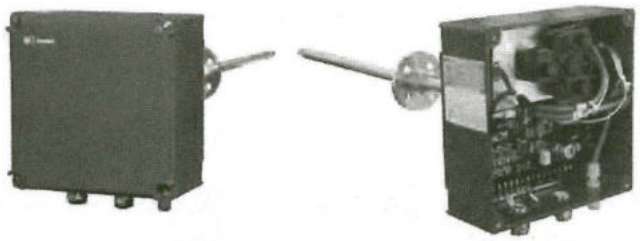


图 11-17 VPT511NF-S产品外形与内部结构图

测量误差：当流速 10<V≤40m/s 时，相对误差不超过±10%；当流速 5≤V≤10m/s 时，相对误差不超过±12%；

分辨率：0.1m/s；

响应时间：≤20s；

烟气温度测量范围：0～300℃，示值偏差：≤±3℃；

烟气压力测量范围：−2500～+2500Pa，线性误差≤±1%。

图 11-18 为浙江杭州某化工现场产品应用照片，实测流速 2～7m/s。图 11-19 为河北沧州某化工现场产品应用照片，实测流速在 5m/s 左右。



图 11-18 浙江杭州某化工现场产品应用图片



图 11-19 河北沧州某化工现场产品应用图片

(1) 腐蚀堵塞问题

重庆某化工厂安装设备运行半年后反馈实测流速为 0m/s。现场检查发现阀组内部腐蚀严重，“O”形密封圈受到腐蚀，电磁阀体黏附大量腐蚀性杂质，如图 11-20 所示。进一步排查故障原因发现，现场设备没有正常连接反吹气源，导致反吹功能没实现，长时间运行后阀体及腔体积存杂质堵塞腐蚀；另外现场压缩空气存在压力不足问题（<0.2MPa），不能有

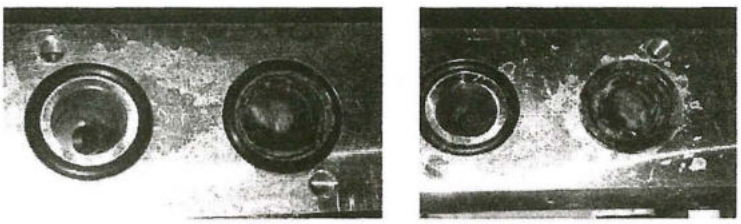


图 11-20 重庆某化工厂设备腐蚀图片

效吹扫杂质，建议设备反吹压力需保持在0.4～0.8MPa；鉴于现场工况较为恶劣，将反吹时间间隔由12h改为4h。通过以上排查措施，设备运行良好，实测流速在7～9m/s。

（2）现场工况问题

北京大兴某化工厂安装设备运行3个月后反馈实测流速比对偏差较大。现场排查发现，安装位置烟道压力为正压且压力过大，同时烟气湿度过大，长期运行后皮托管内积存大量液态水，如图11-21所示，最终导致传感器进水短路损坏。通过将现场反吹时间由12h改为2h，增加设备维护周期频率，设备运行良好，实测流速在15m/s左右。

11.4.1.3　低流速版流速仪

VPT511NF-H产品内部结构如图11-22所示。该流速仪主要适用于低流速现场，一定程度上解决了传统皮托管法对于低流速场合（≤5m/s）测量误差大的问题，其主要技术参数如下：

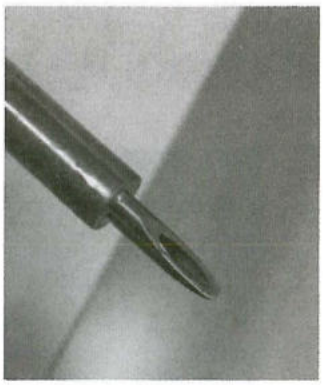


图11-21　北京大兴某化工厂设备积水图片



图11-22　VPT511NF-S产品内部结构图

烟气流速测量范围：0～6m/s；

精密度：≤±0.15m/s；

响应时间：≤20s；

烟气温度测量范围：0～300℃，示值偏差：≤±3℃；

烟气压力测量范围：－2500～＋2500Pa，线性误差≤±1%。

11.4.2　多点差压法流速仪产品简介

11.4.2.1　多点管道矩阵测量装置

重庆威巴仪器ESMD多点矩阵测量装置可适用于管道流场相对复杂的区域，在这些区域分别设置测点，将这些测量点等截面有机地组装在一起。正、负压侧各引出一根总的引压管，分别与差压变送器的正、负端相连，测得平均差压，从而提高了测量精度。采用开放式剖口取压，利用流体动能进行自清灰防堵，降低了维护量。该传感器测量信号稳定、波动小，具有良好的抗振性能。

主要技术参数如下：

测量精度：±1%；

重复精度：±0.2%；

适用压力：0～1.0MPaG；

适用温度：－180～540℃；

测量上限：取决于探头强度；

测量下限：取决于测量最小差压要求；

适用介质：满管、单向流动、单相的气体。

11.4.2.2 多组皮托管矩阵式烟气流速测量系统

矩阵式烟气流速测量系统采用多组多点皮托管法进行多点差压式流速测量，如图 11-23 所示。

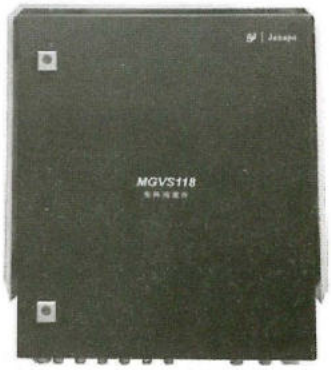


图 11-23 MGVS118 产品外观图

主要技术参数如下：

烟气流速测量范围：0～40m/s；

测量误差：相对误差不超过±5%；

分辨率：0.1m/s；

响应时间：≤20s；

烟气温度测量范围：0～300℃，示值偏差：≤±3℃；

烟气压力测量范围：－2500～＋2500Pa，线性误差≤±1%。

目前安装在广东珠海某电厂现场设备运行情况如下：采用湿法脱硫工艺，运行烟气加热换热装置（GGH），烟囱入口为矩形烟道，烟道尺寸 7m（W）×9m（H）。现场烟道压力为正压，烟温 80℃左右，烟气湿度较大。脱硫塔出口至烟囱入口直管段距离小于 15m。图 11-24 为矩阵式烟气流速测量系统现场安装使用图片。图 11-25 为矩阵式烟气流速测量系统运行 5 个月后的皮托管使用情况图片，设备运行稳定良好。

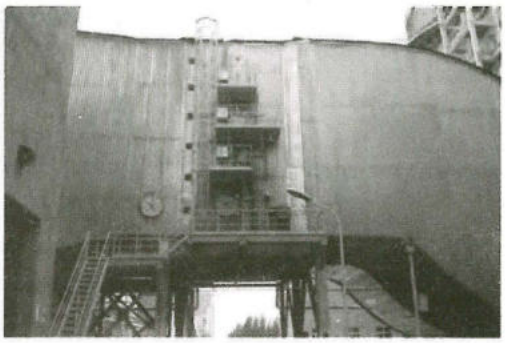






图 11-24 矩阵式烟气流速测量系统现场安装图片

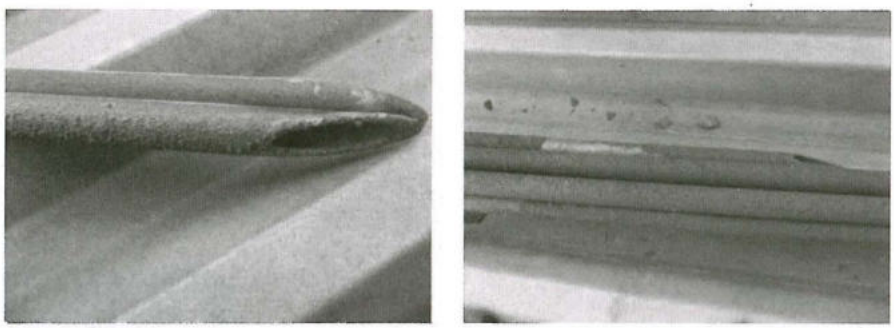


图 11-25　运行 5 个月后皮托管使用情况图片

11.4.3　超声波法

江西南昌某垃圾焚烧电厂安装超声波流速仪系统 D-FL220，其外观如图 11-26 所示。现场安装方案如图 11-27 所示。



图 11-26　超声波流速仪系统 D-FL220 产品外观图

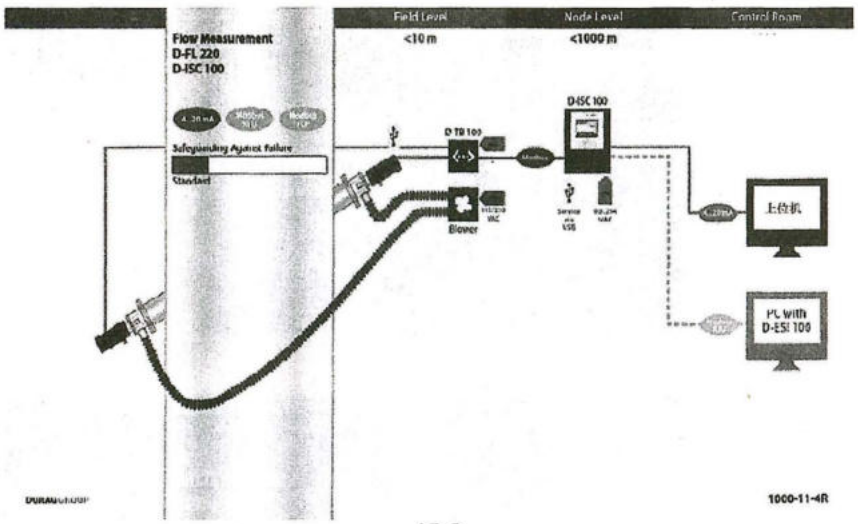


图 11-27　超声波流速仪系统 D-FL220 现场安装方案示意图

11.4.4　光闪烁法

江苏镇江某电厂安装光闪烁气体流量测量系统位于烟囱 75m 平台处，系统安装情况见图 11-28。江西丰城某发电有限公司安装的光闪烁气体流量测量系统见图 11-29。

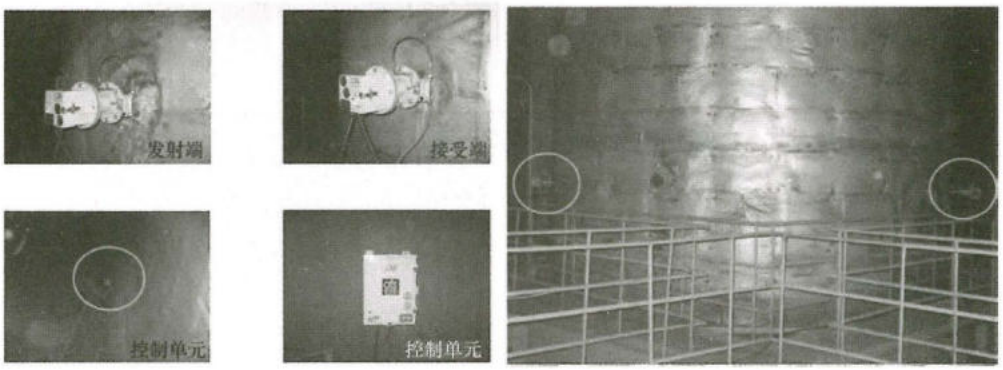


图 11-28 江苏镇江某电厂安装使用现场图片（圆圈内仪表）

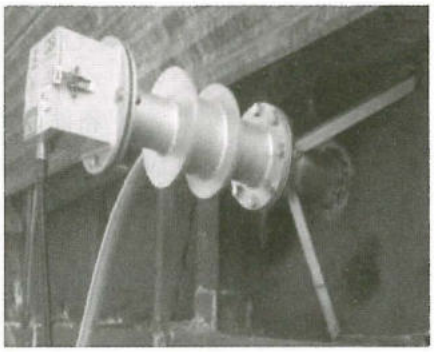


图 11-29 江西丰城某发电有限公司现场安装图片

第 12 章　湿度 CMS

12.1　监测技术

在工业排放的烟气中含有一定量的水分，由于烟气中的含湿量随着燃料种类、燃烧设备工况条件及设备负荷的不同，烟气湿度也不同。如火电行业燃煤锅炉烟气中水蒸气的含量在5～6Vol%；在湿法脱硫后其烟气的温度下降到55℃左右（无GGH），烟气露点约55℃，烟气湿度约在14～16Vol%；在垃圾焚烧电厂，烟囱入口烟气湿度在20Vol%以上，对于燃烧生活垃圾的现场，烟气湿度最高可达到40Vol%。

我国环保标准规定：固定污染源排放的污染物浓度和排放总量按标准状态下（273K，101325Pa）的干烟气折算，即在“干基”条件下的质量浓度和排放总量，烟气湿度直接参与固定污染源污染物排放总量计算，其测量的准确性直接关系到排放总量、浓度计算准确与否。

因此连续监测固定污染源烟气湿度对于实时修正到干烟气状态下的污染物排放浓度及排放速率已经成为现场污染源测量的关键参数。

目前烟气湿度在线监测的分析方法有重量法、干湿氧测定法、阻容式湿度传感器测定法、重量法、激光光谱法、极限电流法、红外吸收法等，其中前两种方法在国内应用较多，而激光法、红外吸收法在国内使用量较少。

12.1.1　阻容法

阻容法在线烟气湿度测量仪的基本原理是水分子渗透改变电容值，温度变化改变电阻值，水分的含量与阻容值的变化频率呈函数关系。

基于平板电容式湿度传感器对微量水分的测量；由含水介质构成的平板电容器及其等效电路参见图12-1。

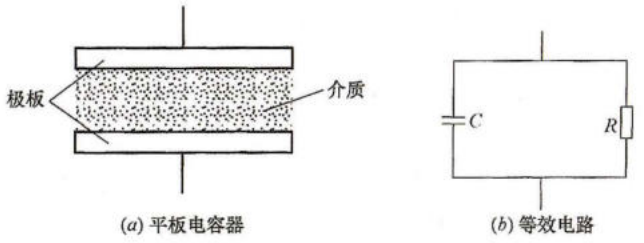


图12-1　电容式湿度传感器及其等效电路

图中：R 是随水分含量而变化的电阻，水分含量越大，R 值越小，反之则越大；C 为与水分含量有关的电容，其值随水分的增大而增大。当忽略电容的边缘效应时，气体中的水分含量 α（体积分数）与传感电容 C 的对数呈线性关系，阻容式烟气湿度测量仪就是依据这

一原理工作的。

阻容式湿度传感器测量的结构与应用：

阻容式湿度传感器的等效电路为并联的电阻和电容，水分含量越大，电容值越大，而电阻值越小。当电容器尺寸确定之后，传感电容的大小取决于介质的相对介电常数，样品的相对介电常数取决于样品中的含水量，样品气湿度（体积分数）与阻容式湿度传感器的电阻和电容值的变化呈一定的函数关系。

阻容式湿度传感器应用于高温烟气的测量，需要克服烟气高温、灰尘、酸性物质对高分子薄膜电容的磨损和腐蚀问题。根据阻容式湿度传感器测量方式不同可分为原位式烟气湿度仪和抽取式烟气湿度仪。原位式烟气湿度仪直接将湿度传感器探头插入到烟道内，直接测量烟气排气中含有的水分量；抽取式烟气湿度仪测量烟气在采样器和加热线之后，经过一级过滤，在确保烟气不冷凝的条件下烟气成分更加干净。

应用范围：能够适用于高温、高湿、高粉尘、高腐蚀、静电等复杂恶劣的测量环境。其主要应用于工业现场测量、火力发电、湿法脱硫检测、石油化工气体排放检测、热电气体排放检测、烟草工业、烘干箱、环境试验箱等。

阻容法测量湿度技术优势如下：

（1）采用高精度阻容式水分传感技术，响应速度快，稳定性高，抗干扰能力强，适合复杂的烟气环境湿度在线监测。

（2）利用温度补偿技术，对高温段测量进行温度补偿，满足了大范围的测量环境温度要求。

（3）利用烧结过滤套冒，在高粉尘环境中很高的提高了传感器的使用寿命。

（4）传感器自动伴热保护，在湿度较高温度较低的测量环境中，能够很好地防止水分结露对传感器探头造成的损害。

（5）对其他气体具有很小的交叉敏感。

（6）增加手动反吹校准功能，有效地保证传感器长期有效准确的测量。

阻容法测量湿度技术缺陷如下：对于部分高温特殊工况的测量环境灵敏性较差，如垃圾焚烧厂、焦化行业等。含有 HCl、焦油吸附探头温度高于 180℃

12.1.2 极限电流法

极限电流法测量原理是使用离子流传感器可以实现对湿度的测量，通过改变施加在传感器阴极和阳极上的电压等方式，可以完成对湿度的测量（图 12-2）。

在氧化锆的阳极和阴极施加一个工作电压提供一个电场驱动氧离子从阴极通过氧化锆到阳极形成氧离子电流。当被测气氛中的氧浓度一定时，氧化锆传感器输出的电流值不再随外加电压的增加而增加，达到某一恒定值，这个恒定电流值称作该氧浓度的极限电流值，我们称作第一极限电流值。根据这个工作原理，当被测气氛中含有水蒸气后，通过提高外加的工作电压，这时水蒸气也被电离成氧离子，同理

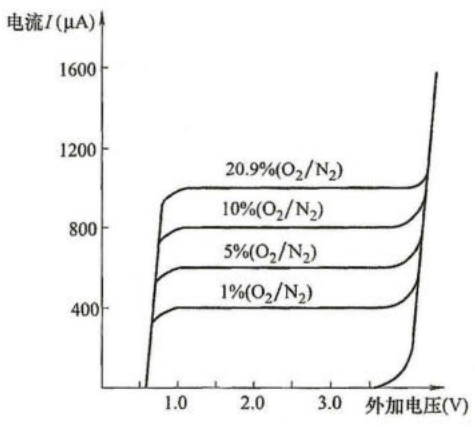


图 12-2 极限电流与外加电压的关系曲线图

当被测气氛中的水蒸气浓度一定时，氧化锆传感器输出一个恒定电流值，我们称作第二极限电流值。

应用范围：应用在燃煤电厂稳定工况，含氧量较低的行业。

极限电流法测湿度的优缺点如下：

优点：在燃煤电力行业的使用环境产品使用性能较好。

缺点：在复杂工况下，受干扰气体的影响较大，比如 CO、NH_3 干扰气体影响比较大（非电力行业不推荐使用）；在高湿环境下测量影响偏差较大；O_2 的干扰影响较大电解池寿命有限，比如钢铁行业等测量数据较异常。不能用于某些腐蚀性气体以及能与 P_2O_5 发生反应的气体，有本底。

12.1.3　激光红外法

激光湿度分析仪基于可调谐半导体激光吸收光谱（TDLAS）技术原理进行测量，通过调制半导体激光器的工作电流来调制激光发光频率，使激光扫描范围略大于被测气体的吸收谱线，从而使半导体激光器发射的特定波长的激光束在穿过被测环境时，被待测气体选频吸收，进而导致激光强度产生一定衰减。激光湿度分析仪利用不同气体成分有不同的特征吸收谱线及气体浓度与吸收光谱之间存在的 Beer-Lambert 关系，通过激光强度衰减量与被测气体浓度的函数关系，从而进行定量分析。

在气体检测与浓度分析中，为了提高探测灵敏度，一般会根据现场工况选择合适的吸收谱线和合适的激光器调制参数，图 12-3 为激光湿度分析仪原理框图。

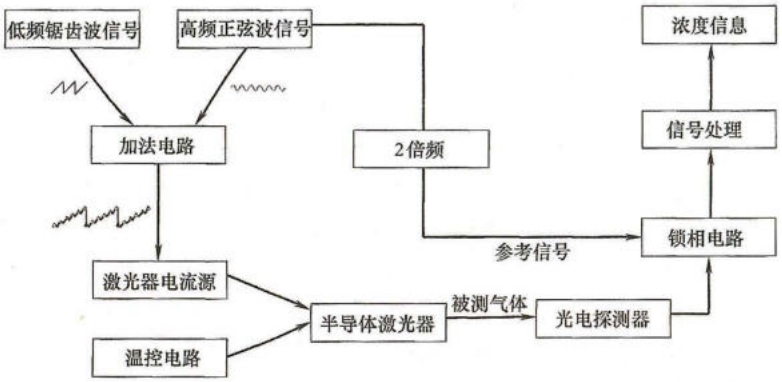


图 12-3　激光湿度分析仪原理框图

应用范围 ：铁冶金、垃圾焚烧、脱硫脱硝、环保尾气排放监测等。

激光红外测湿度其优缺点如下：

优点：被测气体环境参数-温度或压力变化通常导致谱线强度和展宽发生变化，对温度或压力信号不加修正就会影响测量结果。而 TDLAS 技术是对被测气体单一吸收谱线进行分析，因此可较容易地对温度、压力效应进行修正；

缺点：开发式，无法在线校准，镜头极容易污染，可靠性有待验证，另其容易覆盖几个气体的吸收峰，产生交叉干扰，从而影响测试准确性，受震动的影响干扰比较大。激光分析仪器价格昂贵，其售后维护成本较高。

12.2 安装调试要点

因国内大部分现场湿度测量为阻容法，距离阻容法湿度测量产品类型直接插入式烟囱安装调试要点如下：

（1）烟气湿度 CEMS 安装在烟道或烟囱上，应确保安装位置稳定、牢固，不会因为烟道或烟囱的振动导致测量位置发生挪移或抖动；测量管道上焊接 *DN*65 法兰套筒来用于安装水分仪，法兰焊接套筒尺寸如图 12-4 所示。

（2）选择合适位置，根据焊接套筒尺寸开孔，将焊接套筒焊接在烟道壁上。建议焊接套筒向烟道内向下倾斜 5°，可避免粉尘、污泥在管道口堆积或管道内冷凝水囤积（图 12-5）。

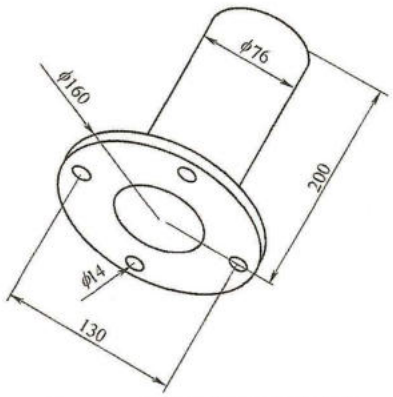


图 12-4 法兰焊接套筒尺寸图

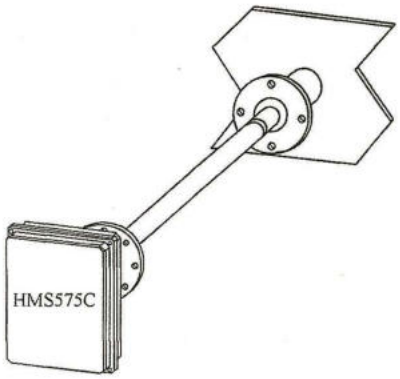


图 12-5 直插式安装示意图

（3）定时反吹装置安装要求：烟气湿度 CEMS 等反吹装置是确保仪器设备在污染源恶劣的环境条件下长期稳定工作的重要保护设备。反吹气应经过必要的除水和过滤等简单预处理过程，确保反吹过程对湿度 CEMS 正常测量不会产生影响。

（4）烟气湿度 CEMS 的测量装置均伸入烟道或烟囱内部，在如此恶劣的高腐蚀环境下，安装时伸入烟道或烟囱内的测量部件的防腐蚀性、耐磨损性等必须符合 CEMS 长期稳定运行的需要；测量装置包括连接部分的材质材料应符合耐磨防腐等相关技术规定，必要时测量部件和连接传输单元应具备加热保温功能。注意：插入烟道前请务必将水分仪通电预热 15 分钟以上，再插入烟道测量，否则将影响传感器的使用寿命。

（5）电缆接线，建议使用带屏蔽的 3～10 芯电缆作为电源和模拟输出/串口通信电缆，电缆直径为 8～11 mm。套管电缆的数量取决于变送器的选择。打开机壳和控制盒顶盖，见图 12-6 所示接线端子，按图所示接线端子示意连接电源与模拟信号输出。注意：接线时候务必断开电源。

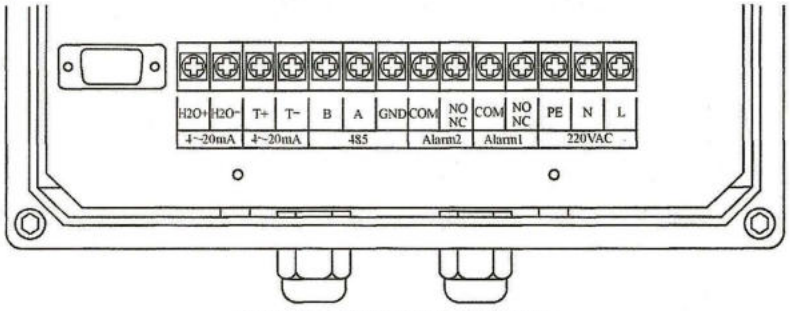


图 12-6 湿度安装电缆接线图

12.3　日常运营要点

烟气湿度 CEMS 的日常维护注意事项：

（1）湿度数据是否异常。

（2）检查反吹气的压力及反吹情况。

（3）清洁反吹气源的过滤器。

（4）确保采样设备的气密性完整、无泄漏，温度达到所设定的温度，检查法兰垫片是否有腐蚀情况，检查是否有漏雨现象。

（5）检查测量管路的气密性，皮托管定期用压缩空气吹扫，检查是否有漏雨、设备受潮现象。

（6）检查湿度仪是否有漏雨、设备受潮现象。

（7）每月至少检查一次流速探头的堵塞、腐蚀情况，反吹气源的工作状态。

12.4　典型应用案例

12.4.1　标准阻容法湿度仪

（1）原位式抽取湿度仪

HMS575 系列烟气水分仪采用研发的阻容式传感技术可实现长期在线稳定测量烟气中的水分，系列产品采用针对不同工况的专利技术实现克服高温烟气的粉尘、高温和酸性腐蚀问题，同时阻止烟气中 NH_3 对水分测量的影响，Prevent Mud 防泥浆技术具有较强的抗干扰能力，防腐防堵技术获国家发明专利，使产品在不影响测量精度的条件下实现长期可靠的工作。根据应用场合的不同，研制出适用于普通常规工况的 HMS575C 烟气湿度仪，适用于湿法脱硫后低温高湿型 HMS 575W 型烟气湿度仪等。图 12-7 为 HMS 575 系列烟气湿度仪的产品示意图。

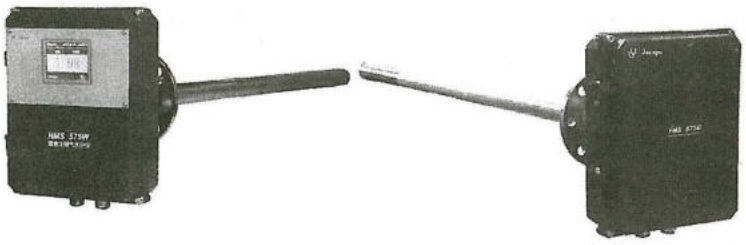


图 12-7　HMS575W 和 HMS547C 烟气湿度仪外观图

HMS575 系列烟气水分仪的主要技术参数如下：

1）测量范围：0～40Vol%；温度范围：0～180℃。

2）准确度：烟气水分：≤5.0%时，绝对误差应≤±1.5%；>5.0%时，相对误差应≤±20%。

烟气温度　±0.5℃（100℃时）。

3）响应时间：T90（在流量和压力分别满足 1L/min 和 1bar 的条件下），从高湿到低湿环境：150s；从低湿到高湿环境：10s。

4）传感器：湿度传感器：阻容式；温度传感器：PT100 铂电阻。

5）探杆长度：1.2m（标准产品）（可按客户要求）。

（2）抽取式烟气湿度仪

抽取式烟气湿度仪是通过采样器将烟气抽出，为防止烟气中水分冷凝，用加热管线进行样气传输，加热线的出口与抽取式烟气湿度仪的进口连接，样气进入抽取式烟气湿度仪测量腔后，内部阻容式湿度传感器直接测量烟气湿度（含水量），其产品外观图及安装如图 12-8 所示。

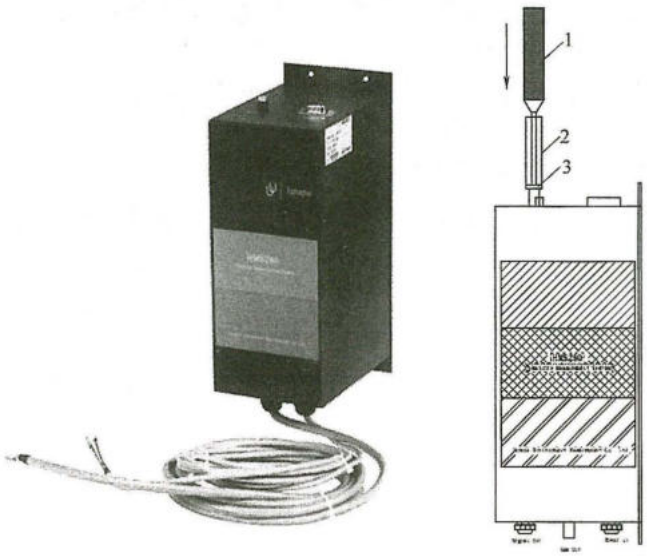


图 12-8 抽取式烟气湿度仪产品外观及安装示意图

主要技术参数如下：

1）测量范围：0～40Vol%；

2）准确度：烟气水分：≤5.0%时，绝对误差应≤±1.5%；>5.0%时，相对误差应≤±20%。

3）探头工作温度：0～180℃。

4）响应时间：T90（在流量和压力分别满足 1L/min 和 1bar 的条件下），从高湿到低湿环境：150s；从低湿到高湿环境：10s。

5）传感器：湿度传感器：阻容式；

温度传感器：PT100 铂电阻。

6）设备全重≤1kg。

12.4.2 常见故障以及维护方法

清洁变送器外壳、探杆或探头要用蘸有中性清洁剂的软湿麻布，定期清理探头滴漏槽。

常见故障与故障清除　　表 12-1

故障现象	故障产生可能原因	解决方案
探杆腐蚀甚至断裂	没有针对工况选择防腐型探杆	选配防腐型探杆
探杆断裂，但没有出现严重腐蚀迹象	现场测点震动剧烈	选择合适的测点
温度输出正常，PPMV 输出满量程	探头结露	安装前充分预热后再装入烟道
PPMV 或者温度输出出现偏差	阻容传感器出现漂移	对传感器进行及时校准

具体相关湿度典型故障现场案例如下：

12.4.2.1 湿度值为固定值

现象：苏州某化工厂反映湿度值为固定值不动，影响整体排污折算值。

解决方案：现场拆下湿度探头后，发现该现场因排放废气中含腐蚀性气体成分较多探杆已经严重腐蚀（图 12-9），其湿度传感器也受损。探头更换为更耐腐蚀材质，增加反吹功能及时清理。

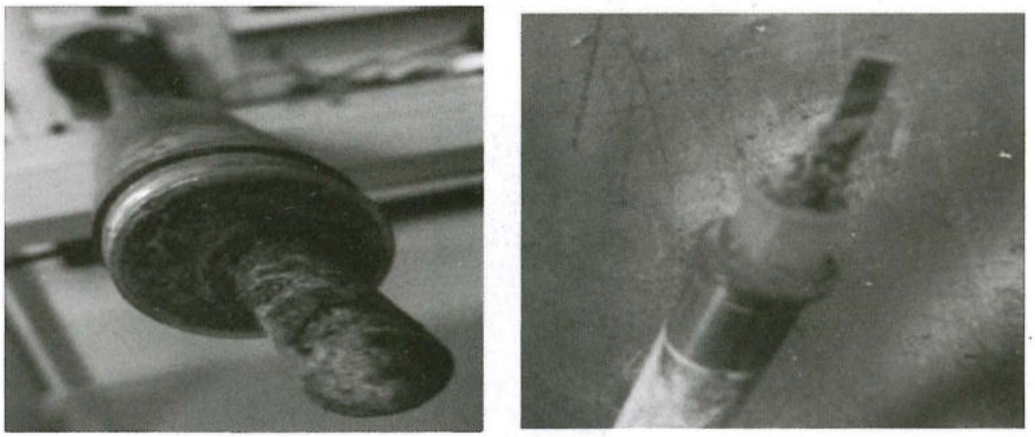


图 12-9 湿度传感器探腐蚀示意图

12.4.2.2 湿度输出值来回波动较大

现象：南京某燃煤电厂湿度输出值波动较大（5～30Vol%），影响污染物折算数据，导致几个点位值数据超标严重（图 12-10）。

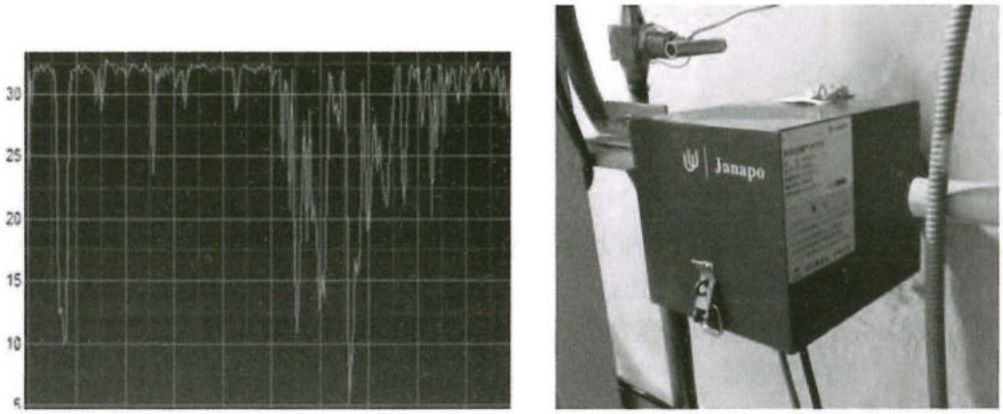


图 12-10 现场湿度值波动图示

解决方案：因现场电源波动较大，加上稳压电源和仪器接地线处理，后湿度测量值恢复正常。

12.4.2.3 湿度值读数不准

现象：山东某热电厂反映湿度测量值准确度有问题，正常工艺湿度为 14 Vol%左右，使用一年后湿度变为 22 Vol%，严重偏大。

解决方案：因现场湿度测量仪器，作为计量设备其测量一段时间后，需要重新校准标定。将现场湿度返回高温发湿装置进行三点校准后，期测量值恢复正常，建议现场湿度至少每季度进行零点校准，每年进行返厂校准。

12.4.2.4 湿度值响应慢

现象：山西太原某电厂反映湿度测量值响应速度极慢（1h 内波动 1～2 次）。如图 12-11 所示探头堵塞异常，以及湿度传感器都有污染。

解决方案：现场湿度探头从烟囱拔出，清洗探头以及气路用压缩空气及时吹扫后恢复正常。

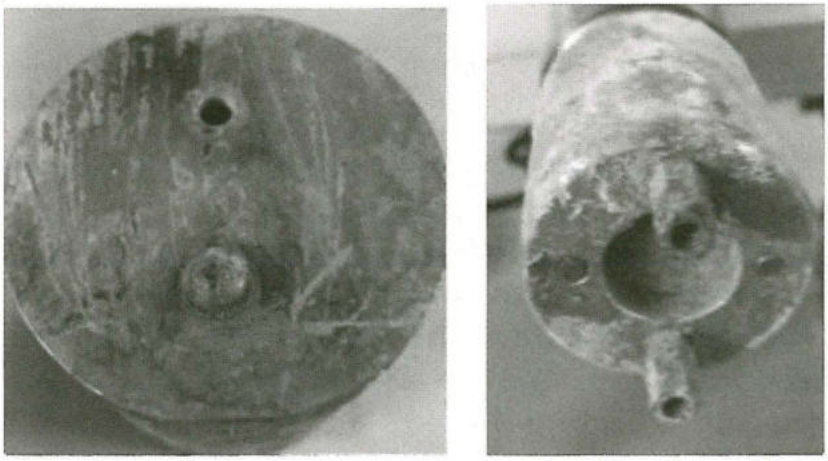


图 12-11 现场湿度值响应较慢

第 13 章　烟温 CMS

13.1　监测技术

在线监测烟气参数的温度已经是成熟的技术，测量烟气温度是为了配合测量烟气的流速，也是为了用于计算标准状态下的干烟气的排放值。

在线测量烟气温度通常用热电偶或铂电阻。常用的热电偶温度计有：镍铬-康铜，用于800℃以下烟气；镍铬-镍铝，用于1300℃以下烟气；铂-铂铑，用于1600℃以下烟气。铂电阻温度测量常采用铂电阻温度计，通常用于测量500℃以下烟气。热电偶或热电阻测量烟气温度的误差应不大于±3℃。

13.2　安装调试要点

烟气参数监测中，通常将烟气温度、压力、流量测量三位一体化。

流量测量的实质是测量流速，测量流速的过程又与测量温度、压力参数相关，因此，流速监测仪表的结构组成中，大多含有测量温度、压力的传感器，实现温度、压力、流速测量一体化。测温热电偶通常集成在流速仪探头部位，直接在烟道中测量烟温。

烟气温度CMS安装测点位置环境温度变化较小，振动幅度较小，不受电磁辐射干扰，安装位置稳定、牢固，测点位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。测量装置应伸入烟道或烟囱内部，测点位置尽量靠近烟道或烟囱内中心位置，测点至烟道内壁距离应≥1/3直径。

调试过程注意系统数据采集软件量程应与设备流速量程对应一致。此外，应根据现场实际温度范围，合理选择温度测量元件型号，保证数据测量的精度和准确度，尽量减少直接软件设置测量量程范围。

13.3　日常运营要点

依照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017，烟气温度CMS的日常维护注意事项主要如下：

（1）建议每周至少查看一次温度数据是否异常。

（2）建议每月至少检查一次设备整体是否有漏雨、设备受潮现象。

（3）建议每月至少检查一次设备的腐蚀情况。

（4）建议至少每季度进行一次比对校准校验，必要时设备返厂检查。

（5）严格按照国家法律法规及相关规范，进行设备日常维护和记录登记工作，如出现设备数据失真问题及时与厂家联系解决。

第 14 章　烟气压力 CMS

14.1　监测技术

在线监测烟气参数的压力已经是成熟的技术，测量烟气压力是为了配合测量烟气的流速，也是为了用于计算标准状态下的干烟气的排放值。

在线压力测量包括测定取样点的烟气压力及取样点附近的大气压力。

测量大气压力可以使用大气压力计直接测出，也可以根据当地气象站给出的数值，加或减因测点与气象站标高不同所需的修正值，即标高每增加 10m，大气压力约减小 110Pa。

烟气压力大多是微正压或负压，常用标准皮托管测定测量烟气压力。标准型皮托管结构参见图 14-1。

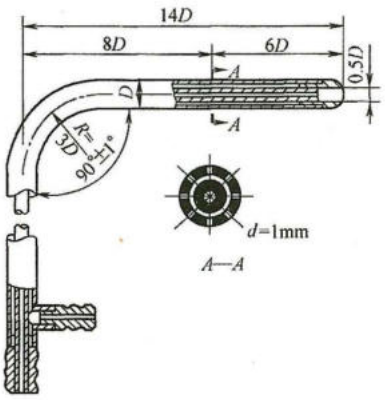


图 14-1　标准型皮托管结构

烟气压力测定包括测量烟气的静压、动压和全压；标准规定的手工测量方法是采用连接压力计的测压管测定。常用标准型皮托管或 S 形皮托管测定，标准型皮托管测孔较小，测量烟气易被烟尘堵塞。

S 形皮托管的结构参见图 14-2。它是由两根相同的金属管并联组成，测量端有方向相反的两个开口，面向气流的开口测全压，背向气流的开口测得的压力小于静压，S 形皮托管的测压孔较大，不易被烟尘堵塞，其修正系数为 $K_p=0.84\pm0.01$。

常用 U 形压力计测量排气的全压和静压，用斜管微压计测定烟气的动压。斜管微压计结构参见图 14-3。

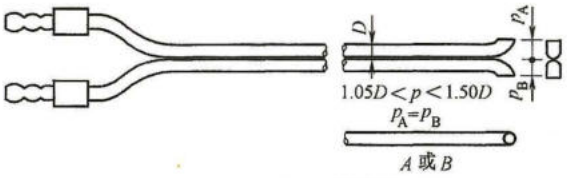
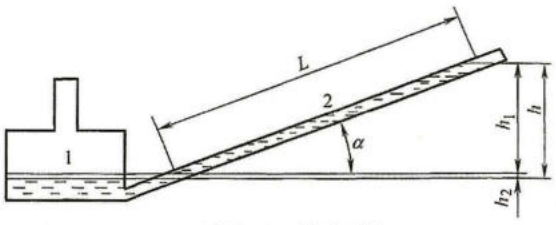


图 14-2　S 形皮托管结构



1—容器；2—斜玻璃管

图 14-3　斜管微压计结构

14.2　安装调试要点

（1）烟气压力 CEMS 安装在烟道或烟囱上，应确保安装位置稳定、牢固，不会因为烟道或烟囱的振动导致测量位置发生挪移或抖动。

（2）定时反吹装置安装要求：烟气压力 CEMS 等反吹装置是确保仪器设备在污染源恶劣的环境条件下长期稳定工作的重要保护设备。其安装应能够满足皮托管自动反吹清洁工作的气体压力需求；反吹频率及方式应依据污染源现场颗粒物的排放状况确定；反吹气应经过必要的除水和过滤等简单预处理过程，确保反吹过程对流速 CEMS 正常测量不会产生影响。

（3）烟气压力 CEMS 的大部分测量装置均伸入烟道或烟囱内部，在如此恶劣的高腐蚀环境下，安装时伸入烟道或烟囱内的测量部件的防腐蚀性、耐磨损性等必须符合 CEMS 长期稳定运行的需要；测量装置包括连接部分的材质材料应符合耐磨防腐等相关技术规定，必要时测量部件和连接传输单元应具备加热保温功能。

14.3 日常运营要点

烟气压力 CEMS 的日常维护注意事项：

（1）检查皮托管反吹气源的压力是否正常。

（2）检查压力取样管、反吹管连接固定情况，看是否有折断松动、积水、积灰等现象。

（3）对流速漂移比较大的情况，建议进行差异变送器零点校准。

（4）检查皮托管反吹箱内电磁阀是否正常，连接管路有无积水、漏气现象。

（5）检查工控机显示的烟气流量、温度、压力参数是否正常，若异常进行维护检查。

（6）消除表面灰尘，检查设备密封情况，看设备是否有灰尘、积水现象压力数据是否异常。

14.4 典型应用案例

烟气压力 CEMS 的典型应用案例：

（1）压力监测数据异常波动：

1）检查压力测量装置（或差压变送器）是否存在异常振动。

2）是否测量点位烟气流量不稳定，减少振动或改变测点位置。

（2）压力异常偏大或偏小：

1）检查是否皮托管堵塞。

2）判断是否控制反吹电磁阀漏气。

3）疏通皮托管，修复或如不可修复，则更换电磁阀。

（3）传感器漂移较大，或不稳定：

1）检查传感器是否故障。

2）检查压差传感器是否因安装地点温度变化、振动、电磁辐射、静电等的干扰造成零点漂移，影响压力的准确测量。

3）如不可修复，则更换传感器，或定期校准仪器的零点。

分析仪的监测值白天、晚上相差很大：检查传感器是否受环境温度影响较大，增加隔热或保温装置，更换为防护级别较高的传感器。

第 15 章　数据采集及传输

15.1　基本功能要求

数据采集及传输系统是 CEMS 的重要组成部分，主要完成在线监测数据采集、处理、存储、表格和图文显示、故障报警、安全管理和支持打印功能，并将在线监测数据上传至数据监控平台。

15.2　系统组成

数据采集及传输系统主要由数据采集模块、计算机/数据处理软件、数采仪等组成，系统结构见图 15-1。实际使用中，可见到将计算机、数采仪的功能合二为一或只取其一，以简化数据采集过程，减少中间环节及故障点，同时避免多次采集导致的数据偏差叠加。

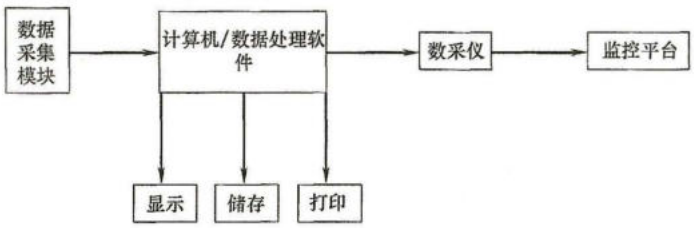


图 15-1　数据采集及传输系统结构图

15.2.1　数据采集模块

数据采集模块主要完成 CEMS 各监测仪测量结果的数据采集，将原始信号转换为计算机数据处理软件可以接收解析的数字信号。常见的数据采集模块有以下几种：

（1）PLC

PLC 是可编程逻辑控制器。它采用一类可编程的存储器，用于其内部程序存储，执行逻辑运算、顺序控制等，并通过丰富的接口及外接模块，实现数字量/模拟量的信号采集及转换。PLC 的优点是人机界面友好，编程便利，运行稳定性强。

（2）A/D 转换模块

A/D 转换模块可以接收 4～20mA 电流信号或 0～5V 等电压信号，并将其转换为数字量信号，以便数据处理软件接收解析。A/D 模块主要有两种类型，一种是独立于系统的模块，例如目前广泛使用的研华亚当模块（Adam），其特点是适应恶劣的工业环境、应用灵活、具备 RS-485 通信能力。另一种是带微处理器的电路板，可直接安装在 PC 机的扩展插槽或者集成到分析仪器中，相比较系统集成性更好，价格低廉。

15.2.2　计算机/数据处理软件

15.2.2.1　计算机

CEMS数据采集计算机通常使用工控机。工控机是专门为工业现场而设计的计算机，而工业现场一般具有强烈的震动，灰尘特别多，另有很高的电磁场力干扰等特点，且一般工厂均是连续作业，即一年中一般没有休息。随着计算机技术的发展，CEMS系统中也越来越多使用普通计算机。部分CEMS系统也采用了工业平板电脑或一体机。

15.2.2.2　数据处理软件

软件必须具备的基本功能包括：系统设置，权限管理，数据采集、显示、处理和存储，历史数据查询，数据传输，报表统计。目前CEMS系统软件设计主要有两种方式，一种是以组态软件为核心的技术，另一种是以专用软件为核心的技术。

（1）组态软件

“组态（Configure）”的含义是“配置”“设定”“设置”等意思，是指用户通过类似“搭积木”的简单方式来完成自己所需要的软件功能，而不需要编写计算机程序，也就是所谓的“组态”。它有时也称为“二次开发”，组态软件就称为“二次开发平台”。

组态软件使用灵活的组态方式，为用户提供快速构建工业自动控制系统监控功能的、通用层次的软件技术，目前中国市场上的组态软件产品大致可划分为三类：即国外专业软件厂商提供的产品，国外硬件或系统厂商提供的产品，以及国内自行开发的国产化产品。产品主要特点如下：

1）丰富的画面显示组态功能，实时显示测量数据的曲线变化和数据值。

2）强大的通信功能和良好的开放性。

3）多任务的软件运行环境、数据库管理。

4）良好的双机冗余，保障系统可靠运行。

5）一次从变量寄存器（V）区把所有数据读入并进行处理、换算。

由于灵活快速的特点，越来越多的CEMS厂商采用组态软件的解决方案。

（2）专用软件

专用软件采用通用编程语言、开发环境如C++、C#、VB等根据CEMS需求开发的数据采集系统。主要特点如下：

1）针对性强：每一个软件的开发都要经过细致的系统分析，针对特定的情况，编制最适用的程序。在编写软件的过程中，充分考虑系统的特性，发挥系统的最佳性能。

2）运行效率高：程序经编译以后以机器码运行或经虚拟机转换为机器码，运行效率较组态软件高。

3）开发周期长：专用编程语言需要专业人员开发，相对组态开发灵活性低，开发周期相对长。

15.3　数据采集技术

按照信号的不同，数据采集可分为模拟量采集与数字量采集。硬件方面一般采用接口板或PLC。接口板通常为各CEMS厂商为自己系统集成量身定制开发，集成度高功能强大，可支持不同类型的采集方式；PLC主要包括模拟量模块，开关量模块，通信模块和功能模块，各模块通过中央处理单元（CPU）实现采集相关功能。经过数据采集模块转换后，以

数字量方式传输到计算机。

15.3.1 模拟量采集

直接从分析仪表获取0～20mA、4～20mA、0～5V等信号，进行A/D转换后传输至数据采集传输系统。例如，烟气参数温度、压力和流速分别用温度变送器、压力变送器和差压变送器进行测量，变送器输出模拟量信号，通过A/D转换模块将各信号进行采集，再用485转232模块，将各信号传输至计算机。

模拟量信号单路仅可以采集1个监测数据，对于多个参数的采集需要更多的线缆连接及A/D转换通道，且在数据传输过程中存在一定信号衰减，导致原始数据与采集数据的偏差。其优点是传输简单，单路信号故障不影响其他信号。

15.3.2 数字量采集

分析仪表直接输出数字信号，通过RS232/RS485/RJ45等方式直接传输至计算机。常用通信协议有MODBUS-RTU协议、PROFIBUS协议、HART协议等等。

MODBUS是1979年开发的一种通信协议，其目的是采用一根双绞线实现多个设备之间的通信。MODBUS协议采用问答式的通信方式，具有简单、硬件便宜、通用性强、使用方便的优点，容易开发和实现。MODBUS-RTU几乎成了国产PLC、分析仪器首选的通信协议。

数字量采集的优点是可以通过较少的线缆连接实现多路信号采集，抗干扰能力强，数据失真幅度小。

15.4 数据处理技术

数据处理主要包括数据的计算、存储、报表、故障报警、权限管理等内容。

15.4.1 数据计算

根据现行气态污染物排放标准，环境管理部门主要关注污染物排放小时折算均值以及污染物排放量。这两个参数都是由很多基础参数计算得来，《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》和《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》都对各参数的计算做出了非常详细的规定。

15.4.1.1 污染物浓度转换计算公式

（1）污染物工况浓度（实测状态）与标况浓度（标准状态）转换按公式（15-1）计算：

$$C_{sn}=C_s\times\frac{101325}{B_a+P_s}\times\frac{273+t_s}{273} \tag{15-1}$$

式中 C_{sn}——污染物标准状态下质量浓度，mg/m^3；

C_s——污染物工况条件下质量浓度，mg/m^3；

B_a——CEMS安装地点的环境大气压值，Pa；

P_s——CEMS测量的烟气静压值，Pa；

t_s——CEMS测量的烟气温度，℃。

注：公式（15-1）中工况浓度与标况浓度的干/湿基状态应相同。

（2）污染物干基浓度和湿基浓度转换按公式（15-2）计算：

$$C_{干}=\frac{C_{湿}}{1-X_{sw}} \tag{15-2}$$

式中 $C_{干}$——污染物干基浓度，mg/m^3（μmol/mol、ppm）；

$C_{湿}$——污染物湿基浓度，mg/m^3（μmol/mol、ppm）；

X_{sw}——烟气绝对湿度（又称水分含量），%。

注：公式（15-2）中干基浓度与湿基浓度的工况状态条件应相同；含氧量干/湿基浓度转换计算方法与公式（15-2）相同。

（3）气态污染物体积浓度与标准状态下质量浓度转换可按公式（15-3）计算：

$$C_Q=\frac{M}{22.4}\times C_V \tag{15-3}$$

式中 C_Q——污染物的质量浓度，mg/m^3；

M——污染物的摩尔质量，g/mol；

C_V——污染物的体积浓度，μmol/mol（ppm）。

（4）当系统未使用 NO_2 转换器而分别测量 NO 和 NO_2 浓度时，氮氧化物（NO_x）质量浓度按公式（15-4）或公式（15-5）计算：

$$C_{NO_x}=C_{NO}\times\frac{M_{NO_2}}{M_{NO}}+C_{NO_2} \tag{15-4}$$

式中 C_{NO_x}——氮氧化物质量浓度，mg/m^3；

C_{NO}——一氧化氮质量浓度，mg/m^3；

C_{NO_2}——二氧化氮质量浓度，mg/m^3；

M_{NO_2}——二氧化氮摩尔质量，g/mol；

M_{NO}——一氧化氮摩尔质量，g/mol。

$$C_{NO_x}=(C_{NOV}+C_{NO_2V})\times\frac{M_{NO_2}}{22.4} \tag{15-5}$$

式中 C_{NOV}——一氧化氮的体积浓度，μmol/mol（ppm）；

C_{NO_2V}——二氧化氮的体积浓度，μmol/mol（ppm）。

15.4.1.2 *污染物质量浓度统计计算公式*

（1）污染物质量浓度分钟数据按公式（15-6）计算：

$$\overline{C_{Qj}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}C_{Qi}}{n} \tag{15-6}$$

式中 $\overline{C_{Qj}}$——CEMS 第 j 分钟测量污染物干基标态质量浓度平均值，mg/m^3；

C_{Qi}——CEMS 最大间隔 5s 采集测量的污染物干基标态质量浓度瞬时值，mg/m^3；

n——CEMS 在该分钟内有效测量的瞬时数据数，（n 为整数，$n\geqslant 12$）。

注：其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气静压、烟气湿度，计算方法与公式与（15-6）相同。

（2）污染物质量浓度小时数据按公式（15-7）计算：

$$\overline{C_{Qh}}=\frac{\sum_{j=1}^{k}\overline{C_{Qj}}}{k} \tag{15-7}$$

式中 $\overline{C_{Qh}}$——CEMS 第 h 小时测量污染物排放干基标态质量浓度平均值，mg/m^3；

k——CEMS 在该小时内有效测量的分钟均值数（$45 \leqslant k$）。

注：其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气静压、烟气湿度，计算方法与公式与（15-7）相同。

（3）污染物质量浓度日均值数据按公式（15-8）计算：

$$\overline{C_{Qd}} = \frac{\sum_{h=1}^{m} \overline{C_{Qh}}}{m} \tag{15-8}$$

式中 $\overline{C_{Qd}}$——CEMS 第 d 天测量污染物排放干基标态质量浓度平均值，mg/m^3；

m——CEMS 在该天内有效测量的小时均值数（$20 \leqslant m$）。

注：其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气静压、烟气湿度，计算方法与公式与（15-8）相同。

15.4.1.3 污染物折算浓度计算公式

（1）对于污染物排放标准中规定了行业排放标准过量空气系数的污染源类型，其污染物排放折算浓度按公式（15-9）计算：

$$C_{折} = C_{sn干} \times \frac{\alpha}{\alpha_s} \tag{15-9}$$

式中 $C_{折}$——折算成实际过量空气系数时的污染物排放浓度，mg/m^3；

$C_{sn干}$——污染物标准状态下干基质量浓度，mg/m^3；

α——实际测量的污染源过量空气系数；

α_s——排放标准中规定的该行业标准过量空气系数。

（2）公式（15-9）中的实际测量的过量空气系数 α 按公式（15-10）计算：

$$\alpha = \frac{21\%}{21\% - C_{VO_2干}} \tag{15-10}$$

式中 $C_{VO_2干}$——排放烟气中含氧量干基体积浓度，%。

（3）对于污染物排放标准中规定了行业排放标准含氧量的污染源类型，其污染物排放折算排放浓度按公式（15-11）计算：

$$C_{折} = C_{sn干} \times \frac{21\% - C_{O_2s}}{21\% - C_{VO_2干}} \tag{15-11}$$

式中 C_{O_2s}——排放标准中规定的该行业标准含氧量，%。

（4）对于污染物排放标准中没有规定标准过量空气系数或标准含氧量的污染源类型，其污染物排放折算浓度按等于标态干基质量浓度计算。

（5）污染物小时数据折算浓度，先计算污染物和含氧量干基浓度小时均值，再按公式（15-9）～公式（15-11）计算。

15.4.1.4 污染物排放流量计算公式

（1）烟囱或烟道断面烟气排放平均流速按公式（15-12）计算：

$$\overline{V_s} = K_v \times \overline{V_p} \tag{15-12}$$

式中 K_v——CEMS 设置速度场系数；

$\overline{V_p}$——CEMS 最大间隔 5s 采集测量的烟气流速值，m/s；

$\overline{V_s}$——烟囱或烟道断面烟气流速的瞬时值，m/s。

（2）烟气排放小时工况流量按公式（15-13）计算：

$$Q_{sh}=3600\times F\times\overline{V_{sh}} \tag{15-13}$$

式中 Q_{sh}——工况条件下小时烟气流量（湿基），m^3/h；

$\overline{V_{sh}}$——CEMS测量的烟气流速的小时均值，m/s；

F——CEMS安装点位烟囱或烟道断面的面积，m^2。

（3）标准状态下干烟气小时排放流量按公式（15-14）计算：

$$Q_{snh}=Q_{sh}\times\frac{273}{273+t_s}\times\frac{B_a+P_s}{101325}\times(1-X_{sw}) \tag{15-14}$$

式中 Q_{snh}——标准状态下小时干烟气流量（干基），m^3/h。

（4）标准状态下干烟气日排放流量按公式（15-15）计算：

$$Q_{snd}=\sum_{h=1}^{l}Q_{snh}\times10^{-4} \tag{15-15}$$

式中 Q_{snd}——标准状态下干烟气日排放流量，$\times10^4 m^3/d$；

l——CEMS在该日内有效测量小时数据数。

（5）标准状态下干烟气月排放流量按公式（15-16）计算：

$$Q_{snm}=\sum_{d=1}^{p}Q_{snd}\times10^{-4} \tag{15-16}$$

式中 Q_{snm}——标准状态下干烟气月排放流量，$\times10^4 m^3/m$；

p——CEMS在该月内有效测量日数据数。

（6）标准状态下干烟气年排放流量按公式（15-17）计算：

$$Q_{sny}=\sum_{m=1}^{q}Q_{snm}\times10^{-4} \tag{15-17}$$

式中 Q_{sny}——标准状态下干烟气年排放流量，$\times10^4 m^3/y$；

q——CEMS在该年内有效测量月数据数。

15.4.1.5 污染物排放速率和排放量计算公式

（1）烟气污染物小时排放速率按公式（15-18）计算：

$$G_h=\overline{C_{Qh}}\times Q_{snh}\times10^{-6} \tag{15-18}$$

式中 G_h——CEMS第 h 小时监测污染物排放速率，kg/h。

（2）烟气污染物日排放速率按公式（15-19）计算：

$$G_d=\sum_{h=1}^{l}G_h\times10^{-3} \tag{15-19}$$

式中 G_d——CEMS第 d 天监测污染物排放速率，t/d。

（3）烟气污染物月排放速率按公式（15-20）计算：

$$G_m=\sum_{d=1}^{p}G_d \tag{15-20}$$

式中 G_m——CEMS第 m 月监测污染物排放速率，t/m。

（4）烟气污染物年排放总量按公式（15-21）计算：

$$G_y=\sum_{m=1}^{q}(G_m\times1) \tag{15-21}$$

式中 G_y——CEMS全年监测污染物排放总量，t。

15.4.1.6 其他计算公式

（1）烟气中 CO_2 的排放浓度可以根据 O_2 测量的浓度按公式（15-22）进行计算：

$$C_{CO_2}=C_{CO_2max}\times\left(1-\frac{C_{O_2}}{20.9/100}\right) \tag{15-22}$$

式中 C_{CO_2}——烟气中 CO_2 排放的体积浓度，%；

C_{O_2}——烟气中 O_2 的体积浓度，%；

C_{CO_2max}——燃料燃烧产生的最大 CO_2 体积浓度，%（其近似值可由表 15-1 查得）。

C_{CO_2max} 近似值表　　表 15-1

燃料类型	烟煤	贫煤	无烟煤	燃料油	石油气	液化石油气	湿性天然气	干性天然气	城市煤气
浓度值（%）	18.4～18.7	18.9～19.3	19.3～20.2	15.0～16.0	11.2～11.4	13.8～15.1	10.6	11.5	10.0

（2）烟气密度和气体分子量的计算

按《固定污染源排气中颗粒物测定和气态污染物采样方法》（GB/T 16157）第 6 条计算烟气密度和气体分子量。

15.4.2 数据存储

根据目前技术标准对 CEMS 历史数据存量要求，数据存储量每年大约在 200M，多数 CEMS 厂商使用关系数据库进行数据存储，如 SQL SERVER、My SQL，部分厂商也使用 TXT 文件方式存储。

15.4.3 报表

《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》和《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》中对日报表、月报表、年报表格式有详细规定。除此之外，排污企业及环境管理部门往往有一些具体的要求，比如分钟数据报表、十分钟数据报表、小时均值月报表等等，需要根据当地管理要求进行功能升级。

15.4.3.1 小时平均值日报表（表 15-2）

烟气排放连续监测小时平均值日报表　　表 15-2

固定污染源名称：

固定污染源编号：　　监测日期：　年　月　日

时间	颗粒物			SO_2			NO_x			标干流量（m^3/h）	干基 O_2（%）	温度（℃）	湿度（%）	负荷（%）	备注
	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（kg/h）	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（kg/h）	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（kg/h）						
00～01															
01～02															
02～03															
03～04															
04～05															
05～06															
06～07															

续表

时间	颗粒物			SO_2			NO_x			标干流量 (m^3/h)	干基 O_2 (%)	温度 (℃)	湿度 (%)	负荷 (%)	备注
	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (kg/h)	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (kg/h)	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (kg/h)						
07～08															
08～09															
09～10															
10～11															
11～12															
12～13															
13～14															
14～15															
15～16															
16～17															
17～18															
18～19															
19～20															
20～21															
21～22															
22～23															
23～24															
平均值															
最大值															
最小值															
样本数															
日排放总量(t)	—			—			—						—		

烟气日排放总量单位：$\times 10^4 m^3/d$

上报单位（盖章）：　　负责人：　　报告人：　　报告日期：　年　月　日

15.4.3.2　日平均值月报表（表 15-3）

烟气排放连续监测日平均值月报表　　**表 15-3**

固定污染源名称：

固定污染源编号：　　监测月份：　年　月

时间	颗粒物			SO_2			NO_x			标干流量 ($\times 10^4 m^3/d$)	干基 O_2 (%)	温度 (℃)	湿度 (%)	负荷 (%)	备注
	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (t/d)	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (t/d)	实测 (mg/m^3)	折算 (mg/m^3)	排放量 (t/d)						
1日															
2日															
3日															

续表

时间	颗粒物			SO_2			NO_x			标干流量（$\times10^4$ m^3/d）	干基O_2（%）	温度（℃）	湿度（%）	负荷（%）	备注
	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（t/d）	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（t/d）	实测（mg/m^3）	折算（mg/m^3）	排放量（t/d）						
4日															
5日															
6日															
7日															
8日															
9日															
10日															
11日															
12日															
13日															
14日															
15日															
16日															
17日															
18日															
19日															
20日															
21日															
22日															
23日															
24日															
25日															
26日															
27日															
28日															
29日															
30日															
31日															
平均值															
最大值															
最小值															
样本数															
月排放总量（t）	—			—			—				—				

烟气月排放总量单位：$\times10^4m^3/m$

上报单位（盖章）：　　负责人：　　报告人：　　报告日期：　年　月　日

15.4.3.3　月平均值年报表（表 15-4）

烟气排放连续监测月平均值年报表　　表 15-4

固定污染源名称：

固定污染源编号：　　监测年份：　年

时间	颗粒物（t/m）	SO_2（t/m）	NO_x（t/m）	标干流量（$\times10^4m^3/m$）	干基 O_2（%）	温度（℃）	湿度（%）	负荷（%）	备注
1月									
2月									
3月									
4月									
5月									
6月									
7月									
8月									
9月									
10月									
11月									
12月									
平均值									
最大值									
最小值									
样本数									
年排放总量(t)					—				

烟气月排放总量单位：$\times10^4m^3/y$

上报单位（盖章）：　　单位负责人：　　报告人：　　报告日期：　年　月　日

15.4.4　故障报警

故障报警多记录存储影响测量结果的关键因素，比如采样探头温度报警、取样管线温度报警、制冷器温度报警、采样流量报警、分析仪报警等等，以便提醒 CEMS 运营人员消除故障，分析监测数据有效性。

15.5　通信与传输

15.5.1　CEMS 与数采仪通信

CEMS 监测数据采集后，经数据采集传输仪（简称数采仪）发送至环境管理部门的数据监控平台，以此作为环境管理的依据。CEMS 数据发送至数采仪，常见的方式见图 15-2。

采用 4～20mA 等模拟量直接连接数采仪的方式，优点是减少中间环节且接口统一，便于现场实施。缺点是容易出现信号衰减导致数据偏差；对于技术标准中计算公式的理解不同

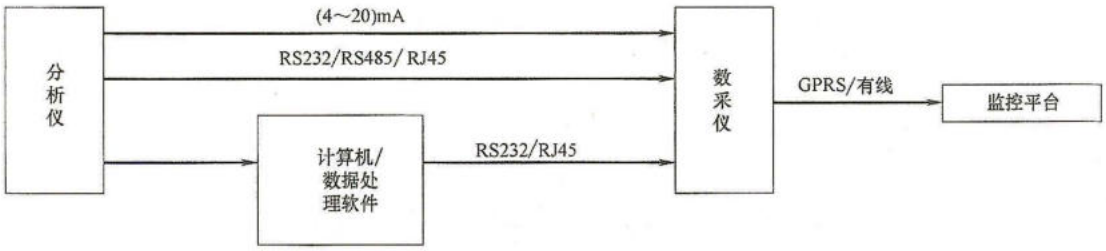


图 15-2 数采仪信号连接示意图

导致的数据计算结果与 CEMS 中数据采集及处理单元结果不一致等。

采用 RS232/RS485/RJ45 等总线方式连接数采仪，优点是数据一致性好，抗干扰能力强。但由于不同分析仪厂商尤其是国外厂商因为分析仪开发时间较早、分析仪设计思路及特点不同、通信协议壁垒等因素，导致与数采仪之间的通信协议很难统一，因此需要数采仪端开发匹配较多通信协议。

经计算机处理后连接数采仪，可经过计算机转换协议后再转发，便于不同型号、不同仪器间的连接，实施便利，也成为目前最为常用的连接方式。《污染物在线监控（监测）系统数据传输标准》HJ 212—2017 推荐使用 MODBUS RTU 作为在线监控仪器仪表与数采仪的通信协议。

15.5.2 数采仪与监控平台通信

数采仪与监控平台/上位机的通信方式主要有以下几种：

（1）无线传输方式，通过 GPRS、CDMA 等无线方式与上位机通信。

（2）以太网方式，直接通过局域网或 internet 与上位机通信。

（3）有线方式，通过电话线、ISDN 或 ADSL 方式与上位机通信。

无线传输方式以其便捷的网络搭建模式，目前应用最为广泛。无线传输存在抗干扰能力差、传输速度慢、大流量传输资费贵等缺点，仅适合传输小流量数据，不适合传输视频等信号。随着 4G、5G 网络的进一步建设及覆盖，无线通信资费逐步下调，其应用场景将更为广阔。

以太网及有线传输方式，运行稳定性强，可短时间内传输大量数据，在很多区域应用较广。其缺点是网络建设期间一次性投入较大、现场组网布线方案复杂。

在此基础上，部分区域采用了专用 APN 或 VPN（虚拟专用网络）技术，对非授权访问进行了隔离，提高了数据传输的安全性。

15.6 技术要求

15.6.1 数据采集与处理单元技术要求

CEMS 应具有具备数据采集、处理、存储、表格或图文显示、故障警告和打印等功能的操作软件；系统应设置通信接口，用于数据输出和通信功能。

15.6.1.1 数据采集记录存储要求

由 CEMS 的控制功能协调整个系统的时序，系统能够将采集和记录的实时数据自动处理为 1min 数据和小时数据。

（1）至少每5s采集一组系统测量的实时数据，主要包括：颗粒物测量一次物理量、气态污染物体积/实测质量浓度、烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气静压、烟气湿度等。

（2）至少每1min记录存储一组系统测量的分钟数据，数据为该时段的平均值，主要包括：颗粒物一次物理量和质量浓度、气态污染物体积/质量浓度、烟气含氧量、烟气流速和流量、烟气温度、烟气静压、烟气湿度及大气压值。若测量结果有湿/干基不同转换数值，则应同时显示记录该测量值湿基和干基的测量数据。

（3）小时数据应包含本小时内至少45min的分钟有效数据，数据为该时段的平均值，主要包括：颗粒物质量浓度（折算浓度）、颗粒物排放量、气态污染物质量浓度（折算浓度）、气态污染物排放量、烟气含氧量、烟气流量、烟气温度、烟气静压、烟气湿度和生产负荷等。小时数据记录表即为日报表。

（4）日数据应包含本日至少20h的小时有效数据，数据为该时段的平均值，主要包括：颗粒物质量浓度和排放量、气态污染物质量浓度和排放量、烟气含氧量、烟气流量、烟气温度、烟气静压、烟气湿度和生产负荷等。日数据记录表即为月报表。

（5）月数据应包含本月至少25天（其中2月份至少23天）的日有效数据，数据均为该时段的平均值，主要包括：颗粒物排放量、气态污染物排放量、烟气含氧量、烟气流量、烟气温度、烟气静压、烟气湿度和生产负荷等。月数据记录表即为年报表。

（6）数据报表中应统计记录当日、当月、当年各指标数据的最大值、最小值和平均值。

（7）当1h污染物折算浓度均值超过排放标准限值时，CEMS应能发出并记录超标报警信息。

（8）CEMS日报表、月报表和年报表中的污染物浓度、烟气流量和烟气含氧量均为干基标准状态值。氮氧化物（NO_x）质量浓度均以NO_2计。

15.6.1.2　*数据格式要求*

CEMS记录处理实时数据和定时段数据时，数据格式应至少符合表15-5和表15-6的要求。

CEMS数据格式一览表　　**表15-5**

序号	项目名称		单位	小数位
1	SO_2、NO_x体积浓度	>100	μmol/mol（10^{-6}mol/mol、ppm）	0
		≤100		1
2	SO_2、NO_x质量浓度	>300	mg/m^3	0
		≤300		1
3	颗粒物质量浓度	>100	mg/m^3	0
		≤100		1
4	烟气含氧量		% V/V	2
5	烟气流速		m/s	2
6	烟气温度		℃	1
7	烟气静压(表压)		Pa(或kPa)	0(或2)
8	大气压		kPa	1
9	烟气湿度		% V/V	2
10	烟道截面积		m^2	2
11	污染物排放速率		kg/h	3

续表

序号	项目名称	单位	小数位
12	污染物排放量	kg	3
13	CO_2 体积浓度	% V/V	2
14	小时烟气流量	m^3/h	0
15	日排放量	$\times 10^4\ m^3/d$	3
16	污染源负荷	%	1
17	颗粒物测量一次物理量	无量纲	—

CEMS 数据时间标签一览表 **表 15-6**

数据时间类型	时间标签	定义	描述与示例
实时数据(5s)	YYYYMMDDHHMMSS	时间标签为数据采集的时刻，数据为相应时刻采集的测量瞬时值	20140628130815 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 8 分 15 秒的测量瞬时值
分钟数据	YYYYMMDDHHMM	时间标签为测量开始时间，数据为此时刻后 1 分钟的测量平均值	201406281308 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 8 分 00 秒至 13 时 9 分 00 秒之间的测量平均值
小时数据	YYYYMMDDHH	时间标签为测量开始时间，数据为此时刻后 1 小时的测量分钟平均值	2014062813 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 00 分至 14 时 00 分之间的测量平均值
日数据	YYYYMMDD	时间标签为测量开始时间，数据为当日 0 时至 24 时(第二天 0 时)的测量小时平均值	20140628 为 2014 年 6 月 28 日 0 时 00 分 00 秒至 29 日 0 时 00 分 00 秒的测量平均值
月数据	YYYYMM	时间标签为测量开始时间，数据为当月 1 日至最后一日的测量平均值	201406 为 2014 年 6 月 1 日 1 时至 30 日的测量平均值

15.6.1.3 *数据状态标记要求*

系统应在分钟数据报表和小时数据报表的数据组后面给出系统和（或）污染源运行状态标记。

分钟数据标记方法为："N"表示系统各检测参数正常，"F"表示排放源停运，"St"表示排放源启炉过程，"Sd"表示排放源停炉过程，"B"表示排放源闷炉，"C"表示校准，"M"表示维护保养，"Md"表示系统无数据，"T"表示超测定上限，"D"表示系统故障。

小时数据标记方法如下：

N——本小时内系统各检测参数正常，检测时间大于 45min；

F——本小时内污染源处于停运状态，其时间大于等于 45min；

St——本小时内污染源处于启炉状态，其时间大于等于 45min；

Sd——本小时内污染源处于停炉状态，其时间大于等于 45min；

B——本小时内污染源处于闷炉状态，其时间大于等于 45min；

T——本小时内污染物排放浓度平均值超过系统测量上限；

C——本小时内系统处于校准状态，其时间大于 15min；

M——本小时内系统处于维护、修理状态，其时间大于 15min；

D——本小时内系统处于故障、断电状态，其时间大于 15min；

Md——本小时内系统无数据。

对于 N、F、St、Sd、B 和 T 状态，均表明系统在本小时内处于正常工作状态；对于 C、

M、D 和 Md 状态，则表明系统在本小时内处于非正常工作状态；数据标记优先级顺序从高到低依次为 F→D→M→C→T→St、Sd、B→N。数据审核标记（针对小时均值）实测数据计算、手工数据替代、按《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》修约数据。

CEMS 数据记录必须具备数据标识功能，除了采用字母标识外，也可采用数字或颜色等标识符号进行明确区分。

15.6.1.4 *数据软件功能要求*

（1）安全管理和使用权限要求

1）软件应具有安全管理功能，操作人员需使用用户名或工号和相应密码登录或注销后，才能进入和退出软件控制界面。

2）软件应具备至少二级的系统操作使用管理权限：

① 系统管理员：具备软件的最高管理和操作权限，可以进行所有的系统设置工作，如：查询历史数据，设定和修改操作人员密码、操作级别，设定和修改系统的参数设置等。

② 一般操作人员：具备软件的基本操作权限，只能进行实时数据查询、例行维护和检查，不能查看和修改软件参数等其他系统设置。

3）软件应对全部外部人员控制操作均自动记录、保存，形成系统操作和运行状态记录日志，并可查询。

4）系统受外界强干扰或偶然意外或掉电后又上电等情况发生，造成程序中断时，应能实现自动启动，自动恢复运行状态并记录出现故障时的时间和恢复运行时的时间。

（2）数据显示、记录、查询和管理要求

1）软件的显示和操作界面均应为简体中文。

2）软件能够显示和记录系统监测污染物和烟气参数的监测数据和超标等报警信息；可查询和导出规定存储设定时间段内的污染物和烟气参数测量和校准校验数据及状态标识。

3）软件应可存储并查询、导出最近至少 12 个月的 1min 均值数据和至少 36 个月以内的 1h 均值数据以及至少 60 个月的日均值数据和月均值数据。

4）软件应能够自动统计生成并保存《烟气排放连续监测小时平均值日报表》《烟气排放连续监测日平均值月报表》和《烟气排放连续监测月平均值年报表》，其格式见表 15-2～表 15-4；能够生成并保存运行操作记录报告和掉电记录报告。

5）软件应具有支持打印监测数据、图表和各种报表的功能。

（3）参数和公式设置和修改要求

1）软件应具备运行参数设置功能，能够查询和修改设置相关参数，主要包括：

系统运行参数：日期、时间、地点、污染源排放口的尺寸和截面积、污染物测量量程、超标报警值、皮托管系数以及标准过剩空气系统（标准含氧量）等。

系统维护参数：系统反吹、维护的时间间隔设置、耗材和部件的维护周期等。

系统测量参数：烟气流速速度场系数、颗粒物相关校准曲线的斜率和截距等。

2）软件参数的设置和修改应由最高管理权限完成，且相关参数设置操作应记录在当日的系统日志中。

3）软件中数据状态转换等计算公式应方便查看和检查，确认无误后一般不得修改。

15.6.1.5 *数据通信和输出要求*

（1）系统接口：应配置 RS232、RS422、RS485 中任一种通信接口和 RJ45 以太网接口，用于对外数据输出和通信，并可根据使用要求，实现单路或双路或多路配置。

（2）系统应具有远程数据通信功能，能够定时传输数据组，并随时接收和应答远程的数据查询、校准时钟等命令，符合《污染物在线监控（监测）系统数据传输标准》的相关要求。

15.6.1.6 其他要求

（1）当1h污染物折算浓度平均值超过排放标准时，系统应能发出超标报警信息。

（2）系统可以接收机组接入污染源停运的开关信号，当接收到污染源处于停运状态信号时，污染物浓度与流速应设置为零。

（3）当污染物检测值高于系统测量上限时，实时和1min数据组的质量浓度值记录为仪器测量上限。

（4）系统采集和处理数据时，污染物浓度、烟气含氧量均为标准状态干基值。

15.6.2 数据采集传输仪技术要求

15.6.2.1 性能指标要求

数据采集传输仪性能指标应符合表15-7的要求。

数据采集传输仪性能指标　　表15-7

项　目	项目性能要求
通信协议	符合《污染物在线监控(监测)系统数据传输标准》要求
数据采集误差	≤1‰
系统时钟计时误差	±0.5‰
存储容量	至少存储14400条记录
控制功能	能通过上位机控制监测仪表进行即时采样和设置采样时间
平均无故障连续运行时间(MTBF)	1440h以上
绝缘阻抗	20MΩ以上

15.6.2.2 通信方式要求

数据采集传输仪应至少具备下列通信方式之一：

（1）无线传输方式，通过GPRS、CDMA等无线方式与上位机通信，数据采集传输仪应能通过串行口与任何标准透明传输的无线模块连接。

（2）以太网方式，直接通过局域网或Internet与上位机通信。

（3）有线方式，通过电话线、ISDN或ASDL方式与上位机通信。

15.6.2.3 构造要求

数据采集传输仪从功能上可分为数据采集单元、数据存储单元、数据传输单元、电源单元、接线单元、显示单元和壳体组成。

（1）数据采集单元应满足如下要求

1）应至少具备5个RS232（或RS485）数字输入通道，用于连接监测仪表，实现数据、命令双向传输。

2）应至少具备8个模拟量输入通道，应支持4～20mA电流输入或1～5V电压输入，应至少达到12位分辨率。

3）应至少具备4个开关量输入通道，用于接入污染治理设施工作状态。开关量电压输入范围为0～5V。

（2）数据存储单元

用于存储所采集到的监测仪表的实时数据和历史数据，存储容量应符合表15-7的要求，

存储单元应具备断电保护功能，断电后所存储数据应不丢失。

（3）数据传输单元

数据传输单元应采用可靠的数据传输设备，保证连续、快速、可靠地进行数据传输；与上位机的通信协议应符合《污染物在线监控（监测）系统数据传输标准》HJ 212—2017 的要求。

（4）电源单元

负责将 220V 交流电转换为直流电，为控制主板提供电源，要求具备防浪涌、防雷击功能，要求在输入电压变化±15%条件下保持输出不变。

（5）接线单元

用于实现监测仪表与数据采集传输仪的连接，要求采用工业级接口，接线牢靠、方便，便于拆卸，接线头应被相对密封，防止接线头腐蚀、生锈和接触不良。

（6）显示单元

数据采集传输仪应自带显示屏，应能显示所连接监测仪表的实时数据、小时均值、日均值和月均值，还应能够显示污染物的小时总量、日总量和月总量。

（7）壳体

数据采集传输仪壳体应坚固，应采用塑料、不锈钢或经处理的烤漆钢板等防腐材料制造。壳体应密封，以防水、灰尘、腐蚀性气体进入壳体腐蚀控制电路。

15.6.2.4　*其他要求*

（1）数据采集传输仪适应温度、湿度环境的能力应符合《工业过程测量和控制装置工作条件　第 1 部分：气候条件》GB/T 17214.1 中 B 类场所的要求，抗振动性能应符合《工业过程测量和控制装置的工作条件　第 2 部分：动力》GB/T 17214.2 的要求，抗电磁干扰能力应符合《电磁兼容　试验和测量技术》GB/T 17626 系列标准的有关要求。

（2）仪器应自带备用电池或配装不间断电源（UPS），在外部供电切断情况下能保证数据采集传输仪连续工作 6h，并且在外部电源断电时自动通知上位机或维护人员。数据采集传输仪必须能够在供电（特别是断电后重新供电）后可靠地自动启动运行，并且所存数据不丢失。

（3）数据采集传输仪应具有数据导出功能，可通过磁盘、U 盘、存储卡或专用软件导出数据。

（4）数据采集传输仪应具有看门狗复位功能，防止系统死机。

（5）数据采集传输仪如果采用工控机，应具有硬件/软件防病毒、防攻击机制。

（6）数据采集传输仪应具备保密功能，能设置密码，通过密码才能调取相关的数据资料。

第四篇　质量保证和质量控制

第 16 章　调试和验收

16.1　调试检测

16.1.1　目的和必要性

开展 CEMS 调试检测的主要目的是验证经过现场安装和调试完毕后的 CEMS 仪器技术性能是否达到应用的水平，是否能够满足日常污染源连续自动监测工作的需求，是否能够真实反映污染源的排放状况。只有经过严格调试检测的 CEMS 仪器才能通过后期的 CEMS 验收工作。CEMS 调试检测在验证 CEMS 安装调试情况的同时需要解决以下两个方面问题。

一方面我国对大气污染物排放浓度监督考核一般使用质量浓度。然而目前我国绝大多数光学仪器不能直接测出烟气中的颗粒物质量浓度值，仅能给出浓度变化的趋势信号，因此必须将变化的趋势信号与手工参比方法测量质量浓度值之间建立可靠有效的相关关系，将颗粒物 CEMS 的输出信号转换成质量浓度。经验证明必须对安装在固定污染源上的颗粒物 CEMS 逐台建立相关曲线，在一个固定污染源建立的相关曲线与在另一个污染源建立的相关曲线是不相同的。因此必须在申请 CEMS 环保验收之前进行调试检测，建立颗粒物浓度相关曲线（气态污染物一般不需要）。

另一方面 CEMS 测量颗粒物、烟气流速、温度、压力和湿度往往都是烟道或烟囱内的点测量或线测量，而手工参比测量方法一般都是测量整个烟道或烟囱断面的平均值。很显然手工方法的测量结果更具代表性，而且点和面之间很可能存在一定的系统误差，这个误差须通过调试检测进行相关校正并修正。一般影响最大的就是烟气流速的调试和校准，通过调试检测可得到该污染源安装该套烟气流速 CEMS 系统后得到的烟气流速速度场系数，用于校准流速 CEMS 点测量造成的烟气流速和流量测量偏差，使 CEMS 测量结果更为准确可靠。

16.1.2　基本要求

调试检测的基本要求如下：

（1）现场完成 CEMS 安装、初调后，使烟气 CEMS 投入运行，调试检测前 CEMS 连续运行时间不少于 168h。

（2）在 CEMS 连续运行 168h 后可进入调试检测阶段，调试检测周期为 72h，在调试检测期间不允许计划外的维护、检修和调节仪器。

（3）如果因 CEMS 故障、固定排放源故障、断电等原因造成调试检测中断，在上述因素恢复正常后，则需要重新开始进行为期 72h 的调试检测。

（4）调试检测必须采用有证标准物质和标准样品，标准气体要求贮存在铝或不锈钢瓶中，不确定度不超过±2%。较低浓度的标准气体可以使用高浓度的标准气体采用等比例稀

释方法获得，等比例稀释装置的精密度在1%以内。

（5）对于光学法颗粒物CEMS，校准时须对实际测量光路进行全光路校准，确保发射光先经过出射镜片，再经过实际测量光路，到校准镜片后，再经过入射镜片到达接收单元，不得只对激光发射器和接收器进行校准。

（6）对于抽取式气态污染物CEMS，当对全系统进行零点校准和量程校准、示值误差和系统响应时间的检测时，零气和标准气体应通过预设管线输送至采样探头处，经由样品传输管线回到站房，经过全套预处理设施后进入气体分析仪。

（7）调试检测合格完成后，应组织编制调试检测报告，作为验收的依据。

16.1.3 内容和方法

16.1.3.1 CEMS调试检测技术指标

固定污染源CEMS调试检测的技术指标要求见表16-1。

固定污染源烟气CEMS调试检测技术指标要求 **表16-1**

检测项目		技术要求	
气态污染物CEMS	二氧化硫	示值误差	当满量程≥100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)； 当满量程<100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
		准确度	排放浓度≥250μmol/mol(715mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(143mg/m³)≤排放浓度<250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(57mg/m³)
			20μmol/mol(57mg/m)≤排放浓度<50μmol/mol(143mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度<20μmol/mol(57mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(17mg/m³)
	氮氧化物	示值误差	当满量程≥200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)； 当满量程<200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
		准确度	排放浓度≥250μmol/mol(513mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(143mg/m³)≤排放浓度<250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(41mg/m³)
			20μmol/mol(41mg/m³)≤排放浓度<50μmol/mol(103mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度<20μmol/mol(41mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(12mg/m³)
	其他气态污染物	准确度	相对准确度≤15%

续表

检测项目		技术要求	
氧气 CMS	O_2	示值误差	不超过±5%(相对于标准气体标称值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
		准确度	>5.0%时,相对准确度≤15%
			≤5.0%时,绝对误差不超过±1.0%
颗粒物 CEMS	颗粒物	零点漂移、量程漂移	±2.0%F.S.
		相关系数	当参比方法测定颗粒物平均浓度>50mg/m³ 时,≥0.85
			当参比方法测定颗粒物平均浓度≤50mg/m³ 时,≥0.70
		置信区间半宽	≤10%(该排放源检测期间参比方法实测状态均值)
		允许区间半宽	≤25%(该排放源检测期间参比方法实测状态均值)
流速 CMS	流速	精密度	≤5%
		相关系数[a]	≥9 个数据时,相关系数≥0.90
		准确度	流速>10m/s,相对误差不超过±10%
			流速≤10m/s,相对误差不超过±12%
温度 CMS	温度	绝对误差	不超过±3℃
湿度 CMS	湿度	准确度	烟气湿度>5.0%时,相对误差不超过±25%
			烟气湿度≤5.0%时,绝对误差不超过±1.5%

a：当精密度不满足本标准要求，进行相关系数校准时应满足本条要求。

注：F.S. 为仪器的满量程值；氮氧化物以 NO_2 计。

16.1.3.2 颗粒物 CEMS 相关技术指标的调试检测

(1) 颗粒物 CEMS 零点漂移、量程漂移技术指标的调试检测

在检测开始时，人工或自动校准仪器零点和量程，记录最初的模拟零点和量程读数。每隔 24h 测定（人工或自动）和记录一次零点、量程读数，随后校准仪器零点和量程。连续操作 3d，按式（16-1）～式（16-4）计算零点漂移、量程漂移。

1）零点漂移

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_{0i} \tag{16-1}$$

$$Z_d = \frac{\Delta Z_{max}}{R} \times 100\% \tag{16-2}$$

式中 Z_{0i}——第 i 次零点读数初始值；

Z_i——第 i 次零点读数值；

Z_d——零点漂移；

ΔZ_i——第 i 次零点测试值的绝对误差；

ΔZ_{max}——零点测试绝对误差最大值；

R——仪器满量程值。

2）量程漂移

$$\Delta S_i = S_i - S_{0i} \tag{16-3}$$

$$S_d = \frac{\Delta S_{max}}{R} \times 100\% \tag{16-4}$$

式中 S_{0i}——第 i 次量程读数初始值；

S_i——第 i 次量程读数值；

S_d——量程漂移；

ΔS_i——第 i 次量程测试值的绝对误差；

ΔS_{max}——量程测试绝对误差最大值。

（2）颗粒物 CEMS 相关校准技术指标的调试检测

在检测期间，通过调节颗粒物控制装置，使颗粒物 CEMS 在高、中、低不同排放浓度条件下进行测试。每个排放浓度至少有 5 个参比数据。

参比方法与颗粒物 CEMS 监测同时段进行，颗粒物 CEMS 每分钟记录 1 个分钟均值，取与参比方法同时段显示值的平均值与参比方法测定的断面浓度平均值组成 1 个数据对，至少获 15 个有效数据对。但应报告所有的数据，包括舍去的数据对。

将由参比方法测定的标准状态干烟气下颗粒物断面浓度平均值转换为实际烟气状况下颗粒物断面浓度平均值。

$$Y=Y_S\times\frac{273}{273+t}\times\frac{B_a+P_s}{101325}\times(1-X_{sw}) \tag{16-5}$$

式中 Y——实际烟气状况下颗粒物断面浓度平均值，mg/m^3；

Y_S——标准状态干烟气下颗粒物断面浓度平均值，mg/m^3；

t——测定断面平均烟温，℃；

B_a——测定期间的大气压，Pa；

P_S——测定断面烟气静压，Pa；

X_{sw}——测定断面烟气平均含湿量，%。

以颗粒物 CEMS 显示值为横坐标（X），参比方法测定的已转换为实际烟气状况下的颗粒物断面浓度为纵坐标（Y），由最小二乘法建立两变量之间的关系。

一元线性回归方程：

$$\hat{Y}=b_0+b_1X \tag{16-6}$$

式中 $\hat{Y}$——测颗粒物浓度，mg/m^3；

b_0——线性相关校准曲线截距，计算见式（16-7）；

b_1——线性相关校准曲线斜率，计算见式（16-9）；

X——颗粒物 CEMS 显示值，无量纲。

截距计算公式：

$$b_0=\overline{Y}-b_1\overline{X} \tag{16-7}$$

式中 $\overline{X}$——颗粒物 CEMS 显示值的平均值，计算见式（16-8）；

$\overline{Y}$——实际烟气状况下参比方法颗粒物断面浓度平均值，mg/m^3，计算见式（16-8）。

$$\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i \quad \overline{Y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y_i \tag{16-8}$$

式中 X_i——第 i 个数据，颗粒物 CEMS 显示值，无量纲；

Y_i——第 i 个数据，实际烟气状况下参比方法颗粒物断面浓度平均值，mg/m^3；

n——数据对数目。

斜率计算公式：

$$b_1=\frac{S_{xy}}{S_{xx}} \tag{16-9}$$

其中，S_{xy} 和 S_{xx} 按（16-10）计算

$$S_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(X_1-\overline{X})^2 \quad S_{xy}=\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y}) \tag{16-10}$$

置信区间的计算，见公式（16-11），颗粒物 CEMS 测定的一批显示值，要求有 95%的把握认为此批显示值的每一个值均应落在由距上述校准曲线为该排放源排放限值的±10%的两条直线组成的区间内。

$$CI=t_{df}S_E\sqrt{\frac{1}{n}} \tag{16-11}$$

式中 CI——在平均值 X 处的 95%置信区间半宽；

t_{df}——对于 $df=n-2$ 见表 16-2 中提供的 student 统计 t 值；

S_E——相关校准曲线的分散性或偏差性（回归线精密度），计算见式（16-12）。

$$S_E=\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i-Y_i)^2} \tag{16-12}$$

在平均值 X 处，对于参比方法实测状态均值百分比的置信区间半宽计算见式（16-13）：

$$CI=\frac{CI}{EL}\times 100\% \tag{16-13}$$

式中 EL——排放源的颗粒物浓度排放限值。

注：当颗粒物排放限值小于颗粒物参比采样测试全部测量有效数据的平均值时，EL 值取颗粒物参比采样测试全部测量有效数据的平均值。

允许区间的计算，见式（16-14），颗粒物 CEMS 测定的一批显示值，要求有 95%的把握认为该批数据中 75%的数据应落在由距上述校准曲线为该排放源限值在检测期间参比方法实测状态均值的±25%的两条直线组成的区间内。

$$TI=k_tS_E \tag{16-14}$$

式中 TI——在平均值 X 处的 95%允许区间半宽；

k_t——计算见式（16-15）；

S_E——计算见式（16-12）。

$$k_t=u_nV_{df} \tag{16-15}$$

式中 u_n——由表 16-2 提供，75%允许因子（在平均值 X 处，$n=n$）；

V_{df}——对于 $df=n-2$ 见表 16-2。

在平均值 X 处，作为参比方法实测状态均值百分比的允许区间半宽计算见式（16-16）：

$$TI=\frac{TI}{EL}\times 100\% \tag{16-16}$$

线性相关系数计算见式（16-17）：

$$r=\sqrt{1-\frac{S_E^2}{S_y^2}} \tag{16-17}$$

式中 r——线性相关系数；

S_y——计算见式（16-18）。

$$S_y=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_1-\overline{Y})^2}{n-1}} \tag{16-18}$$

当一元线性回归方程无法满足相关系数的指标要求时，可选用其他校验方法（如一元多次方程式、对数指数方程式、幂指数方程式、K 系数等）进行调试。

计算置信区间和允许区间参数表　　表 16-2

f	t_{df}	V_{df}	n	$u_p(75)$
7	2.356	1.7972	7	1.233
8	2.306	1.7110	8	1.233
9	2.262	1.6452	9	1.214
10	2.228	1.5931	10	1.208
11	2.201	1.5506	11	1.203
12	2.179	1.5153	12	1.199
13	2.160	1.4854	13	1.195
14	2.145	1.4597	14	1.192
15	2.131	1.4373	15	1.189
16	2.120	1.4176	16	1.187
17	2.110	1.4001	17	1.185
18	2.101	1.3845	18	1.183
19	2.093	1.3704	19	1.181
20	2.086	1.3576	20	1.179
21	2.080	1.3460	21	1.178
22	2.074	1.3353	22	1.177
23	2.069	1.3255	23	1.175
24	2.064	1.3165	24	1.174
25	2.060	1.3081	25	1.173
30	2.042	1.2737	30	1.170
35	2.030	1.2482	35	1.167
40	2.021	1.2284	40	1.165
45	2.014	1.2125	45	L163
50	2.009	1.1993	50	1.162

注：$f=n-1$。

校验颗粒物 CEMS：将建立的手工采样参比方法测定结果与颗粒物 CEMS 测定结果的一元线性回归方程的斜率和截距输入到 CEMS 的数据采集处理系统，将颗粒物 CEMS 的测定显示值修正到与手工采样参比方法一致的颗粒物浓度（mg/m^3）。

手工采样断面排气流速应>5m/s，当不能满足要求时：

1）在 2.5～5m/s 时，取实测平均流速计算采样流量进行恒流采样，校验方法仍采用一元线性回归方程；

2）低于 2.5m/s 时，取 2.5m/s 流速计算采样流量进行恒流采样。至少取 9 个有效数据对计算 K 系数，即手工方法平均值/CEMS 显示值平均值，然后将 K 系数输入到 CEMS 的数据采集处理系统，校验后的颗粒物浓度＝K×CEMS 颗粒物显示值。

3）当无法调节颗粒物控制装置或燃烧清洁能源时，亦可采用 K 系数的方法。

4）由于用相关系数评价回归方程是必需的质量控制程序。但是标准没有提出对 K 值进行评价的指标来确保 K 系数的可靠性。因此在实际中一般不用。

16.1.3.3　气态污染物（含氧量）CEMS 相关技术指标的调试检测

（1）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 零点漂移、量程漂移技术指标的调试检测

1）零点漂移

仪器通入零气（经过滤的不含颗粒物、待测气体的清洁干空气或高纯氮气），校准仪器至零点，记录 Z_{0i}。24h 后再通入零气，待读数稳定后记录零点读数 Z_i，按调零键，仪器调零；连续操作 3 天，按式（16-1）和式（16-2）计算零点漂移 Z_d。

2）量程漂移

仪器通入高浓度标准气体（80%～100%的满量程），校准仪器至该标准气体的浓度值 S_{0i}。24h 后再通入同一标准气体，待读数稳定后记录标准气体读数 S_i，按校准键，校准仪器；连续操作 3 天，按式（16-3）和式（16-4）计算量程漂移 S_d。

（2）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 示值误差、系统响应时间技术指标的调试检测

1）示值误差

① 仪器通入零气，调节仪器零点。

② 通入高浓度（80%～100%的满量程值）标准气体，调整仪器显示浓度值与标准气体浓度值一致。

③ 仪器经上述校准后，按照零气、高浓度标准气体、零气、中浓度（50%～60%的满量程值）标准气体、零气、低浓度（20%～30%的满量程值）标准气体的顺序通入标准气体。若低浓度标准气体浓度高于排放限值，则还需通入浓度低于排放限值的标准气体，完成超低排放改造后的火电污染源还应通入浓度低于排放水平的标准气体。待显示浓度值稳定后读取测定结果；重复测定 3 次，取平均值，按式（16-19）、式（16-20）计算示值误差。

当满足以下条件：

① SO_2 满量程不小于 100μmol/mol；

② NO_x 满量程不小于 200μmol/mol；

③ 测试含氧量示值误差；

示值误差按式（16-19）计算：

$$L_{ei}=\frac{\overline{C_{di}}-C_{si}}{C_{si}}\times 100\% \tag{16-19}$$

式中 L_{ei}——标准气体的示值误差；

$\overline{C_{di}}$——标准气体测定浓度平均值；

C_{si}——标准气体浓度值；

i——第 i 种浓度标准气体。

当满足以下条件：

① SO_2 满量程小于 100μmol/mol；

② NO_x 满量程小于 200μmol/mol；

示值误差按式（16-20）计算：

$$L_{ei}=\frac{\overline{C_{di}}-C_{si}}{F.S.}\times 100\% \tag{16-20}$$

式中 $F.S.$——分析仪满量程值。

2）响应时间

① 待测 CEMS 运行稳定后，按照系统设定采样流量通入零点气体，待读数稳定后按照相同流量通入量程校准气体，同时用秒表开始计时。关闭标气，使系统抽取样气。

② 观察分析仪示值，至读数由零开始跃变止，记录样气管路传输时间 T_1。

③ 继续观察并记录待测分析仪器显示值上升至标准气体浓度标称值 90%时的仪表仪表

响应时间 T_2。

④ 系统响应时间为 T_1 和 T_2 之和。重复测定 3 次，取平均值，应符合表 16-1 中的要求。

(3) 气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 准确度技术指标的调试检测

气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 与参比方法同步测定，由数据采集器每分钟记录 1 个累积平均值，连续记录至参比方法测试结束，取与参比方法同时段的平均值，参比方法每个数据的测试时间为 5～10min。

取参比方法与 CEMS 同时段测定值组成一个数据对，参比方法与 CEMS 测量值均为标态干基浓度，每天至少取 9 对有效数据用于相对准确度计算，但应报告所有的数据，包括舍去的数据对，连续进行 3 天。

相对准确度计算：

$$RA=\frac{|\bar{d}|+|cc|}{\overline{RM}}\times 100\% \tag{16-21}$$

式中 RA——相对准确度；

$\overline{RM}$——参比方法全部数据对测量结果的平均值；

$\bar{d}$——CEMS 与参比方法测量各数据对差的平均值；

cc——置信系数。

$$\overline{RM}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}RM_i \tag{16-22}$$

式中 n——数据对个数；

RM_i——第 i 个数据对中的参比方法测定值。

$$\bar{d}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_i \tag{16-23}$$

$$d_i=CEMS_i-RM_i \tag{16-24}$$

式中 d_i——每个数据对之差；

$CEMS_i$——第 i 个数据对中的 CEMS 测定值。

在计算数据对差的和时，保留差值的正、负号。

$$cc=\pm t_{f,0.95}\frac{S_d}{\sqrt{n}} \tag{16-25}$$

式中 $t_{f,0.95}$——由 t 表查得，$f=n-1$；

S_d——参比方法与 CEMS 测定值数据对的差的标准偏差。

计算置信系数用 t 值表（95%置信水平） 表 16-3

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2.571	2.447	2.365	2.306	2.262	2.228	2.201	1.179	2.160	2.145	2.131	2.120

$$S_d=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\bar{d}_i)^2}{n-1}} \tag{16-26}$$

参比方法评估气态污染物 CEMS 准确度结果按 HJ76—2017 标准附录的表格形式记录。

(4) 校验气态污染物 CEMS 和氧气 CMS

气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 准确度达不到技术指标的要求时，将偏差调节系数输入 CEMS 的数据采集处理系统，按式（16-27）和式（16-28）对 CEMS 测定数据进行调节，经调节仍不能达到要求时，应选择有代表性的位置安装气态污染物 CEMS，重新进行检测。

$$CEMS_{adi}=CEMS_i\times E_{ac} \tag{16-27}$$

式中 $CEMS_{adi}$——CEMS 在 i 时间调节后的数据；

$CEMS_i$——CEMS 在 i 时间测得的数据；

E_{ac}——偏差调节系数。

$$E_{ac}=1+\frac{\bar{d}}{\overline{CEMS_i}} \tag{16-28}$$

式中 $\bar{d}$——公式（16-23）和公式（16-24）计算的数据对差的平均值；

$\overline{CEMS_i}$——第 i 个数据对中的 CEMS 测定数据的平均值。

16.1.3.4 流速 CMS 速度场系数技术指标的调试检测

由参比方法测定断面烟气平均流速和同时段流速 CMS 测定的烟气平均流速，按式（16-29）计算速度场系数：

$$K_V=\frac{F_S}{F_p}\times\frac{\bar{V}_S}{V_p} \tag{16-29}$$

式中 K_V——速度场系数；

F_S——参比方法测定断面面积，m^2；

F_p——流速 CMS 所在测定断面面积，m^2；

$\bar{V}_S$——参比方法测定断面的平均流速，m/s；

$\bar{V}_p$——流速 CMS 在固定点或测定线所在断面的测定流速，m/s。

流速 CMS 速度场系数精密度技术指标的调试检测。每天至少获得 5 个有效速度场系数，计算速度场系数日平均值。但必须报告所有数据，包括舍去的数据。至少连续获得 3 天的日平均值，并按式（16-30）、式（16-31）计算速度场系数精密度：

$$CV\%=\frac{S}{\overline{K_v}}\times 100\% \tag{16-30}$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\overline{K_{vi}}-\overline{K_v})^2}{n-1}} \tag{16-31}$$

式中 CV——速度场系数精密度（相对标准偏差），%；

S——速度场系数的标准偏差；

$\overline{K_v}$——速度场系数日平均值的平均值；

$\overline{K_{vi}}$——速度场系数日平均值；

n——日平均速度场系数的个数。

16.1.3.5 温度 CMS 准确度技术指标的调试检测

检测期间，温度 CMS 与参比方法同步测定，由数据采集器每分钟记录 1 个累积平均值，连续记录至参比方法测试结束，取与参比方法同时段的平均值，参比方法每个数据的测试时间不得低于 5min。

取参比方法与 CEMS 同时段测定值组成一个数据对，每天至少取 5 对有效数据用于相对准确度计算，但应报告所有的数据，包括舍去的数据对，连续进行 3d。将 CEMS 温度显示值减去参比方法断面测定平均值，计算温度准确度：

$$\Delta T=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{CEMS}-T_i) \tag{16-32}$$

式中 ΔT——烟温绝对误差，℃；

n——测定次数（≥5）；

T_{CEMS}——烟温 CMS 与参比方法同时段测定的平均烟温，℃；

T_i——参比方法测定的平均烟温，℃（可与颗粒物参比方法测定同时进行）。

16.1.3.6 湿度 CMS 准确度技术指标的调试检测

检测期间，湿度 CMS 与参比方法同步测定，由数据采集器每分钟记录 1 个平均值，连续记录至参比方法测试结束，取与参比方法同时段的平均值。

取参比方法与 CEMS 同时段测定值组成一个数据对，每天至少取 5 对有效数据用于相对准确度计算，但应报告所有的数据，包括舍去的数据对，连续进行 3d。并按下面公式（16-33）、（16-34）计算湿度绝对误差和相对误差：

绝对误差：

$$\Delta X_{SW}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{SWCMS}-X_{SWi}) \tag{16-33}$$

相对误差：

$$R_{es}=\frac{\Delta X_{SW}}{X_{SWi}}\times 100\% \tag{16-34}$$

式中 ΔX_{SW}——烟气湿度绝对误差，%；

n——测定次数（≥5）；

X_{SWCMS}——烟气湿度 CMS 与参比方法同时段测定的平均烟气湿度，%；

X_{SWi}——参比方法测定的平均烟气湿度，%；

R_{es}——烟气湿度相对误差，%。

16.1.4 调试报告

CEMS 调试检测报告参考格式和内容如表 16-4 所示

调试检测报告 **表 16-4**

企业名称		安装位置		
检测单位		检测日期		
CEMS 供应商：				
CEMS 主要仪器型号				
仪器名称	设备型号	制造商	测量方法	
项目名称		技术要求	检测结果	是否符合
颗粒物	零点漂移	不超过±2.0%		
	量程漂移	不超过±2.0%		
	一元线性方程	—		—
	相关系数	当参比方法测定颗粒物平均浓度＞50mg/m³ 时，≥0.85 平均浓度≤50mg/m³ 时，≥0.70		
	CI(置信区间半宽)	≤10%(该排放源检测期间参比方法实测状态均值)		
	TI(允许区间半宽)	≤25%(该排放源检测期间参比方法实测状态均值)		

续表

项目名称		技术要求	检测结果	是否符合
二氧化硫	零点漂移	不超过±2.5%		
	量程漂移	不超过±2.5%		
	示值误差	当满量程≥100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)；当满量程＜100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)		
	系统响应时间	≤200s		
	准确度	排放浓度≥250μmol/mol(715mg/m³)时，相对准确度≤15%50μmol/mol(143mg/m³)≤排放浓度＜250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(57mg/m³)20μmol/mol(57mg/m³)≤排放浓度＜50μmol/mol(143mg/m³)时，相对误差不超过±30%排放浓度＜20μmol/mol(57mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(17mg/m³)		
氮氧化物	零点漂移	不超过±2.5%		
	量程漂移	不超过±2.5%		
	示值误差	当满量程≥200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)； 当满量程＜200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)		
	系统响应时间	≤200s		
	准确度	排放浓度≥250μmol/mol(513mg/m³)时，相对准确度≤15% 50μmol/mol(103mg/m³)≤排放浓度＜250μmol/mol(513mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol (41mg/m³) 20μmol/mol(41mg/m³)≤排放浓度＜50μmol/mol(103mg/m³)时，相对误差不超过±30%排放浓度＜20μmol/mol(41mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(12mg/m³)		
其他气态污染物	准确度	相对准确度≤15%		
含氧量	零点漂移	不超过±2.5%		
	量程漂移	不超过±2.5%		
	示值误差	不超过±5%(相对于标准气体标称值)		
	系统响应时间	≤200s		
	准确度	≤5.0%时，绝对误差不超过±1.0%； ＞5.0%时，相对准确度≤15%		

续表

项目名称		技术要求	检测结果	是否符合
流速	速度场系数精密度	≤5%		
	相关系数	≥9个数据时，相关系数≥0.90		
	准确度	流速>10m/s，相对误差不超过±10% 流速≤10m/s，相对误差不超过±12%		
烟温	绝对误差	不超过±3℃		
湿度	准确度	≤5.0%时，绝对误差不超过±1.5%； >5.0%时，相对误差不超过±25%。		
结论				

标准气体名称		浓度标称值	生成厂商名称

参比方法测试项目	仪器生产厂商	型号	方法依据

16.2 CEMS验收

CEMS在完成安装、调试检测并和主管部门联网后，应进行技术验收。

16.2.1 CEMS验收的基本前提要求

（1）排污口安装的固定污染源烟气CEMS相关仪器（颗粒物、SO_2、NO_x、流速等）应具有国家环境保护部环境监测仪器质量监督检验中心出具的《适用性检测合格报告》，型号与报告内容相符合。

（2）排污口安装的固定污染源烟气CEMS的安装位置及手工采样位置应符合《固定污染源排气中颗粒物测定与气体污染物采集办法》GB/T 16157—1996标准、《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017标准第7章和CEMS安装的相关要求，CEMS应安装在经环境保护行政主管部门认可的排污口，其安装位置须事先经环境监测部门确认。

（3）CEMS数据采集和传输以及通信协议均应符合《污染物在线监控（监测）系统数据传输标准》HJ 212的要求，并提供一个月内数据采集和传输自检报告，报告应对数据传输标准的各项内容做出响应。由当地环保部门出具CEMS《联网证明》资料。

（4）根据 HJ 75—2017 标准第 8 章的要求进行了 72h 的调试检测，并提供调试检测合格报告及调试检测结果数据。调试检测后至少稳定运行 7d。

（5）建立 CEMS 完成的技术档案，包括产品的说明书、操作规程以及相关的日常管理质量控制和质量保证计划等。

（6）日常运行中更换 CEMS 分析仪表或变动 CEMS 取样点位时，应分别满足 HJ 75—2017 标准 7.1、7.2 的要求，并进行再次验收。

16.2.2 CEMS 验收内容

CEMS 验收内容主要包括三个方面：现场技术性能验收、联网验收和管理制度和档案验收。

16.2.2.1 技术性能验收

（1）一般要求

1）CEMS 技术指标验收包括颗粒物 CEMS、气态污染物 CEMS、烟气参数 CMS 技术指标验收。

2）验收时间由排污单位与验收单位协商决定。

3）现场验收期间，生产设备应正常且稳定运行，可通过调节固定污染源烟气净化设备达到某一排放状况，该状况在测试期间应保持稳定。

4）日常运行中更换 CEMS 分析仪表或变动 CEMS 取样点位时，应分别满足 HJ 75—2017 标准 7.1、7.2 的要求，并进行再次验收。

5）现场验收时必须采用有证标准物质或标准样品，较低浓度的标准气体可以使用高浓度的标准气体采用等比例稀释方法获得，等比例稀释装置的精密度在 1%以内。标准气体要求贮存在铝或不锈钢瓶中，不确定度不超过±2%。

6）对于光学法颗粒物 CEMS，校准时须对实光际测量路进行全光路校准，确保发射光先经过出射镜片，再经过实际测量光路，到校准镜片后，再经过入射镜片到达接受单元，不得只对激光发射器和接收器进行校准。对于抽取式气态污染物 CEMS，当对全系统进行零点校准和量程校准、示值误差和系统响应时间的检测时，零气和标准气体应通过预设管线输送至采样探头处，经由样品传输管线回到站房，经过全套预处理设施后进入气体分析仪。

7）验收前检查直接抽取式气态污染物采样伴热管的设置，应符合 HJ 75—2017 第 7.2.7 条的规定。冷干式 CEMS 冷凝器的设置和实际控制温度应保持在 2～6℃。

（2）颗粒物 CEMS 技术指标验收

1）验收内容

颗粒物 CEMS 技术指标验收包括颗粒物的零点漂移、量程漂移和准确度验收。

2）颗粒物 CEMS 零点漂移、量程漂移

在验收开始时，人工或自动校准仪器零点和量程，测定和记录初始的零点、量程读数，待颗粒物 CEMS 准确度验收结束，且至少距离初始零点、量程测定 6h 后再次测定（人工或自动）和记录一次零点、量程读数，随后校准零点和量程。按《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》附录 A 公式（A1）～公式（A4）计算零点漂移、量程漂移。

① 零点漂移

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_{0i} \quad (A1)$$

$$Z_d = \Delta Z_{max}/R \times 100\% \quad (A2)$$

式中 Z_{0i}——第 i 次零点读数初始值；

Z_i——第 i 次零点读数值；

Z_d——零点漂移；

ΔZ_i——第 i 次零点测试值的绝对误差；

ΔZ_{max}——零点测试绝对误差最大值；

R——仪器满量程值。

② 量程漂移

$$\Delta S_i = S_i - S_{0i} \quad (A3)$$

$$S_d = \Delta S_{max}/R \times 100\% \quad (A4)$$

式中 S_{0i}——第 i 次量程读数初始值；

S_i——第 i 次量程读数；

S_d——量程漂移；

ΔS_i——第 i 次量程测试值的绝对误差；

ΔS_{max}——量程测试绝对误差最大值。

颗粒物 CEMS 零点和量程漂移检测结果按 HJ 75—2017 标准附录 D 表 D.1 的表格形式记录。

③ 颗粒物 CEMS 准确度

采用参比方法与 CEMS 同步测量测试断面烟气中颗粒物平均浓度，至少获取 5 对同时间区间且相同状态的测量结果，按以下方法计算颗粒物 CEMS 准确度：

绝对误差：

$$\overline{d}_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_{CEMS} - C_i) \quad (16\text{-}35)$$

相对误差：

$$R_e = \frac{\overline{d_i}}{\overline{C_i}} \times 100\% \quad (16\text{-}36)$$

式中 $\overline{d}_i$——绝对误差，mg/m^3；

R_e——相对误差，%；

C_i——参比方法测定的第 i 个浓度，mg/m^3；

C_{CEMS}——CEMS 与参比方法同时段测定的浓度，mg/m^3。

（3）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 技术指标验收

1）验收内容

气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 技术指标验收包括零点漂移、量程漂移、示值误差、系统响应时间和准确度验收。现场验收时，先做示值误差和系统响应时间的验收测试，不符合技术要求的，可不再继续开展其余项目验收。

注：通入零气和标气时，均应通过 CEMS 系统，不得直接通入气体分析仪。

2）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 示值误差、系统响应时间

① 示值误差

a. 通入零气（经过滤的不含颗粒物、待测气体的清洁干空气或高纯氮气），调节仪器零点。

b. 通入高浓度（80%～100%的满量程值）标准气体，调整仪器显示浓度值与标准气体浓度值一致。

c. 仪器经上述校准后，按照零气、高浓度标准气体、零气、中浓度（50%～60%的满量程值）标准气体、零气、低浓度（20%～30%的满量程值）标准气体的顺序通入标准气体。若低浓度标准气体浓度高于排放限值，则还需通入浓度低于排放限值的标准气体，完成超低排放改造后的火电污染源还应通入浓度低于超低排放水平的标准气体。待显示浓度值稳定后读取测定结果。重复测定 3 次，取平均值。按 HJ 75—2017 标准附录 A 公式（A19）、公式（A20）计算示值误差。

当满足以下条件：

SO_2 满量程不小于 100μmol/mol，

NO_x 满量程不小于 200μmol/mol，

测试含氧量示值误差，

示值误差按式（A19）计算：

$$L_{ei}=\frac{\overline{C}_{di}-C_{si}}{C_{si}}\times 100\% \tag{A19}$$

式中 L_{ei}——标准气体的示值误差；

$\overline{C}_{di}$——标准气体测定浓度平均值；

C_{si}——标准气体浓度值；

i——第 i 种浓度的标准气体。

当满足以下条件：

SO_2 满量程小于 100μmol/mol，

NO_x 满量程小于 200μmol/mol，

示值误差按（A20）计算：

$$L_{ei}=\frac{\overline{C}_{di}-C_{si}}{F.S.}\times 100\% \tag{A20}$$

式中 $F.S.$——分析仪满量程值。

示值误差检测结果按 HJ 75—2017 标准附录 D 表 D.4 的表格形式记录。

② 系统响应时间

a. 待测 CEMS 运行稳定后，按照系统设定采样流量通入零点气体，待读数稳定后按照相同流量通入量程校准气体，同时用秒表开始计时。

b. 观察分析仪示值，至读数开始跃变止，记录并计算样气管路传输时间 T_1。

继续观察并记录待测分析仪器显示值上升至标准气体浓度标称值 90%时的仪表响应时间 T_2。

c. 系统响应时间为 T_1 和 T_2 之和。重复测定 3 次，取平均值。

3）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 零点漂移、量程漂移

① 零点漂移

系统通入零气（经过滤的不含颗粒物、待测气体的清洁干空气或高纯氮气），校准仪器至零点，测试并记录初始读数 Z_0。待气态污染物和氧气准确度验收结束，且至少距初始测试 6h 后，再通入零气，待读数稳定后记录零点读数 Z_1。按 HJ 75—2017 标准附录 A 公式

（A1）和（A2）计算零点漂移 Z_d。

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_{0i} \tag{A1}$$

$$Z_d = \Delta Z_{max}/R \times 100\% \tag{A2}$$

式中 Z_{0i}——第 i 次零点读数初始值；

Z_i——第 i 次零点读数值；

Z_d——零点漂移；

ΔZ_i——第 i 次零点测试值的绝对误差；

ΔZ_{max}——零点测试绝对误差最大值；

R——仪器满量程值。

② 量程漂移

系统通入高浓度（80%～100%的满量程）标准气体，校准仪器至该标准气体的浓度值，测试并记录初始读数 S_0。待气态污染物和氧气准确度验收结束，且至少距初始测试 6h 后，再通入同一标准气体，待读数稳定后记录标准气体读数 S_1。按 HJ 75—2017 标准附录 A 公式（A3）和（A4）计算量程漂移 S_d。

$$\Delta S_i = S_i - S_{0i} \tag{A3}$$

$$S_d = \Delta S_{max}/R \times 100\% \tag{A4}$$

式中 S_{0i}——第 i 次量程读数初始值；

S_i——第 i 次量程读数；

S_d——量程漂移；

ΔS_i——第 i 次量程测试值的绝对误差；

ΔS_{max}——量程测试绝对误差最大值。

4）气态污染物 CEMS 和氧气 CMS 准确度

参比方法与 CEMS 同步测量烟气中气态污染物和氧气浓度，至少获取 9 个数据对，每个数据对取 5～15min 均值。绝对误差按公式（16-35）计算，相对误差按公式（16-36）计算，相对准确度按 HJ 75—2017 标准附录 A 公式（A21）～公式（A26）计算。

$$RA = \frac{|\bar{d}| + |cc|}{\overline{RM}} \times 100\% \tag{A21}$$

式中 RA——相对准确度。

$$\overline{RM} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} RM_i \tag{A22}$$

式中 n——数据对的个数；

RM_i——第 i 个数据对中的参比方法测定值。

$$\bar{d}_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \tag{A23}$$

$$d_i = CEMS_i - RM_i \tag{A24}$$

式中 d_i——每个数据对之差；

$CEMS_i$——第 i 个数据对中的 CEMS 测定值。

（注：在计算数据对差的和时，保留差值的正、负号）

$$cc = \pm t_{f,0.95}\frac{S_d}{\sqrt{n}} \tag{A25}$$

其中置信系数（cc）由表 A.2 t 值表查得的统计值和数据对差的标准偏差表示：

t 值表（95%置信水平） 表 A.2

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2.571	2.447	2.365	2.306	2.262	2.228	2.201	1.179	2.160	2.145	2.131	2.120

$t_{f,0.95}$——由 t 表查得，$f=n-1$；

$$S_d=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\overline{d}_i)^2}{n-1}} \tag{A26}$$

式中 S_d——参比方法与 CEMS 测定值数据对的差的标准偏差。

烟气参数 CMS 技术指标验收

验收内容：烟气参数指标验收包括流速、烟温、湿度准确度验收。采用参比方法与流速、烟温、湿度 CMS 同步测量，至少获取 5 个同时段测试断面值数据对，分别计算流速、烟温、湿度 CMS 准确度。

5）流速准确度

烟气流速准确度计算方法如下：

绝对误差：
$$\overline{d}_{vi}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(V_{CEM}-V_i) \tag{16-37}$$

相对误差：
$$R_{ev}=\frac{\overline{d}_{vi}}{V_i}\times 100\% \tag{16-38}$$

式中 $\overline{d}_{vi}$——流速绝对误差，m/s；

R_{ev}——流速相对误差，%；

V_i——参比方法测定的测试断面的烟气平均流速，m/s；

V_{CMS}——流速 CMS 与参比方法同时段测定的烟气平均流速，m/s。

6）温度准确度

烟温绝对误差计算方法：

$$\Delta T=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{CMS}-T_i) \tag{16-39}$$

式中 ΔT——烟温绝对误差，℃；

T_i——参比方法测定的平均烟温，℃（可与颗粒物参比方法测定同时进行）；

T_{CMS}——烟温 CMS 与参比方法同时段测定的平均烟温，℃。

7）湿度准确度

湿度准确度计算方法如下：

绝对误差：
$$\Delta X_{SW}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{SWCMS}-X_{SWi}) \tag{16-40}$$

相对误差：
$$R_{es}=\frac{\Delta X_{SW}}{X_{SWi}}\times 100\% \tag{16-41}$$

式中：ΔX_{SW}——烟气湿度绝对误差，%；

R_{es}——烟气湿度相对误差，%

X_{SWi}——参比方法测定的平均烟气湿度，%；

X_{SWCMS}——烟气湿度 CMS 与参比方法同时段测定的平均烟气湿度，%。

验收测试结果可参照 HJ 75—2017 标准附录 D 中的表 D.1、表 D.3～表 D.5 和表 D.8 表格形式记录。

附录 D
（资料性附录）
固定污染源烟气排放连续监测系统安装调试检测原始记录表

表 D.1 颗粒物 CEMS 零点和量程漂移检测

测试人员_____ CEMS 生产厂商_____
测试地点_____ CEMS 型号、编号_____
测试位置_____
CEMS 原理_____

日期	时间		计量单位（mg/m³、mA、mV、不透明度%……）									备注
			零点读数		零点漂移绝对误差	调节零点否	上标校准读数		量程漂移绝对误差	调节量程否	清洁镜头否	
	开始	结束	起始（Z_0）	最终（Z_i）	$\Delta Z=Z_i-Z_0$		起始（S_0）	最终（S_i）	$\Delta S=S_i-S_0$			
零点漂移绝对误差最大值							量程漂移绝对误差最大值					
零点漂移							量程漂移					

表 D.3 气态污染物 CEMS（含氧量）零点和量程漂

测试人员_____ CEMS 生产厂商_____
测试地点_____ CEMS 型号、编号_____
测试位置_____ CEMS 原理_____
标准气体浓度或校准器件的已知响应值_____
污染物名称_____ 计量单位_____

序号	日期	时间	零点读数		零点读数变化	量程读数		量程读数变化	备注
			起始（Z_0）	最终（Z_i）	$\Delta Z=Z_i-Z_0$	起始（S_0）	最终（S_i）	$\Delta S=S_i-S_0$	
零点读数变化最大值						量程读数变化最大值			
零点漂移						量程漂移			

表 D.4　气态污染物 CEMS 示值误差和系统响应时间检测

测试人员_____　　CEMS 生产厂商_____

测试地点_____　　CEMS 型号、编号_____

测试位置_____　　CEMS 原理_____

污染物名称_____　　计量单位_____

测试日期_____年月日

序号	标准气体或校准器件参考值	CEMS 显示值	CEMS 显示值的平均值	示值误差（%）	系统响应时间(s)				备注
					测定值			平均值	
					T_1	T_2	$T=T_1+T_2$		

表 D.5　参比方法评估气态污染物 CEMS（含氧量）准确度

测试人员_____　　CEMS 生产厂商_____

测试地点_____　　CEMS 型号、编号_____

测试位置_____　　CEMS 原理_____

测试日期年月日污染物名称计量单位_____

样品编号	时间(时、分)	参比方法测量值 A	CEMS 测量值 B	数据对差$=B-A$

平均值	
数据对差的平均值的绝对值	
数据对差的标准偏差	
置信系数	
相对准确度	

标准气体	名称	保证值	参比方法测量值		相对误差(%)	
			采样前	采样后	采样前	采样后

表 D.8 颗粒物 CEMS/流速 CMS/温度 CMS/湿度 CMS 准确度检测

测试人员_____ CEMS 生产厂商_____

测试地点_____ CEMS 型号、编号_____

测试位置_____ CEMS 原理_____

参比方法仪器生产厂商_____ 型号、编号_____

原理_____

日期	时间（时、分）	参比方法									CEMS			颗粒物颜色	备注
		序号	滤筒编号	颗粒物重（mg）	标干体积（L）	浓度（mg/m^3）	流速（m/s）	温度（℃）	湿度（%）	测定值（mg/m^3）	流速（m/s）	温度（℃）	湿度（%）		
颗粒物浓度平均值（mg/m^3）															
流速平均值（m/s）															
烟温平均值（℃）															
湿度平均值（%）															
颗粒物相对误差（%）															
流速相对误差（%）															
烟温绝对误差（℃）															
湿度绝对误差（%）（参比方法测量值≤5%时）															
湿度相对误差（%）（参比方法测量值>5%时）															

8）技术指标验收测试报告格式

报告应包括以下信息（可参照 HJ 75—2017 标准附录 F）：

① 报告的标识-编号；

② 检测日期和编制报告的日期；

③ CEMS 标识-制造单位、型号和系列编号；

④ 安装 CEMS 的企业名称和安装位置所在的相关污染源名称；

⑤ 环境条件记录情况（大气压力、环境温度、环境湿度）；

⑥ 示值误差、系统响应时间、零点漂移和量程漂移验收引用的标准；

⑦ 准确度验收引用的标准；

⑧ 所用可溯源到国家标准的标准气体；

⑨ 参比方法所用的主要设备、仪器等；

⑩ 检测结果和结论；

⑪ 测试单位；

⑫ 三级审核签字；

⑬ 备注（技术验收单位认为与评估 CEMS 的性能相关的其他信息）。

9）示值误差、系统响应时间、零点漂移和量程漂移验收技术要求（表 16-5、表 16-6）

示值误差、系统响应时间、零点漂移和量程漂移验收技术要求　　表 16-5

检测项目			技术要求
气态污染物 CEMS	二氧化硫	示值误差	当满量程≥100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)；当满量程＜100μmol/mol(286mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
	氮氧化物	示值误差	当满量程≥200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±5%(相对于标准气体标称值)；当满量程＜200μmol/mol(410mg/m³)时，示值误差不超过±2.5%(相对于仪表满量程值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
氧气 CMS	O_2	示值误差	±5%(相对于标准气体标称值)
		系统响应时间	≤200s
		零点漂移、量程漂移	不超过±2.5%
颗粒物 CEMS	颗粒物	零点漂移、量程漂移	不超过±2.0%

注：氮氧化物以 NO_2 计。

准确度验收技术要求　　表 16-6

检测项目			技术要求
气态污染物 CEMS	二氧化硫	准确度	排放浓度≥250μmol/mol(715mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(143mg/m³)≤排放浓度＜250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(57mg/m³)
			20μmol/mol(57mg/m³)≤排放浓度＜50μmol/mol(143mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度＜20μmol/mol(57mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(17mg/m³)
	氮氧化物	准确度	排放浓度≥250μmol/mol(513mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(103mg/m³)≤排放浓度＜250μmol/mol(513mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(41mg/m³)20μmol/mol(41mg/m³)≤排放浓度＜50μmol/mol(103mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度＜20μmol/mol(41mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(12mg/m³)
	其他气态污染物	准确度	相对准确度≤15%
氧气 CMS	O_2	准确度	＞5.0%时，相对准确度≤15%
			≤5.0%时，绝对误差不超过±1.0%

续表

检测项目			技术要求
颗粒物CEMS	颗粒物	准确度	排放浓度>200mg/m³时，相对误差不超过±15%
			100mg/m³<排放浓度≤200mg/m³时，相对误差不超过±20%
			50mg/m³<排放浓度≤100mg/m³时，相对误差不超过±25%
			20mg/m³<排放浓度≤50mg/m³时，相对误差不超过±30%
			10mg/m³<排放浓度≤20mg/m³时，绝对误差不超过±6mg/m³
			排放浓度≤10mg/m³，绝对误差不超过±5mg/m³
流速CMS	流速	准确度	流速>10m/s时，相对误差不超过±10%
			流速≤10m/s时，相对误差不超过±12%
温度CMS	温度	准确度	绝对误差不超过±3℃
湿度CMS	湿度	准确度	烟气湿度>5.0%时，相对误差不超过±25%
			烟气湿度≤5.0%时，绝对误差不超过±1.5%

注：氮氧化物以NO_2计，以上各参数区间划分以参比方法测量结果为准。

16.2.2.2 联网验收

联网验收由通信及数据传输验收、现场数据比对验收和联网稳定性验收三部分组成。

（1）通信及数据传输验收

按照HJ/T 212的规定检查通信协议的正确性。数据采集和处理子系统与监控中心之间的通信应稳定，不出现经常性的通信连接中断、报文丢失、报文不完整等通信问题。为保证监测数据在公共数据网上传输的安全性，所采用的数据采集和处理子系统应进行加密传输。监测数据在向监控系统传输的过程中，应由数据采集和处理子系统直接传输。

（2）现场数据比对验收

数据采集和处理子系统稳定运行一个星期后，对数据进行抽样检查，对比上位机接收到的数据和现场机存储的数据是否一致，精确至一位小数。

（3）联网稳定性验收

在连续一个月内，子系统能稳定运行，不出现除通信稳定性、通信协议正确性、数据传输正确性以外的其他联网问题。

（4）验收技术指标要求

CEMS联网验收指标 **表16-7**

验收检测项目	考核指标
通信稳定性	1)现场机在线率为95%以上； 2)正常情况下，掉线后，应在5min之内重新上线； 3)单台数据采集传输仪每日掉线次数在3次以内； 4)报文传输稳定性在99%以上，当出现报文错误或丢失时，启动纠错逻辑，要求数据采集传输仪重新发送报文
数据传输安全性	1)对所传输的数据应按照HJ/T 212中规定的加密方法进行加密处理传输，保证数据传输的安全性。 2)服务器端对请求连接的客户端进行身份验证
通信协议正确性	现场机和上位机的通信协议应符合HJ/T 212的规定，正确率100%
数据传输正确性	系统稳定运行一星期后，对一星期的数据进行检查，对比接收的数据和现场的数据一致，精确至1位小数，抽查数据正确率100%
联网稳定性	系统稳定运行1个月，不出现除通信稳定性、通信协议正确性、数据传输正确性以外的其他联网问题

16.2.2.3 CEMS 管理制度和档案验收

CEMS 管理制度和档案验收主要包括两部分内容：首先是 CEMS 相关文件、资质、报告和相关标识的审查；其次是 CEMS 相关运行管理、校准校验以及设备管理等方面建立的制度和相应的记录。

（1）CEMS 相关文件、资质、报告和标识

按照有关环境管理要求，CEMS 现场应具备的基本文件、资质、报告和相关标识包括：

1）环境保护部环境监测仪器质量监督检测中心适用性检测合格报告。

2）中国环境保护产业协会认证中心环境保护产品认证证书（标识）。

3）CEMS 现场安装和调试检测报告。

4）CEMS 现场和联网验收监测报告和相关批复文件。

5）CEMS 日常定期比对监测报告和数据有效性审核批复文件（标识）。

6）环境污染治理设施运营资质证书（自动在线监测气类）（如果有运营）。

（2）CEMS 运行管理、校准校验以及设备管理等的制度和记录

1）岗位责任管理制度

CEMS 现场岗位责任管理制度主要包括：

① 排污单位、设备供应或制造商的以运营单位的责任管理制度。

② 设备管理人员和运营维护人员的岗位责任管理制度。

③ 设备档案建立和存档管理制度。

④ 设备日常运行自查制度。

⑤ 事故报告及应急处置制度。

⑥ 设备更新（更换）程序和制度。

2）仪器设备操作使用和运营维护制度

CEMS 仪器设备操作使用和运营维护制度主要包括：

① 仪器设备使用管理制度和使用技术说明。

② 系统运行和使用操作规程或运行作业指导书。

③ 系统日常巡检制度。

④ 系统定期维护保养制度。

⑤ 系统定期校准和校验制度。

⑥ 系统易损、易耗品的定期检查和更换制度。

⑦ 系统故障维修制度。

3）相关记录和台账

CEMS 根据相关制度应对日常情况进行记录并设置台账，主要包括：

① 日常巡检记录。

② 定期维护保养记录。

③ 定期校准和校验记录。

④ 故障维修和耗材更新（更换）记录。

⑤ 仪器设备相关台账和技术档案。

16.2.3 CEMS 验收报告

安装的污染源现场 CEMS 完成现场技术性能验收、联网验收以及管理制度和档案验收工作以后，应编制《CEMS 验收报告》，报告的参考格式和内容如下。

固定污染源烟气排放连续监测系统（CEMS）验收报告

安装点位：

设备名称：

单位名称：（公章）

年　月　日

基本情况

固定污染源烟气排放连续监测系统(CEMS)安装单位：	
联系人：	单位地址：
邮政编码：	联系电话：
安装点位：	
系统名称及型号：	
监测项目：	
系统生产单位：	
系统试运行单位：	
调试试运行完成时间：	
环境保护部环境监测仪器质量监督检验中心出具的产品适用性检测合格报告	
CEMS 安装调试报告(含试运行日报表、月报表)	
责任环保部门出具的联网证明	
质量控制和质量保证计划文档	
CEMS 技术档案	
备注：	

验收记录表

表 F.1　CEMS 技术指标验收报告

企业名称：安装位置：

验收单位：验收日期：

CEMS 供应商：				
CEMS 主要仪器型号				
仪器名称	设备型号	制造商	测量参数	出厂编号
零点漂移、量程漂移、示值误差、系统响应时间验收结果				
项目名称		技术要求	检测结果	是否合格
颗粒物	零点漂移			
	量程漂移			
二氧化硫	零点漂移			
	量程漂移			
	示值误差			
	系统响应时间			
氮氧化物	零点漂移			
	量程漂移			
	示值误差			
	系统响应时间			

续表

项目名称		技术要求	检测结果	是否合格
含氧量	零点漂移			
	量程漂移			
	示值误差			
	系统响应时间			
流速	零点漂移			
准确度验收结果				
项目	参比方法测量值	CEMS测量值	准确度	准确度限值
颗粒物				
二氧化硫				
氮氧化物				
其他气态污染物				
流速				
烟温				
氧量				
结论				

标准气体名称	浓度值	生产厂商名称

参比方法测试项目	仪器生产厂商	型号	方法依据
备注			

项目	内容	是否符合要求		
		是√	否×	备注/其他
联网验收	联网证明主要内容：			

续表

管理制度、记录和档案验收	CEMS相关文件、资质、报告和标识			
验收结论	验收组成员(签字)： 年月日			

第 17 章　CEMS 运行维护

17.1　CEMS 运行质量管理体系的建立

CEMS 运行质量管理是环境监测中十分重要的技术工作和管理工作，CEMS 的稳定运行依赖于运行质量管理体系的有效实施，成功的 CEMS 均伴有良好的质量管理体系。从 CEMS 调试和验收之时起，CEMS 的运行维护工作便贯穿于整个运行过程的始终。由于 CEMS 是在各种不利的环境下长期运行的复杂、精密的光电系统，因此只有对 CEMS 进行相应的质控程序，才能得到有质量的数据，并促使企业持续改进，以满足顾客的需求和期望。运行维护的成功与否，将直接关系到监测工作的有效性，所以 CEMS 的所有者和运营者必须建立相应的运行质量管理体系，确保 CEMS 获取数据的有效性、完整性、准确度、精密度、溯源性和可靠性。

在烟气自动监测系统运行维护过程中，CEMS 运行质量管理体系是一个以自动监测系统正常运行和监测数据准确可靠为目标的完整体系，是保证烟气 CEMS 正常稳定运行、持续提供有质量保证监测数据的重要手段。

CEMS 运行质量管理体系的建立应当在遵循现行法律法规的前提下，确定管理体系的方针与目标，合理制定管理体系实施的组织结构和资源配置，并编写有关的文件、指南和手册等体系文件。

17.1.1　CEMS 运行质量管理体系必须遵循的法律法规

我国污染源自动监控系统运维行业的法制建设共经历了三个主要阶段。

第一个阶段：行政许可阶段（1998～2014 年）。1995 年，原国家环保局开展了排污口规范化整治工作，许多地方在整治后的排污口安装流量计、“黑匣子”并尝试联网，形成了污染源自动监控设施，物联网的雏形。为了提高环境污染治理设施运营管理水平，规范环境污染治理设施运营市场秩序，原国家环保总局自 1993 年 3 月开始进行运营资质行政许可制度试点工作，发布了《环境保护设施运营资质许可管理办法（试行）》，其中便包括了污染源自动监控设施的运行维护。

2001 年，全国环境工作会议要求，在全国开展污染源自动监控设施试点工作，2005 年，原国家环保总局发布了《污染源自动监控管理办法》（总局令第 28 号），污染源自动监控工作进入了大规模发展阶段。与此同时，2014 年 12 月 10 日，根据《国务院对确需保留的行政审批项目设定行政许可的决定》的规定，原国家环保总局正式发布了《环境污染治理设施运营资质许可管理办法》（国家环保总局令第 23 号），对所有污染治理设施实施运营资质许可管理办法，按照规模分为一级、二级和临时三种证书，环境污染治理设施运营资质类别包括了自动监测系统在内的七种类别，并明确规定了未获得资质证书的单位不得从事环境污染治理设施运营活动，所有证书均由原国家环保总局颁发。

2012 年，原环境保护部修订了《环境污染治理设施运营资质许可办法》，新版文件中将

自动监控系统运营资质分为水污染物监测和大气污染物监测两个类别，只有乙级和临时两个级别，并从人员、业绩、注册资金和监测能力四个主要方面对运营单位进行审核。

第二个阶段，资质取消，初步市场化阶段（2014 年至 2017 年）。随着我国简政放权工作的推进，一大批行政许可逐步取消。2014 年 1 月，国务院下发《关于取消和下放一批行政审批项目的决定》（国发〔2014〕5 号），正式取消了《环境保护（污染治理）设施运营单位甲级资质认定》。同年 3 月，原环境保护部发布了《关于改革环境污染治理设施运行许可工作的通知》（环办〔2014〕31 号），要求各省（区、市）环保部门不宜继续实施乙级和临时资质认定工作。2016 年，国务院《关于第二批取消 152 项中央指定地方实施行政审批事项的决定》（国发〔2016〕9 号）正式取消乙级和临时资质认定工作。至此，自动监控系统运营资质行政许可历史正式画上句号。

尽管自动监控系统运营资质行政许可被取消，各地环保部门为加强对自动监控系统运维质量，多数省份在运维单位选择上采用了统一招标的形式。因此，运维单位数量虽有所增加，但并未呈现爆发式增长。

第三阶段：全面市场化阶段（2017 年至今）。随着新《环保法》的实施，在自动监控系统数据有效性方面逐步明确了排污企业的责任主体。2017 年 11 月，为进一步深入推进“放管服”改革，确保各项改革措施有效落实，原环境保护部 2017 年 57 号公告中，正式取消了《国家监控企业污染源自动监控数据有效性审核办法》和《国家重点监控企业污染源自动监测设备监督考核规程》等一系列文件，各省环保主管部门纷纷放开自动监控系统运营市场，由排污单位自行决定自动监控系统运维单位的选择问题，深入落实排污单位的责任主体。

此外，国家现行的针对 CEMS 运行管理的法律法规、政策、规范性文件和技术标准包括：法律法规方面，有《中华人民共和国大气污染防治法》（自 2016 年 1 月 1 日实施）、《中华人民共和国计量法》（自 2017 年 12 月 28 日实施）、《中华人民共和国环境保护税法》（自 2018 年 1 月 1 日起实施）；政策方面，国家发布了《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》（国发〔2016〕74 号）、《关于加快重点行业重点地区的重点排污单位自动监控工作》（环办环监〔2017〕61 号）、《关于深化环境监测改革提高环境监测数据质量的意见》（中共中央办公厅厅字〔2017〕35 号）；规范性文件和技术标准方面，有《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017、《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术要求及检测方法》HJ 76—2017、《固定污染源烟气低浓度颗粒物的测定重量法》HJ 836—2017、《污染源在线自动监控（监测）系统数据传输标准》HJ/T 212—2005 等。这些相关的法律法规、政策、规范性文件和技术标准，是建立 CEMS 运行质量管理体系的最基本要求。

17.1.2 管理体系的方针与目标

管理体系方针是全体 CEMS 运行维护和监督管理人员的工作准则和价值取向，以有效数据为中心，体现对运行质量的承诺。在管理体系的方针指导下，抓住主要问题，明确主要方向，随着质量目标逐步实现，质量方针管理逐渐实现成效，最终达成管理体系的目标。

管理体系的目标是满足产品运行所需的可测量的量化指标。管理体系建立目标，建立健全 CEMS 运行管理体系，确保 CEMS 监测数据全面、准确、客观、真实，重点关注监测数据的有效性、准确度、精密度、溯源性，例如设备运转率、数据有效率、数据传输率、设备故障率等。

通过树立 CEMS 运行质量管理体系的方针与目标，应明确地反映每个部门、每个岗位、

每个人的职责内容、权利范围、风险利益，使之有规范可照、有制度可循、有法规可依。

（1）明确各职能和层次人员的职责权限以及相互关系，并从教育、培训、技能和经验等方面明确各类人员的能力要求，以确保他们可以胜任对应岗位工作，通过全员参与到整个CEMS运行质量体系的建立、运行和维持活动中，以保证公司CEMS运行质量管理体系的顺利运作。

（2）明确控制可能产生CEMS监测数据不准确的各个环节，通过制度化的数据分析，寻找产生数据偏差的根本原因，通过纠正或预防措施防止再次发生，从而不断降低CEMS监测数据不精确问题发生的频率，并通过其他持续改进的活动来不断提高CEMS运行质量管理的有效性，从而实现公司成本的不断降低和利润的不断增长，有效于企业的持续改进。

（3）明确要求公司管理层直接参与质量管理体系活动，从公司层面制定质量方针和各层次质量目标，最高管理层通过及时获取质量目标的达成情况以判断质量管理体系运行的绩效，直接参与，定期的管理、评审掌握整个CEMS运行管理体系的整体状况，并及时对体系不足之处采取措施，从公司层面保证资源的充分性。

17.1.3 组织结构和资源配置

CEMS运行质量管理体系应合理规划组织结构，妥善配置资源，规定人员职责，协调各部门各岗位的相互关系。

组织结构是运行维护相关主体为实现管理体系方针与目标而进行的各种分工和协调的系统，一般包括排放源的操作人员、CEMS维护人员、排放源负责人、排放源所有者，并根据实际情况制定相关岗位职责，明确责任，各司其职。

资源是运行维护相关主体所拥有或控制的有效因素的总和。资源应基于实际情况，并在能够满足方针和目标实现的基础上进行配置。资源的配置切忌无视自身资源水平，盲目追求高标准反而难以使现有资源配置达到最优化，进而无法满足CEMS运行质量管理体系要求。

组织机构和资源配置是进一步明确相关主体的权利和责任，其目的是为实现管理体系的方针与目标。

（1）维护人员应经过省级环境保护行政主管部门委托的中介机构进行岗位培训，持证上岗，熟悉国家、地方相关的技术规范，能正确、熟练地掌握有关仪器设施的原理、操作、使用、调试、维修和更换等技能。

（2）除了对岗位的职责进行定义外，还应对参与监测和运营的各级人员进行任职条件、工作内容、职责和权利进行描述，使具体岗位人员明确其活动范围、职责和权限。

（3）CEMS运行单位应配置充足的备品备件、易耗品、备机，提供便携式分析仪器，以及必要的交通工具和劳保设施，以保证CEMS的正常运行。

17.1.4 编写体系文件

CEMS运行质量管理体系文件从日常维护保养、日常巡检、定期校验和校准等方面，对运营维护提出了各项质量保证与质量控制的要求，详细地介绍了运营维护方法和操作：校准误差和线性误差、校准和线性调节、预防性维护和调节系统、备件清单、故障及处理、记录保存和报告等。体系文件具有系统性、协调性、强制性，所有相关责任主体都必须认真遵守和执行，以保证运行维护和监督管理的有效进行。

体系文件一般分为《质量手册》《程序文件》《管理规定》和《记录清单》四级文件。

（1）《质量手册》也称《管理手册》，为纲领性文件，属于第一层次文件。它是阐明方针

并描述整个CEMS运行管理体系的文件，是全部管理体系文件的核心，是管理体系建立和运行的纲领。《质量手册》应从管理体系四个要素（组织机构、程序、过程、资源）入手，对管理体系进行描述，手册主要明确各级人员的职责和权限，使事事有人管，人人有事干。

（2）《程序文件》规定了为控制整个运行维护工作程序质量而须执行的有效措施和方法，对各种可能影响质量的活动进行策划和管理，是对运行维护要求与方法的具体的操作性文件。

（3）《管理规定》又称为《作业指导书》，是规定具体工作操作程序的作业指导文件。在实际工作中，为使文件更具操作性，可以根据具体要求和情况编制一些专项的制度，如《运营人员仪器设备操作、使用和维护制度》《岗位责任制度》《定期校准、校验制度》《设备故障预防与处理制度》《日常巡检制度》《标准物质和消耗品的定期更换及废药剂的收集处置制度》等。

（4）《记录清单》是各类CEMS运行管理的记录表格汇总，是对文件中需要记录的内容进行表格式或其他方式的设计，体现了文件“计我所做”的要求。

此外，体系文件还应随着内部、外部环境的变化而持续改进。改进工作的实现可以通过外部与监测站、排污企业、CEMS生产企业等的沟通途径收集外部信息；也可以通过内部审核程序，定期对管理体系的运行状况进行自我评价。通过不断地改进使CEMS运行质量管理体系始终保持较高的管理效率。

17.2 CEMS运行维护和监督管理

17.2.1 CEMS现场监督检查

17.2.1.1 排污口规范化检查

检查排污口设置是否符合《排污口规范化整治技术要求》的规定，便于采集样品、便于计量监测、便于日常现场监督检查的要求。是否与污染源自动监控设施竣工验收、污染源自动监控设施登记备案、最近一次污染源自动监测数据有效性审核一致（以下简称“验收、登记备案、最近一次有效性审核”）。废气排放口必须符合责任生态环境部门规范化排污口要求，并设置有环境保护图形标志牌，标志牌应注明污染源的特征和统一编号。

17.2.1.2 采样点规范性检查

检查烟气排放连续监测设施采样点设置是否符合HJ 75—2017、GB/T 16157和《污染源监控设施现场端建设规范（暂行）》的相关规定。

（1）应优先选择在垂直管段和烟道负压区域，确保所采集样品的代表性。

（2）测定位置应避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。对于圆形烟道，颗粒物CEMS和流速CEMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向≥4倍烟道直径，以及距上述部件上游方向≥2倍烟道直径处；气态污染物CEMS，应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向≥2倍烟道直径，以及距上述部件上游方向≥0.5倍烟道直径处。

（3）若一个固定污染源排气先通过多个烟道或管道后进入该固定污染源的总排气管时，应尽可能将CEMS安装在总排气管上，但要便于用参比方法校验CEMS；不得只在其中的一个烟道或管道上安装CEMS，并将测定值作为该源的排放结果；但允许在每个烟道或管道上安装CEMS。为了便于颗粒物和流速参比方法的校验和比对监测，烟气CEMS不宜安装在烟道内烟气流速小于5m/s的位置。

（4）对于新建排放源，采样平台应与排气装置同步设计、同步建设，确保采样断面满足HJ 75—2017标准第7.1.2.2条的要求；对于现有排放源，当无法找到满足HJ 75—2017标

准第 7.1.2.2 条的采样位置时，应尽可能选择在气流稳定的断面安装 CEMS 采样或分析探头，并采取相应措施保证监测断面烟气分布相对均匀，断面无紊流。

（5）为了便于颗粒物和流速参比方法的校验和比对监测，CEMS 不宜安装在烟道内烟气流速＜5m/s 的位置。

17.2.1.3 污染源配套环境条件检查

（1）采样或监测平台长度应≥2m，宽度应≥2m 或不小于采样枪长度外延 1m，周围设置 1.2m 以上的安全防护栏，有牢固并符合要求的安全措施，便于日常维护（清洁光学镜头、检查和调整光路准直、检测仪器性能和更换部件等）和比对监测。

（2）安装 CEMS 的工作区域应设置一个防水低压配电箱，内设漏电保护器、不少于 2 个 10A 插座，保证监测设备所需电力。

（3）采样或监测平台应易于人员和监测仪器到达，当采样平台设置在离地面高度≥2m 的位置时，应有通往平台的斜梯（或 Z 字梯、旋梯），宽度应≥0.9m；当采样平台设置在离地面高度≥20m 的位置时，应有通往平台的升降梯。

（4）当 CEMS 安装在矩形烟道时，若烟道截面的高度＞4m，则不宜在烟道顶层开设参比方法采样孔；若烟道截面的宽度＞4m，则应在烟道两侧开设参比方法采样孔，并设置多层采样平台。

17.2.1.4 监测站房检查

监测站房主要由站房、房顶护栏和踏步梯构成。检查监测站房内部是否有空调、不间断电源、灭火设备、给排水设施，应保持监测房、控制箱的清洁，保持监测设备的清洁。保证监测房内的温度不影响仪器的正常运行。监测站房建设要求如下：

（1）应为室外的 CEMS 提供独立站房，监测站房与采样点之间距离应尽可能近，原则上不超过 70m。

（2）监测站房的基础荷载强度应≥2000kg/m^2。若站房内仅放置单台机柜时，面积应≥2.5×2.5m^2。若同一站房放置多套分析仪表时，每增加一台机柜，站房面积应至少增加 3m^2，便于开展运维操作。站房空间高度应≥2.8m，站房建在标高≥0m 处。

（3）监测站房内应安装空调和采暖设备，室内温度应保持在 15～30℃，相对湿度应≤60%，空调应具有来电自动重启功能，站房内应安装排风扇或其他通风设施。

（4）监测站房内配电功率能够满足仪表实际要求，功率不少于 8kW，至少预留三孔插座 5 个、稳压电源 1 个、UPS 电源 1 个。

（5）监测站房内应配备不同浓度的有证标准气体，且在有效期内。标准气体应当包含零气（即含二氧化硫、氮氧化物浓度均≤0.1μmol/mol 的标准气体，一般为高纯氮气，纯度≥99.999%；当测量烟气中二氧化碳时，零气中二氧化碳≤400μmol/mol，含有其他气体的浓度不得干扰仪器的读数）和 CEMS 测量的各种气体（二氧化硫、氮氧化物、含氧量）的量程标气，以满足日常零点、量程校准、校验的需要。低浓度标准气体可由高浓度标准气体通过经校准合格的等比例稀释设备获得（精密度≤1%），也可单独配备。

（6）监测站房应有必要的防水、防潮、隔热、保温措施，在特定场合还应具备防爆功能。

（7）监测站房应具有能够满足 CEMS 数据传输要求的通信条件。

17.2.1.5 污染源自动监控设施变更情况检查

（1）检查污染源自动监控设施及其辅助设备类型、型号、位置、数量等是否与验收、登记备案、最近一次有效性审核一致。检查被监控的污染源排污口、排污情况是否发生变化。

（2）检查污染源自动监控设施采样点，检查其位置是否与验收、登记备案、最近一次有效性审核一致。

17.2.1.6 现场资质和资料检查

（1）仪器设备相关技术证明材料

固定污染源烟气CEMS相关仪器（颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、流速等）应具备以下相关技术证明材料：

1）由生态环境部环境监测仪器质量监督检验中心出具的CEMS仪器设备适用性检测合格报告，报告显示CEMS型号与现场相符，且报告在有效期内。

2）由仪器供应商提供的CEMS仪器产品说明书和使用操作规程。

3）由仪器运营单位提供的CEMS质量保证和质量控制计划（日常巡检规范）以及CEMS日常运营维护、校准校验、故障维修和耗材更换等的规定。

4）由各级生态环境部门提供的CEMS定期“监督考核”和“数据有效性审核”的合格报告和相关证明材料。

（2）第三方社会化运行单位

检查第三方社会化运行单位是否符合《环境污染治理设施运营资质许可管理办法》相关规定，是否具有污染源自动监控设施运营资质，查看其资质是否在有效期内和按资质规定从事运行活动。

第三方社会化运行单位资质要求，环境污染治理设施运营资质许可管理办法为提高环境污染治理设施运营管理水平，维护环境污染治理设施运营市场秩序，根据《国务院对确需保留的行政审批项目设定行政许可的决定》的规定，制定《环境污染治理设施运营资质许可管理办法》。2012年4月30日中华人民共和国环境保护部令第20号公布。

1）获得环境污染治理设施运营资质许可的单位应符合以下基本要求：

① 具有独立法人资格。

② 具备符合要求的技术人员。

③ 具备符合要求的运营现场管理人员和操作人员。

④ 具有1年以上连续从事符合规定条件的环境污染治理设施运营的业绩，能够保证设施正常运行（申请临时资质的除外）。

⑤ 具有一定规模的注册资金。

⑥ 具备符合要求的污染物检测能力。

2）技术人员基本要求

① 乙级资质和临时资质：具备不少于6名具有环境工程或相关专业初级以上技术职称的技术人员，其中具有高级技术职称的技术人员不少于3名。

② 申请一类以上资质许可的，每增加一类，应增加不少于3名具有环境工程及相关专业初级以上技术职称的技术人员。

③ 上述要求具有高级技术职称的技术人员中，可有1名兼职人员（要求年龄在70岁以下），其他均应为申请单位的全职人员。

3）现场管理人员和操作人员要求

乙级资质和临时资质：具备不少于10名取得环境污染治理设施运营人员考试合格证书的现场管理人员和操作人员。

4）从事环境污染治理设施运营业绩要求

① 正式资质：大气污染物监测运营不少于10套废（烟）气自动连续监测设施。

② 临时资质：无运营业绩要求。

5）注册资金要求

乙级资质和临时资质：注册资金不少于100万元。

6）污染物检测能力要求

自动连续监测类资质：具备保证污染源自动连续监测设施正常运行所需的主要理化指标检测能力；具有设施完备的污染物检测实验室，配备满足相应监测项目需要的取样、保存、称量和分析等设备；专业技术人员熟悉污染物自动连续监测系统的基本原理和操作方法，并能按照分析方法标准要求对污染物进行分析测试；具有维护、校对监测仪器的能力。

（3）第三方运营服务商的运营管理要求。

1）设备正常运行率：≥90%

正常运行率＝正常运行的自动监测设备数量/通过验收的自动监测设备数量×100%。

正常运行是指自动监测设备安装、验收符合有关技术规范要求，企业定期对其运行维护和校准校验，设备运转率超过90%（设备运转率＝实际运转小时数/应当运转的总小时数）。

2）数据传输有效率：≥75%

① 数据传输率

$$C=D/E\times100\%=(E-F)/E\times100\% \tag{17-1}$$

式中 D——考核时段内各数据类型实收数据个数之和；

E——考核时段内各数据类型应收数据个数之和；

F——考核时段内各数据类型缺失数据个数之和；

数据传输率考核数据类型为小时数据、日数据，按考核时段对各类型数据个数求和后计算传输率。

② 数据有效率

$$P=S/M\times100\% \tag{17-2}$$

式中 S——考核时段内实收有效数据组的数量；

M——考核时段内应收数据组的数量。

数据有效率考核数据类型为小时数据。

③ 数据传输有效率

$$Z=C\times P\times100\% \tag{17-3}$$

式中 Z——被考核地区自动监控数据传输有效率；

C——考核时段内全部监控点的数据传输率；

P——考核时段内全部监控点的数据有效率。

（4）第三方运营服务商的日常维护与监测要求

CEMS运营单位应根据CEMS使用说明书和本标准的要求编制仪器运行管理规程，确定系统运行操作人员和管理维护人员的工作职责。运维人员应当熟练掌握烟气排放连续监测仪器设备的原理、使用和维护方法。CEMS日常运行管理应包括以下方面：

1）日常维护制度

① 建立岗位责任管理制度。

② 操作和使用制度。

③ 设备运行和维护制度。

④ 设备校验和比对制度。

⑤ 日常巡检制度。

2）日常维护内容和记录

① 应根据 CEMS 说明书的要求对 CEMS 系统保养内容、保养周期或耗材更换周期等做出明确规定，每次保养情况应记录并归档。

② 每次进行备件或材料更换时，更换的备件或材料的品名、规格、数量等应记录并归档。

③如更换有证标准物质或标准样品，还需记录新标准物质或标准样品的来源、有效期和浓度等信息。

④ 对日常巡检或维护保养中发现的故障或问题，系统管理维护人员应及时处理并记录。

⑤ 每日通过远程监控系统对固定污染源在线自动监控设备和数据采集处理系统巡检和处理，并记录。

⑥ 每周对固定污染源在线自动监控设备和数据采集处理系统进行现场维护，查看仪器数据和异常情况，检查设备所需标气，检查管路、采样探头是否通畅等，并记录。

3）定期维护和更换部件内容和记录

① 固定污染源在线自动监控设备和数据采集处理系统的检修和记录。

② 设备故障及排除故障和记录。

③ 断电、停运、更换设备和记录。

④ 易损、易耗品更换和记录。

⑤ 监测数据连续出现超标，超量排污报警记录。

4）定期校准和校验并记录

CEMS 日常运行质量可靠是保障 CEMS 正常稳定运行、持续提供有质量保证监测数据的必要手段。当 CEMS 不能满足技术指标而失控时，应及时采取纠正措施，并缩短下一次校准、维护和校验的间隔时间。CEMS 运行过程中的定期校准是质量保证中的一项重要工作，定期校准应做到：

① 具有自动校准功能的颗粒物 CEMS 和气态污染物 CEMS 每 24h 至少自动校准一次仪器零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

② 无自动校准功能的颗粒物 CEMS 每 15d 至少校准一次仪器的零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

③ 无自动校准功能的直接测量法气态污染物 CEMS 每 15d 至少校准一次仪器的零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

④ 无自动校准功能的抽取式气态污染物 CEMS 每 7d 至少校准一次仪器零点和量程，同时测试并记录零点漂移和量程漂移。

⑤ 抽取式气态污染物 CEMS 每 3 个月至少进行一次全系统的校准，要求零气和标准气体从监测站房发出，经采样探头末端与样品气体通过的路径（应包括采样管路、过滤器、洗涤器、调节器、分析仪表等）一致，进行零点和量程漂移、示值误差和系统响应时间的检测。

⑥ 具有自动校准功能的流速 CEMS 每 24h 至少进行一次零点校准，无自动校准功能的流速 CEMS 每 30d 至少进行一次零点校准。

5）相关台账记录要求

① 记录台账的表格采用统一的标准表格，记录台账清晰、完整，现场记录在现场填写时，有专业维护人员的签名。

② 可从技术档案中查阅和了解仪器设备的使用，维修和性能检验等全部历史资料。

③ 与仪器相关的记录可放置在现场，所有记录均应妥善保存。

6）监测要求

CEMS运营维护日常监测指标要求见表17-1。

CEMS日常维护校准校验质控指标和监测要求 **表17-1**

检测项目		技术指标要求	建议频次
气态污染物CEMS	漂移	≤±2%F.S.	每周
	相对准确度	≥250μmol/mol(715mg/m³)时，相对准确度≤15%；≥50μmol/mol(143mg/m³)～<250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差≤20μmol/mol(57mg/m³)≥20μmol/mol(57mg/m³)～<50μmol/mol(143mg/m³)时，相对误差≤30%；<20μmol/mol(57mg/m³)时，绝对误差≤6μmol/mol(17mg/m³)	每季度
颗粒物CEMS	漂移	≤±2.0%F.S.	每周
	相关系数	≥0.85	每半年
		当测量范围上限≤50mg/m³时，≥0.75	
	准确度	当排放浓度>200mg/m³时，相对误差为±15%；>100mg/m³～≤200mg/m³时，相对误差为±20%；>50mg/m³～≤100mg/m³时，相对误差为±25%；>20mg/m³～≤50mg/m³时，相对误差为±30%；>10mg/m³～≤20mg/m³时，绝对误差为±6mg/m³；≤10mg/m³时，绝对误差为±5mg/m³	每季度
含氧量CEMS	漂移	≤±2%F.S.	每周
	相对准确度	≤15%	每季度
流速连续监测单元	场系数精密度	≤5%	每半年
	相对误差	当流速 >10m/s时，速度相对误差≤±10%； ≤10m/s时，速度相对误差≤±12%	每季度
温度连续测量系统	示值偏差	≤±3℃	每季度
湿度连续测量系统	相对误差	当烟气湿度 ≤5.0%时，绝对误差≤±15%； >5.0%时，相对误差≤±25%	每季度

7）运营维护人员

检查从事污染源自动监控系统的运行维护、化验分析人员是否持证上岗。维护人员需经过相关专业培训，方可上岗操作。

17.2.1.7 自动监控设施运行状况检查

（1）工作状况

1）检查污染源自动监控设施各组成部分是否处于完好状态，正常运转。

2）检查分析仪器产生的含有危险废物的废液是否有专门收集装置。

（2）数据传输及存储

1）检查污染源自动监控数据传输及存储是否符合《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017、《水污染源在线监测系统（COD_{Cr}、NH_3-N等）验收技术规范（试行）》HJ/T 354和《污染源在线自动监控（监测）数据采集传输仪技术要求》HJ 477的相关规定。

2）检查污染源自动监控设施是否按要求正常工作并传输数据。

3）检查分析仪器数据、数采仪数据、监控中心数据是否一致。

4）检查历史数据是否保存一年以上。

（3）运行维护记录和校验记录检查。

检查自动监控设施运行维护管理是否符合 HJ 75—2017 的有关规定。检查自动监控设施运行维护记录，主要包括停运、故障及其处理、耗材更换和校验记录等。

（4）自动监测数据有效性审核

查阅近期数据有效性审核报告，按照《水污染源在线监测系统数据有效性判别技术规范（试行）》HJ/T 356 和 HJ 75—2017 的相关规定检查自动监测数据是否通过有效性审核。如果未通过数据有效性审核，则重点检查整改措施落实情况。

（5）自动监控设施运行参数检查

检查自动监控设施运行参数是否与验收、登记备案、最近一次有效性审核一致。

17.2.1.8 工况与治理设施运行和监控数据检查

检查企业生产负荷及工况、污染治理设施运行状况与自动监控设施显示数据变化的相关逻辑性，特别是其变化趋势和数据是否符合基本逻辑关系。

17.2.2 CEMS 现场比对监测

17.2.2.1 监测项目

颗粒物、气态污染物（二氧化硫、氮氧化物）、烟气参数（温度、流速、氧量和湿度）。

17.2.2.2 监测频次

（1）对国家重点监控企业安装的固定污染源烟气 CEMS 的比对监测每年至少 4 次，即每季度至少 1 次。

（2）每次比对监测应对颗粒物浓度、烟气流速、烟温用参比方法至少获取 3 个测试断面的平均值，气态污染物（二氧化硫、氮氧化物）和含氧量至少获取 6 个数据（仪器法可选取 5 分钟平均值为 1 个数据，化学法以一个样品的采样时间段的平均值为 1 个数据）的平均值与同时段烟气 CEMS 的平均值进行准确度计算。

17.2.2.3 监测方法和步骤

CEMS 比对监测的方法和详细操作过程请参见 HJ 75—2017 附录 A 相关内容。

17.2.2.4 监测质量保证和质量控制

（1）比对监测参比仪器的质量管理

1）比对测试中使用的仪器必须经有关计量检定单位检定合格，且在检定期限内。

2）烟气温度测量仪表、空盒大气压力计、皮托管、真空压力表（压力计）、转子流量计、干式累积流量计、采样管加热温度等，至少半年自行校正一次。校正方法按《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采集方法》GB/T 16157—1996 中第 12 章执行。

3）参比方法测定湿法脱硫后的烟气，使用的烟气分析仪必须配有符合国家标准规定的烟气前处理装置（如加热采样枪和快速冷却装置等）。

4）参比方法使用的烟气分析仪必须每次现场使用标准气体检查准确度，并记录现场校验值，若仪器校正示值偏差不高于±5%，则为合格。

5）定电位电解法烟气测定仪和测氧仪的电化学传感器，当性能不满足测定要求时，必须及时更换传感器，送有关计量检定单位检定合格后方可使用。

（2）仪器校准标定的质量管理

CEMS 涉及多种分析仪表、传感器，仪器的分析方法也各有不同，因此合理选择并正确使用校准方法十分重要。控制校准过程，保证校准结果的质量。所有校准工作都是依据校准方法通过一个过程来完成的，这个过程的质量决定着校准结果的质量。

1）标准：校准用的测量仪器及计量标准的功能应满足预定用途的需要；必须经高一级法定计量技术机构的计量考核合格并取得合格证书且在有效期限内使用；这些标准的记录特性在考核的有效期内应被保持。

2）方法：采用的方法应适用于所进行的校准工作；并正确实施。校准气体的流量和压力应与正常测量时保持一致，校准气体的流路应与正常测量时保持一致。

3）人员：校准人员应具备与其承担的工作相适应的知识和技术。

4）环境：环境条件应达到相关规定要求，且其变化波动对校准质量不会产生不良影响，如温度、湿度、振动、灰尘、电磁干扰等。

（3）现场比对监测的质量保证措施

1）颗粒物 CEMS 比对，按照等速采样的方法，应使用微电脑自动跟踪采样仪，以保证等速采样精度。进行多点采样时每点采样时间不少于 3min，各点采样时间应相等或每个固定污染源测定时所采集样品累计的总采气量不少于 $1m^3$。

2）使用微电脑自动跟踪采样仪进行颗粒物及流速测定时，采样枪口和皮托管必须正对烟气流向，偏差不得超过 10°。当采集完毕或更换测试孔时，必须立即封闭采样管路，防止负压反抽样品。

3）当采集高浓度颗粒物，发现测压孔或采样嘴被尘粒沾堵时应及时清除。

4）滤筒处理和称重：在 105～110℃烘烤 1h，取出放入干燥器中冷却至室温，用检定分度值为 0.1mg 天平称重，两次重量之差不超过 0.5mg。当测试 400℃以上烟气时，应预先在 400℃烘烤 1h，取出放入干燥器中冷却至室温称至恒重。

5）采用碘量法测定二氧化硫时，吸收瓶用冰浴或冷水浴控制吸收液温度，以保证吸收效率。

6）用烟气分析仪对烟气二氧化硫、氮氧化物等测试，测定结束时应通入新鲜洁净的空气，使仪器回到零点后保持 10min，使检测器中的被测气体全部排出后，方可关机。下次测定时，必须用洁净的空气校准仪器零点。

7）在现有采样管的技术条件下，如果烟道截面高度大于 4m，则应在侧面开设采样孔；如宽度大于 4m，则应在两侧开设采样孔，并设置符合要求的多层采样平台。以两侧测得的颗粒物平均浓度代表这一截面的颗粒物平均浓度。

（4）原始记录和数据处理的质量保证

因为检测和校准的原始观测数据是得到最终检测和校准结果的依据，所以记录时要项目齐全、字迹清楚、准确明了。

1）为了保证校准结果的可靠性和严肃性，原始监测数据一律不得随意涂改。当记录中出现错误时，每一错误应划改，不可擦涂改，以免字迹模糊或消失，并将正确值填写在其旁边。对记录的所有改动应有改动人的签名。对电子采集、处理、存储的记录也应采取同等措施，以避免原始观测数据的丢失或改动。

2）每次检测和校准的原始记录应包含足够的信息以保证其能够再现。

3）应将原始记录、数据处理记录、校准记录保存至适当年限，其他相关记录工作如存取、存档等等都要遵照实验室的记录控制程序进行。

17.2.2.5 监测结果评价

（1）评价标准

按照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 要求，烟气温度、烟气流速、含氧量和污染物实测浓度（颗粒物、二氧化硫、氮氧化物）必

须满足表17-2的技术指标要求。

烟气CEMS比对监测考核指标要求 表17-2

检测项目		考核指标
颗粒物	准确度	当参比方法测定烟气中颗粒物，排放浓度： $>200mg/m^3$ 时，相对误差为±15%； $>100mg/m^3$～$\leqslant 200mg/m^3$ 时，相对误差为±20%； $>50mg/m^3$～$\leqslant 100mg/m^3$ 时，相对误差为±25%； $>20mg/m^3$～$\leqslant 50mg/m^3$ 时，相对误差为±30%； $>10mg/m^3$～$\leqslant 20mg/m^3$ 时，绝对误差为$\pm 6mg/m^3$； $\leqslant 10mg/m^3$ 时，绝对误差为±5mg/m
气态污染物	准确度	当参比方法测定烟气中二氧化硫、氮氧化物，排放浓度： $\geqslant 250\mu mol/mol(715mg/m^3)$时，相对准确度≤15%； $\geqslant 50\mu mol/mol(143mg/m^3)$～$<250\mu mol/mol(715mg/m^3)$时， 绝对误差$\leqslant 20\mu mol/mol(57mg/m^3)$； $\geqslant 20\mu mol/mol(57mg/m^3)$～$<50\mu mol/mol(143mg/m^3)$时，相对误差≤30%； $<20\mu mol/mol(57mg/m^3)$时，绝对误差$\leqslant 6\mu mol/mol(17mg/m^3)$
含氧量	相对准确度	≤15%
烟气流速	相对误差	流速>10m/s时，不超过±10%； 流速≤10m/s时，不超过±12%
烟气温度	绝对误差	不超过±3℃

（2）评价方法

CEMS比对监测的详细评价方法请参见HJ 75—2017附录A相关内容。

17.2.2.6 比对监测报告

比对监测报告应包括的信息如下：

（1）报告的标识、编号。

（2）检测日期和编制报告的日期。

（3）烟气CEMS标识、制造单位、型号和系列编号。

（4）安装烟气CEMS的企业名称和安装位置所在的相关污染源名称。

（5）参比方法引用的标准。

（6）所用可溯源到国家标准的标准气体。

（7）参比方法所用的主要设备、仪器等。

（8）检测结果和结论。

（9）测试单位。

（10）备注。

17.3 CEMS安全防护要求

17.3.1 CEMS安全防护技术要求

17.3.1.1 CEMS安全与防护功能要求

（1）电源安全与防护

电源标准：在我国工业控制电路中最常用的三相交流电压等级为380V/50Hz，只有在

特定行业环境下才用其他电压等级，如煤矿井下的电钻用127V、运输机用660V、采煤机用1140V等。

单相交流电压等级最常见的为220V/50Hz，机床、热工仪表和矿井照明等采用127V电压等级，其他电压等级如6V、12V、24V、36V和42V等一般用于安全场所的照明、信号灯以及作为控制电压。

国家规定电力系统标准频率为50Hz，对容量在3000MW以上的系统，频率允许偏差为50Hz±0.2Hz，电钟指示与标准时间偏差不大于30s；容量在3000MW以下的系统，频繁允许偏差为50Hz±0.5Hz，电钟指示与标准时间偏差不大于1min。

(2) 接地技术要求

接地的分类：一般分为保护性接地和功能性接地两种。

1) 保护性接地

① 防电击接地：为了防止电气设备绝缘损坏或产生漏电流时，使平时不带电的外露导电部分带电而导致电击，将设备的外露导电部分接地，称为防电击接地。

② 防雷接地：将雷电导入大地，防止雷电流使人身受到电击或财产受到破坏。

③ 防静电接地：将静电荷引入大地，防止由于静电积聚对人体和设备造成危害。

④ 防电蚀接地：地下埋设金属体作为牺牲阳极或阴极，防止电缆、金属管道等受到电蚀。

2) 功能性接地

① 工作接地：为了保证电力系统运行，防止系统振荡，保证继电保护的可靠性，在交直流电力系统的适当地方进行接地，交流一般为中性点，直流一般为中点。

② 逻辑接地：为了确保稳定的参考电位，将电子设备中的适当金属件作为“逻辑地”，一般采用金属底板作逻辑地。

③ 屏蔽接地：将电气干扰源引入大地，抑制外来电磁干扰对电子设备的影响，也可减少电子设备产生的干扰影响其他电子设备。

④ 信号接地：为保证信号具有稳定的基准电位而设置的接地。

3) 接地的范围

① 直流系统

直流两线制配电系统应予接地，但以下情况可不接地：备有接地检测器并在有限场地内只向工业设备供电的系统；线间电压等于或低于50V，或高于300V、采用对地绝缘的系统；由接地的交流系统供电的整流设备供电的直流系统；最大电流在0.03A及以下的直流防火信号线路。

直流三线制供电系统的中性线宜直接接地。

② 交流系统

低于50V的交流线路一般不接地，但具有下列任何一条者应予接地：由变压器供电，而变压器的电源系统对地电压超过150V；由变压器供电，而变压器的电源系统是不接地的；采取隔离变压器的，不应接地，但铁芯必须接地；安装在建筑物外的架空线路。

50～1000V的交流系统，符合以下条件时可作为例外不予接地：专用于向熔炼、精炼、加热或类似工业电炉供电的电气系统；专为工业调速传动系统供电的整流器的单独传动系统；由变压器供电的单独传动系统，变压器一次侧额定电压低于1000V的专用控制系统；其控制电源有供电连续性，控制系统中装有接地检测器，且保证只有专职人员才能监视和维修。

③ 接地装置及组成

接地装置组成：接地装置是接地极和接地线的总称，接地极是埋入土壤中或混凝土基础中做散流用的接地体（圆钢、角钢、扁钢、钢管等）。

接地装置设置：工程上取接地电极的长度为 2.5m；接地地极顶面埋深一般取 0.6～0.8m；接地极之间由于互电阻的存在，故多只接地极的总接地电阻值大于单支接地极的并联接地电阻值；为了减少接地极之间的互电阻，接地极之间的距离要大，一般设计为相距 5m。

接地线的截面选取：根据 GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》表 14.6.2.1-1 规定保护线 PE 的最小截面积（表 17-3）。

PE 线的最小截面（单位：mm^2） **表 17-3**

装置的相线截面 S	接地线及保护线最小截面
$S \leqslant 16$	S
$16 < S \leqslant 35$	16
$S > 35$	$S/2$

④ 接地电阻阻值

建筑物接地电阻的要求：依据《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 接地电阻不应大于 10Ω。

电源系统接地电阻的要求：依据《民用建筑电气设计标准》GB 51348—2019 当机房接地与防雷接地系统共用时，接地电阻要求小于 1Ω 时，依据《民用爆炸物品工程设计安全标准》GB 50089—2018，接地电阻不宜大于 10Ω。

石化接地电阻的要求：依据《石油库设计规范》GB 50074—2014 接地电阻不宜大于 10Ω。

计算机系统接地电阻的要求：依据《电子计算机场地通用规范》GB/T 2887—2011 接地电阻不应大于 4Ω。

（3）雷电安全与防护

1）雷电的危害

雷电产生的静电感应、电磁感应、热效应、力学效应等，均会引起不同的危害。

雷电是由天空中云层间的相互高速运动、剧烈摩擦，使高端云层和低端云层带上相反电荷。此时低端云层在其下面的大地上也感应出大量的异种电荷形成一个极大的电容，当其场强达到一定强度时，就会产生对地放电，这就是雷电现象。

根据不同的破坏机理，雷这种特殊的自然放电现象表现为两种形式：直击雷和感应雷。

“直击雷”是指带电云层与大地上某一点之间发生迅猛的放电现象，其破坏机理主要是机械破坏作用。或者由于直击雷放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物产生电磁感应发生高电压以致发生闪击的现象，叫作“二次雷”或称“感应雷”其破坏机理主要是电子设备的过压击穿，体现在计算机网络上接口网卡和电源部分的损坏，严重者可烧坏主板，造成整机报废。

“感应雷”没有直击雷那么猛烈，但它发生的概率远比直击雷高得多。随着大规模集成电路的应用，防雷已由以前的防直击雷为主发展到今天的综合防雷。

2）雷电防护原理

雷电及其他强干扰对电力、网络、监控和电子信息设备系统的致损及由此引起的后果是严重的，雷电防护将成为必需。

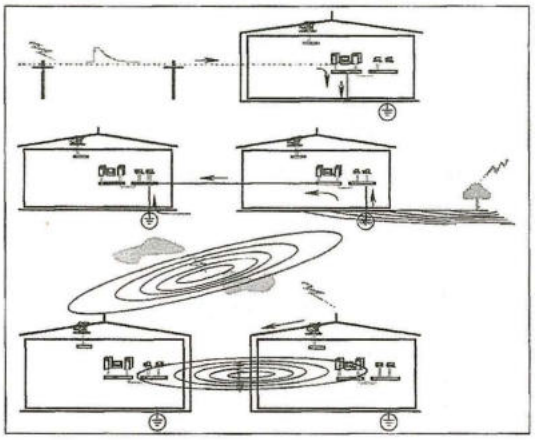


图 17-1 雷的感应和传导示意图

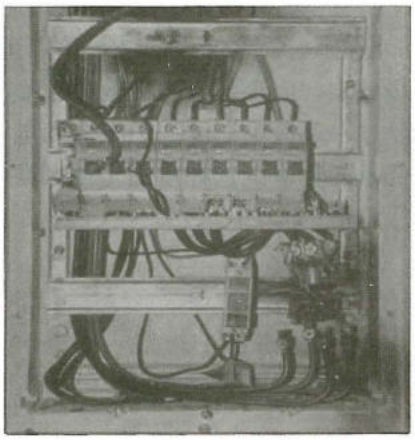


图 17-2 配电柜及设备被感应雷击损坏图

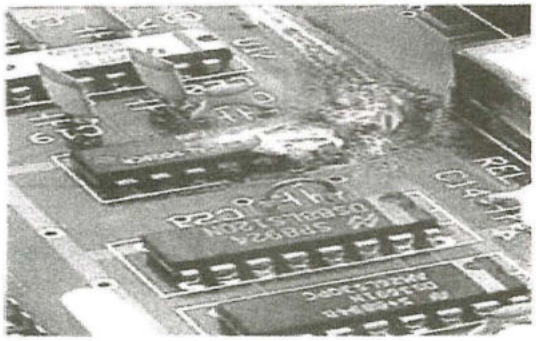


图 17-3 雷电电磁脉冲对设备的损坏图

直击雷的防护一般采用楼顶安装避雷带、避雷针等，配合引下线、地网以保护建（构）筑物及建（构）筑物内人员的安全。感应雷的防护主要采用线路上安装雷击过电压保护器，即防雷器（SPD），配以线路屏蔽接地、等电位接地处理等综合运用，以保护设备的安全。

对于电力及电子信息设备而言，危害主要来自于由雷电引起的雷电电磁脉冲的耦合能量，通过以下三个通道所产生的瞬态浪涌。金属管线通道：如电源线、天馈线、信号线、航空障碍灯引线、自来水管等产生的浪涌。地线通道：地电位反击。空间通道：电磁小组的辐射能量。

其中金属管线通道的浪涌和地线通道的地电位反击是电子信息系统致损的主要原因，它的最常见的致损形式是在电力线上引起的雷损，所以需作为防护的重点。由于雷电无孔不入地侵袭电子信息系统，雷电防护将是个系统工程。因此只有防直击雷或只有防感应雷都是不全面的，而应进行综合防雷。

3）雷电防护的核心内容

雷电防护的中心内容是泄放和均衡。雷电防护措施有加装跨接线、加装均压线、强化接地、埋设消弧线、装设避雷针等。

雷电防护的中心内容是泄放和均衡。

① 泄放

泄放是将雷电与雷电电磁脉冲的能量通过大地泄放，并且应符合层次性原则，即尽可能多、尽可能近地将多余能量在引入通信系统之前泄放入地；层次性就是按照所设立的防雷保护区分层次对雷电能量进行削弱。

防雷保护区又称电磁兼容分区，是按人、物和信息系统对雷电及雷电电磁脉冲的感受强度不同把环境分成几个区域：

LPZOA 区，本区内的各物体都可能遭到直接雷击，因此各物体都可能导走全部雷电流，本区内电磁场没有衰减。

LPZOB区，本区内的各物体不可能遭到直接雷击，但本区电磁场没有衰减。

LPZ1区，本区内的各物体不可能遭到直接雷击，流往各导体的电流比LPZOB区进一步减少，电磁场衰减和效果取决于整体的屏蔽措施。后续的防雷区（LPZ2区等）如果需要进一步减小所导引的电流和电磁场，就应引入后续防雷区，应按照需要保护的系统所要求的环境区选择后续防雷区的要求条件。保护区序号越高，预期的干扰能量和干扰电压越低。

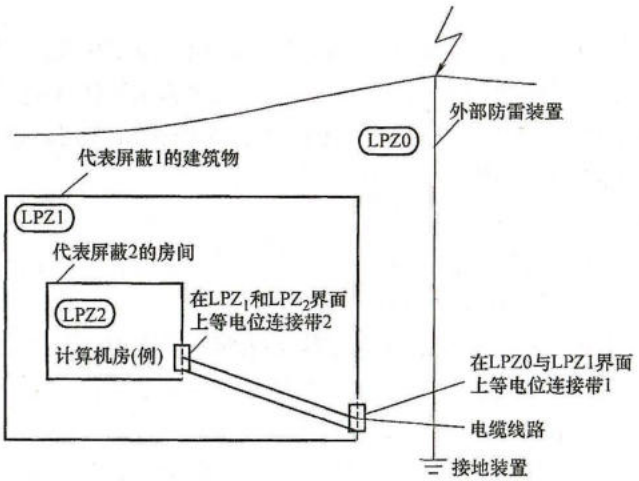


图 17-4 防雷保护区与雷电的关系图

② 均衡

均衡是保持系统各部分不产生足以致损的电位差，即系统所在环境及系统本身所有金属导电体的电位在瞬态现象时保持基本相等，其实质是基于均压等电位连接的。

雷电防护系统由三部分组成，各部分都有其重要作用，不存在替代性，详细情况如图17-5所示。

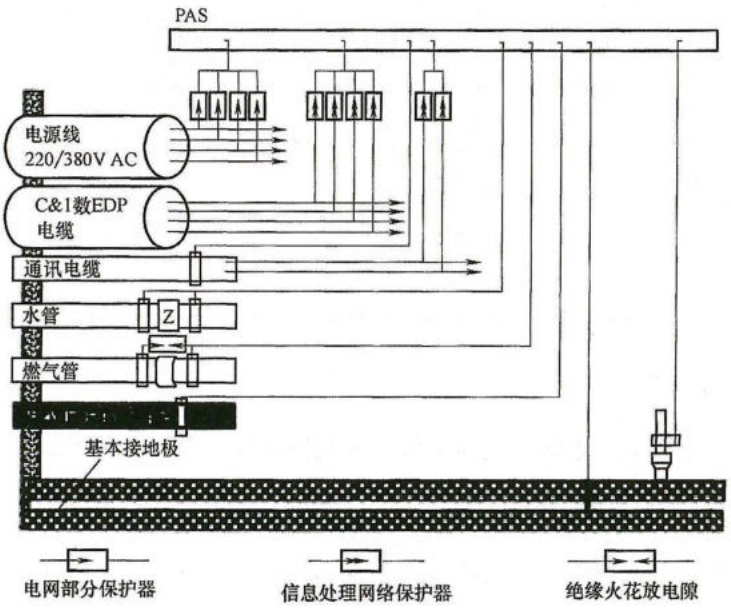


图 17-5 防雷防护系统

外部防护：由接闪器、引下线、接地体组成，可将绝大部分雷电能量直接导入地下泄放。

过渡防护：由合理的屏蔽、接地、布线组成，可减少或阻塞通过各入侵通道引入的感应。

内部防护：由均压等电位连接过电压保护组成，可均衡系统电位，限制过电压幅值。

（4）电缆的安全与防护

1）电缆的构造

电缆按其构造及作用不同可分为电力电缆、控制电缆、电话电缆、射频同轴电缆、移动式软电缆等。电缆的基本结构主要由三部分组成：导电线芯用于传输电能；绝缘层保证电能沿线芯传输，在电气上使线芯与外界隔离；保护层起保护密封作用，使绝缘层不被潮气浸入，不受外界损伤，保持绝缘性能。

2）电缆的分类

按电压等级分类：电力电缆一般是按一定电压等级制造的，分为低电压电力电缆、中电压电力电缆（1～10kV）、高电压电力电缆。

按电线芯截面积分类：电力电缆的导电芯线是按照一定等级的标称截面积制造的，便于制造和设计与施工选型。多芯电缆都是以其中截面最大的相线为准。

按导线芯数分类：电力电缆导电芯线有1～5芯5种。

按绝缘材料分类：油浸纸绝缘电力电缆，塑料绝缘电缆，橡皮绝缘电缆，阻燃聚氯乙烯绝缘电缆。绝缘导线及悬挂绝缘导线的钢绞线的设计安全系数均不应小于3。

3）电缆型号

电缆的型号内容包含其用途类别、绝缘材料、导体材料、铠装保护层等。在电缆型号后面还注有芯线根数、截面、工作电压和长度。电览型号分类见表17-4。

电缆型号的含义 **表17-4**

<table>
<tr><th>类别</th><th>导体</th><th>绝缘</th><th>内护套</th><th>特征</th></tr>
<tr><td rowspan="2">电力电缆
（省略不表示）</td><td rowspan="2">T：铜线
（可省）</td><td>Z：纸绝缘</td><td>Q：铅包</td><td>D：不滴油</td></tr>
<tr><td>X：天然橡皮</td><td>L：铝包</td><td rowspan="2">P：分相金属保护套</td></tr>
<tr><td>K：控制电缆</td><td>L：铝线</td><td>(X)D丁基橡皮</td><td>H：橡套</td></tr>
<tr><td>P：信号电缆</td><td></td><td>(X)E乙丙橡皮</td><td rowspan="2">(H)P：非燃性橡套</td><td>P：屏蔽</td></tr>
<tr><td>B：绝缘电缆</td><td></td><td>V：聚氯乙烯</td><td></td></tr>
<tr><td>R：绝缘软缆</td><td></td><td>Y：聚乙烯</td><td rowspan="2">V：聚氯乙烯护套</td><td></td></tr>
<tr><td>Y：移动式软缆</td><td></td><td rowspan="2">YJ：交联聚乙烯</td><td></td></tr>
<tr><td>H：市内电话缆</td><td></td><td>Y：聚乙烯护套</td></tr>
</table>

4）电缆应用及选择

① 额定电压

额定电压取决于该电缆系统的相间电压、系统的类型、保护设备排除故障时间等。

② 导线的选择

选择导线规格时应考虑，国家电气规范的要求、负荷电流的热效应、相互加热效应、电磁感应产生的损耗、电介质损失、负荷电流有关的指标、应急过负荷指标、电压降的限制和故障电流指标。

③ 负荷电流指标

在载流量表中列出了负荷电流所需要的导线的最小规格。但是在工程中选择电缆往往偏于保守，这是考虑到负荷的增长、电压降和短路电流的发热等因素。

④ 应急过负荷指标

绝缘线和电缆的正常负荷极限值是以实践经验为基础的，代表着电缆的老化速度。此种老化速度预计能使电缆的有效寿命持续 20～30 年。正常的日负荷温度每升高 8℃，则平均故障率将增加一倍，且电缆的绝缘寿命缩短一半。

⑤ 电压降指标

如果供电线的截面不够大，在电路中会产生过大的电压降。电压降与线路长度成正比。

5）电缆的使用条件

大量电缆成组敷设时，由于相互间的加热作用，降低了电缆的载流量。规格大的电缆有时候需要考虑用两根或多根较小规格的并联电缆来代替。

对敷设在地下管道中的电缆，当使用负荷系数时，应考虑管组及其周围土壤的平均热损失的热容量。

户内对低压电缆来说，国家电气法规上的载流量表是以环境温度 30℃为基础。

户外对于安装在遮荫处的电缆，其最高环境温度一般取 40℃，而对于安装在阳光下的电缆，最高环境温度一般取 50℃。

在确定电缆的载流量时，电缆周围介质的热性能是重要的参数。埋设电缆或电缆管块的土壤种类，对电缆载流量有着重大的影响。

直埋敷设于冻土地区时，宜埋入冻土层以下，当无法深埋时可在土壤排水性好的干燥冻土层或回填上中埋设，也可采取其他措施。

6）屏蔽电缆

① 电力电缆的屏蔽定义

用导电或半导电层把电缆的电场封闭在包围着导线的绝缘层中。导电或半导电层紧紧地贴合在绝缘的内表面和外表面上。

② 绝缘的屏蔽有各种用途

把电场封闭在电缆内部，平衡绝缘内部的电压梯度，使表面放电减至最小，避免感应电势以更好地减少电击的危险。

对于运行电压在 1kV 以下的电缆，一般采用非屏蔽的结构，对 10kV 以上的电缆则需要将其屏蔽以符合国家电气法规的规定。

③ 控制电缆及其金属屏蔽

控制电缆应避免同时受绝缘损坏、机械性损伤、着火或电气干扰等影响不能正常工作。双重化保护的电流、电压以及直流电源和跳闸控制回路等需增强可靠性的系统，应采用各自独立的控制电缆。

下列情况的回路，相互间不宜合用同一根控制电缆：

a. 弱电信号、控制回路与强电信号、控制回路。

b. 低电平信号与高电平信号回路。

c. 交流断路器分相操作的各相弱电控制回路。

（5）压缩空气的安全与防护技术

1）压缩空气技术规格术语

露点：就是当湿空气在水蒸气分压力不变的情况下冷却至饱和的温度。

含尘量：要求工艺压缩空气中不含灰尘，确保系统清洁。

含油量：要求工艺压缩空气中不含油，确保系统清洁。

2）用气标准

工艺压缩空气用于管道吹扫，吹过滤器滤芯，气力输送，包装完好等。工艺压缩空气的压力必须满足工艺要求；要求干燥、需要经过除油除尘处理；露点不能过高（需低于当地最低气温），以免在使用过程中积水。工艺压缩空气规格见表17-5。

工艺压缩空气规格表 **表17-5**

序号	项目	单位	指标
1	温度	℃	常温
2	压力	MPa	0.6～0.8
3	露点(常压)	℃	−20
4	质量	—	无油无尘

3）现场用压缩空气设备防护

压缩空气吹扫：CEMS设备应用压缩空气用于相关设备的吹扫，如取样探头、取样管线、粉尘仪、流量计、激光分析仪等。

CEMS设备长时间使用后，烟气中的粉尘会堵塞滤芯等与烟气直接接触的设备，为了保证设备的正常使用，要使用压缩空气对相关设备进行定期吹扫。

压缩空气制冷：在CEMS应用中，有使用压缩空气进行制冷的应用，如涡流制冷器等。用于除去烟气中的水分。

4）压缩空气使用安全要求

① 压缩空气传输管路要使用符合要求的钢管。

② 压力容器、安全阀、压力表需要定期检验。

③ 压缩空气在使用时，首先要用压缩空气吹扫管道，防止管道内的杂物损坏CEMS设备上用的吹扫阀门。

（6）IP防护技术

1）IP防护等级

IP代码：外壳的防护等级标准描述了对电气设备外壳防护等级进行分类的系统。由欧洲电子技术标准化委员会提出，电气设备外壳防护等级被分成很多类，根据不同的号码，能够迅速方便地确定产品的防护等级。

IP防护等级定义-1 **表17-6**

第一特性	防护等级(代码中的第一数字)	
	简要描述	定　义
0	无防护	
1	防直径为50mm甚至更大的固体颗粒物	物体尖端或50mm直径的固体颗粒物不能完全穿透
2	防直径为12.5mm甚至更大的固体颗粒物	物体尖端或12.5mm直径的固体颗粒物不能完全穿透
3	防直径为2.5mm甚至更大的固体颗粒物	物体尖端或2.5mm直径的固体颗粒物完全不能穿透
4	防直径为1mm甚至更大的固体颗粒物	物体尖端或1mm直径的固体颗粒物完全不能穿透
5	灰尘防护	尘埃进入并不能完全防止，但不会达到妨碍仪器正常运转及降低安全性的程度
6	灰尘禁锢	尘埃无法进入
物体整个直径不能超过外壳的空隙		

IP防护等级定义-2 表17-7

第二特性	防护等级(代码中的第二数字)	
	简要描述	定义
0	无防护	
1	防垂直下坠的水滴	垂直下坠的水滴不会造成有害影响
2	当外壳翘起可达15°时防垂直下坠的水滴	
3	防水雾	在任何一垂直侧以任何不超过60°的角度喷雾不会造成有害影响
4	防泼水	对着外壳从任何方向泼水都不会造成有害影响
5	防喷水	对着外壳从任何方向喷水都不会造成有害影响
6	防强力喷水	对着外壳从任何方向强力喷水都不会造成有害影响
7	防短时浸泡	常温常压下,当外壳暂时浸泡在1m深的水里将不会造成有害影响
8	防持续浸泡	在厂家和用户都同意,但是条件比7严酷的条件下,持续浸泡在水里将不会造成有害影响

2）防护标准的应用和注意事项

工业应用中，必须考虑IP防护，对于封闭建筑的标准工业系统，采用IP54防护＝灰尘防护＋泼水防护。对于户外系统（汽车等）推荐IP65防护、防灰和防喷水。防护等级≤IP40仅为防触摸或仅当系统安装在机架（例如支架）上才有意义。在户外仓库的铲车系统上不应该用IP20防护。采用IP67的控制系统，一般是应用在潜艇上。

并非所有的系统提供了高等级的防护就不会出现问题，高防水通常需要完全密闭安装，通常这会引起散热问题，可能会发生由过热引起的系统错误，所以需要附加的散热装置。

（7）防爆的概念

1）防爆标准

爆炸性气体环境用防爆电气设备的通用要求的标准是：国际电工技术委员会《爆炸性气体环境用电气设备 第0部分：一般要求》IEC 60079-0/1998和欧洲电工标准化组《防爆电气一般要求》EN50014—1992；我国相应的通用要求标准是《爆炸性环境 第1部分：设备通用要求》GB 3836.1—2010。

中国国家标准《爆炸危险环境电力装置设计规范》GB 50058—2014，根据爆炸性气体混合物出现的频繁程度和持续时间，将爆炸性气体环境分为0区、1区和2区（与《爆炸性气体环境用电气设备 第0部分：一般要求》IEC 60079—0/2001标准等效）。

爆炸性气体的环境分类 表17-8

爆炸性物质	区域定义	中国标准	北美标准(NEC)
气体(CLASSⅠ)	在正常情况下,爆炸性气体混合物连续或长时间存在的场所	0区	Class1,Div.1
	在正常情况下爆炸性气体混合物有可能出现的场所	1区	
	在正常情况下爆炸性气体混合物不可能出现,仅仅在不正常情况下,偶尔或短时间出现的场所	2区	Class1,Div.2
粉尘或纤维(CLASSⅡ/Ⅲ)	在正常情况下,爆炸性粉尘或可燃纤维与空气的混合物可能连续,短时间频繁地出现或长时间存在的场所	10区	Div.1
	在正常情况下,爆炸性粉尘或可燃纤维与空气的混合物不能出现,仅仅在不正常情况下,偶尔或短时间出现的场所	11区	Div.2

IEC 爆炸危险场所划分方法（IEC 60079-10/2015）与中国相同。

NEC（《美国电气规程》NEC550-4）爆炸危险场所划分方法：

1 级 1 区（Class1，Division1）：相当于 IEC 规范的 0 区和 1 区。

1 级 2 区（Class1，Division2）。

2 级 1 区（ClassⅡ，Division1）：存在可燃性粉尘的场合。

2 级 2 区（ClassⅡ，Division2）。

3 级 1 区（ClassⅢ，Division1）：存在可燃性纤维的场合。

2）防爆物质分类

根据可能引爆的最小火花能量，我国和欧洲及世界上大部分国家和地区将爆炸性气体分为四个危险等级（Ⅰ、ⅡA、ⅡB、ⅡC），如表 17-9 所示。爆炸性粉尘、纤维类分为两级（ⅢA、ⅢB），如表 17-10 所示。爆炸性气体温度组别划分如表 17-11 所示，常见燃气在空气中的点火温度如表 17-12 所示。

爆炸性气体分类 **表 17-9**

气体分类	代表性气体	最小引爆火花能量(mJ)
Ⅰ	甲烷(矿井下)	0.280
ⅡA	乙烷、丙烷、对二甲苯、醋酸甲酯、醋酸、醋酸(异)丁酯、CO、CH_3OH	0.180
ⅡB	乙烯、煤气	0.060
ⅡC	氢气、乙炔	0.019

爆炸性粉尘、纤维类分类 **表 17-10**

粉尘分类	$T>270$	$270>T>200$	$200>T>140$
ⅢA（非导电非爆炸性粉尘）	木棉纤维、PTA 粉末、亚麻、玉米粉等	木质纤维	
ⅢB（导电和爆炸性粉尘）	炭黑	煤粉、TNT	硝化棉

爆炸性气体温度组别划分 **表 17-11**

温度组别	安全的物体表面温度	常见爆炸性气体
T1	≤450℃	氢气、丙烯腈等 46 种
T2	≤300℃	乙炔、乙烯等 47 种
T3	≤200℃	汽油、丁烯醛等 36 种
T4	≤135℃	乙醛、四氟乙烯等 6 种
T5	≤100℃	二硫化碳
T6	≤85℃	硝酸乙酯和亚硝酸乙酯

常见燃气在空气中的点火温度（1 大气压，理论空气量） **表 17-12**

燃气名称	点火温度(℃)	燃气名称	点火温度(℃)
甲烷	700	乙烯	540
乙烷	550	氢	550
丙烷	540	一氧化碳	570
丁烷	530		

3）防爆方法对危险场所的适用性

本安型防爆等级说明：

① ia 等级（ia 是唯一适用于 Zone0 区域的防爆型式）

在正常工作、一个故障和两个故障时均不能点燃爆炸性气体混合物的电气设备。

正常工作时，安全系数为 2.0；一个故障时，安全系数为 1.5；两个故障时，安全系数为 1.0。

注：有火花的触点须加隔爆外壳、气密外壳或加倍提高安全系数。

② ib 等级

在正常工作、一个故障时不能点燃爆炸性气体混合物的电气设备。

正常工作时，安全系数为 2.0；一个故障时，安全系数为 1.5；正常工作时，有火花的触点须加隔爆外壳或气密外壳保护，并且有故障自显示的措施，一个故障时安全系数为 1.0。防爆型式分类见表 17-13。

防爆型式分类 **表 17-13**

防爆型式	代号	国家标准	防爆措施	适用区域
隔爆型	d	《爆炸性环境 第 2 部分：由隔爆外壳“d”保护的设备》GB 3836.2	隔离存在的点火源	Zone1，Zone2
增安型	e	《爆炸性环境 第 3 部分：由增安型“e”保护的设备》GB 3836.3	设法防止产生点火源	Zone1，Zone2
本安型	ia	《爆炸性环境 第 4 部分：由本质安全型“i”保护的设备》GB 3836.4	限制点火源的能量	Zone0，Zone1，Zone2
	ib	《爆炸性环境 第 4 部分：由本质安全型“i”保护的设备》GB 3836.4	限制点火源的能量	Zone1，Zone2
正压型	p	《爆炸性环境 第 5 部分：由正压外壳 p 保护的设备》GB3836.5	危险物质与点火源隔开	Zone1，Zone2
充油型	o	《爆炸性环境 第 6 部分：由液浸型 o 保护的设备》GB3836.6	危险物质与点火源隔开	Zone1，Zone2
充砂型	q	《爆炸性环境 第 7 部分：由充砂型 q 保护的设备》GB 3836.7	危险物质与点火源隔开	Zone1，Zone2
无火花型	n	《爆炸性环境 第 8 部分：由 n 型保护的设备》GB 3836.8	设法防止产生点火源	Zone2
浇封型	m	《爆炸性环境 第 9 部分：由浇封型 m 保护的设备》GB 3836.9	设法防止产生点火源	Zone1，Zone2
气密型	h	《爆炸性环境用防爆电气设备气密型电气设备“h”》GB3836.10	设法防止产生点火源	Zone1，Zone2

4）防爆标志格式说明（表 17-4）

防爆标志说明 **表 17-14**

Ex	(ia)	ⅡC	T4
防爆标记	防爆等级	气体组别	温度组别

5）防爆设备选用要求

防爆分析设备选用，根据 CEMS 所监测的监测因子选择相关的分析设备。

根据防爆类型选择防爆机柜，如隔爆型、本安型或者是正压型等。

（8）工作环境的安全防护技术

1）噪声粉尘的危害与防护

① 噪声、粉尘的危害

噪声的危害：工业噪声由于产生的动力和方式不同，可分为机械性噪声、空气动力性噪声，我国《工业企业噪声卫生标准》规定：工业企业的生产车间和作业场所的工作地点噪声容许值为 85dB（A）。长期接触噪声会对人的听力、神经系统等产生较大危害。

粉尘的危害：接触或吸入粉尘，首先对皮肤、角膜、黏膜等产生局部的刺激作用，长期吸入较高浓度粉尘可引起肺部病变。

② 噪声、粉尘的防护措施

噪声的防护：岗位噪声超过国家卫生标准的职工，多采用个人佩戴的耳塞、耳罩或头盔来保护听力。耳塞、耳罩由软塑料、软橡胶或纤维棉制成。佩戴合适型号的耳塞、耳罩、隔声效果可达 20～40dB（A）。

粉尘的防护：依据粉尘对人体的危害方式和伤害途径，进行针对性的个人防护。依据不同性质的粉尘，配载不同类型的防尘口罩、呼吸器、（对某些有毒粉尘还应佩戴防毒面具）；二是阻隔粉尘对皮肤的接触。正确穿戴工作服（有的还需要穿连裤、连帽的工作服）、头盔（人体头部是汗腺、皮脂肪和毛囊较集中的部位）、眼镜等；三是禁止在粉尘作业现场进食、抽烟、饮水等。

2）现场平台的安全预防与防护

① 平台建设要求

a. 平台建设要求参见《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 标准的相关规范要求。

b. 平台的宽度大于 1.1m，梯子的宽度应大于 600mm，作防锈处理，栏杆的高度大于 1.2m，均要作防锈处理。

c. 平台的长度要能满足设备操作及维护的空间。

d. 平台的承载能力，机箱及其他设备重约 100kg，并考虑平台上同时 4 名工作人员作业，因此总承重不小于 500kg，还要考虑当地最大风力及降雪厚度。

e. 平台的高度位置，平台应低于烟气采集装置、烟尘测试仪、净化风系统、烟气参数测量装置等，便于工作人员操作，具体尺寸要求由现场调查人员来定。扶梯可考虑使用现有扶梯、房顶等现有设施，以减少施工费用。

f. 平台设计时要考虑机箱等设备的吊装。

g. 平台的宽度大于 1100mm，护栏的高度大于 1200mm，承重 500kg，平台与采样孔之间的距离应大于 800mm，且平台低于采样孔。

② 平台作业注意事项

a. 担任高空安装维修人员必须身体健康。

b. 高空安装应一律使用工具袋，较大的工具应用绳拴在牢固的构件上，不准随便乱放，以防止从高空坠落发生事故。

c. 在进行高处工作时，除有关人员外，不准他人在工作地点的下面通行或逗留，工作地点下面应有围栏，防止落物伤人。

d. 不准将工具及材料上下投掷，要用绳系牢后往下或往上吊送，以免打伤下方工作人员或击毁脚手架。

e. 上下层同时进行工作时，中间必须搭设严密牢固的防护隔板、工作人员必须戴安全帽。

f. 在 6 级及以上的大风以及暴雨、打雷、大雾等恶劣天气，应停止露天高空安装业。

3）标气使用的安全与防护

根据标准气类型选择合适的减压阀，检查连接部位是否漏气，可涂上肥皂液进行检查，调整至确实不漏气后才进行操作。钢瓶应存放在阴凉、干燥、远离热源处，钢瓶不能卧放。

使用前检查减压阀是否完好，将减压阀两个开关关住，拧紧螺丝。标气瓶不宜放在仪表房内，以防标气泄漏造成工作人员中毒事件发生。标气瓶沿墙壁摆放，用卡箍或软链拴住，

以免倒地摔坏减压阀，或采用其他更安全牢固的办法。

4）设备检修的安全与防护

严格遵守企业的设备检修安全管理制度。检修设备时做到停电、验电、装设接地线、悬挂标示牌和装设栅栏。

① 监测平台设备的检修

每月更换烟尘吹扫风机空气过滤器和老化的气管，风力不足更换风机。

每月清洗烟尘仪的镜头、校准光路、光源衰竭要更换调节放大倍数。

每月取出流速探头，清洁气管和探头，更换腐蚀严重的部分。

每3～6个月更换采样探头的滤芯，清理积灰，更换腐蚀严重的部分。

② 采样预处理的检修

每3～6个月清洗或更换两级细过滤器的滤芯。

每3～6个月清洗冷凝器的冷凝管和接头

每6～12个月清洗排水泵和采样泵，更换弹片、接头或气管。

每6～12个月清洗清洗电磁阀，更换老化膜片和接头。

每6～12个月用酒精和压缩空气清洗采样管路。

每6～12个月检修冷凝器、制冷片、电源、控制板和风扇等。

③ 仪器仪表的检修

每3～6个月用干燥的压缩气清洁分析仪的气室和箱体。

每6～12个月检查分析仪的光源、镜片和探测器、老化的要更换、调节放大的倍数。

每3～6个月用酒精和干燥的压缩气清洁烟尘/流速仪的气路和箱体。

每6～12个月检查流速仪的各种传感器、调节电路的放大倍数。

每6～12个月检查系统防雨、防雷和防干扰等各项防护措施。

5）环境气体的安全与防护

环境危险性气体危害：工业环境气体有可能具有燃烧性、毒害性、窒息性、腐蚀性、爆炸性。

保护措施：在有上述风险的场合工作必须采取安全防护措施，配备安全防护用品。并且在工作要严格遵守安全操作规程。

17.3.1.2 CEMS安全与防护功能设计

（1）电源安全与防护功能设计

电气设备选型：根据电源标准选择相应电气设备的电压等级。

开关箱接地：金属外壳的开关箱，外壳必须接地可靠。

配电柜接地：《电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范》GB 50171—2012 2.0.1规定配电柜的基础型钢应有明显的可靠接地。

柜（箱）内的PE线编号：导线编号的目的是为了维修时便于查线。配电柜内的相线或零线必须编号，在导线敷设完毕未接线前，在柜（箱）处应根据回路号对PE线进行编号。

（2）雷电安全与防护功能设计

1）方案的组成

① 方案组成包括三大部分

第一部分：防雷接地地网的制作、测量、处理，地网是避雷针、避雷罩、避雷器（SPD）等设施有效发挥作用的保障。

第二部分：避雷器设备安装设计，包括电源避雷器和避雷针两大类。

第三部分：等电位建设，等电位建设主要用于防静电，均衡室内各个线路的电压，设备金属外壳接地等。

② 方案设计目标

保障烟尘监测站输配电线路系统、通信线路系统及信息网络系统免遭雷电浪涌或过电压损坏，保障监测站的正常运行和使用，按规范对相应设备设施进行防雷处理。从而保障监测站的正常办公工作和正常生产有序进行。

③ 方案设计范围

烟尘监测站的输配电线路系统以及监测站楼的信号系统防护。

2）方案的设计

① 方案的选型

选择电源防雷器、信号防雷器作为防雷的设备。

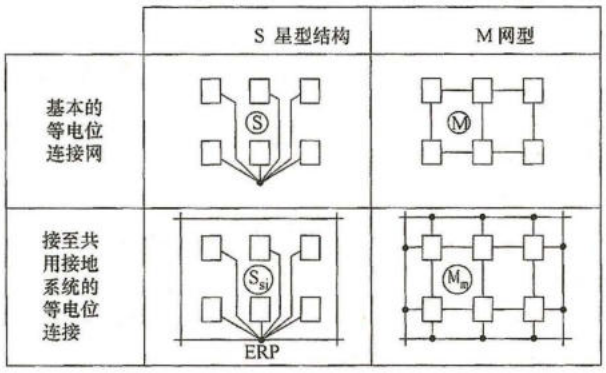
② 方案的具体内容

a. 接地地网的制作、处理

应预先对监测站点制作一个接地地网，地网是避雷针、避雷器（SPD）等设施有效发挥作用的保障。要求环绕监测站房四周进行地网制作，要求接地阻值不大于 4Ω。

等电位连接、接地线的安装：

按照《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 和《交流电气装置的过电压保护和缘绝配合设计规范》GB/T 50064—2014 等国家标准及电力行业标准规定，一个供电系统的多部变压器的交流工作接地、安全保护接地、防雷接地等接地应共用一个接地地网系统。等电位连接网络的基本结构形式有 S 形星形结构和 M 形网形结构，见图 17-6。防雷设备（避雷器 SPD）与汇流排相连的接地地线按相关标准可采用 10mm^2 以上的多股铜缆，相线连接线应采用不小于 6mm^2 的多股铜线。



——：建筑物的共用接地系统
——：等电位连接网
□：设备的分项
●：等电位连接网与共用接地系统的连接
ERP：接地基准点

图 17-6 等电位连接网络的基本结构形式

b. 感应雷防护

感应雷防护系统是为保护建筑物内部的设备以及人员的安全而设置，动力供电应采用不少于 3 级的分流限压措施，电源部分防雷设备的大致配置如图 17-7 所示。

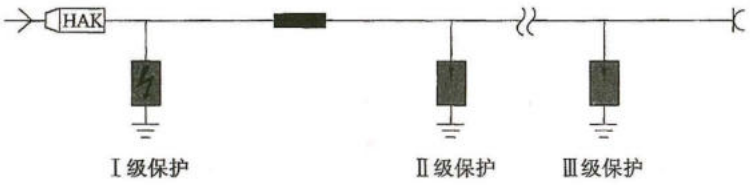


图 17-7 电源设备防雷示意图

c. 信号系统防护

在监测站房机柜内的每条模拟传输信号线路上，分别设计安装一套控制信号避雷器，对整个监测站房内的信号传输系统进行防雷防护。

d. 等电位建设

由于雷电泻放存在趋肤效应，建筑外层钢筋泻放的雷电流通常为建筑内部钢筋的数倍。

(3) 电缆的安全与防护功能设计

电线电缆选用的一般原则：

在选用电线电缆时，一般要注意电线电缆型号、规格（导体截面）的选择。确定电线电缆的使用规格（导体截面）时，一般应考虑发热、电压损失、经济电流密度、机械强度等选择条件。

选用电线电缆时，要考虑用途、敷设条件及安全性，例如：根据用途的不同，可选用电力电缆、架空绝缘电缆、控制电缆等。

根据敷设条件的不同，可选用一般塑料绝缘电缆、钢带铠装电缆、钢丝铠装电缆、防腐电缆等。根据安全性要求，可选用不延燃电缆、阻燃电缆、无卤阻燃电缆、耐火电缆等。不同规格电览载流量对照表见表 17-15～表 17-17。

BV 电线载流量对照表 **表 17-15**

铜电线型号	单载流量(A)	线槽载流量(A)	灯吼载流量(A)	电压降(mV/m)	修正系数
BV(30℃)					
1.0 mm^2	10	6	9		0.7
1.5mm^2	15	8	10	30.86	0.7
2.5mm^2	20	12	18	18.9	0.7
4mm^2	25	20	23	11.76	0.7
6mm^2	40	25	30	7.86	0.7
10mm^2	50	30	41	4.67	0.7
16mm^2	70	40	53	2.95	0.7
25mm^2	90	60	70	1.87	0.7
35mm^2	110	70	87	1.35	0.7
50mm^2	175	90	109	1.01	0.7
70mm^2	220	120	130	0.71	0.7
95mm^2	280	150	170	0.52	0.7
120mm^2	300	180	210	0.43	0.7
150mm^2	380	220	234	0.36	0.7
185mm^2	450	250	261	0.3	0.7

电缆载流量对照表 1　　表 17-16

序号	铜电线型号	单心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	品字型电压降 mv/M	紧挨一字型电压降 mv/M	间距一字型电压降 mv/M	两心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	三心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	四心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M
					0.95	0.85	0.7									
		VV	YJV					VV	YJV		VV	YJV		VV	YJV	
1	1.5mm²	20	25	30.86	26.73	26.73	26.73	16	16		13	18	30.86	13	13	30.86
2	2.5mm²	28	35	18.9	18.9	18.9	18.9	23	35	18.9	18	22	18.9	18	30	18.9
3	4mm²	38	50	11.76	11.76	11.76	11.76	34	38	11.76	23	34	11.76	28	40	11.76
4	6mm²	48	60	7.86	7.86	7.86	7.86	40	55	7.86	32	40	7.86	35	55	7.86
5	10mm²	65	85	4.67	4.04	4.04	4.05	55	75	4.67	45	55	4.67	48	80	4.67
6	16mm²	90	110	2.95	2.55	2.56	2.55	70	108	2.9	60	75	2.6	65	65	2.6
7	25mm²	115	150	1.87	1.62	1.62	1.63	100	140	1.9	80	100	1.6	86	105	1.6
8	35mm²	145	180	1.35	1.17	1.17	1.19	125	175	1.3	105	130	1.2	108	130	1.2
9	50mm²	170	230	1.01	0.87	0.88	0.9	145	210	1	130	160	0.87	138	165	0.87
10	70mm²	220	285	0.71	0.61	0.62	0.65	190	265	0.7	165	210	0.61	175	210	0.61
11	95mm²	260	350	0.52	0.45	0.45	0.5	230	330	0.52	200	260	0.45	220	260	0.45
12	120mm²	300	410	0.43	0.37	0.38	0.42	270	410	0.42	235	300	0.36	255	300	0.36
13	150mm²	350	480	0.36	0.32	0.33	0.37	310	470	0.35	275	350	0.3	340	360	0.3
14	185mm²	410	540	0.3	0.26	0.28	0.33	360	570	0.29	320	410	0.25	400	415	0.25
15	240mm²	480	640	0.25	0.22	0.24	0.29	430	650	0.24	390	485	0.21	470	495	0.21
16	300mm²	560	740	0.22	0.2	0.21	0.28	500	700	0.21	450	560	0.19	500	580	0.19
17	400mm²	650	880	0.2	0.17	0.2	0.26	600	820	0.19						
18	500mm²	750	1000	0.19	0.16	0.18	0.25									
19	630mm²	880	1100	0.18	0.15	0.17	0.25									
20	800mm²	1100	1300	0.17	0.15	0.17	0.24									
21	1000mm²	1300	1400	0.16	0.14	0.16	0.24									

电缆载流量对照表 2　　表 17-17

序号	铜电线型号	单心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	品字型电压降 mv/M	紧挨一字型电压降 mv/M	间距一字型电压降 mv/M	两心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	三心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M	四心载流量(25℃)(A)		电压降 mv/M
					0.95	0.85	0.7									
		VV22	YJV22					VV22	YJV22		VV22	YJV22		VV22	YJV22	
1	1.5mm²	20	25	30.86	26.73	26.73	26.73	16	16		13	18	30.86	13	13	30.86
2	2.5mm²	28	35	18.9	18.9	18.9	18.9	23	35	18.9	18	22	18.9	18	30	18.9
3	4mm²	38	50	11.76	11.76	11.76	11.76	29	45	11.76	24	32	11.76	25	32	11.76
4	6mm²	48	60	7.86	7.86	7.86	7.86	38	58	7.86	32	41	7.86	33	42	7.86
5	10mm²	65	85	4.67	4.04	4.04	4.05	53	82	4.67	45	55	4.67	47	56	4.67
6	16mm²	88	110	2.95	2.55	2.56	2.55	72	111	2.9	61	75	2.6	65	80	2.6
7	25mm²	113	157	1.87	1.62	1.62	1.63	97	145	1.9	85	105	1.6	86	108	1.6
8	35mm²	142	192	1.35	1.17	1.17	1.19	120	180	1.3	105	130	1.2	108	130	1.2
9	50mm²	171	232	1.01	0.87	0.88	0.9	140	220	1	124	155	0.87	137	165	0.87
10	70mm²	218	294	0.71	0.61	0.62	0.65	180	285	0.7	160	205	0.61	176	220	0.61
11	95mm²	265	355	0.52	0.45	0.45	0.5	250	350	0.52	201	248	0.45	217	265	0.45
12	120mm²	305	410	0.43	0.37	0.38	0.42	270	425	0.42	235	292	0.36	253	310	0.36
13	150mm²	355	478	0.36	0.32	0.33	0.37	310	485	0.35	275	343	0.3	290	360	0.3
14	185mm²	410	550	0.3	0.26	0.28	0.33	360	580	0.29	323	400	0.25	333	415	0.25
15	240mm²	490	660	0.25	0.22	0.24	0.29	430	650	0.24	381	480	0.21	400	495	0.21
16	300mm²	560	750	0.22	0.2	0.21	0.28	500	700	0.21	440	540	0.19	467	580	0.19
17	400mm²	650	880	0.2	0.17	0.2	0.26	600	820	0.19						
18	500mm²	750	1000	0.19	0.16	0.18	0.25									
19	630mm²	880	1100	0.18	0.15	0.17	0.25									
20	800mm²	1100	1300	0.17	0.15	0.17	0.24									
21	1000mm²	1300	1400	0.16	0.14	0.16	0.24									

（4）压缩空气的安全与防护功能设计

压缩空气在进入CEMS设备前要安装过滤减压阀，各用气设备前要加装截止阀。设备在维护维修时要关断截止阀，并且要将管道内存留压缩空气放空。

（5）CEMS设备外壳的安全与防护功能设计

安装到工业现场的设备防护等级要达到IP65等级，从而确保防尘防水。如果现场环境有腐蚀性气体，则现场设备外壳要做防腐处理。

一般仪器要求的环境温度为5～45℃，对于严寒地区要考虑给设备增加伴热保温系统，空调在－20℃已经不能工作，可以考虑用电加热器或者是暖气作为保温系统使用。对于温度过高的地区，要考虑增加空调等设备使CEMS设备能够在适合的温度条件下运行。

17.3.2 CEMS分析机柜设计与安装

17.3.2.1 CEMS分析机柜类型

常见的CEMS机柜有：前开门摇架式机柜、前后开门安装式机柜、侧面安装式机柜、前开门整体安装式机柜，如图17-8～图17-11所示。



图17-8 前开门摇架式CEMS机柜示意图



图17-9 前后开门安装式CEMS机柜示意图

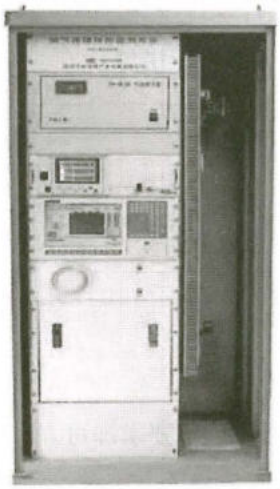


图17-10 侧面安装式CEMS机柜示意图

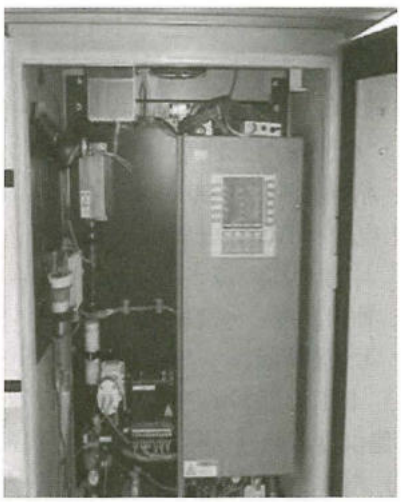


图17-11 前开门整体安装式机柜示意图

17.3.2.2 CEMS分析机柜设计

(1) 分析机柜材质

碳钢：如果分析柜采用碳钢材质，表面需要进行喷塑处理，防止机柜腐蚀生锈。

不锈钢：如果分析柜直接放在户外，或者是放置在腐蚀性较强的环境中，应选用不锈钢材质。

(2) 分析柜尺寸

考虑到分析仪表的长度（深度）600～800mm，留足安装线缆的空间，一般800mm足够安装调试。

分析仪表的宽度为500mm左右，除去分析柜侧板宽度，600～800mm能满足安装于调试要求，也可根据客户要求自行定制。

高度小于等于2200mm，仪器间室内净高一般小于2700mm，取样管线能够从取样探头处以≤5°倾斜向下至分析柜顶部，所以分析柜高度不适宜过高。

(3) 分析柜安装

分析仪的固定：分析柜在安装时要与地面固定，可以采用地脚螺栓固定或者是与预埋件焊接固定。对于分析柜附近有振动源、过热源、电磁干扰源的位置，要采取防震、隔热和抗电磁干扰措施。

分析柜的有效接地：分析柜的排气管要引到室外，防止室内二氧化硫等有害气体含量过高对人体造成损害。分析柜内的排水具有腐蚀性，所以排水管要引到储液罐等容器内，由人工定期倾倒，不能直接排放到室内或者是室外。

CEMS虽然安装设备不多，占用面积不大，但是却集成了许多相关的公用工程技术，包括土建、电气设备安装、现场管线电缆敷设、机械加工等。这些技术相对比较成熟且都有详细的规范要求，因此具体的公用工程技术要求可参考相关的专业技术规定。

17.3.3 CEMS仪器间技术要求

17.3.3.1 CEMS仪器间的技术要求

(1) 适用范围

1) 室内环境温度：5～45℃。

2) 环境湿度：相对湿度不大于95%。

3) 海拔高度：不超过2000m。

4) 分析室内温度根据内装分析仪表器的要求，采取暖气或空调措施。

5) 分析室引风管入口处应处于非危险区。

(2) 安装使用条件

1) 环境温度：－20～40℃。

2) 电源：AC220±10%50Hz。

3) 大气压力：50～106kPa。

4) 海拔高度：＜2000m。

5) 无强烈震动。

(3) 土建仪器间的技术要求

土建仪器间由于是在设备安装现场搭盖，满足CEMS设备环境要求即可。

(4) 整体钢结构仪器间技术要求

1) 仪器间尺寸

长度：室外主体 2.5～6.5m，考虑钢材尺寸和吊装，运输结构强度问题，单个仪器间不宜超过 6.5m，如果长度 6.5m，可采用组合结构，分体制作，运输到现场后再组合成一体，也可采用两个仪器间实现。

宽度：室外主体 2.5m，最宽不应超过 3m，受公路运输宽度限制，宽度不宜超过 3.0m。

高度：室外主体 2.7～3.0m，受通过立交桥、隧道时的高度限制，室内净高 2.5～2.8m。

2）仪器间防护等级

仪器间要达到 IP65 防护等级，要有保温通风功能。

（5）防爆仪器间技术要求

1）仪器间尺寸

仪器间尺寸同整体钢结构仪器间。

2）防爆形式

仪器间防爆形式：隔爆型、正压型。

① 隔爆型

仪器间全采用钢板结构连接、整体槽钢排架，内部填充阻燃、绝热材料。内外墙全部采用碳钢喷塑，顶部配吊装耳环；仪器间采用外开式门，门上方带防爆视窗，配事故紧急撞门锁，配门限位器；仪器间整体接地，设不锈钢排，一点接地，作接地保护。

② 正压型

仪器间内有持续小流量气体充入和间隙充气来确保仪器间内处于正压状态，仪器间根据内部体积大小安装不同数量的微差压变送器来检测仪器间内的正压压力。微差压变送器向 PLC 控制器提供的信号，即 PLC 通过压力信号对仪器间内非防爆电气设备的电源切断控制，必须是仪器间内如有 3 个微差压变送器，有 2 个以上同时给出低于安全规定压力值时，PLC 才给出切断仪器间内非防爆电气设备电源的命令。

17.3.3.2 CEMS 仪器间结构设计和设施配置

（1）土建仪器间

土建仪器间要能满足 CEMS 的使用环境要求，要具有照明、通风、取暖等功能。

（2）整体钢结构仪器间

1）骨架、底座和屋顶

仪器间的骨架、底座和屋顶为金属构件，采用型钢焊接而成，应有足够的强度与刚性，保证仪器间在荷载、起吊、平移、运输时不变形。仪器间顶部要安装吊耳，底座要有叉车槽。

仪器间骨架采用整体钢结构焊接而成，屋顶应有一定的倾斜度，不允许采用平顶，以防雨水积存。

2）内外墙和顶板和地板

仪器间内外墙采用带保温棉的彩钢板拼装而成，在需要安装空调排风扇等需要承重的地方加装横梁。屋顶面板须进行有效的防雨设计，可使用搭扣结构的拼装式防雨设计或平面焊接式防雨设计。保证屋顶面耐腐蚀的持久性能，外顶称重能力应≥250kg/m^2 且不发生永久性变形。地板应为防滑金属板。

3）保温层

内外墙之间应填充阻燃型保温材料，保温层厚度一般为 70～75mm，严寒或酷热地区应加厚至 80～85mm。

4）门

仪器间门应为外开型，安全门应设在维修人员面对仪器操作时，向右转身90°所面对的墙上，以便发生意外情况时，能迅速撤离仪器间。门上应设透视尺寸不小于300mm×300mm的玻璃视窗。

5）钢结构仪器间公用设施配置

照明：仪器间照明的照度一般为250～300lx。

通风：仪器间应配备通风机，一般采用轴流风机。

配电：仪器间需要单独配电，用于照明灯、通风机、空调、维修插座等公用设备。

采暖：仪器间内温度一般控制在10～30℃范围内，极寒地区冬季可使用蒸汽采暖装置。

空调：当环境温度和设备散热超过分析仪表的使用温度时，应配备空调装置，以满足分析仪运行环境温度。

（3）防爆仪器间

1）防爆仪器间设计

分析室主体采用内外钢质结构，内外均为冷扎（或不锈钢）钢板，底座采用10号槽钢，四周龙骨方钢结构，内外板均喷塑处理，中间夹层厚70mm，其间填充有阻燃、保温、隔热材料。室内安装有防爆空调，可调节室内温度。电配系统为管线系统，配有防爆配电箱。照明系统采用防爆应急日光灯。分析室内还具有通风、换气、过滤装置。单开门结构配有玻璃看窗和逃生门锁。采用特殊加工技术，均实现密封性、防腐、防尘、控制温度等功能。

2）防爆仪器间公用设施配置

室内安装有防爆空调，可调节室内温度。电配系统为管线系统，配有防爆配电箱。照明系统采用防爆应急日光灯。分析室内还具有通风、换气、过滤装置。单开门结构配有玻璃看窗和逃生门锁。采用特殊加工技术，均实现密封性、防腐、防尘、控制温度等功能。

17.3.3.3 CEMS仪器间安全设计

（1）安全检测报警系统

如果仪器间安装的环境有危险性气体，则仪器间内需安装安全检测报警系统，如可燃气体检测器、有毒气体检测器、声光报警器等。仪器间安全监测报警控制系统，对仪器间的安全起着极其重要的作用。

安全监测、报警控制系统对仪器间内的可燃气体［可燃气体或其中含有毒气体，一旦泄漏，可燃气体可能达到25%LEL（LEL气体爆炸下限浓度V%值），当有毒气体不能达到最高容许浓度时，应设置可燃气体检测报警仪］、有毒气体（有毒气体或其中含有可燃气体，一旦泄漏，有毒气体可能达到最高容许浓度，当可燃气体不能达到25%LEL时，应设置有毒气体检测报警仪）含氧量等监测报警，并实现了就地、远程报警，自动定时换气和联锁控制（启动风机换气），保证仪表维护人员的安全工作环境，避免安全事故的发生。

（2）仪器间要做好有效接地

参见本书17.3.1.2机柜接地技术章节。

（3）仪器间的防雷设计

参见本书17.3.1.2雷电防护章节。

17.3.3.4 CEMS仪器间的建设与试用

（1）仪器间建设要求

仪器间外面应设有带防护链的气瓶固定支架，用于放置标准气瓶。

仪器间应建设在水泥或稳定的钢结构平台上，平台标高至少应比周围地坪高150～

300mm，平台表面应平坦整洁以防止仪器间变形，平台承重要大于仪器间本体重量和内部设备的总重量。

（2）仪器间内设备放置

分析柜放置：分析柜安装放置的位置，底部要有横梁支撑，保证承重。

桥架安装：分析柜可采用顶部或底部进线，仪器间内要配有相应桥架，电缆不能裸露在外，桥架安装横平竖直、整齐美观、距离一致、连接牢固，同一水平面内水平度偏差不超过5mm/m，直线度偏差不超过5mm/m。

镀锌桥架之间可利用镀锌连接板作为跨接线，把桥架连成一体。在连接板两端的两只连接螺栓上加镀锌弹簧垫圈，桥架之间用不小于$4mm^2$软铜线进行跨接，再将桥架与接地线相连，形成电气通路。桥架整体与接地干线应有不少于两处的连接。仪器间内的排气要接到室外，防止废气在室内集聚，对人体造成损害。

（3）仪器间的试用

CEMS仪器间建设完成后，应进行仪器间的电源系统测试、相关电气设备的测试以及仪器间内环境条件和安全设施的测试试用，以确保仪器间满足CEMS安装和运行使用的需求，同时不会对CEMS仪器设备的稳定运行造成破坏和影响。

第 18 章　校验和比对

18.1　概念和依据

18.1.1　校验和比对的概念

校验（checkout/verification）是指：用参比方法对 CEMS（含取样系统、分析系统）检测结果的“相对准确度、相关系数、置信区间、允许区间、相对误差、绝对误差”等技术指标进行比对检测过程。

比对监测（comparison testing）是指：用参比方法对正常运行的 CEMS 的“准确度”技术指标进行抽检。对现场安装使用的 CEMS 仪器监测结果进行有效性判别。

二者同样采用参比方法，但是检测的技术指标不同，计算方法迥异。

18.1.2　比对监测的主要工作内容

CEMS 比对监测的主要内容：针对颗粒物、气态污染物（含 O_2）以及烟气流速、温度等采用相应的手工参比方法（国家或行业标准分析方法）与同一数据状态（标干、热湿）同一条件（时间和采样地点）CEMS 监测到的数据进行比对，通过数据汇总处理分析后，对 CEMS 检测的数据是否科学有效进行考核。

18.1.3　比对监测的技术依据

CEMS 比对监测的技术依据如下：

（1）连续自动监测仪器进行比对的操作技术规范和质控要求《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ75—2017。该标准详细规定了固定污染源烟气排放连续监测系统中的气态污染物（SO_2、NO_x）排放、颗粒物排放和有关烟气参数（含氧量等）连续监测系统的组成和功能、技术性能、监测站房、安装、调试、验收、维护以及日常管理等各个环节的技术要求。其中的第 8、9 章节有详细的规定，是进行 CEMS 比对监测、判断被比对 CEMS 数据合格与否的主要技术依据。

（2）国家规定的参比标准测试方法的操作规范和质控要求《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB/T 16157—1996。该标准详细规定了固定污染源采用手工参比标准测试方法对废弃污染源现场开展手工采样测试的操作技术规范和各环节的质控措施和要求，是规范手工采样操作的主要技术依据。确保手工参比测试结果准确可靠，能够用于 CEMS 仪器的比对监测需求。对于超低排放颗粒物 CEMS，执行新标准《固定污染源废气 低浓度颗粒物测定 重量法》HJ 836—2017。相应的，GB/T 16157—1996 做出了如下修订：增加“1.3 在测定固定污染源排气中颗粒物浓度时，浓度小于等于 20mg/m^3 时，适用（《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》）HJ 836；浓度大于 20mg/m^3 且不超过 50mg/m^3 时，本标准与 HJ 836 同时适用。采用本标准测定浓度小于等于 20mg/m^3 时，测定结果表述为

‘<20mg/m^3’”。

18.2 CEMS 比对监测前的准备工作

18.2.1 了解掌握 CEMS 及污染源比对现场的情况

开展 CEMS 比对监测前，首先应该尽量多地了解和掌握所要比对的污染源现场的基本情况、现场环境条件状况以及 CEMS 基本信息，这样有利于进行更充分和有针对性的准备工作，提高工作效率。

18.2.1.1 掌握对比监测所在污染源的基本情况

（1）污染源所在的地理位置，如属于哪类区域，执行的相关排放标准等。

（2）排污企业的类型（电力、化工、水泥、钢铁等）。

（3）排污企业的生产情况和近期生产计划，正常、满负荷、低负荷、停产、大修等以及有无周期性的变化。

（4）污染物治理设施的情况，除尘器有无、类型（电、袋）、运行能力和状况；脱硫设施的有无、方式（干法/湿法）、运行能力和状况；脱销设施的有无、方式、运行能力和状况等。

（5）污染源正常生产工况下的排放情况。排放污染物的种类、排放浓度、排放量以及相关大概的排放参数（流速、温度、静压、湿度等）。

1）污染物种类：比对监测的对象（不同行业主要排放污染物不同）。

2）排放浓度（高、低）：决定使用参比仪器设备量程的选取、校准时标准物质、校准浓度的选择。

3）流速（高、低）：烟气流速过低（<5m/s），通常采用的皮托管法其微差压传感器的灵敏度下降，采样和测试误差增大。

4）温度（高、低）：温度过高（>500℃），颗粒物采样用的滤筒类型将发生变化。

5）静压（正、负/大、小）：烟囱或烟道内压力的正负；正压注意防护，负压过大对采样器及分析仪的抽气泵的要求提高，有时需要加泵。

6）湿度（大、小）：湿法脱硫后若没有加热，湿度往往很大，需增加辅助的脱水设备等。

（6）排放口的基本情况，是否规范，烟囱或烟道的形状、尺寸（圆形直径、矩形高度、宽度等）、面积、烟道的路径、排放旁路等。由采样烟道的形状、尺寸可估算出应使用采样枪的长短以及比对监测的工作时间和初步工作量。

（7）参比方法比对监测环境条件，参比监测烟道直管段情况，参比测试孔情况（位置、数目、大小满足要求），采样平台、爬梯以及护栏情况，平台高度、面积、多层平台设置；爬梯情况（一般平台高度≥5m，应配有之字形梯/旋梯/升降梯）；护栏高度是否≥1.2m 等。

（8）比对监测现场的安全性，有无稳定的供电电源，距离；操作环境周围有无危险场所设施；操作平台、爬梯的安全性（稳固结实）；比对现场有无影响身体健康的污染气体的泄漏等。

18.2.1.2 了解安装在该污染源的 CEMS 的基本情况

（1）CEMS 的型号、品牌、生产厂家、基本配置以及其安装、调试和验收等完成的时间等基本信息。

（2）CEMS 的采样和分析测试原理，不同采样和分析测试原理其监测显示、记录的污

染物数据状态和计算过程存在较大差异，确认 CEMS 比对的数据来源。

（3）CEMS 的日常工作运行状态，正常运行、故障、维护维修：有无日常运营维护、校准、运营维护方式以及采取的现场数据质控措施和计划情况等。

18.2.2 手工参比仪器设备的校准和维护

手工参比仪器设备的校准和维护是开展 CEMS 比对监测前的重要准备工作，因为 CEMS 比对监测是以手工参比测试结果为基准，与 CEMS 连续监测数据进行比较，因此在日常的仪器管理中，针对污染源采样的分析仪器应定期做好维护保养，确保其保持正常的工作能力。在每次开展 CEMS 比对监测前，都应该对比对监测中使用的仪器设备进行必要的检查和校准，确保手工参比测试数据准确可靠，保证比对监测工作顺利完成。

18.2.2.1 采样测试用品的准备

CEMS 比对监测手工参比采样分析需准备的现场用品（耗材）主要包括以下几项

（1）颗粒物采样使用的滤筒和硅胶。

滤筒材质的选择和预处理及准确称量过程是质控的关键。一般当现场污染源烟气温度低于 500℃时，使用玻璃纤维材质的滤筒；如果遇到特殊的排放源（例如钢铁高炉尾气）烟气温度较高则应选择使用刚玉材质的滤筒；另外对不同材质的滤筒其烘干称重的要求略有差别，应按照 GB 16157—1996 中的相关操作程序进行，需要对采样前的空滤筒和采样后的负载颗粒物滤筒采用完全相同的预处理步骤和控制条件，确保数据的可比性。另外，由于目前的烟尘采样器均需使用干燥硅胶除湿，因此应准备足够的干燥硅胶供现场使用。

（2）校准用标准气体

气态污染物分析仪校准时使用的零点和量程标准气体

（3）零点气体

要求零气中含二氧化硫、氮氧化物均不超过 0.1μmol/mol。零气中含有的其他气体的浓度不得干扰仪器的读数或产生二氧化硫、氮氧化物的读数。

（4）量程标准气体

不确定度不超过±2%在有效期内的国家标准气体。

（5）量程标气浓度

由国家计量行政部门批准的国家一、二级标准气体，其不确定度不超过±2%。一般量程校准选择单点校准，应尽量选择分析仪器现有量程范围内，且略高于该对比监测污染源正常排放浓度的标准气体进行校准（浓度与现场排放值接近）。

（6）气态污染物采样用的吸收瓶和吸收液

如果使用烟气采样器对污染源现场排放的烟气中的气态污染物进行监测（目前已经应用很少），则应准备干净的液体吸收瓶（50mL），配制采样不同污染物所需要的标准吸收溶液，具体的配制方法、步骤和所需要的化学试剂药品以及储存条件和现场使用要求等应参照下文表 18-1“CEMS 比对监测采用的采样和分析测试方法”中的相关标准分析方法执行。

18.2.2.2 烟尘（烟气）采样器的维护和校准

（1）采样器的气密性检查。

由于烟尘（烟气）采样器长期在污染源现场使用，因此很有可能出现管路或接头老化，密封不严有漏气的情况，因此要进行气密性的检查。

（2）一般在实验室中采样器的气密性检查方法操作比较烦琐，需要使用特殊部件密封采样入口，在管路上外接负压表。通过观察记录采样器抽气泵启动和停止前后负压表的压力变

化检查管路是否有漏气，这种方法在现场难以操作。因此由于目前国内使用的采样器采样流量计一般都设置在采样泵前，可采用一些简单有效的现场方法进行检查，例如启动抽气泵后用手堵住采样入口，观察采样流量计流量的变化。如果采样流量逐步下降到接近0，可以认为系统不漏气，这些还要依据个人现场的操作经验。

（3）流量计量装置校准。

流量计量装置的烟尘采样器和烟气采样器的核心部件，由于采样器的长期在污染源现场使用，相关的各种温度、压力传感器可能会发生漂移、老化；内部流量计的校正参数可能会有变化；而皮托管则由于磨损表面光洁度发生变化导致皮托管系数也有变化等。因此，这些系统误差必须通过定期对流量计量装置进行的有效校准来修正。校准主要包括：1）采样器相关压力传感器的校准（静压、动压、流量计前压力等）；2）采样器相关温度传感器的校准（烟温、流量计前温度等）；3）采样器流量计的采样流量校准（烟气采样器也适用）；4）采样器S型皮托管流速测量的校准。

流量计量装置的校准需要使用仪器设备主要包括压力检测仪表、点位差计或电阻箱、干式或湿式气体累计流量计或标准转子流量计、补偿微压计或低速风洞以及标准皮托管等。

上述的关于流量计量装置的校准工作量较大，但是如果其中的任意一个参数测试不准确，将导致采样的流速、采气的体积、烟气温度以及相关计算均不准确，严重影响数据质量。然而，由于目前各级监测站污染源监测工作非常繁重，因此就目前国内仪器稳定水平来看，这部分校准工作每年可以考虑开展1～2次，如果其中有些实验校准条件不具备也可以。

18.2.2.3 现场便携烟气分析仪（电化学、光学）校准

（1）仪器采样测试气路的气密性检查。

操作和要求与前述烟尘采样器基本一致。

（2）气体分析仪校准。

现场便携烟气分析仪不论原理是电化学法还是光学法的仪器，内部检测器受环境条件以及长期测试使用等影响都会造成一定测试系统误差，这样其测试零点和量程标准气体时会由于系统误差产生测量漂移，从而使测试结果不准确，因此需要使用标准气体（包括O_2）对其进行校准操作。这种校准过程看起来比较容易，但在实际操作中应注意以下两点：

一是校准标气进气流量控制。在现场检测和仪器的适用性检测中发现，目前国内使用的烟气分析仪（电化学、光学）（进口、国产的）其采样流量的变化对气体浓度测试结果有一定影响，一般影响在5%左右，有个别国家仪器受进气流量变化影响接近10%；因此在这类仪器的校准工作中，应控制其校准标气的进样流量与实际检测中的采样流量一致或尽量接近，从而克服系统误差确保校准后的仪器在现场测试更加准确。

二是校准操作流程选择。对参比使用的现场便携烟气分析仪的校准流程一般分为分析仪的校准和测试分析系统的校准（系统包括采样探头、采样管、导气管、分析仪）两种。目前，对国内安装的CEMS校准要求都是全系统的校准（从采样探头进标气），主要是为了克服气体在进分析仪前的各个环节中（过滤、脱水等）的损失（尤其是SO_2气体）。因此，对于参比现场便携烟气分析仪器，现场比对应尽量选择进行测试分析系统的全系统校准过程；尤其是针对采样前端（采样导气过程）管线路径较长，有可能造成气体被吸附等损失的必须进行参比测试系统的全过程校准，从而提高测试的准确性。

现场便携烟气分析仪器作为便携监测仪器，分析测试中零点、量程有漂移，测试结果有波动是很普遍的现象，因此，对于烟气分析仪的校准工作应在每次CEMS比对监测前标定

校准一次或长时间间隔使用前标定；另外，参比烟气分析仪不论是电化学还是光学原理的均主要用于实现在污染源比对监测现场的直接测试（现场出数），因此，如果现场条件具备（有相应浓度并合格有效的标气）这部分校准工作，应尽可能考虑在比对监测现场完成。

18.2.3　安全防护装备和通信设备

污染源 CEMS 现场比对监测工作现场环境相对特殊、复杂，因此，从事 CEMS 比对监测的技术人员应注意个人自身的安全防护，配备各种必须安装防护装备；同时为了能够顺利方便的开展工作，应配备必要的通信设备。

18.2.3.1　个人安全防护装备

安全帽、安全带（平台较高、较窄）、工作服、隔热手套、防护口罩（烟道正压情况）及防毒面具（现场烟道跑、冒、滴、漏严重，影响呼吸）等。

18.2.3.2　通信设备

现场对讲机、笔记本电脑等。

18.2.4　编制《CEMS 比对监测现场实施方案》

CEMS 比对监测前的主要准备工作完成后，可根据上述掌握的基本情况和操作过程，针对每个特定的污染源 CEMS 编制《CEMS 比对监测现场实施方案》。

依据《CEMS 比对监测现场实施方案》可以选择在合适的时间赴现场开展污染源 CEMS 的比对监测工作。

《CEMS 比对监测现场实施方案》的内容主要包括比对监测污染源基本情况、CEMS 系统安装、配置、主要工作原理等情况、现场测试时间安排、人员安排、比对测试内容和指标要求、基本操作过程要求、使用的仪器设备、标准物质、安全防护通信设备以及相关的记录表格等内容。

18.2.5　人员设备和方法

18.2.5.1　CEMS 比对测试人员

CEMS 比对测试工作的承担主体是业主、CEMS 制造者供应者或受委托的具有检测能力的机构。技术验收业主自己做或具备比对验收资质的第三方检测机构，各级环境监测部门的人员对重点排污单位报备的验收资料予以记录，作为现场监督检查的依据。

18.2.5.2　CEMS 比对监测仪器设备

CEMS 比对监测仪器设备：

现场仪器设备：烟尘采样器、烟气采样器、烟气分析仪，见表 18-1。

实验室分析仪器设备包括分析天平（检定分度值≤0.1mg）、分光光度计等。

CEMS 比对监测所需要的仪器设备及相关标准　　**表 18-1**

序号	仪器名称	测试对象	仪器技术条件
1	烟尘采样器	颗粒物(采样) 烟气流速 烟气温度 烟气湿度	《烟尘采样器技术条件》 HJ/T 48—1999
2	烟气采样器	气态污染物 (采样)	《烟气采样器技术条件》 HJ/T 47—1999

续表

序号	仪器名称	测试对象	仪器技术条件
3	烟气分析仪	气态污染物、氧量	《定电位电解法二氧化硫测定仪技术条件》HJ/T 46—1999 《环境空气和废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃便携式监测仪技术要求及检测方法》HJ 1012—2018 《环境空气和废气 挥发性有机物组分便携式傅里叶红外监测仪技术要求及检测方法》HJ 1011—2018 《固定污染源烟气(二氧化硫和氮氧化物)便携式紫外吸收法测量仪器技术要求及检测方法》HJ 1045—2019

18.2.5.3 CEMS 比对监测分析方法

CEMS 比对测试采用的分析方法见表 18-2（国标 A 和行业标准 B）。

CEMS 比对监测采用的采样和分析测试方法 **表 18-2**

序号	测试对象	测量分析方法	方法来源
1	颗粒物	重量法(A)	《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB/T 16157—1996 《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》HJ 836—2017
2	烟气湿度	重量法(A) 干湿球法(A) 冷凝法(A)	
3	烟气流速	皮托管平行法(A)	
4	烟气温度	玻璃水银温度计(A) 电热偶温度计(A) 电阻温度计(A)	
5	氧含量	奥式气体分析仪法(A) 电化学法(B) 氧化锆法(B) 热磁法(B) 磁力机械法(B)	《空气和废气监测分析方法》(第四版)
6	二氧化硫	碘量法(A) 定电位电解法(A) 非分散红外吸收法(B) 紫外吸收法(A)	《固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法》HJ/T 56—2000 《固定污染源废气 二氧化硫的测定 非分散红外吸收法》HJ 629—2011 《固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法》HJ/T 57—2017 《固定污染源废气 二氧化硫的测定 便携式紫外吸收法》HJ/T 133—2020
7	氮氧化物	紫外分光光度法(B) 盐酸萘乙二胺分光光度法(A) 定电位电解法(B) 非分散红外吸收法(B) 紫外吸收法(A)	《固定污染源排气中氮氧化物的测定 紫外分光光度法》HJ/T 42—1999 《固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法》HJ/T 43—1999 《固定污染源废气 氮氧化物的测定 定电位电解法》HJ 693—2014 《固定污染源废气 氮氧化物的测定 非分散红外吸收法》HJ 692—2014 《固定污染源废气 氮氧化物的测定 便携式紫外吸收法》HJ 1132—2020

18.3 现场测试和质量保证

18.3.1 现场安装 CEMS 仪器检查

到达 CEMS 比对监测现场后，首先应该对现场安装的 CEMS 仪器的运行情况和运行状态进行检查；以确认 CEMS 是在正常、稳定（非故障）的状态下运行，从而保证 CEMS 比对监测结果科学有效。

主要的检查内容包括以下几项：

（1）检查 CEMS 仪器整体运行状态。采样（伴热温度）、预处理（冷凝温度）、分析测试（流量）、数据显示、存储记录、数据传输以及尾气和冷凝水的排放等，尤其注意数据存储记录（存储记录分钟数值）。

（2）查看 CEMS 仪器操作软件的相关设置，以管理员权限登录 CEMS 操作软件查看相关设置。系统参数设置，包括测试对象的检测量程、污染源排放口的相关参数（烟囱直径、烟道尺寸截面积）、时钟设置等；过程参数设置，包括标准过剩空气系数、各测试对象的校正系数［颗粒物相关曲线（斜率、截距）、流速速度场系数等其他的测试数据校正参数（调节因子］、湿度设置（手工输入）、各种数据状态的转换公式设置以及不同显示单位设置等。

（3）查看现场 CEMS 运营维护、维修、校准记录，系统以往的运行状态、故障出现和排除情况、系统的定期校准情况。

（4）检查 CEMS 运行现场环境条件检查，分析小屋环境、烟囱或烟道排放口位置和规划情况、比对测试操作平台、爬梯以及护栏情况、手工参比测试的规范操作环境等。

（5）通过 CEMS 比对前的现场观察和检查，确认 CEMS 运行不正常时，应暂停比对监测工作，待相关运营单位对其维护、校准甚至维修并运行正常后再考虑开展比对监测。另外，了解更多的现场 CEMS 的相关参数设定以及现场维护等情况资料更有助于将来对 CEMS 比对监测数据的综合汇总分析和比对监测结果的总体判定。

18.3.2 颗粒物 CEMS 比对监测

颗粒物 CEMS 比对监测手工参比测试方法为重量法。手工参比测试主要包括颗粒物的采样、烘干、称重以及数据处理等工作，这部分的操作要求可参见 GB 16157—1996 中的第 8 部分内容。重量法的基本方法原理是：按等速原则从烟道中抽取一定体积的含颗粒物烟气，通过已知重量的滤筒，烟气中的尘粒被捕集，根据滤筒在采样前后的重量差和采样体积，计算颗粒物排放浓度。针对超低浓度排放现场可以通过滤膜进行捕集烟气中的尘粒。具体的滤膜的要求参见《固定污染物废气低浓度颗粒物的测定　重量法》HJ 836—2017 中第 5 部分内容。使用的仪器设备主要包括烟尘平行采样仪、电子天平等。手工采样过程和步骤：将烟尘采样管由采样孔插入烟道中，使采样嘴置于测点上，正对气流，按颗粒物等速采样原理，抽取一定量的含尘气体。根据采样管滤筒上所捕集到的颗粒物量和同时抽取的气体量，计算出烟气中颗粒物浓度。

18.3.2.1 非超低浓度颗粒物

比对监测过程需要注意的环节如下：

（1）采样点布设

颗粒物参比方法测试测量的是采样测试断面颗粒物的平均浓度，其采样是整个断面的采

样（与 CEMS 不同，CEMS 一般采用的是单点测量或线测量）。参比测试采样点的设置应该按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB 16157 标准中的要求针对烟囱或烟道截面的形状（圆形或矩形）和尺寸进行布设。

需要注意的是：按照 GB 16157—1996 标准及 CEMS 安装要求，手工参比采样点位应尽量设置在烟囱或烟道直管段较好（前四后二）的位置，且参比测试孔应位于 CEMS 附近、在 CEMS 取样测试点的下游。当检测现场参比测试环境条件不能完全满足要求，例如比对测试烟道的直管段不够或是现场污染源排放颗粒物浓度较低（$<50mg/m^3$）时，应根据现场实际情况选择合适的比对测试采样位置，同时在规范的基础上适当增加布设采样点位的个数。

（2）采样方法

污染源颗粒物 CEMS 比对监测手工参比采样方法必须采用等速跟踪采样的原理方法，也就是采样器采样嘴的吸引速度与采样嘴测点处的实际烟气流速相等。

如果采样嘴吸引速度大于测点的烟气流速，那么采样器的抽力过大，则除了正对采样嘴的烟气外，采样嘴附近的烟气也会被抽入采样器，而附近烟气中的颗粒物则由于惯性没有被抽入采样器，这样导致采样器采样体积偏大，测试浓度结果偏小；相反，采样嘴吸引速度如果小于测点的烟气流速，那么采样器的抽力过小，则会使本应进入采样器的正对采样嘴的烟气从采样嘴旁流失不能正常进入，而烟气中的颗粒物则由于惯性进入采样器，这样导致采样器采样体积偏小，测试浓度结果偏大。

等速跟踪率的采样方法在我们日常使用的采样器里均可设置。一台正常性能良好的颗粒物采样器按照 GB 16157 标准要求，其采样嘴吸引速度与测点实际烟气流速相对误差（等速吸引误差）应<10%；按照目前国内使用的仪器适用性检测的烟尘采样器技术要求标准《烟尘采样器技术条件》HJ/T 48—1999，等速吸引误差应<8%。在采样器采样结果记录单中一般均有关于跟踪采样的“跟踪率”指标，其值越接近 1 越好。

（3）采样方式

由于颗粒物 CEMS 比对监测是比对烟道断面的平均浓度，因此颗粒物手工参比采样的采样方式均使用移动采样的方式，即“用一个滤筒在整个断面上的采样点按顺序移动采样，每个采样点采样时间相同，从而得出采样断面的平均浓度”，这种采样方式相对省时、方便，用于测定烟道断面的平均浓度。

（4）样品的数量和空白样

按照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 中颗粒物 CEMS 比对监测的要求，颗粒物 CEMS 比对监测样品数量为至少 5 对（烟道断面的平均浓度），即手工参比采样测试与颗粒物 CEMS 同时各自测试至少 5 个颗粒物样品进行比对。在比对监测过程中应同时采集过程空白滤筒，作为采样过程中的质控样品，确认颗粒物 CEMS 比对监测数据是否有效。

空白样品：在颗粒物样品采集中，滤筒和烟枪深入烟道内，因此采样系统误差是在所难免，因此一般建议采样时加做 1 个测试的空白样品，作为采样的质控措施，以了解颗粒物采样中系统误差的影响多少。

空白样品采样操作过程：烟枪装好新滤筒，将采样嘴置于测点上，不同的是采样嘴反向背对气流，这时皮托管全压和静压倒置采样器显示流速接近 0，采样泵不工作，其他操作（移动点位、采样时间等）与正常采样完全相同，测试完成后样品即为空白样品（空白样仅有颗粒物重量无采样体积，不参与计算）。

（5）手工采样时间

颗粒物 CEMS 比对监测每个手工参比测试样品的采样时间长短对比对测试结果的影响

较大。采样时间过短则可能采集的颗粒物量不够，从而导致测试结果灵敏度和误差较大；相反如果采样时间过长，不仅增加了工作量，而且容易造成采样滤筒失效，长此以往也很可能会降低采样器的寿命。

每个样品的采样时间＝该采样断面的采样点个数×每个点的采样时间，因此，每个采样点位的采样时间长短一般应根据监测污染源颗粒物排放浓度高低来确定，颗粒物排放浓度高则可缩短每点的采样时间，反之则加长采样时间。正常情况下，一般每个采样点的采样停留时间为3～5min。当对颗粒物排放浓度不确定时，可采取比对测试第一个样品设置采样时间控制在30min左右，然后检查采样完成后的滤筒，观察采样完成后的滤筒表面均匀地附着一层薄薄的深色的颗粒物，滤筒底部无颗粒物脱落，则说明颗粒物采样时间合适；如果颗粒物附着不明显则应加长每个点的采样停留时间；相反如果滤筒内颗粒物附着较多甚至出现堆积则必须缩短每个点的采样停留时间。

（6）采样嘴的选择和方向

1）采样嘴尺寸的选择污染源颗粒物采样采用等速跟踪法，采样嘴尺寸的大小决定了烟气采样量的多少。

假设烟气流速固定，那么所选择使用的采样嘴直径越大，采样进气流量就会增大，相同采样时间内采集的烟气量就越多，这时滤筒负载的颗粒物量也越多，测试灵敏度较高；但是，如果一味增大采样嘴尺寸来增加采样流量，那么就要求采样器配置的抽气泵必须具备足够的抽力，满足跟踪流量的需求，显然，抽气泵跟踪采样的流量越大泵的负荷越高，采样器抽气泵的寿命会因此而降低，不利于采样器的长期稳定使用。

按照目前大部分烟尘采样器的基本配置和颗粒物采样的灵敏度要求，一般控制采样器跟踪采样流量在20～30L/min为最理想的数值，因此，采样嘴尺寸的选择依据是烟囱或烟道内的烟气流速大小；一般原则来说是烟气流速越大所选取的采样嘴直径相对越小。国内目前使用的烟尘采样器一般提供直径为5～12mm的不同尺寸采样嘴，不同烟气流速相对应的采样嘴直径尺寸见表18-3。使用烟气采样器采样前可以通过预测流速来选择使用正确尺寸的烟尘采样嘴。

不同烟气流速相对应选择使用的采样嘴直径尺寸　　**表18-3**

烟气流速(m/s)	采样流量(L/min)	采样嘴直径(mm)
5左右	20～30	9～11
10左右		6～7
15左右		5～6
20左右		4～5
＞20		≤5

采样嘴直径：

$$d=\sqrt{Q_s/V_s/0.047}$$

式中　d——采样嘴直径，mm；

Q_s—— 采样跟踪流量，L/min；

V_s——烟道中的烟气流速，m/s。

2）采样时采样嘴的方向GB 16157标准要求，颗粒物采样时采样嘴应正对烟气气流方向，其与气流方向的角度偏差不得大于10°。

据相关资料显示，采样嘴的方向对颗粒物的采样有比较大的影响，尤其是对颗粒粒径＞4μm的较大颗粒物，影响尤为明显。

（7）滤筒的烘干称重

按照 GB 16157 标准的要求，用于颗粒物采样使用的滤筒在采样前和采样后均应放置在105℃烘箱内烘烤至少 1h，取出后用干燥器干燥冷却至室温，使用检定分度值＜0.1mg 的分析天平称量，记录称量结果；然后重复上述操作，直至称量至恒重（恒重一般指前后两次烘干称重结果差值＜0.5mg）。

滤筒烘干称重的过程应选择在温度和湿度波动不大、阴凉干燥的室内进行。且同一滤筒采样前、后应尽量使用同一台天平称量；有关分析天平的使用称量要求和相关质控措施应参考 HJ 656—2013 标准的相关要求。

（8）其他需要说明的问题

1）现场静电干扰颗粒物 CEMS 比对监测的颗粒物手工采样过程中，现场静电干扰的现象在烟道前安装有电除尘治理设施的污染源现场会时常发生。

烟道中的颗粒物往往经过静电除尘器后携带电荷，因此排放烟道或烟囱内易产生较强的静电，参比测试孔法兰和采样枪外壁一般均为金属材质，容易导电；当烟枪与测试孔法兰接触时，静电会通过烟枪、烟温测量线传导至烟尘采样器，轻微的静电可能造成测试信号的干扰或采样器不停重起甚至死机；严重时则会击穿采样器内部电路板使采样器损毁从而无法正常开展工作。一般采取在烟枪上接地线的方法可有效避免静电对参比采样仪器造成的干扰。

2）比对监测同一时间段问题 CEMS 比对监测中，颗粒物参比方法样品的采样一定注意要与 CEMS 测试在同一时间段进行，也就是每一组颗粒物手工参比样品采样前参比采样器和 CEMS 仪器的时间设置必须保持一致，否则测试结果不具备可比性。

3）烟气湿度较大的情况颗粒物 CEMS 比对监测的烟道或烟囱内烟气如果含湿量较大时，对烟尘采样器配置干燥器中硅胶的使用量和更换频次提出了较高的要求。这时可以采取在硅胶干燥器前串联空干燥器的方法，先让烟气自然冷却脱水以节省硅胶的使用量，并在每个样品测试结束后手动排空采样管和气体导气管线中的液态水，从而尽量保护采样器主机，节约干燥硅胶的使用。

4）目前国内普遍使用的烟尘采样器，颗粒物质量浓度一般不能在检测现场直接给出，必须回到实验室后进行滤筒称重后计算得出，个别特殊原理的颗粒物检测仪器具备现场出数的能力但其性能质量尚无法验证；因此，一般颗粒物 CEMS 比对监测数据整理和汇总分析及结果判别只能在比对监测完成后进行。

18.3.2.2 超低现场滤膜使用

针对超低浓度的颗粒物 CEMS，使用滤膜替代传统滤筒的使用。

（1）滤膜

滤膜直径为 47±0.25mm，应满足如下要求：

1）最大期望流速下，对于直径为 0.3μm 的标准粒子，滤膜的捕集率效率应大于99.5%，对于直径为 0.6μm 的标准粒子，滤膜的捕集效率应大于 99.9%。

2）选择石英材质或聚四氟乙烯材质滤膜，滤膜材质不应吸收或与废气中的气态化合物发生化学反应，在最大的采样温度下应保持热稳定，并避免质量损失。

根据《固定污染物废气低浓度颗粒物的测定　重量法》HJ 836—2017 标准中第 8 部分废气颗粒物的测定步骤：

（2）采样前处理

采样前，在去离子水介质中用超声波清洗前弯管、密封铝圈和不锈钢托网清洗 5min 后

再用去离子水冲洗干净，以去除各部件上可能吸附的颗粒物。

将上述部件放置在烘箱内烘烤，烘烤温度105～110℃，烘干至少1h。

石英材质滤膜应烘焙1h，烘焙温度为180℃或大于烟温20℃（取两者较高的温度）。冷却后将滤膜和不锈钢托网用密封铝圈同前弯管封装在一起，放入恒温恒湿设备平衡至少24h。

（3）采样前称量

在已按1步骤处理平衡后的采样头，在恒温恒湿设备内用天平称重，每个样品称量2次，每次称量间隔应大于1h，2次称量结果间最大偏差应在0.20mg以内，记录称量结果。

以2次称量的平均值作为称量结果。当同一采样头2次称量中的质量差大于0.20mg时，可将相应采样头再平衡至少24h后称量；如果第二次平衡后称量的质量同上次称量的质量差仍大于0.20mg，可将相应采样头再平衡至少24h后称量；如果第三次平衡后称量的质量同上次称量的质量差仍大于0.20mg，在确认平衡称量仪器和操作正确后，此样品作废。

（4）采样后的处理称重

将采样后的采样头运回实验室后，用蘸有丙酮的石英棉对采样头外表面进行擦拭清洗，清洗过程应在通风橱中进行。清洗后在烘箱内烘烤采样头，烘烤温度为105～110℃，时间1h。待采样头干燥冷却后放入恒温恒湿设备平衡至少24h。应保证采样前后的恒温恒湿设备平衡条件不变。在恒温恒湿设备内用天平称重，采样前后采样头重量之差即为所取的颗粒物量。

应对称重后的采样头进行检查，检查是否存在滤膜破损或其他异常情况，若存在异常情况，则样品无效。

（5）针对超低浓度排放现场采样的质量控制

1）采样断面最大流速和最小流速比不应大于3∶1。

2）并需要及时清理采样管，减少样品沾污。

3）在现场条件允许的前提下，尽可能选取入口直径大的采样嘴。

4）样品采集时应保证每个样品的增重不小于1mg，或采样体积不小于$1m^3$。

5）颗粒物浓度低于方法检出限时，对应的全程序空白增重应不高于0.5mg，失重应不多于0.5mg。

总体来说，颗粒物CEMS比对监测过程中颗粒物的参比测试采样通常是在相对恶劣的高空条件下进行的，是一项具备一定危险性的工作，如果遇到正压烟道对操作人员的身体健康往往会有一定危害，需配备必要的防护装备；如果采样中遭遇雷雨天气，应立即停止工作收好烟枪，在安全区域躲避。因此，颗粒物CEMS的比对监测工作更应该注意采样操作中的各项工作细节，加强个人的防护意识，进而提高比对监测的工作效率。

18.3.2.3 颗粒物CEMS比对监测数据处理

（1）颗粒物CEMS的比对监测数据处理过程

1）计算每个样品的颗粒物浓度：将滤筒中颗粒物质量除以烟尘采样器中记录的标态干基采样体积即可得到颗粒物的标态干基浓度值。

2）计算至少5个参比样品颗粒物浓度的平均值。

3）查到同一时间段CEMS中记录的颗粒物浓度值（分钟均值）的平均值，并记录数值状态（实测值/标态干基值）。

4）对照技术要求中不同分段，计算同一状态下比对数据的相对误差、绝对误差或者相对准确度。

（2）案例一：颗粒物CEMS比对监测数据

结果见表18-4。

颗粒物 CEMS 比对监测数据处理示例　　表 18-4

样片编号	时间(时、分)	参比方法(mg/m^3)	CEMS 法(mg/m^3)	绝对误差
1	08：30	13.2	9.07	−4.13
2	09：00	29.8	35.85	6.05
3	09：30	17.2	12.21	−4.99
4	10：00	16.6	11.14	−5.46
5	10：30	14.6	10.49	−4.11
均值		18.3	15.75	−2.55

本例中：颗粒物 CEMS 比对监测共取得同一时间段比对数据 6 对，每个样品比对测试时间 60min。

注意：本例中应执行“$10mg/m^3$＜排放浓度≤$20mg/m^3$，绝对误差不超过±$6mg/m^3$”的考核标准。

（3）比对数据结果分析

颗粒物 CEMS 的比对监测由于颗粒物手工采样不能在污染源现场读取测量数据，因此必须回到实验室完成滤筒的烘干称重后才能进行数据结果比对。颗粒物 CEMS 比对监测结果往往受到“颗粒物相关校准”的影响。

前面章节已提到过，目前安装使用的颗粒物 CEMS 仪器一般不能直接给出烟气中颗粒物的质量浓度值，仅能直接给出透光率、电流信号或电压信号等，且也很难找到像气态污染物标准气体一样的标准浓度颗粒物对其进行校准，其测试方法一般为单点和线测量，而手工采样测量的是断面平均浓度。因此在系统验收前颗粒物 CEMS 必须与手工参比方法进行相关校准，找到 CEMS 测试数据与手工参比数据之间的线性相关关系。同流速速度场系数类似，这部分相关校准工作应该在 CEMS 验收前的调试检测中完成的，有关调试检测的内容和操作可参见《固体污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 标准中相关规定。将得到的相关曲线方程的斜率和截距输入 CEMS 软件的过程参数设置中，并定期检查和校验。

颗粒物 CEMS 比对监测不合格很可能受到相关校准的影响，颗粒物 CEMS 调试检测取得相关校准曲线的斜率和截距（未做、未输入或条件变化使系数变化等）一旦不准确，应尽快重新校准校验曲线的斜率和截距后方可再次进行颗粒物 CEMS 的比对监测。

（4）质量保证

CEMS 检测应在固定污染源正常排放污染物条件下进行。初检和复检时，必须有专人负责监督工况，排污单位应根据相关校准工作的要求调整工况或净化设备的运行参数，在测试期间保持相对稳定。

应使用等速跟踪烟尘采样器进行颗粒物手工采样及颗粒物 CEMS 相关校准和准确度测试，初检和复检应尽可能使用同一台采样器和同一根采样枪。在测量前进行流量和气密性等运行检查，保证采样器功能正常。使用参比方法测量断面颗粒物样品的采样、称量和计算过程应符合 GB/T 16157 、《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》HJ 836 及其他相关国家标准的要求。

18.3.2.4　颗粒物相关校准检测实例

相关校准：采用参比方法与 CEMS 同步测量烟气中颗粒物浓度，取同时间区间且相同状态的测量结果组成若干数据对，通过建立数据对之间的相关曲线，用参比方法校准颗粒物

CEMS 的过程。

参比方法校准颗粒物，测试期间烟气参数平均值如下：

温度：40.9℃；静压：－9Pa（表压）；含氧量：14.7%；湿度：6.57%；烟气压力：101291Pa（绝压）。

测定结果原始记录见表 18-5。

CEMS 法和参比方法测定烟气中颗粒物数据　　**表 18-5**

日期	时间(时、分)	参比方法					CMES 法		
		序号	滤筒编号	颗粒物重(mg)	标干体积(L)	浓度(mg/m^3)	测定值	颗粒物颜色	备注
2017/4/19	10：39～11：19	1	00047581	0.75	816.83	0.92	2.01	灰色	—
	11：26～12：26	2	00042631	1.13	1223.49	0.92	1.97	灰色	—
	14：08～15：08	3	00044741	0.89	1211.49	0.73	1.98	灰色	—
	15：12～16：12	4	00043241	0.95	1158.45	0.82	2.00	灰色	—
	16：16～17：16	5	00044331	0.82	1162.89	0.71	1.94	灰色	—
	17：20～18：20	6	00043131	0.60	1124.92	0.53	1.98	灰色	—
2017/4/20	10：25～11：25	1	00053321	19.02	1333.44	14.26	14.86	灰色	—
	11：29～12：29	2	00053421	20.39	1275.54	15.99	14.36	灰色	—
	12：34～13：34	3	00041341	18.43	1267.42	14.54	13.93	灰色	—
	15：30～14：30	4	00041481	20.72	1414.81	14.65	12.96	灰色	—
	16：23～17：23	5	00042301	20.72	1416.13	14.63	12.74	灰色	—
	17：28～18：28	6	00043071	19.79	1402.68	14.11	12.34	灰色	—
2017/4/21	10：28～11：28	1	00044211	5.71	1382.82	4.13	3.74	灰色	—
	11：31～12：31	2	00042821	5.39	1388.03	3.88	3.45	灰色	—
	12：35～13：35	3	00041001	5.86	1348.26	4.35	3.92	灰色	—
	14：25～15：25	4	00042761	8.25	1384.29	5.96	3.89	灰色	—
	15：30～16：30	5	00042791	9.31	1520.50	6.12	4.50	灰色	—
	16：34～17：34	6	00053561	8.12	1299.04	6.25	5.15	灰色	—
一元线性方程式：$y=0.933x-0.47$					相关系数：0.982				
置信区间半宽：7.1%					允许区间半宽：23.1%				

注：CEMS 法中测定值是无量纲值。

图例：

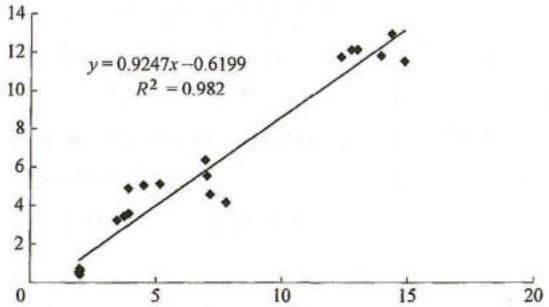


图 18-1　颗粒物 CEMS 线性相关校准曲线

颗粒物 CEMS 线性相关校准曲线应符合下列条件：

（1）相关系数：≥0.85（当测量范围上限小于或等于 50mg/m³ 时，相关系数≥0.75）。

（2）置信区间：95%的置信水平区间应落在由距校准曲线适合的颗粒物排放浓度限值±10%的两条直线组成的区间内。

（3）允许区间：允许区间应具有 95%的置信水平，即 75%的测定值应落在由距校准曲线适合的颗粒物排放浓度限值±25%的两条直线组成的区间内。

颗粒物 CEMS 相关校准时，应协调和记录参比方法取样和颗粒物 CEMS 操作的开始和停止的时间。对于间歇取样和测量的颗粒物 CEMS，参比方法取样时间应和颗粒物 CEMS 的取样时间同时开始。必要时，应标记并记录参比方法取样孔改变的时间和参比方法被暂停的时间，以便相应的调整颗粒物 CEMS 的数据，分析颗粒物 CEMS 的相关校准操作。

（1）具有自动校准功能的系统，应不超过 24h 自动检测一次系统零点和量程，此期间的零点和量程漂移应符合：不超过±2%满量程。

（2）手动校准的系统，应不超过 15 天用校准装置校正系统的零点和量程，此期间的零点和量程漂移也应符合：不超过±2%满量程。

（3）不超过 1 个月更换一次空气过滤器。

（4）不超过 3 个月清洗一次隔离烟气与光学探头的玻璃视窗，检查一次系统光路的准直情况。

18.3.3 气态污染物（含 O_2）CEMS 比对监测

气态污染物 CEMS 的比对监测根据使用手工测量仪器设备和监测分析方法的不同，一般有两种方式，分别是通过烟气采样器采样-化学分析（分光光度法等）的方法和使用便携烟气分析仪现场直接测量的方法。

18.3.3.1 CEMS 比对监测技术指标要求

CEMS 比对监测技术指标要求　　表 18-6

检测项目			技术要求
颗粒物 CEMS	颗粒物	准确度	排放浓度>200mg/m³ 时，相对误差不超过±15%
			100mg/m³<排放浓度≤200mg/m³，相对误差不超过±20%
			50mg/m³<排放浓度≤100mg/m³，相对误差不超过±25%
			20mg/m³<排放浓度≤50mg/m³，相对误差不超过±30%
			10mg/m³<排放浓度≤20mg/m³，绝对误差不超过±6mg/m³
			排放浓度≤10mg/m³，相对误差不超过±5mg/m³
气态污染物 CEMS	二氧化硫	准确度	排放浓度>250μmol/mol(715mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(143mg/m³)≤排放浓度<250μmol/mol(715mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(57mg/m³)
			20μmol/mol(57mg/m³)≤排放浓度<50μmol/mol(143mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度<20μmol/mol(57mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(17mg/m³)
	氮氧化物	准确度	排放浓度>250μmol/mol(513mg/m³)时，相对准确度≤15%
			50μmol/mol(103mg/m³)≤排放浓度<250μmol/mol(513mg/m³)时，绝对误差不超过±20μmol/mol(41mg/m³)

续表

检测项目			技术要求
气态污染物 CEMS	氮氧化物	准确度	20μmol/mol(41mg/m³)≤排放浓度<50μmol/mol(103mg/m³)时，相对误差不超过±30%
			排放浓度<20μmol/mol(41mg/m³)时，绝对误差不超过±6μmol/mol(12mg/m³)
	其他气态污染物	准确度	相对准确度≤15%
氧气 CMS	O_2	准确度	>5.0%时，相对准确度≤15%
			≤5.0%时，绝对误差不超过±1.0%
流速 CMS	流速	准确度	流速>10m/s 时，相对误差不超过±10%
			流速≤10m/s 时，相对误差不超过±12%
温度 CMS	温度	准确度	绝对误差不超过±3℃
湿度 CMS	湿度	准确度	烟气湿度>5.0%时，相对误差不超过±25%
			烟气湿度≤5.0%时，绝对误差不超过±1.5%

注：氮氧化物以 NO_2 计，以上各参数区间划分以参比方法测量结果为准。

18.3.3.2 烟气采样器采样化学分析法

(1) 方法原理

通过采样管将气样抽入到装有吸收液的吸收瓶或装有固体吸附剂的吸附管、真空瓶、注射器或气袋中，经化学分析或仪器分析得出污染物含量。

(2) 测量步骤

1) 吸收瓶、吸附管、真空瓶、注射器或气袋，按实验室化学分析操作要求进行准备，并用记号笔进行样品编号。

2) 用连接管将吸收瓶、吸附管、真空瓶、注射器或气袋与烟气采样器连接，连接管应尽可能短。当烟气中气态污染物浓度较高时应考虑串联吸收瓶和吸附管。当吸收液温度较高而对吸收效率有影响时应将吸收瓶放人冷水槽中冷却。

3) 采样管出口至吸收瓶或吸附管之间连接管要用保温材料保温，当管线长时需采取加热保温措施。

4) 用活性炭、高分子多孔微球作吸附剂时，如烟气中水分含量体积百分数大于 3%，为了减少烟气水分对吸附剂吸附性能的影响，应在吸附管前串接气水分离装置，除去烟气中的水分。

5) 打开采样管加热电源，将采样管加热到所需温度。

6) 接通采样管路，置换吸收瓶前采样管路内的空气，调节所需要的采样流量进行采样，采样期间应保持流量恒定，波动应不大于±10%。采样时间视待测污染物浓度而定，但每个样品采样时间一般不少于 10min。

7) 采样结束，切断采样管至吸收瓶之间气路，防止烟道负压将吸收液与空气抽入采样管。

8) 采集的样品应放在不与被测物产生化学反应的容器内储存，容器要密封并注明样品号后，送实验室用分光光度计分析。

采用烟气采样器采样-化学分析方式的比对监测其采样环节的基本要求与前一节“烟尘采样器”采样质控要求基本类似，一般也需要注意采样点选择、采样系统的气密性、吸收液或吸附管的准备等环节。采集后的样品分析则需要在实验室使用表 18-2 中的相关污染物标

准分析方法完成。

18.3.3.3 便携烟气（电化学、光学）分析仪现场直接测量法

采用便携烟气分析仪现场直接测量方式的比对监测由于其操作方便、数据准确并能实现在比对监测现场直接读数比较，因此目前在国内污染源比对监测中得到广泛的应用，一般使用较多的便携现场烟气分析仪采样的方法原理为电化学法（定电位电解法）和光学法（红外或紫外吸收光谱或激发光谱方法）。

（1）方法原理

通过采样管、颗粒物过滤器和除湿器（制冷器），用抽气泵将样气送入分析仪器中，通过定电位电解或光谱测量直接显示被测气态污染物的含量。

（2）测定步骤

1）检查并清洁采样预处理器的颗粒物过滤器、除湿器和输气管路，必要时更换滤料。

2）连接采样管、采样预处理器和检测仪的气路和电路。

3）连接管线要尽可能短，当使用较长管线时应注意防止样气中水分冷凝，必要时应对管线加热。

4）将采样管置于环境空气中，接通仪器电源，仪器自检并校正零点后自动进入测定状态。

5）将采样管插入烟道中，将采样孔堵严使之不漏气，抽取烟气进行测定，待仪器读数稳定后即可记录（打印）测试数据。

6）测定结束后，将采样管从烟道取出置于环境空气中，抽取干净空气直至仪器示值回零后关机。

（3）比对监测过程需要注意的环节如下：

1）采样点位选择

气态污染物 CEMS 比对监测中手工参比测试的采样点位是单点采样（与气态污染物 CEMS 相同），点位的选择相比颗粒物采样简单。烟囱或烟道内的气态污染物一般认为是混合均匀的，因此其比对监测手工参比方法采样点应选择距离气态污染物 CEMS 采样点尽量接近（不能重合），并位于 CEMS 取样点的下游；同时应根据 CEMS 气态污染物采样枪的长度情况尽量使手工比对采样枪的前端接近烟囱或烟道的中心点。如果气态污染物与颗粒物采样同时进行，则气态污染物采样点应尽量选择位于颗粒物手工参比方法测试孔上游。

2）样品数量和比对测试时间

① 比对测试样品数量

按照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 中有关 CEMS 比对监测的要求，气态污染物 CEMS 比对监测样品数量为至少 6 对，也就是手工参比采样测试与气态污染物 CEMS 在同一时间段内各自测试至少 6 个样品进行比对。

② 每个比对测试样品的测试时间

气态污染物 CEMS 的比对监测，每个比对样品的测试时间没有具体规定，一般来说在检测现场，从比对监测数据的有效性、可比性以及比对监测的工作量、参比仪器设备状态和寿命等方面的因素考虑，如果该污染源气态污染物排放情况较为稳定，一般选择控制每个比对样品的比对测试时间为 5min 左右；整个气态污染物 CEMS 的比对监测时间控制在 1h 以内。

当该比对测试现场污染源排放污染物浓度波动较大时，CEMS 仪器与便携仪器之间可能出现同时测试，但测量结果变化不一致的情况；这时如果选择每个样品比对测试时间过

短，则很有可能出现由于测试时间问题导致手工参比烟气分析仪测试数据与 CEMS 测试数据比对不合格的误判情况。主要原因是：参比仪器测量方法与 CEMS 仪器测量方法比对测试由于其内部测试原理不同、采样流量不同、导气管线长度不同，造成对气态污染物测量的响应时间不同。因此当污染物排放浓度波动幅度较大时，这种响应时间不同对比对测试结果的影响就会非常明显，再加之烟囱或烟道内的烟气并不是完全混合均匀且排放浓度也在不断变化，比对时间太短将有可能导致对比对测试不合格的误判。所以这种情况下应适当加长每个样品的比对监测时间。然而如果比对时间太长，一是增加比对监测的工作量和工作时间，二是对手工参比便携现场监测仪器设备的寿命和使用状态将有不利的影响。

3）采样探头和导气管线

按照《固定污染物排气中颗粒物测定与生态污染物采样方法》GB 16157—1996 的要求，烟气测试便携监测仪器的采样管和连接导气管应该具备加热保温功能，以防止采集的气体中的水分在管路中冷凝从而导致测试误差。目前手工参比使用的便携现场监测仪器，不论电化学法仪器还是光学法的仪器均配备有符合标准要求的可加热保温采样探头、连接导气管和一般的简易采样管。

在实际操作中，可加热保温的采样探头、导气管一般体积比较大，比较笨重，且加热控温时间较长。因此，如果烟气采样管全部插入烟囱或烟道内，且连接烟气分析仪（一般可连接除湿装置）的导气管长度较短，能够很快将烟气导入烟气分析仪，这时可根据现场检测的实际情况，采用一般的简易采样管（枪）；而对于手工参比测试采样管线较长（例如参比烟气便携分析仪无法搬到较高的测试平台上；或者有些地方污染源监测已经使用了污染源监测车，参比烟气分析仪器固定在车上等）时，则必须使用具有加热保温功能的采样探头和加热保温的导气管线，从而减少由于气体水分冷凝造成的待测污染物损失，从而引起的比对监测数据偏差。便携烟气分析仪采用的采样管和连接导气管材料必须是不吸附也不与烟气中的气态污染物（SO_2、NO_x）发生化学反应的材料，一般使用特氟龙管。

4）过滤和除湿

过滤装置和除湿装置是保证手工参比便携烟气分析仪正常工作的两个重要部件。

过滤装置主要是为了防止颗粒物进入测量仪器（污染测试单元），一般在采样探头前端或后端安装颗粒物过滤装置，有些仪器在除湿后进入检测单元前还有一级细颗粒物过滤器以保护分析测试单元（传感器或检测池），注意这些过滤材质必须是不吸附也不与烟气中的气态污染物（SO_2、NO_x）发生化学反应的材料，过滤部件是便携烟气分析仪的日常消耗材料，发现过滤器滤芯变色或经过长期多次使用后应该定期检查、及时更换。

除湿装置是为了脱除烟气中水分，避免水汽直接进入分析测试单元，干扰影响测试或损坏测试元件（干扰气体测试/腐蚀测试单元），且经过除湿脱水后测得的气态污染物的浓度是参比测试烟气的干基浓度，转化到标态后可直接用于 CEMS 比对监测的数据比对分析。依据烟气中绝对含湿量的由小到大变化，可逐级采用自然空气冷却、气水分离冷却（<7%）、电子或机械冷却（>7%）等除湿脱水方式。另外，CEMS 比对监测时应注意参比仪器的除湿后冷凝水的排放情况，及时采取手动或自动方式排出冷凝水，以避免水分储满后进入分析测试单元造成仪器损坏。

5）流量控制

“烟气分析仪（电化学/光学）采样流量的变化对测试气体污染物浓度结果将有一定的影响”。因此，气态污染物 CEMS 比对监测过程中一定要注意采样流量的稳定情况。

参比烟气分析仪器中一般均有自己的采样流量控制单元（例如采用限流孔、压力调节阀

等），容易引起采样流量变化的因素主要是烟囱或烟道内的压力变化。烟道内的微正压或负压对参比仪器的流量控制单元影响不大，仪器本身可正常控制调节。如果长期处在较大正压条件下采样，仪器的流量控制单元就必须长时间满负荷工作控制流量，这个流量控制元件本身也是仪器的耗材（有使用寿命），久而久之就逐步失去对流量的控制，导致测试结果的变化，这时就需要及时更换流量控制元件。相反，如果仪器处在较大的负压条件下采样，仪器的抽气泵抽气能力不够不能正常工作（抽不出足够的烟气），测试结果同样不准确，无法进行比对。

对于污染源现场烟囱或烟道内负压较大的情况，可以采取在便携烟气分析仪器前加装独立的抽气泵和缓冲器（瓶）的方法，具体加装流程见图 18-2。按照图 18-2 的流程可以保证便携烟气分析仪在正常的压力和采样流量下工作，既克服了可能由于烟道负压大抽气不足的问题，又对烟气分析仪的流量控制单元进行了有效保护，提高了其使用寿命。但由于加装的抽气泵没有任何保护而直接面对湿烟气，因此这种连接流程仅适用于 CEMS 比对等短期的污染源现场监测工作。

应注意两点：一是缓冲器（瓶）体积不能太大，否则烟气浓度变化时在缓冲器（瓶）内混合时间较长，分析仪器响应不明显；二是这样连接前端的隔膜在烟气湿度较大时容易腐蚀损坏，而且各连接管线应尽量缩短。

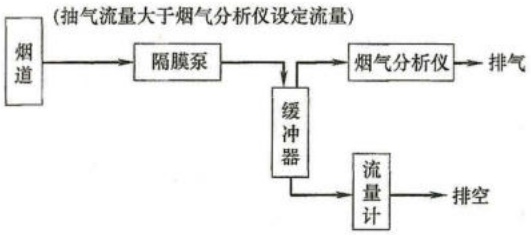


图 18-2 烟囱或烟道负压较大时建议加装抽气泵及缓冲器（瓶）的连接流程

6）现场比对情况分析

气态污染物 CEMS 比对监测，一般现场使用参比便携烟气分析仪（电化学/光学）进行比对的均可实现在比对监测现场直接读数，也就是说可以在检测现场通过简单计算同时间段参比数据与 CEMS 数据的相对或绝对误差来对比对监测结果进行一个初步判定。

如果比对结果不符合指标要求，首先应该检查参比仪器测量质控过程，以确保手工参比测试数据的准确可靠，避免由于自身过失造成错误的判定。

① 参比测试采样点位置是否合理，与 CEMS 烟气采样点进行比对监测是否有可比性，是否符合点位要求。

② 比对监测中参比测试与 CEMS 测试获取数据同步性变化情况。

如果该比对监测污染源排放污染物浓度变化比较剧烈，则可能是时间同步性相差较大，样品比对测试时间较短，可加长样品比对测试时间重新进行比对。

③ 标准气体校准的一致性。

参比测试仪器与 CEMS 仪器如果采用不同厂家生产的标气进行校准，可能会由于标准配置本身的误差（2%）造成校准的系统误差，可考虑参比便携仪器和 CEMS 用同一标气重新进行标定再进行比对。

④ 观察比对监测数据中双方烟气污染物测试中 O_2 含量的数据，如果参比测量 CEMS 测量的含氧量差别较大（一般是绝对误差超过 0.5%，甚至 1%左右），应该高度怀疑有一方

有漏气，数据中测试含氧量高而 SO_2、NO 浓度低的一方应检查漏气的情况和漏气点并进行修复抽取重新比对。

⑤ 观察比对监测数据，如果 SO_2 比对浓度数据差别较大（不合格），则参比测试或 CEMS 测试浓度较低的一方可能是系统中管路、冷凝水、过滤装置对烟气中的 SO_2 有吸附造成 SO_2 损失，这时对较低的一方应该进行从采样探头通标气的全过程系统校准以去除测试过程中的 SO_2 损失，并重新比对。

⑥ 观察比对监测数据，如果 NO 比对数据差别较大，则参比或 CEMS 测试浓度较高的一方可能是系统中除湿脱水装置的除水效果不理想，导致少部分水汽进入分析测试单元，水汽对 NO 的测试结果可能造成正干扰（尤其是光学法的参比仪器），导致测量结果偏高。

⑦ CEMS 比对测试过程中，如参比测试气态污染物 SO_2、NO 数据突然升高或降低，则有可能是参比测试采样流量（抽气量）受压力变化影响而发生变化。这时应检查系统压力稳定性，必要时加装抽气泵和缓冲器（瓶）。

⑧ 如果排除了参比测试系统和 CEMS 系统的全部可能出现的问题，气态污染物 SO_2、NO 比对数据始终有恒定的或有规律的偏差，则也有可能是由于参比测试方法、便携仪器与 CEMS 的测试原理上的差别造成的比对测试系统误差。这时可从软件上进行相关设置调整，调整的过程和数据应到当地环保主管部门备案，便于以后的核查。

综上，现场 CEMS 比对监测中气态污染物的现场测试会遇到很多种情况，上述的例子仅是其中常见的一部分，这些事件的分析和判断将为有效提高 CEMS 比对监测的质量和工作效率起到重要作用。

18.3.3.4 气态污染物（含 O_2）CEMS 比对监测数据处理

气态污染物 CEMS 的比对监测数据处理过程与上述颗粒物 CEMS 的处理过程步骤相同，最终需要取参比方法与 CEMS 在同一时间段同一状态下的测试数据进行比较，对照技术要求中不同分段，计算比对数据的绝对误差、相对误差或相对准确度。相对准确度的计算复杂一些，举两个例子说明如下。

（1）案例二：SO_2CEMS 比对监测

SO_2CEMS 比对监测数据结果见表 18-7。

CEMS 比对监测数据处理示例 **表 18-7**

样片编号	时间(时、分)	参比方法(mg/m^3)	CEMS 法(mg/m^3)	相对误差(%)
1	10：40	135	132.69	−1.71
2	10：43	132	119.05	−9.81
3	10：47	131	124.96	−4.61
4	10：50	134	136.6	1.94
5	10：53	138	143.15	3.73
6	10：57	140	147.46	5.33
7	11：02	128	117.85	−7.93
8	11：07	126	119.31	−5.31
9	11：10	129	127.00	−1.55
均值		133	129.79	−2.41

注：CEMS 原理非分散红外吸收；污染物名称 SO_2；计量单位 ppm（10^{-6}）。

本案例中：SO_2 CEMS 比对监测共取得同一时间段 SO_2 比对数据 9 对；“参比方法测量

平均值”数据为133mg/m^3；由于“参比方法测量平均值”20μmol/mol（57mg/m^3）≤数据＜50μmol/mol（143mg/m^3），应计算相对误差指标进行考核，判断是否符合要求。

（2）案例三：NO_x CEMS比对监测

NO_x CEMS比对监测数据结果见表18-8。

NO_x CEMS比对监测数据处理示例 **表18-8**

样片编号	时间(时、分)	参比方法(mg/m^3)	CEMS法(mg/m^3)	绝对误差(mg/m^3)
1	10：40	255	261.29	2.47
2	10：43	259	266.42	2.86
3	10：47	266	287.95	8.25
4	10：50	270	288.64	6.90
5	10：53	269	281.72	4.73
6	10：57	267	276.89	3.70
7	11：02	264	261.59	−0.91
8	11：07	273	294.06	7.71
9	11：10	274	297.10	8.43
均值		266	279.52	5.08

本案例中：NO_x CEMS比对监测共取得同一时间段NO_x比对数据9对；“参比方法测量平均值”数据为266mg/m^3；“CEMS测量平均值”数据为279.52mg/m^3；两者为同一时间段同一状态下的比对数据，可进行比较，计算相对误差，判断是否符合要求。

注意：“参比方法测量平均值”数据是用来判断执行哪一段的标准进行考核，本案例中应执行“50μmol/mol（103mg/m^3）≤排放浓度＜250μmol/mol（513mg/m^3）时，绝对误差不超过±20μmol/mol（41mg/m^3）”的考核标准。

（3）案例四：O_2 CEMS比对监测

O_2 CEMS比对监测数据结果见表18-9。

O_2 CEMS比对监测数据处理示例 **表18-9**

样片编号	时间(时、分)	参比方法(%)	CEMS法(%)	相对准确度(%)
1	10：40	10.5	11.55	7.73
2	10：43	10.2	10.96	
3	10：47	10.1	10.68	
4	10：50	10.1	10.63	
5	10：53	10.3	10.73	
6	10：57	10.3	10.80	
7	11：02	11.3	12.14	
8	11：07	11.2	10.85	
9	11：10	11.1	10.80	
均值		10.6	11.02	

本案例中：O_2 CEMS比对监测共取得同一时间段O_2比对数据9对；“参比方法测量平均值”数据为10.6%；“CEMS测量平均值”数据为11.02%；两者为同一时间段同一状态下的比对数据，可进行比较，计算相对误差，判断是否符合要求。

注意："参比方法测量平均值"数据是用来判断执行哪一段的标准进行考核，本案例中应执行"＞5.0%时，相对准确度≤15%"的考核标准。

气态污染物 CEMS（含 O_2）的质量保证：

对于完全抽取式和稀释抽取式气态污染物 CEMS，进行零点和量程校准时，原则上要求零气和标准气体与样品气体通过的路径（如：采样管、过滤器、洗涤器、调节器）相同。

对于直接测量式气态污染物 CEMS，当进行零点和量程校准时，原则上要求导入流动零气和标准气体进行校准：

1）不超过 15 天用零气和高浓度标准气体和校准装置校准一次系统零点和量程，此期间的零点和量程漂移应符合：不超过±2.5%满量程。

2）不超过 3 个月更换一次采样探头滤料，不超过 3 个月更换一次净化稀释空气的除湿、除尘等的材料。

3）必须使用在有效期内的标准物质。

4）必须每天放空空气压缩机内冷凝水。

5）不超过 3 个月清洗一次隔离烟气与光学探头的玻璃视窗，检查一次系统光路的准直情况。

18.3.4 烟气流速、温度 CEMS 比对监测

烟气流速、温度 CEMS 的比对监测同样也是通过手工参比测试仪器在污染源现场进行测试比较的方式完成。其中烟气流速的手工参比测试方法一般采用 S 形皮托管法，烟气温度的手工参比测试方法一般采用热电偶法或钼电阻法。由于污染源颗粒物的采样一般采用等速跟踪方法，也就是颗粒物的采集过程中也必须实时测量并跟踪烟气流速，因此目前国内普遍使用的烟尘采样器均配置使用组合式的采样管，即在颗粒物采样嘴旁边连接烟气流速测量皮托管开口和温度检测装置，从而实现了烟气流速、温度测量和颗粒物采样的同时进行，这样烟气流速和烟气温度 CEMS 的比对监测与颗粒物 CEMS 的比对监测可同时进行。

18.3.4.1 测试点位和时间

（1）测试点位

烟气流速、温度参比测试的测试点位布设与颗粒物的参比采样完全相同，手工烟气流速和烟温参比测试的结果也是烟囱或烟道整个断面的平均值（与 CEMS 不同，CEMS 一般是点或线测量值）。

（2）每一点的测试时间

如果烟气流速、温度参比测试与颗粒物参比采样同时进行，为节省工作量，那么烟气流速、温度参比测试每个点位的测试时间应与颗粒物采样时间相同；如果烟气流速、温度参比测试不与颗粒物参比采样同时进行（例如现场安装的 CEMS 没有颗粒物的监测因子），则烟气流速、温度参比测试每个点位的测试时间应依据现场情况和操作经验确定，一般为 1≈3min。

18.3.4.2 样品数量

按照《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》（HJ 75—2017）中有关 CEMS 比对监测的要求，烟气流速、温度 CEMS 比对监测样品数量为至少 3 对（与颗粒物相同），也就是手工参比采样测试与 CEMS 在同一时间段内各自测试至少 3 个样品进行比对。

18.3.4.3 流速测量皮托管系数

烟气流速测量S形皮托管法的测量原理是通过测量烟囱或烟道中烟气的全压和静压的压差来计算出烟气流速。由于背向气流方向的开口测量的烟气静压小于烟气的实际静压值，因此S形皮托管法需要使用皮托管系数设置来修正。

S形皮托管皮托管系数：符合标准加工要求的新S形皮托管相对于标准L形皮托管其皮托管系数（修正系数）一般为0.84±0.01；皮托管管口的磨损、变形或者堵塞都可能对皮托管系数的数值造成影响。污染源现场比对参比测试过程中，应注意相关规范操作，尽量避免和减少S形皮托管开口端包括整个采样枪前段的磕碰、磨损，避免皮托管开口端的变形；同时在每次使用后通过手工反吹防止皮托管口堵塞。另外，如果一根手工采样皮托管长期使用后，应定期到相关具备皮托管校准能力和资质的检测机构进行皮托管系数的检验和测试。

18.3.4.4 流速测量皮托管方向

烟气流速测量皮托管的方向：按照GB 16157—1996要求，皮托管全压测孔开口应正对气流方向，偏差不超过10°。如果使用组合式采样枪，那么颗粒物采样嘴的方向应与S形皮托管全压测孔开口方向保持一致，正对气流方向。

18.3.4.5 烟温测量方式

烟气温度的测量技术比较成熟，手工参比测试测量的是烟囱或烟道断面的平均烟气温度。目前使用的参比仪器烟尘采样器测试烟温，一般具备两种模式：一是采样前用烟枪测量烟温并输入固定在仪器中，这种模式下每个样品采集过程中是不测烟温的（烟温数值不变）；二是样品采集过程中实时的测量烟气温度变化值，待每个样品采集完成后，仪器自动给出每个样品采样测试过程的平均烟温值。

在CEMS比对监测中，这两种模式的使用对烟温的测量比对可能会造成比较大的影响。一般情况下，烟气温度CEMS比对监测中，应尽量使用后一种模式，即实时的采集测量烟温值，计算平均烟温，这样能真正反映烟温的变化而且与CEMS测量同步，可比性较强，尤其是针对烟囱或烟道内烟气温度波动较大的污染源必须采用实时测试的模式。

而对于前一种测量并固定输入的模式在某些情况下也是可以使用的，例如说有些高度较高的烟道参比测试孔较多（单侧8～10个孔），采集测试一个样品时，采样枪需要在多个测试孔之间拔插来回移动，这样采样温度测量过程就可能经过“烟道内加热-烟道外空气冷却—烟道内加热-烟道外空气冷却-……”的过程，很明显这时如果烟温采用实时测量的模式很可能造成对比测量结果的误差。在这种情况下，可以采取两种方式：一是如果烟道内的烟温比较稳定，可以采用测量并固定输入的模式；二是如果烟道内的烟温变化波动较大，就应该采用实时测量的模式，但是针对烟温的比对应加长在每个测试点的停留时间，以消除或减少测量操作移动采样枪过程中对烟温对比测试产生的误差。如果污染源现场烟囱或烟道的尺寸较大或排放情况比较复杂，烟气温度CEMS的比对监测可与流速、颗粒物CEMS的比对分割开来，独立完成。

18.3.4.6 现场比对情况分析

烟气流速和烟气温度CEMS比对监测的参比测试一般是同颗粒物的采样同时进行，但不同的是烟气流速和温度手工参比测试结果可以在污染源比对监测现场直接读出参比测试同时间段内的烟气流速和烟气温度断面平均值，那么也就是说可以在检测现场通过简单计算同时间段参比数据与CEMS数据的相对或绝对误差来对比对监测结果进行一个初步判定。

如果比对结果不符合指标要求，首先应该检查参比仪器测量质控过程，以确保手工参比测试数据的准确可靠，避免由于自身过失造成错误的判定。

（1）参比测试测量点位置是否合理，与 CEMS 烟气测量点比对监测是否具有可比性，是否符合点位要求。

关于烟气流速 CEMS 的比对，有可能存在参比测试测量点与 CEMS 测试测量点不在同一断面的情况，这时应注意烟囱或烟道不同断面烟道截面积在比对计算中的影响，如果截面积大小不同应按 HJ 76 标准要求扣除。

关于烟气温度 CEMS 的比对，应选择参比测量断面与 CEMS 测量点尽量接近，因为如果两者相距较远，烟道内的烟温有可能发生变化。

虽然颗粒物、烟气流速、烟气温度 CEMS 可以同时进行测量比对，但有些现场条件不满足要求时，也应采取分开分别测量比对的方式。

（2）速度场系数的影响烟气流速 CEMS 的比对监测中参比方法测量的是整个烟囱或烟道断面的平均流速，而 CEMS 测量的是烟囱或烟道中某一点或一条线上的流速，断面平均流速与点或线流速的数值之间一般是不会完全相同的，两者往往存在着正比例线性关系，这个比例系数称为速度场系数。

流速 CEMS 的校准工作应该是在 CEMS 验收前的调试检测中完成，有关流 CEMS 调试检测的内容和操作可参见《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017 标准中相关规定。速度场系数确定后，应输入到 CEMS 软件的过程参数设置中，并定期检查和校验。烟气流速 CEMS 比对监测不合格很可能受到速度场系数的影响，速度场系数（未做、未输入或条件变化使系数变化等）一旦不准确，应尽快重新校准校验速度场系数后方可再次进行流速 CEMS 的比对监测。

（3）烟气流速较低的情况（＜5m/s）流速 CEMS 比对监测过程中，当烟囱或烟道中烟气流速较低（＜5m/s）时，这时参比仪器皮托管差压传感器测试灵敏度下降，这样会导致比对测试系统误差增大。目前由于受到手工参比仪器设备的局限还没有比较理想的解决方法，一般的做法是在同一个污染源烟囱或烟道上尽量找到符合要求但烟道截面积相对较小的断面，使烟气流速增大，重新开展流速 CEMS 比对监测。

18.3.4.7　烟气流速、温度 CMS 比对监测数据处理

烟气流速和烟温 CMS 的比对监测数据处理过程与上述颗粒物的处理过程步骤相同，最终需要取参比方法与 CMS 在同一时间段同一状态下的测试数据进行比较，对照技术要求中不同分段，计算流速比对数据的相对误差和烟温比对监测数据的绝对误差。

（1）案例五：烟气流速 CMS 比对监测

烟气流速 CMS 比对监测数据结果见表 18-10。

烟气流速 CMS 比对监测数据处理示例　　**表 18-10**

样片编号	时间(时、分)	参比方法(m/s)	CEMS 法(m/s)	相对误差(%)
1	08：30	17.9	18.90	5.59
2	09：00	18.0	19.08	6.00
3	09：30	17.9	18.62	4.02
4	10：00	18.2	19.02	4.51
5	10：30	17.3	18.08	4.51
均值		17.9	18.74	4.69

本案例中：流速 CMS 比对监测共取得同一时间段烟气流速比对数据 5 对；5 个手工参比方法流速测试数据的平均值为 17.9m/s（实测值）；5 个 CMS 流速测试数据的平均值为

18.74m/s（实测值）；两者为同一时间段同一状态下的比对数据，可进行比较，计算相对误差，判断是否符合要求。

注意：手工参比方法流速测试数据的平均值数据是用来判断执行哪一段的标准进行考核，本例中，应执行“流速＞10m/s时，相对误差不超过±10%”的考核标准。

（2）案例六：烟气温度CMS比对监测

烟气温度CMS比对监测数据结果见表18-11。

烟气温度CMS比对监测数据处理示例　　表18-11

样片编号	时间(时、分)	参比方法(℃)	CEMS法(℃)	绝对误差(℃)
1	08：30	197.4	196.05	−1.35
2	09：00	197.5	196.52	−0.98
3	09：30	196.8	197.52	0.72
4	10：00	198.3	197.70	−0.60
5	10：30	198.9	198.34	−0.56
均值		197.8	197.23	−0.57

本案例中：烟温CMS比对监测共取得同一时间段烟气温度比对数据5对；5个手工参比方法烟温测试数据的平均值为197.8℃（实测值）；5个CMS烟温测试数据的平均值为197.23℃（实测值）；两者为同一时间段同一状态下的比对数据，可进行比较，计算绝对误差，判断是否符合要求。

注意：手工参比方法温度测试数据的平均值数据是用来判断执行哪一段的标准进行考核，本例应执行“绝对误差不超过±3℃”的考核标准。

18.3.5 湿度测量的校准和比对

任何一种测量和控制都离不开标准，湿度也不例外。湿度测量主要关注测量的溯源性和不确定度问题，为检定和校准湿度计，必须有能够产生标准湿度源的装置及湿度的基准和标准。湿度的溯源性和湿度的基准及定义相联系，湿度测量的不确定度则和测量仪器和测量过程相关联。能够进行湿度的绝对测定（不是绝对湿度的测定）的湿度测定法就可作为湿度的基准。已知湿度的气体也可作为湿度的基准。

（1）湿度测量设备在出厂时已经进行了严格的校准和调整。运行一段时间后，根据现场的工况推荐校准周期为一个季度。实际情况下可以采用空气进行零点的单点校准。

（2）设备不在精度指标范围内时，必须进行有资质的实验室或便携式标准源头进行溯源校准。

烟气湿度仪在出厂以及返厂校验必须经过严格的检定以及使用一段时间进行校准，通常采用标准湿度发生器进行比对，同时烟气温度在50～200℃，因此对烟气湿度仪的校准必须在高温下进行。基于分流法标准湿度发生装置的工作原理，并结合镜面露点仪测量湿度的准确可靠性，研制出适用于实验室及现场使用的高温标准湿度发生器和便携式湿度发生器，以适应烟气湿度仪在不同场合的校准需求。

18.3.5.1 标准湿度发生校准装置

高温标准湿度发生校准装置由湿度发生单元、混合气储气单元和数据控制单元构成，用于高温标准湿气的发生，可作为湿度溯源校准其他湿度测量装置。湿度发生范围在0～32Vol%（体积百分比），发生湿气温度在50～180℃，可模拟发生湿法脱硫前后、垃圾焚烧

等不同污染源现场烟气湿度。同时采用数据控制软件进行任意湿度的配比，具有操作简单、重复性强的特点，图 18-3 为高温标准湿度发生校准装置及数据控制软件的外观图。

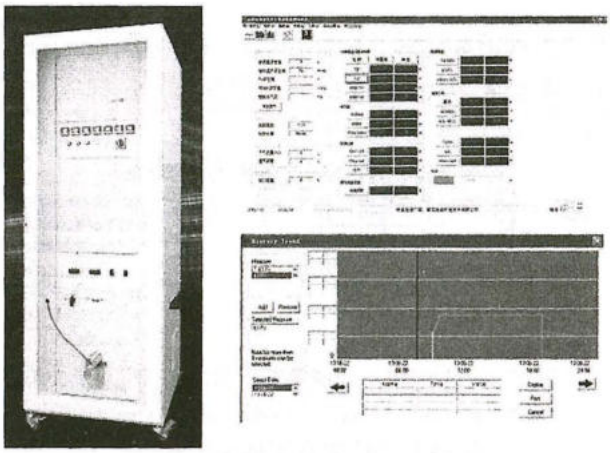


图 18-3　高温标准湿度发生校准装置准装置软件界面



图 18-4　PHG310 便携式高温湿度发生校准装置外观图

18.3.5.2　便携式高温湿度发生校准装置

PHG310 型便携式高温湿度发生校准装置能发生稳定标准的湿气环境来对湿度测量设备进行现场校准比对，可发生 0～15Vol%的湿气，满足烟气湿度仪低湿、中湿条件下的校准。

PHG310 便携式高温湿度发生校准装置采用一体化设计，现场适用性强，湿度发生响应速度快，具有智能化液晶显示界面，操作简单方便。图 18-4 为 PHG310 便携式高温湿度发生校准装置外观图。

案例七：烟气湿度 CMS 比对监测

烟气湿度 CMS 比对监测数据结果见表 18-12。

烟气湿度 CEMS 比对监测数据处理示例　　**表 18-12**

样片编号	时间(时、分)	参比方法(%)	CEMS 法(%)	相对误差(%)
1	08：00	09.9	09.35	−5.56
2	08：05	10.0	10.15	1.50
3	08：10	10.3	10.15	−1.46
4	08：15	10.5	11.55	10.0
5	08：20	10.2	9.42	−7.65
均值		10.2	10.1	−0.98

本案例中：烟气湿度 CMS 比对监测共取得同一时间段烟气湿度比对数据 5 对；5 个手工参比方法烟温测试数据的平均值为 10.2%；5 个 CMS 烟温测试数据的平均值为 10.1%；两者为同一时间段同一状态下的比对数据，可进行比较，计算相对误差，判断是否符合要求。

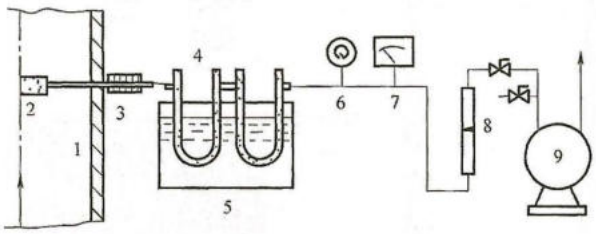
注意：手工参比方法烟气湿度测试数据的平均值数据是用来判断执行哪一段的标准进行

考核，本例中，应执行“烟气湿度>5.0%时，相对误差不超过±25%”的考核标准。

18.3.5.3 重量法

（1）测量原理

根据绝对湿度定义，由烟道内抽取一定体积的排气，通过冷凝和干燥剂吸收的方法，使排气中的水分分离出来，吸湿管内的增重除以湿气体积即为已知体积排气中的水分量。



1—烟道；2—过滤器；3—加热器；4—吸湿管；5—冷却水槽；6—真空压力表；7—温度计；8—转子流量计；9—抽气泵

图 18-5 重量法测定烟气湿度装置

（2）测量步骤

1）测试装置按流程图 18-5 连接好。

2）将粒状吸湿剂装入 U 形吸湿管或雪菲尔德吸湿管内，并在吸湿管进、出口两端填充少量玻璃棉，关闭吸湿管阀门，擦去表面的附着物后，用天平称重。

3）检查测试装置气密性。将吸湿管前的连接橡皮管堵死，开动抽气泵，至压力表指示的负压达到 13kPa，封闭连接抽气泵的橡皮管，如真空压力表的示值在 1min 内下降不超过 0.15kPa，则视为气密性良好。

4）将装有滤料的采样管由采样孔插入烟道中心后，封闭采样孔，对采样管进行预热。

5）打开吸湿管阀门，以 1L/min 流量抽气，同时记下采样开始时间。采样时间视排气的水分含量大小而定，采集的水分量应不小于 10mg。

6）记下流量计前气体的温度、压力和流量计读数。

7）采样结束，关闭抽气泵，记下采样终止时间，关闭吸湿阀门，取下吸湿管。

8）擦去吸湿管表面的附着物后，用天平称重。

（3）计算方法

排气中水分按公式（18-1）进行计算：

$$X_{sw}=\frac{1.24G_m}{V_d\left(\frac{273}{273+t_c}\times\frac{B_a+P_r}{101300}\right)+1.24G_m}\times 100 \tag{18-1}$$

式中 X_{sw}——排气中水分含量的体积百分数，%；

G_m——吸湿管吸收的水分重量，g；

V_d——测量状况下抽取的干气体积，$V_d\approx(Q_t'\times t)$，L；

Q_t'——转子流量计读数，L/min；

t——采样时间，min；

t_c——流量计前气体温度，℃；

P_r——流量计前气体压力，Pa；

B_a——大气压力，Pa；

1.24——在标准状态下，1g 水蒸气所占有的体积，L。

（4）实际应用中存在的问题

传统重量法测湿度优缺点：传统重量法原理成熟，测定结果重复性好、准确度高，国外也采用此方法作为湿度测量标准方法，如美国标准（EPA 方法）烟气湿度测定和英国标准（BS EN 14790：2005）固定污染源——烟道水分测量方法均规定采用重量法作为湿度测量方法，重量法被认为是最权威、最经典的湿度测量方法。但重量法在实际操作过程中存在一定的局限性，如测量系统过于复杂、对测试人员操作要求高、结果计算烦琐、现场适用性差等。

（5）工作流程

从烟道中抽取一定体积的烟气排气，烟气排气先后通过冷凝器和吸湿管，使烟气中的水分先冷凝后吸附，根据冷凝排出的水量，加上吸湿剂吸附的水量，即为已知体积的烟气排气中含有的水分量。采用质量流量计实时采集烟气排气体积，根据含水量与采样体积换算成烟气含湿量。图 18-6 为便携式重量法烟气湿度测量设备流程图。

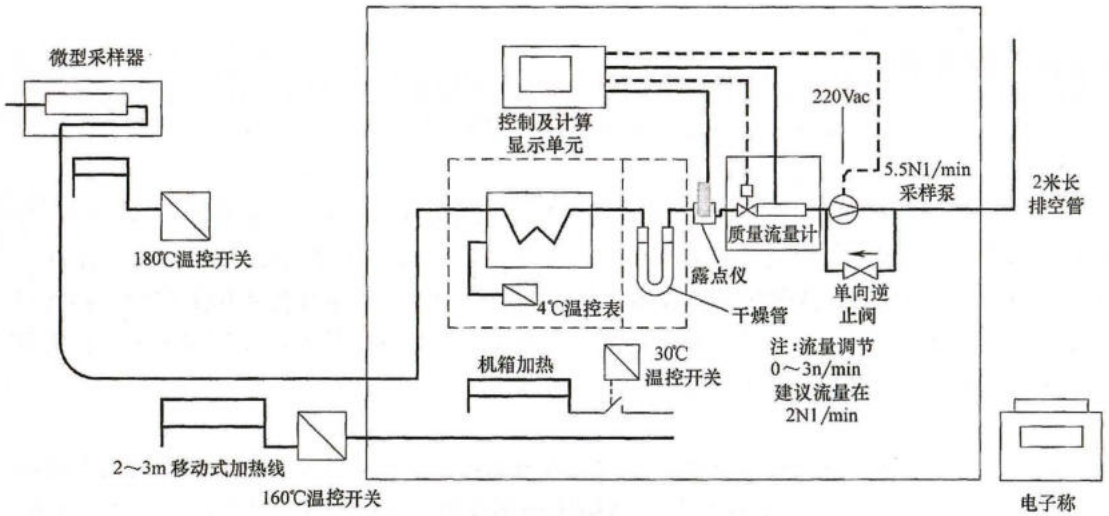


图 18-6　便携式重量法烟气湿度测量设备流程图

（6）设备构成

便携式重量法烟气湿度测量装置由气体采样设备、水气分离设备、气体体积测量、天平组成。图 18-7 为便携式重量法烟气湿度设备外观图。

采样部分采用传统的烟气采样设备，在采样探杆前端带有高温过滤器，可去除烟气中颗粒物、灰尘等杂志，采样探管带有加热或保温功能，防止烟气冷凝。整套采样设备采用额定温控控制，保证采集的样气灰尘完全过滤，且温度稳定在一定范围内。这样，采样设备能够应用于几乎所有烟气领域的湿度环境。

水气分离设备采用制冷设备代替传统重量法里的冰水混合制冷法，结构设计合理，性能上更稳定。采用冷凝器分离作为一级干燥，用于分离、储存在采样管、连接管和冷凝器中烟气冷凝下来的水。冷凝器制冷能力不小于 2L/min，制冷温度不高于 4℃，吸湿管作为二级干燥，管内装硅胶或氯化钙等干燥剂。两级干燥有效保证了完全去除烟气的水分，同时在干燥后面增加露点变送器监测分离后的气体湿度，保证水气分离的程度。从该套设备的使用情况来看，能够保证出口的露点温度稳定低于－15℃。

流量测量也区别于传统的测量方法。EPA-Method 4 中流量采用皮托管差压法进行测

量，该套设备采用了质量流量计，实时稳定地监测流量，所测流量为标准状态下的流量，并对流量信号进行采集，从而计算成采样的体积。



图 18-7 便携式重量法烟气湿度设备外观图

18.3.6 质量保证

18.3.6.1 CEMS 比对监测数据审核、报告和结果判定

（1）CEMS 比对监测数据的审核

CEMS 比对监测数据的审核是 CEMS 比对监测过程的最后一个质量控制环节，应按照各地不同环境监测部门各自的质量控制要求，根据 CEMS 比对监测前编制的《比对监测方案》，对本次 CEMS 比对监测的全部采样和测试原始记录、实验室准备和称重记录、参比仪器设备的校准和使用记录以及各种标准物质的使用情况、数据处理和汇总原始记录等进行详细的检查和校核，确保 CEMS 比对监测的全部数据质量。

（2）CEMS 比对监测报告

CEMS 比对监测数据审核合格后，可按照有效的比对监测数据出具针对该污染源 CEMS 的《比对监测报告》。报告内容应包括：污染源现场安装的 CEMS 基本情况（名称、型号、编号、生产单位、安装时间和具体位置以及系统的基本配置）、检测基本能情况（监测依据、项目、时间、使用仪器设备和标准物质等）、比对监测数据和结果（分项的检测结果和总体比对监测结论）。《CEMS 比对监测报告》应符合《国家重点污染源自动监控数据有效性审核办法》规定要求。

（3）CEMS 比对监测结果判定

按照 HJ 75—2017 标准的要求，CEMS 的比对监测结果必须全部符合 75 规范中表 2 准确度验收技术要求，有任意 1 项比对不符合要求应判定本次 CEMS 比对监测被检 CEMS 不合格。此时，应以参比方法监测数据代替 CEMS 数据作为该污染源进行环境管理和监督执法的依据，并要求相关责任单位（运营公司或供应商）对该 CEMS 进行检查、维护、校准或维修，直至调试至 CEMS 比对测试数据符合技术指标要求为止。

18.3.6.2 CEMS 比对监测全过程的质量保证和质量控制

CEMS 比对监测全过程的质量保证和质量控制主要包括 CEMS 比对监测的要求（人员、仪器设备和采样分析方法）、准备工作、现场检测操作、数据处理分析以及数据审核、结果判定和报告等。这个过程就是 CEMS 比对监测全过程的内部质量控制和质量保证过程。每一个质控环节的具体要求可参见本章的各节的具体内容。CEMS 比对监测全过程的质量保证和质量控制具体流程见图 18-8。

CEMS 比对监测是保证 CEMS 数据质量，提高 CEMS 数据使用效率的一个重要的外部质控手段，同时也是 CEMS 数据质量控制过程中最重要末端控制环节之一。因此，针对 CEMS 比对监测必须制定一套科学完备、行之有效的内部质量保证和质量控制（QA/QC）程序，以确保 CEMS 比对监测的各项操作规范和比对监测取得的全部数据有效，提高比对监测数据的可靠性，进而能够真实、准确地反映目前在用 CEMS 仪器设备的运行使用状态和数据质量状况。

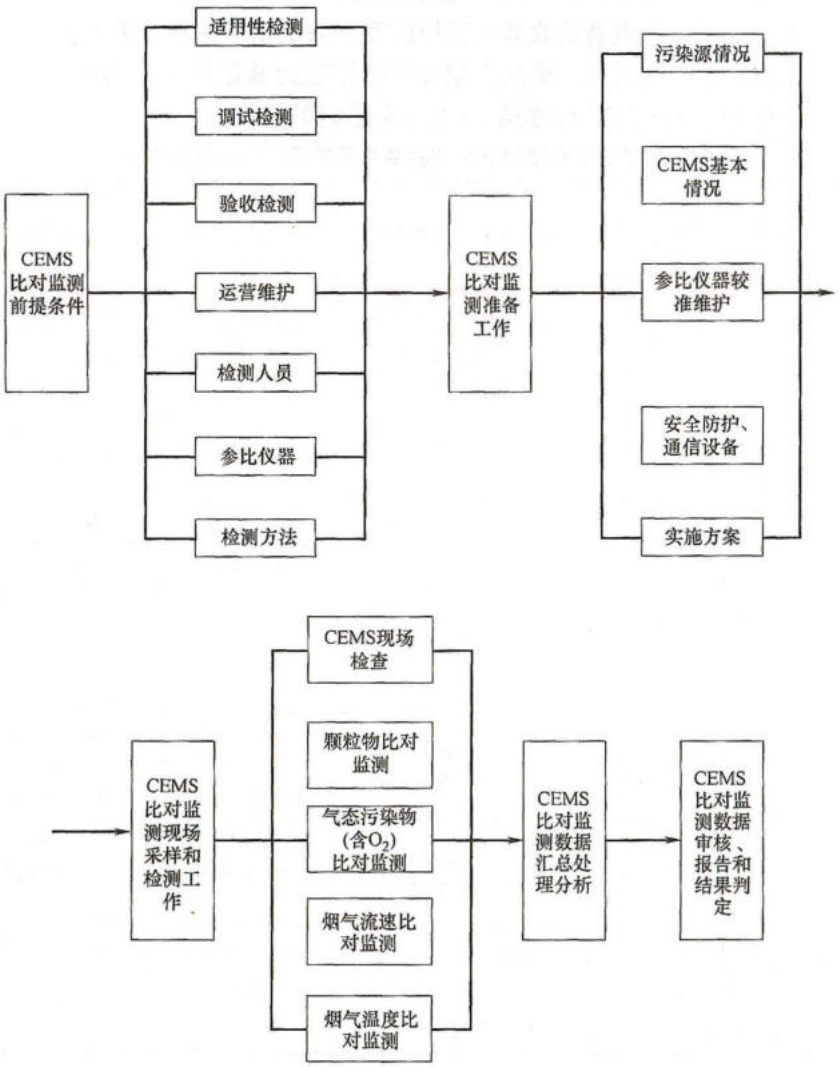


图 18-8　CEMS 比对监测全过程的质量保证和质量控制流程

18.3.6.3　CEMS 定期校验

CEMS 投入使用后，燃料、除尘效率的变化、水分的影响、安装点的振动等都会对测量结果的准确性产生影响。定期校验应做到：

（1）有自动校准功能的测试单元每 6 个月至少做一次校验，没有自动校准功能的测试单元每 3 个月至少做一次校验；校验用参比方法和 CEMS 同时段数据进行比对，按 HJ 75—2017 标准 9.3 进行。

（2）校验结果应符合 HJ 75—2017 标准表 4 要求，不符合时，则应扩展为对颗粒物

CEMS的相关系数的校正或/和评估气态污染物CEMS的准确度或/和流速CMS的速度场系数（或相关性）的校正，直到CEMS达到HJ 75—2017标准第9.3.8条的要求，方法见HJ 75—2017标准附录A；

（3）定期校验记录按HJ 75—2017标准附录G中的表G.5表格形式记录。

18.3.6.4 定期校准校验技术指标要求及数据失控时段的判别与修约

CEMS在定期校准、校验期间的技术指标要求及数据失控时段的判别标准见表18-13。当发现任一参数不满足技术指标要求时，应及时按照本规范及仪器说明书等的相关要求，采取校准、调试乃至更换设备重新验收等纠正措施直至满足技术指标要求为止。当发现任一参数数据失控时，应记录失控时段（即从发现失控数据起到满足技术指标要求后止的时间段）及失控参数，并按HJ 75—2017标准第12.2.3条进行数据修约。

CEMS定期校准校验技术指标要求及数据失控时段的判别　　表18-13

项目	CEMS类型		校准功能	校准周期	技术指标	技术指标要求	失控指标	最少样品数（对）
定期校准	颗粒物CEMS		自动	24h	零点漂移	不超过±2.0%	超过±8.0%	—
					量程漂移	不超过±2.0%	超过±8.0%	
			手动	15d	零点漂移	不超过±2.0%	超过±8.0%	
					量程漂移	不超过±2.0%	超过±8.0%	
	气态污染物CEMS	抽取测量或直接测量	自动	24h	零点漂移	不超过±2.5%	超过±5.0%	
					量程漂移	不超过±2.5%	超过±10.0%	
		抽取测量	手动	7d	零点漂移	不超过±2.5%	超过±5.0%	
					量程漂移	不超过±2.5%	超过±10.0%	
		直接测量	手动	15d	零点漂移	不超过±2.5%	超过±5.0%	
					量程漂移	不超过±2.5%	超过±10.0%	
	流速CMS		自动	24h	零点漂移或绝对误差	零点漂移不超过±3.0%或绝对误差不超过±0.9m/s	零点漂移超过±8.0%且绝对误差超过±1.8m/s	—
			手动	30d	零点漂移或绝对误差	零点漂移不超过±3.0%或绝对误差不超过±0.9m/s	零点漂移超过±8.0%且绝对误差超过±1.8m/s	—
定期校验	颗粒物CEMS			3个月或6个月	准确度	满足本75标准9.3.8	超过75标准9.3.8规定范	5
	气态污染物CEMS							9
	流速CMS							5

第五篇　相关法规

第 19 章　法律法规

19.1　法律法规

《中华人民共和国环境保护法》（自 2015 年 1 月 1 日实施）
《中华人民共和国大气污染防治法》（自 2016 年 1 月 1 日实施）
《中华人民共和国计量法》（自 2017 年 12 月 28 日实施）
《中华人民共和国环境保护税法》（自 2018 年 1 月 1 日起实施）
《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》（国发〔2016〕74 号）
《关于加快重点行业重点地区的重点排污单位自动监控工作》（环办环监〔2017〕61 号）
《关于深化环境监测改革提高环境监测数据质量的意见》（中共中央办公厅厅字〔2017〕35 号）
国家环境保护总局令 28 号《污染源自动监控管理办法》
《环境污染治理设施运营资质分级分类标准（试行）》
国家环境保护总局令第 20 号《环境污染治理设施运营资质许可管理办法》

19.2　规范性文件

《现场端信息系统运营服务认证实施规则》（CCAEPI-RG-ES-003-2021）
《固定污染源烟气排放连续监测系统运营服务认证实施规则》（CCAEPI-RG-ES-002-2021）
《环境服务认证-自动监控系统运营服务质量保证能力要求》（RJGF+302-2021）

第 20 章　技术规范

20.1　排放标准

《水泥工业大气污染物排放标准》GB 4915—2013
《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223—2011
《锅炉大气污染物排放标准》GB 13271—2014
《火葬场大气污染物排放标准》GB 13801—2015
《烧碱、聚氯乙烯工业污染物排放标准》GB 15581—2016
《生活垃圾焚烧污染控制标准》GB 18485—2014
《炼焦化学工业污染物排放标准》GB 16171—2012
《电镀污染物排放标准》GB 21900—2008
《合成革与人造革工业污染物排放标准》GB 21902—2008
《硝酸工业污染物排放标准》GB 26131—2010
《硫酸工业污染物排放标准》GB 26132—2010
《稀土工业污染物排放标准》GB 26451—2011
《钒工业污染物排放标准》GB 26452—2011
《平板玻璃工业大气污染物排放标准》GB 26453—2011
《陶瓷工业污染物排放标准》GB 25464—2010
《铝工业污染物排放标准》GB 25465—2010
《铅、锌工业污染物排放标准》GB 25466—2010
《铜、镍、钴工业污染物排放标准》GB 25467—2010
《镁、钛工业污染物排放标准》GB 25468—2010
《橡胶制品工业污染物排放标准》GB 27632—2011
《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》GB 28662—2012
《炼铁工业大气污染物排放标准》GB 28663—2012
《炼钢工业大气污染物排放标准》GB 28664—2012
《轧钢工业大气污染物排放标准》GB 28665—2012
《铁合金工业污染物排放标准》GB 28666—2012
《电子玻璃工业大气污染物排放标准》GB 29495—2013
《砖瓦工业大气污染物排放标准》GB 29620—2013
《电池工业污染物排放标准》GB 30484—2013
《锡、锑、汞工业污染物排放标准》GB 30770—2014
《石油炼制工业污染物排放标准》GB 31570—2015
《石油化学工业污染物排放标准》GB 31571—2015
《合成树脂工业污染物排放标准》GB 31572—2015

《无机化学工业污染物排放标准》GB 31573—2015
《再生铜、铝、铅、锌工业污染物排放标准》GB 31574—2015

20.2 监测方法标准

《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》GB/T 16157—1996
《气体分析 二氧化硫和氮氧化物的测定 紫外差分吸收光谱分析法》GB/T 37186—2018
《固定污染源废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法》HJ 38—2017
《固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法》HJ 57—2017
《环境空气和废气 氨的测定 纳氏试剂分光光度法》HJ 533—2009
《固定污染源废气 汞的测定 冷原子吸收分光光度法》HJ 543—2009
《固定污染源废气 氯化氢的测定 硝酸银容量法》HJ 548—2016
《环境空气和废气 氯化氢的测定 离子色谱法》HJ 549—2016
《固定污染源废气 二氧化硫的测定 非分散红外吸收法》HJ 629—2011
《固定污染源排气 氮氧化物的测定 酸碱滴定法》HJ 675—2013
《固定污染源废气 氮氧化物的测定 非分散红外吸收法》HJ 692—2014
《固定污染源废气 氮氧化物的测定 定电位电解法》HJ 693—2014
《固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法》HJ 732—2014
《固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法》HJ734—2014
《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》HJ 836—2017
《固定污染源废气 二氧化碳的测定 非分散红外吸收法》HJ 870—2017
《固定污染源废气 气态汞的测定 活性炭吸附/热裂解原子吸收分光光度法》HJ 917—2017
《固定污染源废气 一氧化碳的测定 定电位电解法》HJ 973—2018
《固定污染源废气 二氧化硫的测定 便携式紫外吸收法》HJ 1131—2020
《固定污染源废气 氮氧化物的测定 便携式紫外吸收法》HJ 1132—2020
《固定污染源排气中苯并（a）芘的测定 高效液相色谱法》HJ/T 40—1999
《固定污染源排气中石棉尘的测定 镜检法》HJ/T 41—1999
《固定污染源排气中氮氧化物的测定 紫外分光光度法》HJ/T 42—1999
《固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法》HJ/T 43—1999
《固定污染源排气中一氧化碳的测定 非色散红外吸收法》HJ/T 44—1999
《固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法》HJ/T 56—2000
《固定污染源排放 烟气黑度的测定 林格曼烟气黑度图法》HJ/T 398—2007

20.3 监测技术规范

《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范》HJ 75—2017
《污染物在线监控（监测）系统数据传输标准》HJ 212—2017
《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范（试行）》HJ/T 373—2007
《固定源废气监测技术规范》HJ/T 397—2007

20.4 监测仪器技术要求

《定电位电解法二氧化硫测定仪技术条件》HJ/T 46—1999

《烟气采样器技术条件》HJ/T 47—1999

《烟尘采样器技术条件》HJ/T 48—1999

《固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》HJ 76—2017

《环境空气和废气 挥发性有机物组分便携式傅里叶红外监测仪技术要求及检测方法》HJ 1011—2018

《环境空气和废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃便携式监测仪技术要求及检测方法》HJ 1012—2018

《固定污染源废气非甲烷总烃连续监测系统技术要求及检测方法》HJ 1013—2018

《固定污染源烟气（二氧化硫和氮氧化物）便携式紫外吸收法测量仪器技术要求及检测方法》HJ 1045—2019

参 考 文 献

第 2 章

[1] 张弛. 烟气连续监测系统关键技术的研究 [D]. 天津大学，2012.

[2] 汤光华. 差分吸收光谱法测量烟气污染物浓度的研究 [D]. 2007.

第 7 章

[1] 李霖峰，等. 光后向散射法测烟尘浓度的实验研究 [J]. 光子学报，2006 (6)：915-917.

[2] Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [M]. New York：Academic Press，1969.

[3] 吴金雷，等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究 [J]. 光子学报，2016 (6).

[4] 铁路作业场所空气中粉尘测定相对质量浓度与质量浓度的转换方法. TB/T 2323—92.

[5] 张国城，沈正生，等. 微电荷法在线粉尘仪原理及其计量检测 [J]. 计量技术，2017 (3)：39-43.

[6] 陈建阁，王杰，吴付祥. 交流耦合式电荷感应法粉尘浓度检测技术研究 [J]. 环境工程，2014 (4)：131-134.

[7] 王强，杨凯. 烟气排放连续监测系统 (CEMS) 监测技术及应用 [M]. 第 2 版. 北京：化学工业出版社，2014.

第 16 章

[1] 王强，杨凯. 烟气排放连续监测系统 (CEMS) 监测技术及应用 [M]. 化学工业出版社，2015.

[2] 环境保护部科技标准司. HJ75—2017 固定污染源烟气排放连续监测技术规 [S]. 中国环境科学出版社，2017.

[3] 环境保护部科技标准司. HJ76—2017 固定污染源烟气排放连续监测系统技术要求及检测方法 [S]. 中国环境科学出版社，2017.