

大气污染防治先进技术汇编

科技部 环境保护部

二〇一四年三月

前言

当前，我国大气污染防治已经进入全面推进和综合整治的新阶段，对先进、适用的大气污染防治技术提出了更加迫切的需求。自“十一五”以来，围绕改善重点区域、重点城市大气环境质量，国家和地方组织开展了大量的科技攻关，形成了一大批大气污染治理技术创新成果，有力地支撑和引领了大气污染治理工作。

为推动相关大气污染治理技术成果的全社会共享和应用转化，我们向承担国家科技计划研究任务的单位，征集了一批先进适用的大气污染治理关键技术成果，并组织专家对征集到大气污染防治关键技术及其案例进行评估、筛选，最终汇集了 89 项关键技术及 130 余项相应案例成果，编制形成了《大气污染防治先进技术汇编》（以下简称《技术汇编》）。

《技术汇编》涵盖电站锅炉烟气排放控制、工业锅炉及炉窑烟气排放控制、典型有毒有害工业废气净化、机动车尾气排放控制、居室及公共场所典型空气污染物净化、无组织排放源控制、大气复合污染监测模拟与决策支持、清洁生产等八个领域的关键技术，入选技术大多源于“十一五”以来相关国家科技计划项目或自主创新的研究成果。

为便于使用者查阅和掌握整体情况，《技术汇编》分为技术目录和技术简介两部分。第一部分技术目录中，每项技术由技术名称、技术内容和适用范围三部分组成，其中的技术内容包含了技术的基本原理、主要特点和指标、使用效果以及投资运行成本情况等信息。第二部分技术简介中较详细阐述了各项技术的具体内容、应用工程与案例、主要工艺原理、关键技术或设计创新特色、主要技术指标、投资及运行效益分析、用户意见等。

《技术汇编》中的技术主要由承担国家科技计划研究任务的相关单位提供，经专家评估评审和征求相关地方与国家相关部门意见后形成。任何机构使用本清单所列技术，请认真研究分析该技术在相关应用中的适用性，并根据《合同法》等相关法律法规，与技术提供方约定双方权利义务，在技术交易和使用中严格履行供需双方的责任与义务。

目 录

第一部分 技术目录.....	
一、 电站锅炉烟气排放控制关键技术.....	1
1. 燃煤电站锅炉石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术.....	1
2. 火电厂双相整流湿法烟气脱硫技术.....	1
3. 燃煤锅炉电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术.....	1
4. 循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化技术.....	1
5. 氨法烟气脱硫技术.....	2
6. 海水脱硫技术.....	2
7. 燃煤电站锅炉选择性催化还原法（SCR）脱硝技术.....	2
8. SCR 脱硝催化剂生产技术.....	2
9. 改性催化剂硝汞协同控制技术.....	2
10. 失活脱硝催化剂再生技术.....	2
11. 循环流化床锅炉选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术.....	3
12. 燃煤电厂湿式静电除尘技术.....	3
13. 移动极板静电除尘技术.....	3
14. 高效低低温电除尘技术.....	3
15. 电除尘器节能提效供电关键技术.....	3
16. 电袋复合除尘技术.....	4
17. 高效袋式除尘关键技术及设备.....	4
18. 大型燃煤锅炉 PM _{2.5} 预荷电增效捕集装置.....	4
19. 溴化钙添加与 FGD 协同脱汞技术.....	4
20. 燃煤电站锅炉乙醇胺法 CO ₂ 捕集技术.....	4
二、 工业锅炉及炉窑烟气排放控制关键技术.....	5
21. 石灰石-石膏湿法脱硫技术.....	5
22. 电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术.....	5
23. 白泥-石膏湿法烟气脱硫技术.....	5
24. 钢铁烧结烟气循环流化床法脱硫技术.....	5
25. 新型催化法烟气脱硫技术.....	5
26. 钠碱法烟气脱硫技术与装置.....	6

27.烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术.....	6
28.工业锅炉烟气尿素湿法同时脱硫脱硝技术.....	6
29.工业锅炉脱硫脱硝一体化技术.....	6
30.冶炼烟气 SO ₂ 与重金属协同控制技术.....	6
31.中小型锅炉 SCR 烟气脱硝技术.....	7
32.循环流化床锅炉 SNCR 脱硝技术.....	7
33.水泥窑炉选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术.....	7
34.工业锅炉用增强型选择性催化还原法 (SNCR) 脱硝技术.....	7
35.水泥窑 SNCR 脱硝技术.....	7
36.燃煤烟气 SSNCR 脱硝技术.....	7
37.臭氧氧化脱硝技术.....	7
38.改进型电炉烟气导流集成捕集技术.....	8
39.大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备.....	8
40.密闭电石炉/矿热炉干法净化技术.....	8
三、典型有毒有害工业废气净化关键技术.....	8
41.挥发性有机气体 (VOCs) 循环脱附分流回收吸附净化技术.....	8
42.高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧 VOCs 治理技术.....	8
43.活性炭吸附回收 VOCs 技术.....	8
44.高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧 VOCs 治理技术.....	9
45.高效 VOCs 催化燃烧技术.....	9
46.中高浓度 VOCs 蓄热催化燃烧 (RCO) 净化技术.....	9
47.治理 VOCs 的 RTO 及余热利用技术.....	9
48.低浓度多组分工业废气生物净化技术.....	9
49.变温吸附有机废气治理及溶剂回收技术.....	9
50.冷凝与变压吸附联用有机废气治理技术.....	10
51.转轮与蓄热式燃烧联用有机废气治理技术.....	10
52.适用于煤化工酸性气体净化的硫磺回收技术.....	10
53.石化、化工行业酸性气体净化无在线炉硫磺回收及尾气加氢还原吸收工艺技术.....	10
54.生活垃圾及工业危废焚烧烟气净化系统技术.....	10
55.黄磷尾气催化净化技术.....	11

56.含氰废气净化及资源化利用技术.....	11
57.低浓度甲烷蓄热催化氧化利用技术.....	11
58.低温等离子体协同净化机制处理复杂有毒有害工业废气技术.....	11
四、机动车尾气排放控制关键技术.....	11
59.汽油车尾气催化净化技术.....	11
60.柴油车尾气 NO _x 净化技术.....	12
61.柴油车尾气颗粒物过滤消除技术.....	12
62.摩托车尾气催化净化技术.....	12
63.大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体技术.....	12
五、居室及公共场所典型空气污染物净化关键技术.....	12
64.中央空调空气净化单元及室内空气净化技术.....	12
65.室内空气中有害微生物净化技术.....	12
66.常温催化氧化净化甲醛技术.....	13
67.担载型金属氧化物催化氧化去除饮食油烟技术.....	13
68.室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧完全氧化/分解去除纳米金催化技术.....	13
六、无组织排放源控制关键技术.....	13
69.综合抑尘技术	13
70.粮食行业转运码头除尘系统装备技术.....	14
七、大气复合污染监测、模拟与决策支持关键技术.....	14
71.大气挥发性有机物快速在线监测系统.....	14
72.大气细粒子及其气态前体物一体化在线监测技术.....	14
73.大气中 NO _x 及其光化产物一体化在线监测仪器及标定技术	14
74.大气细粒子和超细粒子的快速在线监测技术.....	14
75.臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统.....	15
76.便携式多组份气体紫外、红外现场分析仪.....	15
77.污染源排放遥测技术系统.....	15
78.重点污染物面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统.....	15
79.大气污染多组分排放通量快速遥测系统.....	15
80.区域大气污染源识别与动态源清单技术.....	16
81.区域敏感源筛选识别技术.....	16

82.空气质量多模式集成预报系统.....	16
83.城市机动车排放控制决策评估技术.....	16
84.多源卫星遥感大气污染综合监测技术.....	17
85.环境空气监测代表性的印痕分析技术.....	17
86.大气 PM _{2.5} 水溶性污染组分及其气态前体物在线监测系统.....	17
87.过氧酰基硝酸酯类 (PANs) 化合物快速在线监测系统.....	17
八、清洁生产关键技术.....	17
88.水煤浆代油洁净燃烧技术.....	17
89.多重空气分级低 NO _x 燃烧技术.....	18
第二部分 技术简介.....
一、电站锅炉烟气排放控制关键技术.....	19
1.燃煤电站锅炉石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术.....	19
2.火电厂双相整流湿法烟气脱硫技术.....	33
3.燃煤锅炉电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术.....	36
4.循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化技术.....	42
5.氨法烟气脱硫技术.....	54
6.海水脱硫技术.....	58
7.燃煤电站锅炉选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术.....	61
8.SCR 脱硝催化剂生产技术.....	75
9.改性催化剂硝汞协同控制技术.....	81
10.失活脱硝催化剂再生技术.....	84
11.循环流化床锅炉选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术.....	91
12.燃煤电厂湿式静电除尘技术.....	95
13.移动电极静电除尘技术.....	98
14.高效低低温电除尘技术.....	103
15.电除尘器节能提效供电关键技术.....	107
16.电袋复合除尘技术.....	112
17.高效袋式除尘关键技术及设备.....	124
18.大型燃煤锅炉 PM _{2.5} 预荷电增效捕集装置.....	137
19.溴化钙添加与 FGD 协同脱汞技术.....	140

20.燃煤电站锅炉乙醇胺法 CO ₂ 捕集技术	144
二、工业锅炉及炉窑烟气排放控制关键技术	148
21.石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术	149
22.电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术	157
23.白泥-石膏湿法烟气脱硫技术	160
24.钢铁烧结烟气循环流化床法烟气脱硫技术	165
25.新型催化法烟气脱硫技术	176
26.钠碱法烟气脱硫技术与装置	181
27.烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术	184
28.工业锅炉烟气尿素湿法同时脱硫脱硝技术	185
29.工业锅炉脱硫脱硝一体化技术	189
30.冶炼烟气 SO ₂ 与重金属协同控制技术	193
31.中小型锅炉 SCR 烟气脱硝技术	197
32.循环流化床锅炉选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术	200
33.水泥窑炉选择性催化还原法 (SCR) 烟气脱硝技术	207
34.工业锅炉用增强型选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术	209
35.水泥窑 SNCR 脱硝技术	211
36.燃煤烟气 SSNCR 脱硝技术	221
37.臭氧氧化脱硝技术	224
38.改进型电炉烟气导流集成捕集技术	226
39.大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备	230
40.密闭电石炉/矿热炉干法净化技术	233
三、典型有毒有害工业废气净化关键技术	242
41.挥发性有机气体(VOCs)循环脱附分流回收吸附净化技术	242
42.高效吸附-强化脱附回收 VOCs 技术	247
43.活性炭吸附回收 VOCs 技术	253
44.高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧 VOCs 治理技术	258
45.高效 VOCs 催化燃烧技术	264
46.中高浓度 VOCs 蓄热催化燃烧 (RCO) 净化技术	267
47.治理 VOCs 的 RTO 及余热利用技术	269

48.低浓度多组分工业废气生物净化技术.....	275
49.变温吸附有机废气治理及溶剂回收技术.....	278
50.冷凝与变压吸附联用有机废气治理技术.....	281
51.转轮与蓄热式燃烧联用 VOCs 治理技术.....	284
52.适用于煤化工行业酸性气体净化的硫磺回收工艺技术.....	287
53.石化、化工行业酸性气体净化无在线炉硫磺回收及尾气加氢还原吸收工艺技术.....	292
54.生活垃圾及工业危废焚烧烟气净化系统技术.....	297
55.黄磷尾气催化净化技术.....	302
56.含氰废气净化及资源化利用技术.....	308
57.低浓度甲烷蓄热催化氧化利用技术.....	310
58.低温等离子体协同净化机制处理复杂有毒有害工业废气技术.....	311
四、机动车尾气排放控制关键技术.....	312
59.汽油车尾气催化净化技术.....	312
60.柴油车尾气 NO _x 净化技术.....	316
61.柴油车尾气颗粒物过滤消除技术.....	325
62.摩托车尾气催化净化技术.....	332
63.大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体技术.....	335
五、居室及公共场所典型空气污染物净化关键技术.....	337
64.中央空调空气净化单元及室内空气净化技术.....	337
65.室内空气中有害微生物净化技术.....	340
66.常温催化氧化净化甲醛技术.....	345
67.担载型金属氧化物催化氧化去除饮食油烟技术.....	347
68.室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧完全氧化/分解去除纳米金催化技术.....	351
六、无组织排放源控制关键技术.....	352
69.综合抑尘关键技术.....	352
70.散粮码头中转储运除尘系统装备技术.....	360
七、大气复合污染监测、模拟与决策支持关键技术.....	363
71.大气挥发性有机物快速在线监测系统.....	363
72.大气细粒子及其气态前体物一体化在线监测技术.....	365
73.大气中 NO _x 及其光化产物一体化在线监测仪器及标定技术.....	367

74.大气细粒子和超细粒子的快速在线监测技术.....	369
75.臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统.....	373
76.便携式多组份气体紫外、红外现场分析仪.....	376
77.污染源排放遥测技术系统.....	378
78.重点污染物面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统.....	385
79.大气污染多组分排放通量快速遥测系统.....	388
80.区域大气污染源识别与动态源清单技术.....	391
81.区域敏感源筛选识别技术.....	394
82.空气质量多模式集成预报系统.....	398
83.城市机动车排放控制决策评估技术.....	401
84.多源卫星遥感大气污染综合监测技术.....	405
85.环境空气监测代表性的印痕分析技术.....	408
86.大气 PM _{2.5} 水溶性污染组分及其气态前体物在线监测系统.....	411
87.过氧酰基硝酸酯类 (PANs) 化合物快速在线监测系统.....	413
八、清洁生产关键技术.....	415
88.水煤浆代油洁净燃烧技术.....	415
89.燃煤电站锅炉多重空气分级低 NO _x 燃烧技术.....	420

第一部分技术目录

大气污染治理先进技术目录

序号	技术名称	技术内容	适用范围
一、电站锅炉烟气排放控制关键技术			
1	燃煤电站锅炉石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术	采用石灰石或石灰作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫与浆液中的碳酸钙（或氢氧化钙）以及鼓入的氧化空气进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。该技术的脱硫效率一般大于95%，可达98%以上；SO ₂ 排放浓度一般小于100mg/m ³ ，可达50mg/m ³ 以下。单位投资大致为150~250元/kW；运行成本一般低于1.5分/kWh。	燃煤电站锅炉
2	火电厂双相整流湿法烟气脱硫技术	利用在脱硫吸收塔入口与第一层喷淋层间安装的多孔薄片状设备，使进入吸收塔的烟气经过该设备后流场分布更均匀，同时烟气与在该设备上形成的浆液液膜撞击，促进气、液两相介质发生反应，达到脱除一部分SO ₂ 的目的。该技术将喷淋塔和鼓泡塔技术相结合，对提高脱硫效率、减少浆液循环量有显著效果，特别适用于脱硫达标改造项目。双相整流装置能提高系统脱硫效率20%~30%，整体脱硫效率可达97%以上；阻力为600Pa~700Pa，单位投资大致为3~6元/kWh，电耗降低约250~850kWh/h。	燃煤电站锅炉
3	燃煤锅炉电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术	采用电石渣作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫与浆液中的氢氧化钙以及鼓入的氧化空气进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。该技术的脱硫效率一般大于95%，可达98%以上；SO ₂ 排放浓度一般小于100mg/Nm ³ ，可达50mg/Nm ³ 以下；单位投资大致为150~250元/kW；运行成本一般低于1.35分/kWh。	燃煤电站锅炉
4	循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化技术	以循环流化床原理为基础，通过物料的循环利用，在反应塔内吸收剂、吸附剂、循环灰形成浓相的床态，并向反应塔中喷入水，烟气中多种污染物在反应塔内发生化学反应或物理吸附；经反应塔净化后的烟气进入下游的除尘器，进一步净化烟气。此时烟气中的SO ₂ 和几乎全部的SO ₃ ，HCl，HF等酸性成分被吸收而除去，生成CaSO ₃ ·1/2H ₂ O、CaSO ₄ ·1/2H ₂ O等副产物。该技术的脱硫效率一般大于90%，可达98%以上；SO ₂ 排放浓度一般小于100mg/m ³ ，可达50mg/m ³ 以下；单位投资大致为150~250元/kW；在不添加任何吸附剂及脱硝剂的条件下运行成本一般为0.8~1.2分/kWh。	燃煤电站锅炉

第一部分技术目录

5	氨法烟气脱硫技术	采用一定浓度的氨水 ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 或液氨作为吸收剂, 在一个结构紧凑的吸收塔内洗涤烟气中的 SO_2 达到烟气净化的目的。形成的脱硫副产品是可作农用肥的硫酸铵, 不产生废水和其他废物, 脱硫效率保持在 95%~99.5%, 能保证出口 SO_2 浓度在 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下; 单位投资大致为 150~200 元/kW; 运行成本一般低于 1 分/kWh。	燃煤电站锅炉
6	海水脱硫技术	采用海水作为脱硫吸收剂, 在吸收塔内, 烟气与海水充分接触混合, 烟气中的二氧化硫等酸性气体、烟尘被海水洗涤溶解到海水中与海水中的碱性物质发生中和反应, 从而被脱除, 吸收塔排出的酸性海水自流到下游的海水水质恢复系统得以恢复后排放到大海。该技术的脱硫效率一般大于 95%, 可达 98% 以上; SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$, 可达 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下, 排放海水 pH 大于 6.8, DO 大于 $4\text{mg}/\text{L}$; 单位投资大致为 150~250 元/kW; 运行成本一般低于 1.5 分/kWh。	燃煤电站锅炉
7	燃煤电站锅炉选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术	以液氨或尿素作为还原剂, 制取氨气并经空气稀释, 与烟气均匀混合后由喷氨格栅送入布置在省煤器与空气预热器之间的 SCR 脱硝反应器, 在反应器催化剂层中还原剂与烟气中的氮氧化物发生氧化还原反应生成氮气和水蒸气, 达到脱除氮氧化物的目的。通常设计脱硝效率 80%~90%, 可达 95% 以上。为保证高效脱硝, 可采用烟气均流优化工艺及设备来保证烟气和氨的充分均匀混合。系统单位投资一般单位投资约 100~230 元/kW; 运行成本一般低于 1.2 分/kWh。	燃煤电站锅炉
8	SCR 脱硝催化剂生产技术	选择性催化还原氮氧化物技术中, 催化剂是最核心的部分。本技术基于国产原材料, 开发脱硝催化剂核心成型配方以及工艺参数, 形成国产催化剂混炼、挤出、干燥和烧成工艺, 提高产品成品率、降低能耗; 实现催化剂生产中核心设备的国产化, 形成采用国产设备的催化剂规模化生产线。	燃煤电站锅炉
9	改性催化剂硝汞协同控制技术	采用整体式催化剂生产方式或对 SCR 催化剂再负载的方式制备出硝汞协同控制催化剂。催化剂布置在省煤器与空气预热器之间的脱硝反应器中, 在反应器内还原剂与烟气中的氮氧化物在催化剂的作用下发生反应生成氮气和水蒸气, 达到脱除氮氧化物的目的, 同时可将烟气中的零价汞氧化成二价汞, 以利于后续污染物控制设备对二价汞的脱除, 达到脱硝的同时协同氧化汞的目的。通常设计脱硝效率 80%~90%, 汞氧化效率可达 50% 以上。	燃煤电站锅炉
10	失活脱硝催化剂再生技术	通过物理和化学手段去除失活催化剂上的有害物质或使中毒活性中心恢复, 使催化剂活性得以部分乃至完全的恢复。该再生技术处理的催化剂活性可以	燃煤电站锅炉

第一部分技术目录

		达到新鲜催化剂的 90% 以上甚至超过新鲜催化剂的活性，SO ₂ /SO ₃ 转化率≤1%，氨逃逸率≤3ppm；单位投资大致为 20000~30000 元/m ³ 。	
11	循环流化床锅炉选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术	采用氨或尿素作为还原剂，向循环流化床锅炉高温烟气中喷射氨或尿素等还原剂，将 NO _x 还原成 N ₂ 。该技术的脱硝效率一般大于 60%，可达 75% 以上；NO _x 排放浓度一般小于 100mg/m ³ ；单位投资大致为 30~40 元/kW；运行成本一般低于 0.35 分/kWh。	循环流化床电站锅炉
12	燃煤电厂湿式静电除尘技术	采用喷水或溢流水等方式使集尘极表面形成一层水膜，将沉集在极板上的粉尘冲走的电除尘器。主要用于解决湿法脱硫后烟气中酸雾、微细颗粒物、重金属汞等污染物的治理，实现烟气超低排放。PM _{2.5} 捕集效率一般大于 60%，可达 90% 以上；颗粒物排放浓度可小于 10mg/m ³ ；酸雾去除率达 80% 以上；以 300MW 机组为例，一次性设备投资约 2000 万元。	燃煤电站锅炉
13	移动极板静电除尘技术	由固定电极和移动电极组成，其工作原理与传统电除尘器一样，仍然是依靠静电力来收集粉尘。来自高压直流电源的高电压施加到电晕线上，电晕线产生电晕放电，流经电场的烟气中的粉尘荷电后，在电场力作用下，被收集到极板上。当极板旋转到电场下端的灰斗时，清灰刷在远离气流的位置把板面的粉尘刷除。转动极板一般设在电除尘器末级电场，极板平行烟气布置。除尘效率可达 99.9%；出口排放浓度≤30mg/m ³ ；本体压力降 < 200Pa；本体漏风率 < 2%。	燃煤电站锅炉
14	高效低低温电除尘技术	通过换热器进行热交换，使得进入电除尘器的运行温度由通常的低温状态（130℃~170℃）下降到低低温状态（90℃左右），实现提高除尘效率的目的。除尘效率可达 99.8% 以上；出口烟尘排放浓度≤30mg/m ³ ；烟气余热回收系统的漏风率不大于 0.5%，电除尘器的漏风率不大于 3%。烟温每降 10℃可节省不低于 0.4g/kWh 的发电标煤耗。	燃煤电站锅炉
15	电除尘器节能提效供电关键技术	通过调整供电方式与电气参数，以克服反电晕危害，并达到有效提高除尘效率和节能效果的目的，如采用高频电源、三相电源、脉冲电源等供电方式。以高频电源为例，用高频电源代替原有工频电源对电除尘器进行供电，具备纯直流供电时输出纹波小，间歇供电时间歇比任意可调的特点，能给电除尘器提供从纯直流到脉动幅度很大的各种电压波形；针对各种特定的工况，可以提供最合适的电压波形，通常能有效降低排放 30% 以上，且比工频电源节能 20% 以上，与电除尘节能优化控制系统配合，可实现电除尘系统节能 50% 以上。	燃煤电站锅炉

第一部分技术目录

16	电袋复合除尘技术	<p>在一个箱体安装电场区和滤袋区（电场区和滤袋区可有多种配置形式），将静电和过滤两种除尘技术复合在一起的除尘器。粉尘排放$\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$，除尘效率$\geq 99.9\%$，$\text{PM}_{2.5}$捕集效率$\geq 96\%$，除尘器阻力$\leq 1200\text{Pa}$，滤袋寿命$\geq 30000$小时，过滤风速$\geq 1.2\text{m}/\text{min}$。以600MW机组为例，一次性设备投资约3200万元。</p>	燃煤电站锅炉、水泥窑、冶金除尘
17	高效袋式除尘关键技术及设备	<p>一种干式滤尘技术，它适用于捕集细小、干燥、非纤维性粉尘。其工作原理是利用滤袋对含尘气体进行过滤，颗粒大、比重大的粉尘，由于重力的作用沉降下来，落入灰斗，含有较细小粉尘的气体在通过滤料时，粉尘被阻留，使气体得到净化。该技术处理烟气流量为10~300万m^3/h，入口温度$< 260^\circ\text{C}$，排尘浓度$\leq 30\text{mg}/\text{m}^3$，漏风率$\leq 3\%$，设备阻力1200Pa~1500Pa，滤袋寿命$> 3$年（年破袋率$\leq 0.5\%$）。该设备具有烟气处理能力强、除尘效率高、排放浓度低等特点，且具有稳定可靠、能耗低等特点。</p>	燃煤电厂锅炉；市政供热锅炉；钢铁、建材、有色、化工、垃圾焚烧等行业锅炉/窑炉
18	大型燃煤锅炉 $\text{PM}_{2.5}$ 预荷电增效捕集装置	<p>采用正、负高压电源对微细粉尘进行分列电荷处理，使相邻两列粉尘带上不同极性电荷，然后通过扰流装置扰流作用，使不同粒径粉尘产生速度和方向上的差异，增加正、负粒子碰撞机会，形成容易捕集的大颗粒后进入电除尘器顺利捕获。该技术设备压力损失$\leq 250\text{Pa}$，粉尘排放浓度$\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$，$\text{PM}_{2.5}$分级效率$\geq 97\%$。</p>	燃煤电站锅炉
19	溴化钙添加与FGD协同脱汞技术	<p>针对湿法脱硫装置（FGD）对氧化态汞的脱除效果虽然较好，但对单质汞的脱除不理想的特点，向入炉煤中添加溴化钙作为氧化剂使煤炭燃烧过程中释放出的元素态汞在燃烧炉中氧化为二价汞，二价汞在烟气进入FGD后大部分被脱除。该技术中FGD单独作用对氧化态汞的去除率在80%~95%之间，总汞脱除率在10%-80%之间，加入溴化钙之后，可以使烟气中二价汞占总汞的比例从35%显著提高到90%，并且能使烟气汞浓度下降30%~60%，运行成本约为7.88×10^{-4}元/kWh。</p>	燃煤电站锅炉
20	燃煤电站锅炉乙醇胺法 CO_2 捕集技术	<p>采用乙醇胺（MEA）作为吸收剂，在吸收塔内，经雾化的吸收剂浆液与从底部进入的被冷却至40°C~50°C左右的烟气充分接触混合，烟气中的CO_2与MEA发生化学反应生成氨基甲酸盐，在再生塔内，氨基甲酸盐解析出高浓度CO_2后循环使用，从而实现烟气CO_2高效分离和捕集。该技术净化气中CO_2浓度一般小于0.1%，CO_2回收率一般可达95%以上，该技术单位投资大致为800~5100元/tCO_2，运行成本大致为310~570元/tCO_2。</p>	燃煤电站锅炉

二、工业锅炉及炉窑烟气排放控制关键技术			
21	石灰石-石膏湿法脱硫技术	采用石灰石作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫与浆液中的碳酸钙（或氢氧化钙）以及鼓入的氧化空气进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上；SO ₂ 排放浓度一般小于 100mg/m ³ ，可达 50mg/m ³ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW 或 15~25 万元/m ² 烧结面积；运行成本一般低于 1.5 分/kWh。	工业锅炉/钢铁烧结烟气
22	电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术	采用电石渣作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫与浆液中的氢氧化钙以及鼓入的氧化空气进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上；SO ₂ 排放浓度一般小于 100mg/Nm ³ ，可达 50mg/Nm ³ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.35 分/kWh。	工业锅炉
23	白泥-石膏湿法烟气脱硫技术	采用白泥作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫与浆液中的碳酸钙（或氢氧化钠）以及鼓入的氧化空气进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上；SO ₂ 排放浓度小于 100mg/Nm ³ ，可达 50mg/Nm ³ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.35 分/kWh。	工业锅炉
24	钢铁烧结烟气循环流化床法脱硫技术	将生石灰消化后引入脱硫塔内，在流化状态下与通入的烟气进行脱硫反应，烟气脱硫后进入布袋除尘器除尘，再由引风机经烟囱排出，布袋除尘器除下的物料大部分经吸收剂循环输送槽返回流化床循环使用。该技术脱硫率略低于湿法，吸收剂利用率高，结构紧凑，操作简单，运行可靠，脱硫产物为固体，无制浆系统，无二次污染，脱硫塔体积小，投资省，不易堵塞。烟气中的 SO ₂ 和几乎全部的 SO ₃ ，HCl，HF 等酸性成分被吸收而除去，生成 CaSO ₃ ·1/2H ₂ O、CaSO ₄ ·1/2 H ₂ O 等副产物。该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上；SO ₂ 排放浓度一般小于 100mg/m ³ ，可达 50mg/m ³ 以下；单位投资大致为 15~20 万元/平方米；在不添加任何吸附剂及脱硝剂的条件下运行成本一般低于 5~9 元/吨烧结矿。	钢铁烧结烟气
25	新型催化法烟气脱硫技术	采用新型低温催化剂，在 80~200℃ 的烟气排放温度条件下，将烟气中的 SO ₂ 、H ₂ O、O ₂ 选择性吸附在催化剂的微孔中，通过活性组分催化作用反应生成	有色、石化化工、工业锅炉/炉窑（含民

第一部分技术目录

		<p>H_2SO_4，实现二氧化硫脱除同时回收硫资源，无二次污染。催化剂在脱硫过程中不消耗，不需持续添加脱硫剂，催化剂寿命大于3年。该技术的脱硫率一般大于95%，可达99%以上，SO_2排放浓度可低于$50mg/m^3$以下。单位投资约为80~200元/Nm^3；单位运行成本300~1000元/t SO_2；一定条件下脱硫装置本身可实现盈利。</p>	用)、建材、钢铁等行业
26	钠碱法烟气脱硫技术与装置	<p>利用酸碱中和原理，在脱硫塔中利用氢氧化钠脱除烟气中的SO_2，之后在结晶器中，将亚硫酸氢钠转化为亚硫酸钠。副产物亚硫酸钠晶体经过干燥、包装成为副产品。脱硫率>95%；副产品亚硫酸钠达到工业合格品标准，具有较高的经济效益。该技术装置对原烟气工况适应性强，实际运行烟气温度可高达$360^\circ C$，入口SO_2浓度超过$22000mg/Nm^3$。</p>	钢铁、火电、有色等行业
27	烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术	<p>在传统氨法的基础上开发出的新型烟气净化技术，其核心是在NH_3吸收SO_2生成$(NH_4)_2SO_3$后使用催化剂将$(NH_4)_2SO_3$催化氧化成$(NH_4)_2SO_4$，从而提高SO_2的去除率和$(NH_4)_2SO_4$生成率。脱硫彻底且副产品可直接氧化成硫酸铵制成化肥。烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术净化处理后尾气脱硫率达到95%。</p>	炭素煅烧回转窑尾气低浓度 SO_2 脱硫技术
28	工业锅炉烟气尿素湿法同时脱硫脱硝技术	<p>由尿素/添加剂组成的复合吸收剂，在吸收塔中与烟气接触反应，使烟气中的SO_2、NO_x等污染物同时净化。该技术采用一体化设备同时净化多种污染物，占地面积小、投资及运行成本低、工艺系统简单易控，对SO_2、NO_x去除率分别大于90%和50%。</p>	工业锅炉及部分工业窑炉烟气脱硫脱硝
29	工业锅炉脱硫脱硝一体化技术	<p>采用空气分离技术制备富氧源，经臭氧发生器产生臭氧，注入臭氧混合反应装置，氧化烟气中的氮氧化物，将一氧化氮等氧化成高价态氮氧化物，以液态氧化镁吸收。充分利用氢氧化镁对二氧化硫、氮氧化物吸收效率高的特性，将臭氧氧化脱硝技术及镁法脱硫技术耦合，研制成脱硫脱硝一体化装置。该技术的脱硫效率一般大于95%，可达98%以上；SO_2排放浓度一般小于$100mg/m^3$以下，脱硝效率达86%以上，NO_x排放浓度一般小于$100mg/m^3$。</p>	20~440t/h的工业锅炉
30	冶炼烟气 SO_2 与重金属协同控制技术	<p>以铅锌等冶炼烟气作为治理对象，针对有色冶炼烟气中SO_2浓度高、气量波动大、同时含有Hg、As、Cd、Pb等多种重金属的特征，通过高效重金属预去除、深度脱汞、复合吸收液的SO_2及重金属协同净化、重金属分离回收技术，实现同时脱除烟气中SO_2和重金属，并对重金属和硫产物进行回收利用，最终获得硫酸铵产品。该技术脱硫效率$\geq 95\%$，出口烟气中SO_2含量$\leq 200mg/m^3$；汞、砷、镉、铅四种重金属去除效率稳定大于90%，出口烟气中$Hg \leq 0.05mg/m^3$、</p>	冶炼烟气净化及资源化利用

第一部分技术目录

		As≤0.5mg/m ³ 、Cd≤0.85mg/m ³ 、Pb≤1mg/m ³ ，副产硫酸铵达到 DL/T 808-2002 产品质量标准，汞的综合回收率大于 80%，铅、砷、镉的综合回收率大于 65%。	
31	中小型锅炉 SCR 烟气脱硝技术	采用选择性催化还原法，以氨为还原剂、利用商用或自主开发的新型脱硝催化剂，将烟气中的氮氧化物还原为氮气。该技术的脱硝效率一般大于 80%。	中小型工业锅炉
32	循环流化床锅炉 SNCR 脱硝技术	以氨或者尿素为还原剂，将还原剂喷入烟气中，然后还原剂与氮氧化物发生反应，生成氮气和水，在合适的温度范围内，脱硝效率可超过 60%，进口浓度在 350mg/Nm ³ 以内，可以实现 100mg/Nm ³ 达标排放。投资费用比同等条件下 SCR 低 60%左右。	循环流化床锅炉
33	水泥窑炉选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术	设置催化剂装置于水泥窑路烟囱的旁路出口，然后喷入的氨与烟气中的氮氧化物反应实现脱硝，反应温度区间约在 150°C~200°C，脱硝后的烟气经除尘后由烟囱排入大气，脱硝效率达到 70%。	水泥行业
34	工业锅炉用增强型选择性催化还原法 (SNCR) 脱硝技术	针对工业锅炉实施SNCR脱硝技术时因空间局限遇到的反应温度和停留时间问题，利用添加剂诱发还原剂的脱氢反应，形成具有高还原活性的反应基团，将烟气中的NO还原为N ₂ ，从而促进了SNCR脱硝反应的进行，有效降低了反应的温度窗口并缩减了反应时间，提高了脱硝效率。该技术脱硝效率可达60%以上。	适用于工业锅炉排放氮氧化物的控制
35	水泥窑 SNCR 脱硝技术	针对水泥窑的工艺特点以及NO _x 的形成机理，在分解炉内采用SNCR脱硝技术对NO _x 进行脱除。通过采用添加剂对还原剂进行改性、还原剂多级喷射布置方案及喷枪的特有设计，有效促进了还原剂与烟气的混合以及脱硝反应的进行，并显著减轻了炉内粉体对SNCR反应的抑制作用，从而显著提高了脱硝效率，使得水泥窑SNCR脱硝装置具有超过70%脱硝效率的高脱硝性能。新建炉窑的NO _x 排放浓度控制在200mg/Nm ³ 以下，原有炉窑改造的NO _x 排放浓度控制在300mg/Nm ³ 以下；单位减排约3000元/t·NO _x ，运行成本一般为3~5元/t熟料。	水泥行业
36	燃煤烟气 SSNCR 脱硝技术	利用水蒸汽向锅炉炉膛喷吹并雾化尿素溶液的方法，将脱硝还原剂预先加热，可提高烟气与还原性气体的混合均匀度和反应速率，提高还原剂的利用率和脱硝效率。以 2t/h 燃煤锅炉 SSNCR 烟气脱硝技术为例，该项技术在 NH ₃ /NO 小于 1.4、脱硝效率达 62.5%，氨逃逸低于 4 mg/Nm ³ 。	适合火电机组锅炉、工业锅炉、工业窑炉以及大型焚烧炉
37	臭氧氧化脱硝技术	以臭氧为氧化剂将烟气中不易溶于水的NO氧化成更高价的氮氧化物，然后以相应的吸收液对烟气进行喷淋洗涤，实现烟气的脱硝处理。本技术脱硝效率高 (90%)，对烟气温度没有要求，可作为其他脱硝技术的补充，达到深度脱硝。	各种工业锅炉、炉窑的烟气深度脱硝

第一部分技术目录

38	改进型电炉烟气导流集成捕集技术	在加废钢、兑铁水和出钢过程中会产生大量的烟气，以及电炉冶炼时从电极孔溢出的烟气，采用半密闭导流烟罩+屋顶贮留集尘罩+铁水溜槽活动烟罩（又称兑铁水协同拟尘罩）的联合方式捕集烟气，烟气由除尘器净化后，洁净空气由主风机排入烟囱达标排放。	电炉等冶金行业的粉尘治理
39	大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备	高效：除尘效率可达99.99%；粉尘排放浓度稳定 $<10\text{mg}/\text{m}^3$ ； $\text{PM}_{2.5}$ 及重金属等有害物质去除效率可达95%；节能：清灰压力低，可用净化后的烟气做清灰源，不用设置高压气源设备，节省了清灰电耗。除尘器阻力小于1200Pa，比其他类型除尘器节能20%以上；省地：同比传统工艺布袋除尘器，占地面积减少30%；稳定可靠：采用多通道组合设计，每通道进出口，都装有单板截止阀。使在线切换检修方便、安全，实现影响主机运行故障为零；设备寿命长：静态清灰时，清灰压力仅是脉冲清灰的1/100，滤袋处于静止状态，没有弯曲变形，滤袋寿命可延长50%以上。	冶金行业电炉、转炉、混铁炉、铁合金炉、高炉、物料输送等除尘系统
40	密闭电石炉/矿热炉干法净化技术	采用高效降温装置，将密闭矿热炉高温烟气（通常温度在 $500^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，特殊工况下温度在 1000°C 左右）降温至 $220^{\circ}\text{C}\sim 260^{\circ}\text{C}$ ，再进入正压高效布袋过滤器进行除尘，确保系统的安全性，回收后的粉尘可以作为水泥原料加工水泥熟料。该技术的除尘效率一般大于99.9%以上；烟气排放浓度小于 $30\text{mg}/\text{m}^3$ ，单位投资大致为300~400万元/套；单设备运行成本一般低于20元/吨电石，运行成本一般低于2500元/天。	密闭电石炉/矿热炉

三、典型有毒有害工业废气净化关键技术

41	挥发性有机气体（VOCs）循环脱附分流回收吸附净化技术	采用活性炭作为吸附剂，采用惰性气体循环加热脱附分流冷凝回收的工艺对有机气体进行净化和回收。回收液通过后续的精制工艺可实现有机物的循环利用。该技术对有机气体成分的净化回收效率一般大于90%，也可达95%以上。单位投资大致为9~24万元/千（ m^3h^{-1} ），回收有机物的成本大致为700~3000元/吨。	石油化工、制药、印刷、表面涂装、涂布等
42	高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧VOCs治理技术	利用高吸附性能的活性炭纤维、颗粒炭、蜂窝炭和耐高温高湿整体式分子筛等固体吸附材料对工业废气中的VOCs进行富集，对吸附饱和的材料进行强化脱附工艺处理，脱附出的VOCs进入高效催化材料床层进行催化燃烧或蓄热催化燃烧工艺处理，进而降解VOCs。该技术的VOCs去除效率一般大于95%，可达98%以上。	石油、化工、电子、机械、涂装等行业
43	活性炭吸附回收VOCs技术	采用吸附、解析性能优异的活性炭（颗粒炭、活性炭纤维和蜂窝状活性炭）作为吸附剂，吸附企业生产过程中产生的有机废气，并将有机溶剂回收再利用，实现了清洁生产和有机废气的资源化回收利用。废气风量： $800\sim 40000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气浓度： $3\sim 150\text{g}/\text{m}^3$ 。	包装印刷、石油、化工、化学药品原药制造、涂布、纺织、集装箱喷

第一部分技术目录

			涂及合成材料等行业
44	高效吸附-脱附(蓄热)催化燃烧VOCs治理技术	利用高吸附性能的活性炭纤维、颗粒炭、蜂窝炭和耐高温高湿整体式分子筛等固体吸附材料对工业废气中的VOCs进行富集，对吸附饱和的材料进行强化脱附工艺处理，脱附出的VOCs进入高效催化材料床层进行催化燃烧或蓄热催化燃烧工艺处理，进而降解VOCs。该技术的VOCs去除效率一般大于95%，可达98%以上。	石油、化工、电子、机械、涂装等行业
45	高效VOCs催化燃烧技术	含有VOCs的固定源尾气，通过热交换器的换热和加热器（仅开车或VOCs含量偏低时启动）的加热，使尾气加热到催化剂的起燃温度(~250℃)后进入催化反应器，在催化剂的催化氧化作用下，VOCs被氧化成H ₂ O和CO ₂ ，并释放出大量热量，催化氧化反应后的高温尾气经过余热利用后通过烟囱排空。	含有VOCs的固定源尾气
46	中高浓度VOCs蓄热催化燃烧(RCO)净化技术	在旋转阀式蓄热催化燃烧设备中，首先利用堇青石-莫来石复相材料的蓄热和放热性能，加热未反应的有机废气，在蓄热催化一体化材料上发生催化氧化反应，气体中的挥发性有机物转化为二氧化碳和水，并释放反应热，反应后的气体将热量传递给蓄热材料，以高于进口气体20~30℃的温度排放。该技术的热回收效率可达90%；有机物净化效率95%以上；适用的有机物浓度范围为500mg/m ³ 以上，无二次污染物排放；单位投资大致为50~100万/10000m ³ 。	中高浓度有机废气，特别是各类烘干废气
47	治理VOCs的RTO及余热利用技术	以蜂窝陶瓷蓄热体为核心材料制成的蓄热式热力氧化RTO系统，经“蓄热—放热—清扫”过程，实现使工业生产过程中排放的可挥发性有机化合物VOCs的无害化燃烧，使VOCs的排放达到行业排放法规要求。利用燃烧产生的余热，经余热锅炉和汽轮发电系统发电，或直接生产蒸汽或热水，达到节能和环保的目的。系统VOCs的脱除率大于95%，能量回收率高于90%。	用于石油、化工、农药等行业
48	低浓度多组分工业废气生物净化技术	利用高效复合功能菌剂与扩培技术，强化废气生物净化的反应过程；针对不同类型废气应用新型的生物净化工艺（设备），强化废气生物净化的传质过程；装填具有高比表面积和生物固着力的生物填料，解决微生物附着难、系统运行不稳定的问题。该技术适用范围广，运行管理方便，二次污染少；H ₂ S的去除率可达95%以上，VOCs的去除率达80%~90%。	适用于低浓度多组分工业废气排放控制
49	变温吸附有机废气治理及溶剂回收技术	采用活性炭或碳纤维为吸附材料，在吸附器内，废气中有机成分得到净化，尾气达标排放。同时通过热空气、水蒸气使有机废气脱附，经过冷却后回收利用。通过设置多组吸附器循环切换使用，实现装置连续自动运行。该技术的有机物净化效率一般大于90%，	石油化工、有机化工、涂布、印刷、制药、制革等

第一部分技术目录

		最高可达99.99%以上；非甲烷总烃排放浓度一般小于120mg/m ³ ，最低可达2mg/m ³ 以下；单套投资大致为150~800万元，单位运行成本通常为0.8~1.5元/kg。	
50	冷凝与变压吸附联用有机废气治理技术	采用多级冷凝技术，使废气中的有机成分在常压下凝结成液体析出，经净化的废气进入活性炭吸附器进行拦截，确保达标排放，吸附饱和后采用负压脱附方式提取高浓度废气，并送回前端冷凝装置。冷凝与变压吸附联用处理工艺确保废气达标排放。该技术的有机物净化效率一般大于98%，可达99%以上；非甲烷总烃排放浓度一般小于120mg/m ³ ；单位投资大致为0.4~0.8万/m ³ ，单位小时运行成本通常为0.08~0.2元/m ³ 。	石油化工、有机化工、油气储运等
51	转轮与蓄热式燃烧联用有机废气治理技术	采用高浓缩倍率沸石转轮浓缩设备将废气浓缩10~15倍，浓缩后的废气进入蓄热式燃烧炉进行燃烧处理，被彻底分解成CO ₂ 和H ₂ O，反应后的高温烟气进入特殊结构的陶瓷蓄热体，95%的废气热量被蓄热体吸收，温度降到接近进口温度。不同蓄热体通过切换阀或者旋转装置随时间进行转换，分别进行吸热和放热，对系统热量进行有效回收和利用，热回收效率可达95%以上，处理效率可达95~99%，出口浓度优于国家相关标准。	有机化工、电子、半导体、涂装、涂布、印刷等行业
52	适用于煤化工酸性气体净化的硫磺回收技术	采用无在线炉两级克劳斯富氧或纯氧制硫工艺十多种尾气处理组合工艺，产出优级品硫磺，尾气达标排放。根据不同的装置规模及不同的尾气处理工艺配置，装置投资回收期各异。	煤化工、化肥等行业
53	石化、化工行业酸性气体净化无在线炉硫磺回收及尾气加氢还原吸收工艺技术	原料酸性气通过无在线炉两级克劳斯+尾气加氢还原吸收工艺，产出优级品硫磺，尾气达标排放。装置总硫收率≥99.9%。	石化、化工等行业
54	生活垃圾及工业危废焚烧烟气净化系统技术	采用“活性炭吸附+干法脱酸塔+袋式除尘器+湿法脱酸+脱白”的工艺路线，干法净化工艺是将碱性反应物以干粉形式喷入反应塔中，中和反应的生成物以固态形式收集，通过除尘器除尘后的酸性气体从袋式除尘器出口出来，再进入湿式脱酸塔进行二级脱酸，脱白工艺主要是脱除白烟（水蒸气），实测能满足欧盟2000标准的排放要求。	生活垃圾、工业危废焚烧炉等

第一部分技术目录

55	黄磷尾气催化净化技术	<p>将吸收-液相催化氧化耦合净化、低温微氧催化氧化、氰硫同步催化水解、低常温转化精脱硫与精脱氰等核心净化技术单元进行组合，可设计出适应普通锅炉、发电锅炉燃气、材料制备燃料气、碳一化工原料气四种不同净化深度的典型工艺。满足一碳化工原料气的要求指标如下：$P \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{PH}_3 \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{COS} \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{H}_2\text{S} \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{SO}_2 \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{HF} \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$，$\text{AsH}_3 \leq 0.1 \text{ mg/m}^3$。</p>	黄磷尾气净化与资源化利用
56	含氰废气净化及资源化利用技术	<p>利用电化学与液相催化氧化协同作用，同步净化还原气氛尾气中硫化氢和氰化氢。液相催化氧化法对还原性气体具有优良的净化性能，但受溶解氧制约；采用电化学协同条件下液相催化氧化的方法，能够解决氧溶解度低、产物与催化剂分离难、多杂质同步净化难的问题。</p>	含氰废气净化及资源化利用
57	低浓度甲烷蓄热催化氧化利用技术	<p>利用高活性、高热稳定性的甲烷催化氧化材料，将甲烷和空气进行预混和后通过流向变换反应器，使甲烷在催化剂表面上发生催化氧化。该技术和火焰燃烧相比，节能效率可提高8~10%，尾气CO排放减少75%以上，NOx排放减少80%以上。</p>	适用于钢铁、有色、机械、石油化工、玻璃、陶瓷、锅炉、垃圾焚烧等行业
58	低温等离子体协同净化机制处理复杂有毒有害工业废气技术	<p>利用高压电场分离复杂有毒有害工业废气的气溶胶组分；利用低温等离子体净化或改性复杂有毒有害工业废气的气态污染物组分；利用生化、催化、吸收或吸附等净化机制处理低温等离子体改性的污染组分。克服了现有低温等离子体技术存在的二次污染和能耗高，以及部分污染物不能高效生化降解、催化技术应对复杂有机废气存在的易中毒、吸收作用不能高效分离水溶性差的污染组分等问题。</p>	气溶胶污染物和各类气态污染物共存的复杂有毒有害工业废气
四、机动车尾气排放控制关键技术			
59	汽油车尾气催化净化技术	<p>采用优化配方的全Pd型三效催化剂，以及真空吸附蜂窝状催化剂的定位涂覆技术，制备汽车尾气净化器核心组件。真空涂覆技术可以精确控制催化剂涂覆量，有效提高产品的一致性。全Pd催化剂配方根据发动机型号不同其Pd含量约在1~3g/L范围内，较同种发动机上用的普通Pd-Pt-Rh三效催化剂成本可降低50%以上。利用该催化剂及涂覆技术生产的净化器对汽车尾气中CO、HC和NOx的同时净化效果可大于95%，催化剂寿命超过10万公里，达到相当于国VI以上的尾气排放标准要求。</p>	汽车尾气污染物处理

第一部分技术目录

60	柴油车尾气NO _x 净化技术	包括Urea供给系统、SCR催化剂净化器和相关控制模块。将SCR脱硝催化剂涂覆在堇青石蜂窝陶瓷表面，通过流体和催化性能模拟设计净化器的结构，根据发动机功率、NO _x 传感器及排气温度的反馈信息制定喷尿素（氨）的策略。该技术的脱硝效率一般大于80%，最高可达95%以上。整套装置大约需投资3~8万元。每套后处理装置的价格约为1万元。	柴油车、非道路柴油机以及内河船舶
61	柴油车尾气颗粒物过滤消除技术	通过高起燃特性的碳烟燃烧催化剂以及高固含量、高流动性的涂层料液的研究，开发高性能的催化燃烧再生颗粒物过滤器（CDPF）产品。该产品的碳烟颗粒物过滤效率达到95%以上，压差≤4kPa，耐1400℃左右的高温。	柴油车、非道路柴油机以及内河船舶
62	摩托车尾气催化净化技术	以稀土复合氧化物和改性氧化铝为载体，贵金属为活性组分，并辅以助剂，混合而成催化剂活性涂层，均匀涂覆于作为基体的金属蜂窝载体表面。该技术能够在较低的温度下，将摩托车运转产生的CO、HC、NO _x 等有害气体转化为无害的CO ₂ 、H ₂ O和N ₂ 。该技术污染物的起燃温度低于210℃，400℃时三种污染物的转化效率超过95%，初始和耐久均完全满足国/欧三排放标准。	各种类型摩托车
63	大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体技术	大尺寸蜂窝陶瓷载体（直径≥285.8mm）涂覆催化剂后，用于碳氢化合物HC、一氧化碳CO和颗粒物PM中的可溶性有机组分SOF的氧化及氮化物NO _x 的还原，使污染物排放水平达到国家标准要求。蜂窝陶瓷壁厚0.17mm；孔密度400psi；热膨胀系数≤1.25×10 ⁻⁶ /℃；软化温度>1350℃；热震性能≥650℃（40~800℃）；孔轴向压缩强度>8MPa、横向压缩强度>2MPa；压力损失<200Pa；耐久性>100万公里。	中重型机动车、工程机械排气后处理系统
五、居室及公共场所典型空气污染物净化关键技术			
64	中央空调空气净化单元及室内空气净化技术	针对不同场所，采用风盘或/和组空不同的中央空调系统，设置过滤器和净化组件，集成过滤、吸附、（光）催化、抗菌/杀菌等多种净化技术，实现室内温度和空气品质的全面调节。	居室及公共场所室内空气净化
65	室内空气中有害微生物净化技术	研制层状材料为载体负载银离子的抗菌剂，在保持很好的抗菌性能的同时解决了银离子在高温使用时变色的问题。研制有机无机复合抗菌喷剂，对室内常见的有害微生物，如大肠杆菌，金黄色葡萄球菌，白色念珠菌，军团菌有很好的抗菌效果，对枯草芽孢杆菌也有很好的抑制作用。	居室及公共场所室内空气净化

第一部分技术目录

66	常温催化氧化净化甲醛技术	<p>核心是一种可常温催化氧化甲醛的新型催化剂，利用该催化剂，在常温下不借助外加能量（光和热），直接将空气中的甲醛催化氧化为无害的水和二氧化碳，操作简单，运行方便，具有高效、安全、长寿命的技术优势，克服了现有甲醛净化技术如吸附、光催化和等离子体技术不能彻底清除甲醛、依赖紫外光、寿命短、能耗高、具有二次污染等缺陷。</p>	密闭环境条件下的室内空气中甲醛气体的净化
67	担载型金属氧化物催化氧化去除饮食油烟技术	<p>可用于家庭、餐馆等中小型饮食油烟的污染治理，也可实现酒店等大型饮食油烟的污染治理。该技术完成了饮食油烟中易挥发组分的吸附催化氧化高效去除，相比较国内外治理现状，技术含量高，净化效率高，工艺简单，使用灵活，运行管理方便，投资与运行成本低。以2000m³/h的处理量为例，油烟气净化效率不低于85%，排放浓度不高于2mg/m³，运行费用低于1.5元/m³。</p>	饮食（酒店、餐馆等大中型）油烟污染治理工程
68	室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧完全氧化/分解去除纳米金催化技术	<p>采用高活性的纳米金催化材料作为室温空气净化催化剂，室内化学污染物一氧化碳和甲醛通过金催化剂床层，在空气的作用下，完全氧化为二氧化碳，臭氧通过金催化剂床层，分解为氧气。使用该催化技术，在合适的反应条件下，室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧的去除率一般大于80-90%。在实际应用中，纳米金催化去除技术可与其他技术（比如等离子体技术）进行结合或耦合，实现室内化学污染物的高效率去除。</p>	中央空调、空气净化器室内空气净化系统
六、无组织排放源控制关键技术			
69	综合抑尘技术	<p>主要包括生物纳膜抑尘技术、云雾抑尘技术及湿式收尘技术等关键技术。生物纳膜是层间距达到纳米级的双电离层膜，能最大限度增加水分子的延展性，并具有强电荷吸附性；将生物纳膜喷附在物料表面，能吸引和团聚小颗粒粉尘，使其聚合成大颗粒状尘粒，自重增加而沉降；该技术的除尘率最高可达99%以上，平均运行成本为0.05~0.5元/吨。云雾抑尘技术是通过高压离子雾化和超声波雾化，可产生1μm~100μm的超细干雾；超细干雾颗粒细密，充分增加与粉尘颗粒的接触面积，水雾颗粒与粉尘颗粒碰撞并凝聚，形成团聚物，团聚物不断变大变重，直至最后自然沉降，达到消除粉尘的目的；所产生的干雾颗粒，30%~40%粒径在2.5μm以下，对大气细微颗粒污染的防治效果明显。湿式收尘技术通过压降来吸收附着粉尘的空气，在离心力以及水与粉尘气体混合的双重作用下除尘；独特的叶轮等关键设计可提供更高的除尘效率。</p>	适用于散料生产、加工、运输、装卸等环节，如矿山、建筑、采石场、堆场、港口、火电厂、钢铁厂、垃圾回收处理等场所

第一部分技术目录

70	粮食行业转运码头除尘系统装备技术	除尘系统通过控制码头散粮接收、码头散粮发放、立筒仓散粮发放、散粮进熏蒸仓、熏蒸仓散粮发放、散粮进平房仓等工艺点上散粮输送过程中尤其是落料点或转接点的粉尘外泄，保证散粮输送设备周边的作业环境达到环保和职业卫生要求。	粮食行业
七、大气复合污染监测、模拟与决策支持关键技术			
71	大气挥发性有机物快速在线监测系统	环境大气通过采样系统采集后，进入浓缩系统，在低温条件下，大气中的挥发性有机化合物在空毛细管捕集柱中被冷冻捕集；然后快速加热解吸，进入分析系统，经色谱柱分离后被FID和MS检测器检测，系统还配有自动反吹和自动标定程序，整个过程全部通过软件控制自动完成。系统主要特点有：自然复叠电子超低温制冷系统、自主研发的温度测量技术、双通路惰性采样系统、去活空毛细管捕集、双色谱柱分离、FID和MS双检测器检测。系统可以用于在线连续监测，也可以用于应急检测（采样罐现场采样）。该系统一次采样可以检测99种各类VOCs（碳氢化合物、卤代烃、含氧挥发性有机物），在较长时间内可以满足我国环境空气中VOCs的监测要求。	大气环境监测
72	大气细粒子及其气态前体物一体化在线监测技术	利用多种快速接口组合，设计开发出具有自主知识产权的“大气细粒子及其气态前体物一体化的在线监测系统”，实现细粒子水溶性化学成分及其气态前体物的同步在线监测，包括：气态HCl、HONO、HNO ₃ 、H ₂ SO ₄ ，气溶胶中F ⁻ 、Cl ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 以及WSOC的分析，实现大气细粒子中多种元素快速在线检测。设计开发出能够进行不同粒径段的细粒子样品成分分析装置，用于解析大气细粒子的来源与转化过程，为大气污染区域协同控制提供基础数据，为区域大气细粒子污染调控措施的制定提供科学基础和监测技术。	大气环境监测
73	大气中NO _x 及其光化产物一体化在线监测仪器及标定技术	利用光解技术和表面化学方法研发准确测量NO ₂ 的技术，与常规化学发光技术结合开发能够准确测定NO、NO ₂ 、PAN和PPN的技术系统。集成所研制的动态零点化学发光法测NO模块，光降解NO ₂ 模块和钼催化转化模块，制造一体化样机，样机可同时在线精确测量大气样品中的NO、NO ₂ 、NO _y 。为评估含氮大气活性成分对O ₃ 产生贡献的准确测算和其产物的进一步演化提供可靠的技术方法和适合国情的仪器设备产品。	大气环境监测
74	大气细粒子和超细粒子的快速在线监测技术	针对区域大气颗粒物立体在线监测的技术需求，开展大气复合污染中细粒子及超细粒子物化特性的原位快速测定技术研究，基于“称重法”的振荡天平颗粒物质量浓度监测仪，完成大气PM _{2.5} 质量浓度的实	大气环境监测

第一部分技术目录

		时在线测量；利用双波长三通道气溶胶探测拉曼激光雷达，同时独立探测大气颗粒物后向散射和消光系数；利用细粒子谱分析仪，获取从纳米级至微米级范围内大气细颗粒物的粒径谱数据；利用大气OC/EC测定技术，完成大气颗粒物碳素含量的实时在线测量。	
75	臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统	臭氧激光雷达系统为车载式激光雷达系统，方便野外实验。激光器电源所需的强电与信号探测采集单元所需的弱点两相分开，消除了两者之间的相互干扰。系统设计总体上分为三大部分：第一部分为光学发射与接收光机系统；第二部分为光电探测组件中的电子学系统，包括激光器电源、信号放大、采集和控制单元；第三部分主要为信号存储与数据处理系统。	大气环境监测
76	便携式多组份气体紫外、红外现场分析仪	针对气体泄漏、无组织排放等气体现场监测需求，对SO ₂ 、NO ₂ 、CO、CO ₂ 、NO、硫化物、有机污染物(苯系物)等多种污染气体进行现场快速测量，应用于火电、化工、钢铁、矿业等工业排放的现场监测，具有小型、便携特点，既可满足现场环境的自动连续实时监测需求，也可满足工厂的常规监测以及污染泄漏事故的应急监测的需求。	对工业源、生产厂区、工业园区（气体泄漏、无组织排放）的气态污染物的监督性监测和评估
77	污染源排放遥测技术系统	针对多组份污染气体排放监测的需求，在污染源排放的下风向或周边界面，对排放烟羽剖面进行扫描测量，根据污染气体分子对紫外可见光的吸收特征光谱，通过被动差分吸收光谱分析方法获得气团剖面污染成分的柱浓度及空间分布，并结合风场信息，计算获得污染源的污染气体的排放通量。	污染源(点源、面源、非组织排放源)污染气体排放的监测
78	重点污染物面源排放VOCs及温室气体连续自动监测系统	系统采用收、发分置的双站式配置，整个设备由红外光源发射单元、红外接收单元、傅里叶变换光谱仪、系统自动控制与数据分析等四部分组成。系统具有连续自动光谱测量与处理、定量分析与显示、数据储存与回放等功能，实现了面源排放VOCs及温室气体浓度的非接触、长光程、多组分（可同时分析10~20种气体成分）、高灵敏度（主要成分的检测下限<10ppb）连续自动监测。	可用于重点污染面源，如石化工业区、大型垃圾处理场、大型养殖场以及石油天然气储运站等排放的VOCs及温室气体多组分实时连续自动监测
79	大气污染多组分排放通量快速遥测系统	在掩日法傅里叶变换红外气体通量测量方法的基础上，研制了拥有自主知识产权的大气污染多组分排放通量快速遥测系统，实现了多组分污染气体排放通量的车载快速遥感监测。	主要用于工业区域污染气体排放通量的监测；亦可用于污染排放源解析，污染物扩散、输送跟踪监测和突发性

第一部分技术目录

			污染事件快速监测分析
80	区域大气污染源识别与动态源清单技术	<p>基于完整的源分类体系建立能源统计到源分类的映射关系和生产工艺/污染控制技术的动态更替曲线，充分考虑了技术演进对排放量变化的影响，全面构建了反映我国复杂排放源特征和排放变化趋势的大气污染物排放定量方法。并进一步建立了多尺度大气污染源动态排放信息平台，包括自主开发的动态数据库技术、排放数据库与模型的接口技术，提供适于主流空气质量模型、工程化决策模型和预测预警模型的源清单。</p>	覆盖电力、供热、工业、民用、交通、农业等主要人为源，并涵盖一次颗粒物和主要气态污染物的
81	区域敏感源筛选识别技术	<p>采用气象流场诊断分析与环境数值模拟相结合的方法，开展了区域敏感源筛选识别技术研究。建立了气象-轨迹耦合模式（MM5-HYSPLIT）与K均值聚类相结合的污染物输送轨迹聚类分析技术，结合基于数值模拟（MM5-CMAQ）的通量梯度识别技术，确定影响目标区域空气质量的污染物输送路径及其三维空间分布特征，定性识别对目标区域空气质量影响较大的敏感区域。创建了基于MM5-CAMx-PSAT耦合模式系统的敏感源筛选新技术，实现对敏感区域和敏感源的半定量研究，最终建立起区域敏感源筛选识别技术体系，为区域大气污染优化控制方案的制定提供科学依据。</p>	用于筛选识别对空气质量影响较大的敏感区域和敏感源
82	空气质量多模式集成预报系统	<p>以自主研发的嵌套网格空气质量预报模式NAQPMS为核心，集成最优插值和集合卡尔曼滤波等大气化学资料同化技术、大气复合污染化学反应模拟技术、污染源识别与追踪等多项共性技术，构建了国际上首个业务化空气质量多模式集成预报系统。系统可提供1~3天短期气象要素、空气质量的精细预报和7天的趋势预报。系统稳定性高，实现100%自动化，预报时效小于8小时，短期预报不确定性小于30%。该系统整个投资约1200万元，年运行、维护和软件升级成本约80万。</p>	区域、城市空气质量模拟、预测、预警
83	城市机动车排放控制决策评估技术	<p>开发了基于图形用户界面的中国城市机动车排放因子模型，在排放因子模型基础上，将机动车排放量化与GIS技术相结合，实现路网机动车排放污染的地图化显示和空间分析评价，为进一步准确量化机动车排放控制的效果提供了可视化的评估平台。该平台可准确、动态和定量显示城市交通流以及路网排放的时空分布特征，为空气质量管理 and 机动车综合控制决策提供直接数据支持。</p>	用于建立高分辨率城市机动车排放清单、机动车排放污染空气质量模拟、机动车排放对人体健康影响评估和城市机动车排放控制决策

第一部分技术目录

84	多源卫星遥感大气污染综合监测技术	<p>多源卫星遥感可以提供大气污染源的空间分布，区域大气污染的时间序列变化和传输信息。环境空气遥感监测技术以我国自主卫星和国外高光谱卫星数据为基础，发展用于灰霾、雾、气溶胶光学厚度、PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、CH₄以及秸秆焚烧等大气污染参数监测系统。该系统提供每天重点区域、城市群和全国尺度的大气污染分布信息，具有优秀的可扩展性，7*24小时连续运转能力，能通过并行计算快速处理大批量卫星遥感数据，自动化程度很高，可用于大气遥感监测的业务化运行。</p>	用于重点区域、城市群和全国尺度大气环境监测
85	环境空气监测代表性的印痕分析技术	<p>该技术主要应用于区域大气污染物的监测分析，识别污染来源的空间分布。该技术由两个主要部分组成，分别为拉格朗日粒子扩散模拟方法，以及印痕分析方法。该项技术的主要应用方法为：利用气象模式为粒子扩散模式提供边界层风和湍流资料背景场；运用自主开发的拉格朗日粒子模式进行反向扩散模拟；使用后处理模式统计分析印痕分布及与监测浓度的相关性，定性分析区域污染物来源分布。成果可为区域污染来源的动态分析判断提供技术支撑。</p>	用于分析区域大气环境监测站网的空间代表性
86	大气PM _{2.5} 水溶性污染组分及其气态前体物在线监测系统	<p>该系统采用自主研发的表面磨砂的旋转环形湿式扩散管和冷凝式旋风撞击的气溶胶捕集装置，在自主研发的软件和硬件的控制下，实现了自动连续观测，数据同步传输等功能。可连续测量气态HF、HCl、HONO、HNO₃、SO₂、NH₃等和气溶胶中水溶性离子成分F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等，可根据实验需要，选择只监测气体或气溶胶，可连续无人值守运行5-7天，自动出数，数据实时上传。</p>	用于大气中气态污染物和气溶胶化学组分的在线监测
87	过氧酰基硝酸酯类(PANs)化合物快速在线监测系统	<p>该系统是采用气相色谱法(GC-ECD)检测大气中过氧酰基硝酸酯类化合物PANs的一体化在线测量技术及设备。该系统还包括自主设计研发的在线零气生成和在线标定系统。系统采用双气路，一路用于采集样品，一路用于零空气制备，保证采样与标定顺利进行。系统可一次完成对常见PANs的分析，时间分辨率高达5分钟，检测线达到5pptv。自行设计和编制的运行软件，可完成采样、分析、热解和系统标定过程的全程自动化控制。</p>	用于对大气中各类PANs进行系统监测
<h3>八、清洁生产关键技术</h3>			
88	水煤浆代油洁净燃烧技术	<p>水煤浆代油洁净燃烧技术是把煤磨成细粉与水少量添加剂混合成悬浮状高浓度浆液，像油一样采用全封闭方式输送和储存，用泵输送，并用喷嘴喷入锅炉炉膛雾化悬浮燃烧，燃烧效率高，它是一种以煤代油的新技术。在制浆过程中要对煤净化处理，处理</p>	各种电站锅炉、工业锅炉、工业窑炉

第一部分技术目录

		<p>后能除去原料煤中灰分的50~70%和40~90%的硫，可以减少燃烧造成的污染。同时，由于水煤浆中含水量多，燃烧温度低，能有效降低热力型NO_x，而气化和水煤气反应也可以降低燃料型NO_x的产生，故有清洁燃料之称。水煤浆燃烧效率可达99%以上。</p>	
89	多重空气分级低NO _x 燃烧技术	<p>糅合了高浓淡比可调式煤粉浓淡低NO_x燃烧器、偏置周界风、一二次风大小切圆（二次风偏转径向空气分级燃烧）、主燃区CCOFA空气分级技术、全炉膛SOFA深度垂直空气分级燃烧等的多重空气分级低NO_x燃烧技术，通过炉内燃烧控制NO_x。具有初投资少、零运行成本、改造施工周期短、运行简单等优点，而且采用燃烧技术降低NO_x后可以减少后期烟气NO_x脱除的设备投资和运行费用。对于已有机组，也可直接进行燃烧器部分改造，降低NO_x排放，改造后不影响锅炉蒸汽侧和烟气侧参数，不影响锅炉效率。该套技术用于烟煤、贫煤、无烟煤、褐煤、水煤浆等多种燃料，可达40%~80%的NO_x脱除率，同时保证锅炉高效燃烧，改善锅炉结焦状况，提高锅炉煤种适应性和低负荷稳燃性能。单位投资大致为20~40元/kW。</p>	燃煤电站锅炉

第二部分技术简介

一、电站锅炉烟气排放控制关键技术

1. 燃煤电站锅炉石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术

燃煤电站锅炉石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫技术是目前世界上最成熟、实用业绩最多的一种烟气脱硫工艺，其主要原理在于采用石灰石（或石灰）作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫（ SO_2 ）与浆液中的碳酸钙（或氢氧化钙）以及鼓入的空气中的氧化进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏，经脱水装置脱水后可抛弃，也可以石膏形式回收。该脱硫方法最早于 1909 年由美国 Eschellman 首先提出，20 世纪 70 年代中后期才开始逐步在美国、德国、日本等发达国家和地区得到规模化推广应用；而我国在 20 世纪 90 年代中后期开始引进发达国家的石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术。随后，国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持，特别是“十五”、“十一五”以来，在系列国家 863 计划课题、国家科技支撑计划课题等国家科技计划项目的连续资助下，国内多家单位通过自主研发和引进、消化吸收、再创新，在脱硫效率、吸收剂品质适应性、煤质和硫份适应性等多方面取得突破，使燃煤电站锅炉石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术及其标准化、产业化取得了重大进展，形成了一批创新性突出、具有自主知识产权、技术水平高、国际竞争力强的科技创新成果，如“大型火电厂烟气脱硫脱硝成套关键技术的开发与应用”获 2006 年国家科学技术进步奖二等奖，“湿法高效脱硫及硝汞控制一体化关键技术与应用”获 2012 年国家科学技术进步奖二等奖等，并解决了其工艺设计、设备成套和运行规范化等问题，提高了脱硫设施工程建设质量和运行管理水平，其投运装机容量从 2006 年的 9642.6 万千瓦到 2012 年底已超过了 5.7 亿千瓦（占脱硫总装机容量 85% 以上）。该技术研究成果为我国电力行业“十一五” SO_2 减排任务的提前完成发挥了重要作用，也为“十二五” SO_2 减排约束性指标的实现提供了强有力的技术支撑。

该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，可达 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.5 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，但相对占地面积较大、投资及运行费用高；适用于燃煤电站锅炉烟气脱硫。

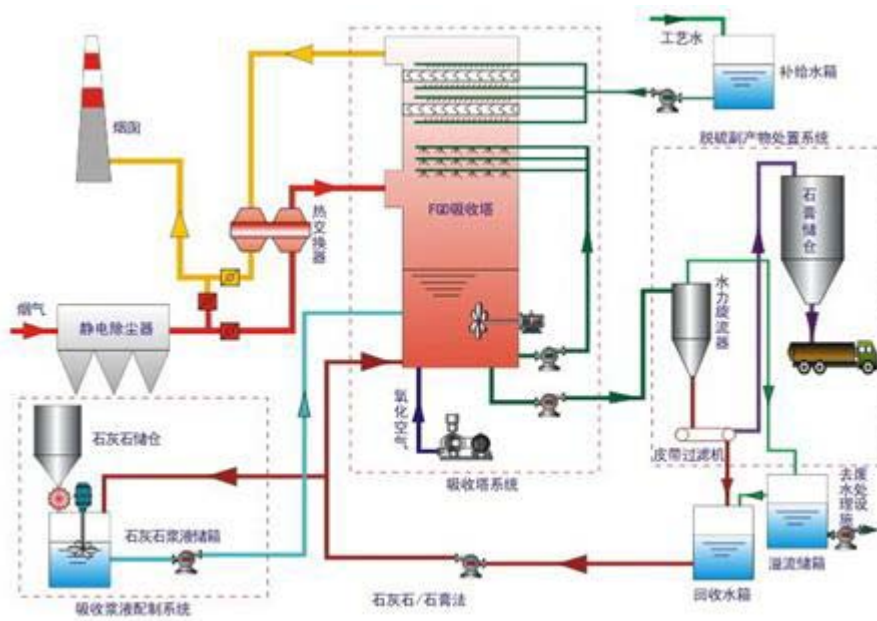


图 1-1 典型石灰石-石膏湿法脱硫技术工艺流程图



图 1-2 石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统示意图

典型案例(一)

案例名称

2×1000MW 超超临界机组湿法烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2010 年 5 月脱硫项目开工建设，2011 年 6 月首套脱硫装置与 7# 主机同步完成 168 试运行，第 2 套脱硫装置与 8# 主机组于 2011 年 10 月同步完成 168 试运行。本项目于 2013 年 11 月 25 日获中国施工企业管理企业颁发的 2012-2013 年度国家优质工程奖。

主要工艺原理

本项目采用带托盘的喷淋式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的循环浆液接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。在吸收塔内通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

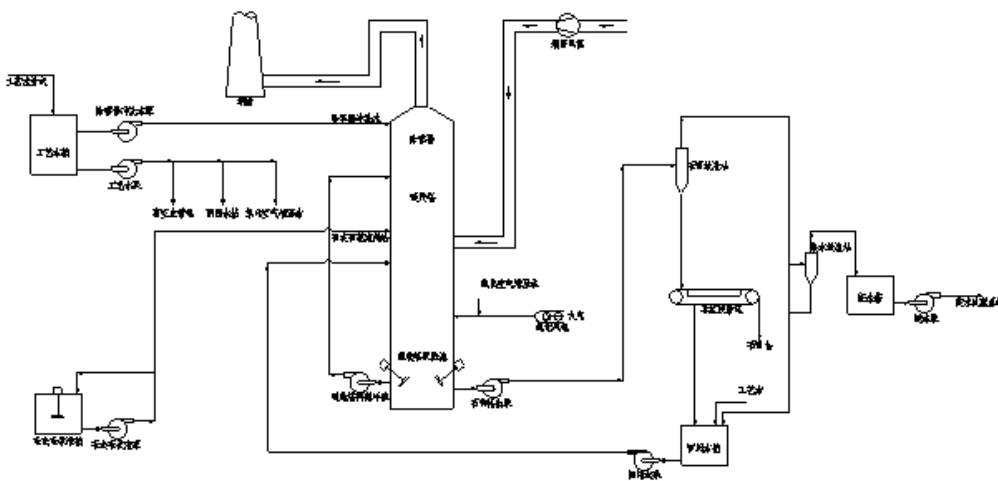


图 1-3 本项目湿法脱硫工艺原理图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的托盘喷淋塔工艺，气流分布均匀，吸收塔直径越大，优势越明显。
- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，增加了浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。
- 吸收塔采用管式溢流系统，结构简单、不堵塞，更好的控制吸收塔内的液位平衡。
- 工艺水管与除雾器冲洗水管采用母管制设计，确保工艺水系统安全可靠。

- 系统布置紧凑，吸收塔靠近烟囱布置，烟道走向简捷，降低了烟气阻力，提高了系统可靠性。



图 1-4 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)的要求，脱硫效率达到 96% 以上(二氧化硫入口浓度为 $2153\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $81\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2.96 亿元。

运行费用

根据 2011 年 10 月-2012 年 10 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 12750 万元/年，年折旧费用约为 1970 万元（按 15 年平均折旧），年维修费用约 600 万元；副产物石膏全部作为商品销售，一年收入约为 670 万元。一年电厂因上网电价的补贴约为 16500 万元/年（上网电量按机组年运行时间 5500 小时计，电补贴按 1.5 分/度电计）。

该项目的一年来实际经济净效益约为 1850 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，两台百万千瓦机组脱硫装置的竣工投运，每年减少二氧化硫排放 71190 吨，对于改善地区大气污染质量、减轻酸雨污染具有重要作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天地环保工程有限公司

联系人：胡达清

地址：浙江省杭州市凤起路 108 号国信房产大厦 9 楼 邮政编码：310003

联系电话：13857155427 E-mail: hdqgd@126.com

典型案例(二)

案例名称

2×330MW 机组湿法烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2007 年脱硫项目与主机同步开始设计，2009 年完成 168 小时试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于石灰石的溶解和副产物的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

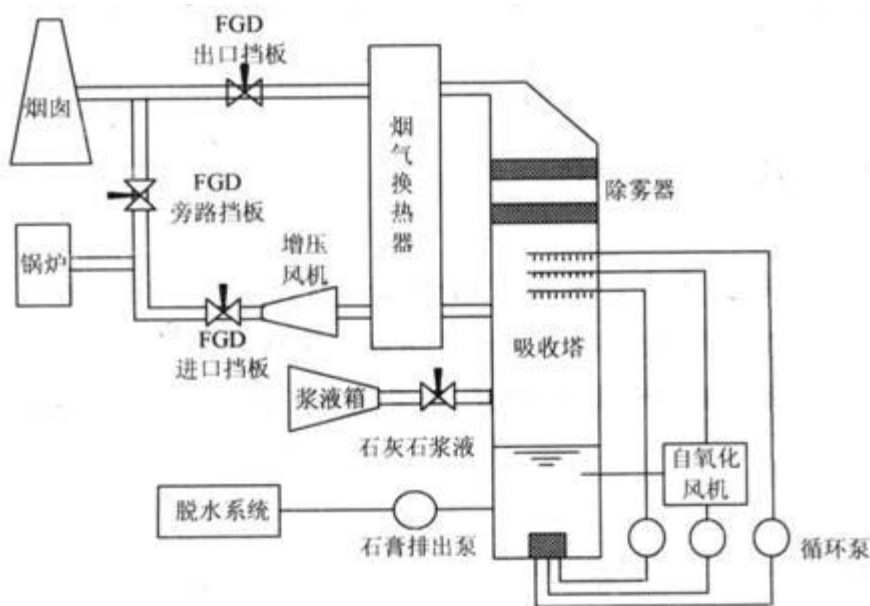


图 1-5 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，既保证了脱硫效率，又减少了占地，节约投资。
- 吸收塔喷嘴采用双向中空锥型式，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。
- 工艺水管与除雾器冲洗水管采用母管制设计，确保工艺水系统安全可靠。

- 系统布置紧凑，烟道走向简捷，吸收塔靠近烟囱布置，循环泵、氧化风机布置在净烟道下方，烟道支架和循环泵房综合利用。



图 1-6 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》的要求，脱硫效率达到 96% 以上(二氧化硫入口浓度为 $2070\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $83\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.2 亿元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京国电龙源环保工程有限公司

联系人：路光杰

地址：北京市海淀区西四环中路 16 号院 1 号楼

邮政编码：100039

电话：010-57659618/13910118942

E-mail: lugj@lyhb.cn

典型案例(三)

案例名称

4×600MW 亚临界机组湿法烟气脱硫改造工程

项目概况

本工程按总承包方式建设，采用石灰石—石膏湿法全烟气脱硫工艺，每炉设 1 座吸收塔。其中，3、4 号机组安装有 GGH，1、2 号机组未安装 GGH。由于电厂来煤渠道复杂、燃煤含硫量逐年增高，业主方要求对 4 台机组的脱硫系统进行增容改造。改造 FGD 装置按 EPC 总承包方式进行建设。2011 年 9 月 3#、4# 机组完成 168 试运行，2012 年 1 月完 1# 机组成 168 试运行，2012 年 6 月 2# 机组完成 168 试运行。本项目的核心关键技术获 2012 年国家科学技术进步奖二等奖。

主要工艺原理

本项目采用双回路塔湿法脱硫技术，在原脱硫塔的基础上设计预洗涤塔。主要工艺原理如下：石灰石浆液通过循环泵从预洗涤塔浆池送至塔内喷淋系统，与烟气接触发生化学反应吸收烟气中的 SO_2 ，在预洗涤塔循环浆池中利用氧化空气将亚硫酸钙氧化成硫酸钙。石膏排出泵将石膏浆液从预洗涤塔和原吸收塔送到石膏脱水系统。预洗涤塔为逆流无填料空塔，强制氧化系统。浆液循环泵将预洗涤塔浆池内的吸收剂浆液循环送至喷嘴，预洗涤塔浆液循环泵按照单元制设置（每台预洗涤塔浆液循环泵对应一层喷嘴）。脱硫后的烟气夹带的液滴将在吸收塔出口的屋脊式除雾器中收集。烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

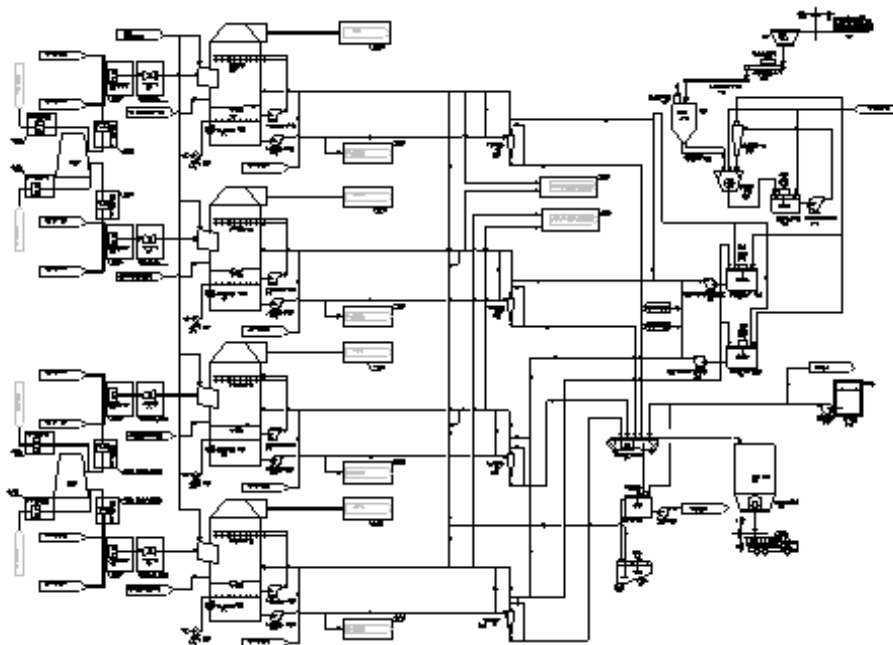


图 1-7 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用具有自主知识产权的双回路塔湿法脱硫工艺，并对塔内流场及构件进行系统优化。

- 采用喷淋空塔，逆流烟气洗涤，不设置任何隔栅、托盘装置，可以有效降低系统运行阻力，并有效避免结垢，降低运行维护成本。
- 采用氧化喷枪，设计简单可靠，空气泡更小，氧化效果好，氧化空气消耗量更少，不会堵塞，更节能。
- 吸收塔浆池安装侧进式低速搅拌器，确保在任何时候都不会有石膏浆液的沉淀、结垢或堵塞。
- 优化喷淋设计，保证 300%~600% 覆盖率，循环泵采用单元制喷淋层，允许根据运行状况关闭喷淋层，在最低的能耗下达到设计脱硫效率。喷淋层喷嘴采用直接粘接，能有效减少喷淋层浆液冲刷塔壁及喷淋层梁。喷淋层间距设计不仅满足性能要求，而且充分考虑到检修和维护需求。



图 1-8 案例双回路吸收塔改造工程效果图



图 1-9 案例双回路吸收塔现场图

主要技术指标

本脱硫改造工程原设计煤含硫量 1.6%， SO_2 浓度 $3344\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，原脱硫效率 95%；改造后设计煤含硫量 4.0%， SO_2 浓度 $9320\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫效率不低于 97.85%。测试数据表明，能够满足设计要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2.363 亿元。

运行费用

本工程为脱硫改造项目，改造后整个电厂脱硫系统的石灰石耗量为 157.24t/h，工艺水耗量为 635.6t/h，脱硫副产物石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)产生量 300t/h。同时，本技术相对单塔可以降低液气比 10%~15%，实际运行的电耗相对单塔较小。以本项目为例，超高效湿法脱硫技术与单塔改造相比系统阻力增加相当，但可以减少一台流量 10000m³/h 的循环泵，相当于每小时每台机组可节电 800kW 左右。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江浙大网新机电工程有限公司

地址：浙江杭州滨江区江汉路 1785 号双城国际 4 号楼 15F

邮政编码：310051

联系人：马志刚

电话：0571-28800823

E-mail: mazhigang@unitedmne.com

典型案例(四)

案例名称

2×630MW 机组配套烟气脱硫改造工程

项目概况

本项目于 2012 年 10 月开始设计，2012 年 11 月开工建设，2013 年 7 月完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用单塔双区湿法脱硫技术，该技术是传统石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术的延伸和发展，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由六层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。浆池部分布置有 pH 调节器和射流搅拌，通过两者的相互配合，使得浆液区 pH 调节器上部 pH 可维持在 4.5~5，而下部 pH 可维持在 5~6.4，在单塔的浆池中相对维持上下 2 种 pH 值环境的不同区域，分别作为氧化结晶区和吸收区，即实现“单塔双回路”。在氧化结晶区通过射流搅拌和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

单塔双区湿法脱硫技术的分区关键是控制上下部浆液的返混，经过总结现场运行经验，通过设置氧化隔离装置，可以很好的防止上下部浆液返混，在塔内形成分区，保证高效的脱硫效率，同时提高了副产物石膏品质。

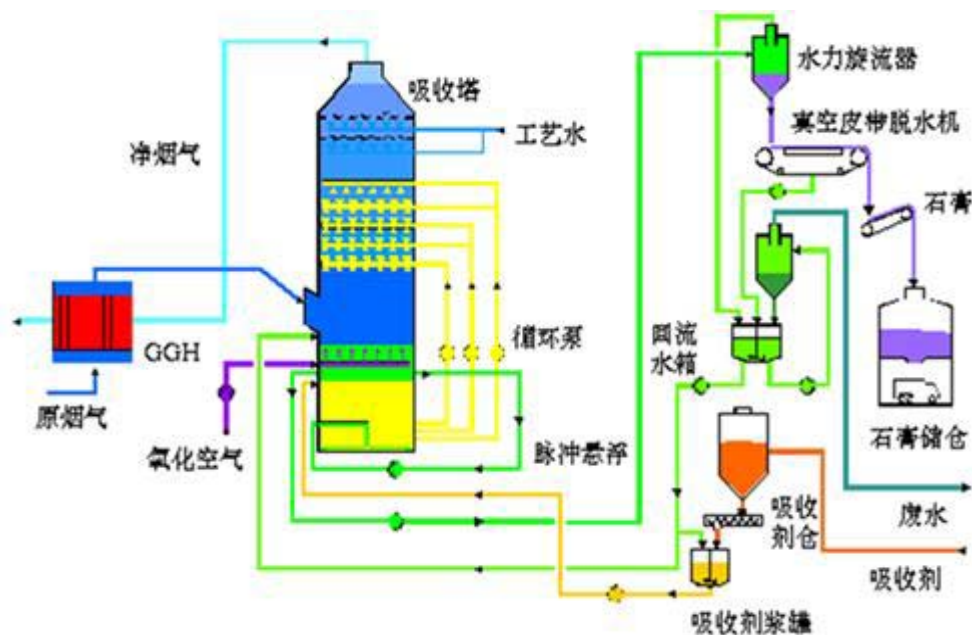


图 1-10 本项目脱硫工艺流程图

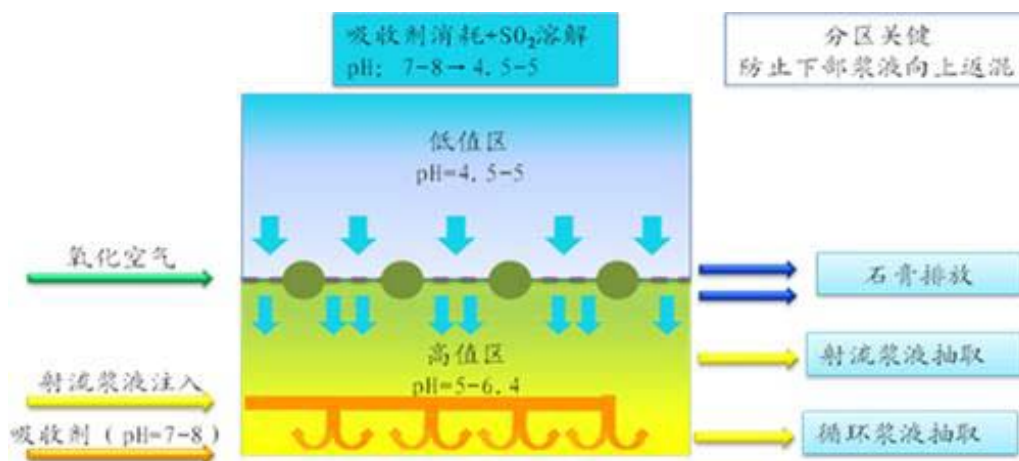


图 1-11 “双回路”浆池

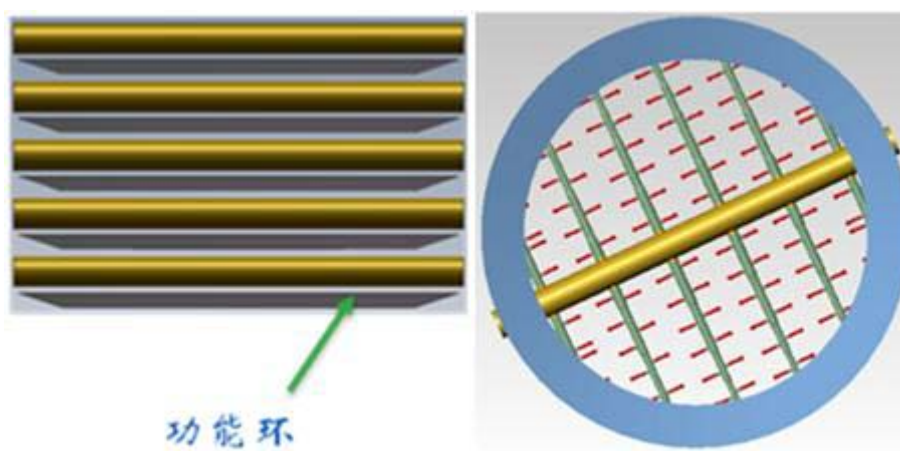


图 1-12 功能环（立面）及功能环布置（喷淋层上方）

关键技术或设计创新特色

- 通过常规的单塔系统达到了双回路系统的优点，节约大量投资。
- 塔外无需任何附加脱硫设施。
- 在吸收塔内没有可动部件的情况下，实现固体物的悬浮。
- 浆液池分为氧化结晶区和吸收区 2 种回路。
- 吸收剂的利用率高、石膏纯度最高。
- 喷淋层之间设置烟气分布功能环，在塔壁处阻挡短路烟气，使其向中心区域流动，可有效防止脱硫效率无谓降低，保证高脱硫效率。
- 脱硫系统停机后可以很顺利地重新起动。

主要技术指标

本项目系统主要指标：脱硫效率 98.5%~99%；排放浓度 22~32mg/Nm³；系统阻力 1090Pa（保证值≤2750Pa）。



图 1-13 案例现场图

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 5488.99 万元。

运行费用

按目前的实际运行情况，副产物石膏全部作为商品销售，一年收入约为 1100 万元/年；一年电厂因上网电价的补贴约为 11800 万元/年（上网电量按机组平均负荷 80%，厂用电率按 20%计）。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：王建春

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：15990392960

E-mail: wangjianchun@lonjing.com

典型案例(五)

案例名称

2×660MW 超临界机组湿法烟气脱硫工程

项目概况

本技术属于产学研合作开发成果，关键技术获 2012 年国家科学技术进步奖二等奖。本项目于 2010 年 4 月与主机同步开始设计，2010 年 6 月与主机同步开工建设，2012 年 3 月首套脱硫装置与 1#主机同步完成 168 试运行，第 2 套脱硫装置与 2#主机于 2012 年 5 月同步完成 168 试运行。该项目被评为 2013 年国家重点环境保护实用技术示范工程及 2013 年中国设计行业优秀设计奖。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于石灰石的溶解和副产品的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

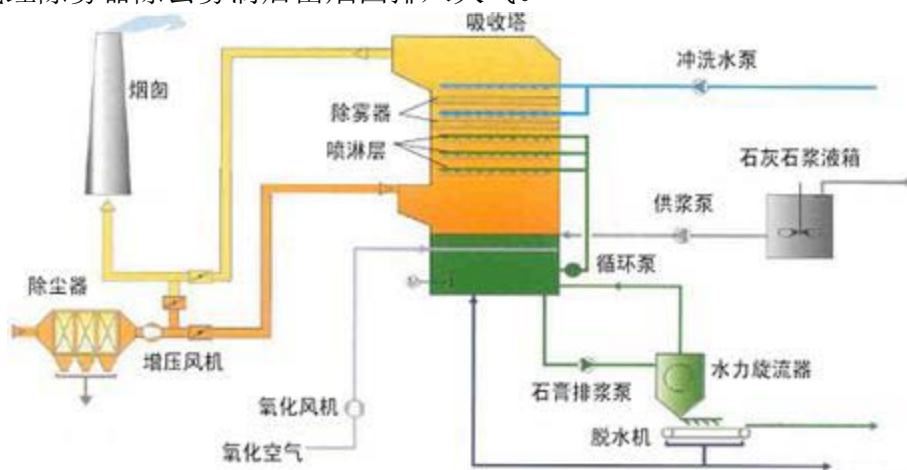


图 1-14 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，不设置旁路烟道、烟气换热器和增压风机，烟气系统简单，阻力小，脱硫系统的可利用率大于 99%。
- 吸收塔喷嘴采用双向与单向喷嘴结合，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。
- 设计采用石膏滤液水作为磨机制浆水，更好的控制整套系统内水平衡。

- 工艺水管与除雾器冲洗水管采用母管制设计，确保工艺水系统的安全可靠。
- 系统布置紧凑，烟道走向简捷，吸收塔靠近烟囱布置，循环泵、氧化风机布置在净烟道下方，烟道支架和循环泵房综合利用；石膏脱水车间与脱硫废水处理车间合为工艺楼，制浆车间与电控室合为综合楼，两座楼并排布置脱硫区域中间。



图 1-15 案例全貌图



图 1-16 案例吸收塔图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)的要求，脱硫效率达到 96% 以上(二氧化硫入口浓度为 1200~3000mg/Nm³，出口浓度 20~100 mg/Nm³)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.05 亿元。

运行费用

根据 2012 年 3 月-2013 年 3 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 5300 万元/年，年维修费用约 500 万元。副产物石膏全部作为商品销售，一年收入约为 285 万元/年；一年电厂因上网电价的补贴约为 9884 万元/年(上网电量按机组平均负荷 80%，厂用电率按 20%计)。

该项目的一年来实际经济净效益约为 4334 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：蓝天环保设备工程股份有限公司

联系人：尹安琴

地址：杭州市西湖区翠柏路 6 号 2 号楼

邮政编码：310012

电话：0571-56798797

E-mail: yinanqin1980@126.com

2. 火电厂双相整流湿法烟气脱硫技术

火电厂双相整流湿法烟气脱硫技术结合了喷淋塔和鼓泡塔脱硫技术,利用在脱硫吸收塔入口与第一层喷淋层间安装的多孔薄片状设备,使进入吸收塔的烟气经过该设备后流场分布更均匀,同时烟气与在该设备上形成的浆液液膜撞击,促进气、液两相介质发生反应,达到脱除一部分 SO_2 的目的。

在家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持,特别在“十一五”国家科技支撑计划——燃煤电厂双相整流烟气脱硫成套技术与装备(2007BAC24B01)的资助下,通过自主研发和引进、消化吸收、再创新,开发出具有自主知识产权核心的双相整流技术脱硫效率及阻力计算软件程序,并在 135MW 脱硫吸收塔中试试验,验证并修正了计算软件。2012 年底,烟气脱硫喷淋塔双相整流技术在陕西 300MW 脱硫吸收塔成功应用。该技术成熟稳定,不额外占用场地,在一定程度上可不对脱硫装置其它系统进行改造即可实现达标排放,投资成本少;吸收塔系统综合能耗低,特别适用于高硫分燃煤烟气脱硫系统达标改造项目。

该技术在烟气进入喷淋层前预先脱除 SO_2 的经济效率为 20%~30%,阻力为 600Pa~700Pa,单位投资大致为 3~6 元/kWh;折算双相整流装置阻力风机增加电耗和浆液循环泵减少电耗,综合电耗降低约 250~850 kWh/h。

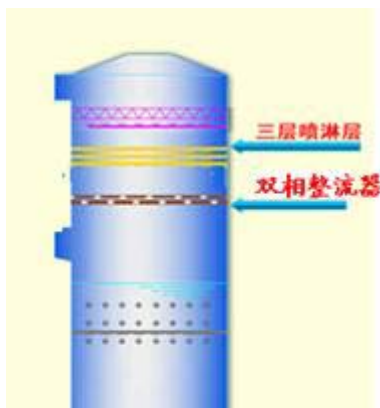


图 1-17 双相整流烟气脱硫技术原理图

图 1-18 双相整流装置工程实物图

典型案例

案例名称

2×300MW 机组脱硫吸收塔双相整流装置改造项目

项目概况

本项目于 2012 年 6 月完成吸收塔双相整流装置改造施工工作，2012 年 7 月完成项目测试试验。

主要工艺原理

本项目采用双相整流湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：在吸收塔原烟道入口上沿 0.9m，距最底层喷淋层中心线 1.6 m 处设置双相整流脱硫装置，浆液在双相整流装置上形成一层液膜，烟气通过液膜时部分 SO_2 被吸收脱除；同时双相整流装置可使烟气流场更加均匀，提高喷淋脱硫效率。

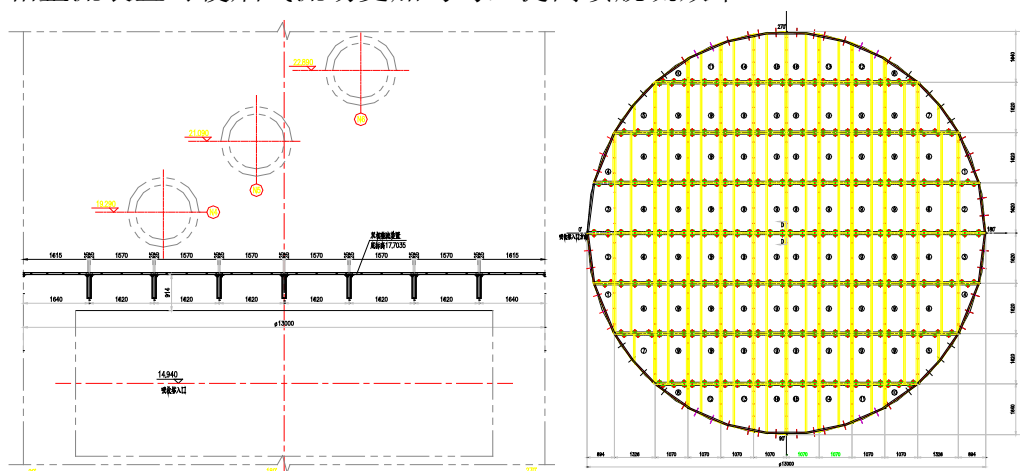


图 1-19 本项目双相整流装置安装示意图

关键技术或设计创新特色

- 采用自主研发的软件计算程序，合理平衡了脱硫率与阻力之间的关系，在较小阻力下实现脱硫效果最优。
- 采用计算机模拟技术，根据烟气速度分布云图，确定双相整流装置的最佳安装位置，使烟气分布更加均匀，从而提高喷淋塔原有喷淋区域的脱硫效率。



图 1-20 案例全貌图



图 1-21 案例吸收塔图

主要技术指标

本项目脱硫装置出口 SO₂ 浓度满足 200mg/Nm³（标态、干基、6%O₂）以下的排放要求（入口 SO₂ 浓度不大于 5438mg/Nm³（标态、干基、6%O₂）的情况下），双相整流装置提高脱硫效率 20% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 178 万元（即吸收塔双相整流装置改造费用）。

运行费用

本项目在浆液循环量保持不变，满足脱硫装置出口 SO₂ 达标排放情况下，风机电耗增加约 350~450kWh/h，年运行费用增加约 80 万元左右（机组利用小时数为 5000h），基本与电厂 SO₂ 年排污费持平，故该项目新增双相整流装置后，不增加脱硫系统运行费用。

用户意见

本项目 4#机组采用脱硫吸收塔双相整流装置改造后，在不对脱硫装置其它系统改造的情况下，实现 SO₂ 达标排放，大大节省了项目改造投资费用，是高效、低能耗脱硫改造项目的典范。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中电投远达环保工程有限公司

联系人：李云涛

地址：重庆市北部新区金渝大道 96 号

邮政编码：401122

电话：023-63062744

E-mail: yuntao.li@yuandaep.com

3. 燃煤锅炉电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术

电石渣-石膏法脱硫工艺，是以电石渣代替石灰石作为脱硫剂，脱除燃煤锅炉烟气中二氧化硫。其主要原理在于采用电石渣（主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫（ SO_2 ）与浆液中的氢氧化钙以及鼓入的空气中的氧化进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。

与常规的石灰石-石膏湿法相比，电石渣-石膏法液气比低，脱硫反应速度快，脱硫效率高（一般脱硫效率都能达到 95% 以上）。电石渣作为一种大宗工业固废，具有以废治污、资源综合利用的循环经济效益；同时，采用电石渣石膏法工艺每脱除 1 吨二氧化硫比石灰石-石膏法减排约 0.69 吨二氧化碳。选用电石渣代替石灰石来进行烟气脱硫，可降低脱硫运行成本，具有良好的经济效益、环境效益和社会效益。目前，我国多家单位已有该技术的具体实施工程案例。

该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，可达 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.35 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，运行费用低，适用于燃煤锅炉烟气脱硫。

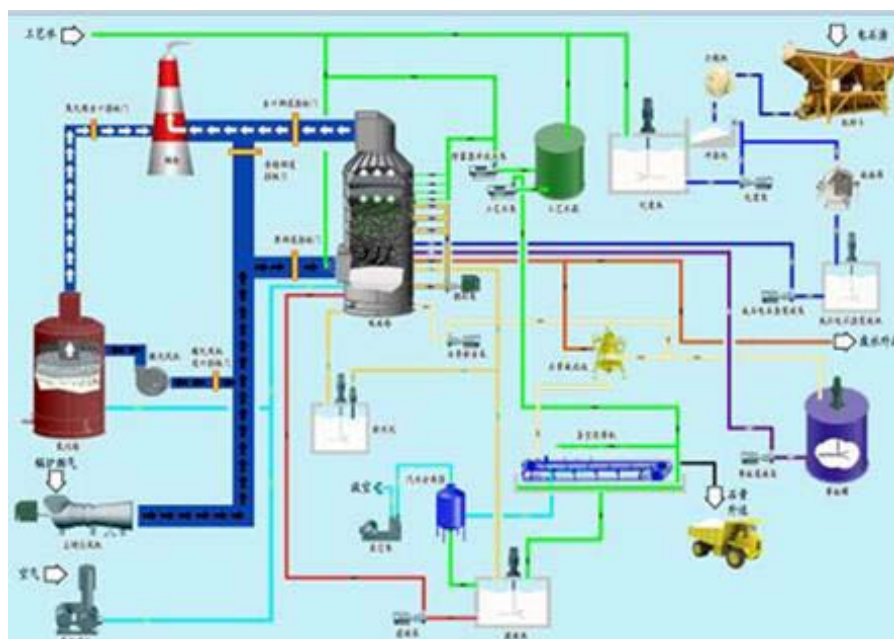


图 1-22 典型工艺流程图

典型案例（一）

案例名称

2×300MW 亚临界机组湿法烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2009 年 7 月脱硫项目与主机同步开始设计，2010 年 4 月与主机同步开工建设，2011 年 8 月脱硫装置与主机同步完成 168h 试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式电石渣-石膏法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的电石渣浆液由电石渣浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。烟气中的二氧化硫以及其它酸性物质与氢氧化钙反应，形成亚硫酸钙等物质。吸收塔分为塔内吸收区和塔外氧化结晶区两个部分：塔内吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；塔外氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于副产物的生成二水硫酸钙（石膏）。石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

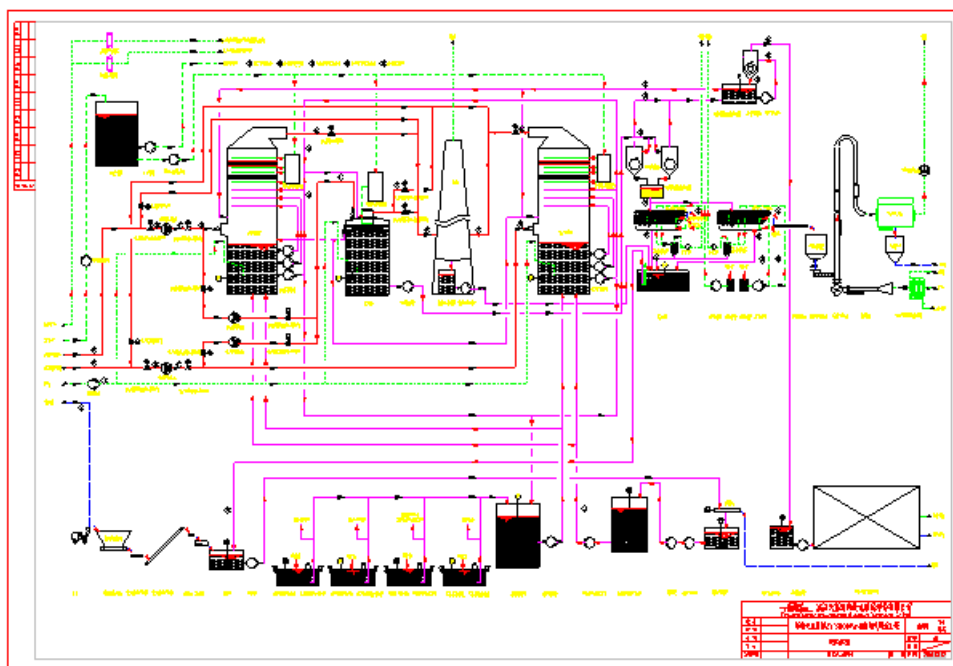


图 1-23 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋技术，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。大量应用实例证明该技术塔内传质稳定、气液接触充分，可保证系统的高效、稳定运行，能够达到最佳脱硫效果。
- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，并选用独特的喷嘴布置形式，可对整个塔

体有效横截面（烟气分布横截面）进行充分合理地覆盖，截面喷淋量均匀，雾化效果好，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。

- 采用特有的塔外氧化技术，实现分区氧化功能，使吸收塔内高 pH 值运行提高脱硫效率，塔外低 pH 值运行充分氧化石膏。
- 滤液回用化浆，冷却水收集并回用，更好的控制整套系统内的水平衡。



图 1-24 案例现场图



图 1-25 案例吸收塔图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准（GB13223-2011）》标准的要求，脱硫效率达到 97.2% 以上，二氧化硫排放浓度为 $56\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.07 亿元。

运行费用

与传统的石灰石-石膏法比较，节约运行费用 12%。

用户意见

该脱硫系统运行稳定可靠，满足环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

典型案例（二）

案例名称

2×130t/h 应急锅炉脱硫系统改造项目

项目概况

本技术属于产学研合作开发成果，获 2013 年度福建省科技进步奖二等奖。本项目于 2009 年 7 月开始设计、开工建设，2009 年 12 月完成 168 试运行，2010 年 2 月完成性能验收试验。

主要工艺原理

电石渣/石灰粉由粉仓进入化灰罐加水进行消化，配制成具有一定浓度的浆液，然后送入成品浆液罐储存，最终通过供浆泵打入吸收塔。吸收塔有三层喷淋层，浆液经喷嘴雾化成雾滴，从上部向下喷洒。烟气经过引风机进入吸收塔，在塔内上升过程中与雾滴充分接触，大部分 SO_2 被除去，反应后的净烟气通过除雾器，以除去夹带的液滴，然后排至烟囱。通过氧化风机将空气鼓入塔内，保证了被吸收的 SO_2 与浆液反应后生成的 HSO_3^- 完全氧化成 SO_4^{2-} ，直接降低浆液发生结垢的可能性，同时使石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）结晶析出，在吸收塔内停留一定时间后，通过石膏外排泵送至石膏旋流站。经旋流器分离的高浓度石膏浆液进入真空皮带机脱水形成水分少于 10% 的石膏。

改造后的脱硫系统采用塔内氧化-钙基强碱(电石渣/石灰粉)-石膏湿法工艺，一炉一塔方案，吸收塔采用喷淋塔。脱硫副产品采用旋流站和皮带脱水机配合的二级脱水装置，不设置废水处理系统。本工艺过程与其他石灰-石膏湿法脱硫系统相比，突出特点为采用了单塔强制氧化的方式，在同一个吸收塔内完成吸收、氧化和结晶过程，有别于原有的非氧化流程，属一种新颖的脱硫装置。

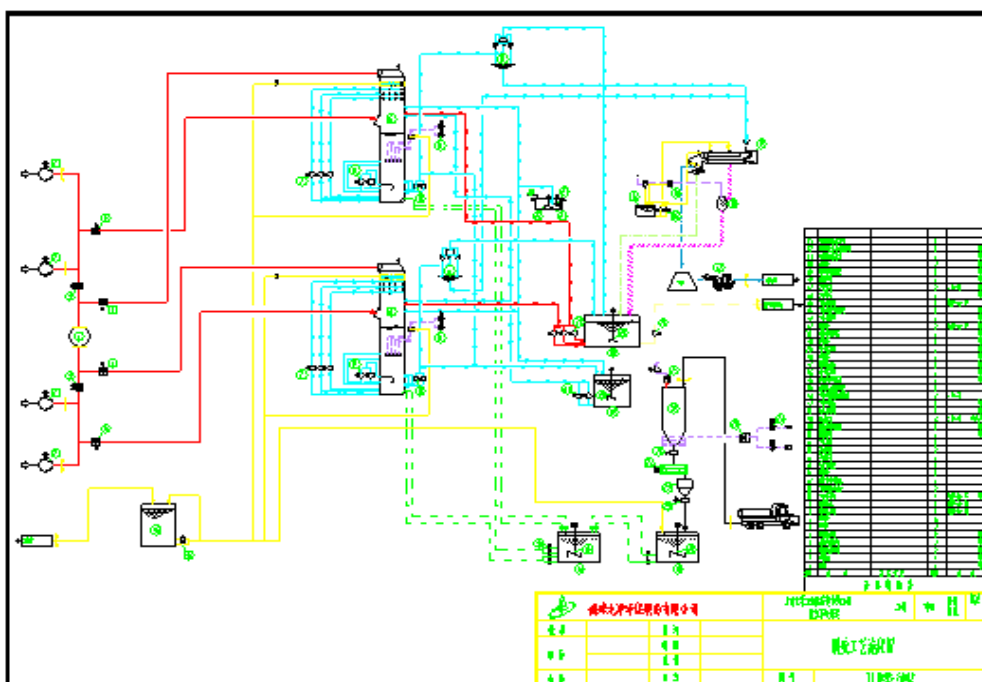


图 1-26 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 在吸收塔浆池内设置有氧化自动隔离器，将吸收塔浆池分为上、下两个分区，分别为pH的“低值区”和“高值区”。分隔采用粗管间隔布置方式，使2个分区的浆液既有分隔，又有交换。在分隔管的间歇中设置氧化空气喷嘴。隔离器上部“低值区”浆液呈现较强的酸性，pH可达4.5~6，有利于亚硫酸钙的氧化和结晶。隔离器底部“高值区”浆液pH可达6~7.5，有利于循环浆液对SO₂的吸收和脱硫反应。
- 采用射流泵进行浆池悬浊液的混合，舍去了浆池搅拌器方式，避免浆液对流返混对pH的影响，同时解决搅拌器方式磨损和密封问题。
- 采用的吸收塔顶部侧向斜切引出方式，也是龙净环保经过研发后确定的优化出口方式，在保证脱硫效果的情况下，有效地降低了塔高。



图 1-27 现场工程图

主要技术指标

本项目系统达到的主要技术指标如下：

1) SO₂ 脱除率及 FGD 出口 SO₂ 浓度

在煤的含硫量不大于 2%或入口浓度不大于 5385mg/Nm³(两者中选较大者)的前提下，脱硫效率不小于 95%，脱硫系统出口 SO₂ 浓度不超过 200mg/Nm³。通过增加吸收剂加入量可进一步提高效率，满足国家最新排放标准。

2) 物料消耗 (2 台)：

性能验收试验期间脱硫系统按设计条件运行，在确保脱硫效率的条件下，装置连续运行 14 天折算到 BMCR 工况下的石灰消耗量平均值不大于 1.85t/h，工业用水量消耗量平均值不大于 27.32t/h，电量消耗量平均值不超过 750kWh/h，仪用压缩空气耗量 0.5Nm³/h，Ca/S 比 1.03，液气比 L/Q13.04。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2130 万元。

运行费用

表 1-1 本项目运行费用分析表

项目		单位	数据	
运行 费用	脱硫剂费用	单价	元/吨	580
		年消耗脱硫剂量	吨	14800
		年消耗脱硫剂费用	万元	858.4
	水费	单价	元/吨	1.8
		年消耗水量	吨	218560
		年消耗水费用	万元	39.3
	电费	单价	元/kWh	1
		年消耗用电量	kWh	6000000
		年消耗用电量费用	万元	600
	设备维修费		万元	30
其他费用		万元	100	
总计	年运行实际费用	万元	1627.7	

注：年利用时间按 8000 小时计算。

本项目改造成功后通过 SO₂ 排污费的减少支出，净收益 206.91 万元/年。与原脱硫系统相比，改造成功后每年都可向大气减少排放 SO₂ 达 7040t，减排效果非常明显。

用户意见

本项目运行至今，整套装置可靠，设备缺陷率低，脱硫效率高，石膏品质良好，彻底解决了前期脱硫系统运行所出现的问题，各种参数符合环保要求。且该两套装置自动化程度高，大大节省了人力，减少了人员的劳动强度。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：王建春

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：15990392960

E-mail: wangjianchun@lonjing.com

4.循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化技术

循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化工艺是目前世界上比较成熟、实用业绩较多的一种烟气脱硫工艺，以循环流化床原理为基础，通过物料的循环利用，在反应塔内吸收剂、吸附剂、循环灰形成浓相的床态，并向反应塔中喷入水，烟气中多种污染物在反应塔内发生化学反应或物理吸附；经反应塔净化后的烟气进入下游的除尘器，进一步净化烟气。此时烟气中的 SO_2 和几乎全部的 SO_3 ， HCl ， HF 等酸性成分被吸收而除去，生成 $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 等副产物。循环流化床（Circulating Fluidized Bed, CFB）烟气脱硫技术是 20 世纪 80 年代末提出的一种半干法烟气脱硫工艺，通过自主开发或引进消化再创新，我国形成了具有自主知识产权的循环流化床干法/半干法烟气脱硫除尘及多污染物协同净化技术，并已实现了规模化、产业化应用。

该技术的脱硫效率一般大于 90%，可达 98% 以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，可达 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 0.8~1.2 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，但相对占地面积较小、投资及运行费用低；适用于燃煤电站锅炉烟气脱硫除尘及多污染物协同控制。

典型案例（一）

案例名称

2×660MW 超临界机组循环流化床干法烟气脱硫除尘工程

项目概况

本项目于 2008 年 1 月脱硫项目开始设计，2008 年 2 月开工建设，2008 年 12 月首套脱硫装置与 1#主机同步完成 168 试运行，第 2 套脱硫装置与 2#主机于 2009 年 1 月同步完成 168 试运行。本项目是目前世界上装机容量最大的烟气循环流化床干法烟气脱硫除尘一体化系统，同时，也是我国十一五“国家高技术研究发展计划（863 计划）”项目课题——600MW 燃煤电站半干法脱硫除尘一体化技术与装备（课题号：2007AA061806）的依托工程。

主要工艺原理

锅炉的空气预热器出来的烟气温度一般为 120℃~180℃左右，从底部进入脱硫塔（当脱硫灰与粉煤灰须分别处理时，才需要预除尘器，否则烟气可直接进入脱硫塔），在此处高温烟气与加入的吸收剂、循环脱硫灰充分预混合，进行初步的脱硫反应，在这一区域主要完成吸收剂与 HCl、HF 的反应。

随后，烟气通过脱硫塔底部的文丘里管的加速，进入循环流化床体，物料在循环流化床里，气固两相由于气流的作用，产生激烈的湍动与混合，充分接触，在上升的过程中，不断形成絮状物向下返回，而絮状物在激烈湍动中又不断解体重新被气流提升，形成类似循环流化床锅炉所特有的内循环颗粒流，使得气固间的滑落速度高达单颗粒滑落速度的数十倍；脱硫塔顶部结构进一步强化了絮状物的返回，进一步提高了塔内颗粒的床层密度，使得床内的 Ca/S 比高达 50 以上。这种循环流化床内气固两相流机制，极大地强化了气固间的传质与传热，为实现高脱硫率提供了根本的保证。

脱硫后的含有脱硫灰的烟气从脱硫塔顶部侧向排出，然后转向进入脱硫除尘器，再通过引风机排入烟囱。经除尘器捕集下来的固体颗粒：脱硫灰，通过除尘器下的再循环系统，返回脱硫塔，脱硫灰中未完全反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 继续参加反应，如此循环，多余的少量脱硫灰渣通过物料输送至脱硫灰仓内，再通过罐车或二级输送设备外排。

同时利用流化床高比表面积的颗粒层，可以在吸收塔中添加吸附剂和脱硝剂，达到同步脱除二噁英（PCDD/Fs）和 NO_x 等多污染物协同净化的能力。且 SO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应时，在其空隙结构表面产生了吸附活性区域。气态汞元素单质汞（ $\text{Hg}^0(\text{g})$ ）扩散到活性区域表面时就会被催化氧化，形成 Hg^{2+} 化合物，此种价态的汞化合物很不稳定，会进一步被氧化成 Hg^{2+} 化合物，附着于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和飞灰颗粒表面，随着烟气经除尘器被脱除。

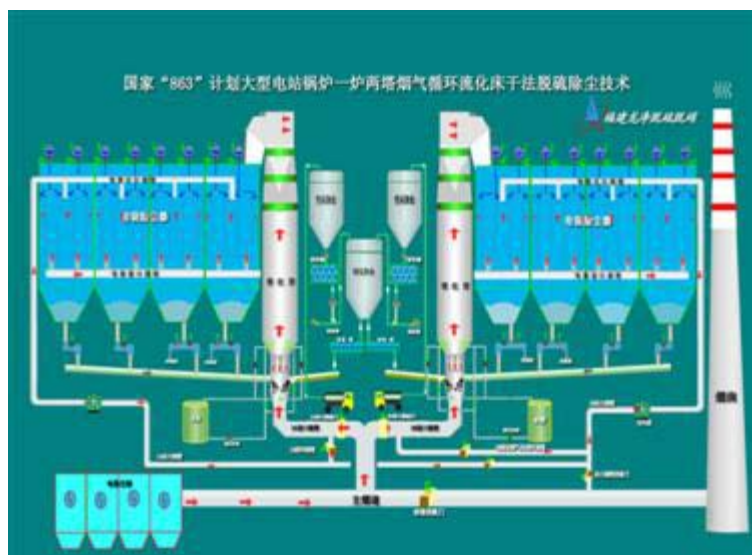


图 1-28 本项目脱硫系统工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- **一炉两塔：**低负荷下单塔运行（400MW 以下）整体节能至少达到 34.6%（2606kW），负荷波动时双塔平衡技术保证脱硫风机不抢风，不影响主机运行。
- **反应器多文丘里管研发：**大型燃煤机组的脱硫反应器如果采用普通的单文丘里设计，反应器高度将达到 70m~80m。通过多文丘里管（蜂窝状，含 7 个文丘里管）的开发设计，可以有效降低文丘里的射流高度，反应器高度可降低 10m，且流化床高浓度区更加集中。

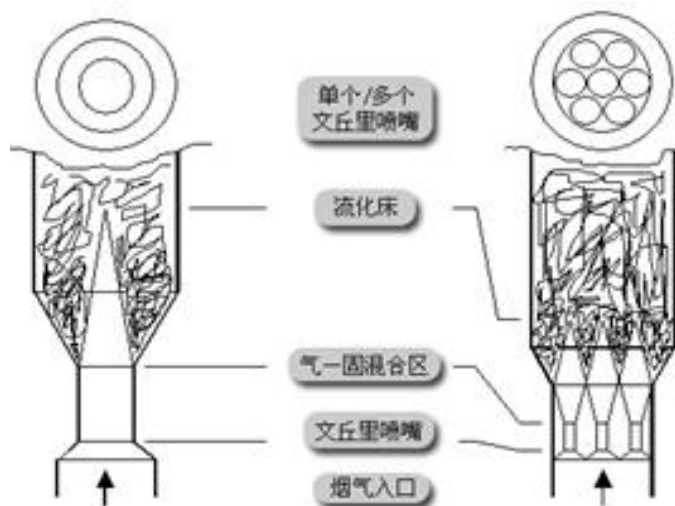


图 1-29 多文丘里管吸收塔

- **反应器入口装置开发：**多文丘里管反应器要求在有循环灰干扰的情况下多文丘里管入口的流场能够稳定、均匀，通过与多文丘里配套组合的流线型入口装置的开发可以获得极佳的入口流场，入口装置包括了双级格栅整流器和气灰混合输送段。合理的气灰混合输送段保证了循环灰不会塌落且在文丘里入口分布较均匀。

- **多灰斗多线程自平衡控制模式开发：**通过仿真和不断摸索总结，开发了多灰斗多线程自平衡控制模式，灰斗料位和物料床层联合控制。

①稳定的、连续的、线性的检测灰斗的料位；

②取得灰斗料位的平均值，对于 8 个灰斗中料位最接近平均值的其中 4 个灰斗及其配套物料循环控制阀作为物料床层的主要调节措施，与床层压降直接对应，床层压降增加和减少时，对应的 4 个物料循环控制阀根据比例同时减少和增加阀门开度。

③8 个灰斗中另外 4 个灰斗料位与平均值差值大，采用平衡调节，即按比例减少料位高于平均值的灰斗对应的物料循环控制阀，按比例增加料位低于平均值的灰斗对应的物料循环控制阀。

④最终灰斗的料位趋于平衡，对应的物料循环阀开度趋于平衡，物料床层波动达到最小，实现 $\pm 50\text{Pa}$ 的高精度控制。

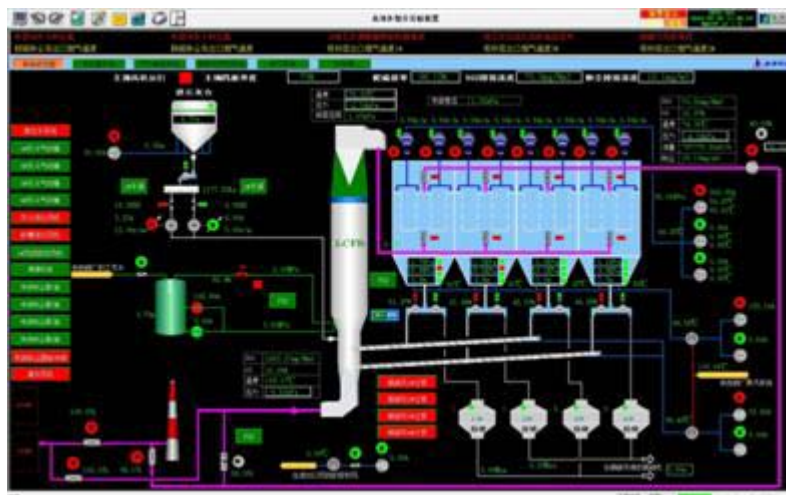


图 1-30 本项目脱硫系统 DCS 画面

- **反应器出口装置开发：**反应器采用独特的防积灰恒流速的设计可以最大限度保留粉尘的絮状大颗粒状态，有利于脱硫除尘器形成稀松的粉饼层，利于清灰。

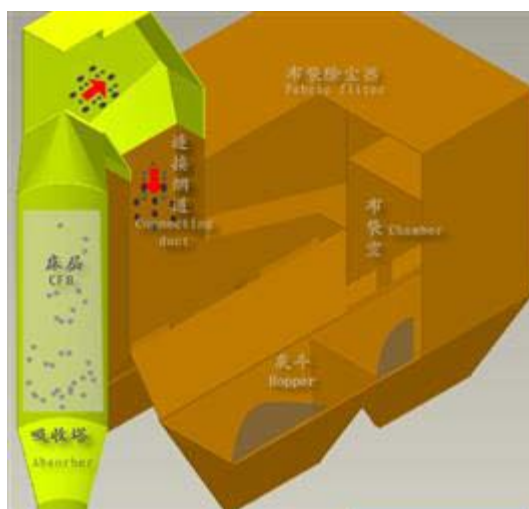


图 1-31 反应器出口装置图



图 1-32 案例现场图

(左、全景；右上、1#炉脱硫装置；右下、2#炉脱硫装置)

主要技术指标

表 1-2 本项目脱硫系统设计参数

序号	参数	单位	数据
1	脱硫方式		一炉两塔
2	脱硫装置处理烟气体量	m ³ /h (工况) Nm ³ /h (干标)	4200000 2550000
3	入口烟气温度	°C	平均 135
4	入口烟气 SO ₂ 浓度	mg/Nm ³ (干态)	3200
5	入口粉尘浓度	mg/Nm ³ (干态)	1000
6	脱硫效率		保证≥91%，设计≥95%
7	出口 SO ₂ 浓度	mg/Nm ³ (干态)	保证≤400，设计≤100
8	出口含尘浓度	mg/Nm ³ (干态)	保证≤50，设计≤20
9	吸收塔		双塔；直径 10.5m，高度 58m
10	脱硫除尘器型式		低压回转脉冲布袋除尘器
11	脱硫引风机		轴流引风机

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2.5 亿元。

运行费用

表 1-3 本项目运行费用

序号	项目	单位	数值	备注
1	处理烟气体量	Nm ³ /h	2×2550000	(标态, 干基, 6%O ₂)
2	入口 SO ₂ 浓度	mg/Nm ³	3200	
3	设计脱硫效率	%	≥91	
4	脱除 SO ₂ 量	t/h	2×0.734	
5	入口烟气温度	°C	135	
6	排烟温度	°C	70~75	高于露点温度 15~20°C
7	年运行小时	小时	7920	
8	电负荷	kW	2×5960kW	
9	厂用电率增加	%	2×1.02%	
10	工艺水耗	t/h	2×67.5t/h	

序号	项目	单位	数值	备注
11	吸收剂耗量（生石灰）	t/h	2×10.5	
12	生产运行人员数	人	2×6	四值三班
13	脱硫成本	元/kWh	0.008	

备注：能源介质按当地市场平均价格计算；水：2 元/吨，生石灰：245 元/吨，电：0.4 元/度。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物运用良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：王建春

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：15990392960

E-mail: wangjianchun@lonjing.com

典型案例（二）

案例名称

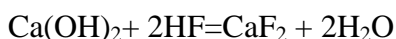
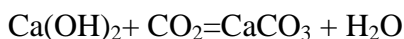
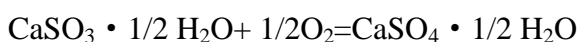
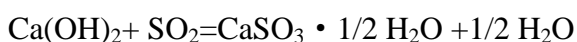
2×330MWCFB 锅炉循环流化床干法烟气脱硫除尘工程

项目概况

本项目于 2009 年 7 月脱硫项目开始设计，2009 年 12 月开工建设，2012 年 5 月首套脱硫装置与 1#主机同步完成 168 试运行，第 2 套脱硫装置与 2#主机于 2012 年 5 月同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

在循环流化床脱硫塔中， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与烟气中的 SO_2 和几乎全部的 SO_3 ， HCl ， HF 发生化学反应，主要化学反应方程式如下：



同时利用流化床高比表面积颗粒层，可以在吸收塔中添加吸附剂和脱硝剂，达到同步脱除二噁英(PCDD/Fs)和 NO_x 等多污染物的目的。且 SO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应时，在其空隙结构表面产生了吸附活性区域，当气态单质汞($\text{Hg}^0(\text{g})$)扩散到活性区域表面时就会被催化氧化，形成 Hg^{2+} 化合物，此种价态的汞化合物很不稳定，会进一步被氧化成 Hg^+ 化合物，附着于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和飞灰颗粒表面，随烟气经除尘器被脱除。

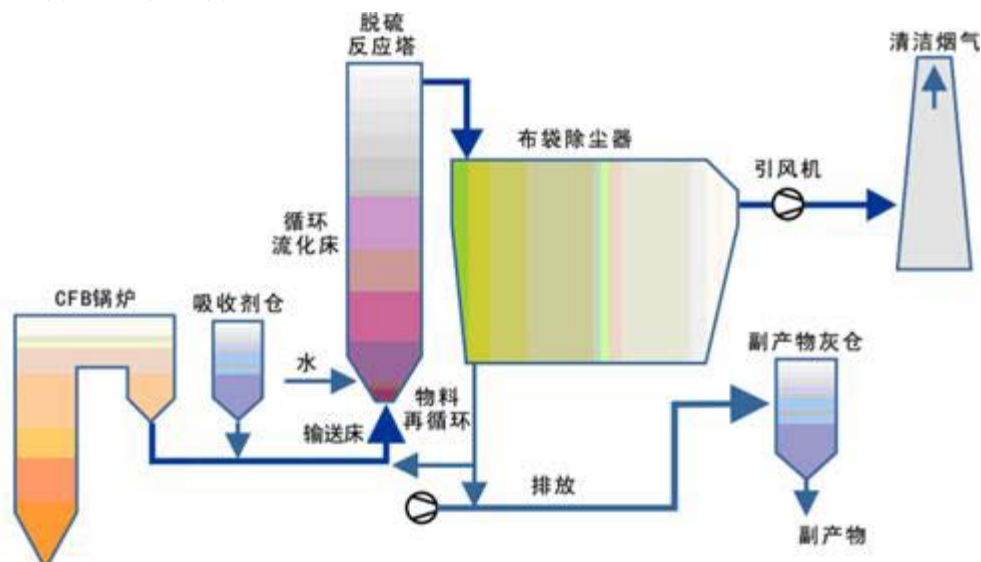


图 1-33 本项目 CFB 锅炉配套炉外 LJD 脱硫除尘工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 在炉内达到 80% 脱硫效率时，炉后 LJD 脱硫不需另外增加消石灰，也可以保证 SO_2 排放浓度小于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，这也进一步表明 LJD 脱硫除尘

一体化装置能够充分利用锅炉飞灰 CaO 作为脱硫剂,从而大大节约了脱硫剂成本,实现循环经济。同时又可以解决循环流化床锅炉飞灰中游离氧化钙较多,飞灰不好综合利用的问题。同时,可以根据运行需要,适度降低循环流化床锅炉炉内脱硫率,换来较高的锅炉燃烧效率和减少炉内磨损。

- **脱硫效率高。**采用烟气循环流化床反应器,烟气中的 CaO 随烟气进入循环流化床工艺流化床反应器后,利用高密度和激烈湍动的颗粒床层所形成的高传质传热速率,能够迅速消化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,在流化床内与烟气中 SO_2 充分反应,可实现 95% 以上的脱硫效率。
- **不受烟气负荷及含硫量限制,对煤质煤种适应性强,对 FGD 入口 SO_2 浓度的增加,只需适当增加吸收剂的加入量即可(设备无须改造)。**LJD 脱硫除尘一体化工艺独有的清洁烟气再循环技术,可保证脱硫系统不受锅炉负荷的变化高效、稳定运行。在炉内脱硫效率下降,甚至炉内脱硫不投运情况下,单靠运行二级脱硫,就能保证 SO_2 排放浓度小于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的要求。
- **先脱硫后除尘,可高效脱硫同时实现高效除尘。**LJD 脱硫除尘一体化工艺装置出口粉尘排放浓度低于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的最新排放标准,最低可小于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$,同时,循环流化床脱硫塔置于布袋除尘器前,加上烟气经过循环流化床塔脱硫后,烟气温度降低,有利于提高布袋除尘器的滤袋寿命(滤袋寿命与烟气温度成反比),大大降低了布袋除尘器的维护成本。另外,由于循环流化床反应塔,具有 SO_2 、 SO_3 、 HCl 、 HF 等多组分污染物净化能力。因此,经流化床塔净化后的烟气,大大降低了对布袋除尘器滤料的化学侵害,提高了滤袋的使用寿命。
- **烟囱不要防腐,大大降低投资和风险。**烟气循环流化床脱硫塔内激烈湍动的高密度的颗粒床层所形成的巨大吸附表面积,几乎 100% 脱除 SO_3 、 HCl 、 HF 等所有酸性气体。因此,整个脱硫系统及后续的烟囱无需任何防腐。不但大大节约烟囱防腐的投资,还避免了因烟囱实施防腐出现问题而导致的锅炉机组停运的损失。
- **可协同脱除包含酸性气体、细微颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$)、重金属 Hg 等在内的多组分污染物,满足严格的环保要求的同时,烟囱感官效果良好。** SO_3 、 HCl 、 HF 等酸性气体在流化床内几乎 100% 的高效脱除。重金属 Hg、细微颗粒物,特别是小于 $\text{PM}_{2.5}$ 的细微颗粒,在流化床塔内激烈湍动的高密度颗粒床层的作用下,团聚、凝并成大颗粒絮状物,被脱硫后的布袋除尘器加以捕集。经过布袋除尘器净化后的粉尘排放容易控制在 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。
- **不产生废水,没有二次污染问题。**

- 运行成本低、设备简单，运行维护方便。



图 1-34 案例全貌图

主要技术指标

表 1-4 锅炉空预器出口烟气参数（炉后脱硫设计按炉内脱硫效率为 60%设计）

项目	单位	设计煤种	校核煤种
烟气成分(标准状态,湿基,实际 O ₂)BMCR			
O ₂	Vol%	3.18	3.16
N ₂	Vol%	72.07	71.8
CO ₂	Vol%	13.93	13.89
SO ₂	Vol%	0.013	0.013
H ₂ O	Vol%	10.81	11.14
每台锅炉烟气量	Nm ³ /h	1298056	1289890
烟气成分(标准状态,干基,实际 O ₂)BMCR			
O ₂	Vol%	3.56	3.56
N ₂	Vol%	80.81	80.8
CO ₂	Vol%	15.62	15.63
SO ₂	Vol%	0.014	0.014
每台锅炉烟气量	Nm ³ /h	1157736	1146196
空预器出口烟气温度	℃	140	142
每台锅炉飞灰流量	t/h	63.9	70.6
SO ₂ 浓度（标准状态，干基，6%O ₂ ）	mg/Nm ³	626	626

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 0.75 亿元。

运行费用

表 1-5 本项目经济分析表（单台套，168 期间）

序号	项目	单位	数值	备注
1	处理烟气量	Nm ³ /h	1157736	(STP、干态)
2	FGD 入口 SO ₂ 浓度 (平均)	mg/Nm ³	800	168 小时运行期间, FGD 入口 SO ₂ 浓度波动大, 取平均值 (STP、干态)
3	FGD 脱除 SO ₂ 量	t/h	0.81	
4	吸收剂单价	元/吨	320	CaO 纯度 85% 生石灰
5	水价	元/吨	1.5	
6	电价	元/kw.h	0.32	
7	吸收剂耗量	吨/小时	0	炉后脱硫利用炉内脱硫飞灰中的 CaO 作为吸收剂, 无需另外再添加
8	吸收剂费用	元/小时	0	
9	水耗量	吨/小时	38.2	
10	水费用	元/小时	57.3	
11	电耗量	kw.h	530	
12	电费用	元/小时	169.6	
13	脱每吨 SO ₂ 的费用	元	280.12	
14	168 小时脱硫运行总成本	万元	3.81	168 小时, 不含折旧

用户意见

本项目投运至今, 各项技术指标优良, 无任何环保事故, 系统脱硫效率达到设计要求, 各项耗能指标达到或优于设计要求, 副产物运用良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益, 是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 福建龙净环保股份有限公司

联系人: 王建春

地址: 福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码: 364000

电话: 15990392960

E-mail: wangjianchun@lonjing.com

典型案例（三）

案例名称

6×100MW 燃煤机组循环流化床半干法烟气脱硫改造工程

项目概况

本技术属于产学研合作研发成果，核心关键技术曾获 2008 年国家技术发明奖二等奖。本项目设三套脱硫除尘系统，每两台锅炉共用一套装置。其中 1#脱硫系统 168 试运于 2011 年 5 月 20 日结束，2#脱硫系统 168 试运于 2011 年 1 月 7 日结束，3#脱硫系统 168 试运于 2011 年 5 月 3 日结束，投运至今。

主要工艺原理

本项目工艺以循环流化床原理为基础，主要采用干态的生石灰粉作为吸收剂，生石灰通过消化系统消化成消石灰。通过吸收剂的多次再循环，延长吸收剂与烟气的接触时间，以达到高效脱硫的目的，其脱硫效率达 90% 以上。

系统烟气通过连接烟道、挡板门装置，由原烟道引出，进入吸收塔→布袋除尘器→新引风机，重新进入烟囱。

烟气在文丘里管前后分别与脱硫剂和布袋除下的循环灰混合（脱硫剂由空气斜槽送进入床体，循环灰由空气斜槽同时加入床体），它们经过吸收塔下部的文丘里管的混合加速，高速气流可将循环灰、脱硫剂和烟气充分混合均匀，然后进入吸收塔的直径段（循环流化床体）反应。物料在循环流化床里，气固两相由于气流的作用，使吸收剂在吸收塔内悬浮、反复循环，与烟气中的 SO_2 充分接触，产生激烈的湍动与混合，充分接触，在烟气上升的过程中，不断形成聚团物向下返回，而聚团物在激烈湍动中又不断解体重新被气流提升，气固间的滑落速度高达单颗粒滑落速度的数十倍，使颗粒表面生成物的固形物外壳被破坏，里面未反应的新鲜颗粒暴露出来继续参加反应。由于高浓度密相循环的形成，吸收塔内传热、传质过程被强化，反应效率、反应速度都被大幅度提高。反应灰中含有大量未反应完全的吸收剂，所以吸收塔内实际钙硫比远远大于表观钙硫比，床内的 Ca/S 比高达 40 以上。这样循环流化床内气固两相流机制，极大地强化了气固间的传质与传热，为实现高脱硫率提供了根本保证。

关键技术或设计创新特色

- 1) 采用了二炉一塔的循环流化床半干法烟气脱硫除尘工艺系统，布置紧凑；
- 2) 独特的增湿技术和灰循环技术，实现吸收塔内流动、干燥、反应协同控制，保障系统的安全稳定运行；
- 3) 配置了高效干式消化设备，可购买生石灰粉来自行制备脱硫剂，使运行成本大大降低；
- 4) 通过吸收塔与除尘设备的协同作用，实现高效脱除 SO_2 的同时，可协同脱除 SO_3 、 HCl 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等多种污染物，使得烟气酸露点降低，无需对现有烟囱进行防腐处理。
- 5) 实现废水“零”排放，脱硫产物为干态，便于运输，并可作为水泥等建材原料综合利用。



图 1-35 案例全貌图



图 1-36 干式消化器

主要技术指标

本项目脱硫系统 SO_2 脱除效率保证值 $\geq 90\%$ ，系统可利用率 $\geq 98\%$ ，脱硫系统出口烟尘排放浓度 $\leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫系统出口 SO_2 排放浓度 $\leq 200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫投运时除尘效率 $\geq 99.995\%$ ，达到设计要求，满足环保排放要求。可通过增加吸收剂添加量等措施，进一步提升系统脱硫效率，降低系统出口 SO_2 排放浓度。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.3 亿元。

运行费用

表 1-6 本项目单位小时的运行费用分析

序号	物耗	耗量	成本 (元/h)	备注
1	水量	31×3 t/h	288.3	
2	汽量	2×3t/h	1260	
3	电量	2332×3kWh	2658.5	
4	生石灰粉	2724×3kg/h	3922.6	
5	气量	22×3Nm ³ /min		费用折算到电费中
		合计	8129.4	

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，满足国家环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江大学

联系人：翁卫国

地址：浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学热能工程研究所 334 室

邮政编码：310027

电话：0571-87952443-6334

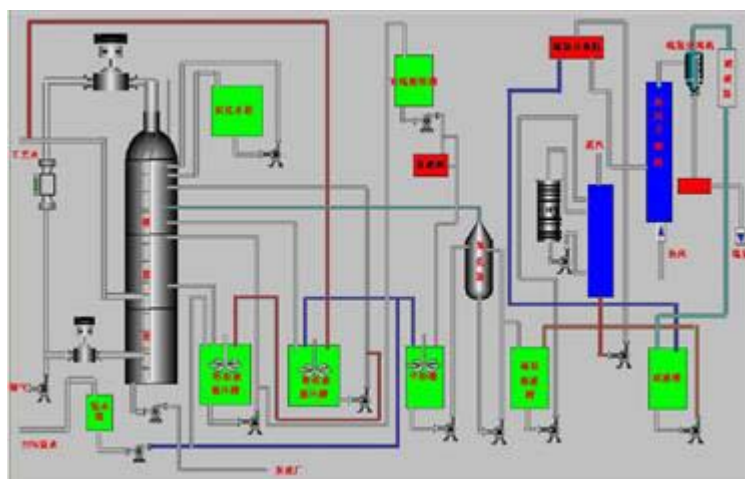
E-mail: wgweng@163.com

5. 氨法烟气脱硫技术

氨法烟气脱硫技术具有脱硫效率高、无二次污染、可资源化回收二氧化硫等特点，具有满足循环经济要求等优势。其主要原理是以氨基物质（液氨、氨水、碳铵、尿素等）作吸收剂，在吸收塔内，吸收液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫（SO₂）与吸收液中的氨进行化学反应而被脱除，吸收产物被鼓入的空气氧化后最终生成脱硫副产物硫酸铵，硫酸铵经干燥、包装后，得到水分<1%的商品硫酸铵。

国际上，氨法脱硫于 20 世纪 70 年代首次应用。在我国，氨法脱硫技术首先用于硫酸行业，主要用于制酸尾气的吸收治理。在烟气脱硫领域，氨法的发展较迟。近年来，随着合成氨工业的不断发展以及氨法脱硫工艺自身的不断改进和完善，我国氨法脱硫技术取得了较快的发展，在氨逃逸控制、高硫煤的脱硫效率、氨的回收利用率等多方面实现突破，并已建成工程案例。

该技术脱硫效率一般为 95%~99.5%，能保证出口 SO₂ 浓度在 50mg/Nm³ 以下，单位投资大致为 150~200 元/kW，运行成本一般低于 1 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，投资及运行费用适中，装置设备占地面积小。适用于燃煤锅炉烟气脱硫。该技术燃煤硫分适应性强，可用于 0.3%~8% 甚至更高的燃煤硫分，且应用于中、高硫煤时经济性更加突出，煤的含硫量越高，副产品硫酸铵产量越大，脱除单位 SO₂ 的运行费用越低；同时锅炉也因为使用中、高硫煤使得成本降低；环保效益、经济效益一举两得。



1-37 典型氨法脱硫工艺流程图

典型案例

案例名称

2×135MW 机组烟气脱硫改扩建工程

项目概况

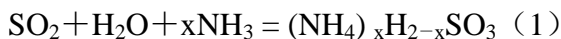
本项目现有两台 135MW 发电机组，燃用百色地区混煤，烟气中 SO₂ 含量设计值达 7684mg/Nm³。本工程采用塔顶烟气直排、塔内饱和结晶工艺，外购液氨为吸收剂，产品为硫酸铵化肥。本工程采用 EPC 模式建设，于 2008 年 6 月 6 日开始脱硫装置的建设，2009 年 8 月 14 日一次性通过 168 小时试运行考核。

主要工艺原理

技术原理

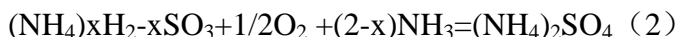
本工程采用氨法脱硫工艺，以液氨作吸收剂，脱除烟气中的 SO₂ 并回收副产物硫酸铵化肥。原料来自化工企业，副产品作为农用氮肥。氨法脱硫过程是一个化学吸收过程，具体反应原理分如下两步进行：

第一步：以水溶液中的 SO₂ 和 NH₃ 的反应为基础的吸收过程：



利用氨将废气中的 SO₂ 脱除，得到亚硫酸铵中间产品。

第二步：采用空气对亚硫酸铵直接强制氧化：



此过程是将吸收反应的中间产物-不稳定的亚硫酸铵氧化成稳定的硫酸铵，以制得农用的硫酸铵化肥。氨法技术的脱硫原料来自氮肥行业，主要副产品同样是氮肥。不影响市场的总氮供给，还增加了硫元素的供应。

工艺流程

引风机来烟气经入口烟道进入吸收塔，经洗涤降温、吸收 SO₂、除雾后的净烟气从塔顶烟囱排放。吸收了烟气中 SO₂ 形成的亚硫酸铵溶液，经氧化、浓缩、结晶后得到一定固含量的硫酸铵浆液。一定固含量的硫酸铵浆液，再经旋流器、离心机、干燥机后，得到水分<1%的硫酸铵，再进入包装机包装即可得到商品硫酸铵。

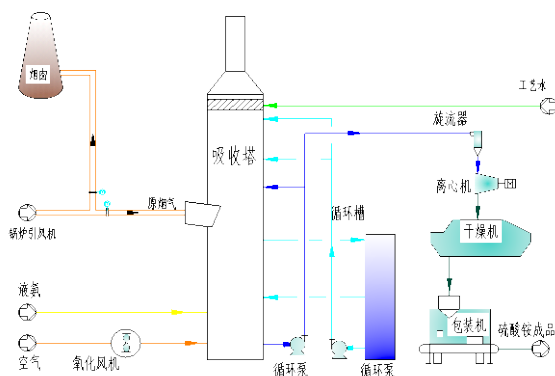


图 1-38 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 通过控制 SO₂ 在脱硫溶液中的溶解度和气速、控制吸收液 pH 值和反应温度等确保脱硫效率超过 95%；
- 通过控制反应温度和吸收液的成份等从根本上解决了气溶胶问题、降低了氨损，使其 <8mg/Nm³；
- 通过对塔内工艺进行调整，保证亚硫酸铵的氧化率达 99% 以上；
- 塔内饱和结晶技术：改变常规的蒸发结晶技术，大大降低蒸汽消耗和运行成本；
- 空塔型脱硫技术：改变常规的填料吸收塔，实现更低的建设成本。



图 1-39 案例全貌图



图 1-40 案例吸收塔图

主要技术指标

表 1-7 本项目主要指数指标参数

序号	项目	单位	平均值	设计值
1	脱硫效率	%	96.2	95
2	脱硝效率	%	30	
3	脱硫岛压力降	kPa	0.77	≤1.0
4	塔出口 NH ₃ 含量	mg/ Nm ³	0.07	≤10
5	氨利用率	%	98	97
6	耗电量	kWh	1548.2	≤1682

根据 168 小时试运测试报告，本项目系统出口烟气指标满足 GB13223-2003 标准的要求，脱硫效率达到 96.2% 以上。副产硫酸铵质量完全达到了 GB535-1995 合格品标准，部分达到 GB535-1995 一级品标准。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资 5046 万元。

运行费用

根据田东电厂烟气脱硫工程的运行数据测算本项目的运行经济指标，其结果如下表。

表 1-8 本项目运行经济指标表

序号	项目	规格	单位	年耗量	单价/元	费用/万元
1	液氨	99.6%	t	15018	3000	4505.5
2	水		t	351802	1.5	52.8
3	电	6kV、380V	kWh	9288000	0.441	409.6
4	蒸汽	0.6-0.8MPa	t	13087	120	157.0
5	仪用空气	0.6MPa	Nm ³	540000	0.15	8.1
6	循环冷却水	0.3MPa	t	300000	0.15	4.5
7	包装袋	50kg	只	1138000	1.5	170.7
8	工人工资		人·年	24	50000	120.0
9	检修费		万元			100.0
10	直接运行成本		万元			5528.2
11	副产硫酸铵收入		吨	56900	800	4552
12	扣除销售收入的年综合脱 硫成本		万元			820.43
13	年脱 SO ₂ 总量		t	27312		
14	单位 SO ₂ 的脱硫成本		元/kg			0.30
15	单位发电成本		元/度			0.0051
16	脱硫电价补贴		万度	149040	0.015	2236
17	增值税（销项税-进项税）		万元			-155.8
18	折旧费		万元			252
19	年脱硫效益	（硫酸铵销售收入+脱硫电价补贴 -直接运行成本-增值税-折旧费）				1163

本项目的直接单位脱硫成本约 300 元/吨 SO₂，远低于 630 元/吨 SO₂ 的排污费用，折算发电成本约增加 0.0051 元/kWh，远低于 0.015 元/kWh 的脱硫电价补贴，效益明显。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，脱硫效率、氨回收利用率、氨的逃逸值等指标均达到或优于设计要求，无任何环保事故，副产物硫酸铵品质良好，比较畅销。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：江苏新世纪江南环保股份有限公司

联系人：徐长香

地址：南京市江宁国家高新技术开发区天元路 108 号

邮政编码：211100

电话：025-52763852 E-mail: xucx@jnhb.com

6.海水脱硫技术

海水烟气脱硫技术主要原理在于采用海水作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，烟气与海水充分接触混合，烟气中的二氧化硫（SO₂）、酸性气体、烟尘等被海水洗涤并溶解到海水中，与海水中的碱性物质发生中和反应，从而被脱除。海水脱硫方法最早于 20 世纪 60 年代应用于挪威，此后陆续推广到全世界。我国拥有较长的海岸线，沿海火电厂数量可观，而沿海地区经济发达，人口稠密，环境保护要求严格，大多数地区列在酸雨控制区和二氧化硫控制区内、同时淡水资源严重不足，这给适宜在海滨电厂应用的海水脱硫工艺提供了良好的发展空间与机遇。

“十一五”期间，在国家 863 计划课题“大型燃煤电站锅炉海水烟气脱硫技术与示范”（2007AA061801）的支持下，研制出了具有自主知识产权的海水脱硫技术，实现了核心设备国产化和成套装备的产业化应用，并进入了斯里兰卡、菲律宾、柬埔寨等海外市场。其中，我国建成的 1036MW 机组海水烟气脱硫工程，是当前世界单台机组容量最大的海水烟气脱硫工程。目前，国内海水脱硫工程已投运总机组容量超过了 21404MW。

海滨电厂用于机组冷却的海水是一种天然碱资源，将其用于烟气脱硫取代对石灰石的消耗，既保护环境、减少资源浪费，又降低了能耗，是符合循环经济理念、实现节能减排的实用技术。该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上；SO₂ 排放浓度一般小于 100mg/m³，可达 50mg/m³ 以下，海水排放 pH 大于 6.8、DO 大于 4mg/L；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.5 分/kWh。该技术脱硫效率高，技术成熟、稳定，安全性、可靠性高，尤其适合于沿海布置的燃中、低硫含量煤的火电机组。



图 1-41 海水脱硫系统三维示意图



图 1-42 工程吸收塔图

典型案例

案例名称

2×660MW 机组海水烟气脱硫工程

项目概况

本项目海水脱硫系统于 2008 年 1 号机组开工建设，2009 年 1 月脱硫项目与主机同步开始设计，2011 年 11 月首套脱硫装置与 1#主机同步完成 72+24 小时试运行，第 2 套脱硫装置正在安装过程中。

主要工艺原理

本项目采用了空塔喷淋海水烟气脱硫专利技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从吸收塔中下部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的海水接触、洗涤，烟气中的 SO_2 等溶于海水生成亚硫酸，亚硫酸与海水中的弱碱性物质发生中和反应。吸收了酸性气体的酸性海水从吸收塔底部排出，借助重力自流到下游的海水恢复系统，与部分新鲜海水混合，初步提高海水的 pH/DO 后，自流到曝气池，在曝气池通过鼓入空气曝气，通过曝气作用，将亚硫酸根离子氧化成稳定的海水中大量存在的硫酸根离子，并吹脱酸碱中和反应中生成的 CO_2 ，以提高海水的 pH/DO，使海水水质满足排放标准后排入大海。

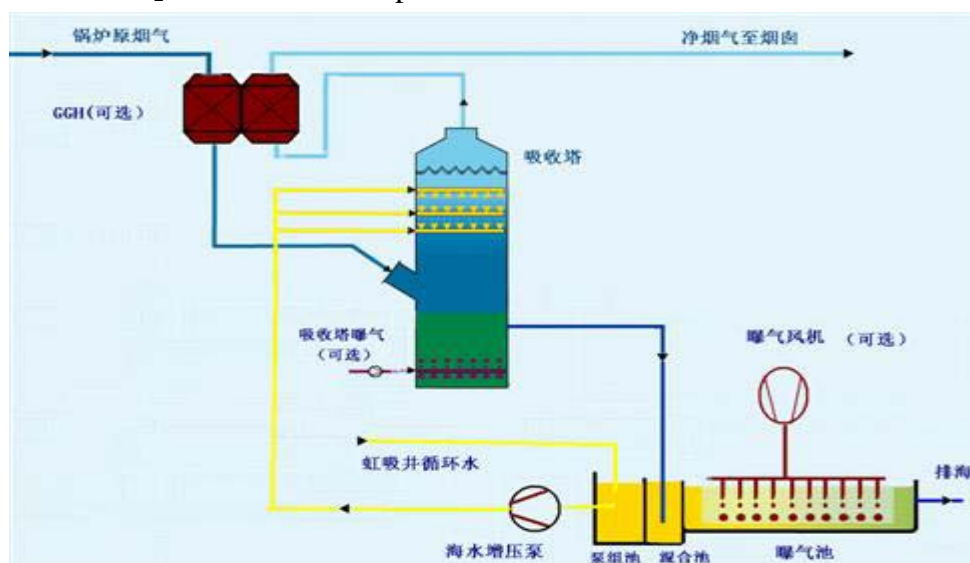


图 1-43 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用自主的脱硫工艺核心计算程序；
- 采用专利的海水脱硫喷淋空塔工艺；
- 吸收塔喷嘴采用实心+空心锥，强化喷淋海水与烟气接触的喷淋密度，进一步提高脱硫效率。



图 1-44 案例全貌图



图 1-45 案例吸收塔图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足欧盟标准的要求，实际运行主要指标：脱硫效率达到 98% 以上（合同值 90%）、排放海水 pH6.8（合同值 6.0）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2.5 亿元。

运行费用

海水脱硫吸收剂采用冷凝器冷凝海水，无需额外吸收剂。运行费用主要是设备电耗。根据 SO₂ 浓度、排放要求、系统配置，脱硫系统厂用电率约 0.5%~1.2%。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率、烟气排放指标、海水排放指标、耗能达到或优于设计要求。该脱硫工程带来了显著的经济效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司

联系人：杨志忠，崔有贵

地址：四川省成都市高新西区西芯大道 18 号

邮政编码：610073

电话：028-87898422/87898425

E-mail: dbcjszx-hb@dbc.com.cn

7. 燃煤电站锅炉选择性催化还原法（SCR）脱硝技术

燃煤电站锅炉选择性催化还原脱硝技术是目前世界上最成熟、实用业绩最多的一种烟气脱硝工艺，采用 NH_3 作为还原剂，将空气稀释后的 NH_3 喷入到约 $280\sim 420^\circ\text{C}$ 的烟气中，与烟气均匀混合后通过布置有催化剂的 SCR 反应器。烟气中的 NO_x 与 NH_3 在催化剂的作用下发生选择性催化还原反应，生成无污染的 N_2 和 H_2O 。

该工艺的核心技术是 SCR 催化剂，其对投资和运行成本有直接影响。SCR 催化剂的常规应用形态可分为板式、蜂窝式和波纹板式，其中蜂窝式催化剂是将二氧化钛、活性组分以及添加剂按照一定配比混合，经捏合后通过挤压整体成型，再经干燥，热处理，切割，最后组装成标准规格的催化剂模块。蜂窝式催化剂具有模块化、表面积大、催化体积小、长度易于控制、活性高、回收利用率高等优点，低尘布置和高尘布置均可应用，目前在世界 SCR 催化剂市场占 60% 以上，其 NO_x 脱除率可达 80%~90%。

“十一五”、“十二五”以来，通过 863 计划等科技项目（2007AA061802、2010AA065001、2010AA065002、2010AA065003）支持产学研结合，在自主知识产权的新材料配方、工艺设计和工程应用等多方面取得突破，使 SCR 脱硝关键技术及其标准化、产业化取得了重大进展。

通过精准的物料平衡分析、流场均流优化分析及设计工艺，对不同项目的具体研究与论证，开发出高效的 SCR 脱硝技术，以应对日益严格的环保排放标准。该技术的脱硝效率一般为 80%~90%，可达 95% 以上； NO_x 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；单位投资约 100~230 元/kW；运行成本一般低于 1.2 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硝效率高，但相对占地面积较大、投资及运行费用较高；适用于燃煤电站锅炉烟气脱硝。

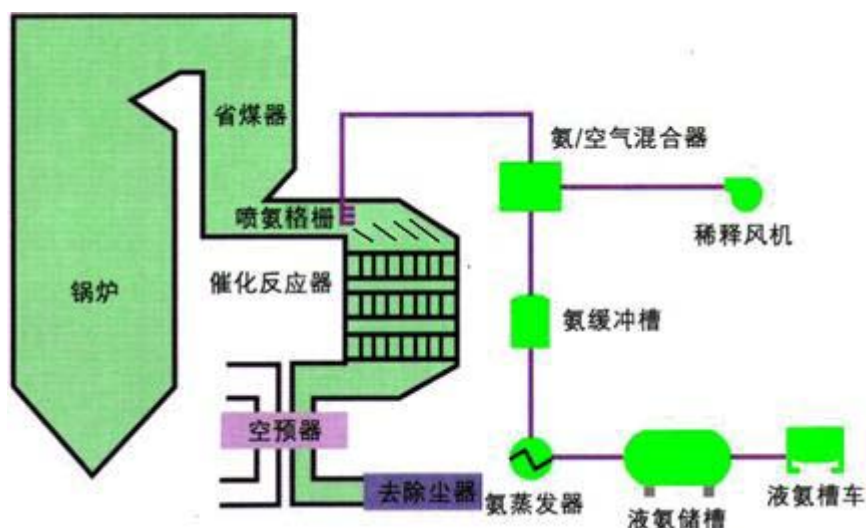


图 1-46 典型 SCR 烟气脱硝工艺原理图

典型案例(一)

案例名称

2×300MW 亚临界机组烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2006 年 7 月开始设计，2007 年 5 月与主机同步开工建设，2009 年 3 月两套脱硝装置完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用选择性催化还原法脱硝技术，主要工艺原理如下：脱硝反应器布置在省煤器后、空预器前的空间内，满负荷设计烟气温度为 370℃，还原剂采用液氨。液氨蒸发为氨气后输送至反应器区，与稀释空气混合后将浓度稀释至 5% 以下，经空气稀释的氨气通过喷氨栅格喷入到反应器上游的烟道内，与烟气均匀混合后进入到脱硝反应器内。在反应器内布置的催化剂的作用下，发生选择性催化还原反应，生成无污染的 N_2 和 H_2O 。

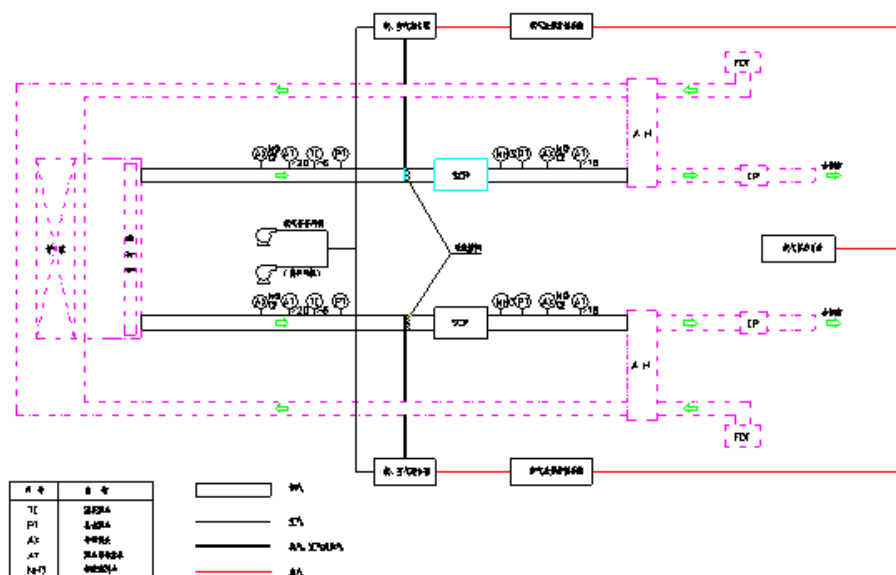


图 1-47 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用优化的反应器系统，设置导流板及整流装置，保证烟气流场均匀分布。
- 在反应器入口竖直烟道下部设置“天鹅颈”结构，有效降低烟气中大颗粒灰含量，防止催化剂积灰。
- 长烟道布置，保证氨与烟气的混合距离。
- 先进的氨喷射及混合系统—喷氨格栅，在烟道宽度与深度方向可调，确保氨与烟气的均匀混合。



图 1-48 案例全貌图



图 1-49 烟气脱硝反应器区图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足火电厂大气污染物排放标准的要求，脱硝效率达到 80% 以上（氮氧化物入口浓度为 $450\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $90\text{mg}/\text{Nm}^3$ ）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 5500 万元。

运行费用

根据 2009 年 3 月-2013 年 8 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 530 万元/年，年维修费用约 4 万元。一年电厂因上网电价的补贴约为 211.2 万元/年（上网电量按机组平均负荷 80%，厂用电率按 20% 计）。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：哈尔滨锅炉厂有限责任公司

联系人：姜孝国

地址：哈尔滨市三大动力路 309 号哈锅设计处

邮政编码：150046

电话：0451-82198515

E-mail: 15904618005@163.com

典型案例（二）

案例名称

2×1030MW 超超临界机组烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2007 年 9 月脱硝项目开始设计,2008 年 6 月与主机同步开工建设,2010 年 1 月首套脱硝装置完成 168 试运行,第 2 套脱硝装置于 2010 年 12 月完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用选择性催化还原法脱硝技术,主要工艺原理如下:脱硝反应器布置在省煤器后、空预器前的空间内,满负荷设计烟气温度为 370℃,还原剂采用液氨。液氨蒸发为氨气后输送至反应器区,与稀释空气混合后稀释至 5%以下,经空气稀释的氨气通过喷氨栅格喷入到反应器上游的烟道内,与烟气均匀混合后进入到脱硝反应器内。在反应器内布置的催化剂的作用下,发生选择性催化还原反应,生成无污染的 N_2 和 H_2O 。

关键技术或设计创新特色

- 1030MW 超超临界脱硝装置,大截面反应器。
- 采用优化的反应器系统,设置导流板及整流装置,保证烟气流场均匀分布。
- 在反应器入口竖直烟道下部设置“天鹅颈”结构,有效降低烟气中大颗粒灰含量,防止催化剂积灰。
- 长烟道布置,保证氨与烟气的混合距离。
- 先进的氨喷射及混合系统—喷氨格栅,在烟道宽度与深度方向可调,确保氨与烟气的均匀混合。



图 1-50 脱硝反应器本体图



图 1-51 液氨储存区图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足火电厂大气污染物排放标准的要求,脱硝效率达到 80%以上(氮氧化物入口浓度为 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$,出口浓度 $60\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

金陵脱硝装置和锅炉本体的合同总额为 15 亿 8 千万（2 台炉+脱硝装置）。

运行费用

根据 2011 年 1 月-2013 年 8 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 2350 万元/年，年维修费用约 20 万元。一年电厂因上网电价的补贴约为 1071 万元/年（上网电量按机组平均负荷 80%，厂用电率按 20%计）。

用户意见

本项目自投运以来，在运行过程中无任何环保事故，安全可靠，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于保证值要求，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：哈尔滨锅炉厂有限责任公司

联系人：姜孝国

地址：哈尔滨市三大动力路 309 号哈锅设计处

邮政编码：150046

电话：0451-82198515

E-mail: 15904618005@163.com

典型案例（三）

案例名称

2×330MW 机组烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2011 年 1 月 25 日顺利通过 168 小时满负荷试运行后投入使用。

主要工艺原理

本项目采用选择性催化还原烟气脱硝技术，主要工艺原理如下：烟气经过省煤器后，进入脱硝装置，与脱硝装置前端喷入的还原剂氨气混合均匀后进入脱硝催化剂层，在催化剂层中还原剂氨气与烟气中的氮氧化物发生氧化还原反应生成氮气和水蒸气。脱硝后的烟气经除尘器和脱硫装置后由烟囱排入大气。

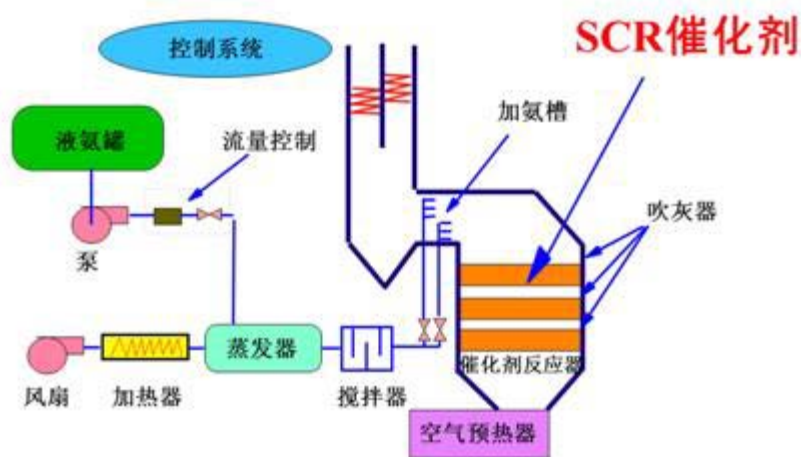


图 1-52 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的脱硝入口烟道输灰系统，有效防止烟道积灰。
- 采用大空间薄壁结构设计方法，利用三维有限元数值方法分析反应器及烟道结构，充分利用反应器壁板的承载力优化设计，比常规采用框架设计反应器在用钢量上节省 10%~15%。
- 采用专利技术“涡流式混合器”，实现了注入烟道的氨与烟气在进入脱硝反应器本体之前混合的均匀性，使催化剂均匀发挥效用，保证出口氮氧化物和氨逃逸在精确的可控范围内，并降低系统阻力。
- 保证催化剂脱硝活性的基础上，显著提高催化剂的强度和耐磨性能，使催化剂能够适应于国内高含尘的烟气条件。



图 1-53 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》GB 13223-2011 的要求，脱硝效率达到 80% 以上(氮氧化物入口浓度为 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $80\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.5 亿元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该脱硝工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京国电龙源环保工程有限公司

联系人：路光杰

地址：北京市海淀区西四环中路 16 号院 1 号楼

邮政编码：100039

电话：010-57659618/13910118942

E-mail: lugj@lyhb.cn

典型案例（四）

案例名称

6×460t/h 煤粉炉脱硝改造工程

项目概况

本技术属于产学研合作开发成果。本项目于 2013 年 1 月脱硝项目开始设计，2013 年 6 月开工建设，2013 年 11 月完成 2 台炉的 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用 SCR 烟气脱硝技术，主要工艺原理如下：设置催化剂装置于锅炉省煤器出口与空气预热器入口之间，其作用为使喷入的氨与烟气中的 NO_x 加速反应实现脱硝，其有效反应温度范围较宽，约在 $300^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$ 之间，脱硝后的烟气经除尘和脱硫后由烟囱排入大气。

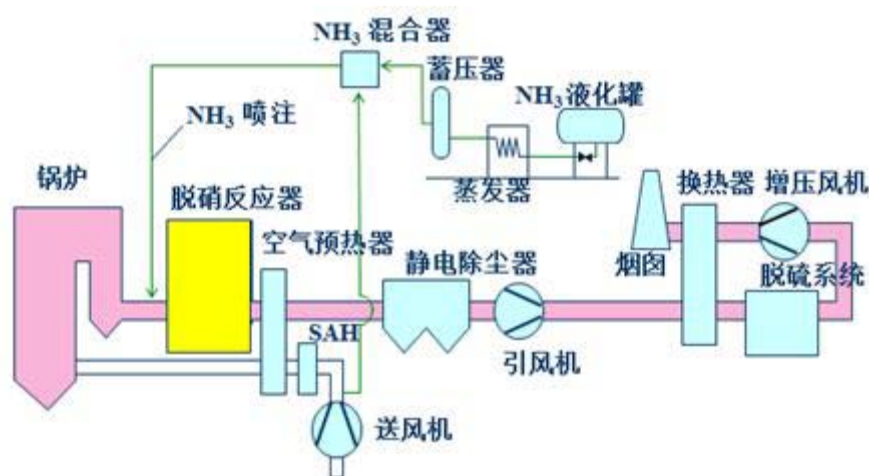


图 1-54 本项目所采用的 SCR 烟气脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 喷氨格栅和静态混合器专利技术：为保证进入脱硝系统氨气和烟气混合均匀，并且便于调整烟气中 NH_3/NO_x 摩尔比，在进口烟道合适位置设置喷氨格栅和静态混合器装置，使其具有优越的变负荷调节能力、高的防堵塞性能、氨氮摩尔比的最大偏差小于平均值的 $\pm 5\%$ 。
- 改造停炉周期短：充分利用锅炉大修期间进行改造，改造需要停炉时间为 40~45 天。
- 低阻力运行：合理设计设备结构、气流分布和运行参数，确保运行阻力小于 980Pa（含备用层），持续满负荷工作，降低运行能耗。
- 安全、可靠：在锅炉运行可能出现的 40~100% 负荷情况下长期可靠、安全运行，确保不影响生产。
- 催化剂高效、稳定，抗中毒能、抗尘能力强在较恶劣的烟气环境下长期稳定运行。



图 1-55 案例现场图

主要技术指标

本项目 SCR 催化剂配方经过优化，在保证脱硝效率的同时，极大地提高了抗中毒能力，并经过添加粘土提高了催化剂的抗尘能力。此催化剂在较恶劣的烟气环境下长期稳定运行。根据第三方验收报告，本项目系统出口烟气指标满足 GB13223-2011 标准的要求，脱硝效率达到 85% 以上(氮氧化物浓度为小于 $500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度小于 $75\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 0.84 亿元。

运行费用

氨费用 < 2361.75 万元/年，水、电、气、管理等运行费用 < 472.35 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该脱硝工程为我公司带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江海亮环境材料有限公司

联系人：沈毅

地址：浙江省诸暨市店口镇兴旺路 1 号

邮编：311814

电话：0575-82489611

E-mail: wo-yiyi@139.com

典型案例（五）

案例名称

2×1000MW 超超临界机组 SCR 烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2010 年 5 月与主机同步开工建设，2011 年 6 月首套脱硝装置与 7# 主机同步完成 168 试运行，第 2 套脱硝装置与 8# 主机组于 2011 年 10 月同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

锅炉尾部烟气离开省煤器后分别进入两个水平斜变截面烟道，再向上进入两个垂直烟道。烟道上依次装有烟气导流板、多孔板和喷氨格栅（AIG），烟气与还原剂—— NH_3 混合后分别进入两个反应器。烟气中的 NO_x 在流经 SCR 催化剂层时，在催化剂的作用下，与 NH_3 发生化学反应生成 N_2 和 H_2O 。脱硝后的净烟气从反应器出口经两段斜向下变径烟道分别进入下游空气预热器。

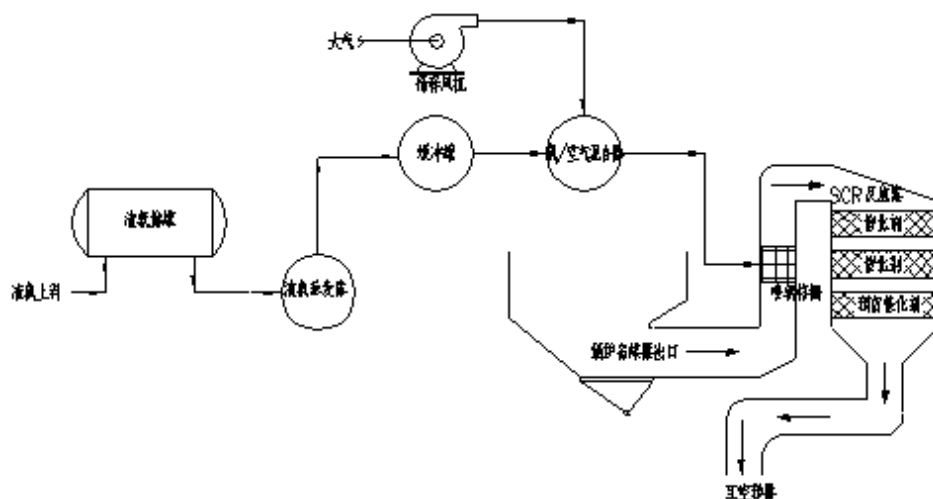


图 1-56 SCR 脱硝工艺原理图



图 1-57 案例现场图

关键技术或设计创新特色

- 脱硝反应器采用高尘布置，每台炉设两台反应器。
- 脱硝系统不设反应器旁路和省煤器旁路。
- 烟道中采用多孔板，反应器内设置均流格栅，以提高烟气流场的均匀性。
- 还原剂采用液氨，喷氨装置采用可分区调节的格栅式，使还原剂分布更加均匀。
- 催化剂采用国产蜂窝式，反应器除灰器采用声波式，更加适应项目煤种灰分特性，不宜堵灰，催化剂寿命长。

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)的要求,脱硝效率达到 80%以上(NO_x 入口浓度为 $385\text{mg}/\text{Nm}^3$, 出口浓度 $77\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.35 亿元。

运行费用

根据 2011 年 10 月~2012 年 10 月实际运行情况,水、电、还原剂、管理等运行费用约为 3280 万元/年,年维修费用约 270 万元,年折旧费用约为 1350 万元(按 10 年平均折旧)。一年电厂因上网电价的补贴约为 8800 万元/年(上网电量按机组年运行时间 5500 小时计,补贴按 0.8 分/度电计)。

该项目的实际经济净效益约为 3900 万元/年。

用户意见

该项目在设计煤种及校核煤种、锅炉最大连续出力工况(BMCR)、处理 100% 烟气量条件下脱硝效率不小于 80%,脱硝装置可用率不低于 98%。脱硝装置投运后,各类设备运行良好,系统工况稳定,对煤种及锅炉负荷变化的适应性强,各项指标达到或优于设计要求。两台百万千瓦机组脱硝装置的竣工投运,使我厂每年减少氮氧化物排放 11490 吨,对于改善地区大气污染质量、减轻酸雨污染具有重要作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:浙江天地环保工程有限公司

联系人:胡达清

地址:浙江省杭州市凤起路 108 号国信房产大厦 9 楼

邮政编码:310003

联系电话:13857155427

E-mail:hdqfgd@126.com

典型案例（六）

案例名称

600MW 机组烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2011 年 10 月开始设计，2011 年 12 月开工建设，2012 年 6 月竣工并于当月投入试运。

主要工艺原理

本项目选择性催化还原（SCR）烟气脱硝技术，脱硝装置采用高含尘的布置方式，即 SCR 反应器布置在锅炉省煤器出口和空气预热器之间，每台锅炉配置 2 台 SCR 反应器。SCR 入口烟道由锅炉省煤器引出，水平烟道的部分荷载和入口垂直烟道支撑在 SCR 钢架。SCR 出口返回空预器的烟道及 SCR 反应器，荷载由加固后的一次风机上方的锅炉钢承担。

SCR 反应器的设计充分考虑与周围设备布置的协调性及美观性，SCR 脱硝反应器垂直布置，用于放置和固定催化剂模块。反应器截面尺寸约为 10.00×16.00m，高 14.8m。反应器每一层催化剂设有安装门和催化剂模块更换平台。每台反应器设有 3 层辅助平台，分别为 39m、42m、45m 层，用于催化剂和吹灰器的维护检修；36.5m、43.85m 层，用于稀释风机及 AIG 系统的布置及其测控。催化剂检修起吊梁布置在 49.00m 层，用于反应器各层催化剂的装卸。氨区布置在预留场地，区域尺寸长约 69m，宽 40m。

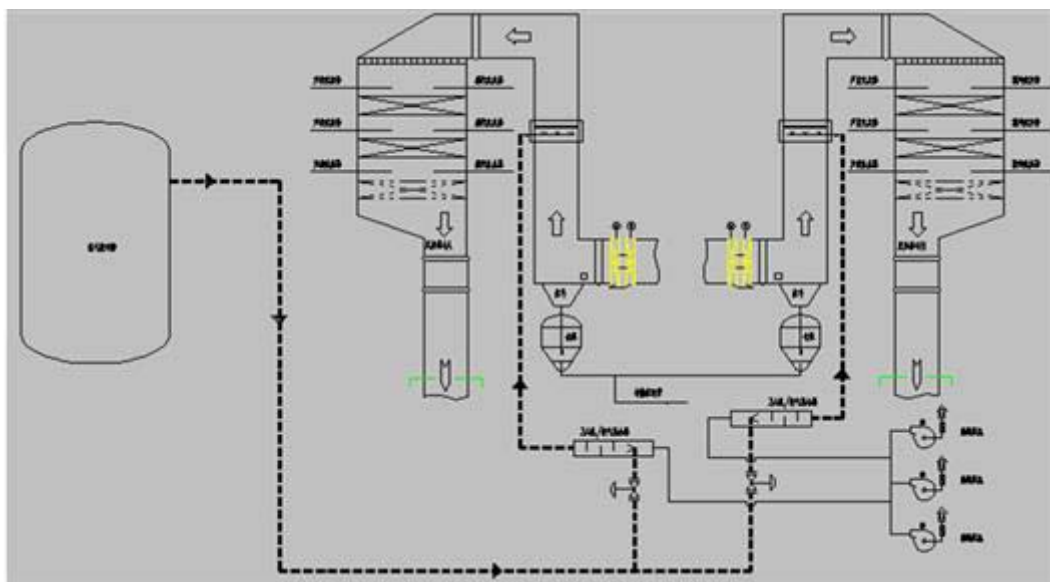


图 1-58 本项目系统流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用高灰型选择性催化还原烟气脱硝（SCR）工艺。
- 催化剂采用平板式催化剂，催化剂节距应不小于 7.0mm，保证足够的表面积，进一步提高脱硝效率。
- 合理的 AIG 喷射系统，更好的控制整套系统内的氨分布。
- 采用 CFD 数值模拟和物理模型试验，确保烟气系统的流场均匀可靠。

- 脱硝系统不设置烟气旁路，但预留省煤器高温旁路系统接口位置。



图 1-59 案例现场图及物理模型图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）的要求，脱硝效率达到 86.4%、出口浓度 $\leq 70\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，氨逃逸 1.7ppm、 SO_2 转化率为 0.53%，温降为 2°C 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 10179 万元。

运行费用

根据 2012 年 7 月-2013 年 6 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 654 万元/年（单台机组）。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该脱硝工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：郭上迎

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：13959061102

E-mail: 13959061102@139.com

典型案例（七）

案例名称

2×362.5MW 燃煤机组 SCR 脱硝改造工程

项目概况

本技术属于产学研合作开发成果。本工程按 EPC 方式建设，2012 年 8 月完成 2#机组 168 试运行，2012 年 12 月完成 1#机组 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用高效 SCR 脱硝成套工艺技术。主要工艺原理如下：脱硝反应系统主要是由烟气系统、氨储存制备系统、SCR 反应器、催化剂、吹灰及控制系统组成。每台锅炉设两台 SCR 反应器，采用液氨蒸发制备脱硝还原剂，液氨蒸发后通过管道输送至反应器区，氨气与空气混合稀释成 5% 左右氨气的混合气体后由喷氨格栅经烟道与烟气均匀混合后进入 SCR 反应器，通过催化剂进行还原反应过程。脱硝后烟气回到锅炉空气预热器。氨喷射格栅的布置与烟气流动方向相垂直，带有独立控制装置的分区，每个分区有若干根支管，每个支管有相同数目喷嘴。喷氨格栅后加装静态混合器来增强烟气和氨的混合。静态混合器位于喷氨格栅下游 1m~1.5m 处，矩形涡发生元件的大小为 1m×1m，板间距 1.5m。涡发生元件的形式及间隔距离，可根据优化分析结果进行调整。

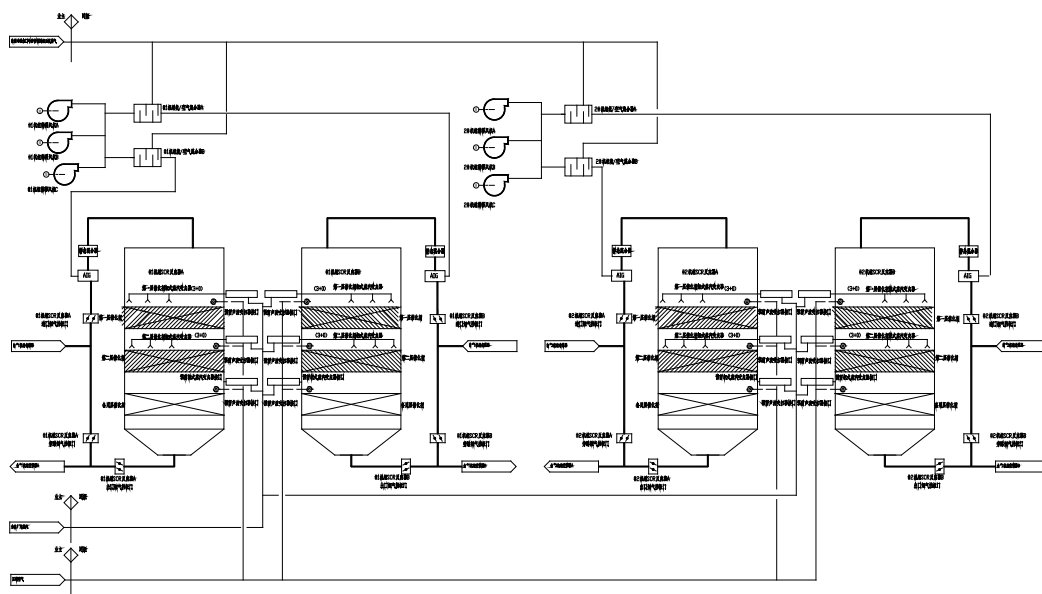


图 1-60 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 1) 采用具有自主知识产权的高效 SCR 脱硝成套工艺技术，烟气均流及导流板优化技术可以保证催化剂内的高效脱硝反应效率，降低系统压降。
- 2) 分区控制的喷氨格栅及静态混合器、整流格栅设计，有利于氨和烟气的均匀混合。
- 3) 结构优化设计可以有效分配系统荷载，降低系统造价成本。



图 1-61 案例现场图

主要技术指标

本脱硝改造项目的设计入口 NO_x 浓度为 $1500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，设计 NO_x 脱除率为两层催化剂为 73.3%（出口浓度 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ ）；三层催化剂为 86.7%（出口浓度 $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ）。测试数据表明，能够满足设计和国家环保要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程脱硝改造总投资约 8744 万元。

运行费用

脱硝系统的日常运行费用相对较低，针对本项目两台炉的液氨耗量为 $1086.4\text{kg}/\text{h}$ （2 层催化剂）、 $1283.4\text{kg}/\text{h}$ （3 层催化剂）。液氨蒸发用蒸汽耗量 $1.272\text{t}/\text{h}$ （2 层催化剂）、 $1.503\text{t}/\text{h}$ （3 层催化剂），吹灰蒸汽耗量 $48\text{t}/\text{d}$ ，电耗 248kW ，催化剂每隔三年更换（再生）一层的用量为 316m^3 。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该脱硝工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江浙大网新机电工程有限公司

联系人：马志刚

地址：浙江杭州滨江区江汉路 1785 号双城国际 4 号楼 15F

邮政编码：310051

电话：0571-28800823

E-mail: myaddmzg@163.com

8.SCR 脱硝催化剂生产技术

选择性催化还原（SCR）技术是众多的脱硝技术中脱硝效率最高，最为成熟的脱硝技术，其 NO_x 的脱除率可达到 80% 以上。目前 SCR 技术已成为国内外电厂脱硝的主流技术。SCR 脱硝技术采用氨作为还原剂，喷入温度约 $280\sim 420^\circ\text{C}$ 的烟气中，在催化剂的作用下，选择性地将 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O 。催化剂是 SCR 技术的核心元件，决定了整个技术的脱硝性能，在整个技术的投资成本中也占有 40% 左右的比例。我国在催化剂制备技术的研发方面起步较晚，目前国内使用的催化剂产品或为国外企业生产，或为国外引进技术生产，原料依赖进口，致使催化剂成本较高。随后，国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持，特别是“十一五”、“十二五”以来，在国家 863 计划课题“催化剂关键原材料制备技术及基于原材料的配方研究”（2010AA065001）、“高效脱硝催化剂开发及关键生产设备的研制”（2010AA065002）等课题资助下，基于国产原材料，研发高效低成本脱硝催化剂核心成型配方及工艺参数，形成国产催化剂混炼、挤出、干燥和烧成工艺，提高产品成品率、降低能耗；实现催化剂生产中核心设备的国产化，形成采用国产设备的催化剂规模化生产线。



图 1-62 催化剂连续式隧道窑



图 1-63 催化剂挤出机

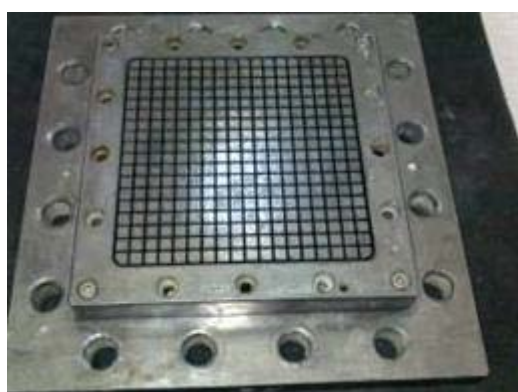


图 1-64 催化剂成型模具



图 1-65 催化剂混炼机

典型案例（一）

案例名称

采用国产钛钨粉制备脱硝 SCR 催化剂

项目概况

本项目开发的国产钛钨粉已为侯马、太仓、镇雄等多个电厂提供催化剂产品，截止 2013 年底，累计生产催化剂约 2.9 万方，生产的催化剂与进口钛钨粉生产的催化剂性能相当，节省生产成本约 1 亿元。催化剂至今已运行 2 年时间，从用户反映情况来看，催化剂运行良好，各项性能指标达标。

主要工艺原理

研究钛钨粉的 WO_3 含量、比表面积、峰高、晶粒度、金红石/锐钛矿性晶体比例、硫酸根含量、 Fe_2O_3 含量和碱金属 (Na_2O 和 K_2O) 等对催化剂性能的影响，为钛钨粉生产提供依据；通过对钛矿的选取，并研究钛矿中杂质对钛钨粉性能的研究工作，对其组份进行优化；优化研究钛钨粉制备过程中， WO_3 加入方式和煅烧工艺，为钛钨粉中试和工业化提供工艺理论基础和关键技术参数。通过催化剂性能研究和催化剂配方研究来验证中试和工业生产出来的钛钨粉产品，最终形成具有知识产权的国产钛钨粉生产技术及催化剂配方。

关键技术或设计创新特色

- 钛钨粉性能指标的调控。精细控制酸解、水解、钨添加和煅烧工艺的条件参数，获得适合脱硝催化剂制备要求的钛钨粉。
- 设计出温度场各向均匀、适合超精细钛钨粉生产的煅烧窑炉，使得煅烧后的钛钨粉粒径分布、硫酸根含量和晶型等关键指标得以控制。
- 国产钛钨粉对催化剂配方影响的研究。采用国产钛钨粉后，调节催化剂配方中的 V_2O_5 和结构助剂含量，保证催化剂性能和成品率。
- 低钒高效催化剂配方研究。研究非钒或低钒基 $\text{NH}_3\text{-SCR}$ 催化剂配方及其反应机理，在低钒条件下保证催化剂具有较高的脱硝活性。

主要技术指标

采用国产钛钨粉制备的催化剂，通过微观结构分析 (BET、XRD、FT-IR、DSC-TG)、力学性能、商业磨损测试和活性评价装置分析，性能基本达到了采用进口料生产的催化剂性能：脱硝率大于 80%，横向抗压 $\geq 0.6\text{MPa}$ ，轴向抗压 $\geq 2\text{MPa}$ ，二氧化硫氧化率 $< 1\%$ ，磨损率为 0.12%。

投资及运行效益分析

本项目开发的国产钛钨粉可降低钛钨粉成本 30% 左右。截止目前，催化剂公司采用国产钛钨粉生产催化剂近 2.9 万方，产品合格率达到 95% 以上，节约生产成本上亿元。随着催化剂公司产量的不断增加，预计“十三五”期间，公司每年生产催化剂约 1 万方立方米，可节约生产成本近 5000 万元/年。同时，该产品面向全国，根据国家节能减排的需要，SCR 脱硝催化剂市场已大规模启动，2010~2020 年期间，钛钨粉需求量在 30 吨左右，按照 20% 的市场占有率计算，与进口钛钨粉比较，可节省成本约 22 亿元。

本项目实现了钛钨粉的自主生产，促进了催化剂整体产业链的国产化，降低脱硝催化剂成本，增强了我国脱硝催化剂的市场竞争力。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中电投远达环保工程有限公司

联系人：李云涛

地址：重庆市北部新区金渝大道 96 号

邮政编码：401122

电话：023-63062744

E-mail: yuntao.li@yuandaep.com

典型案例（二）

案例名称

15×15 孔高灰型 SCR 蜂窝式烟气脱硝催化剂生产线

项目概况

本技术属于产学研合作开发成果，生产 15×15 孔高灰型 SCR 蜂窝式烟气脱硝催化剂。该催化剂通过了第三方检测中心对催化剂几何尺寸、机械强度、活性、物理性能、微量元素、硫酸根等项目的检测。

主要工艺原理

以 SCR 催化剂载体为基体，加入活性成分 AMV，并添加粘结剂、助挤剂、润滑剂、造孔剂等各种添加剂，通过混炼、过滤、挤压成型、干燥、煅烧、切割等过程，得到整体式催化剂。其活性组分均匀分布在载体中，可同时应用于高灰和低灰的烟气条件。



图 1-66 蜂窝状催化剂制备过程

关键技术或设计创新特色

- 国产 SCR 催化剂用连续式隧道烧结窑；
- 国产催化剂挤出成型机；
- 大孔径蜂窝催化剂成型模具；
- 国产连续干燥 DCS 控制系统；
- 国产混炼机。

主要技术指标

该 15×15 孔高灰型 SCR 蜂窝式烟气脱硝催化剂在几何尺寸、机械强度、活性、物理性能、微量元素、硫酸根等六个方面均符合标准要求。检测结果如下。

表 1-9 催化剂检测结果

检测项目		单位	标准要求	检测结果	备注
几何尺寸	孔数排列	—	15×15	15×15	合格
	长度	mm	900±2	900.5	合格
	截面尺寸	mm	150.0±3.0	151.2	合格
	内壁厚	mm	1.30±0.20	1.31	合格
	外壁厚	mm	2.20	2.27	—
	孔径	mm	8.50	8.62	—
机械强度	轴向抗压强度	N/cm ²	≥100	310	合格
	径向抗压强度	N/cm ²	≥40	146	合格

第二部分 技术简介

	磨损强度（未硬化）	%/kg	≤0.19	0.07	合格
活性测试	NO _x 脱除率	%	≥60 ^①	62.45	合格
	SO ₂ 氧化率	%	≤1 ^①	0.89	合格
物理性能	BET 比表面	m ² /g	≥50	58.82	合格
	孔体积	mL/g	≥0.25	0.289	合格
	晶形	—	锐钛型	锐钛型	合格
微量元素	Fe	ppm	—	157	—
	K	ppm	—	120	—
	Na	ppm	—	374	—
硫酸根	SO ₄ ²⁻	%	—	1.05	—

备注：①为标准实验测试条件。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：江苏龙源催化剂有限公司

联系人：肖雨亭

地址：江苏省无锡市钱桥镇钱胡路 557 号

邮政编码：214151

电话：0510-83219129

E-mail: master@jslychj.cn

9.改性催化剂硝汞协同控制技术

NO_x 和 Hg 是燃煤烟气的主要污染物,我国政府高度重视 NO_x 和 Hg 的控制工作,2011 年 3 月十一届全国人大四次会议表决通过了《我国国民经济和社会发展规划十二五规划纲要》,明确提出“十二五”氮氧化物减排 10%的约束性指标,2011 年 2 月通过的《重金属污染综合防治“十二五”规划》明确要求 2015 年 Hg 排放比 2007 年削减 15%,2011 年 7 月国家环保部发布了《火电厂大气污染排放标准》(GB 13223-2011)中,NO_x 排放限值从 450mg/m³ 降至 100mg/m³,并首次将 Hg 及其化合物纳入燃煤电站大气污染物排放限值指标中,其排放限值为 0.03mg/m³。为达到日益严格的 NO_x 和 Hg 排放控制指标,可采用硝汞协同控制技术,即是将硝汞协同控制催化剂布置在省煤器与空气预热器之间的脱硝反应器中,在反应器内还原剂与烟气中的氮氧化物在催化剂的作用下发生反应生成氨气和水蒸气,达到脱除氮氧化物的目的,同时可将烟气中的零价汞氧化成二价汞,以利于后续污染物控制设备对二价汞的脱除,达到脱除汞的目的。该工艺的核心技术是硝汞协同控制催化剂,其对投资和运行成本有直接影响。

国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持,在系列国家 863 计划课题(2013AA065401 等)、国家科技支撑计划课题等的连续资助下,我国在汞形态转化规律、自主知识产权的新材料配方、我国煤质适应性、国产化原料适应性、生产工艺和工程应用等多方面取得突破,使硝汞协同控制催化剂技术产业化取得了重大进展,为我国电力行业“十二五”NO_x 和 Hg 减排约束性指标的实现提供了强有力的技术支撑。该催化剂技术的脱硝效率一般可达 80%~90%,氨逃逸率小于 3ppm,汞氧化率可达 50%以上,并有利于后续污染物控制设备对汞的脱除,使总汞脱除率达到 85%以上,该技术成熟、稳定、适用于燃煤电厂中对 NO_x 和 Hg 的控制。

典型案例

案例名称

220t/h 循环流化床锅炉硝汞协同控制工程

项目概况

本项目预期 2014 年 5 月完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用 SNCR+硝汞协同控制技术，主要工艺原理如下：硝汞协同控制反应器布置在两级省煤器中间的空间内，满负荷设计烟气温度为 360℃，还原剂采用氨水。氨水与稀释水混合后通过喷嘴形成雾化液滴喷入高温烟道，并与烟气中一定量的氮氧化物发生选择性非催化还原反应生成无污染的 N_2 和 H_2O ，未反应的氨和氮氧化物进入硝汞协同控制反应器中，在反应器内布置的催化剂的作用下，发生选择性催化还原反应，生成无污染的 N_2 和 H_2O 。另外，烟气中的零价汞进入反应器中，在催化剂的氧化作用下形成二价汞进入后续设备，从而有利于后续污染物控制设备（除尘、脱硫系统等）对二价汞的脱除。

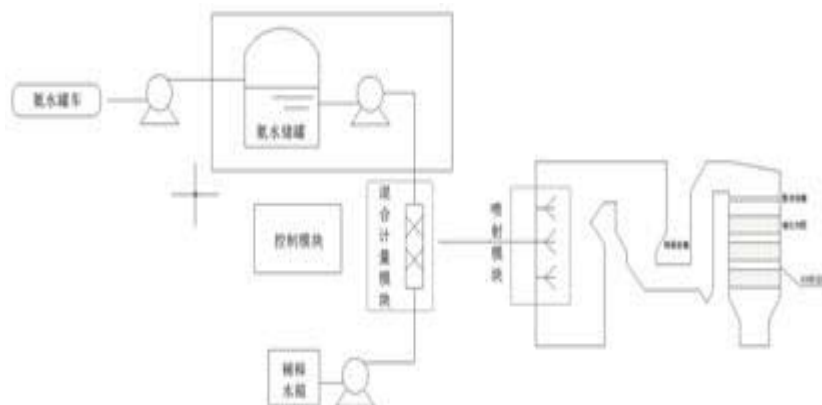


图 1-67 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 自主的硝汞协同控制催化剂配方；
- 催化剂成型添加剂配方；
- 催化剂成型工艺技术；
- 催化剂层上部安装防磨损装置，有利于降低高尘烟气对催化剂的磨蚀。



图 1-68 案例现场图



图 1-69 案例所用催化剂图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)的要求,设计出口 NO_x 浓度达到 80mg/Nm³ (干基, 6%O₂) 以下,设计系统总汞脱除率达到 80%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 730 万元。

运行费用

经测算本项目年运行费用约为 247.6 万元 (年运行时间按 7200h 计)。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 浙江大学

联系人: 高翔

地址: 浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学能源工程学系

邮政编码: 310027

电话: 0571-87951335

E-mail: xgao1@zju.edu.cn

10.失活脱硝催化剂再生技术

目前商业应用的 SCR 烟气脱硝催化剂是以 TiO_2 为载体, $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$ 或 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MoO}_3$ 为活性成分。此类 SCR 催化剂的最佳操作温度在 $300^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$, 工业上一般将其置于省煤器与空气预热器之间, 由于处于高灰侧而导致催化剂的活性会逐渐下降, 其主要原因包括: (1) 催化剂中毒: 燃煤烟气中含有的碱金属、碱土金属、重金属等元素进入到催化剂表面及微孔内, 能够与催化剂的活性组分发生键合作用, 从而抑制催化剂中活性组分的化学性能, 导致催化剂中毒; (2) 堵塞及粘污: 燃煤烟气中的飞灰会沉积或粘附在催化剂的表面, 造成催化剂活性组分被覆盖, 飞灰中的钙盐会与烟气中的三氧化硫反应生成硫酸钙沉积在催化剂表面, 从而阻止了烟气中的 NO_x 与 NH_3 进入催化剂内发生反应; (3) 机械磨损: 烟尘对催化剂的磨蚀、撞击等会造成催化剂量减少, 从而降低催化剂活性; (4) 烧结: 长时间高温会引起催化剂烧结, 使催化剂比表面积降低, 活性下降; (5) 活性组分挥发: 烟气中的卤素会与催化剂的活性组分 V_2O_5 发生反应生成钒盐, 并将其挥发, 导致活性组分含量减少, 降低活性。由于上述问题, 目前工业应用的 SCR 催化剂的使用寿命一般为 3~4 年, 逾期需要及时更换。失活催化剂可通过再生、填埋、再利用等方式进行处理。其中, 再生可以使催化剂活性恢复到新鲜催化剂活性的 90% 以上。目前, 我国已经掌握了 SCR 催化剂再生的成套生产工艺, 该再生技术适应于受中国复杂多变的煤质特性影响的失活催化剂, 且具有完全自主知识产权, 已实现了 SCR 脱硝催化剂再生技术的国产化。

该技术再生的催化剂活性可以达到新鲜催化剂的 90% 以上甚至超过新鲜催化剂的活性, SO_2/SO_3 转化率 $\leq 1\%$, 氨逃逸率 $\leq 3\text{ppm}$ 。单位投资大致为 20000~30000 元/ m^3 。该技术成熟、稳定, 催化剂活性恢复效果好, 从而有效延长了催化剂的使用寿命, 降低更换新鲜催化剂的成本, 具有较好的经济性, 而且减少了废旧催化剂处置费用和给环境带来的微肥污染, 实现资源的可循环利用。适用于燃煤电站锅炉失活脱硝催化剂的再生。

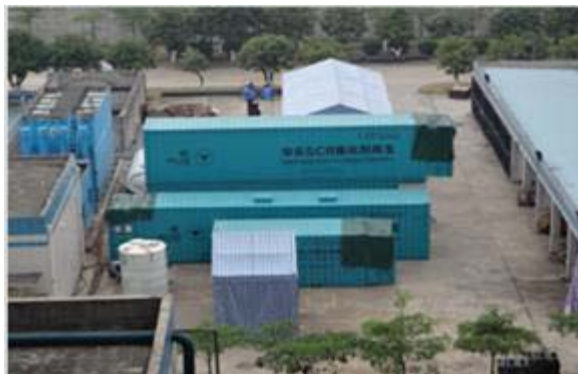


图 1-70 SCR 脱硝催化剂再生移动式生产线

典型案例（一）

案例名称

300MW 机组 SCR 脱硝催化剂再生工程

项目概况

本项目于 2013 年 1 月对脱硝失活催化剂进行再生生产，2013 年 2 月再生催化剂与 1#主机同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用 SCR 脱硝催化剂再生技术，主要工艺原理如下：在对失活催化剂进行再生之前，需对其失活原因进行研究分析，通过对失活催化剂样品的各项物理化学性能进行检测分析，确认催化剂失活的本征原因，为催化剂再生提供方案。依次按照以下工艺流程进行再生处理：

（1）吹扫：采用压缩空气，真空等物理作用松散催化剂表面以及孔道内的飞灰，以将催化剂孔道内外的飞灰清洗干净；

（2）除灰处置：通过外力场作用来清洗催化剂表面和孔道内的飞灰，从而对催化剂表面进行全面高强度的精密清洗；

（3）复孔处置：催化剂中毒现象的发生主要是由于原烟气中的有毒化学成分作用于催化剂的活性位点造成的，这些化学混合物会沉积在催化剂表面微孔内，但当通过复孔添加剂的处理后，能很好的去除这些沉积在微孔内的有毒物质；

（4）强化处置：催化剂在使用过程中由于烟尘、水汽等影响而导致催化剂表面磨损和抗压强度降低，通过强化添加剂的处理，可以进一步强化催化剂表面活性、耐磨损能力以及抗压强度，使再生后的催化剂达到更高的再生要求；

（5）活化处置：催化剂在使用过程中，活性组分会因为机械磨损、化学作用等原因而导致挥发流失，需对催化剂进行活性物质进行补充，通过合理的活性液配方保证活性组分均匀有效的负载在催化剂上，以提高催化剂的再生性能；

（6）热处理：用于整个催化剂模块的干燥和煅烧，热源为热风，活化处置完后，催化剂模块被送入梭式窑进行干燥和煅烧。烧制好的催化剂模块已经具备了应用的机械性能和活性。

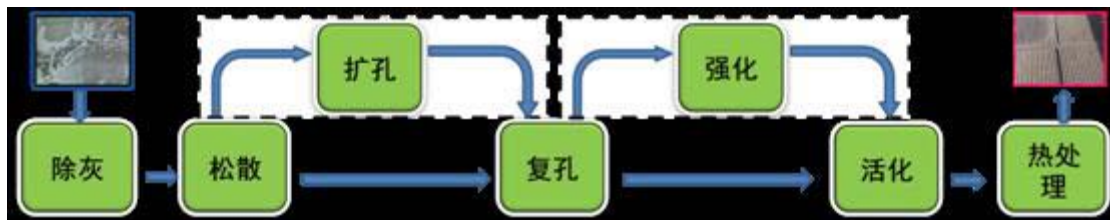


图 1-70 典型 SCR 脱硝催化剂再生工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 通过量子化学调控和实验相结合的手段，建立催化剂表面原子簇模型，得到催化剂中毒的原子构架，揭示催化剂活性下降的本征原因，对其失活机理进行分析诊断；

- 失活催化剂中毒物质的综合有效消除技术，具有工艺简单高效且不造成二次污染等特点；
- 基于中国燃煤电厂 SCR 催化剂失活现状，得到适合中国燃煤特性的高效低成本失活催化剂再生方法；
- 针对不同中毒类型的催化剂，获得催化剂再生过程的关键参数与相关规律，对于发展我国具有自主知识产权的催化剂再生技术具有重要的指导意义。



图 1-72 案例现场图



图 1-73 再生后 SCR 反应器图

主要技术指标

本项目再生后催化剂的活性能恢复到新鲜催化剂的 92%，且 SO_2/SO_3 转化率 $\leq 1\%$ 。未再生的 A 侧反应器氮氧化物脱除率可以达到 60%， SO_2/SO_3 转化率 0.19%，氨逃逸 1.28ppm；而进行了一层催化剂再生的 B 侧反应器氮氧化物脱除率可以达到 82.11%， SO_2/SO_3 转化率 0.17%，氨逃逸 1.24ppm。系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

相比于更换新鲜催化剂（约 3.5 万元/ m^3 ），再生催化剂费用约为 2 万/ m^3 。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标均达到或优于设计要求。该脱硝催化剂再生工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江大学

联系人：高翔

地址：浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学热能工程研究所

邮政编码：310027

电话：0571-87951335

E-mail: xgao1@zju.edu.cn

典型案例（二）

案例名称

1000MW 机组 SCR 烟气脱硝催化剂再生工程

项目概况

本项目整套 SCR 烟气脱硝装置采用 22 孔蜂窝式催化剂，设计效率 80%，催化剂化学保证寿命不小于 16000h，催化剂采用 2+1 方式布置于两个反应器上，已装有两层，预留一层备用。2008 年 12 月催化剂开始投入运行，2011 年 10 月，结合 8#机组锅炉检修的机会，将该机组第一层催化剂模块全部取出，对其进行催化剂再生处理，催化剂再生前累计运行时间约为 23000 小时。

主要工艺原理

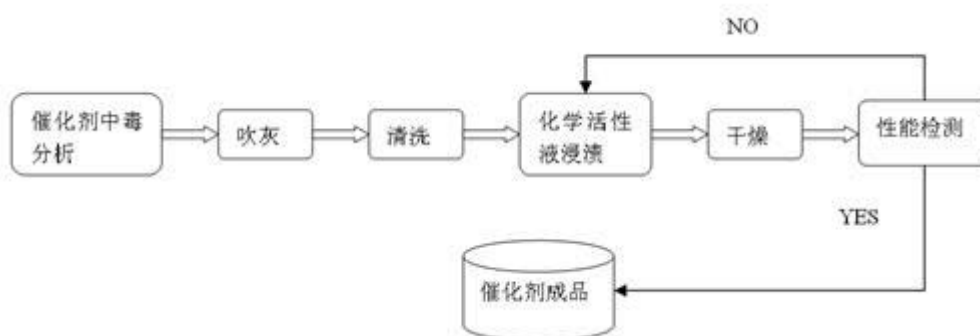


图 1-74 本项目工艺流程图

首先分析催化剂中毒类型，包括：钙中毒、As 中毒、碱金属中毒（Na 和 K）和孔内积灰等。依据分析结果，制定工艺路线。再生工艺：第一步，清除催化剂模块上面的积灰；第二步，对中毒催化剂进行清洗，去除中毒物质；第三步，在活性补充液池中，补充失去的催化剂活性成分；第四步，干燥已经完成活性补充的催化剂，最后一步，对再生后的催化剂进行性能测试。催化剂活性恢复到原始值的 95~100%，SO₂ 氧化率小于 1%，基本解决催化剂灰堵现象；抗压强度和磨损基本保持不变。

关键技术或设计创新特色

- 采用自主知识产权的催化剂再生工艺；
- 采用无机酸加表面活性剂联合清洗，降低了催化剂中的碱金属含量；
- 采用有机酸加表面活性剂联合清洗，清除催化剂 CaSO₄ 覆盖层，提高催化剂比表面积；
- 通过催化剂活性计算，控制催化剂活性物质含量，保证催化剂的活性



图 1-75 催化剂再生前后对比图

主要技术指标

本项目失活催化剂活性恢复到原始值的 95% 以上，基本解决了催化剂灰堵现象；本项目系统出口烟气指标满足 GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》的要求，脱硝效率达到 90% 以上， SO_3/SO_2 转化率小于 1%，氨逃逸小于 3ppm，性能指标完全满足脱硝设计要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本项目使用了再生催化剂，节约催化剂采购费用 1000 万元以上。

用户意见

本项目脱硝装置使用的催化剂模块（其中上层为再生催化剂模块，第二层为新催化剂模块），自 2013 年 6 月 20 日通烟气运行以来，根据现场脱硝运行数据来看，截止目前运行情况良好，各项指标满足脱硝设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中电投远达环保工程有限公司

联系人：李云涛

地址：重庆市北部新区金渝大道 96 号

邮政编码：401122

电话：023-63062744

E-mail: yuntao.li@yuandaep.com

典型案例（三）

案例名称

660MW 超临界机组 SCR 烟气脱硝催化剂再生工程

项目概况

本项目采用 18 孔蜂窝式催化剂，设计效率 80%，催化剂化学保证寿命不小于 24000h，催化剂采用 2+1 方式布置于两个反应器上，已装有两层，预留一层备用。2009 年催化剂开始投入运行，2013 年 5 月，结合 1#机组锅炉检修的机会，将该机组二层催化剂模块全部取出，对其进行催化剂再生处理。

主要工艺原理

首先分析催化剂中毒类型，包括：钙中毒、As 中毒、碱金属中毒（Na 和 K）和孔内积灰等。依据分析结果，制定工艺路线。再生工艺：第一步，清除催化剂模块上面的积灰；第二步，对中毒催化剂进行清洗，去除中毒物质；第三步，在活性补充液池中，补充失去的催化剂活性成分；第四步，干燥已经完成活性物质补充的催化剂，最后一步，对再生后的催化剂进行性能测试。催化剂活性恢复到原始值的 95%~100%，SO₂ 氧化率小于 1%，基本解决催化剂灰堵现象；抗压强度和磨损情况基本保持不变。

关键技术或设计创新特色

- 采用自主知识产权的催化剂再生工艺；
- 采用无机酸加表面活性剂联合清洗，降低了催化剂中的碱金属含量；
- 采用有机酸加表面活性剂联合清洗，清除催化剂 CaSO₄ 覆盖层，提高催化剂比表面积；
- 采用孔道堵塞清理技术，解决催化剂的通畅率；
- 通过催化剂活性计算，控制催化剂活性物质含量，保证催化剂的活性；



图 1-76 催化剂再生前后对比图

主要技术指标

失活催化剂活性恢复到原始值的 95% 以上基本解决催化剂灰堵现象；本项目系统出口烟气指标满足 GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》的要求，脱硝效率达到 95% 以上，SO₃/SO₂ 转化率小于 1%，氨逃逸小于 3ppm，性能指标完全满足脱硝设计要求。

投资及运行效益分析

本项目两层失活脱硝催化剂通过再生技术的应用，活性恢复到初始活性的100%。

用户意见

本项目脱硝装置自2013年6月底通烟气运行以来，根据现场脱硝运行数据来看，截止目前运行情况良好，各项指标满足脱硝设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中电投远达环保工程有限公司

联系人：李云涛

地址：重庆市北部新区金渝大道96号

邮政编码：401122

电话：023-63062744

E-mail: yuntao.li@yuandaep.com

11. 循环流化床锅炉选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术

SNCR 是一种发展成熟的 NO_x 控制技术。1974 年在日本首次投入商业应用, 到目前为止, 全世界大约超过 300 套 SNCR 装置应用于电站锅炉、工业锅炉、市政垃圾焚烧炉和其它燃烧装置。从 90 年代以来 SNCR 技术在美国也得到迅速的推广应用, 由于 SNCR 成本较低, 改造方便, 适宜协同应用其它的低 NO_x 技术, 因此特别适宜发展中国家使用。近年在捷克、韩国、台湾等地都有发展应用。SNCR 主要原理是在没有催化剂作用下, 向 870℃~1150℃ 高温烟气中喷射氨或尿素等还原剂, 还原剂与烟气中 NO_x 反应生成 N₂。

SNCR 技术属于燃烧后控制技术之一, 与煤粉锅炉相比, CFB 锅炉由于合理组织了分段送风和分段燃烧, NO_x 排放量自身可控制到 200mg/m³ 左右。如再配有简单的氨或尿素喷射系统的 SNCR 脱硝技术, 就可以实现更低排放水平。由于 SNCR 脱硝系统设备简单, 造价相对低廉, 不存在反应器堵塞等问题, SNCR 脱硝系统在 CFB 锅炉中正逐步得到应用。

该技术的脱硝效率一般大于 60%, 可达 75% 以上; NO_x 排放浓度一般小于 100mg/m³; 单位投资大致为 30~40 元/kW; 运行成本一般低于 0.35 分/kWh。该技术成熟、稳定, 脱硝效率较高; 相对 SCR 脱硝而言, 该技术的占地面积较小、投资及运行费用较低。适用于燃煤电站循环流化床锅炉烟气脱硝。

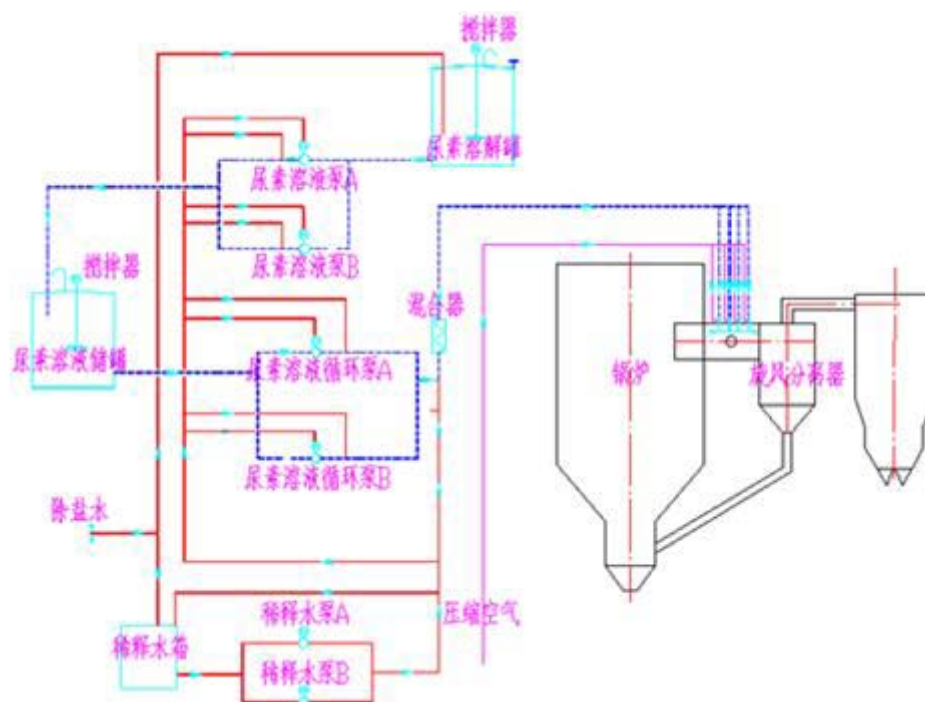


图 1-77 CFB-SNCR 脱硝装置示意图

典型案例

案例名称

2×300MW 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝工程

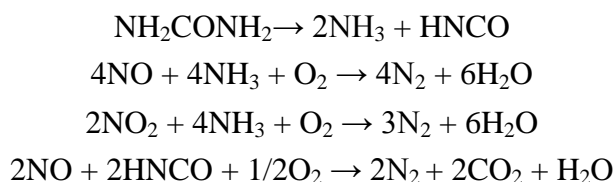
项目概况

本项目于 2012 年 1 月脱硝项目开始设计及开工建设，2012 年 7 月 2 套脱硝装置完成 168 试运行。

主要工艺原理

SNCR 的基本原理是在没有催化剂的情况下，向 900~1150℃ 炉膛中喷入还原剂氨或尿素，还原剂有选择性地与烟气中的 NO_x 反应并生成无毒、无污染的 N₂ 和 H₂O。

当用尿素作还原剂时其反应可表示为：



同 SCR 工艺类似，SNCR 法的 NO_x 脱除效率主要取决于反应温度、NH₃ 与 NO_x 的化学计量比、混合程度，反应时间等。SNCR 工艺的温度控制至关重要，若温度过低，NH₃ 的反应不完全，容易造成 NH₃ 逃逸；而温度过高，NH₃ 则容易被氧化为 NO，抵消了 NH₃ 的脱硝效果。温度过高或过低都会导致还原剂损失和 NO_x 脱除率下降。

关键技术或设计创新特色

- 适用于 CFB-SNCR 技术的尿素水溶液喷枪；
- 依托 3MW 循环流化床燃烧试验台进行 CFB-SNCR 试验，通过该试验台的建设并进行相关试验，能够快速的掌握 CFB-SNCR 关键技术，为 CFB-SNCR 技术的开发提供关键的理论和实践指导；
- 基于 CHEMKIN 机理的 SNCR 过程模拟方法，用于指导 SNCR 喷枪的布置；
- 在锅炉 SNCR 系统中采用无任何动力设备的静态混合器，保证尿素溶液混合均匀。



图 1-78 3MW 煤粉燃烧试验台及 3MW 循环流化床燃烧试验台示意图

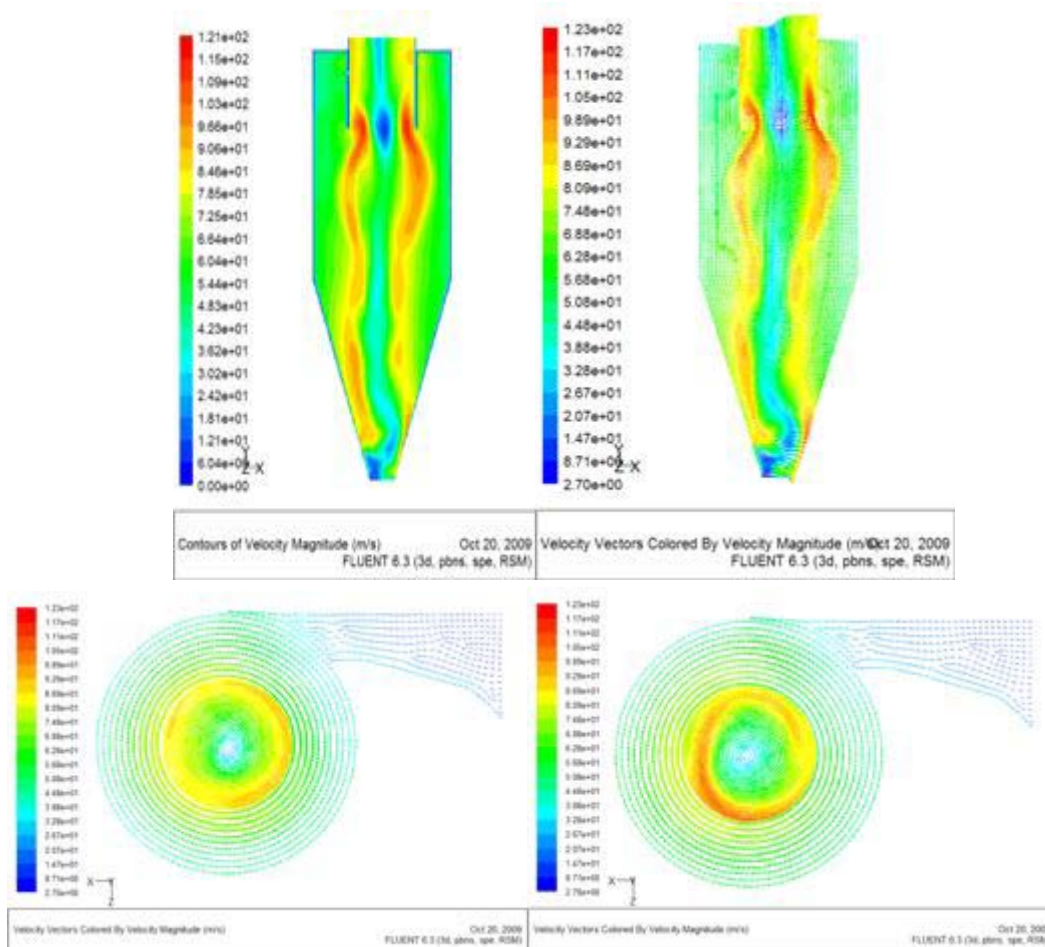


图 1-79 旋风分离器气相流场速度分布的研究

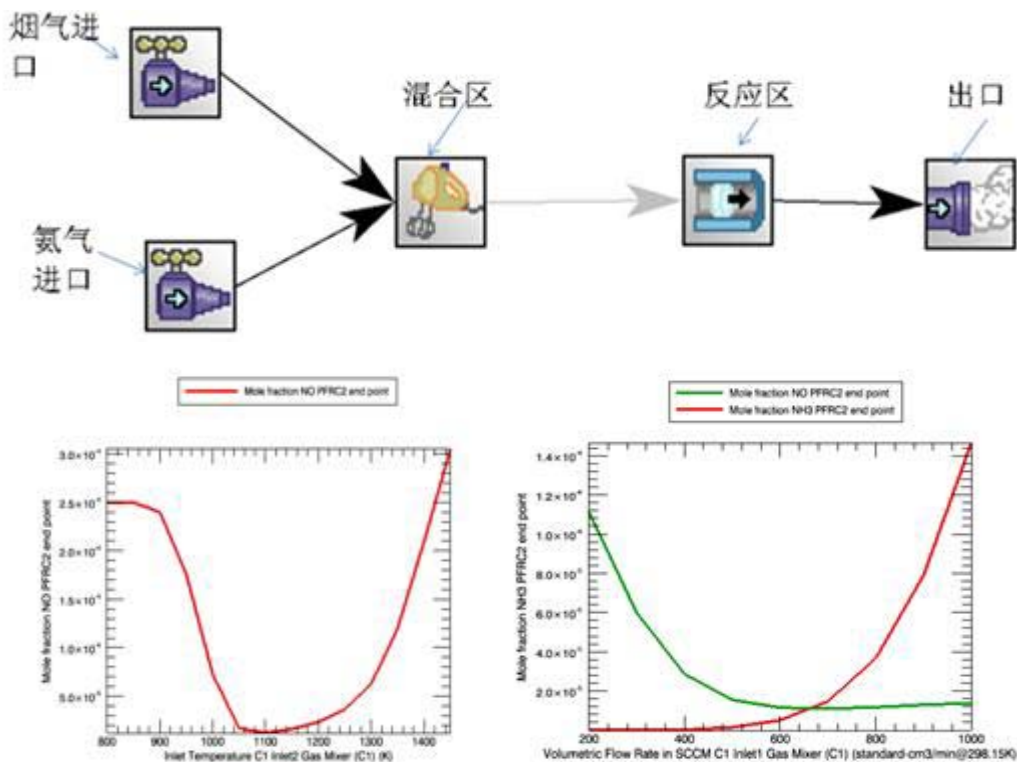


图 1-80 基于 CHEMKIN-PRO SNCR 化学动力学的研究

主要技术指标

根据环保验收报告，本项目系统出口烟气指标满足国家标准的要求，脱硝效率达到 70%以上(二氧化氮入口浓度为 220mg/Nm³，出口浓度 60mg/Nm³)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 0.15 亿元。

运行费用

根据 2012 年 7 月-2013 年 8 月实际运行情况，水、电、尿素、气、管理等运行费用约为 605 万元/年，年维修费用约 30 元。实际增加发电运行成本 0.0034 元/kW，江苏地区的脱硝产品补偿电价为 0.008 元/kW。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，具有明显的经济和社会效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司

联系人：杨志忠，崔有贵

地址：四川省成都市高新西区西芯大道 18 号

邮政编码：610073

电话：028-87898422/87898425

E-mail: dbcjszx-hb@dbc.com.cn

12. 燃煤电厂湿式静电除尘技术

湿式静电除尘器通常用于饱和烟气中颗粒物的脱除，在燃煤电厂中通常布置于吸收塔后，其主要工作原理是：将水雾喷向集尘板，水雾在放电极形成的强大的电晕场内荷电后分裂并进一步雾化；电场力、荷电水雾的碰撞拦截、吸附凝并，共同对细颗粒物起捕集作用，最终颗粒物在电场力作用下到达集尘极而被捕集。与干式电除尘器的振打清灰相比，湿式电除尘器是通过集尘板上形成连续的水膜实现高效清灰，不受粉尘比电阻影响，无反电晕及二次扬尘问题；且在高湿环境中存在大量带电雾滴，大大增加亚微米粒子碰撞带电的机率，大幅度提高亚微米粒子向集电极的驱进速度，可以在较高的烟气流速下，捕获更多的微粒。湿式静电除尘器不仅可有效去除烟气中的 $PM_{2.5}$ ，同时可协同脱除 SO_3 、汞及除雾器后烟气中携带的脱硫石膏雾滴等污染物，抑制“石膏雨”和“烟囱白雾”的形成，是一种高效的静电除尘器，已成为满足火电厂粉尘排放标准要求的重要技术。

早在 1907 年全世界第一台湿式电除尘器就已应用于去除硫酸酸雾，随着技术的不断发展，湿式电除尘器逐步被推广到多个应用领域。特别是在冶金和化工行业上的大量应用，使湿式电除尘技术趋于成熟。然而，随着各国对大气污染物排放标准不断地提高，直到 20 世纪 80 年代中后期才开始逐步在发达国家和地区得到规模化推广应用。国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持，特别是“十二五”以来，在国家 863 计划课题(燃煤电站 $PM_{2.5}$ 新型湿式电除尘技术与装备)等科技计划项目的连续推动下，我国开发了自主的湿式静电除尘技术，在设备防腐、灰水分离、阴阳极材料、污染物控制种类等多方面取得突破，其标准化、产业化也取得了重大进展。

该技术具备多污染物协同集成控制效果：单电场除尘效率一般大于 70%，可达 90% 以上；粉尘排放浓度一般低于 $20mg/m^3$ ，可达 $5mg/m^3$ 以下； $PM_{2.5}$ 脱除率一般大于 60%，可达 90% 以上； SO_3 脱除效率可达 80% 以上；低浓度 SO_2 脱除效率可达 50% 以上；汞等重金属脱除率可达 70% 以上；雾滴排放浓度可控制在 $10 mg/m^3$ 以下；单位投资大致为 85~100 元/kW；运行成本一般低于 0.15 分/kWh。该技术成熟、稳定，除尘效率高，相对占地面积小，适用于燃煤电站锅炉烟气脱硫后烟尘、石膏雾滴等的深度控制。

典型案例

案例名称

330MW 机组配套湿式电除尘器

项目概况

本项目于 2013 年 5 月与二级脱硫塔同步开始设计，2013 年 7 月与二级脱硫塔同步开工建设，2013 年 11 月首套脱硫装置与 6#主机同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用湿法脱硫后湿式电除尘器烟气多污染物协同集成控制技术，主要工艺原理如下：烟气经脱硫二级塔脱硫后，在通过湿式电除尘其入口区分两路进入除尘器本体，在本体内，水平流动的烟气与电场顶部的喷淋水（循环喷淋）接触发生化学反应吸收 SO_3 及 SO_2 ，同时发生物理反应，粉尘和雾滴发生凝并、荷电、长大、趋附于极板随极板上的水膜流入灰水斗内。灰水斗内的灰水流入循环水箱，经加碱中和后由泵打入灰水分离器，干净水循环进入电场喷淋，少量污水排往前置的湿法脱硫工艺水箱，供湿法脱硫使用。除尘脱硫（ SO_3 、 SO_2 ）后的烟气经主烟道由烟囱排入大气。

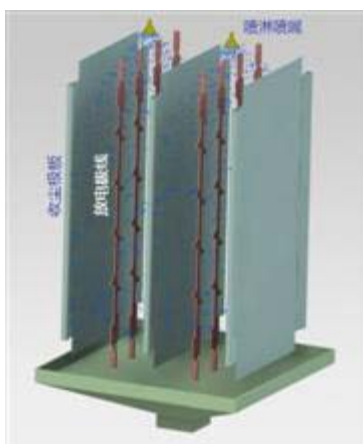


图 1-81 湿式静电除尘原理图

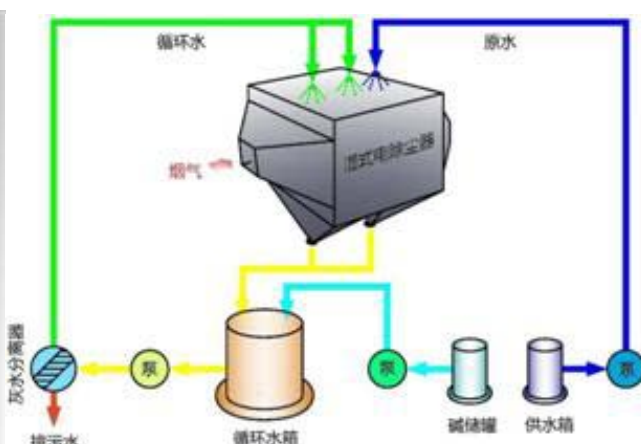


图 1-82 湿式电除尘器工艺流程图

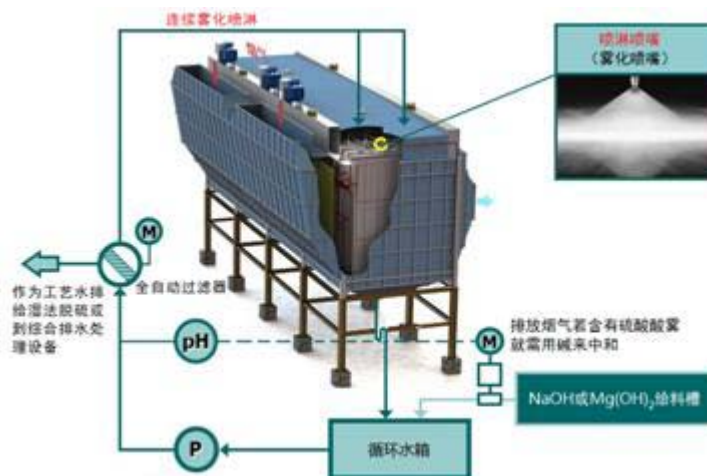


图 1-83 本项目湿式电除尘器灰水处理自循环系统流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用科学合理的极配形式，电场强度分布均匀。
- 独特阳板技术——具有专利保护的阳极板设计，保证水膜更加均匀。
- 采用先进的喷淋系统和冲洗方式。
- 独特系统防腐设计。
- 先进的灰水分离技术——具有专利保护的全自动灰水分离器，保证循环水更干净。
- 严密的系统水平衡设计。
- 先进电气控制系统技术。



图 1-84 案例全貌图



图 1-85 案例水系统图

主要技术指标

根据设计技术指标，本项目系统出口烟气指标满足 GB13223-2011 标准的要求，出口浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。经现场测试，粉尘入口浓度为 $35\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度为 $7.95\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，各项指标优于设计值。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2500 万元。

运行费用

根据工程设计预估，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 300 万元/年，设备年维修费用约 12 万元。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司（武汉龙净环保工程有限公司）

联系人：龚北平

地址：武汉市洪山区珞瑜路 716 号 华乐商务中心 26 楼

邮政编码：430070

电话：13971351536

E-mail: gongbeiping@163.com

13.移动电极静电除尘技术

燃煤电站锅炉移动电极静电除尘器是目前世界上比较成熟、实用业绩较多的一种烟气除尘技术，主要由固定电极和移动电极组成。其主要原理与传统电除尘器一样，仍然是依靠静电力来收集粉尘，属于高效电除尘技术的一种，只是清灰方式不同，其采用清灰刷来进行清灰，转动集尘极在驱动轮的带动下缓慢地上下移动，附着在极板上的粉尘随极板转移到非收尘区域，被正反两把转动清灰刷刷除，粉尘直接刷落于灰斗中，最大限度地减少二次扬尘。由于集尘极能保持清洁状态且粉尘在灰斗中被清除，有效克服了困扰常规电除尘器中高比电阻粉尘引起的反电晕及振打二次扬尘等问题，大幅度提高了除尘效率。移动电极式电除尘技术是近年来国内外研究的热点技术，与常规电除尘器相比，移动电极式电除尘器不但结构紧凑，而且还能够降低电能损耗。在保证稳定达标排放的前提下，很好解决了场地受限的难题。移动电极式电除尘技术是 2000 年欧盟委员会推荐的烧结机除尘的最佳可行技术（BAT）之一，是中国环保产业协会确定的“十二五”期间重点开发和推广的电除尘新技术之一，并已被列入“国家鼓励发展的重大环保技术装备目录（2011 年版）”。

“十一五、十二五”以来，国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上对移动电极静电除尘关键技术开发给予了大力支持，从 2010 年国内首台（套）机组投运至今，国内已有多家公司掌握该项技术，并在移动静电除尘器等多方面取得突破。

该技术除尘效率一般大于 99.9%，可达 99.92% 以上，排放浓度一般小于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，可达 $20\text{ mg}/\text{Nm}^3$ ，系统压力降 $\leq 250\text{Pa}$ ，本体漏风率 $\leq 2\%$ ，单位投资大致 55~75 元/kW，运行成本一般低于 0.15 分/kWh。

典型案例（一）

案例名称

330MW 机组旋转电极式电除尘工程

项目概况

本项目核心技术获 2013 年度获浙江省科学技术一等奖。本项目于 2011 年 3 月开工建设，在原第一电场前新增一个与原电除尘器电场长、宽、高一致的电场，并将原第四电场改造成旋转电极电场，对原除尘器的前三个电场进行检修、优化调试，2011 年 5 月改造完毕并完成 168 试运行。

主要工艺原理

旋转电极式电除尘器的配置为“前固定电极电场+末级转电极电场”，首先利用前级固定电极电场除去大部分粉尘，再利用后级旋转电极电场收集剩余微细粉尘，由于能保持后级电场阳极板的永久清洁，因此可避免反电晕效应，并最大限度地减少二次扬尘，有效解决了常规电除尘器难以解决的高比电阻反电晕和微细粉尘二次扬尘等技术难题。

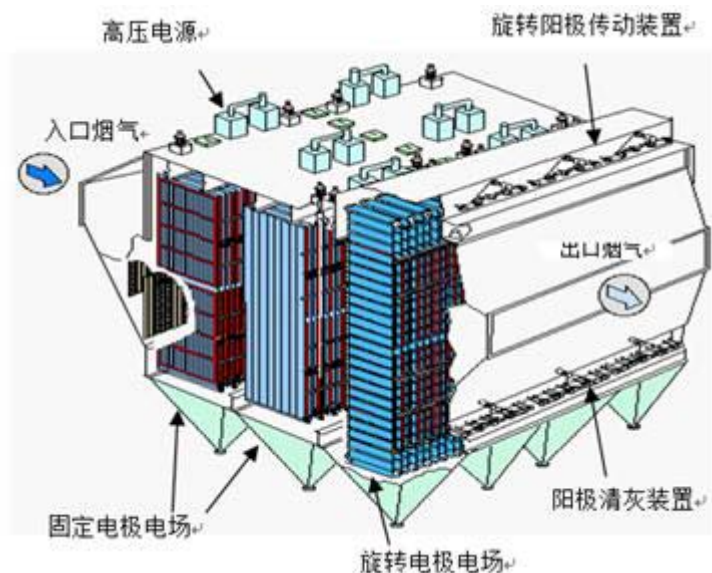


图 1-86 本项目除尘工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 根据工况特点针对性选取异极间距，采用正反旋转的清灰刷在非收尘区清灰，可有效清除粘结在收尘极上的高比电阻粉尘和粘性粉尘，使阳极板能保持永久的清洁状态，克服二次场尘和反电晕产生，提高除尘效率。
- 链传动中心距自动调节技术：从动辊组件在垂直方向不设限位而采用自由悬挂方式，自动补偿工作状态时的热膨胀影响，使主动辊和从动辊之间的链传动中心距总能自动调节，保证链条始终保持“张紧”状态，从而使链轮链条正常啮合，平稳工作。
- 配对链条同步性自动补偿：从动链轮采用带紧定螺钉的调整环进行轴向定位，为了保证左右配对两列链条同步转动，一侧链轮与从动辊采用键

连接，另外一侧链轮与从动辊通过衬套连接，链轮与衬套采用一定的间隙配合，可径向调整，使得左右两只链轮的齿形相位保持一致，从而保证了配对链条运动的同步性。

- 清灰刷中心距连续可调：每对反向旋转的清灰刷组件的中心距连续可调，从而使旋转刷组件始终对阳极板提供合适的清灰力；清灰刷组件的两端设置有可移动的密封装置，保证调整旋转刷组件中心距时的密封性，避免影响灰斗保温性能和灰的流动性，造成灰斗堵灰。



图 1-87 案例现场图

主要技术指标

2011 年 5 月旋转电极式电除尘器投入运行；2011 年 6 月，经第三方测试，烟尘排放浓度为 $29.2\text{mg}/\text{m}^3$ （设计值为 $40\text{mg}/\text{m}^3$ ，改造前出口烟尘浓度 $\geq 200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ），除尘效率为 99.915%，设备阻力为 191.5Pa，漏风率为 1.16%。系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1500 万元。

运行费用

根据 2012 年 1~12 月实际运行情况，电耗费用约为 168 万元/年，年维修费用约 40 万元，年运行费用约 208 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，该除尘工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江菲达环保科技股份有限公司 联系人：崔盈

地址：浙江省诸暨市望云路 88 号 邮政编码：311800

电话：0575-87213390 E-mail: cuiying@126.com

典型案例（二）

案例名称

2×1000MW 超临界机组移动静电除尘器工程

项目概况

本项目于 2011 年 11 月与主机同步开始设计，2012 年 5 月与主机同步开工建设，2013 年 7 月首套移动除尘与 1#主机同步完成 168 试运行，第 2 套移动除尘与 2#主机于 2013 年 8 月同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

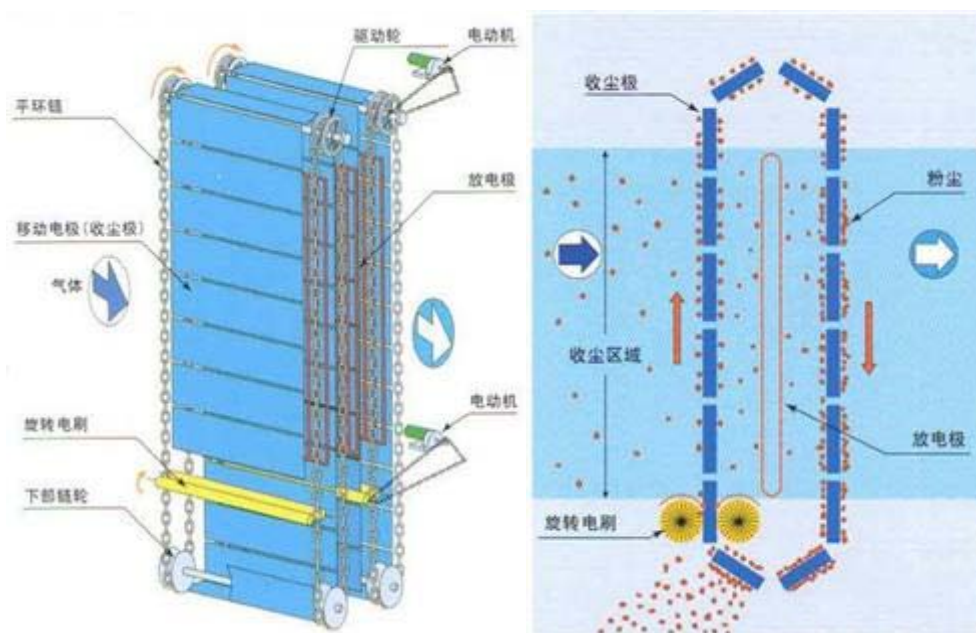


图 1-88 本项目工艺原理图

关键技术或设计创新特色

- 由于集尘板能长期保持洁净，随着时间的推移，电除尘器除尘效率下降缓慢；避免反电晕现象的发生，能有效地解决高比电阻、超细、高粘度粉尘的收尘问题。
- 能最大限度地抑制末级电场二次飞扬的产生，以较高的性价比，实现较高的除尘效率，并持续保障烟尘达标排放低于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。
- 适应燃料品种的范围更宽，适用收集的粉尘范围广泛。
- 节省空间、节省能源，实现除尘器的小型化，特别适合于老机组电除尘器改造，通常情况下将末电场改成移动极板电场排放就能达标，不需另占场地。
- 移动电场采用方管作为加强框架，具有较好的刚性，极板两端由链条传动，通过限位保证在烟气流中平稳运行。
- 极板转动缓慢，电机使用变频调速，以适应机组工况变化，正常工况下传动机构功耗为额定功率输出的一半。一台电机通过链条传动可同时驱动（4~6）根驱动轴，减少驱动电机数量。

主要技术指标

根据合同技术协议，本项目系统出口烟气指标满足新国标的要求，除尘效率达到 99.1%以上(出口浓度 $27\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下)，年减排粉尘约 1400 吨。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 0.55 亿元。

运行费用

根据实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 500 万元/年，年维修费用约 300 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该除尘工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江南源环境工程技术有限公司

联系人：解展

地址：杭州市西湖区文三西路 18 号 7 楼

邮政编码：310012

电话：0571-89718263

E-mail: kingzhan521@163.com

14. 高效低低温电除尘技术

随着国家节能降耗要求的不断推进及环保排放新标准的出台，特别是对电除尘器的除尘效率要求不断提高，市场迫切需要一种简单有效的除尘提效技术。高效低低温电除尘技术正是一种符合新要求的除尘提效技术，其主要原理通过换热器进行热交换，使得进入电除尘器的运行温度由通常的低温状态（ $130^{\circ}\text{C}\sim 170^{\circ}\text{C}$ ）下降到低低温状态（ 90°C 左右），实现提高除尘效率的目的。在1997年，日本率先在大型燃煤火电机组中开始推广应用低低温电除尘器工艺，经过十多年来的发展，现今在日本服役的几乎所有大型火电机组，均采用该低低温烟气处理技术，取得了显著的环境、节能效益。在国内不少高校和企业均已有余热烟气利用热量的工业应用，其出发点主要是考虑余热回收利用。日本的低低温工艺虽考虑到了降低进入电除尘器烟气温度后能提高收尘效率，但是这种换热器与电除尘器是独立分开的，而这种简单的降温装置并不能形成真正的核心技术（类似于锅炉的省煤器），与国内某些厂家已有的工业应用相类似。余热利用高效低低温电除尘技术是把余热利用装置和电除尘器有机复合成一体，这种新型电除尘技术的研究和应用在国内外尚未有报道。该技术在达到高效除尘的同时可节省10%的成本，并可节省10%左右能耗，因此该新型电除尘器的推广应用，可获得明显的社会、环境和经济效益。根据国内电力行业的发展趋势，预计未来十年，我国电力系统每年需求电除尘器40万吨，再加上老电除尘器改造约15万吨，则对电除尘器的年平均需求量约为55万吨，年产值为40亿元左右，而且随着环保要求的不断提高，该市场需求量预计每年将有不低于10%的递增量。本新型电除尘技术具有显著的节能降耗减排的优点，适用于新建、扩建以及旧电除尘设备的提效改造升级项目，符合国家环保政策要求。

运用余热利用高效低低温电除尘技术后，额定负荷工况下，烟气余热利用节能装置出口烟温可从 $130^{\circ}\text{C}\sim 170^{\circ}\text{C}$ 降至 $90^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 左右；燃煤机组供电煤耗比烟气余热利用节能技术运用前降低 $1.0\sim 3.5\text{g/kWh}$ ；烟温每降低 10°C 可节省不低于 0.4g/kWh 的发电标煤耗。粉尘排放浓度可达到国家最新排放标准 30mg/Nm^3 以下。该技术成熟、稳定，节能降耗的同时又能减排，非常适用于燃煤电站锅炉烟气治理。

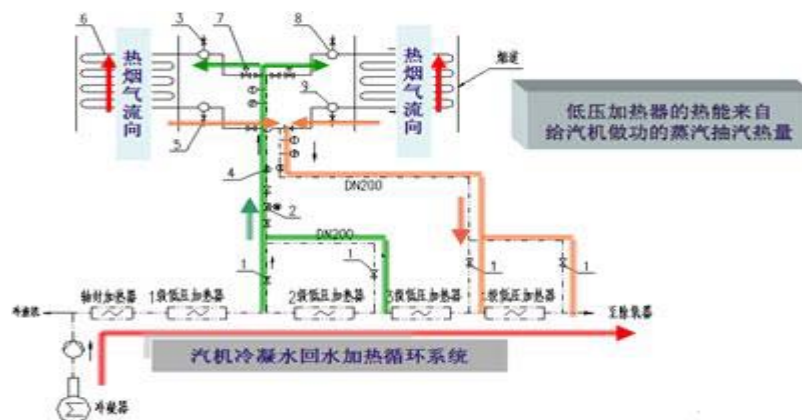


图 1-89 换热器原理图

典型案例

案例名称

600MW 机组余热利用高效低低温电除尘工程

项目概况

本项目于 2012 年 1 月开始设计，2012 年 5 月开工建设，2012 年 7 月竣工并于当月投入试运。

主要工艺原理

本项目采用余热利用高效低低温电除尘技术，主要工艺原理如下：在除尘器的进口喇叭处和前置的垂直烟道处分别设置烟气余热利用节能装置，两段换热装置串联连接，采用汽机凝结水与热烟气通过烟气余热利用节能装置进行热交换，使除尘器的运行温度由原来的 150°C 下降到 95°C 左右。垂直段换热装置将烟温从 150°C 降至 115°C ，水平段换热装置将烟温从 115°C 降至 95°C 。烟温降低使得烟尘比电阻降低至 $10^9\sim 10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 的电除尘器最佳工作范围；同时，烟气的体积流量也得以降低，相应地降低电场烟气通道内的烟气流速。这些因素均可提高电除尘效率，使得电除尘出口粉尘排放浓度达到国家环保排放要求。此外，同步对电场气流分布进行 CFD 分析与改进，改善各室流量分配及气流均布。将换热与电除尘器进口喇叭紧密结合，利用换热器替代原电除尘器第一层气流分布板，重新布置气流分布，形成换热、除尘一体式布置的系统解决方案，实现综合阻力最低。

关键技术或设计创新特色

- 在有限的场地空间内合理布置足够的换热面积：垂直烟道换热器和水平烟道换热器；
- 采取“换热+气流均布”复合设计方案，实现综合流阻最低；
- 采取新型复合换热面，高效换热、使用寿命长；
- 采取合理的换热工艺布置，确保换热效果最佳；
- 配置余热利用电除尘自适应控制系统；
- 应用四防(防止低温腐蚀/防止磨损/防止积灰/防止泄漏)关键技术。

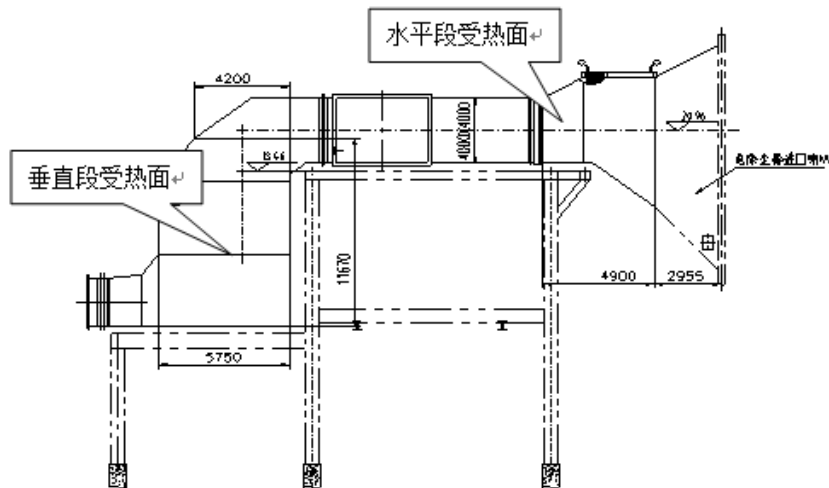


图 1-90 本项目改造示意图

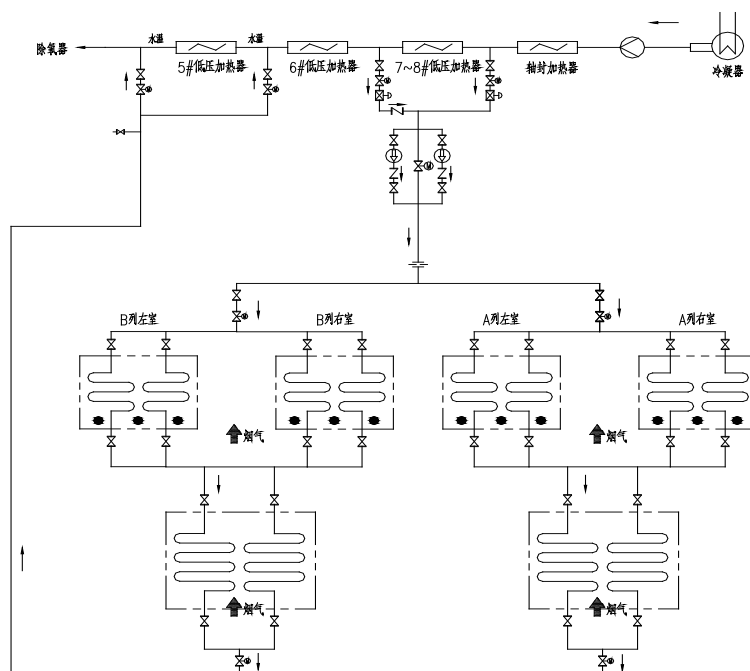


图 1-91 本项目除尘工艺流程图



图 1-92 案例现场图

主要技术指标

本项目主要技术指标如下：

- (1) 加装烟气余热利用节能装置后，4 号机组额定负荷工况下，烟气余热利用节能装置出口烟温由 150℃ 降至 95℃ 左右。
- (2) 加装烟气余热利用节能装置后，额定负荷下，4 号机组供电煤耗比烟气余热利用节能装置投入前降低 2.16g/kWh。
- (3) 烟气粉尘排放浓度 $\leq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1800 万元。

运行费用

根据 2012 年 8 月-2013 年 7 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 80 万元/年。

该项目投运实际经济净效益约为 650 万元/年。

用户意见

通过本项目的实施，达到了电除尘器提效，节省煤耗、水耗和引风机电耗的目的，对于燃煤电厂是一种较为实用的除尘提效、节能、降耗的改造方案。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：郭上迎

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：13959061102

E-mail: 13959061102@139.com

15. 电除尘器节能提效供电关键技术

我们是世界电除尘器大国，同时也是电除尘器电源大国。电除尘器（ESP）具有除尘效率高、处理烟气量大、运行费用较低等优点，仍是当前我国燃煤电厂的主流除尘设备。随着火电厂大气污染物排放新标准的颁布，大量现有的电除尘器面临着改造问题。在节能减排的大背景下，如何在提高除尘效率、降低烟尘排放浓度的同时，大幅度降低 ESP 的能耗，是一项亟待解决的重要课题。影响 ESP 性能的因素主要有本体结构、供电控制与运行工况。其中，ESP 供电控制设备的性能直接影响除尘设备的可靠运行，在适应运行工况的要求和提高电除尘器整体性能方面起着重要作用。我国在电除尘器节能提效供电相关关键技术的研发及应用方面取得了重要进展。高频开关电源、三相高压电源、脉冲供电等一批电除尘器节能提效供电关键技术，得以不断进行完善开发与推广应用。

高频开关电源（简称“高频电源”）的主电路形式是三相交流→直流→高频逆变→升压→整流→输出，其关键技术集中在逆变开关和高频高压整流变压器，其控制技术和制造工艺要求均很高。实践证明，与传统的可控硅控制工频高压整流设备（简称工频电源）相比，高频电源性能更优异，具有输出纹波小、平均电压电流高、体积小、重量轻、成套设备集成一体化、转换效率与功率因数高、采用三相电源对电网影响小等多项优点。据相关统计，应用高频电源的 ESP 出口粉尘排放浓度降幅可超过 30%，与电除尘节能优化控制系统配合，节能可达 50% 以上，在除尘领域获得了广泛认可，也得到了国家相关部门的大力支持。2007 年，国家将电除尘高频高压整流设备列入国家火炬计划项目；2008 年，又将电除尘器高频电源的研发列入了《国家重大产业技术开发专项》；2009 年，高频电源列入了《国家重点节能技术推广目录（第二批）》；2010 年，国家又将高频电源列入了《当前国家鼓励发展的环保产业设备（产品）目录》。

三相高压电源是在火花自动跟踪单相高压电源基础上研发出的一种 ESP 高压电源。该种电源是三相 380V/50Hz 输入，主回路由 3 组反并联可控硅即 6 只可控硅构成三相移相调压电路。高压硅整流变压器也是三相输入、三相升压、三相整流，产生脉动率为 $3 \times 100\text{Hz}$ 的直流负高压向 ESP 电场阴、阳极供电。三相电源具有电能转换效率高，具有一定节能效果（比单相电源的固有能耗约节约 28%）；输出平均电压高、平均电流大、二次电能消耗大，几乎接近纯直流；三完全平衡，对电网无污染，无缺相损耗；但网路冲击较大，设备相对较大。通过对 250MW、300MW 和 600MW 燃煤电厂电除尘改造的应用看，实现 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 排放电除尘改造的费用在 10~30 元/kW 左右，同时没有需要电厂增大风机和处理袋二次污染物的问题，可为燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放控制做出贡献。

典型案例（一）

案例名称

660MW 机组电除尘高频电源改造项目

项目概况

本项目于 2013 年 3 月开始设计，2013 年 4 月开工建设，2013 年 5 月竣工并于当月投入试运。

主要改造内容及情况

本项目 2#机组原除尘器出口排放平均高达 $110.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，为达到环保要求的最新排放标准，2013 年 4 月，对 2#机组进行了电除尘器高频改造工程，将 2#炉电除尘的一、二电场工频电源更换成高频电源，对三~五电场工频电源控制器进行升级，低压控制系统升级，上位机控制系统采用电除尘节能优化控制系统，改造项目要求除尘器出口粉尘排放浓度 $\leq 30\text{mg}/\text{m}^3$ ，设备电耗 $\leq 360\text{kW}$ 。

项目改造完毕后，于 2013 年 6 月对 2#机组电除尘器改造后性能进行了测试，测试结果表明，2#机组甲、乙两侧除尘器出口烟尘浓度分别为 $23.50\text{mg}/\text{dNm}^3$ 、 $26.96\text{mg}/\text{dNm}^3$ ，达到改造协议设计值 $\leq 30\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。改造期间，2#炉电除尘器 8 台高频电源和 12 台工频电源总设备电耗为 254kW ，达到改造协议设计值 $\leq 360\text{kW}$ 的要求。

表 1-10 本项目主要参数表

项目	单位	甲侧		乙侧	
		进口	出口	进口	出口
烟气平均流量	$\times 10^4\text{m}^3/\text{h}$	162.91	165.78	166.11	168.75
干标态烟气平均流量	$\times 10^4\text{dNm}^3/\text{h}$	99.03	101.36	101.53	103.41
烟气平均含氧量	%	4.42	4.67	3.84	4.13
过剩空气系数		-	1.29	-	1.24
烟气平均二氧化硫浓度	mg/dNm^3	-	2330	-	2291
烟气平均氮氧化物浓度	mg/dNm^3	-	237.7	-	249.9
烟尘平均浓度	mg/dNm^3	25.04×10^3	23.50	25.99×10^3	26.96
漏风率	%	1.51		1.69	
除尘效率	%	99.90		99.89	
平均除尘效率	%	99.90			

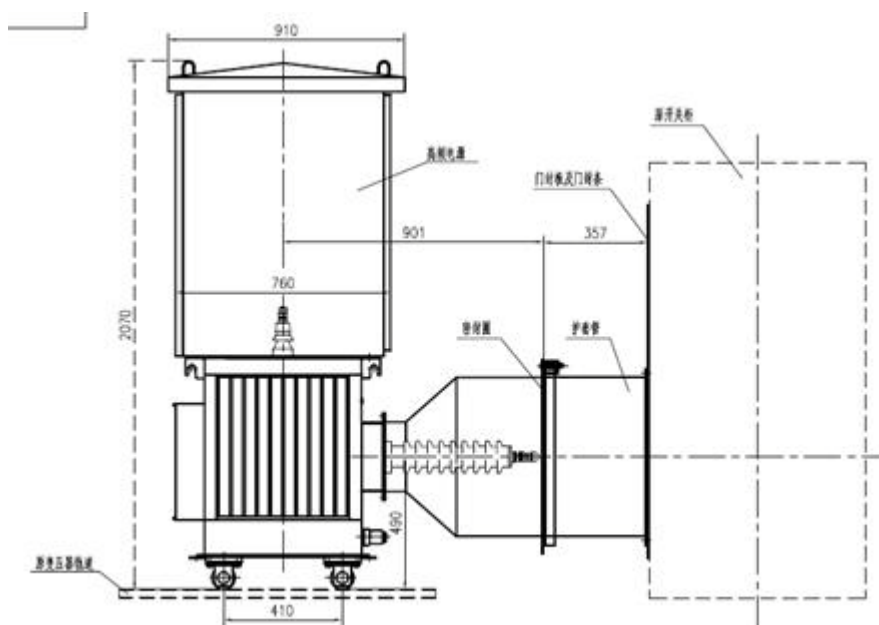


图 1-93 本项目改造示意图

高频应用—单IPC主机系统

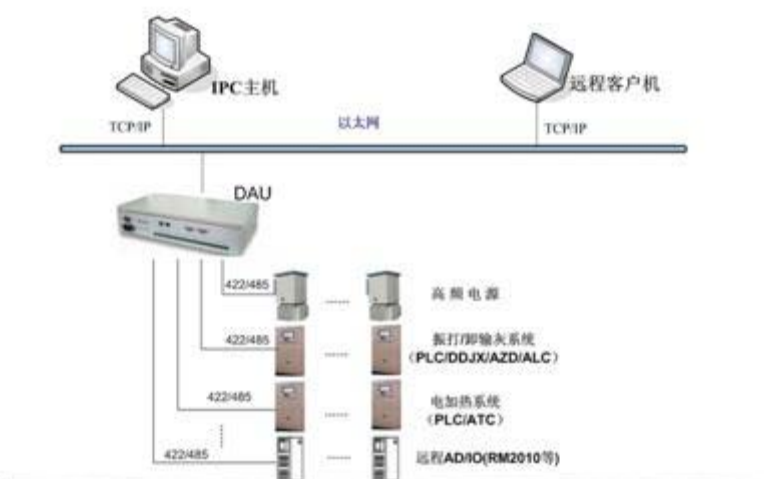


图 1-94 本项目电除尘控制系统架构图

高频电源关键技术或设计创新特色

- RCD 缓冲电路采用自制印刷电路确保 IGBT 变换器可靠工作，配置方便灵活；
- 叠层母排式大功率变换器结构降低线路分布电感提高功率器件运行可靠性及稳定性；
- IGBT 功率器件、分立式整流模块采用热管散热技术，散热效果好，散热系统利用率高；
- 机柜热交换散热防护技术确保控制柜防护等级达到 IP55，特殊设计的母线固定装置确保控制柜的连接密封，配套应用方便。
- 印刷电路板采用灌封和涂覆有机硅三防漆工艺技术，确保硬刷电路板可靠工作；

- 大功率高频高压硅堆和变压器分布参数设计，确保高频整流变压器在大功率高频状态下可靠运行。



图 1-95 案例现场改造图

主要技术指标

本项目主要技术指标如下：

- 1) 2# 机组甲、乙两侧除尘器出口烟尘浓度分别为 23.50mg/dNm^3 、 26.96mg/dNm^3 ，达到改造协议设计值 $\leq 30\text{mg/m}^3$ 的要求。
- 2) 改造期间，2#炉电除尘器 8 台高频电源和 12 台工频电源总设备电耗为 254kW ，达到改造协议设计值 $\leq 360\text{kW}$ 的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 308.8 万元。

运行费用

改造后，该项目投运 8 个多月来节省的电费（同改造前运行电耗相比）约为 100 万元。

用户意见

本项目提供的高频高压整流设备运行可靠，与 IPEC 节能优化控制系统配合可确实有效地保证了电除尘器的除尘效率，与工频电源相比节能效果显著，降低了电除尘器的运行成本，具有良好的环境效益和经济效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：郭上迎

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：13959061102

E-mail: 13959061102@139.com

典型案例（二）

案例名称

600MW 燃煤机组电除尘改造

项目概况

保留国产电除尘本体，改造技术路线和方案、电除尘电源和电除尘控制来源于 863 计划（2013AA065001）研究成果，实现 600MW 机组四电场电除尘电源改造后电除尘出口排放低于 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

主要工艺原理

改造工作保留原国产四电场电除尘本体，对 16 台高压电源改造为 16 台三相电源。电源根据电除尘指数设计选型，可实现电流电压的极限运行。

关键技术或设计创新特色

- 高功率三相电源电流电压极限运行

主要技术指标

在电除尘比集尘面积为 $80\sim 100\text{m}^2/\text{m}^3/\text{s}$ 左右，电除尘电流密度 $0.4\text{mA}/\text{m}^2$ ，电除尘中电场强度 $3.0\sim 3.5\text{kV}/\text{cm}$ ，实现电除尘出口排放 $15\sim 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右。

投资及运行效益分析

投资费用

单台电除尘改造费用在 500 万左右。

运行费用

同改造前基本一样。

用户意见

电除尘出口粉尘排放 $15\sim 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，达到合同要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江大学

联系人：闫克平

地址：杭州市天目山路 148 号教学主楼 110 号

邮政编码：310018

电话：0571-88210340

E-mail: kyan@zju.edu.cn

16.电袋复合除尘技术

电袋复合除尘技术是在一个箱体内安装电场区和滤袋区(电场区和滤袋区可有多种配置形式),将静电和过滤两种除尘技术复合在一起的除尘技术。其工艺原理如下:含尘烟气经过气流分布板均匀地进入电除尘部分,在收尘电场的作用下大部分粉尘荷电,并在电场力作用下向收尘极移动并在收尘极板上去除带电性和沉积;经过电除尘处理后含有少量粉尘的烟气少部分通过多孔板进入袋收尘区,大部分烟气向下部,然后由下而上地进入袋除尘区,粉尘被阻留在滤袋表面上,经过净化后的烟气经提升阀进入烟道排出。

国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持,特别是“十一五”以来,在国家 863 计划课题(2007AA061804)等的连续资助下,国内在气流分布技术、均流喷吹清灰、滤袋材料选择和配套电源等多方面取得突破,使电袋复合除尘技术及其标准化、产业化取得了重大进展。现电袋复合除尘器已成为我国燃煤电站除尘的主流技术,可节约能源消耗,减小粉尘特别是细颗粒的排放。国内的过滤风速设定相对较低,设备阻力也较低,可靠性更好,单位设备投资和年运行费用相比国外技术具有明显优势,且已在 1000MW 及以下燃煤机组上得到了应用,并已出口印度、印尼、越南等多个国家。

该技术粉尘排放浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$,除尘效率 $\geq 99.9\%$,过滤速率 $\geq 1.2\text{m}/\text{min}$,本体阻力 $\leq 1000\text{Pa}$ 。该技术成熟、稳定,实现电除尘和袋式过滤除尘两种不同机理收尘方式的有机功能集成,具有除尘效率高,结构紧凑,占用场地少,除尘效率高且不受粉尘特性影响等特点,可实现电袋复合除尘器前级电除尘和后级袋式除尘共用同一壳体,非常适合现有电厂的提效改造。

典型案例（一）

案例名称

2×1000MW 机组电袋复合除尘工程

项目概况

该项目于 2013 年 3 月顺利通过 168 小时试运行，配套电袋除尘器运行正常，粉尘排放低于 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，阻力小于 1100Pa ，清灰周期长达 4.6 小时。该项目为世界上第一台 1000MW 机组电袋复合除尘器。

主要工艺原理

含尘烟气从除尘器经进口喇叭（内设气流均布板）进入电场区，烟气中的粉尘约有 80%~90% 在电场区被收集，并落入下部的灰斗。未被收集的荷电粉尘流入滤袋区，烟气经滤袋区再次被净化，纯净的烟气从滤袋内腔流入上部的净气室，然后流经上部的提升阀，从出风烟道排出，如下图。

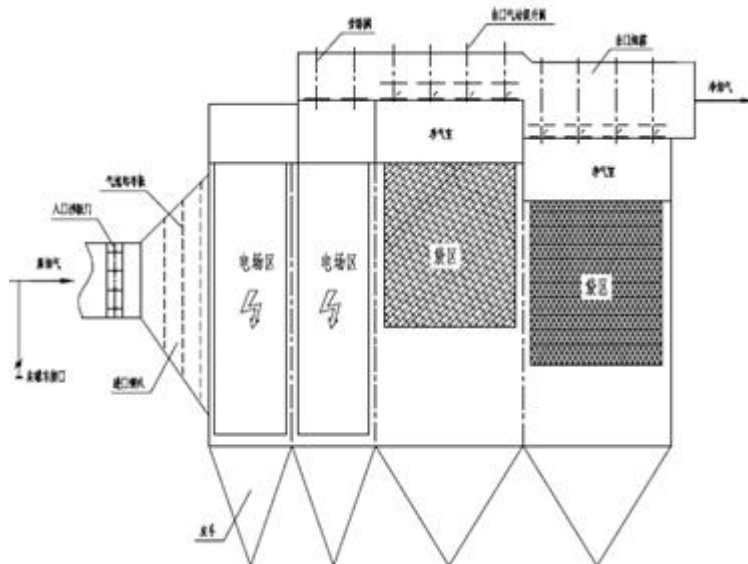


图 1-96 本项目特大型电袋复合除尘器开发与应用的工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 开发了大型电袋气流均布技术。通过大型化气流均布措施，控制各室流量偏差和各滤袋流量均方根偏差，及 CFD 和物模实体模型验证，使大型化中设备体积大，除尘器分室多，各室滤袋数量多的复杂问题得到解决。
- 开发了大型电袋脉冲喷吹技术。采用大型喷吹技术，实现单个脉冲喷吹滤袋数量达到 26 个，滤袋长度达到 8.25 米，解决滤袋长度与极板不相匹配问题，从而节省设备投资和减少占地面积。
- 研制了使用复杂燃煤电厂烟气的耐强滤料技术。针对大型锅炉烟气复杂工况特征，采用适应各种煤种、炉型的耐强腐蚀滤料，延长滤袋使用寿命，实现大型燃煤电袋除尘器保持长期稳定高效运行。
- 创建了不同粉尘荷电特性的理论。针对不同炉型、不同煤种粉尘荷电特性，采用增强粉尘荷电的方法，并开发分级效率技术，实现电场区和滤袋区的最佳组合，实现除尘器性价比最高，提高市场竞争力。

- 开发捕集微细粉尘（PM_{2.5}）的技术。可实现高效捕集微细粉尘（PM_{2.5}）满足新的环保要求。



图 1-97 案例现场图

主要技术指标

2013 年 4 月经第三方测试：机组负荷 1000MW 时，设备阻力为小于 1100Pa，除尘效率为 99.924%，出口粉尘浓度为 26mg/m³(标干态、O₂=6%)；该除尘器 PM_{2.5} 脱除效率为 99.89%，具有较高的脱除 PM_{2.5} 性能。

投资及运行效益分析

投资费用

本项目电袋复合除尘器项目工程总投资（不含安装费）为 8500 万元。

表 1-11 本项目电袋复合除尘器工程总投资估算表单位：万元

序号	价目名称	合计	所占比例 (%)
1	设备价格	8330	98
2	设计费及调试服务费	170	2
费用合计		8500	

注：以上数据均为 2 台除尘器的费用，单台除尘器费用减半。

运行费用

表 1-12 本项目年运行费用表

项目		单位	数据
运行费用	电费	单价	元/kWh
		年消耗电量	kWh
	年消耗电量费用	万元	
其他费用	设备维修等费用	万元	50
费用总计		万元	527

注：以上数据均为 2 台除尘器的运行数据，单台除尘器费用减半。

项目的运行大大减少烟气中烟尘等污染物的排放，从而改善空气质量，保护当地的环境。考虑烟尘减排的量，项目投运前后烟尘脱除情况见表 1-10。

表 1-13 本项目投运后烟尘减排表（2 台炉）

名称	单位	结果
入口烟尘浓度	mg/Nm ³	37803
出口烟尘浓度	mg/Nm ³	26
削减率(%)	%	99.93
年削减总量	万吨	163.15

注：按年运行 6000 小时计。

从上表可以看出，项目投运后每年可向大气减少烟尘排放达 163.15 万吨，减排效果非常明显。

用户意见

本项目 3#、4#电袋复合除尘器是世界上在运行的最大规格电袋复合除尘器之一，是百万机组除尘新技术的一个里程碑。其出口排放、运行阻力等运行指标均优于设计值。电袋复合除尘器成为大型燃煤机组满足新排放标准的新一代高效节能除尘技术。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：郭上迎

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：13959061102

E-mail: 13959061102@139.com

典型案例（二）

案例名称

2×600MW 机组电袋复合除尘工程

项目概况

本技术属于国家 863 课题（项目编号：2007AA061804）产学研合作开发成果，2012 年度获浙江省科技成果转化二等奖；浙江省科技成果登记号：13006352。本项目 1 台 600MW 机组配置 2 台电袋复合除尘器，每台电袋复合除尘器设置成二个大室，每个大室均设置有进口风门及出口风门，在每台除尘器的中间设置隔墙，以方便检修工作。2009 年 9 月，开始改造机组设计，2009 年 12 月开始开工建设，2011 年 9 月，完成 168 试运行。

主要工艺原理

采用“前级电除尘器+后级袋式除尘器”的配置型式，首先由前电场捕集 80% 左右的粗粉尘，其余粉尘则由堆积在滤袋上的荷电粉饼层捕获。电袋复合除尘器的气流分布设计是决定设备性能的关键技术，菲达独特的二次导流技术保证了各滤室气流分布的均匀性，也减少了粉尘的“二次吸附”，良好的气流分布不仅可以降低除尘器的运行阻力，还可以延长滤袋的寿命，保证除尘器的高效率，实现电除尘和袋除尘的有机集成；出色的均流清灰喷吹技术，具有“软着陆”功能的活塞式脉冲阀形成了可靠的清灰系统；国际上最先进的滤料动态过滤性能测试设备，严格的试验程序为用户优选性能优异的滤料；还有采用专利技术的笼骨、零泄漏的旁通阀以及完善的控制系统。

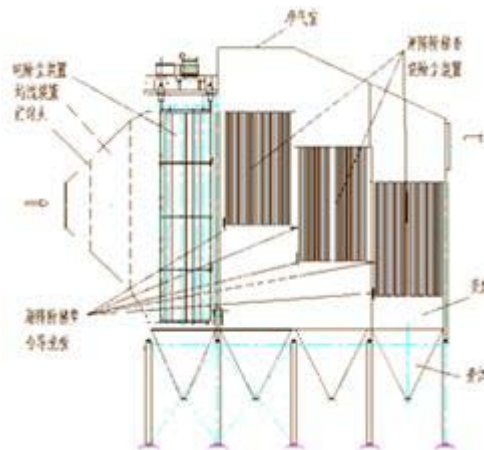


图 1-98 本项目电袋复合除尘工艺流程图

关键技术或设计创新特色

采用错层式气流分布技术，在袋除尘区，可使阻碍粉尘沉降的上升气流速度减小 30% 以上，提高清灰效率；并可大大改善电除尘区的气流分布均匀性，消除滤袋受高速气流冲刷发生的大量破袋现象，全面改进传统方式的缺陷，有效提高电除尘区的除尘效率和袋式除尘区的清灰效率。

研制脉冲喷吹阀性能测试平台，开发出均流喷吹技术，最大限度保证清灰力的均匀性，提高了清灰效果，延长滤袋使用寿命。

研制适合于电袋复合除尘器应用、针对超细颗粒捕集的多梯度高密面层的优化滤料，降低残余阻力，延长清灰周期。



图 1-99 案例现场图

主要技术指标

本项目电袋复合除尘器在连续稳定运行 5500 小时后进行了性能测试。性能测试时，机组负荷为 552MW，电袋复合型除尘器正常运行，平均入口烟气温度为：127℃，平均入口烟气量（工况）为：3354000m³/h，平均入口粉尘浓度（标况）为：15.1g/m³。在此工况下测得电袋复合除尘器性能参数平均值为：除尘效率达到 99.92%；压力降 448Pa；漏风率 2.0%；粉尘排放浓度 13.6mg/Nm³。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 5830 万元。

运行费用

根据 2012 年 1~12 月实际运行情况，电耗费用约为 280 万元/年，年维修费用（包括滤袋折旧）约 145 万元，该项目年运行费用约 425 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，该除尘工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江菲达环保科技股份有限公司

联系人：崔盈

地址：浙江省诸暨市望云路 88 号

邮政编码：311800

电话：0575-87213390

E-mail: cuiying@126.com

典型案例（三）

案例名称

多场耦合紧凑型除尘器示范工程

项目概况

多场耦合紧凑型除尘技术是在 973 课题“可吸入颗粒物的形成和控制”的基础研究中，对电袋一体化技术从机理到工程示范进行了综合性的研究，历经 12 年发展起来的具有自主产权的革新性技术和成果。

主要工艺原理

多场耦合紧凑型除尘技术是基于静电除尘和布袋除尘两种成熟的除尘理论而提出的一种新型的除尘技术，结合了静电除尘器和布袋除尘器的优点。清华大学研究表明，不带电的粉尘沉积在滤袋表面为密实平整结构，而预荷电粉尘将在滤袋表面形成由树叉状颗粒链编织而成的疏松滤饼，这种滤饼结构有利于降低气流的通过阻力。因此，若能在静电场的有效收尘区域内同时实现烟气过滤，将使收尘效率递增且有利于减小布袋除尘器压降。正是基于这种考虑，耦合式电袋除尘器将静电除尘和布袋在同一除尘室混合布置。这种布置带来的直接好处是：在烟气到达滤料表面之前，静电除尘器已脱除其中大部分颗粒，同时通过特殊的气流分布板分隔，控制着两种除尘技术的协同作用效能，大大降低了滤料过滤的灰负荷，而且这种布置克服了传统静电除尘中大量细颗粒逃逸的问题，同时解决了传统布袋过滤清灰时二次扬尘和反复收集的问题，除尘效率高(排放浓度可以低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$)，既能满足新的环保标准，又能增加运行可靠性，降低用户除尘成本。

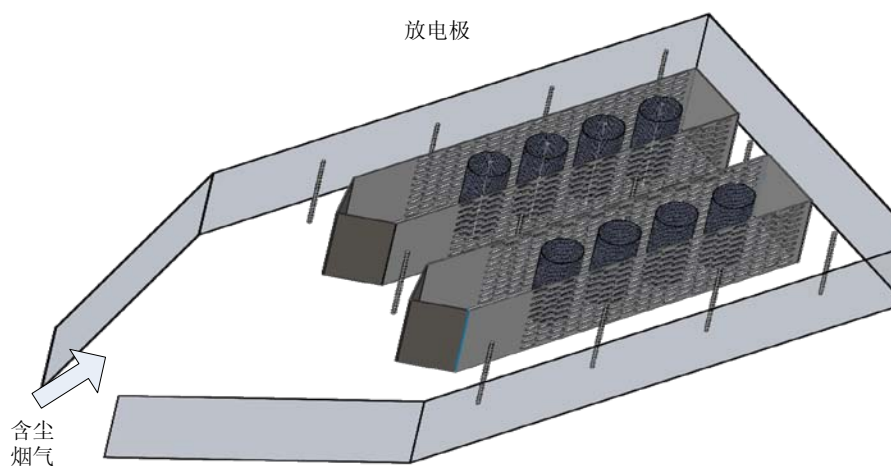


图 1-100 多场耦合紧凑型除尘器原理图

关键技术或设计创新特色

- 除尘效果极好，中间试验设备的排尘浓度只有 $0.1\sim 0.2\text{mg}/\text{m}^3$ ；
- 滤袋的气布比可达一般脉冲袋式过滤器的 3 倍，大大减少了滤袋数量和除尘器的占地面积；

- 电除尘部分的部件也比普通电除尘器的少一半还多，多场耦合紧凑型除尘器的大小大约只有普通电除尘器的 1/3；
- 滤袋的清灰频率比普通袋式过滤器的低，可以延长滤袋寿命，并运行费用也随之降低。



图 1-101 除尘器安装图



图 1-102 除尘器运行图

主要技术指标

处理烟气量：87587Nm³/h；烟气温度：155℃；除尘压降：<1000Pa；过滤风速：1.12~3.36m/min；排放浓度：<5mg/Nm³。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学热能工程系

联系人：姚强

地址：清华大学热能工程系

邮政编码：100084

电话：010-62782108

E-mail: yaoq@tsinghua.edu.cn

典型案例（四）

案例名称

100t/h 煤粉锅炉电除尘器改造工程

项目概况

本项目于 2012 年 9 月电袋组合分流除尘器开始设计及制造，2012 年 12 月首套（5#）设备完成安装工作并完成 168 试运行，2013 年 4 月第二套（3#）设备完成安装工作并完成 168 试运行，2013 年 6 月第三套（4#）设备完成安装工作并完成 168 试运行，2013 年 8 月第四套（7#）设备完成安装工作，当前正在进行第五套（6#）设备的安装工作。

主要工艺原理

工艺特点：电袋组合分流除尘器有效地结合了电除尘器和袋式除尘器各自的优点，项目中设计的除尘器是在已建的电除尘器基础上改装而成，该除尘器分为两级，前级为电除尘区，后级为袋除尘区，两级之间采用串联结构有机结合。

利用电除尘区第一电场捕集锅炉停机后再点火启动时产生的油烟。此时袋除尘区不运行，关闭出风阀门，开启旁路阀门，利用电除尘器第一电场约 80~90% 的除尘效率进行消烟除尘，经过电除尘器捕集后的烟气中的含尘浓度已大大降低，通过旁通管道排放。

将原电除尘器第二、三电场改为滤袋仓室进行强化过滤，以满足烟气排放达标的要求。在锅炉点火投入正常运行后，开启出风阀门，关闭旁路阀门，袋除尘区投入正常运行，此时电除尘区不需要运行。

该除尘器能够有效地保护滤袋。在突发情况下，如锅炉停机后再点火启动时产生油烟、锅炉发生省煤气、再热器、过热器、水冷壁四管泄露或爆管时，可以关闭袋除尘区，只使用电除尘区除尘，防止滤袋损害。同样，电除尘在前能够沉降高温烟气中未熄灭的颗粒和水汽，缓冲气流，保证了滤袋的安全。另外，袋除尘区的进风形式，也可避免气流对滤袋的直接冲击。

工艺流程：锅炉的烟气经烟道进入到电袋组合分流除尘器的进风口，进风口内部设置有气流分布板，烟气经气流分布板分配后进入到第一电场，电场内设置有阴极线和阳极板，烟气中的粉尘通过带有直流高压电场的通道，粉尘被荷电。带有负电荷的粉尘在电场力的作用下趋向阳极板，粉尘吸附在阳极板上并释放电荷。通过机械振打机构对阳极板进行振打清灰，聚集在阳极板上的粉尘被振落到灰斗中。

电袋组合分流除尘器将原电除尘器第二、三电场改为滤袋仓室。烟气条件正常后，开启除尘器出风提升阀，关闭旁路阀门。烟气经过第一电场，此时电场未投入运行，烟气在此区间流速降低，大颗粒粉尘得到重力沉降，经过重力沉降后的烟气通过槽形阻流板进入滤袋仓室内，有效地避免了大颗粒粉尘在惯性力作用下对滤袋的冲刷，烟气在滤袋仓室内均匀上升。

随着除尘器过滤工作的持续进行，除尘器滤袋表面的粉尘将越积越厚，除尘器阻力也随之上升。因此，需要对滤袋表面的粉尘进行定期的清除。除尘器的

清灰程序可通过设置在除尘器上的压差检测装置或控制系统中的清灰程序的反馈实现。清灰程序有定阻控制和定时控制两种方式可以供选择，并能实现手动或自动的控制方式启动清灰程序。滤袋表面的粉尘通过脉冲喷吹清灰后落入灰斗中，由卸灰、输灰装置送出。经处理后的洁净气体通过烟囱排放进入大气环境。

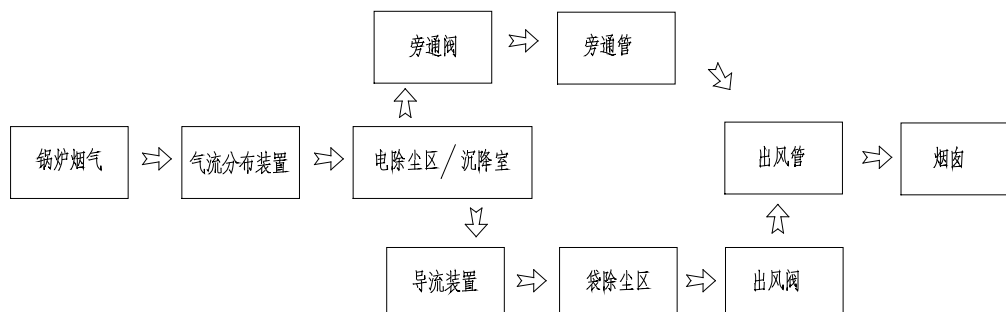


图 1-103 本项目电袋组合分流除尘器工艺流程图

电袋组合分流除尘器技术参数如下表所示。

表 1-14 本项目除尘器技术参数

序号	项目	单位	数据
1	除尘器型号		LDCM-3716
2	入口烟气体量	m ³ /h	212000
3	入口含尘浓度	g/Nm ³	40
4	出口含尘浓度	mg/Nm ³	<20
5	入口烟气温度	℃	<135
6	箱体改造设计耐压	Pa	-8727
7	除尘器设备阻力	Pa	≤1200
8	除尘器的漏风率	%	≤3
9	除尘器电场截面	m ²	61.2
10	极板间距	mm	400
11	电场风速	m/s	0.907
12	除尘器过滤面积	m ²	3716
13	过滤风速	m/min	0.951
14	滤袋规格		Φ160×6950
15	滤袋材质		PPS 浸 PTFE
16	滤袋数量		1076
17	脉冲阀数量		76
18	耗气量	Nm ³ /min	3

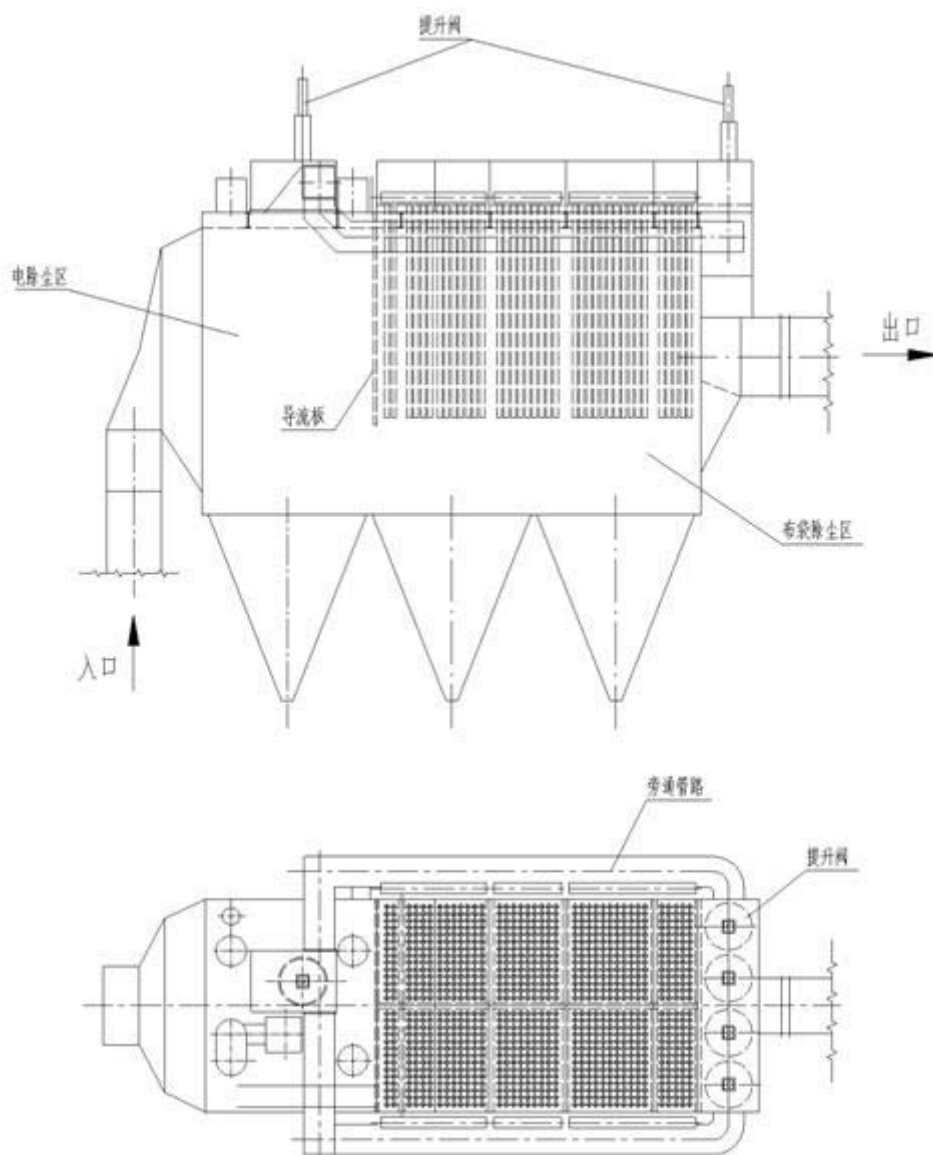


图 1-104 电袋组合分流除尘器结构示意图

关键技术或设计创新特色

- 高效超长袋脉冲清灰技术；
- 低阻力可靠气流分布技术（气流分布数值模拟计算）；
- 改造后设备低阻运行，节能降耗技术（利用原系统风机）；
- 精密加工及施工质量控制；
- 滤袋设计选型及检测控制技术。

主要技术指标

根据检测报告，本项目（5#）电袋组合分流除尘器出口烟气排放浓度为 $11.47\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，满足国家现行《火力发电厂污染物排放标准》（GB13223-2011）要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程设备单台投资约 160 万元。

运行费用

根据 2013 年 1~6 月（5#）电袋组合分流除尘器实际运行情况，电袋组合分流除尘器管理运行费用与原电除尘器相比基本持平，压缩空气耗量有所增加。

该项目实施后可减少烟尘排放，每台设备每年可减少排放烟尘 160 吨，有较好的环境效益。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：科林环保装备股份有限公司

联系人：吴建新

地址：江苏省苏州市工业园区通园路 210 号（科林大厦）

邮政编码：215021

电话：0512-62512888

E-mail: kelin@188.com

17. 高效袋式除尘关键技术及设备

袋式除尘技术是一种干式滤尘技术，它适用于捕集细小、干燥、非纤维性粉尘。其工作原理是利用滤袋对含尘气体进行过滤，颗粒大、比重大的粉尘由于重力的作用沉降落入灰斗之中，而含有较细小粉尘的气体在通过滤袋时，粉尘被阻留过滤，使气体得到净化。1881年机械振动清灰袋式除尘器获德国专利并开始袋式除尘器的商业化生产；1950年，逆喷型袋式除尘器首次实现连续操作。1957年，发明了脉冲袋式除尘器。20世纪70年代以后，袋式除尘技术向大型化发展。

“十五”以来，在国家863计划等课题的资助下，袋式除尘器的大型化进展显著，其纤维、滤料、配件和自动控制的技术水平得到了一定的发展，耐高温、耐腐蚀特种纤维的研究、开发、生产等方面也均有突破。

如在“十五”863计划课题“燃煤电厂锅炉烟气细微颗粒高效控制设备与技术”及“十一五”863计划课题“大型燃煤电厂锅炉烟气细微颗粒高效控制设备与技术”资助下，开发完成了直通导流袋式除尘技术与装备及大型化袋式除尘装置机构安全计算分析软件，对传统袋式除尘器进行了根本性改善。含尘气体沿水平方向进入除尘器，经气流分布后过滤，再沿水平方向排出。这缩短了烟气流程，取消了传统袋式除尘器中烟道、仓室、停风阀等构件，表现为结构简单、占地小、效率高、流动阻力低的特点。对 $PM_{2.5}$ 微细颗粒具有较高的脱除效率，烟尘排放浓度可低于 $10mg/Nm^3$ ，满足环保排放特别限值要求。在国家863计划课题（2007AA06Z346、2007AA061804）等资助下，我国在聚苯硫醚（PPS）纤维纺丝及PPS滤料产业化等多方面取得突破，所研发的具有自主知识产权的PPS滤料可应用于大型燃煤电厂高温烟尘的控制，且已将该种PPS滤料产业化，并用于现场示范工程；在国家863计划课题（2007AA06Z310、2013AA065003）等的资助下，我国在薄膜孔径控制、制膜设备、与支撑体的复合等多方面取得突破，在覆膜滤料技术的标准化、产业化方面取得了重大进展，如“聚四氟乙烯复合膜共拉伸制备方法与层压覆膜技术”获2009年国家技术发明二等奖。该技术的粉尘排放浓度低于 $6mg/m^3$ ，使用寿命可达到4年以上。

该技术的处理烟气量为 $10\sim 300$ 万 m^3/h ，入口温度小于 $260^\circ C$ ，排尘浓度小于等于 $30mg/Nm^3$ ，漏风率 $\leq 3\%$ ，设备阻力 $1200Pa\sim 1500Pa$ ，滤袋寿命大于3年（年破袋率 $\leq 0.5\%$ ）。该设备具有烟气处理能力强、除尘效率高、排放浓度低等特点，还具有稳定可靠、能耗低、占地面积小的特点。

典型案例（一）

案例名称

5×100t/h 供热锅炉除尘工程

项目概况

本项目安装 5 台 100t/h 供热锅炉，总供热面积 657 万平方米，总供热能力 350 兆瓦。本项目为该供热锅炉提供烟气除尘净化服务，于 2009 年 2 月开始设计，2009 年 7 月与主机同步开工建设，2009 年 11 月 15 日完成，实现了与锅炉主机同时成功投运，排放浓度 $7.2\text{mg}/\text{Nm}^3 \sim 7.7\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，设备阻力为 800~900Pa，安全可靠运行至今。

主要工艺原理

直通式袋式除尘器主要由上箱体、喷吹装置、中箱体和灰斗等部分组成，除尘器进口喇叭设在中箱体上，锅炉烟气经气流分布装置进行气量分配且整流，整流后的烟气流向袋式除尘器的过滤空间；烟气通过过滤方式进行净化，大颗粒粉尘主要靠重力、惯性碰撞作用落入灰斗，细微颗粒的捕集主要靠筛滤作用。粉尘被过滤在滤袋外表面，净化后的烟气沿袋内通道向上流动，在上箱体汇集后从尾部流向引风机。随着滤袋表面粉尘量的不断增加，过滤阻力也逐渐增加，当达到规定的上限值时，对滤袋进行清灰；当过滤阻力降低到下限时，停止清灰，清下的粉尘通过灰斗排出，达到除尘目的。该工艺技术气体历程短，流动顺畅，箱体流通阻力小。



图 1-105 直通导流袋式除尘器原理图

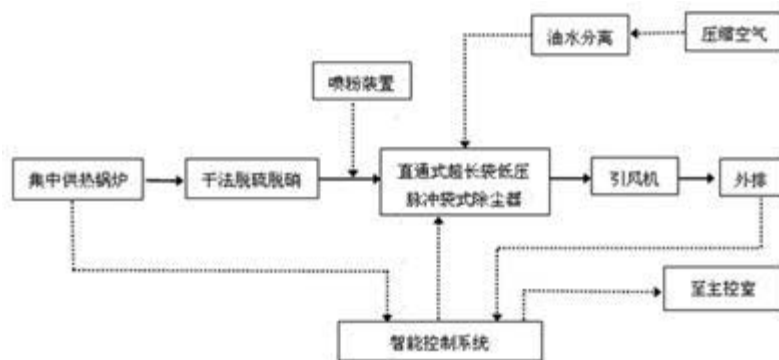


图 1-106 本项目工艺路线图一

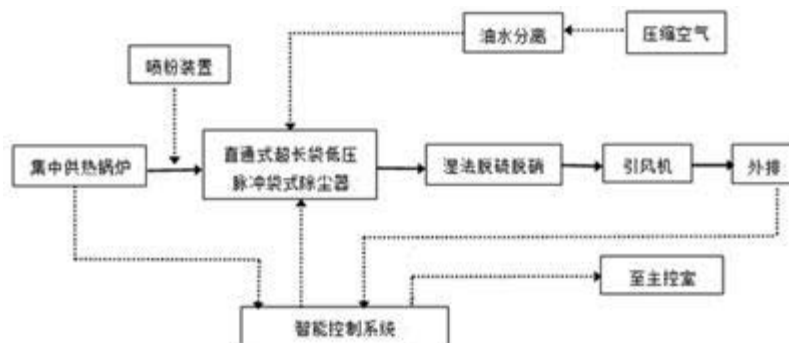


图 1-107 本项目工艺路线图二

关键技术或设计创新特色

- 针对集中供热锅炉烟气，开发新型结构的直通均流式脉冲袋式除尘器，可以显著降低设备阻力和运行能耗；
- 针对 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 排放要求，如何保证袋口严密措施和滤料的过滤性能；
- 保障滤袋长寿命的气流分布技术和装置；
- 采用超长滤袋以保障清灰效果的保障措施；
- 采用长距离机械输灰和提升技术措施；
- 解决了浮链、跑偏和磨损等问题；
- 采用了多炉一机的总线控制模式。



图 1-108 案例现场图

主要技术指标

本项目出口粉尘排放浓度 $7.2\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，设备阻力 800Pa 。项目较常规技术装备占地面积节省 27.7% ，除尘器钢耗量节省 20.6% 。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资约 1500 万元。

运行费用

自 2009 年 11 月 15 日实况运行情况，水、电、粉、气、管理、维修等运行费用约为 25.7 万元/年。单台机组每小时阻力能耗减少 25.6KW ，一天运行 24 小

时，以年运行 180 天计，一年节省 11.06 万千瓦时。该项目安装 5 台 100 吨供热锅炉，则一年共节省约 55 万千瓦时。

用户意见

本项目投运至今，粉尘排放浓度约 $7.2\text{mg}/\text{m}^3$ ，设备阻力低于 1000Pa，运行可靠有效，保障区域的供暖要求同时实现了达标排放。该市政供热锅炉烟气除尘带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中钢集团天澄环保科技股份有限公司

联系人：张发有

地址：武汉市东湖新技术开发区光谷一路 225 号

邮政编码：430205

电话：027-59908241

E-mail: vvew@163.com

典型案例（二）

案例名称

330MW 机组电改袋除尘改造项目

项目概况

本项目是在上海世博会召开之前，为改善上海市大气环境质量进行的除尘改造提效项目，将 330MW 燃煤机组原电除尘设施改造为直通导流袋式除尘装置，粉尘排放浓度由高于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 改造为低于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。项目于 2010 年 4 月开工建设，2010 年 6 月 12 日完成，项目工期仅用了两个月。

主要工艺原理

改进后的袋式除尘器，设置气流分布板、导流板和导流通道，含尘气体水平进入袋式除尘器，经进口喇叭、气流分布板、导流板和导流通道进入中集箱，经滤袋过滤以后，再水平排出，从而表现出结构简单，流程短、流动顺畅、流动阻力低的特点，以达到降低能耗，提高除尘效率，防止冲刷损坏滤袋的目的。

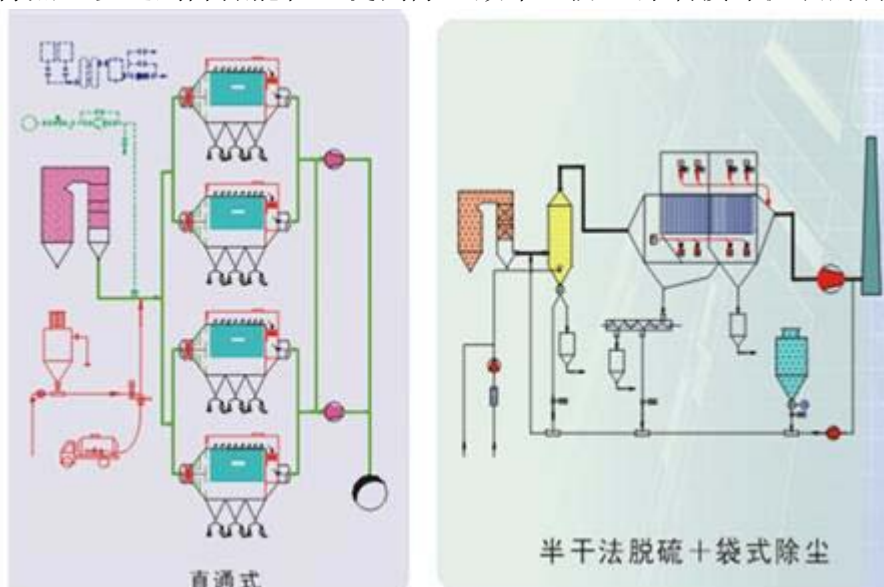


图 1-109 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 对原电除尘器改造，拆除其内部构件；
- 改造后颗粒物平均排放浓度 $13.4\text{mg}/\text{m}^3$ ； $\text{PM}_{2.5}$ 捕集效率达到 95% 以上；设备阻力 700~1200pa；能耗比常规袋式除尘器降低约 30%，比电除尘器降低 10%；
- 项目安装工期 2 个月；
- 在上海外高桥电厂 320MW 燃煤机组建成示范工程；
- 通过欧盟 CE 认证，出口至土耳其、哈萨克斯坦、俄罗斯等国家。



图 1-110 案例现场图

主要技术指标

本项目平均出口粉尘排放浓度 $13.2\text{mg}/\text{m}^3$ 。本装置运行阻力低于 1000Pa ， PM_{10} 的捕集效率大于 99.5% 。本产品并通过欧盟 CE 认证，出口至土耳其、哈萨克斯坦、俄罗斯等国家。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1800 万元。

运行费用

自投运实况情况来看，水、电、粉、气、管理、维修等运行费用约为 101.6 万元/年。投资折旧节省 10 万元/年、排污收费节省 275.28 万元/年、年度节省标准煤为 576 吨，该项目的实际经济净效益约为 546.88 万元/年。

用户意见

本项目达到预期效果，投运至今运行可靠稳定。除尘设施出口粉尘平均排放浓度 $13.2\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，设备阻力 $700\sim 1000\text{Pa}$ ，运行可靠有效实现了达标排放，带来了显著的经济、社会效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中钢集团天澄环保科技股份有限公司

联系人：张发有

地址：武汉市东湖新技术开发区光谷一路 225 号

邮政编码：430205

电话：027-59908241

E-mail: vvew@163.com

典型案例（三）

案例名称

2×300MW 机组袋式除尘项目

项目概况

本项目 2 台 300MW 机组使用风氧化煤,采用炉内干粉脱硫,氧气浓度 6.5%, 烟气温度 140℃, 瞬间 170℃。现场粉尘入口浓度 110g/m³, 粉尘出口浓度 40.04mg/m³。应用 24 个月后, 无一条滤袋破损。

主要工艺原理

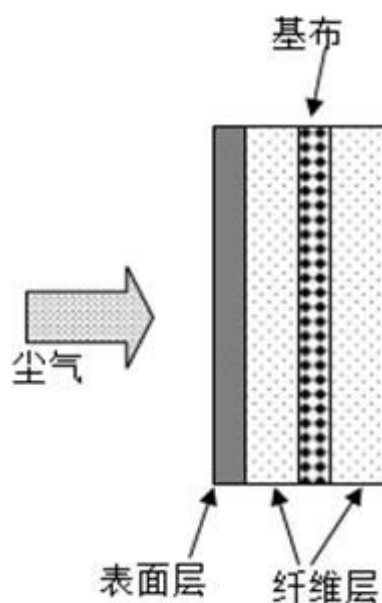


图 1-111 本项目工艺原理图

关键技术或设计创新特色

- PPS 纤维制造中的树脂前处理, 高温纺丝、多级拉伸、热定型, 纺丝后处理技术;
- PPS 纤维大规模产业化设备配套及工艺优化技术;
- PPS 超细短纤维、长丝纤维产品及大容量纺丝与紧张热定型技术;
- 纤度组合与密度分级的滤料 CFD 优化设计新技术, 使滤料具有最优的智能化三维结构;
- 国产 PPS 滤料的交叉均匀铺网、高速串联针刺以及综合制造技术;
- 在研究烟气条件对 PPS 滤料性能影响基础上, 研发了有效可行的滤料性能强化处理配方技术, 实践证明, 滤料的耐腐、抗氧化强力明显提升;
- 滤料优选专家系统, 为各种烟气条件中滤料的选择提供帮助。



图 1-112 案例现场图

主要技术指标

本项目粉尘入口浓度 $110\text{g}/\text{m}^3$ ，粉尘出口浓度 $40.04\text{mg}/\text{m}^3$ ，除尘效率为 99.9636%。进口滤袋和国产滤袋同时挂袋运行结果表明，国产滤料在经纬向强力、透气度 C_v 值、热收缩率以及耐腐蚀性能上已经达到和超过国外产品水平。

费用分析

投资费用

本项目机组容量 300MW，烟气过滤面积 37740 平米，滤袋费用 370 万元，使用寿命 3 年，折合每年费用 123 万元。

用户意见

本项目滤袋在使用的 24 个月内，各项技术指标优良，无滤袋损坏，过滤效率 99.9636%，有效降低了排尘浓度。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：东北大学滤料检测中心

联系人：柳静献

地址：沈阳市和平区文化路 3-11 号东北大学 265 信箱

邮政编码：110004

电话：024-83688327

邮箱：82003@126.com

典型案例（四）

案例名称

350t/d 垃圾焚烧发电工程尾气处理工程

项目概况

本项目尾气处理工程于 2012 年 10 月投入运行。

主要工艺原理

本项目采用覆膜滤料控制烟尘排放。主要加工原理如下：通过复合膜双向拉伸技术控制 PTFE 微孔孔径在 1.0~2.3 μm 范围内，孔隙率 85~88%；通过针刺技术加工将 PTFE 短纤和 PTFE 长丝增强基布加工成针刺毡作为支撑材料；最后将薄膜和针刺毡热复合成覆膜滤料。控制垃圾焚烧尾气温度 150~180 $^{\circ}\text{C}$ ，经过袋式除尘器，由烟囱排入大气。

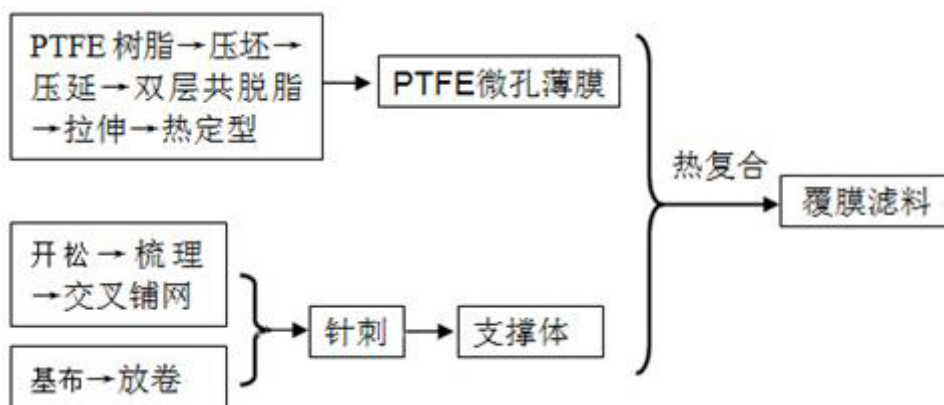


图 1-113 本项目所采用的覆膜滤料工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用 PTFE 覆膜滤料实现表面过滤，提高过滤精度。
- 发明了双向拉伸拉伸 PTFE 复合膜，精确控制薄膜微孔孔径。
- 发明了无胶热复合技术，有效防止高温下的分层。



图 1-114 案例现场图

主要技术指标

根据测试报告，本项目系统除尘效率为 99.99%，粉尘排放量低于 6 mg/m^3 。

投资分析

本工程过滤袋规格为 152×6200，共 880 条，总投资 79.2 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，除尘系统达到设计要求。该工程带来了显著的环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江理工大学

联系人：郭玉海

地址：杭州下沙高教园

邮政编码：310018

电话：0571-86843622

E-mail: gyh@zstu.edu.cn

典型案例（五）

案例名称

1000t/d 垃圾焚烧炉烟气净化工程

项目概况

本项目是我国首座千吨级生活垃圾焚烧发电厂，总投资 6.7 亿元人民币，日处理生活垃圾能力 1000 吨、发电 35 万度，可对城区 150 万居民当天产生的生活垃圾进行减量化、无害化和资源化处理。本工程通过第三方监测中心的测试，出口烟尘排放浓度小于 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，大大低于上海市规定的排放标准 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 。

主要工艺原理

滤料的过滤方式主要有深层过滤和表面过滤 2 种方式。传统滤料的深层过滤主要依靠一次粉尘层的作用，为保证滤料持续工作，应定期对滤料进行清灰，清灰时应尽量做到不破坏“一次粉尘层”。在过滤过程中，一次粉尘层只是在一段时间内效率比较高，而且深层过滤对细小颗粒的捕集效率非常低。一次粉尘层处于形成→稳定→清灰破坏→形成的反复状态。而覆膜滤料则属于表面过滤，覆膜滤料利用其微孔结构改变了普通滤料的过滤机理，由普通滤料的深层过滤机理转变成成为表面过滤机理。覆膜滤料的过滤过程中，基布和针刺毡只起到了支撑的作用，不像传统滤料那样需要依靠滤料表面形成的粉尘初层进行过滤，PTFE 膜层本身就能够起到一次粉尘层的作用。这样一来覆膜滤料从一开始效率就很高，不需要一次粉尘层来提高效率。薄膜滤料除尘主要利用微孔薄膜的微滤作用，这是新型薄膜滤料与传统滤料除尘机理的区别所在。

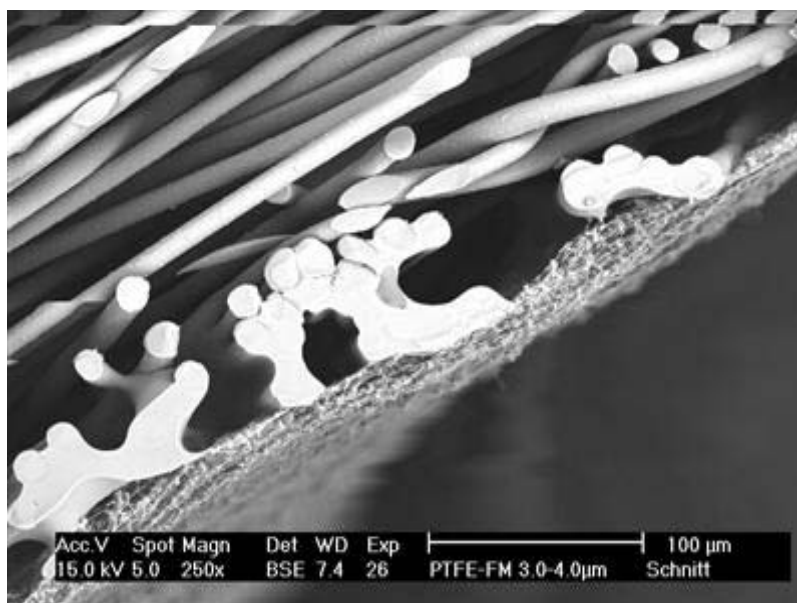


图 1-115 PTFE 覆膜滤袋的截面扫描电镜图

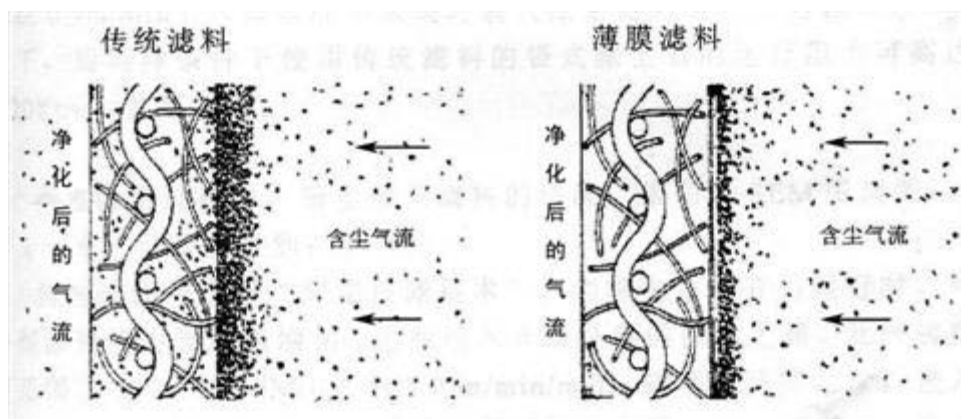


图 1-116 滤料的两种过滤方式

关键技术或设计创新特色

- 采用了 PTFE 微孔膜，使滤料对 PM_{2.5} 的过滤效率达到 99.9996% 以上。
- 滤料的骨架采用高强度的 PTFE 纤维基布，在有效控制成本的前提下，大大提高了滤料的使用寿命。
- 由于 PTFE 微孔膜的抗粘附性，使清灰工作更加容易，减少了由于清灰而导致的滤袋使用寿命下降。
- 覆膜滤料利用其微孔结构改变了普通滤料的过滤机理，由普通滤料的深层过滤机理转变成为表面过滤机理。



图 1-117 案例现场图

主要技术指标

本项目运行至今，运行阻力低，寿命长，运行稳定，过滤效果优异，出口排放浓度指标满足小于 2mg/m³ 的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资约 90 万元/台，三台共投资 270 万元。

运行费用

根据 2009 年 10 月-2013 年 8 月实际运行情况，每年运行费用约为 22.5 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，袋式除尘设备稳定运行，各项技术指标优良，无任何环保事故，由于采用了 PTFE 覆膜滤料，有效地控制严重危害环境和人体健康的 PM_{2.5} 粉尘和二噁英的排放，对于电力系统尾气处理技术的推广起到了积极的推动作用，系统运行阻力达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，该尾气处理工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：上海市凌桥环保设备厂有限公司

联系人：钟正平

地址：上海市浦东新区江东路 1726 弄 188 号

邮政编码：200137

电话：021-58642108

E-mail: zhongzp@eptfe.com.cn

18.大型燃煤锅炉 PM_{2.5} 预荷电增效捕集装置

PM_{2.5} 预荷电增效捕集装置布置于电除尘器进口平直段烟道内（水平段或垂直段），通过对微细粉尘强荷电和扰流聚合，使微细粉尘形成容易捕集的大颗粒后进入后续电除尘器顺利捕获。在荷电区，采用正、负高压放电极与接地极交替排列，并适当增加正放电通道宽度，来获取较高的平均电场强度，提高 PM_{2.5} 荷电效果；在聚合区，设置扰流装置，促进不同粒径粉尘有效聚合凝并。国家环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持，在微颗粒荷电机理、库仑凝并和湍流凝并协同效应、关键零部件优化设计及配套高压电源等多方面取得突破，使 PM_{2.5} 预荷电增效捕集技术及其标准化、产业化取得了重大进展。该技术为目前燃煤电站实现 PM_{2.5} 低排放最为有效的技术之一。

该技术设备压力损失 $\leq 250\text{Pa}$ ，粉尘排放浓度 $\leq 20\text{mg/m}^3$ ，PM_{2.5} 分级效率 $\geq 97\%$ 。该技术荷电能力强，除尘效率高，工况适用范围广，设备投资和维护成本低，非常适合现有电厂的提效改造。无论是水平还是垂直烟道都可以安装与使用该技术装置，但烟道直管段长度需大于 5m。

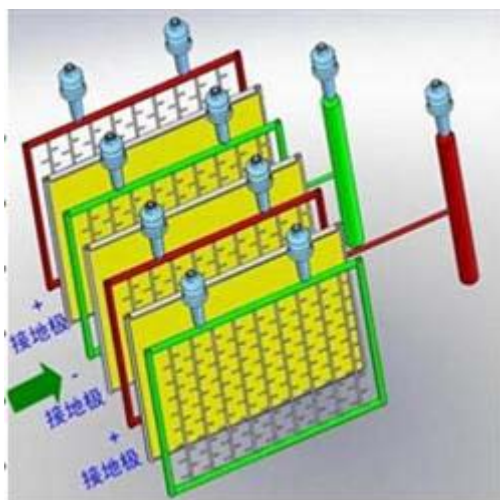


图 1-118 结构示意图



图 1-119 工程现场图

典型案例

案例名称

300MW 机组 PM_{2.5} 预荷电增效收集工程

项目概况

本项目核心技术获 2013 年浙江省科学技术奖一等奖。本项目 300MW 机组配 2 台电除尘器，共有 4 支进口烟道且直管段较长，为电凝聚器的布置提供了有利的条件，于 2012 年 3 月进入预荷电增效装置设计阶段。本项目将原进口封头前烟道的直管段割去约 6.6m，在割去的 6.6m 长的直管段烟道处安装电凝聚器。2012 年 4 月，完成预荷电装置的制造和安装工作，并完成 168 试运行。

主要工艺原理

含尘气体进入除尘器前，先利用正、负高压对其进行分列荷电处理，使相邻两列的烟气粉尘带上正、负不同极性的电荷，然后，通过扰流装置的扰流作用，使带异性电荷的不同粒径粉尘产生速度或方向差异，增加粒子碰撞机会，从而有效聚合，形成大颗粒后被电除尘器有效收集。

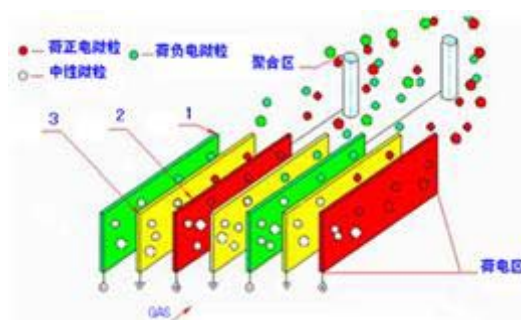


图 1-120 本项目 PM_{2.5} 预荷电增效捕集工艺原理图

关键技术或设计创新特色

- 双极异距荷电技术：采用正、负高压放电极与接地极交替排列，按正、负双极荷电的方式，适当增加正放电通道宽度，来获取较高的平均电场强度，提高PM_{2.5}荷电效果。
- 卡门涡街流动聚合技术：在聚合区内设置扰流装置，流体为湍流状态，产生大规模的卡门涡街，使不同粒径的粉尘产生速度、方向差异，从而增加了正负粒子碰撞的机会，促使不同粒径粉尘有效聚合成更大的颗粒物，从而有利于后续除尘设备高效收集。
- 先进的极配设计技术：采用高锰耐磨钢材质的针刺线为放电线，采取针刺平行气流方向的布置方式，具有良好的电流密度和伏安特性，击穿电压高、放电电流大、放电点多的优点，且耐磨性强、结构稳定。
- 高频高压电源技术：采用高低压一体化协同控制，应用电源运行的能量优化算法，精度高，闪络判断准确，根据不同工况采用不同的火花处理方式，提供最合适的电压波形，提高电场的平均电压和电晕电流，

保证闪络后正、负电场正常升压，且使正、负电压基本保持相同水平，提高荷电能力，节约用电，降低能耗。



图 1-121 案例现场图

主要技术指标

2012 年 4 月，微颗粒增效装置安装完成，并投入工业运行，经国内某权威检测机构测试：使用微颗粒装置后，电除尘器第一电场二次电压提高为 20.4%，电除尘器节能效率为 20.42%，电除尘器出口烟尘总质量浓度为 $16.07\text{mg}/\text{m}^3$ ，烟尘总质量浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降率分别为 32.59%、34.1%。 $\text{PM}_{2.5}$ 减排作用显著，系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2011）要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 345 万元。

运行费用

根据 2012 年 4 月-2013 年 3 月实际运行情况，发生的电耗费用约为 8 万元/年，年维修费用约 5 万元，年运行费用约 13 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，该除尘工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江菲达环保科技股份有限公司

联系人：崔盈

地址：浙江省诸暨市望云路 88 号

邮政编码：311800

电话：0575-87213390

E-mail: cuiying@126.com

19. 溴化钙添加与 FGD 协同脱汞技术

汞（Hg）是一种对环境和人体健康都会产生危害的危险化学品，而燃料燃烧是人为汞排放的重要因素。溴化钙添加与 FGD 协同脱汞技术通过在燃煤中添加溴化钙增加了烟气中元素汞氧化为二价汞的比例，能使二价汞在气态总汞中的份额从 35% 显著提高到 90% 以上，从而进一步提高了 FGD 协同脱汞效率。溴化钙添加装置结构简单、经济实用，运行成本约为 7.88×10^{-4} 元/kWh。该技术设备简单，占地面积小，对原有电厂空预布局几乎没有改动。



图 1-122 工程现场图

典型案例

案例名称

300MW 燃煤发电机组溴化钙添加与 FGD 协同脱汞工程

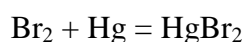
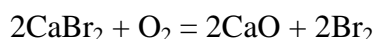
项目概况

2009 年 4 月本项目正式启动，2009 年底项目组对烟气汞排放特征进行了手动测试，同时为了实时连续监测不同价态大气汞的排放特征，于 2010 年 8 月在该电厂安装了烟气汞在线监测仪（Hg CEMS），并于 2011 年 1 月和 3 月前后两次进行了烟气汞排放手动和在线监测。2012 年 7 月，项目组在对烟气汞排放特征进行了测试和全面掌握的基础上，开展了 300MW 燃煤发电机组入炉煤添加溴化钙烟气汞控制技术工程试验。

主要工艺原理

湿法脱硫装置（WFGD）可以达到一定的除汞目的，烟气通过 WFGD 后，总汞的脱除率在 10%~80% 范围内， Hg^{2+} 的去除率可以达到 80%~95%，不溶性的气态单质 Hg^0 去除率几乎为 0，气态单质 Hg^0 的去除始终是烟气中汞污染控制的难点。湿法脱硫装置对氧化态汞的处理效果虽然较好，但对单质汞的处理不理想，如果利用氧化剂使烟气中的 Hg^0 转化为 Hg^{2+} ，WFGD 的除汞效率就会大大提高。

实际燃煤烟气中汞主要以 Hg^0 存在，研究如何提高烟气中的 Hg^0 转化为 Hg^{2+} 的转化率，是目前利用 WFGD 脱汞的重点。利用强氧化性且具有相对较高蒸汽压的添加剂加入到烟气中，使得几乎所有的单质汞都与之发生反应，形成易溶于水的二价汞化合物，提高了烟气中 Hg^{2+} 比例，脱硫设施的除汞率明显地提高。本次实验喷入溴化钙会使大部分的元素态汞转化为氧化态汞，发生的化学反应如下：



溴在反应中起到了氧化剂的作用，产生了溶于水的溴化汞。

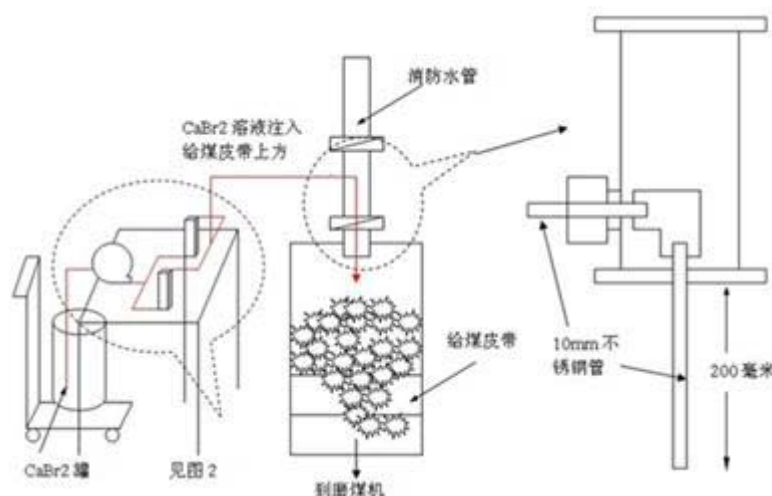


图 1-123 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 在燃煤电厂开展燃煤中添加溴化钙协同脱汞实验，增加了烟气中元素汞氧化为二价汞的比例，进一步提高了 FGD 协同脱汞效率。能使二价汞在气态总汞中的份额从 35% 显著提高到 90% 以上，在三河电厂目前的脱硫塔运行条件下，添加溴化钙浓度在 50~100ppm 时可以取得较好的脱汞效率；
- 建立了手动采样和在线连续监测相结合的汞排放监测方法，系统分析了煤、灰、渣、脱硫石膏、烟气以及脱硫废水等样品中汞的含量，揭示了锅炉负荷、烟气温度、脱硫浆液 pH 值、除雾器冲水及脱硫废液排放周期等机组和 FGD 运行参数与烟气汞排放特征、排放规律之间的关系；
- 提出了将脱硫塔由目前人为因素影响较大的手动控制改为自动控制、将脱硫废水和脱硫石膏的定期外排改为连续排放、在高负荷下增加脱硫塔浆液池氧气补充量、在维持稳定的 Ca/S 比的情况下增加新鲜工艺水的补充、在低负荷工况下进行除雾器冲洗等机组和 FGD 运行参数调整以及脱硫运行工艺改进措施，有效提高了烟气汞的脱除率。



图 1-124 案例现场图

主要技术指标

本项目提出的溴化钙添加及 FGD 协同脱汞技术，使烟气中二价汞占总汞的比例从 35% 显著提高到 90%，使烟气汞排放浓度下降 30%~60%，具有较好的脱汞效果。

投资及运行效益分析

本工程设备投资低于 1 万元，运行成本主要来自溴化钙溶液消耗，约为 197.6 万/年。

用户意见

该项目研究建立的溴化钙添加与 FGD 协同脱汞技术和手动监测与在线监测相结合的烟气汞排放测试技术，成功应用到燃煤电厂，基于大量实测，得出了本厂烟气汞排放特征以及现有脱硝、除尘和脱硫技术的大气汞污染控制效果，为该厂成功开展燃煤电厂汞污染控制试点工作提供强有力的技术支持。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国环境科学研究院

联系人：薛志刚

地址：北京市朝阳区安外北苑大羊坊 8 号

邮政编码：100012

电话：010-84915281

E-mail: xuezg@craes.org.cn

20. 燃煤电站锅炉乙醇胺法 CO₂ 捕集技术

燃煤电厂 CO₂ 捕集技术路线主要可分为：燃烧后脱碳（post-combustion）、燃烧前脱碳（pre-combustion）、富氧燃烧技术（oxyfuel）以及化学链燃烧技术（CLC）。以低温甲醇洗、Selexol/NHD 为代表的物理吸收比较适用于燃煤电厂燃烧前脱碳系统，以乙醇胺（MEA）为代表的化学吸收法比较适用于燃煤电厂燃烧后脱碳系统。燃煤电站锅炉 MEA 法是目前最成熟、应用最广的烟气 CO₂ 捕集技术，其主要原理在于乙醇胺作为吸收剂，在吸收塔内，经雾化的吸收剂浆液与从底部进入的被冷却至 40℃~50℃ 左右的烟气充分接触混合，烟气中的 CO₂ 与 MEA 发生化学反应生成氨基甲酸盐，在再生塔内，氨基甲酸盐解析出高浓度 CO₂ 后循环使用，从而实现烟气 CO₂ 高效分离和捕集。2008 年 7 月我国首套燃煤电厂 CO₂ 捕集工业级示范系统在北京建成并成功示范运行。

乙醇胺法 CO₂ 捕集技术具有吸收速度快、净化度高和 CO₂ 回收率高的特点，净化气中 CO₂ 浓度一般小于 0.1%，CO₂ 回收率一般可达 95% 以上，且吸收容量不受 CO₂ 分压和原料气总压的影响，缺点是有腐蚀性，能耗高。该技术单位投资大致为 800~5100 元/tCO₂，运行成本大致为 310~570 元/tCO₂。

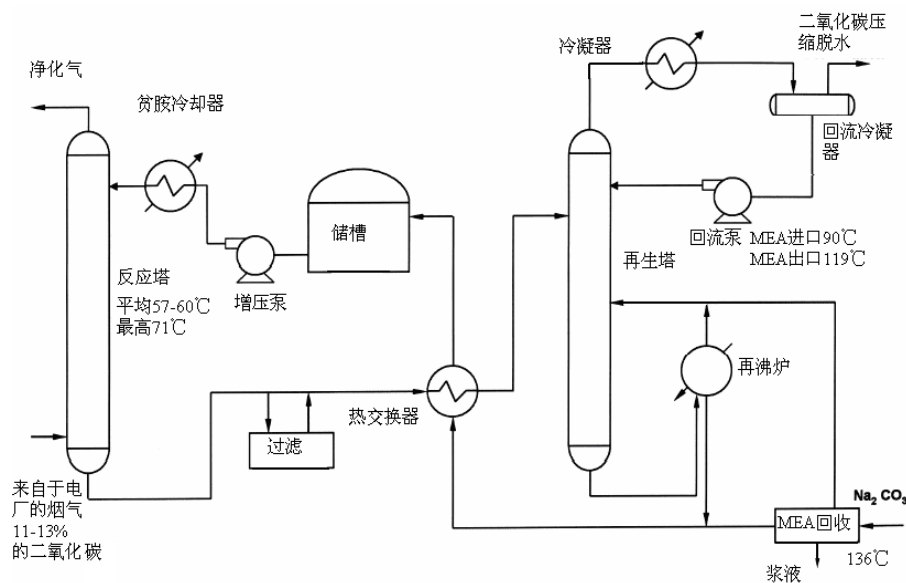


图 1-125 燃煤电厂烟气乙醇胺化学吸收法工艺流程图

典型案例（一）

案例名称

4×830t/h 锅炉 3000 吨/年二氧化碳捕集项目

项目概况

本项目系我国首座燃煤电厂烟气二氧化碳捕集试验示范系统，于 2008 年 7 月 16 日建成投产。

主要工艺原理

工艺流程主要由三部分组成：以吸收塔为中心，辅以喷水冷却及增压设备；以再生塔和再沸器为中心，辅以酸气冷凝器以及分离器和回流系统；介于以上两者之间的部分，主要有富酸气吸收液、再生吸收液换热及过滤系统。

从炉后经除尘、脱硫后引来的烟气温度约为 50℃，经设置在 CO₂ 捕集装置吸收塔前的旋流分离装置将烟气中的石膏液滴脱除并降尘，然后进入烟气冷却器中与循环冷却水换热，使其温度降到~40℃，达到 MEA 理想吸收温度，通过气水分离器除去游离水后经增压风机加压后直接进入捕集装置吸收塔进行 CO₂ 吸收。设置烟气预处理系统，脱除烟气脱硫后携带的粉尘、水等杂质对系统的长期稳定运行有利，同时使用抗氧化剂和缓蚀剂，吸收剂消耗低，设备腐蚀小。增压风机用来克服气体通过捕集装置吸收塔时所产生的阻力。

在捕集装置吸收塔中，烟气自下向上流动，与从上部入塔吸收液形成逆流接触，使 CO₂ 得到脱除，净化后烟气从塔顶排出。由于 MEA 具有较高的蒸汽压，为减少 MEA 蒸汽随烟气带出而造成吸收液损失，通常将吸收塔分成两段，下段进行酸气吸收，上段通过水洗，降低烟气中的 MEA 蒸汽含量。洗涤水循环利用，为防止洗涤水中 MEA 富集，需要将一部分洗涤水并入富液中送去再生塔再生，损失的洗涤水通过补给水系统来保持。

吸收了 CO₂ 的富液通过富液泵加压送至再生塔，为减少富液再生时蒸汽的消耗量，利用再生塔出来的吸收溶液的余热对富液进行加热。富液从再生塔的上部入塔，自上向下流动，与从塔的下部上升的热蒸汽接触，升温分离出 CO₂。富液达到再生塔下部时所吸收的 CO₂ 已解析出绝大部分，此时可称为半贫液。半贫液进入再沸器内进一步解析，残余的 CO₂ 分离出来，富液变成贫液。

出再沸器的贫液回流至再生塔底部缓冲后从底部流出，经贫富液换热回收装置，通过贫液泵加压进入贫液冷却器，在冷却器中冷却至适当温度进入吸收塔，从而完成溶液的循环。

从再生塔塔顶出来的 CO₂ 蒸汽混合物经再生冷却器冷却，使其中的水蒸汽大部分冷凝下来，此冷凝水进入分离器、地下槽、并送入再生塔。为维持吸收液的清洁，在贫液冷却器后设立旁路过滤器，脱除吸收液中的铁锈等固体杂质，分离的 CO₂ 气体进入后续的精制装置。

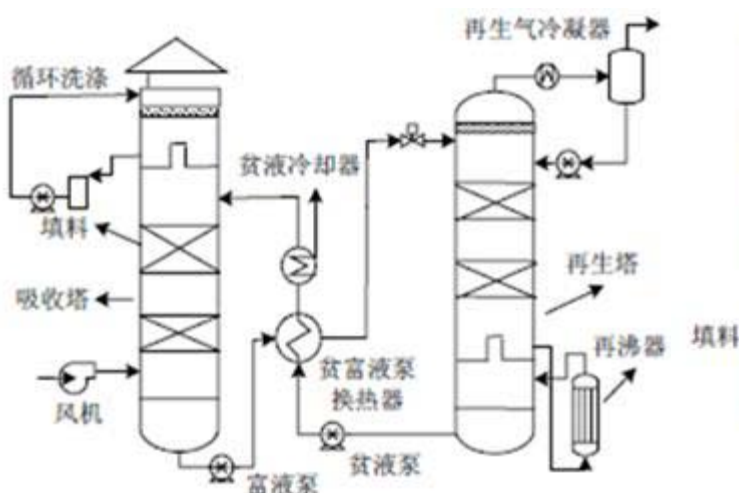


图 1-126 本项目工艺流程图



图 1-127 吸收塔和再生塔图

关键技术或设计创新特色

- 设置烟气预处理系统，脱除烟气脱硫后携带的粉尘、水等杂质，同时使用抗氧化剂和缓蚀剂，吸收剂消耗低，设备腐蚀小。
- 在吸收塔中布置孔板波纹规整填料，使氨溶液在填料中均匀分部，强化气液接触。
- 吸收塔顶部设置循环洗涤和除雾装置，减少 MEA 蒸汽随烟气带出而造成吸收液损失。
- CO₂ 捕集工艺采用贫富液换热器、CO₂ 冷却器等多级换热，热量综合利用，系统能耗低。
- 在再生塔下半部增设升气帽，既可降低再生温度，又缩短了溶液在再沸器内的停留时间，降低氨溶液降解的可能性。

主要技术指标

本项目二氧化碳捕捉量为 0.3 万吨/年，二氧化碳干基纯度 99.5% 以上（精制工艺后纯度可达 99.99%）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资约 1529 万元，对应的单位千瓦造价和发电成本约为 38225 元/kW 和 535 元/MWh。若考虑 CO₂ 精制装置成本，则相应的总投资、单位千瓦造价和发电成本分别为 1950 万元、48750 元/kW 和 747.4 元/MWh。

运行费用

据初步核算，该示范工程的运行成本约为 572.54 元/tCO₂（考虑 CO₂ 精制装置运行成本时约为 741.98 元/tCO₂）。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：西安热工研究院有限公司

地址：陕西西安兴庆路 136 号

邮政编码：710032

典型案例（二）

案例名称

600MW 机组 10×10^4 吨二氧化碳捕集项目

项目概况

本项目于 2009 年 12 月 30 日脱碳工程完成 72 小时试运行，正式投运。

主要工艺原理

工艺流程主要由三部分组成：以吸收塔为中心，辅以旋风分离、气水分离机增压设备；以再生塔和再沸器为中心，辅以再生气冷却器以及分离器和回流系统；介于以上两者之间的部分，主要由富 CO_2 气吸收液与再生吸收液换热以及过滤系统。

烟气经洗涤冷却后由引风机送入吸收塔，其中大部分 CO_2 被溶剂吸收，尾气由塔顶排入大气。吸收 CO_2 后的富液从塔底流出，由塔底经泵送至冷凝器和贫富液换热器，回收热量后送入再生塔。再生出的 CO_2 经冷凝后分离除去其中的水分，得到纯度大于 99.5% 的 CO_2 产品气，送入后续工序。再生气中被冷凝分离出来的冷凝液送入地下槽，用泵送至吸收塔顶洗涤段和再生塔作回流液使用。部分解吸了 CO_2 的溶液进入再沸器，使其中的 CO_2 进一步再生。再生塔底部出来的贫液经贫富液换热器换热后送至水冷器，最后进入吸收塔顶部。此溶液往返循环构成连续吸收和再生 CO_2 的工艺过程。

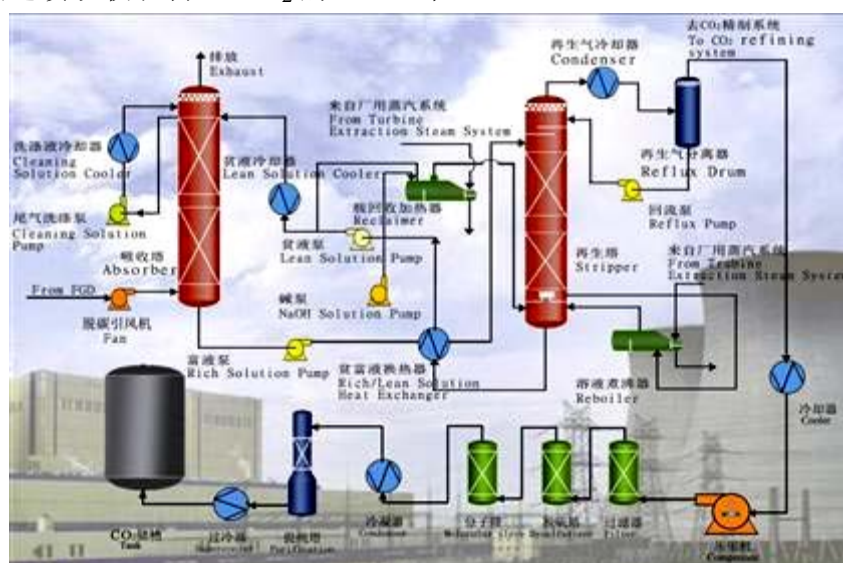


图 1-128 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 在吸收塔前布置旋风分离和气水分离等烟气预处理装置，减少待处理烟气的水分和杂质。
- 吸收塔顶部设置水洗，减少 MEA 蒸汽随烟气带出而造成吸收液损失。
- 设置氨回收加热器，必要时将部分贫液送入氨回收加热器中，加入碳酸钠溶液，通过蒸汽加热再生回收。



图 1-129 案例现场图

主要技术指标

本项目二氧化碳捕捉量为 12.5 吨/小时，每年 10 万吨，精制二氧化碳浓度大于 99.99%，满足食品级标准。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资约 9843 万元，对应的单位千瓦造价和发电成本约为 5543 元/kW 和 115.3 元/MWh。若考虑 CO₂ 精制装置成本，则相应的总投资、单位千瓦造价和发电成本分别为 12738.5 万元、7177 元/kW 和 199.8 元/MWh。

运行费用

据初步核算，该示范工程的运行成本约为 307.52 元/tCO₂（考虑 CO₂ 精制装置运行成本时约为 397.7 元/tCO₂）。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：西安热工研究院有限公司

地址：陕西西安兴庆路 136 号

邮政编码：710032

二、工业锅炉及炉窑烟气排放控制关键技术

21. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术

石灰石-石膏湿法原理是采用石灰石粉制成浆液作为脱硫吸收剂，进入吸收塔与烟气接触混合，浆液中的碳酸钙（ CaCO_3 ）与烟气中的 SO_2 、以及鼓入的氧化空气进行化学反应，最后生成石膏。脱硫后的烟气经过除雾器除去雾滴、再经过加热器加热升温后（有时不需要），由引风机（脱硫增压风机）经烟囱排入大气。吸收液通过喷嘴雾化喷入吸收塔，分散成细小的液滴并覆盖吸收塔的整个断面。这些液滴与塔内烟气逆流接触，发生传质与吸收反应，烟气中的 SO_2 、 SO_3 及 HCl 、 HF 被吸收。 SO_2 吸收产物的氧化和中和反应在吸收塔底部的氧化区完成并最终形成石膏。为了维持吸收液恒定的 pH 值并减少石灰石耗量，石灰石被连续加入吸收塔，同时吸收塔内的吸收剂浆液被搅拌机、氧化空气和吸收塔循环泵不停地搅动，以加快石灰石在浆液中的均布和溶解。

在吸收塔内吸收剂经循环泵反复循环与烟气接触，吸收剂利用率很高，钙硫比（ Ca/S ）较低，一般不超过 1.05，脱硫效率超过 95%。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，但相对占地面积较大、投资及运行费用高；适用于燃煤工业锅炉/窑炉烟气脱硫。

典型案例（一）

案例名称

3×75t/h 锅炉烟气脱硫工程

项目概况

本项目技术获国家“十一五”863计划课题资助（“工业燃煤锅炉烟气湿法脱硫脱硝技术与示范”，课题编号：2007AA061701）。本项目于2012年10月开始设计，2012年12月开工建设，2013年8月3#脱硫装置完成168试运行，5#脱硫装置于2013年9月完成168试运行，4#脱硫装置于2013年12月完成168试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区pH值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低pH值下运行，有利于石灰石的溶解和副产物的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

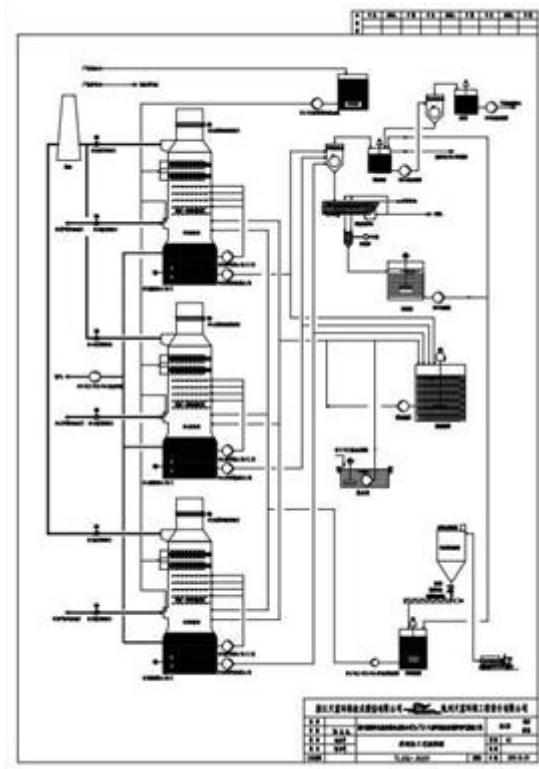


图 2-1 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。
- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。
- 增设气体再分布装置，有利于气体分布均匀。
- 滤液回用化浆，冷却水由厂区冷却水母管提供并通过回水管网回收至冷却塔，更好的控制系统内的水平衡。
- 工艺水管与除雾器冲洗水管采用母管制设计，确保工艺水系统安全可靠。



图 2-2 案例现场图

主要技术指标

根据 168 运行报告，本项目系统出口烟气指标满足《火电厂大气污染物排放标准（GB13223-2011）》标准的要求，脱硫效率达到 98.5%以上(最大二氧化硫入口浓度为 $4900\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，设计二氧化硫入口浓度为 $3760\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，二氧化硫排放浓度均低于 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2000 万元。

运行费用

根据 2013 年 8 月~12 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 770 万元/年，年维修费用约 80 万元。副产物石膏全部作为新都绿能水泥厂的水泥缓凝剂用。

用户意见

该脱硫系统运行稳定可靠，满足环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

典型案例（二）

案例名称

495m² 烧结机石灰石-石膏气喷旋冲法烟气脱硫工程

项目概况

本项目采用总承包方式建设,全烟气脱硫,烟气处理量为 115~145 万 Nm³/h,脱硫效率按大于 90% 设计。于 2007 年 11 月动工,2008 年 10 月调试成功,目前运行稳定。

主要工艺原理

本项目采用气喷旋冲式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术,主要工艺原理如下:来自烧结厂引风机的烟气,经增压风机增压后进入冷却器。在冷却器中,原烟气被工业水和来自吸收塔的浆液冷却,然后通过气喷旋冲管喷射到石灰石浆液液面以下。吸收塔中的浆液分为两部分:鼓泡区和反应区。当原烟气流经喷射管进入浆液内部时产生气泡,由大量不断形成和破碎的气泡形成连续的气泡层,气泡的直径从3~20mm不等。大量的气泡产生了巨大的接触面积,使鼓泡区成为一个非常高效的多级气液接触区。在该区域中,烟气中的SO₂溶解在气泡表面的液膜中,烟气中的飞灰也在接触液膜后被除去。鼓泡区气泡迅速不断的生成和破裂使气液接触能力进一步加强,从而不断产生新的接触面积,同时将反应物由鼓泡区传递至反应区,并使新鲜的吸收剂与烟气接触。

反应区在鼓泡区以下,石灰石浆液直接补入反应区。此区域有 5 种过程,包括吸收、溶解、氧化、中和、结晶,即氧化空气在浆液中被充分溶解,在鼓泡区没有被氧化的亚硫酸被氧化成硫酸,石灰石溶解,石灰石与硫酸中和,石膏晶体生成。气喷旋冲吸收塔的运行 pH 值一般为 4.2~5.5,这种相对较低的 pH 值使石灰石溶解更快更完全,低 pH 值环境下的快速氧化和完善的氧化系统是吸收塔成功运行的关键之一。浆液中鼓入空气并驱赶出 CO₂,进一步促进了石灰石的溶解,因此吸收塔的浆液成分主要是石膏颗粒。抽出一定数量的石膏浆液至脱水系统,使吸收塔内浆液中固体物浓度保持在 10%~20%。气喷旋冲吸收塔在设计上考虑了浆液 10~20h 的反应区停留时间,为塔内化学反应提供充足的时间。从吸收塔排出的烟气经装在烟道上的除雾器除去水雾,然后排出烟囱。

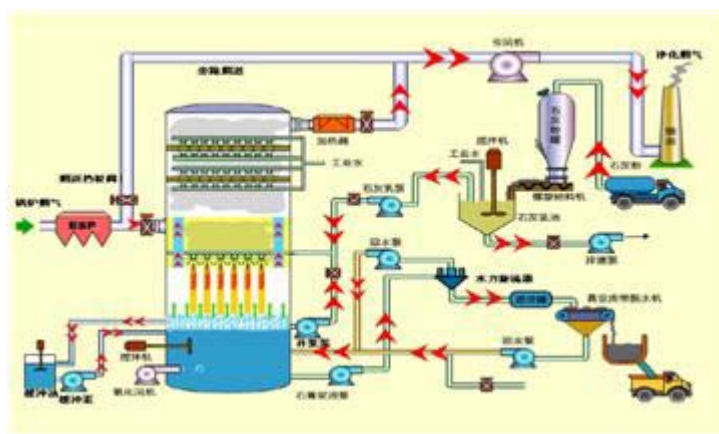


图 2-3 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用气喷旋冲脱硫工艺，对烟气量和 SO_2 浓度大幅波动的适应能力强；脱硫、除尘效率高，吸收反应一次完成，浆液不需反复循环，能耗低；脱硫石膏结晶好、粒径大，有利于资源化利用。
- 烟气二级冷却装置对烟气进行降温后，出口平均烟温保持在 70°C 以下，降温效果良好。
- 采用组合式除雾器，除雾效率高，出口烟气中液滴含量小于 $75\text{mg}/\text{m}^3$ 。



图 2-4 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足 GB28662-2012 标准的要求，脱硫效率达到 95% 以上(二氧化硫入口浓度为 $1500\text{mg}/\text{m}^3$ ，出口浓度 $50\text{mg}/\text{m}^3$)。

运行效益分析

烟气处理量为 $115\sim 145\text{万Nm}^3/\text{h}$ ，年耗压缩空气量 $\leq 1911.8\text{万m}^3$ ；年消耗电量 $\leq 3441\text{万kWh}$ ；年耗工业水量 $\leq 65\text{万m}^3$ ；年消耗石灰石量 $\leq 9092\text{t}$ 。根据烧结烟气实际硫含量，项目每年总削减 SO_2 约为 $1.5\text{万}\sim 2.0\text{万吨}$ ，每年减少排污费 2000 多万元。

用户意见

本项目自 2008 年 10 月投产以来，能长期稳定地与烧结生产装置同步运行。各项技术指标优良，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物石膏品质良好。该脱硫工程是一项节能减排、符合循环经济要求的环境工程技术。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院过程工程研究所

联系人：李玉然

地址：北京市海淀区中关村北二街 1 号过程大厦

邮政编码：311212

电话：010-82544823

E-mail: yrli@home.ipe.ac.cn

典型案例（三）

案例名称

320m² 烧结机烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2010 年 2 月脱硫项目开始设计，2010 年 3 月开工建设，2012 年 8 月完成环保验收。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的石灰石浆液由石灰石浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于石灰石的溶解和副产品的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

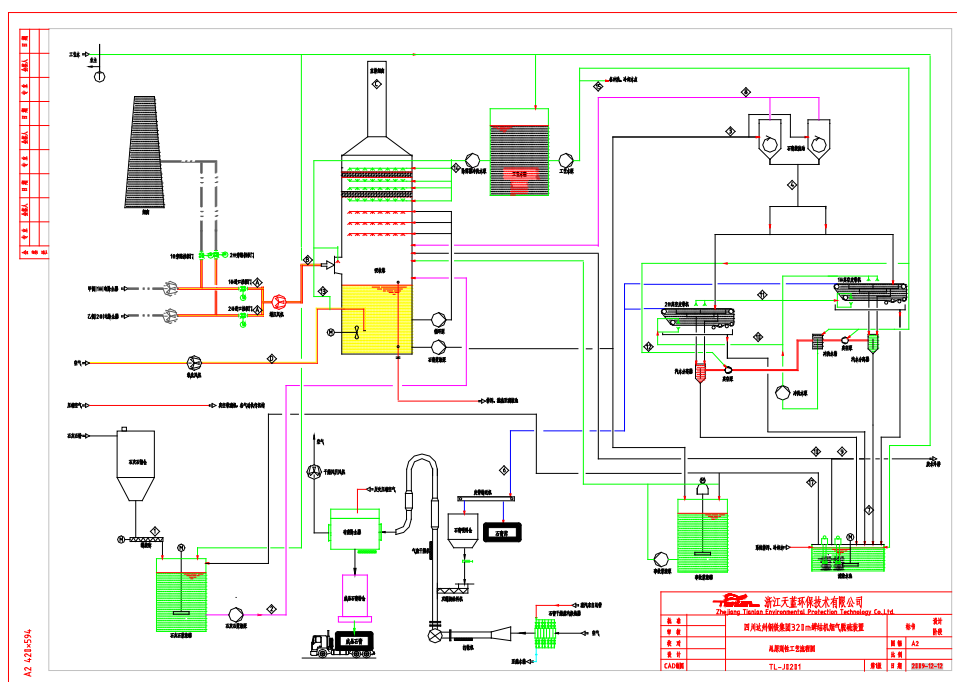


图 2-5 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。
- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，并选用独特的喷嘴布置形式，可对整个塔体有

效横截面（烟气分布横截面）进行充分合理地覆盖，截面喷淋量均匀，雾化效果好，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。

- 多层喷淋设计，更好的适应炉窑波动大的特点，有利于节能。
- 滤液回用化浆，冷却水收集并回用，更好的控制系统内的水平衡。



图 2-6 案例现场全貌图



图 2-7 案例吸收塔图

主要技术指标

根据环保验收报告，本项目系统脱硫效率达到 96%以上(二氧化硫入口浓度约 $2000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，二氧化硫排放浓度小于 $80\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 5000 万元。

运行费用

根据 2011 年 11 月-2013 年 11 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 920 万元/年，年维修费用约 120 万元。

用户意见

设备性能良好、运行稳定可靠，满足环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

22.电石渣-石膏湿法烟气脱硫技术

电石渣-石膏法脱硫工艺，是以电石渣代替石灰石作为脱硫剂，脱除燃煤锅炉烟气中二氧化硫。其主要原理在于采用电石渣（主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫（ SO_2 ）与浆液中的氢氧化钙以及鼓入的空气中的氧化进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。

与石灰石-石膏法相比，电石渣-石膏法液气比低，脱硫反应速度快，脱硫效率高（一般脱硫效率都能达到 95% 以上）。电石渣作为一种大宗工业固废，具有以废治污、资源综合利用的循环经济效益；同时，采用电石渣石膏法工艺每脱除 1 吨二氧化硫比石灰石-石膏法减排约 0.69 吨二氧化碳。选用电石渣代替石灰石来进行烟气脱硫，可降低脱硫运行成本，具有良好的经济效益、环境效益和社会效益。

目前，国内已有多家具体实施工程案例。其中，在国家“十一五”863 计划课题（2009AA064002）经费资助，电石渣-石膏湿法烟气脱硫研究成果于 2008 年在 300MW 级机组上实现成功应用，目前已在燃煤电站锅炉和工业锅炉等领域推广应用 30 余台套，先后获得中国产学研合作创新成果奖和环保部科学技术奖二等奖。

该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，可达 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.35 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，运行费用低，适用于燃煤锅炉烟气脱硫。

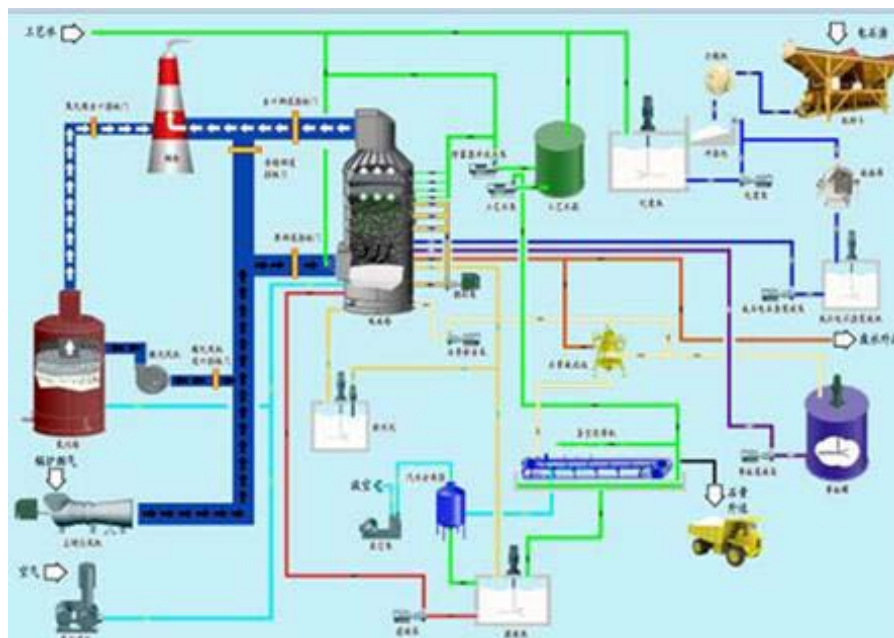


图 2-8 电石渣-石膏湿法烟气脱硫工艺流程图

典型案例

案例名称

1×240t/h 循环流化床锅炉湿法烟气脱硫工程

项目概况

本技术获国家“十一五”863 计划经费资助（2009AA064002）。本项目于 2010 年 10 月开始设计，2011 年 2 月开工建设，2011 年 9 月脱硫装置完成 168h 试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式电石渣-石膏法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的电石渣浆液由电石渣浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与氢氧化钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为塔内吸收区和塔外氧化结晶区两个部分：塔内吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；塔外氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于副产物的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从氧化塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

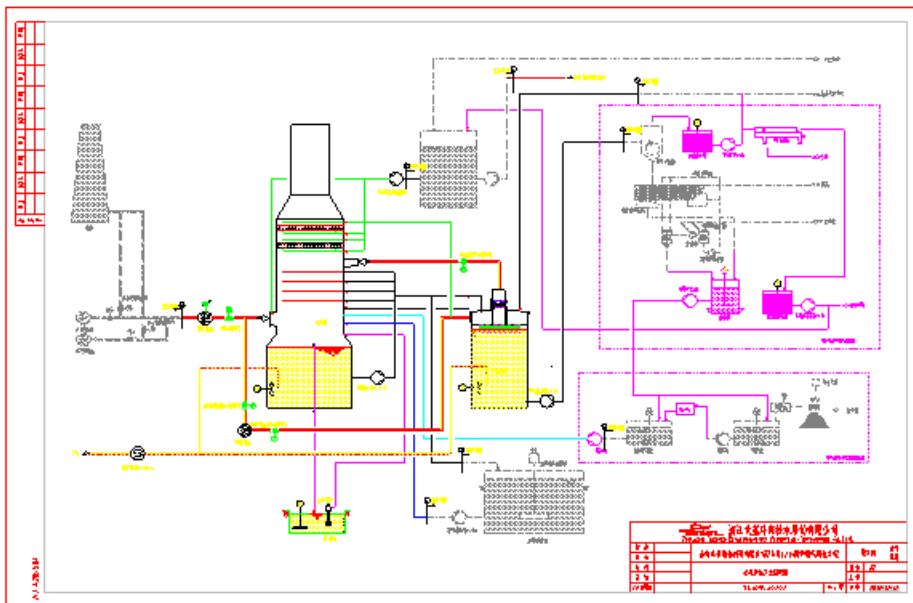


图 2-9 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋技术，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。
- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，并选用独特的喷嘴布置形式，可对整个塔体有效横截面（烟气分布横截面）进行充分合理地覆盖，截面喷淋量均匀，雾化

效果好，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。

- 采用特有的氧化塔技术，实现分区氧化功能，使吸收塔内高 pH 运行提高脱硫效率，塔外低 pH 值运行充分氧化生成石膏。
- 滤液回用化浆，更好的控制整套系统内的水平衡。



图 2-10 案例现场图

主要技术指标

根据监测报告，本项目系统脱硫效率达到 97.6% 以上，二氧化硫排放浓度为 $112\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1200 万元。

运行费用

与石灰石-石膏法比较，节约运行费用 18%。

用户意见

该脱硫系统运行稳定，可达标排放。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

23.白泥-石膏湿法烟气脱硫技术

白泥-石膏湿法烟气脱硫技术其主要原理在于采用白泥中含有碳酸钙和少量的氢氧化钠作为脱硫吸收剂，在吸收塔内，吸收剂浆液与烟气充分接触混合，烟气中的二氧化硫（SO₂）与浆液中的碳酸钙（或氢氧化钠）以及鼓入的空气中的氧化进行化学反应从而被脱除，最终脱硫副产物为二水硫酸钙即石膏。

该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98%以上；SO₂ 排放浓度一般小于 100mg/Nm³，可达 50mg/Nm³ 以下；单位投资大致为 150~250 元/kW；运行成本一般低于 1.35 分/kWh。该技术成熟、稳定，脱硫效率高；适用于燃煤锅炉烟气脱硫。

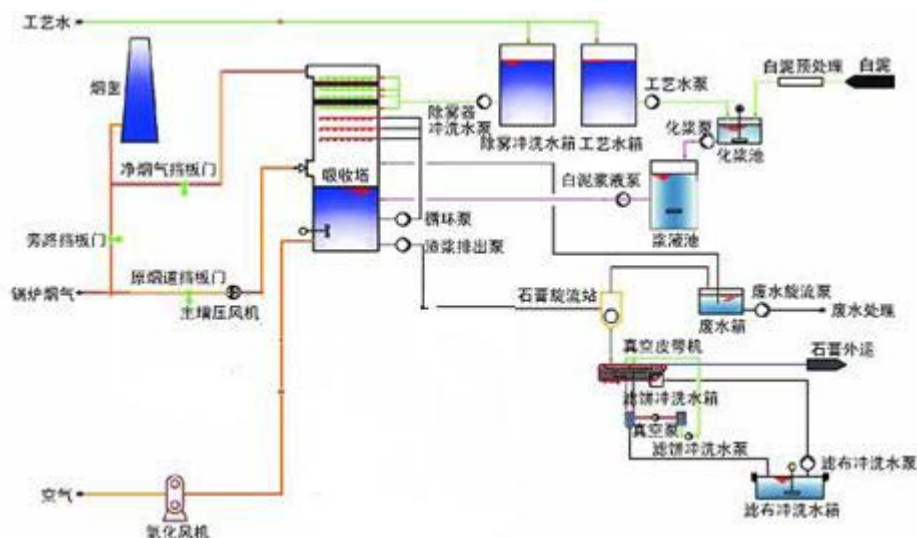


图 2-11 白泥-石膏湿法烟气脱硫工艺流程图

典型案例（一）

案例名称

2×410t/h 锅炉白泥-石膏湿法烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2009 年 3 月与主机同步开始设计，2009 年 11 月与主机同步开工建设，2010 年 1 月首套脱硫装置与 1#主机同步完成 168h 试运行，第 2 套脱硫装置与 2#主机组于 2010 年 3 月同步完成 168h 试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式白泥-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的白泥浆液由白泥浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于石灰石的溶解和副产品的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

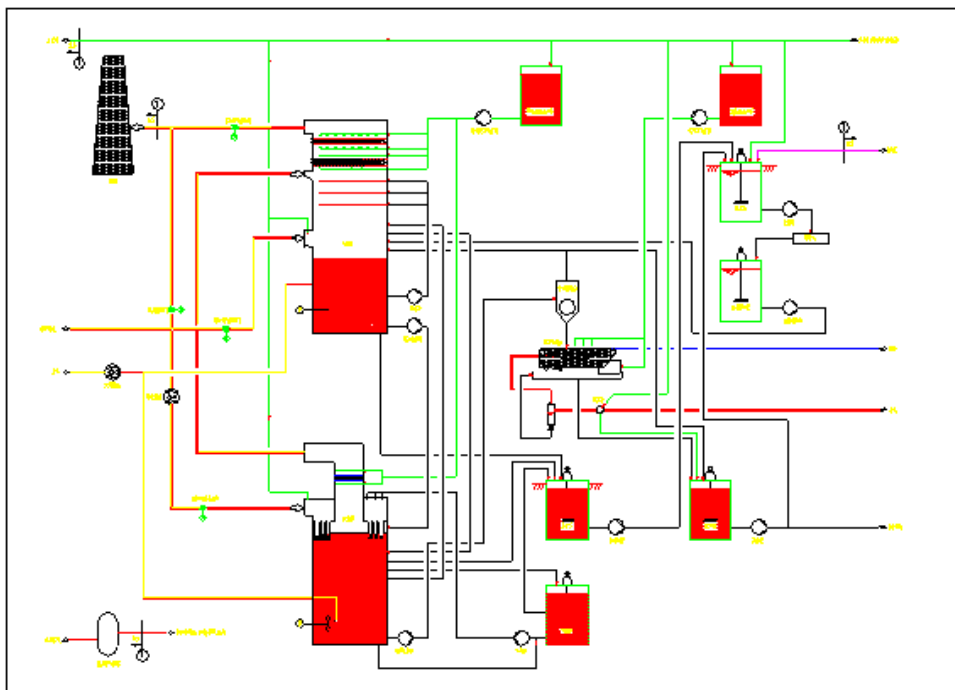


图 2-12 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。大量应用实例证明该技术

塔内传质稳定、气液接触充分，可保证系统的高效、稳定运行，能够达到最佳脱硫效果。

- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，并选用独特的喷嘴布置形式，可对整个塔体有效横截面（烟气分布横截面）进行充分合理地覆盖，截面喷淋量均匀，雾化效果好，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。
- 采用特有的塔外氧化技术，实现分区氧化功能，使吸收塔内高 pH 值运行提高脱硫效率，塔外低 pH 值运行充分氧化石膏。
- 滤液回用化浆，冷却水收集并回用，更好的控制整套系统内的水平衡。



图 2-13 案例现场图

主要技术指标

根据监测报告，本项目脱硫效率达到 95.1% 以上，二氧化硫排放浓度为 $92\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 3800 万元。

运行费用

与传统的石灰石-石膏法比较，可节约运行费用 12%。

用户意见

设备性能良好、运行稳定可靠，可满足环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

典型案例（二）

案例名称

1×155MW 锅炉湿法烟气脱硫工程

项目概况

本项目于 2011 年 9 月与主机同步开始设计，2012 年 6 月与主机同步开工建设，2013 年 5 月脱硫装置与主机同步完成 168h 试运行。

主要工艺原理

本项目采用空塔喷淋式白泥-石膏湿法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，通过吸收塔入口区从浆液池上部进入塔体，在吸收塔内，热烟气逆流向上与自上而下的浆液（循环喷淋）接触发生化学吸收反应。添加的白泥浆液由白泥浆液泵输送至吸收塔，与吸收塔内的浆液混合，混合浆液通过循环泵向上输送由多层喷淋层的喷嘴喷出。浆液吸收烟气中二氧化硫以及其它酸性物质，在液相中二氧化硫与碳酸钙反应，形成亚硫酸钙。吸收塔分为吸收区和氧化结晶区两个部分：上部吸收区 pH 值较高，有利于二氧化硫等酸性物质的吸收；下部氧化结晶区在低 pH 值下运行，有利于石灰石的溶解和副产品的生成。在氧化结晶区通过搅拌器和氧化风机将亚硫酸钙强制氧化成二水硫酸钙（石膏）。从吸收塔排出的石膏浆液经浓缩、脱水，使其含水量小于 10%，形成石膏。脱硫后的烟气经除雾器除去雾滴后由烟囱排入大气。

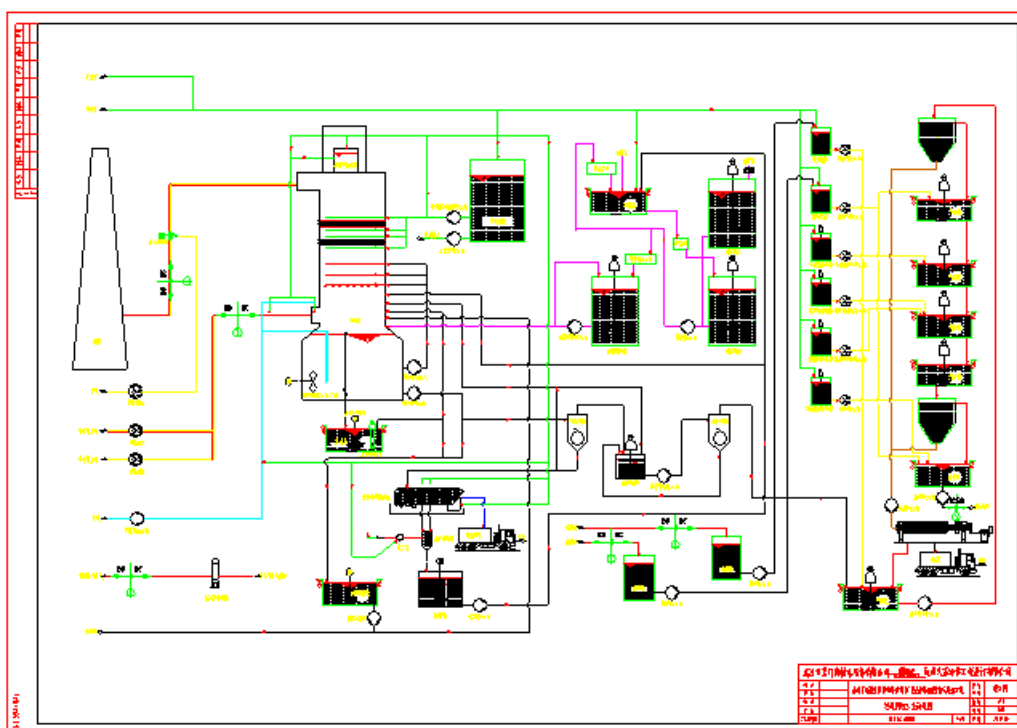


图 2-14 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的空塔喷淋工艺，吸收塔内气液接触区无构件，可有效降低塔内运行阻力，有效杜绝异常工况下塔内堵塞结垢现象。大量应用实例证明该技术塔内传质稳定、气液接触充分，可保证系统的高效、稳定运行，能够达到最佳脱

硫效果。

- 吸收塔喷嘴采用空心锥喷嘴，并选用独特的喷嘴布置形式，可对整个塔体有效横截面（烟气分布横截面）进行充分合理地覆盖，截面喷淋量均匀，雾化效果好，增加浆液与烟气的接触面积，进一步提高脱硫效率。

- 采用特有的塔外氧化技术，实现分区氧化功能，使吸收塔内高 pH 值运行提高脱硫效率，塔外低 pH 值运行充分氧化石膏。

- 滤液回用化浆，冷却水收集并回用，更好的控制整套系统内的水平衡。



图 2-15 案例现场图

主要技术指标

根据监测报告，本项目系统脱硫效率达到 95.5% 以上，二氧化硫排放浓度为 $180\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2480 万元。

运行费用

与传统的石灰石-石膏法比较，可节约运行费用 15%。

用户意见

设备性能良好、运行稳定可靠，可满足环保要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

24. 钢铁烧结烟气循环流化床法烟气脱硫技术

循环流化床烟气脱硫（CFB-FGD）一般采用干态的消石灰粉作为吸收剂，将石灰粉按一定的比例加入烟气中，使石灰粉在烟气中处于流态化，反复反应生成亚硫酸钙。具体过程为烟气从吸收塔底部进入，经吸收塔底部的文丘里结构加速后与加入的吸收剂、吸附剂、循环灰及水发生反应，除去烟气中的 SO_x 、 HCl 、 HF 等气体。物料颗粒在通过吸收塔底部的文丘里管时，受到气流的加速而悬浮起来，形成激烈的湍动状态，使颗粒与烟气之间具有很大的相对滑落速度，颗粒反应界面不断摩擦、碰撞更新，从而极大地强化了气固间的传热、传质。为了达到最佳的反应温度，通过向吸收塔内喷水，使烟气温度冷却到露点温度以上 20°C 左右。携带大量吸收剂、吸附剂和反应产物的烟气从吸收塔顶部侧向下行进入布袋除尘器，进行气固分离，经气固分离后的烟气含尘量不超过 $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。另外，烟气中的吸收剂和吸附剂在滤袋表面沉降形成滤饼，延长吸收剂与酸性气体、吸附剂与有机污染物的接触时间，增加酸性气体、二恶英脱除率。

循环流化床烟气脱硫（CFB-FGD）工艺是 20 世纪 80 年代开发的一种半干法脱硫工艺，基于循环流化床原理，通过吸收剂的多次再循环，延长吸收剂与烟气的接触时间，大大提高了吸收剂的利用率，在钙硫比为 1.1~1.2 的情况下脱硫效率可达到 90% 左右。最大特点是水耗低，基本不需要考虑防腐问题，同时可以预留添加活性炭（焦）去除二恶英的接口，还可通过选择性脱硫和“多机一塔”来降低脱硫投资。在国家 863 计划课题等相关科技项目的支持下，我国已形成了具有自主知识产权的 CFB-FGD 技术，并已钢铁厂烧结机、垃圾焚烧锅炉、燃煤电站锅炉及工业锅炉上实现了产业化、规模化应用。

该技术的脱硫效率一般大于 95%，可达 98% 以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，可达 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；单位投资大致为 15~20 万元/平方米；在不添加任何吸附剂及脱硝剂的条件下运行成本一般低于 5~9 元/吨烧结矿。该技术成熟、稳定，脱硫效率高，但相对占地面积较小、投资及运行费用低；适用于烧结烟气脱硫。

典型案例（一）

案例名称

2×450m² 烧结机干法脱硫除尘及多污染物协同净化项目

项目概况

本项目于 2009 年 1 月开始设计，2009 年 3 月开工建设，2009 年 12 月首套脱硫装置与 4#400m² 烧结机（现已扩容为 450m²）同步完成 168 试运行，第 2 套脱硫装置与 5#450m² 烧结机于 2011 年 1 月同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

烧结主抽风机出来的烟气温度一般为 120℃~180℃左右，从底部进入脱硫塔的输送床，在此处高温烟气与加入的吸收剂、循环脱硫灰充分预混合，进行初步的脱硫反应，在这一区域主要完成吸收剂与 HCl、HF 的反应。

随后，烟气通过脱硫塔底部的文丘里管的加速，进入循环流化床，物料在循环流化床里，气固两相由于气流的作用，产生激烈的湍动与混合，充分接触，在上升的过程中，不断形成絮状物向下返回，而絮状物在激烈湍动中又不断解体重新被气流提升，形成类似循环流化床锅炉所特有的内循环颗粒流，使得气固间的滑落速度高达单颗粒滑落速度的数十倍；脱硫塔顶部结构进一步强化了絮状物的返回，进一步提高了塔内颗粒的床层密度，使得床内的 Ca/S 比高达 50 以上。这种循环流化床内气固两相流机制，极大地强化了气固间的传质与传热，为实现高脱硫率提供了根本的保证。

在文丘里的出口扩管段设一套喷水装置，喷入雾化水以降低脱硫反应器内的烟温，使烟温降至高于烟气露点 15℃左右。由于水的存在，从而使得 SO₂ 与 Ca(OH)₂ 之间的固态型反应转化为可以瞬间完成的离子型反应。吸收剂、循环脱硫灰在文丘里段以上的塔内进行第二步的充分反应，生成副产物 CaSO₃·1/2H₂O，此外还有与 SO₃、HF 和 HCl 反应生成相应的副产物 CaSO₄·1/2H₂O、CaF₂、CaCl₂·Ca(OH)₂·2H₂O 等。

烟气在上升过程中，颗粒一部分随烟气被带出脱硫塔，一部分因自重重新回流到循环流化床内，进一步增加了流化床的床层颗粒浓度和延长吸收剂的反应时间。喷入的用于降低烟气温度的水，以激烈湍动的、拥有巨大的表面积的颗粒作为载体，在塔内得到充分的蒸发，保证了进入后续除尘器中的灰具有良好的流动状态。

由于流化床中气固间良好的传热、传质效果，SO₃ 全部得以去除，加上排烟温度始终控制在高于露点温度 15℃以上，因此排放的烟气不需要再加热，同时整个系统也无须任何的防腐处理措施。

脱硫后的含有脱硫灰的烟气从脱硫塔顶部侧向排出，然后转向进入脱硫除尘器，再通过引风机排入烟囱。经除尘器捕集下来的固体颗粒：脱硫灰，通过除尘器下的再循环系统，返回脱硫塔，脱硫灰中未完全反应的 Ca(OH)₂ 继续参加反应，如此循环，多余的少量脱硫灰渣通过物料输送至脱硫灰仓内，再通过罐车或二级输送设备外排。

同时利用流化床高比表面积颗粒层，可以在吸收塔中添加吸附剂和脱硝剂，达到同步脱除二噁英(PCDD/Fs)和NO_x等多污染物的目的。SO₂与Ca(OH)₂发生反应时，在其空隙结构表面产生了吸附活性区域，气态单质汞(Hg⁰(g))扩散到活性区域表面时就会被催化氧化，形成Hg²⁺化合物，此种价态的汞化合物很不稳定，会进一步被氧化成Hg⁺化合物，附着于Ca(OH)₂和飞灰颗粒表面，随烟气经除尘器被脱除。

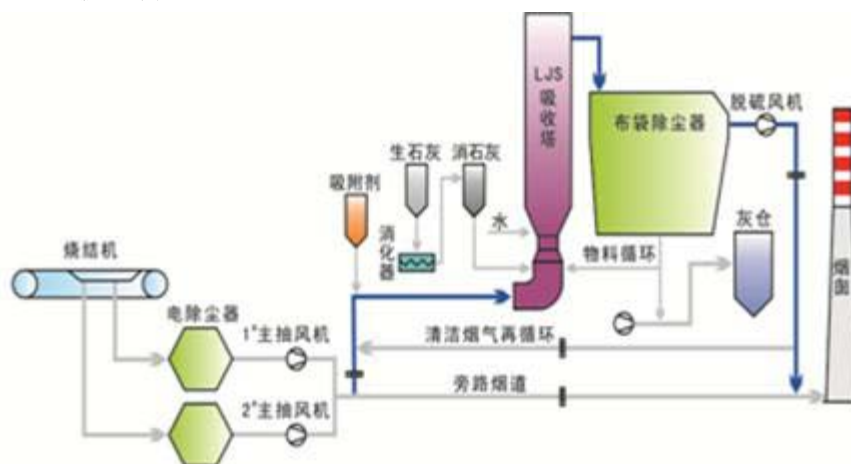


图 2-16 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 良好的 SO₂ 浓度适应性：从实际运行数据看出，随着矿源的变化，脱硫装置的实际入口 SO₂ 浓度变化较广，从 800~1600mg/Nm³ 之间变化，只要调整吸收剂的加入量，均可稳定出口 SO₂ 排放达到小于 50mg/Nm³ 的要求。

- 高投运率：由于脱硫系统设置了清洁烟气的自动补偿系统，可以使脱硫系统先于主机开机，后于主机关机，脱硫系统与烧结机的同步投运率高，根据统计，2010 年同步投运率达到 99.5%，年运行小时数为 7881.9 小时。

指标	脱硫机运行时间 (h)	脱硫投运时间 (h)	同步运行率 (%)	入口平均SO ₂ 浓度 (mg/Nm ³)	出口平均SO ₂ 浓度 (mg/Nm ³)	出口平均粉尘浓度 (mg/Nm ³)	脱硫效率 (%)	SO ₂ 减排量 (吨)
1月份	690.06	686.15	99.43	1498.2	32	6.3	95.6	945.95
2月份	557.65	549.72	98.58	1617.7	47.1	6.3	96.8	334
3月份	648.95	646.42	99.60	1672.9	414.2	11.8	74.6	510.02
4月份	587.48	585.05	99.59	1662.2	66.4	5.9	95.7	630.64
5月份	731.32	710.12	97.06	2031.7	48.9	5.3	97.8	892.7
6月份	630.93	630.42	99.92	1884.9	27	5.5	98.4	683.9
7月份	679.57	679.57	100.00	1822.1	42.4	5.5	97.6	943.33
8月份	701.23	695.74	99.24	2064.4	33.9	5.2	98.3	1056.21
9月份	642.92	642.92	100.00	1497.4	15.5	6.4	98.5	843.02
10月份	712.20	712.20	100.00	1597.1	24.7	6.4	97.9	999.67
11月份	651.90	645.82	99.06	1498.2	32	6.3	95.6	782.7
12月份	705.35	694.76	98.50	1617.7	47.1	6.3	96.8	962.9
全年数据	7922.4	7881.9	99.5	1697.88	69.43	6.43	95.3	全年减排SO ₂ 9656.64吨

图 2-17 本项目 2010 年全年运行数据统计表

- 高脱硫率：采用的烟气循环流化床反应器，利用塔内激烈湍动的高密度颗粒床层，以及采用现场消化的新鲜消石灰作为吸收剂，运行数据表明，LJS 工艺在经济 Ca/S 下，脱硫效率高达 95% 以上，SO₂ 排放小于 50mg/Nm³。



图 2-18 本项目 4#烧结机脱硫装置运行 DCS 画面



图 2-19 本项目 5#烧结机脱硫装置运行 DCS 画面

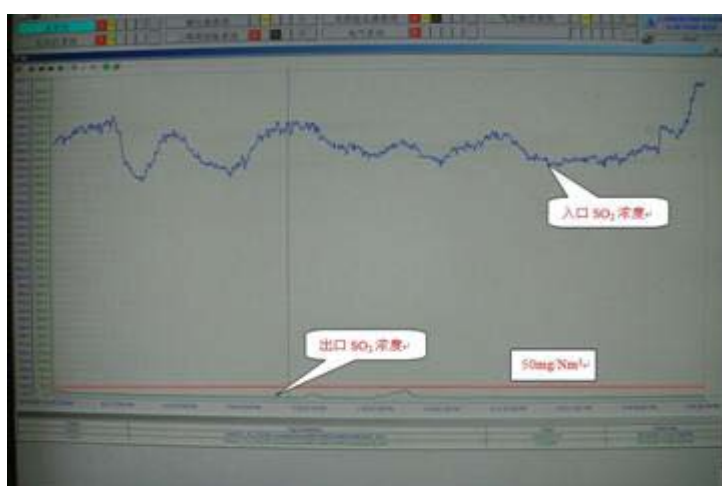


图 2-20 本项目出口排放 SO₂ 浓度稳定低于 50mg/Nm³

- 低粉尘排放：采用脱硫除尘一体化工序，脱硫后采用布袋除尘器，进一步降低烧结机机头的烟尘排放浓度，达到 10mg/Nm³ 左右，使最终的粉尘排放浓度低于国家 30mg/Nm³ 的排放标准。

● 具有 SO_3 、 HCl 、 HF 、重金属、RSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 、二噁英、 NO_x 等多污染物协同脱除能力：根据国家环境分析测试中心对梅钢装置的测试结果表明，在高效脱除 SO_2 的同时，对 SO_3 、 HCl 、 HF 、重金属 Hg 、 Pb 、 Cd 等多污染物均达到了很高的脱除效率，另外，为了满足将来更严格的环保要求，梅钢项目前瞻性地直接建设了二噁英脱除装置见图 2-21。



图 2-21 本项目烧结二噁英脱除装置图

在脱硝方面，实际运行数据表明，在不加脱硝剂的情况下，脱除 NO_x 达到 10%~25% 的协同净化效果，见 DCS 画面及环保监测报告。根据江门华尔润 COA 脱硫脱硝成功运行的经验，以及宝钢的最新试验结果证明，在外加脱硝剂的情况下，可以达到 60%~80% 的脱硝效率。

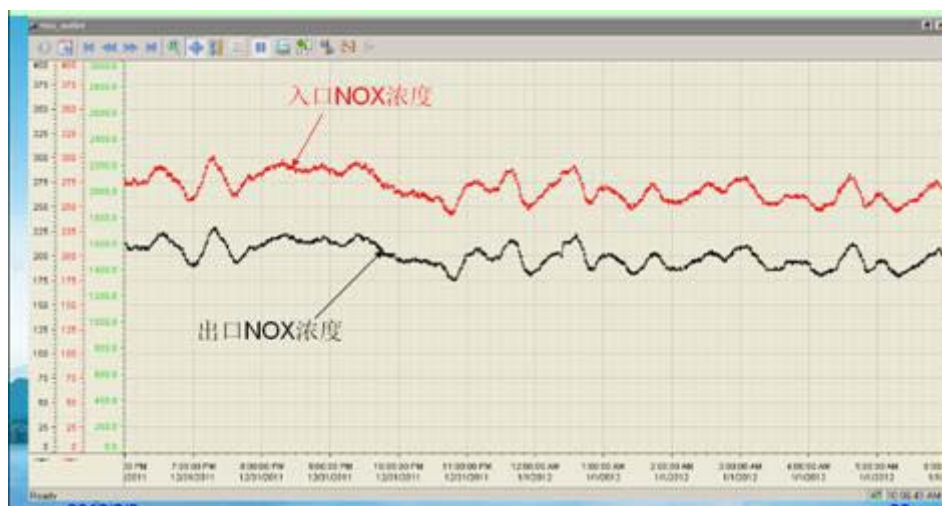


图 2-22 本项目脱硫装置运行脱硝效果曲线

● 可利用焦化废水进行以废治废：浓缩焦化废水是钢铁行业中难以处理的废水，在宝钢项目中采用宝钢 4#焦炉化工厂浓缩废水用于一烧结脱硫系统，实现 4#焦炉化工厂废水“零排放”。

● 利用原烟囱排放：出口排烟不需要再热、整套脱硫装置及烟囱不需要防腐，可以利用原来烟囱进行排烟，烟气的扩散效果好，同时大大降低了设备的投资和运行维护费用。



图 2-23 案例 4#现场图图 2-24 案例 5#现场图

主要技术指标

表 2-1 本项目脱硫系统设计参数

序号	参数	单位	本钢铁厂 4#450m ²	本钢铁厂 5#450m ²
1	脱硫方式		全烟气脱硫	全烟气脱硫
2	脱硫装置处理烟 气量	m ³ /h (工况)	2400000	2400000
3	机头除尘器形式		电除尘器	电除尘器
4	主抽风机数量	台	2	2
5	入口烟气温度	℃	平均 120	130, max180
6	入口烟气 SO ₂ 浓度	mg/Nm ³ (干态)	800~1600	850~1000
7	入口粉尘浓度	mg/Nm ³ (干态)	80	80
8	脱硫效率		保证≥90%, 设计 ≥95%	保证≥90%, 设计 ≥95%
9	出口 SO ₂ 浓度	mg/Nm ³ (干态)	保证≤100, 设计 ≤50	保证≤100, 设计 ≤50
10	出口含尘浓度	mg/Nm ³ (干态)	≤20	≤20
11	吸收塔		LJS 流化床塔、高 度 58m	LJS 流化床塔、高 度 58m
12	脱硫除尘器		LF 低压回转脉冲 布袋除尘器, 8 室 16 个单元	LF 低压回转脉冲 布袋除尘器, 8 室 16 个单元
13	脱硫引风机		1 台静叶可调轴流 式风机	1 台静叶可调轴流 式风机

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.6 亿元。

运行费用

表 2-2 本项目技术经济分析表

序号	项目	单位	梅钢 4#	梅钢 5#	备注
1	烧结机规模	m ²	450	450	
2	工程投资	万元	8000	7800	
3	吸收剂单价	元/吨	300	300	
4	水价	元/吨	0.24	0.24	工业水
5	电价	元/千瓦时	0.53	0.53	
6	蒸汽价	元/吨	120	120	
7	年运行小时	小时	7920	7920	
8	吸收剂耗量	吨/小时	2.2	~2.5	
	吸收剂年费用	万元	522.72	594	
9	水耗量	吨/小时	38	45.2	
	水年费用	万元	7.22	8.59	
10	电耗量	千瓦	3537	3245	
	电年费用	万元	1484.69	1362	
11	蒸汽耗量	吨/小时	1.3	1.3	
	蒸汽年费用	万元	123.55	123.55	
12	人员	人	12	12	
	人员年费用	万元	96	96	按 8 万元/人.年
13	年维修费	万元	89	89	
14	年脱硫运行总成本	万元	2323	2273	不含投资折旧
15	年产烧结矿	万吨	411	463	
16	吨矿增加运行成本	元/吨烧结矿	5.6	4.9	不含投资折旧
17	单位烧结平米投资	元/m ²	18	17.3	含土建、供货、安装、调试等总承包

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物运用良好。该脱硫工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司

联系人：王建春

地址：福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码：364000

电话：15990392960

E-mail: wangjianchun@lonjing.com

典型案例（二）

案例名称

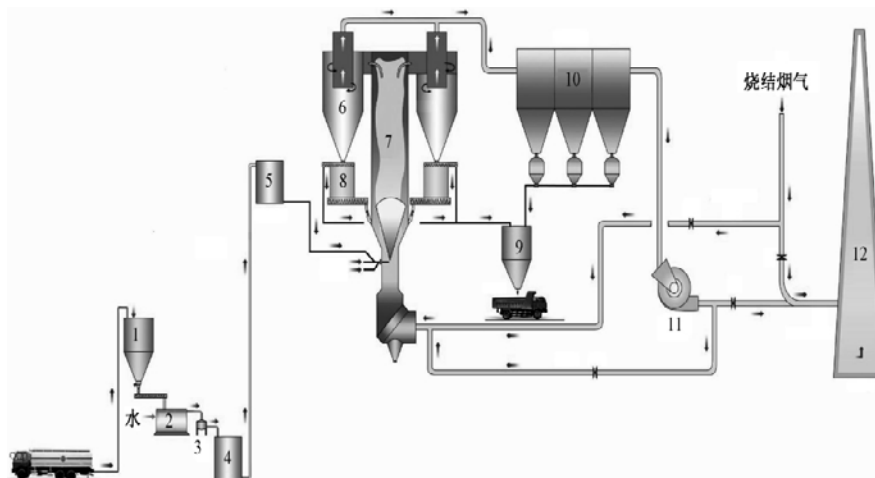
400m² 烧结机 CFB 法脱硫工程

项目概况

本项目采用循环流化床半干法脱硫工艺，核心技术在国家863计划课题（2007AA061702）支持下自主开发成果。本项目处理烟气量100万Nm³/h，每年可以减少SO₂排放量7000多吨。年运行时间为8320h，运行率95%。

主要工艺原理

本项目采用循环流化床法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：该工艺以循环流化床法为基础，改善了物料循环方式，增加了净烟气再循环通路。应用了流化床原理、喷雾干燥原理、气固两相分离理论及化学反应原理，是一种两级惯性分离、内外双重循环的循环流化床烟气悬浮脱硫装置，烟气通过文丘里流化装置时将脱硫剂颗粒流态化，并在悬浮状态下进行脱硫反应。高倍率的循环和增强内循环的结构增大了脱硫塔内的物料浓度，提高了脱硫剂的利用率；同时，脱硫塔中心区域的喷浆形成湿反应区，利用快速的液相反应，保证了较高的脱硫效率。工艺系统包括烟道及烟气循环系统、脱硫剂储存供给系统、反应塔吸收系统、布袋除尘器系统和控制系统等。



（1-水灰料仓，2-熟化器，3-除砂机，4-熟石灰仓，5-熟水灰就地仓，6-旋风除尘器，7-反应器，8-回流装置，9-灰仓，10-布袋除尘器，11-风机，12-烟囱）

图 2-25 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用石灰熟化浆液做脱硫剂，具有更好的脱硫性能。
- 流化状态的反应塔，最大程度地利用了吸收剂，达到高吸收效率：反应塔内更有效的蒸发冷却；在更接近绝热饱和温度下运行；采用由旋风分离器和回料机组成的循环回料装置。
- 采用三流体喷枪：反应塔采用装于文丘里内的三流体喷枪，将脱硫剂浆液、水和压缩空气在喷嘴处混合喷入经文丘里的高速热气流中。

● 采用净化烟气再循环，使进入反应塔的烟气总量始终保持塔内最佳的流化状态。

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足 GB28662-2012 标准的要求，脱硫效率达到脱硫效率为 94%。二氧化硫入口浓度 $1200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口平均排放浓度小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资约 4687 万元。

运行费用

水、电、粉等运行费用约为 1167 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，系统脱硫效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物脱硫灰渣不会形成二次污染。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院过程工程研究所

联系人：李玉然

地址：北京市海淀区中关村北二街 1 号过程大厦

邮政编码：311212

电话：010-82544823

E-mail: yrli@home.ipe.ac.cn

典型案例（三）

案例名称

132m² 烧结机 IOCFB 法脱硫工程

项目概况

本项目采用 IOCFB 多污染物协同控制技术进行示范应用，目前工程仍在建设中，预计该工艺能在较低的钙硫比(Ca/S<1.3)情况下，脱硫效率稳定达到 90%。

主要工艺原理

IOCFB多污染物协同控制技术是在内外双循环流化床半干法脱硫技术(Inner and Outer Circulating Fluidized Bed, IOCFB)基础上发展而来的。IOCFB多污染物协同控制技术原理类同与EFA曳流吸收塔工艺，利用Ca(OH)₂等碱性吸收剂吸收烟气中SO₂等酸性气体，利用活性炭或活性焦吸附剂吸附烟气中二噁英类污染物，以循环流化床原理为基础，通过吸收剂和吸附剂的多次再循环，延长吸收剂和吸附剂与烟气的接触时间，提高了吸收剂和吸附剂的利用率。

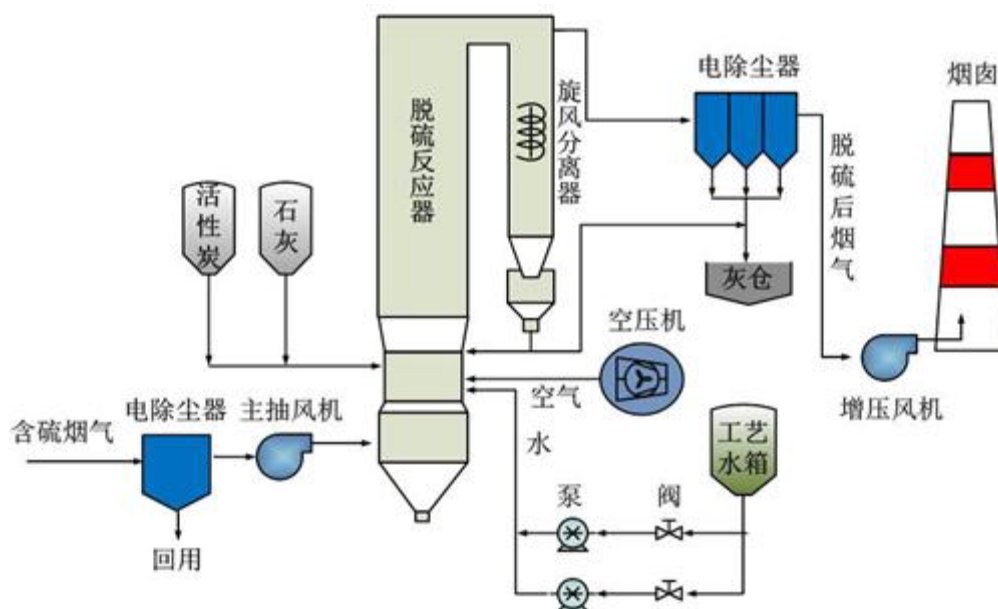


图 2-26 本项目脱硫工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用内、外循环相结合方式，提高了技术适应性。在反应塔内置扰流导流型管束复合构件，增强内循环。
- 采用外置旋风分离器与反应器本体相结合的一体化结构，极大降低了反应器后除尘器入口的烟气颗粒浓度，避免了对原有除尘器的改造，同时可实现对反应器单元的单独立控。
- 吸收剂采用干态进料，避免了管路腐蚀、堵塞等问题，省去了包含制浆单元在内的多个子系统，投资和运行费用降低，同时工艺耗水量小。
- 采用 PLC 技术实现脱硫系统独立控制，抗干扰能力强，配置灵活，扩展性强，稳定性强，显著提高了技术整体运行的可靠性。

主要技术指标

预计该工艺能在较低的钙硫比($\text{Ca/S} < 1.3$)情况下, 脱硫效率稳定达到 90%, 二噁英脱除效率达到 70% 以上。

投资及运行效益分析

水、电、活性炭、气等年运行费用约为 900 万元/年。

用户意见

通过比较多种烟气净化工艺, 最终选择了 IOCFB 多污染物协同控制技术。目前工程仍在建设中, 其污染物控制效果有待调试运行后检测, 预期能够实现 SO_2 和二噁英等多污染物的高效脱除。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 中国科学院过程工程研究所

联系人: 李玉然

地址: 北京市海淀区中关村北二街 1 号过程大厦

邮政编码: 311212

电话: 010-82544823

E-mail: yrli@home.ipe.ac.cn

25. 新型催化法烟气脱硫技术

新型催化法烟气脱硫技术是一种可资源化烟气脱硫技术，能将废物充分资源化利用。四川大学针对该技术自“七五”科技攻关研究以来，进行了长期的持续研发，在国家自然科学基金、国家科技攻关项目等多个项目的支持下，并与中国化学等企业开展产学研合作，使得该技术在新型脱硫剂、新型脱硫反应器、新型脱硫工艺等方面取得重大突破，形成具有我国自主知识产权的新型烟气脱硫技术。已成功建成工业示范装置，于2011年7月在湖北建成脱硫工程，该装置出口二氧化硫浓度低于国家最新排放标准。目前，已建成工业化装置5套，在建4套。

该技术脱硫效率一般高于95%，并在工程实践中实现了接近100%的脱硫效率；脱硫后SO₂排放浓度可以按照客户需要进行设计，最低可满足20mg/m³的排放要求。单位投资与烟气量及烟气中SO₂浓度相关，一般为80~200元/m³；单位运行成本相对传统技术至少降低50%，约为300-1000元/tSO₂；考虑脱硫产物收益后，一定条件下可实现盈利。该技术工艺流程短、设备少、占地面积小，操作简单、运行稳定、无二次污染，且SO₂浓度越高，收益越好，但须确保脱硫产物能够被有效资源化利用。特别适用于对硫酸需求较大的有色和石化化工行业，以及可充分利用资源将硫酸转化为其他产品的建材、钢铁等行业，也可结合电力行业的烟气脱硫脱硝工程改造升级作为电力行业深度脱硫和近零排放控制的关键技术使用。

新型催化法烟气脱硫技术的工作机理和脱硫工艺如下图所示：

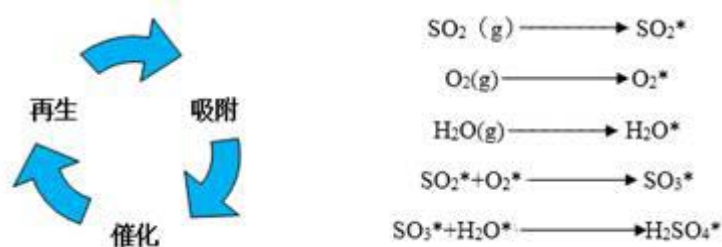


图 2-27 新型催化法烟气脱硫技术工作原理

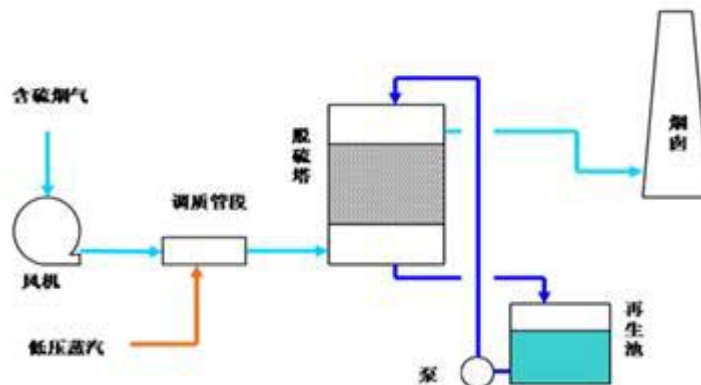


图 2-28 新型催化法烟气脱硫技术脱硫工艺流程

典型案例（一）

案例名称

120 万吨硫酸尾气治理工程

项目概况

本项目处理尾气量为 350000Nm³/h，占地面积 1470m²。该项目于 2013 年 9 月底投入运行。

主要工艺原理

来自硫酸系统的尾气经调制系统进行增湿，随后进入脱硫塔的催化剂固定床，尾气中的二氧化硫被催化氧化生成硫酸，脱硫后的尾气经烟囱排放。当催化剂内的硫酸达到饱和后进行再生。

再生采用梯级循环再生方式，通过不同浓度的稀酸进行分级洗淋，最终将床层内的硫酸富集到再生液中。脱硫剂的活性得到恢复。静置沥干一段时间后，即可再次投入使用。同时获得较高浓度的稀酸产品。稀酸产品经膜过滤后泵送回硫酸装置，作为硫酸系统的添加水进行再利用，实现零排放。

关键技术或设计创新特色

- 脱硫塔的设计采用计算模拟复核，确保塔内气体分布均匀；
- 脱硫塔采用混凝土加耐酸砖内防腐的形式，结构更加可靠，工程造价降低；
- 烟囱直接建在脱硫塔上，利用了塔本身高度，减小投资；
- 催化剂层下部铺设瓷环瓷球，在不增加阻力的情况下避免催化剂泄漏；
- 塔内再生分区进行，减小再生泵流量；
- 烟气进口采用液封替代阀门，关闭时达到 100%密封，使各并联塔层实现可单独检修。



图 2-29 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足二氧化硫浓度低于 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 标准的要求，实际监测浓度为 $11.4\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫效率达到 99% 以上(二氧化硫入口浓度为 $1500\sim 1600\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 3080 万元。

运行费用

根据本项目可行性研究报告显示，本项目年运行成本 733.66 万元，年脱除 SO_2 达 2287.6 吨/年，副产品折算 98% 硫酸产量 3578 吨/年，按年运行时间 8000 小时算，年经济效益（包括减排收益）322.8 万元。

用户意见

本项目尾气装置试运行成功，脱硫效果显著。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：四川大学

联系人：尹华强

地址：成都市四川大学行政楼一楼（望江）

邮政编码：610064

电话：13678015662

E-mail: hqyinscu@126.com

典型案例（二）

案例名称

还原炉、烟化炉烟气尘治理项目

项目概况

本项目处理总烟气量为 $11000\text{Nm}^3/\text{h}$ ， SO_2 含量约为 $800\sim 8000\text{mg}/\text{m}^3$ 。该项目采用了塔池一体结构，有效减少了占地面积，于 2012 年 9 月进入调试。

主要工艺原理

本项目采用新型催化法烟气脱硫技术，主要工艺原理如下：还原炉、烟化炉混合后的尾气经鼓风机分别进入并联的固定床脱硫塔中，在尾气通过催化剂固定床程时， SO_2 、 H_2O 、 O_2 被吸附、催化变为具有活性的分子，并迅速反应生成 H_2SO_4 。脱除 SO_2 后的尾气可直接达标排放。催化剂床程内的硫酸富集到一定程度后需要切断烟气进行再生。再生采用梯级浓度的稀硫酸及清水作为再生液，通过大流量喷淋将催化剂中的硫酸带出，得到 30% 左右的稀硫酸。成品硫酸经膜过滤装置处理后泵送至硫酸生产装置，从一吸塔循环槽和二吸塔循环槽处作为补充水再利用。再生后的脱硫塔经过一定时间的静置沥干后重新投入脱硫。

关键技术或设计创新特色

- 塔池一体，布局紧凑，减少占地。
- 工艺简单，自动化程度较高



图 2-30 案例现场图

主要技术指标

根据济源市环保局的监测数据，本项目系统出口烟气指标满足二氧化硫浓度低于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 标准的要求，脱硫效率达到 95% 以上(二氧化硫入口浓度为 $3633\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $34\sim 94\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1510 万元。

运行费用

根据 2012 年 10 月-2013 年 8 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 148 万元/年，年维修费用约 10 万元。运行时间按 8000h 计算，实现每年二氧化硫减排最多可达到 6688 吨，减少经济损失约 13376 万元。并且脱硫过程无其他废气、废渣、废水等排放。同时生成副产品硫酸（折 100%）10241 吨，可作为商品销售。

用户意见

新型催化法烟气脱硫技术在氧化还原炉系统尾气脱硫工程中使用。脱硫效率达到了 95%，硫酸回收率 100%，同时还有一定的除尘能力。实践证明，该技术脱硫效率高，硫资源利用率高，没有其他副产物，操作简单，运行稳定，值得在行业内进行推广。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：四川大学

联系人：尹华强

地址：成都市四川大学行政楼一楼（望江）

邮政编码：610064

电话：13678015662

E-mail: hqyinscu@126.com

26. 钠碱法烟气脱硫技术与装置

钠碱法烟气脱硫技术与装置利用酸碱中和原理，在脱硫塔中利用氢氧化钠脱除烟气中的 SO_2 ，之后在结晶器中，将亚硫酸氢钠转化为亚硫酸钠。钠碱法脱硫工艺具有总投资低、系统简洁设备少、脱硫效率高、运行可靠、占地面积小、不结垢不堵塞、副产物销路好等特点。国内多家企事业单位进行了其工业化开发工作，并将该技术推广应用于燃煤工业锅炉/炉窑的烟气脱硫。在实际工程运行中可处理 SO_2 浓度超过 $22000\text{mg}/\text{m}^3$ 、烟气温度达到 360°C 的烟气。副产物亚硫酸钠是重要的化工原料，真正实现变废为宝。

该技术的脱硫系统同步运行率可达 100%；脱硫率大于 95%，可根据需要设计；脱硫尾气二氧化硫排放浓度 $<400\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；二氧化硫、铅、镉等污染物减排效果明显，副产品亚硫酸钠达到工业合格品标准，带来经济效益、环境效益和社会效益。

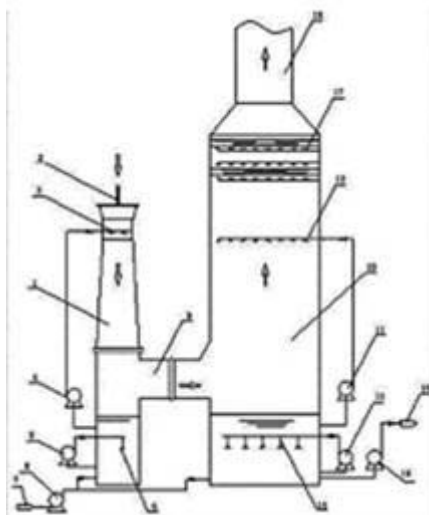


图 2-31 钠碱法烟气脱硫装置示意图

(1-预洗涤塔；3-与洗涤塔喷淋层；6-预洗涤塔扰动喷淋层；9-烟道；10-脱硫塔；12-脱硫塔循环喷淋层；14-脱硫塔扰动喷淋层；17-除雾器；18-湿烟囱)

典型案例

案例名称

锌二系统挥发窑烟气脱硫工程

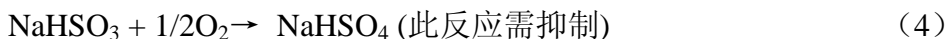
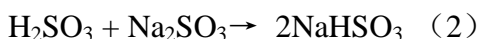
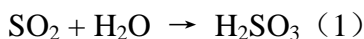
项目概况

本项目采用 EPC 总承包建设。项目总投资 2600 万元，4#、5#挥发窑的氧化锌产能分别为 70t/d、90t/d，副产物亚硫酸钠产量约为 4.9t/h。项目于 2010 年 6 月 25 日与主机同步开工建设，2012 年 5 月 19 日投产运行。

主要工艺原理

烟气中的二氧化硫和浆液中氢氧化钠首先在脱硫塔中进行酸碱中和反应生成亚硫酸氢钠；然后生成的亚硫酸氢钠输送到反应结晶器内，通过添加碱液最终生成副产品亚硫酸钠。

1) 脱硫塔内主要化学如下：



2) 反应结晶器内主要反应如下：

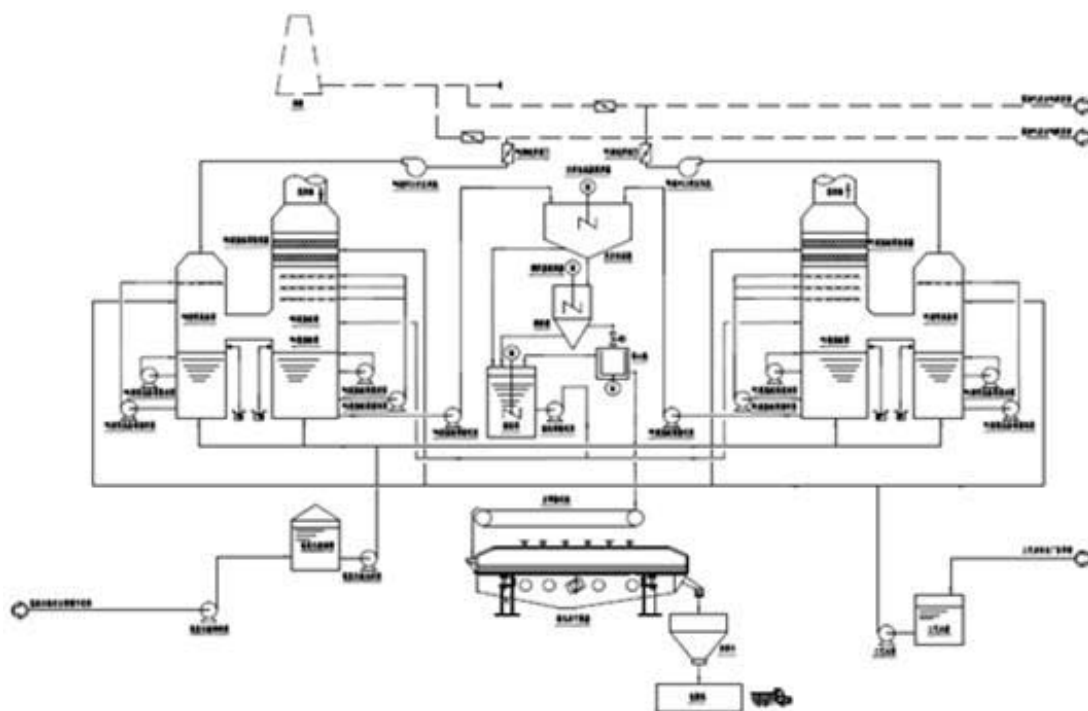


图 2-32 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 二氧化硫吸收系统的关键设备

本工程采用喷淋塔，喷淋塔设计采用逆流方式，利用上升烟气在一定程度上托住喷淋下落的小液滴，从而延长液滴在吸收区的停留时间，加强了烟气与吸收剂的充分接触，提高了脱硫效率。喷淋塔吸收区除了喷嘴外，无其他设备，减少了结垢、堵塞、磨损的几率，提高了设备的可用率，减少了检修工作量。由于塔内设备少，减少了脱硫系统的阻力，节约能源。喷淋塔设置了备用喷淋层，能够适应机组负荷及 SO_2 浓度的变化，运行方式灵活，可以保持稳定的脱硫效率。



图 2-33 案例现场图

主要技术指标

本项目脱硫率 $>95\%$ ，脱硫尾气二氧化硫排放浓度小于 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫系统同步运行率（与挥发窑同步运行率） 100% ，副产品亚硫酸钠达到工业合格品标准。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2600 万元。

运行费用

根据自 2012 年 5 月 9 日起实况运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 7100 万元/年。其中，原料液碱的年购置费用约为 6300 万，公用工程的年运行费用约为 800 万。副产品亚硫酸钠的年产量约为 35500 吨(折 100%含量)，销售收入约 8150 万元/年。项目年均净收益约 1000 万元。

用户意见

本脱硫项目能够与挥发窑 100% 同步运行，脱硫尾气二氧化硫排放浓度小于 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫率大于 95% ，副产品亚硫酸钠达到工业合格品标准，达到了项目预期目标，带来了显著的环境效益和经济效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中钢集团天澄环保科技股份有限公司

联系人：张发有

地址：武汉市东湖新技术开发区光谷一路 225 号 邮政编码：430205

电话：027-59908241 E-mail: vvew@163.com

27. 烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术

烟气脱硫 (Flue Gas Desulfurization, FGD) 是有效削减 SO_2 排放量不可替代的技术。目前, 世界各国对烟气脱硫都非常重视, 已开发了数十种行之有效的脱硫技术。氨-肥法采用氨吸收烟气中 SO_2 并生成亚硫酸氢铵和亚硫酸铵, 结合化肥生产, 将烟气中的 SO_2 回收生成硫酸铵化肥。氨法烟气脱硫技术反应速度快、反应完全, 是一种理想的烟气脱硫方法, 但由于氧化率低、易挥发等因素使得 SO_2 脱除不彻底、消耗能量多。较高的运行成本是影响氨法广泛使用的最主要因素。液相催化氧化可以有效解决实际过程中二氧化硫在水中氧化速率慢的缺陷, 能明显加速反应进程。

关键技术包括:

- (1) 烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化技术, 适用于生物质裂解、煤焦化、煤液化、煤气化、高炉炼铁等过程中含 SO_2 尾气的资源化利用;
- (2) 氨法脱硫技术。

典型案例

案例名称

炭素煅烧回转窑尾气低浓度 SO₂ 脱硫工程

项目概况

本项目 4 台炭素煅烧回转的窑尾气低浓度 SO₂ 脱硫工程使用了烟气液相催化氧化协同氨法脱硫深度净化处理后尾气脱硫率达到 95%，项目成本与收益持平或略有盈利，实现了社会效益与环境效益的提升。

主要工艺原理

氨法脱硫技术中，脱硫液主要是(NH₄)₂SO₃ 及 NH₄HSO₃ 共存的溶液，脱硫过程中向系统中添加氨的目的是为了调整(NH₄)₂SO₃ 的浓度。起主要脱硫作用的化学物质即(NH₄)₂SO₃ 也可作为化肥直接施用，但产品的稳定性较差，易造成二次污染，需将其氧化成产品性能稳定的(NH₄)₂SO₄，达到既能作为单独的肥料，也能作为生产复合肥料的原料的目的。液相催化氧化技术可以氧化高浓度的亚硫酸盐，且氧化时间较传统氧化技术短；液相催化氧化技术的二次污染小，催化剂可成为多效复合肥中的功效元素，提高铵肥的附加值。

工艺流程：含 SO₂ 的烟气通过除尘器后进入氨法脱硫塔，在塔内与脱硫剂与和催化剂反应，经脱硫处理后的其它烟气成分作为原料气回用或排入大气。

关键技术或设计创新特色

- 氨法脱硫技术
- 工业废气中二氧化硫液相催化氧化净化技术

主要技术指标

处理尾气量为 123000m³/h，年处理尾气量 10.775 亿 Nm³。脱硫效率达到 83%（排放达到 850mg/m³ 控制指标）时可削减二氧化硫 400t/a，脱硫效率达到 95%（装置实际运行指标）时可削减二氧化硫 458t/a。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 745.38 万元。

运行费用

根据实际运行情况，年运行费用（水、电、粉、气、检修、折旧等运行费用）约 77.42 万元。主体设备寿命 15 年，项目成本与收益持平或略有盈利。

用户意见

项目达到综合治理尾气并资源化回收利用的目的，既消除烟气中有害污染物 SO₂，且硫资源回收利用，得到有用的化肥产品，符合我国的基本国策及当前我国推行的循环经济政策。项目实施后，取得了良好的环境、社会和一定经济效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：昆明理工大学 联系人：宁平

地址：云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码：650500 电话：13708409187 E-mail: ningping58@sina.com

28.工业锅炉烟气尿素湿法同时脱硫脱硝技术

针对湿法烟气同时脱硫脱硝，国内外多有研究，如氯酸氧化法、黄磷氧化法、络合物法、双氧水法、有机溶剂吸收法及尿素法等。从“十五”开始，我国各级政府通过各类科技研究计划支持了大量的研究开发工作，在 863 课题“尿素添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮技术研究开发”（编号 2002AA529160）的资助下，开展了尿素添加剂湿法烟气同时脱硫脱硝技术研究，在单一吸收剂中加入添加剂提高净化效率，先后完成了尿素/添加剂、尿素/碱/添加剂湿法烟气同时脱硫脱硝等技术研究，并在工业锅炉烟气净化工程上推广应用。其方法原理是由尿素/添加剂或尿素/碱/添加剂组成的复合吸收剂，在吸收塔中与烟气接触反应，使烟气中的 SO_2 、 NO_x 等污染物同时净化。核心技术拥有自主知识产权，获发明专利 3 项，获广东省科技进步一等奖。

针对工业锅炉烟气污染控制，尿素/碱/添加剂湿法烟气同时脱硫脱硝等技术实用性强，可实现一体化烟气同时脱硫脱硝，具有经济、节能及稳定等特点，与烟气脱硝+湿法脱硫两段组合工艺比较，可以节约脱硝投资成本及运行能耗，治理工程 SO_2 净化效率达到 95% 以上， NO_x 净化效率达到 50% 以上。

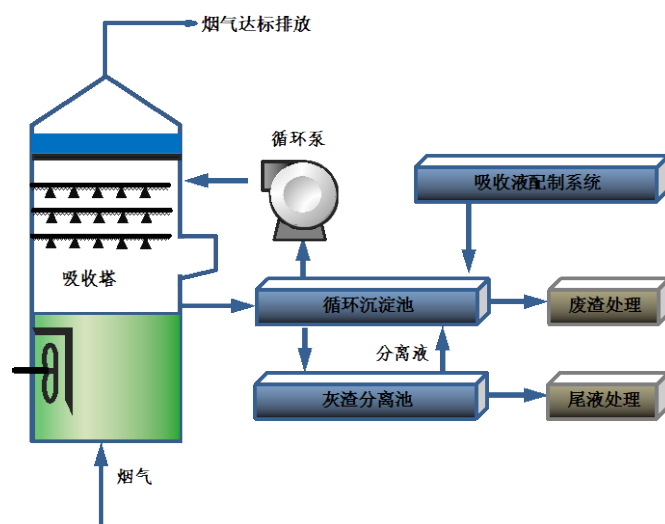


图 2-34 工艺流程图

在 863 课题“玻璃炉窑/陶瓷炉窑烟气多污染物协同控制技术与示范”（编号 2012AA062505）的资助下，已完成中试并取得超预期的效果， SO_2 和重金属去除率大于 95%、 HF 和 HCl 去除率大于 85%、 NO_x 去除率大于 50%，目前正在建设示范工程，预计一年内也可以推广应用。

典型案例

案例名称

30 吨/时燃煤工业锅炉湿法烟气同时脱硫脱硝工程

项目概况

本项目于 2010 年 10 月完工并投入运行。

主要工艺原理

以尿素/碱/添加剂组成的复合吸收剂，在吸收塔中与烟气接触反应，使烟气中的 SO_2 、 NO_x 等污染物同时净化，脱硫生成硫酸（钙、镁、钠）盐，脱硝生成无害的氮气，含硫酸盐的吸收尾液经预处理后进入污水处理系统，处理至达标排放。以尿素/添加剂为复合吸收剂净化烟气后，吸收尾液含硫酸铵，可进行蒸发浓缩结晶回收资源。

关键技术或设计创新特色

采用结构简单、体积小、防堵塞及多级吸收传质的高效吸收塔。



图 2-35 案例现场图

主要技术指标

设计参数处理烟气量： $90000\text{m}^3/\text{h}$ ；烟气温度： 130°C ；进口： SO_2 浓度为 $1200\text{mg}/\text{m}^3$ 、 NO_x 浓度为 $350\text{mg}/\text{m}^3$ ；出口： SO_2 浓度小于 $300\text{mg}/\text{m}^3$ 、 NO_x 浓度小于 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 。实际运行结果 SO_2 净化效率大于 95%，出口浓度小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 、 NO_x 净化效率大于 50%，出口浓度小于 $170\text{mg}/\text{m}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资 60 万元。

用户意见

本项目投运至今，无任何环保事故，各项技术经济指标均达到或优于设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：广州华科环保工程有限公司

联系人：韩琪

地址：广州员村西街7号大院

邮政编码：510655

电话：020-85558425

E-mail: hanqi@scies.org

29.工业锅炉脱硫脱硝一体化技术

我国工业锅炉分布广、数量大、品种多，燃料的品种也多，锅炉的燃烧排放的烟气大约占大气中燃烧排放污染物的三分之一。目前，国内外的大型火力电厂的脱硫脱硝技术已逐步成熟，但火力发电厂技术不适用于工业锅炉/炉窑。

工业锅炉运行负荷变化较大，烟气量不稳定，含氮氧化物量不稳定，氮氧化物控制技术难度较大。传统的铵法脱硝设备存在 SO_3 中毒，堵塞滤布、 NH_3 逃逸，臭味很大，对居民区影响很大。

本项目产品主要适用于20t/h-440t/h工业锅炉/炉窑的烟气污染物治理。在公司原有镁法脱硫的基础上，突破了传统工业锅炉脱硫脱硝设备存在的技术瓶颈，采用臭氧氧化一氧化氮、氧化镁吸收的一体化结构，达到脱除率高、运行稳定、投资少、运行成本低、适用性强、废液废渣资源化、无二次污染等目标。本项目设备结构紧凑、占地面积小、与锅炉的匹配简便，既可与新建锅炉配套，也可很简便地用于旧锅炉改造。填补了我国脱硫脱硝一体化工程应用的空白。项目产品化会较大幅度减少我国工业锅炉中烟气的污染物排放量，对减少我国大气中酸雨及雾霾做出贡献。

该技术的脱硫效率一般大于90%，可达93%以上； SO_2 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ；脱硝效率达86%以上， NO_x 排放浓度一般小于 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。该技术成熟、稳定，脱硫脱硝效率高。

典型案例

案例名称

14.5MW烟气脱硫脱硝一体化工程

项目概况

本项目于2012年3月开始设计，2012年6月开工建设，2012年8月首套脱硫脱硝装置试运行。

主要技术原理

本装置以空气制成富氧源，经臭氧发生器产生臭氧，注入臭氧混合反应器与烟气混合，臭氧强行氧化烟气中氮氧化物，将氮氧化物氧化成高价态氮氧化物，进入吸收塔，以液态氧化镁吸收。充分利用液态氧化镁对二氧化硫、氮氧化物吸收效率高的特性，将臭氧氧化脱硝技术及镁法脱硫技术耦合，设计制造成一体化脱硫、脱硝装置。

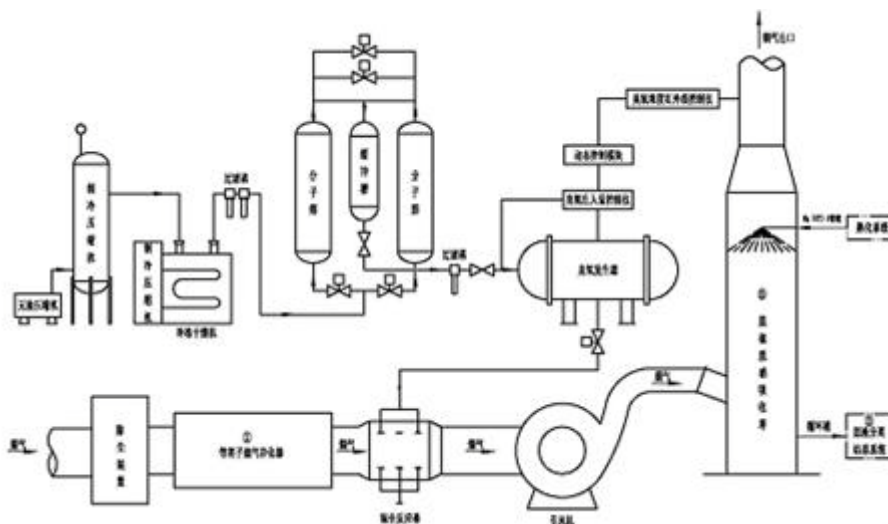


图 2-36 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用等离子混合反应分离器；
- 臭氧氧化脱硝技术与镁法脱硫技术耦合的一体化结构；
- 采用臭氧联动控制技术，通过动态调整臭氧注入，控制NO_x排放量，可控到50mg/m³以下；
- 脱硫脱硝液、渣进行强氧化后固水分离、脱硫脱硝渣可与煤灰一起利用；
- 脱硫脱硝浓液利用烟气余热蒸馏结晶产出硝酸镁，结晶时产生的蒸馏水冷凝后返回循环使用；
- 烟囱排放出来的烟气无异味。



图 2-37 案例现场图



图 2-38 案例吸收塔图

主要技术指标

(1) 本项目系统出口烟气指标满足GB13271-2001《锅炉大气污染物排放标准》的要求, 脱硫效率达到93%以上, 脱硝效率达86%以上(二氧化硫入口浓度为 $1290.6\text{mg}/\text{Nm}^3$, 出口浓度 $80.7\text{mg}/\text{Nm}^3$, NO_x 入口浓度为 $705.9\text{mg}/\text{Nm}^3$, 出口浓度 $98.3\text{mg}/\text{Nm}^3$);

(2) 脱硫脱硝渣进行强氧化处理, 经压滤可与煤灰一起利用;

(3) 压滤后的浓液利用烟气余热蒸馏结晶为复盐, 可提纯后为农肥。

投资及运行效益分析

投资费用

脱硫脱硝一体化设备投入为380万元。

运行费用

原碱法脱硫剂每年150万, 氧化镁法脱硫50万元, SCR等方法脱硝催化剂每年需80万元, 现臭氧氧化吸收只需每两年更换一次空气分子筛, 每年只需15万元。

结晶产品资源化收入: 每天1吨硝酸镁晶体, 每吨400元, 每年12万元。

用户意见

本项目投运至今, 各项技术指标优良, 无任何环保事故, 系统脱硫脱硝效率达到设计要求, 各项耗能指标达到或优于设计要求, 结晶副产物可以出售。该脱硫脱硝工程带来了显著的经济环境效益, 是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：上海三卿环保科技有限公司

联系人：何静

地址：上海市浦东新区沪南公路5205号

邮政编码：201317

电话：021-58148378

E-mail: shhsanqing@163.com

30. 冶炼烟气 SO₂ 与重金属协同控制技术

我国有色冶金行业烟气中的 SO₂ 与重金属排放问题亟待加强控制。随着冶炼烟气制酸尾气 SO₂ 排放标准限值的降低提高和铅、锌等冶炼工程中汞、铅等重金属污染物排放标准的日趋严格,有色冶炼烟气重金属控制和 SO₂ 资源化利用技术已成为有色行业急需的技术。

本技术是典型有色炉窑烟气 SO₂ 回收及重金属协同控制技术。以铅锌等冶炼烟气作为治理对象,针对有色冶炼烟气中 SO₂ 浓度高、气量波动大、同时含有 Hg、As、Cd、Pb 等多种重金属的特征,将冶炼烟气经预处理后、采用(NH₄)₂S 及 HgCl₂ 溶液高效液相吸收,可同时脱除烟气中 SO₂ 和重金属(Hg、As、Cd、Pb),并对重金属和硫产物进行回收利用,最终获得硫酸铵产品,为我国有色冶炼烟气污染物控制提出一条可行途径。该技术获得国家科技部 863 计划“有色炉窑烟气高浓度 SO₂ 回收及重金属协同控制技术研究示范”(课题编号:2012AA062504,)的支持,建立与 1 万吨/年锌生产规模相匹配的冶炼烟气 SO₂ 与多种重金属协同控制的示范工程。

本技术有如下优点:

(1) 冶炼烟气中的 SO₂ 与重金属的氧化物同步脱除,脱除效率高,烟气可以达标排放。脱硫效率≥95%,出口烟气中 SO₂ 含量≤200mg/m³;汞、砷、镉、铅四种重金属去除效率稳定大于 90%,出口烟气中 Hg≤0.05mg/m³、As≤0.5mg/m³、Cd≤0.85mg/m³、Pb≤1mg/m³,副产硫磺或硫酸铵产品,汞的综合回收率大于 80%,铅、砷、镉的综合回收率大于 65%。

(2) 从冶炼烟气中的 SO₂ 制取硫酸铵副产品,脱硫率高,运行成本低,而硫酸铵与其它硫产品相比具有易于贮存和运输等优点,在达到协同净化的同时,还有一定的经济效益。本技术是解决冶炼烟气净化与利用的关键技术,适于工业化应用。

(3) 可回收冶炼烟气中的重金属,实现金属硫化物的资源化利用,同时避免了冶炼烟气的重金属排放及其转移到废水造成的二次污染问题。

(4) 采用氯化汞溶液洗涤脱汞时,氯化汞可循环使用,吸收的金属汞形成甘汞产品,兼顾了汞的治理与回收利用。该技术工艺简捷,易操作,脱硫率高,重金属去除效率高,成本低,适于工业化应用,在有色冶炼行业有较好的推广应用前景。

典型案例

案例名称

锌冶炼烟气 SO₂ 与重金属协同净化工程

项目概况

本项目于 2013 年 11 月投产。

主要工艺原理

技术路线由以下四部分组成：

(1) 高效重金属预去除技术：静电除尘器后的烟气进入湿式洗涤塔进行处理，主要针对粉尘及烟气中汞、砷、镉、铅等重金属及化合物的去除。

(2) 深度脱汞：湿式洗涤烟气进入深度脱汞装置（脱汞塔）：烟气被氯化汞溶液洗涤时，溶液中的汞离子将与烟气中的金属汞蒸汽进行一个快速而完全的反应，生成不溶于水的氯化亚汞晶体，一部分氯化亚汞用氯气重新氯化成溶于水的氯化汞，加入洗涤液中继续循环，多余部分经处理后成为甘汞产品。

(3) 复合吸收液的 SO₂ 及重金属协同净化技术：针对有色冶炼烟气 SO₂ 浓度高、气量波动大、同时含有 Hg、As、Cd、Pb 等多种重金属的特征，这些重金属在烟气中多为重金属氧化物存在，采用(NH₄)₂S 溶液吸收法在脱除 SO₂ 的同时，可将烟气中的 HgO、As₂O₃、CdO、PbO 等重金属氧化物脱去并加以回收，(NH₄)₂S 与烟气中的 SO₂ 反应生成(NH₄)₂S₂O₃ 和(NH₄)HSO₃，经进一步氧化、结晶后获得(NH₄)₂SO₄ 产品，使烟气中的硫资源和金属资源得到回收利用。

(4) 重金属分离回收：SO₂ 烟气中 Hg、Pb、Cd、As 重金属在湿式洗涤步骤的去除效率为 65.02%~97.30%，其中进入污酸中的重金属在废水处理步骤用硫化法(Na₂S)去除，有效去除重金属并生成沉淀，底流经板框压滤后得到硫化渣，硫化渣中的汞质量分数达到了 28.31%，铅为 20.75%，Zn 为 12.96%。可作为汞冶炼厂或其他冶炼厂的原料出售。剩余的汞进脱汞塔脱汞，汞的去除率也在 90% 以上，脱汞塔脱汞得到 Hg₂Cl₂(甘汞)产品外卖。脱汞塔出来的烟气采用(NH₄)₂S 吸收液二级吸收，脱除 SO₂ 的同时进一步脱除重金属，吸收液底流同样进入硫化槽和沉淀池，生成硫化渣回收重金属。

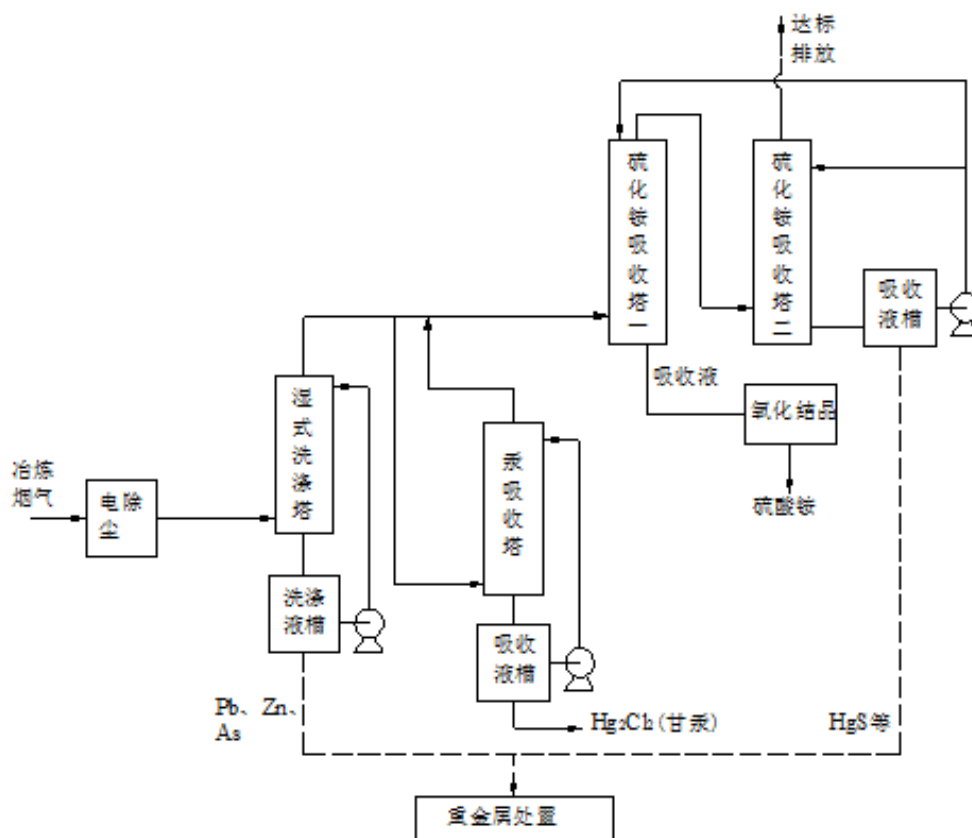


图 2-39 本项目工艺示意图

关键技术或设计创新特色

- 深度脱汞技术：采用 HgCl_2 溶液脱汞，汞吸收塔能将冶炼烟气中的汞排放控制在 $1.05\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，总汞去除效率大于 90%，同时获得甘汞产品外售。
- 复合吸收液的 SO_2 及重金属协同净化技术：采用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 复合液同时吸收转化 SO_2 及重金属，脱硫效率 $\geq 95\%$ ，出口烟气中 SO_2 含量 $\leq 200\text{mg}/\text{m}^3$ ；汞、砷、镉、铅四种重金属去除效率稳定大于 90%，出口烟气中 $\text{Hg} \leq 0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{As} \leq 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{Cd} \leq 0.85\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{Pb} \leq 1\text{mg}/\text{m}^3$ ，副产硫酸铵达到 DL/T 808-2002 标准，汞的综合回收率大于 80%，铅、砷、镉的综合回收率大于 65%。



图 2-40 案例现场预处理系统装置



图 2-41 案例现场深度脱汞装置

主要技术指标

冶炼烟气中的 SO_2 与重金属的氧化物同步脱除，脱除效率高，烟气可以达标排放。脱硫效率 $\geq 95\%$ ，出口烟气中 SO_2 含量 $\leq 200\text{mg/m}^3$ ；汞、砷、镉、铅四种重金属去除效率稳定大于 90%，出口烟气中 $\text{Hg}\leq 0.05\text{mg/m}^3$ 、 $\text{As}\leq 0.5\text{mg/m}^3$ 、 $\text{Cd}\leq 0.85\text{mg/m}^3$ 、 $\text{Pb}\leq 1\text{mg/m}^3$ ，副产硫酸铵达到 DL/T 808-2002 产品质量标准，汞的综合回收率大于 80%，铅、砷、镉的综合回收率大于 65%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1100 万元。

运行费用

3500 m^3/h 规模装置水、电、气、原料等运行费用约为 1124 万元/年，单位运行成本约：0.44 元/ m^3 。硫酸铵产值约 1268 万元/年。

用户意见

本技术系统高效重金属预去除、深度脱汞、重金属分离回收装置已稳定运行三年，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。复合吸收液的 SO_2 及重金属协同净化装置 2013 年 12 月投产，对 SO_2 和重金属均有高净化效率，环境效益和经济效益显著，净化指标优于环境排放标准。是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：昆明理工大学

联系人：宁平

地址：云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码：650500

电话：13708409187

E-mail: ningping58@sina.com

31. 中小型锅炉 SCR 烟气脱硝技术

工业锅炉减排氮氧化物的途径包括优化燃烧方式和燃烧后脱硝两类，其中燃烧后脱硝的主要技术包括选择性催化还原（SCR）烟气脱硝和选择性非催化还原（SNCR）烟气脱硝两种。燃烧优化、SCR 和 SNCR 技术的 NO_x 控制效果、成本各不相同，可满足不同地区、不同时段的技术需求，是电站锅炉和发达国家工业锅炉 NO_x 排放控制的主流技术。SCR 技术是控制 NO_x 排放最高效的烟气脱硝技术，该项技术利用氨或碳氢类物质作为还原剂，在催化剂的作用下，将氮氧化物还原为氮气。对工业锅炉的应用来讲，SCR 技术存在成本高、难于推广的问题，另外，工业锅炉的负荷变化大，要求催化剂的脱硝温度窗口较宽，要有良好的低温适应性。随着标准的日益严格，加大对中小型工业锅炉 SCR 烟气脱硝技术的研发及示范应用成为当前的一项重大课题。我国已在工业锅炉 SCR 烟气脱硝领域取得了重要进展，并进行了工业示范性应用，促进了工业锅炉 SCR 烟气脱硝技术的发展和应



图 2-42 工业锅炉 SCR 烟气脱硝示范工程

典型案例

案例名称

35t/h 锅炉 863 烟气脱硝示范工程

项目概况

本项目中的锅炉为某热电厂燃煤链条炉，采用选择性催化还原法（SCR）脱硝技术控制 NO_x 排放，锅炉耗煤量约为 130 吨/天。主要技术指标为：NO_x 去除效率不低于 80%，氨逃逸率小于 5 ppm。

主要工艺原理

本技术主要工艺原理如下：来自锅炉的未脱硝烟气从 1#锅炉一级省煤器下方，二级省煤器上方（温度为 360℃~400℃的烟道处）引出，经 SCR 脱硝系统旁路烟道，进入 SCR 烟气脱硝装置，喷氨格栅喷出氨与烟气混合，经导流板和整流装置后进入催化剂层，在催化剂催化作用下，NH₃ 与烟气中的 NO_x 进行脱硝反应，反应产物是 N₂ 和 H₂O。脱硝后的烟气排出 SCR 烟气脱硝装置，进入空气预热器，回到锅炉尾部烟道。

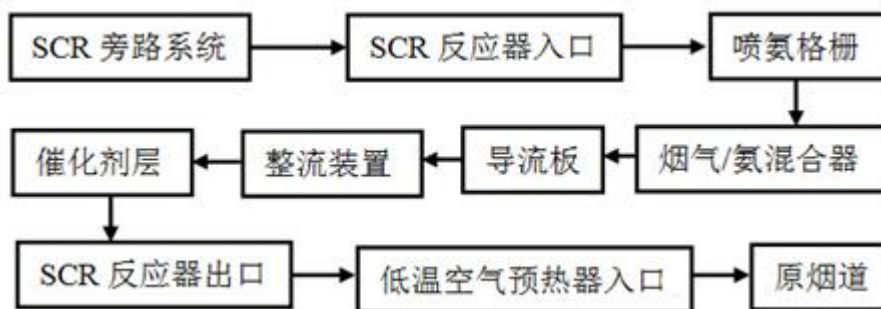


图 2-43 本项目 SCR 技术烟气流向示意图

关键技术或设计创新特色

- SCR 反应器：反应器入口设气流均布装置，入口及出口段设置导流板，对于反应器内部易于磨损的部位设计必要的防磨措施；反应器内部各类加强板、支架设计成不易积灰的型式，同时充分考虑热膨胀的补偿措施；反应器出口设有取样口；反应器进口设置 1 套在线烟气取样测试仪器 CEMS，不间断测量 NO_x、O₂ 等烟气参数；并带有相应的过滤、加热装置。
- 氨储存和供应系统：氨水的储罐和氨站的设计保证满足国家对此类危险品罐区的有关规定。自行设计开发了电加热式氨水蒸发系统，充分考虑氨的供应量保证能满足锅炉不同负荷的要求，调节方便灵活。
- 氨喷射系统：先采用流体力学计算软件模拟，以达到最佳的氨/NO_x 混合比，而后设计了喷氨格栅中母管的数量和布置的位置。通过在烟道中布置静态混合器使烟气与氨气充分混合，导流板、烟气整流器使烟气尽可能均匀分布在烟道中，并保持系统的低压降。

- 控制系统：合理布置烟道内温度、NO_x 浓度等测点，确定喷氨量的计算方法，开发控制软件，在氨水缓冲罐前将流量计和电动调节阀连锁，通过调节喷氨量来控制氮氧化物的排放。

主要技术指标

本项目经第三方对热电厂 1#锅炉 SCR 脱硝示范工程进行了测试，实测脱硝效率为 90.6%（考虑到过量空气系数折算后的计算值）。同时委托另一资质单位对 1#锅炉 SCR 脱硝示范工程进行再次测试，实测脱硝效率为 90.8%，氨逃逸为 1.12mg/Nm³，折合为 1.48ppm。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学

联系人：李俊华

地址：北京市海淀区清华大学

邮政编码：100084

电话：010-62771093

E-mail: lijunhua@tsinghua.edu.cn

32. 循环流化床锅炉选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术

SNCR 脱硝技术即选择性非催化还原技术是一种不需要催化剂的脱硝方式。在 $850^{\circ}\text{C}\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 通过将含氨基的还原剂 (如氨水、尿素溶液) 喷入炉内, 将烟气中的 NO_x 还原脱除, 生成氮气和水从而实现脱除 NO_x 的目的。SNCR 脱硝技术的工业应用开始于 20 世纪 70 年代中期。目前世界上燃煤电厂 SNCR 脱硝工艺的总装机容量在 2GW 以上。而我国在 20 世纪 90 年代中后期开始应用 SNCR 脱硝技术。循环流化床因其有高温旋风分离器的存在, 为 SNCR 脱硝反应的充分进行提供了良好的温度区间、停留时间及混合条件, 是理想的 SNCR 脱硝反应应用场合, 使 SNCR 技术的脱硝效率不断突破, 可稳定达到 60%、最高可达 70% 及以上, 这为 SNCR 技术的继续推广拓宽了新的途径。

该技术可用于循环流化床的脱硝, 投资费用比 SCR 技术低 60% 以上, 脱硝效率可达 60% 以上, 单位投资大致为 15~35 元/kW; 运行成本低于 0.4 分/kWh, 可经济有效地解决循环流化床的 NO_x 排放污染问题, 达到排放标准。

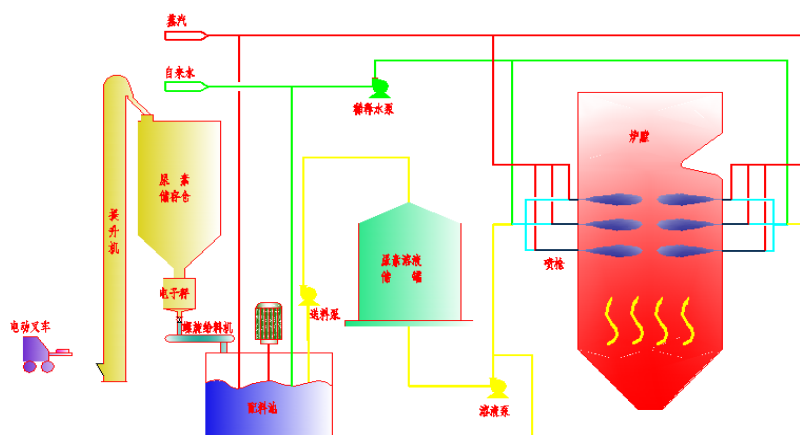


图 2-44 SNCR 工艺流程示意图

典型案例（一）

案例名称

75t/h循环流化床锅炉烟气SNCR脱硝工程

项目概况

本项目所采用的 SNCR 脱硝技术以 20% 的氨水溶液作为还原剂，氨水喷射位置位于旋风分离器入口烟道处。在进口浓度为 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的锅炉运行条件下，该 SNCR 脱硝工程能稳定运行，实现 67% 的脱硝效率，出口 NO_x 浓度低于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

主要工艺原理

本工程采用选择性非催化还原法脱硝技术，还原剂（氨水）是以雾化的水溶液形式喷入到温度为 $850\sim 1050^\circ\text{C}$ 的区域，与 NO 发生还原反应生成 N_2 和水。

SNCR 系统主要包括氨水卸载系统、氨水储存系统、氨水输送系统、稀释水系统、计量混合系统、喷射系统和电气控制系统。氨水卸载系统实现将氨水从氨车卸载到氨水储罐中，氨水储存系统储存 20~25% 的氨水，然后由氨水输送系统和稀释水系统将氨水、稀释水送至计量混合系统进行混合，经稀释后重新计量分配的氨水送入喷射系统。喷射系统实现各支喷枪的氨水溶液雾化喷射。还原剂的供应量能满足锅炉不同负荷的要求，调节方便、灵活、可靠；氨水计量混合和喷射系统配有良好的控制系统。

关键技术

- 利用先进的计算机流场模拟（CFD）对锅炉的流场进行模拟，并根据此结果选取合适的喷枪布置方案以及合理的喷枪设计；
- 计量分配系统实时和出口 NO_x 浓度和氨逃逸浓度形成连锁，使其在稳定达标排放的前提下，获得最低的运行成本。
- 系统采用模块化设计，工厂内进行系统测试与总装，现场安装与调试简便，工程周期短。



图 2-45 案例工程图

主要技术指标

本项目循环流化床锅炉烟气SNCR脱硝工程脱硝效率达到67%，氨逃逸小于8mg/Nm³。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资费用约为 300 万元。

用户意见

本项目根据锅炉特点进行针对性设计，系统投入以来运行稳定，脱硝效果好，运行费用较低，各项指标满足合同要求和实际需求，圆满实现氮氧化物的控制目标。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn

典型案例（二）

案例名称

1×220t/h 循环流化床锅炉烟气脱硝工程

项目概况

本项目所采用的SNCR脱硝技术以20%的氨水溶液作为还原剂，氨水喷射位置位于旋风分离器入口烟道处。在进口浓度为 $350\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的锅炉运行条件下，该SNCR脱硝工程能稳定运行，实现70%的脱硝效率，出口 NO_x 浓度低于 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

主要工艺原理

该工程采用选择性非催化还原法脱硝技术，还原剂（氨水）是以雾化的水溶液形式喷入到温度为 $850\sim 1050^\circ\text{C}$ 的区域，与 NO 发生还原反应生成 N_2 和水。

SNCR系统主要包括氨水卸载系统、氨水储存系统、氨水输送系统、稀释水系统、计量混合系统、喷射系统和电气控制系统。氨水卸载系统实现将氨水从氨车卸载到氨水储罐中，氨水储存系统储存20~25%的氨水，然后由氨水输送系统和稀释水系统将氨水、稀释水送至计量混合系统进行混合，经稀释后重新计量分配的氨水送入喷射系统。喷射系统实现各支喷枪的氨水溶液雾化喷射。还原剂的供应量能满足锅炉不同负荷的要求，调节方便、灵活、可靠；氨水计量混合和喷射系统配有良好的控制系统。

关键技术

- 利用先进的计算机流场模拟（CFD）对锅炉的流场进行模拟，并根据此结果选取合适的喷枪布置方案以及合理的喷枪设计；
- 计量分配系统实时和出口 NO_x 浓度和氨逃逸浓度形成连锁，使其在稳定达标排放的前提下，获得最低的运行成本。
- 系统采用模块化设计，工厂内进行系统测试与总装，现场安装与调试简便，工程周期短。



图 2-46 案例现场图

主要技术指标

本项目循环流化床锅炉烟气脱硝工程脱硝效率达到70%，氨逃逸小于 $8\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资费用约为 350 万元。

用户意见

本项目 SNCR 脱硝系统根据锅炉特点进行针对性设计，系统投入以来运行稳定，脱硝效果良好，运行费用较低，各项指标满足合同要求和实际需求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江天蓝环保技术股份有限公司

联系人：莫建松

地址：浙江省杭州市萧山区北干街道兴议村

邮政编码：311212

电话：0571-83787379

E-mail: mojs1977@tianlan.cn



图 2-48SNCR 脱硝系统氨区图 2-49SNCR 脱硝炉前系统

主要技术指标

根据第三方检测报告，本项目脱硝系统脱硝率大于 70%，氮氧化物排放浓度 $\leq 100\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，达到设计要求，达到环保排放标准。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1300 万元。

运行费用

根据 2012 年 10 月-2013 年 10 月实际运行情况，年维修费用不超过 5 万元，年运行费用约 300 万元，年减排氮氧化物约 960 吨（按年利用小时 7000 小时计算）。

用户意见

本项目 2012 年完成了 $3\times 75\text{t}/\text{h}+3\times 130\text{t}/\text{h}$ 共 6 台循环流化床锅炉烟气脱硝改造工程，SNCR 烟气脱硝工程自改造完成正式投运至今，运行状况良好，设备运转正常， NO_x 排放满足环保要求， NO_x 排放浓度从初始 $330\text{mg}/\text{Nm}^3$ 下降到 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江百能科技有限公司

联系人：刘茂省

地址：杭州市文三路 478 号华星时代广场 C 座 2 层

邮政编码：310012

电话：0571-89939250-600

E-mail: liums@pyneo.com

33.水泥窑炉选择性催化还原法（SCR）烟气脱硝技术

根据水泥窑炉氮氧化物的形成机理，水泥窑炉 NO_x 减排的技术措施有两大类：一是从源头上治理，控制煅烧中生成 NO_x；其技术措施：①采用低氮燃烧器；②分解炉和管道内的分段燃烧，控制燃烧温度；③改变配料方案，采用矿化剂，降低熟料烧成温度。二是从末端治理，即控制烟气中排放的 NO_x，其技术措施：①“分级燃烧+SNCR”，国内已得到推广应用；②选择性非催化还原法（SNCR），国内已实现了产业化规模化应用；③选择性催化还原法（SCR），目前欧洲只有三条线实验；④SNCR/SCR 联合脱硝技术，国内水泥脱硝还没有成功经验；⑤生物脱硝技术（正处于研发阶段）。

选择性催化还原法（SCR）已成为全世界燃煤电厂高效控制 NO_x 的主流技术之一，但在水泥窑炉、钢铁烧结机等行业的应用还不多。低温 SCR 脱硝技术具有较高的脱硝率和节能的特点，可应用于水泥窑炉尾气 NO_x 的脱硝，但目前低温 SCR 脱硝催化剂在低温范围内脱硝率还不是很高、反应机理及毒化机理还不十分明确，加之成本原因，使得低温 SCR 脱硝技术未能规模化推广应用于水泥行业 NO_x 的高效控制。在国家相关科技计划的支持下，我国在低温 SCR 脱硝催化剂配方及其成型工艺研究上取得了重要进展，相关关键技术在水泥窑炉上得到了中试示范应用。

典型案例

案例名称

水泥窑 SCR 烟气脱硝治理中试项目

项目概况

2011 年 8 月开始设计，当年 12 月开工建设，2012 年 4 月完成设备试运行。

主要工艺原理

采用喷氨氮氧化物选择性还原（SCR）脱硝技术，主要工艺原理如下：设置催化剂装置于水泥窑路烟囱的旁路出口，然后喷入的氨与烟气中的氮氧化物反应实现脱硝，反应温度区间约在 150°C~200°C，脱硝后烟气经除尘由烟囱排入大气。

关键技术或设计创新特色

- 本项目 SCR 催化剂在经典 V₂O₅-WO₃-TiO₂ 催化剂的基础上进行配方改进，在保证脱硝效率的同时，极大地提高催化剂的低温脱硝性能，并使催化剂能够在高灰和高碱的恶劣的烟气环境下长期稳定运行。

主要技术指标

催化剂运行工况如表 2-3 所示。

表 2-3 本项目脱硝烟气成分

项目名称	水泥窑脱硝示范线	HCl,ppmv	0.33 mg/m ³
设备类型	水泥窑	SO _x , ppmv	0
运行温度（℃或°F）	150℃	SO ₃ , ppmv	0
运行压力（绝压或表压）	250Pa		
气体流量	330000m ³ /h	粉尘收集设备（布袋等）	布袋
O ₂ , vol%, (氧气)	12.5	布袋前是否注入石灰或活性炭	否
H ₂ O, vol%, (水)	4.9	粉尘程度 mg/m ³	10
NO ppmv	800mg/Nm ³	微粒粒度分布,%<1 微米（选）	
NO _x ppmv		粉尘组成（选）	

在 150°C~200°C 脱硝效率达到 70%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 0.2 亿元。

预计运行成本

氨费用：<300 万元/年，水、电、气、管理等运行费用：<200 万元/年。

用户意见

本项目中试结果表明，催化剂在 150°C~200°C 达到超过 70% 的脱硝效率，显示了优异的低温脱硝性能，在水泥厂等低温脱硝中的应用前景广阔，为实现我国水泥厂未来的低温脱硝提供了有益借鉴。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学材料学院 联系人：吴晓东

地址：北京市海淀区清华大学逸夫技术科学楼 2415 邮编：100084

电话：010-62792375 E-mail: wuxiaodong@tsinghua.edu.cn

34.工业锅炉用增强型选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术

SNCR 脱硝技术即选择性非催化还原技术是一种不需要催化剂的脱硝方式。在 850℃~1050℃的温度范围内，通过将含氨基的还原剂（如氨水、尿素溶液）喷入炉内，将烟气中的 NO_x 还原脱除，生成氮气和水从而脱除 NO_x 的目的。在国家科技部、环保部、工信部等有关部门的支持下，我国 SNCR 脱硝技术及其标准化、产业化取得了重大进展，提高了脱硝设施工程建设质量和运行管理水平，其烟气处理量高达 600000Nm³/h，实现 SNCR 烟气脱硝系统的完全自动化。

该技术可用于中小型工业锅炉的 NO_x 排放控制，投资成本较采用 SCR 技术低 60%以上，脱硝效率可达 60%以上。可经济有效地解决中小型工业锅炉的 NO_x 排放污染问题。

典型案例

案例名称

35t/h 自备锅炉链条炉安装增强型 SNCR 脱硝装置工程

项目概况

本技术以氨水为还原剂，添加10%添加剂对还原剂进行改性，采用两层多点喷射方式，实现了64%的脱硝效率，达到国家以及广东省工业锅炉NO_x排放的标准限值以下（200mg/Nm³）。

主要工艺原理

针对工业锅炉实施 SNCR 脱硝技术时因空间局限遇到的反应温度和停留时间问题，利用添加剂诱发还原剂的脱氢反应，形成具有高还原活性的反应基团，将烟气中的 NO 还原为 N₂，从而促进了 SNCR 脱硝反应的进行，有效降低了反应的温度窗口并缩减了反应时间，提高了脱硝效率。

整个增强型 SNCR 脱硝系统由还原剂和添加剂存储系统、还原剂输运系统、还原剂喷射系统和控制系统四部分组成。按一定计量比将添加剂定量投放到还原剂罐或者与还原剂在输运管路中的混合器进行混合后，由喷枪喷入炉膛内，与烟气中的 NO_x 发生氧化还原反应，达到脱硝效果。

关键技术

- 添加剂对 SNCR 反应的增强效应；
- 还原剂多级喷射系统。



图 2-50 案例现场图

主要技术指标

本项目在 35t/h 链条炉上安装增强型 SNCR 脱硝装置，脱硝效率达 60% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

总投资 100 万元(以 35t/h 链条炉为例)；主体设备寿命 20 年。该技术可用于中小型工业锅炉的 NO_x 排放控制，投资成本较采用 SCR 技术低 60% 以上，脱硝效率可达 60% 以上。可经济有效地解决中小型工业锅炉的 NO_x 排放污染问题。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学热能工程系 联系人：宋蕾

地址：北京市海淀区清华园 1 号清华大学热能工程系 邮编：100084

电话：010-62781740 E-mail: qsong@tsinghua.edu.cn

35.水泥窑 SNCR 脱硝技术

水泥窑 SNCR 脱硝技术是目前能够适应我国水泥炉窑工况、能满足新的排放标准和国内市场需求的一种烟气脱硝工艺，其主要原理是在没有催化剂的条件下，在 850~1050℃ 的温度范围内，把还原剂（氨气或尿素）喷入水泥炉窑内，还原剂与炉窑中的氮氧化物（主要是一氧化氮和二氧化氮）发生化学反应，生成氮气和水，从而减少烟气中氮氧化物的排放，且无二次污染物生成。我国 SNCR 脱硝技术及其标准化、产业化取得了重大进展，提高了脱硝设施工程建设质量和运行管理水平，其烟气处理量高达 600000Nm³/h，实现 SNCR 烟气脱硝系统的完全自动化。

该技术的脱硝效率一般大于 65%，可达 70% 以上；新建炉窑的 NO_x 排放浓度控制在 200mg/Nm³ 以下，原有炉窑改造的 NO_x 排放浓度控制在 300mg/Nm³ 以下；单位减排成本约 3000 元/t·NO_x，运行成本一般为 3~5 元/t 熟料。该技术效率高、耗能低、投资低和占地面积小；适用于国内水泥窑炉烟气脱硝。

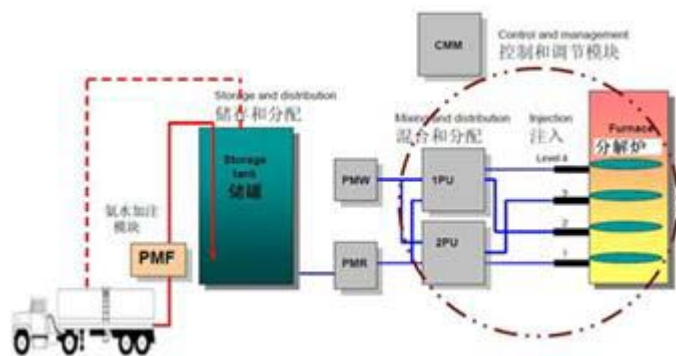


图 2-51 SNCR 法烟气脱硝示意图



图 2-52 烟气脱硝示范工程

典型案例（一）

案例名称

4500t/d 水泥生产线配套 SNCR 烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2011 年 11 月开始设计，2011 年 12 月脱硝项目开工建设，2012 年 2 月脱硝装置完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用新型干法水泥旋窑 SNCR 脱硝技术，主要工艺原理如下：新型干法水泥旋窑 SNCR 脱硝技术是在没有催化剂的条件下，在 850~1050℃ 的温度范围内，把还原剂（氨气或尿素）喷入水泥炉窑内，还原剂与炉窑中的氮氧化物（主要是一氧化氮和二氧化氮）发生化学反应，生成氮气和水，从而减少烟气中氮氧化物的排放。本项技术是在传统 SNCR 脱硝技术的基础上，开发出既能采用尿素，又能采用氨水作为还原剂的系统；对于尿素溶解系统，其热源可以实现电加热和蒸汽加热方式的自动切换；喷枪采用变流量控制技术，既可以提高脱硝效率，又可以降低能耗，同时能降低对分解炉内温度场的影响。

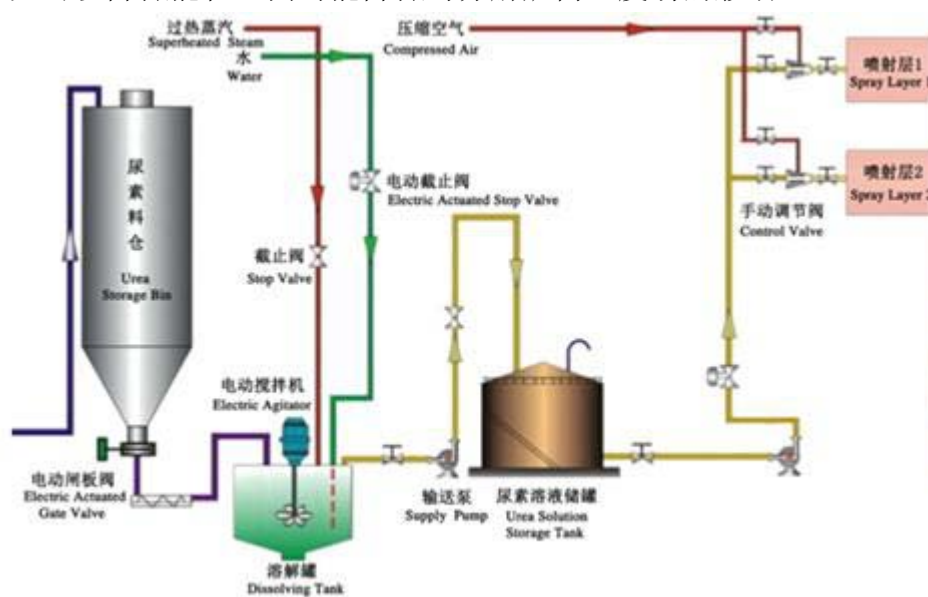


图 2-53 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 喷枪位置的确定：喷枪布置位置直接关系到脱硝效率的高低。研究表明：当采用尿素作为还原剂时，当分解炉内温度在 980~1030℃ 时，脱硝效率最佳；采用氨水作为还原剂，最佳的反应温度窗口在 840~910℃。
- 尿素溶液的雾化要求：为了使尿素溶液有良好的雾化效果，必须具体选择喷嘴的结构和喷嘴处的液体、气体压力和流量。喷嘴处的液体压力一般为 0.34MPa，喷嘴处的气体压力一般为 0.43MPa。
- 喷枪的结构和材质：为了解决喷枪能够长期经受高温烧灼的影响而不变形，一方面枪体采用合金材料，另一方面，在枪体的外部设置保护套，

使得喷枪本体能够避免受高温烟气的直接烧灼。同时，喷枪枪头被包裹在保护套内，避免了高尘烟气对喷枪枪头的磨损和堵塞。同时，保护套的设计要考虑保护套变形对枪体的影响。喷枪的结构型式见下图。喷枪的喷体材料选用 310 合金材料。

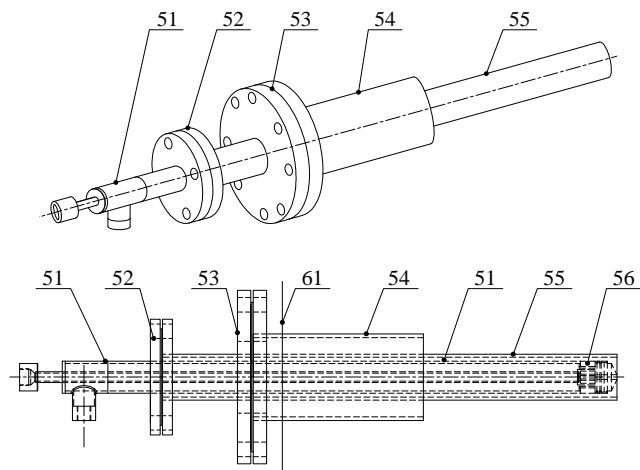


图 2-54 新型水泥 SNCR 脱硝系统喷枪结构型式

51-枪体 52-枪体法兰 53-预埋套管法兰 54-预埋套管 55-保护套管 56-喷嘴 61-炉壁



图 2-55 案例现场图



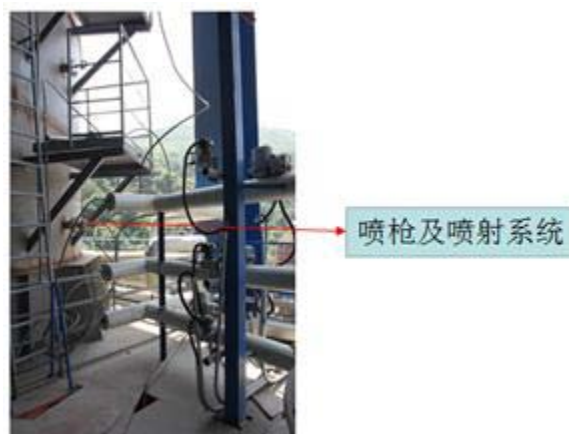


图 2-56 现场工程照片

在分解炉上布置三层喷枪,当温度场变化后,能根据对应喷枪层的温度情况,选择合适的喷枪层投入,保证喷入炉内的还原剂,始终处于最佳的反应温度期间。

主要技术指标

本工程运行一年以上,根据第三方监测数据,氮氧化物实测浓度为 $185\text{mg}/\text{m}^3$ 、脱硝效率可达到 66%,满足我们国家的最新氮氧化物排放标准,即原有炉窑改造的氮氧化物排放浓度控制在 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。(烟气处理量 $5.37\times 10^5\text{Nm}^3/\text{h}$, NO_x 入口浓度为 $519\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 468 万元。

运行费用

根据 2012 年 3 月-2013 年 3 月实际运行情况,水、电、粉、气、管理等运行费用约为 220 万元/年,年维修费用约 10 万元。

用户意见

本项目采用的 SNCR 脱硝系统设计科学合理、技术配合全面、服务及时到位,能从用户的需求角度出发,满足用户技术要求和实际需求,为我司的氮氧化物控制提供了有效的控制手段。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:福建龙净环保股份有限公司

联系人:郭上迎

地址:福建省龙岩市新罗区陵园路 81 号

邮政编码:364000

电话:13959061102

E-mail:13959061102@139.com

典型案例（二）

案例名称

2500t/d 水泥窑配套增强型 SNCR 脱硝装置

项目概况

本技术已申请国家发明专利2项CN102806002A和CN103007707A。

主要工艺原理

针对水泥窑的工艺特点以及 NO_x 的形成机理，在分解炉采用 SNCR 脱硝技术对 NO_x 进行脱除。通过采用添加剂对还原剂进行改性、还原剂多级喷射布置方案和喷枪的特有设计，有效促进了还原剂与烟气的混合以及脱硝反应的进行，并显著减轻了炉内粉体对 SNCR 反应的抑制作用，从而显著提高了脱硝效率，使得水泥窑 SNCR 脱硝装置具有超过 70% 脱硝效率的高脱硝性能。

整个增强型 SNCR 脱硝系统由还原剂和添加剂存储系统、还原剂输运系统、还原剂喷射系统和控制系统四部分组成。按一定计量比将添加剂定量投放到还原剂罐或者与还原剂在输运管路中的混合器进行混合后，由喷枪喷入炉膛内，与烟气中的 NO_x 发生氧化还原反应，达到脱硝效果。

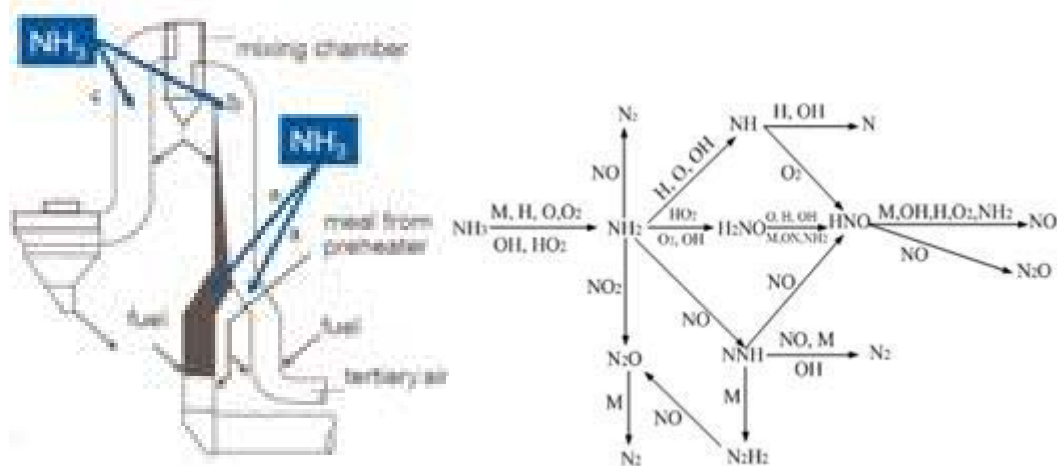


图 2-57 本项目技术原理图

关键技术

- 还原剂改性方法；
- 多级喷射系统；
- 防结垢、高效喷枪；
- 分解炉内 SNCR 数值模拟和设计方法。



图 2-58 案例现场图

主要技术指标

本项目以氨水为还原剂，添加 10% 添加剂对还原剂进行改性，采用两层多点喷射方式，实现了 71% 的脱硝效率，达到国家水泥窑 NO_x 排放的标准限值以下（320mg/Nm³）。

投资及运行效益分析

总投资 300 万元（以 5000t/D 炉为例）；主体设备寿命 20 年。该技术可用于水泥窑的 NO_x 排放控制，投资成本较采用 SCR 技术低 60% 以上，脱硝效率可达 70% 以上。可经济有效地解决水泥窑的 NO_x 排放污染问题。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学热能工程系

联系人：宋蓄

地址：北京市海淀区清华园 1 号清华大学热能工程系

邮编：100084

电话：010-62781740

E-mail: qsong@tsinghua.edu.cn

典型案例（三）

案例名称

2000t/d 水泥炉窑 SNCR 法烟气脱硝工程

项目概况

本项目于 2012 年 6 月开工，2012 年 7 月安装完工。调试工作从 2012 年 7 月开始，按照调试方案，完成了设备单体调试、系统联运和运行优化。2012 年 8 月，系统投入 168h 试运行。2012 年 10 月通过环保验收。

主要工艺原理

SNCR 技术是在水泥窑的适当位置喷入含有氨基的还原剂，使烟气中已生成的 NO_x 被还原为 N_2 。含有氨基的还原剂主要有氨气、液氨、氨水和尿素。对于不同还原剂，对应的温度窗口亦有所区别，以 NH_3 为还原剂的最佳温度窗口在 $760\sim 930^\circ\text{C}$ 之间，以尿素为还原剂，对应的脱硝反应最佳温度窗口为 $950\sim 1040^\circ\text{C}$ ，较之氨气稍高。氨水是水泥窑 SNCR 法脱硝最适合的还原剂。SNCR 技术关键是还原剂喷射在合适的温度窗口以及喷入的还原剂与烟气中的 NO_x 能够进行充分混合，从而实现较高的脱硝效率，提高还原剂利用率，降低还原剂耗量和尾部氨逃逸。对水泥窑，无论还原剂喷入分解炉或烟室之后的烟道内，较之大型工业锅炉，烟气在适合脱硝反应的温度窗口内停留时间更长，混合效果更好，脱硝效率至少可以达 60% 以上，同时又不引起氨逃逸超标。

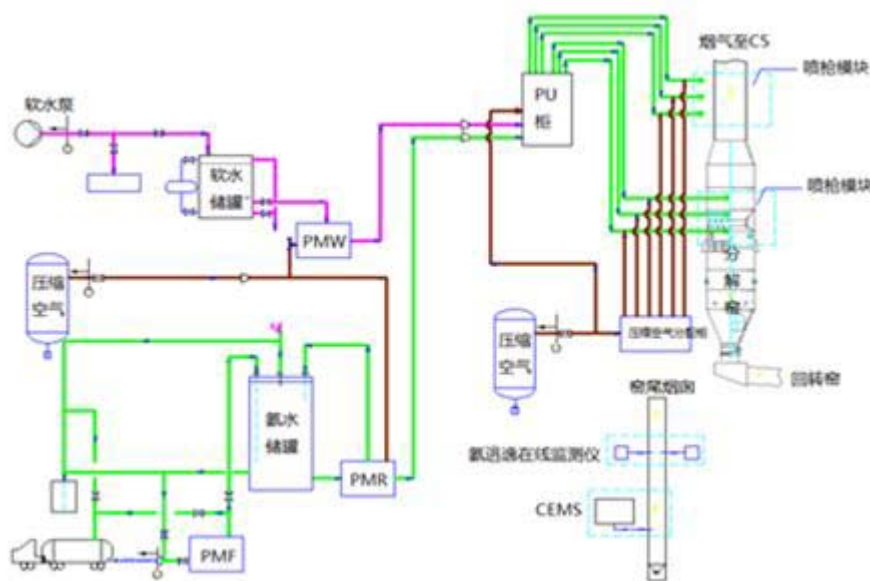


图 2-59 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 专注于控制算法和策略，最大限度节省还原剂及运行费用；
- 模块化设计、最大限度缩短施工、调试周期；
- 抗负荷波动范围大、能适应最恶劣工况；
- 针对氨水充分考虑安全性措施；
- 更有效响应负荷波动。



图 2-60 案例现场图

本区布置氨水储罐、氨水卸载模块、氨水输送模块、软水输送模块及泵房。控制系统布置在脱硝控制室房内。

主要技术指标

(1) 工程处理烟气量 $300000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，初始 NO_x 排放浓度 $700\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标态，干基， $10\%\text{O}_2$)，系统投运后 NO_x 排放浓度低于 $250\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硝效率大于 64.3% ，氨逃逸小于 $8\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标态，干基， $10\%\text{O}_2$)。

(2) 脱硝设施投运后正常情况下直接运行成本低于 4.2 元/吨水泥熟料。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 700 万元。

运行费用

根据实际运行情况，氨水(20wt%)年需求量 3024 吨；电年需求量 48000 kWh；水需求量 16 吨。系统的运行直接成本为 3.5 元/吨熟料。

用户意见

本项目采用 SNCR 烟气脱硝技术及设备，系统运行稳定，经过 168 小时满负荷试运行后，各项技术指标均达到设计要求；该系统采用的喷枪具有良好的耐高温性能和耐磨蚀性能；SNCR 系统自动化程度高，能有效相应生产负荷变化，调整喷入的氨水量，使处理后的 NO_x 排放浓度达到目标值。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江省环境保护科学设计研究院

联系人：顾震宇

地址：浙江省杭州市天目山路 111 号

邮编：310007

电话：13957120448

E-mail: zy_g@163.com

典型案例（四）

案例名称

5000t/d 水泥炉窑 SNCR 法烟气脱硝工程

项目概况

本项目采用 SNCR 烟气脱硝技术，还原剂采用浓度约为 20~25wt% 的氨水。二号线水泥炉窑烟气脱硝系统工程于 2012 年 9 月开工，2012 年 10 月安装完成，具备调试条件。二号线脱硝系统的单体调试工作和分系统调试工作于 2012 年 11 月开始，完成了设备单体调试，输送系统和喷射系统管道清洗吹扫、喷枪雾化试验。并于 2013 年 3 月对二号线脱硝系统进行了 168 小时满负荷性能试验。

主要工艺原理

SNCR 技术是在水泥窑的适当位置喷入含有氨基的还原剂，使烟气中已生成的 NO_x 被还原为 N_2 。含有氨基的还原剂主要有氨气、液氨、氨水和尿素。对于不同还原剂，对应的温度窗口亦有所区别，以 NH_3 为还原剂的最佳温度窗口在 $760\sim 930^\circ\text{C}$ 之间，以尿素为还原剂，对应的脱硝反应最佳温度窗口为 $950\sim 1040^\circ\text{C}$ ，较之氨气稍高。氨水是水泥窑 SNCR 法脱硝最适合的还原剂。SNCR 技术关键是还原剂喷射在合适的温度窗口以及喷入的还原剂与烟气中的 NO_x 能够进行充分混合，从而实现较高的脱硝效率，提高还原剂利用率，降低还原剂耗量和尾部氨逃逸。

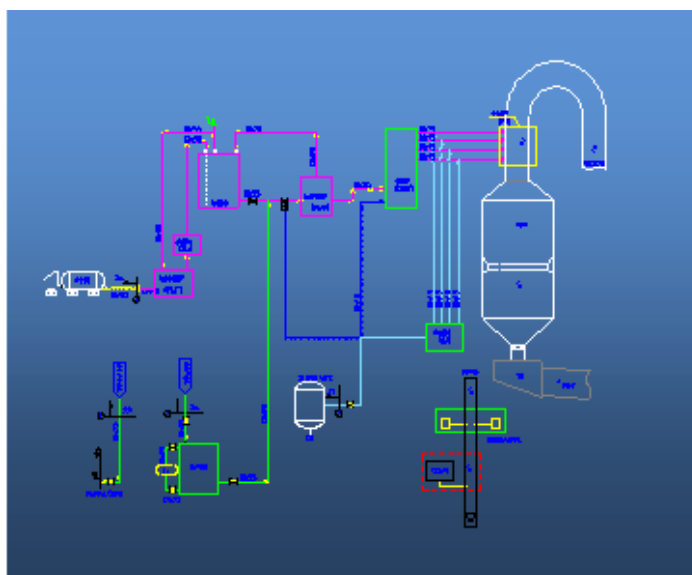


图 2-61 本项目脱硝工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 专注于控制算法和策略，最大限度节省还原剂及运行费用；
- 模块化设计、最大限度缩短施工、调试周期；
- 抗负荷波动范围大、能适应最恶劣工况；
- 针对氨水充分考虑安全性措施；
- 更有效响应负荷波动。



图 2-62 案例现场图

主要技术指标

本项目 NO_x（按 NO₂@10vol%O₂，干基）排放浓度小于 400mg/Nm³；初始 NO_x（按 NO₂@10vol%O₂，干基）浓度为 1000mg/Nm³ 时，脱硝效率≥60%；氨逃逸（气相@10vol%O₂，干基）<8 mg/Nm³；还原剂消耗（25wt%）890kg/h。

投资及运行效益分析

运行费用

根据实际运行情况，吨熟料氨水耗量为 3.45kg/t，如按氨水市场价浓度为 20wt%氨水每吨 1000 元计算，每吨熟料增加成本约 3.45 元。

用户意见

本项目采用 SNCR 烟气脱硝技术及设备，系统运行稳定，经过 168 小时满负荷试运行后，各项技术指标均达到设计要求。该系统采用的喷枪具有良好的耐高温性能和耐磨蚀性能。本项目 SNCR 系统自动化程度高，能有效响应生产负荷变化，调整喷入的氨水量，使处理后的 NO_x 排放浓度达到目标值。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江省环境保护科学设计研究院

联系人：顾震宇

地址：浙江省杭州市天目山路 111 号

邮编：310007

电话：13957120448

E-mail: zy_g@163.com

36. 燃煤烟气 SSNCR 脱硝技术

常规的燃煤锅炉 SNCR 烟气脱硝技术多采用尿素溶液、氨水或化工废氨水作为还原剂。以氨水作为还原剂，运行成本较高，同时存在氨逃逸及安全性的问题；以化工废氨水作为还原剂，品质不能保证，造成脱硝效率不稳定；以尿素溶液作为还原剂，尿素在 850℃ 以上的高温条件下直接分解为 NH_3 和 CO ，脱硝反应速率较低，尿素利用率较低。

利用蒸汽雾化尿素溶液的方法，可使尿素溶液在加热条件下预先分解为 NH_3 和 HCN ，提高尿素的穿透能力以及与烟气混合均匀度，提高还原剂的反应活性和反应速率，达到稳定脱硝效率的目的。

以 2t/h 锅炉 SSNCR 烟气脱硝为例，应用水蒸汽雾化尿素溶液进行烟气脱硝，结果表明，在 NH_3/NO 摩尔比小于 1.4 的条件下，SSNCR 脱硝技术脱硝效率可达 62.5%，脱硝效果非常明显。在相同条件下，该水蒸汽雾化还原剂技术比压缩空气雾化可提高脱硝效率 5~12%。



图 2-63 示范工程图

典型案例

案例名称

85t/h 煤粉锅炉 SSNCR 烟气脱硝技术示范工程

项目概况

本项目为广州市 2010 年亚运会期间广州市人民政府限期治理的项目，针对 85t/h 煤粉锅炉进行 SSNCR 烟气脱硝，项目总投资为 225 万元，于 2010 年 10 月完成验收。本项目研究共申请 7 项国家专利，获得已授权国家专利 3 项，获软件知识产权 1 项。该项技术获环境保护科学技术奖二等奖、中国产学研合作创新成果奖和全国优秀工程咨询成果二等奖。

主要工艺原理

采用 180℃~200℃的水蒸汽输送 5~10%的尿素溶液等还原剂，通过向处于 800℃~1100℃的温度窗口的锅炉炉膛喷吹并雾化尿素溶液，在输送过程中将尿素预先分解为还原性较强的氨气（ NH_3 ）和氢氰酸（HCN），大大提高了还原 NO_x 的能力，提高了脱硝效率。

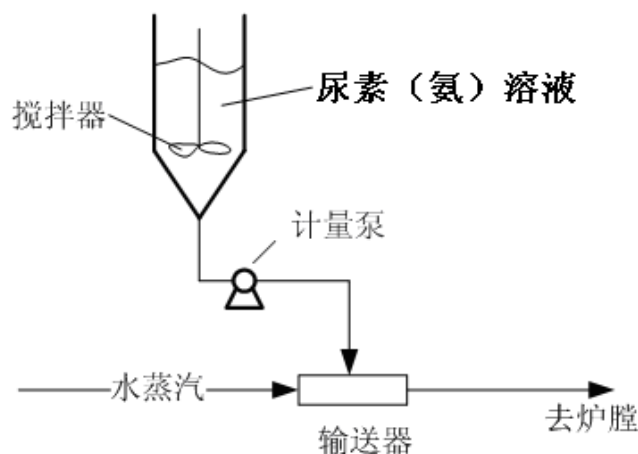


图 2-64 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用水蒸汽输送尿素还原剂，提高了还原剂的利用率。
- 通过 CFD 进行锅炉温度场分析，优化还原剂雾化喷枪布置。

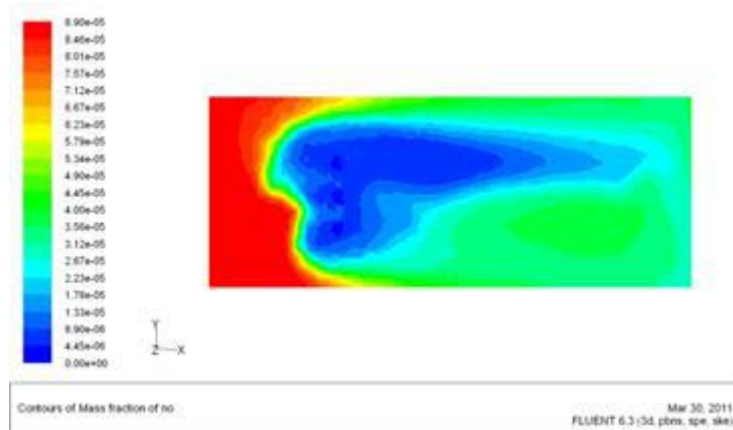


图 2-65 吸收塔数值模拟浓度分布图

主要技术指标

该项技术在 NH_3/NO 小于 1.2 时, SNCR 脱氮效率达 40.7%, 氨逃逸低于 $4\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本项目总投资 225 万元。

运行费用

本项目运行费用主要为尿素还原剂和水蒸汽成本, 消耗尿素 $490.8\text{t}/\text{a}$, 消耗水蒸汽 $4.9\text{t}/\text{a}$ 。可实现减排氮氧化物达 $268.8\text{t}/\text{a}$, 按排放一吨氮氧化物所造成的经济损失为 5000 元计算, 每年可减少经济损失 134.4 万元, 节省氮氧化物排污费用 26.88 万元。

用户意见

本烟气脱硝项目实施后不仅提高了我公司的社会形象, 同时具有重大的经济、社会和环境效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 中国环境科学研究院

联系人: 王凡

地址: 北京市朝阳区安外北苑大羊坊 8 号

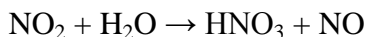
邮政编码: 100012

电话: 010- 84934516

E-mail: fanwangsd@yahoo.com

37. 臭氧氧化脱硝技术

臭氧氧化吸收脱硝法以臭氧为氧化剂将烟气中不易溶于水的NO氧化成NO₂或更高价的氮氧化物，然后以相应的吸收液（水、碱溶液、酸溶液或金属络合物溶液等）对烟气进行喷淋洗涤，使气相中的氮氧化物转移到液相中，实现烟气的脱硝处理。经过氧化后的烟气在洗涤塔中主要发生如下反应：



全套臭氧氧化脱硝工艺系统简单，容易在原有脱硫塔基础上改造并实现脱硫脱硝同时进行；脱硝效率高（可达90%以上）；根据烟气中氮氧化物的实时监测，可实现氧化剂（臭氧）投加量的精确控制，使系统的运行效率不受锅炉运行状态影响；系统运行温度低，可实现低温脱硝处理；系统运行效率不随运行时间增加而下降，大大减少脱硝系统的停机检修时间；臭氧的氧化能力也能实现对烟气中其它有害成分（如汞）的氧化脱除，能满足将来越来越严的环保要求。目前，该技术开始在国内石化行业应用。其脱硝效率一般大于85%，可达90%以上；NO排放浓度可达20mg/m³以下；100万m³/h工程投资大致为5000万左右；运行成本一般低于16元（每公斤NO）。该技术成熟、稳定，运行简单，脱硝效率高，且可以运用于温度较低的烟气脱硝中，以及燃煤电站锅炉烟气深度脱硝。

是“十一五”、“十二五”以来，在国家相关科技计划的资助下，我国在臭氧发生器放电结构和放电介质的设计研究、大功率变频谐振电源与臭氧发生器的参数研究、整体结构和放电管模块化结构的图纸设计研究、冷却系统、检测系统、PLC控制系统的研究设计以及臭氧发生系统的可靠性分析等方面取得重要进展，大幅提高了大型臭氧发生器的制造水平，使装置具有高效率、低能耗、体积小、寿命长、运行稳定可靠、价格低等显著优点。

典型案例

案例名称

石油催化裂化气烟气脱硝工程

项目概况

本项目脱硝装置于 2012 年 10 月完成试运行。

主要工艺原理

本项目采用臭氧氧化+碱液喷淋吸收脱硝技术，主要工艺原理如下：烟气经除尘后，与通入的臭氧反应，生成 NO_2 、 N_2O_5 ，在吸收塔内，热烟气与喷淋碱液接触发生化学吸收反应。

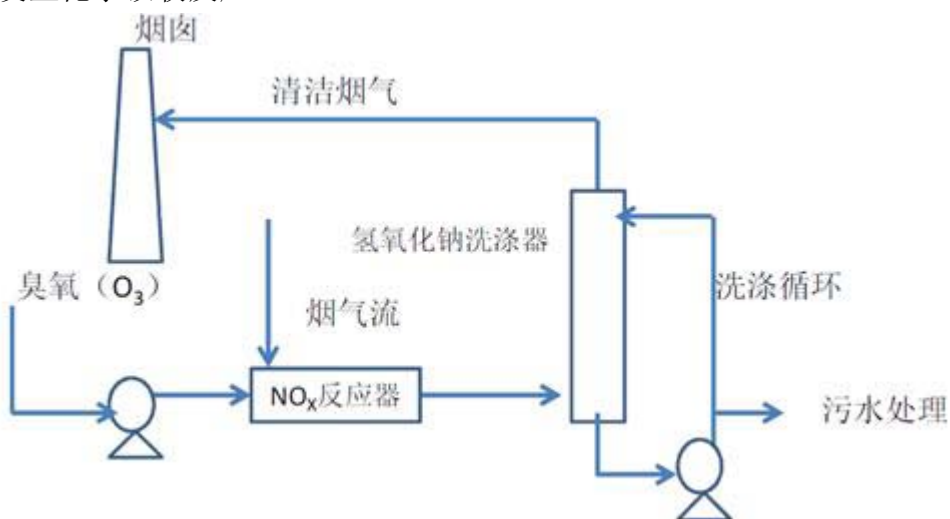


图 2-66 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 运用于脱硝项目中的国产大型臭氧发生器
- 世界最大型臭氧氧化脱硝项目



图 2-67 5 套 55kg/h (空气源) 臭氧发生器全貌照片



图 2-68 案例吸收塔图



图 2-69 单台 55kg/h (空气源) 臭氧发生器

主要技术指标

烟气来源：石油催化裂化气；

烟气流量：50 万 Nm^3/h ；

臭氧投加点烟气温度：180℃；

所用臭氧设备量：5 台 55kg 空气源臭氧发生器；

喷淋液液气比：>7。

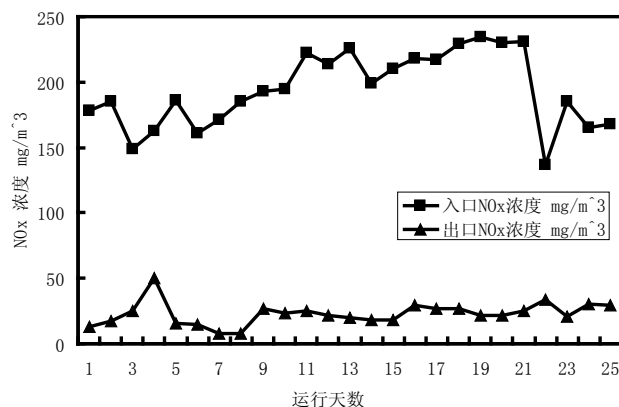


图 2-70 出入口 NOx 监控数据

经过近一个月的监控结果显示，入口 NOx（含 NO 及 NO₂）平均浓度为 194 mg/m^3 ，出口 NOx 平均浓度为 23 mg/m^3 ，完全达到国家烟气排放标准，其平均脱硝效率达 88%。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建新大陆环保科技有限公司

联系人：陈健

地址：福建省福州市马尾区儒江西路 1 号

邮政编码：350015

电话：059183979299

E-mail: james@newlanduv.com

38.改进型电炉烟气导流集成捕集技术

电炉短流程炼钢技术因在能耗、投资、占地面积及温室气体排放方面具有高炉/转炉长流程无可比拟的优势而获得了快速的发展。目前的电弧炉除尘是在微正压或微负压气氛下操作，不具备良好的密封性，即使在电炉冶炼时有炉内排烟的情况下也将有部分烟气溢出炉外，另外电炉在加料时也会有大量烟气外溢。因此电炉短流程炼钢方式也面临着较严重的环境问题。

电炉烟气除尘系统设计原则是在尽可能不影响工艺的条件下通过炉内排烟捕集绝大部分的一次烟气，另外溢出的二次烟气通过密闭罩/半密闭罩及屋顶罩等进行捕集。单纯炉内排烟和单纯的屋顶罩及密闭罩等捕集方式都存在二次烟气捕集率低的问题。

改进型电炉烟气导流集成捕集技术采用“半密闭导流烟罩+屋顶贮留集尘罩+铁水溜槽活动烟罩（又称兑铁水协同拟尘罩）”的联合方式捕集烟气，烟气再经袋式除尘器净化后达标排放。开发了改进型电炉烟气导流集成捕集关键技术，并实现了产业化应用。



图 2-71 容量屋顶贮留集尘罩



图 2-72 配套袋式除尘器

典型案例

案例名称

100 吨电炉炼钢工程配套除尘项目

项目概况

本项目于 2012 年 5 月与电炉等主体设备同步开始设计，2012 年 11 月与主体设备同步开工建设，2013 年 8 月与主体设备同步热负荷试运行。

主要工艺原理

电炉在加废钢、兑铁水和出钢过程中会产生大量的烟气，电炉冶炼时也会有烟气从电极孔溢出，本项目采用半密闭导流烟罩+屋顶贮留集尘罩+铁水溜槽活动烟罩（又称兑铁水协同拟尘罩）的联合方式捕集烟气，烟气由除尘器净化后，洁净空气由主风机排入烟囱达标排放。

（1）屋顶贮留集尘罩，针对 100 吨级及以上的大电炉除尘加料出钢等产生的高流量阵发性烟气，遵循气体流动动力学和热动力学的基本规律，充分考虑了烟气上升速度的大小、以及车间横向气流和行车加料位置对上升气流的干扰等因素，采用专有的屋顶大烟罩烟气贮留技术，防止烟气至罩口时形成的烟柱因烟气上升速度和温度的降低、及横向气流和行车加料位置的干扰而溢出至罩外引起污染。

（2）铁水溜槽活动烟罩，也称兑铁水协同除尘罩，主要针对屋顶罩捕集电炉通过溜槽兑铁水时产生的烟气，并进入电炉外排烟系统。具有不需要额外增加其他除尘系统，规模小、投资和能耗低，操作管理方便，风量小，捕集效率高等优点。

（3）半密闭导流罩辅助屋顶贮留集尘烟罩，主要捕集电炉加废钢和出钢阶段的烟气，同时附带捕集电炉熔炼时从电极孔等处溢出的部分烟气。具有投资小、电炉操作维护方便、车间横向气流干扰少、风量相对较小等优点，同时还具有降低电炉噪声和电弧光的辐射等功能。



图 2-73 案例现场图

关键技术或设计创新特色

- 电炉半密闭导流罩技术；
- 大容量屋顶贮留集尘罩技术；
- 兑铁水工艺采用兑铁水协同拟尘罩技术。

主要技术指标

结构简单可靠，收尘效果好的特点

投资及运行效益分析

本工程总投资约 4000 万元。

用户意见

本项目投运后，各项技术指标优良，环境效益良好，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：科林环保装备股份有限公司

联系人：吴建新

地址：江苏省苏州市工业园区通园路 210 号科林大厦

邮政编码：215021

电话：0512-62512888

E-mail: kelin@188.com

39.大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备

大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备是一种结构紧凑、过滤风速低、占地面积较小、净化效果好的低压脉冲布袋除尘设备。该类型除尘设备具有工作稳定、故障少、投资低等优点，处理风量大、耐高温、清灰效果好、排放浓度符合国家排放标准。其综合了目前国际上最优秀的长袋低压脉冲除尘技术，广泛应用于冶金行业电炉、转炉、混铁炉、铁合金炉、高炉、物料输送等除尘系统中。该技术主要特点：

(1) 采用耐高温滤料，设有均温沉降段，可避免大颗粒粉尘对滤袋的直接冲刷，提高使用寿命；可利用沉降段减少滤袋的负荷；沉降段阻力系数较低可降低阻损。

(2) 滤袋间距的合理布置，以及上升气流速度的有效控制，使进入除尘设备的含尘气体均匀地分布到每个滤袋，防止了滤袋间的碰撞和摩擦，有利于滤袋使用寿命的延长。

(3) 进出口风管进行优化处理，可降低阻损。

(4) PLC 控制优化清灰程序，使除尘设备阻力由常规的高陡变为低平。这是确保系统正常运行的关键。

(5) 对反吹气源进行脱水、脱油和冷冻、加热处理，可实现滤袋抗结露，同时提高了设备阻力的稳定性。

(6) 灰斗倾角大于 65° ，不易积灰、搭拱。

(7) 结构阻力低，使除尘设备稳定运行在 1300Pa 以下。

(8) 实行离线清灰，减少粉尘二次吸附。

(9) 小仓净化结构、离线、检修均对系统无影响，清洁换袋。

(10) 轻型袋笼，换袋轻松。

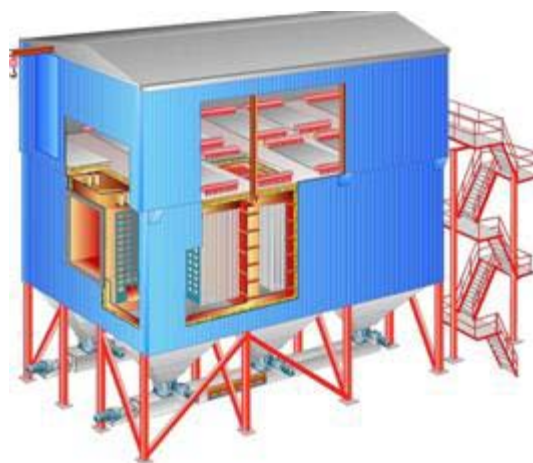


图 2-74 典型大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备结构图

典型案例

案例名称

2×90m² 烧结机烟气脱硫工程布袋除尘设备

项目概况

大流量高温长袋脉冲袋式除尘设备于 2003 年获五部委联合颁发的国家重点新产品证书；2004 年被评为国家重点环境保护技术推广项目；2005 年获中国电力科学技术二等奖；2009 年获中国电力建设成果一等奖。

本项目于 2009 年 9 月与脱硫装置主机同步开始设计，2010 年 3 月与主机同步开工建设，2010 年 9 月首套除尘装置与脱硫装置同步完成试运行。

主要工艺原理

除尘设备由上箱体、中箱体、灰斗、导流板、支架、滤袋组件、喷吹装置、离线阀、卸灰装置及检测、控制系统等组成。整套设备还包括检修平台、照明系统、检修电源等辅助设备。工作原理如下：含尘气体由进风烟道各入口阀进入各单元箱体，在箱体导流系统的引导下，大颗粒粉尘分离后直接落入灰斗、其余粉尘随气流进入中箱体过滤区，过滤后的洁净气体透过滤袋，经上箱体、提升阀、出风烟道排出除尘设备，经过风机和烟囱直接排放到大气中。

随着过滤工况的进行，当滤袋表面积尘达到一定量时，由清灰控制装置（差压或定时、手动控制）按设定程序，控制当前单元离线，并打开电磁脉冲阀喷吹，抖落滤袋上的粉尘。落入灰斗中的粉尘经由仓泵进入气力输灰系统。

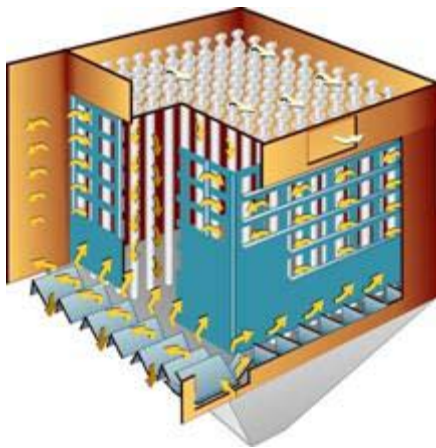


图 2-75 箱体及滤袋布置示意图

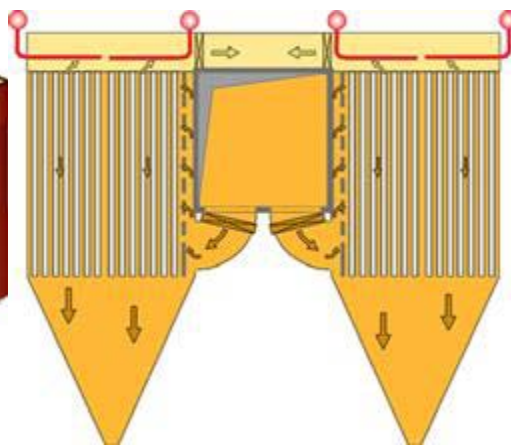


图 2-76 工作原理图

关键技术或设计创新特色

- 清灰利用脉冲气流实现，逐室、逐行进行清灰；过滤室执行清灰工序时处于在线状态。
- 对于高温、含湿、含油、粉尘较细和粘的除尘系统：采用喷粉或喂粉的方式，对新滤袋进行人工喂涂，使滤袋表面建立粉尘层，在滤袋室阻力达到 200Pa~400Pa 或喂粉量达到~250g/ m² 时，再投入系统运行。

- 对于常温、无油、粉尘较粗和干燥的除尘系统：采用人工调节风机的阀门减少风量，使过滤速度小于设计值，这样容易使最初的粉尘停留沉积在滤袋表面，形成粉尘层，然后逐渐增加至设计风量，使系统恢复正常。



图 2-77 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足 2012 年开始执行的《燃煤电厂大气污染物排放标准》的排放要求。除尘效率可达 99.99%；粉尘排放浓度稳定 $<10\text{mg}/\text{m}^3$ ； $\text{PM}_{2.5}$ 及重金属等有害物质去除效率可达 95%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 5800 万元。

运行费用

根据 2010 年 9 月-2011 年 9 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 200 万元/年，年备品备件及维修费用约 300 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该除尘工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：辽宁万和环保产业有限公司

联系人：徐文宝

地址：辽宁省沈阳市皇姑区崇山东路 34 号 6 楼

邮政编码：110033

电话：024-83787998

E-mail: lnwhhb@vip.163.com

40.密闭电石炉/矿热炉干法净化技术

密闭电石炉炉气净化技术于 20 世纪 80 年代中后期开始在我国得到应用。国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持，特别是“十二五”以来，被环保部选入《2012 年国家鼓励发展的环境保护技术目录》，被中国化工环保协会评为石油和化工行业环境保护清洁生产重点支撑技术。截止 2012 年底，我国已有多台实际运行的工程。该技术的除尘效率可达 99.9% 以上；出口排放浓度可达 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；炉压稳定在 $\pm 20\text{Pa}$ 范围之内；总投资大致为 400~600 万元。



图 2-78 工程现场图

典型案例（一）

案例名称

8×40.5MW 密闭电石炉炉气净化项目

项目概况

本项目于 2011 年 2 月与主机同步开始设计，2011 年 4 月与主机同步开工建设，2012 年 9 月首套净化装置与主机同步完成 72 小时试运行，并正常投产运行。2013 年 7 月第八套净化装置与主机同步完成 72 小时试运行，目前也正常运行。

主要工艺原理

本项目采用无阀离线清灰布袋过滤净化技术，主要工艺原理如下：600~800℃ 高温炉气从电石炉炉膛出来后经过一段夹水套管初步降温，然后通过一、二级缓冲罐进一步降温，把大部分火星和粗颗粒分离出来后，炉气再进入旋风冷却器再次降温，并采用风机强制风冷，旋风冷却器把炉气中的剩余火星和粗颗粒分离，进一步分离后的炉气由系统粗气风机鼓入布袋除尘器。通过在旋风冷却器出口采用变频自动控制技术控制出口炉气温度来确保出口炉气温度的稳定性，保证进入布袋除尘器的炉气温度控制在 220~260℃ 之间，以确保净化系统的布袋既不被高温烧毁，又不被低温炉气焦油析出糊袋。粗炉气经过布袋除尘器过滤后得到净炉气，系统工作一段时间（或阻力达到一个事先设定好的值）后，控制系统发出指令，除尘器顶部设置一个定位旋转机构配合引射管的作用，第一个大单元的定位旋转机构旋转定位到其第一个小单元室，利用引射管的作用对准该室的喷吹口，切断该室过滤，正常由增压风机出口净炉气或压缩氮气对该室进行反向吹扫，以达到清除滤袋表面灰尘。一般采取净炉气清灰 n 次而压缩氮气清灰 1 次的组合方式。也可以根据现场实际粉尘粘性大小进行任意组合。第一个小单元室清灰完成并留有充足的时间让粉尘落入灰斗后，定位旋转机构旋转其第二个小单元室，以此类推到第八个清灰完成后，旋转机构停留在第九个小单元室出风口位置，不影响 8 个小单元室的过滤工作。然后轮到第二个大单元进行同样的清灰动作，到最后一个大单元清灰完成即为一个清灰周期完成。一般净炉气可以用来直接烧石灰或者用作其他燃料，也可以作为价值更高的其他化工原料。缓冲罐、旋风冷却器和布袋除尘器收集下来的粉尘经过集中处理可以作为水泥原料。

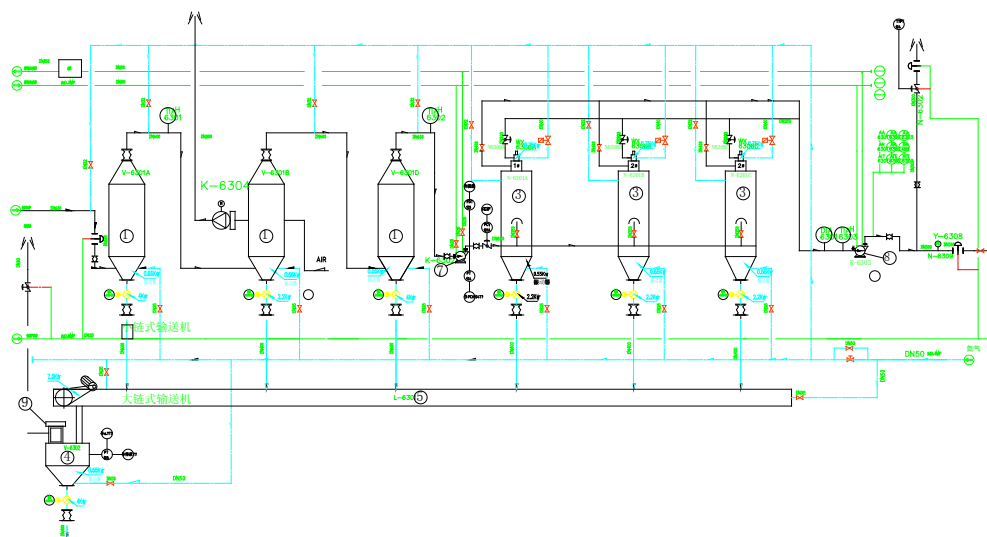


图 2-79 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的无离线阀实现离线清灰技术。
- 定位氮气脉冲和净气反吹复合应用技术。
- 下置式喷吹装置技术的开发与利用，便于巡检和维修，安全可靠。
- 有限的过滤面积和空间进行足够多的分室方式的技术应用。
- 所有运动部件尽可能外置，检修方便安全。



图 2-80 案例现场图

主要技术指标

本项目除尘效率达到 99.9% 以上 (粉尘入口浓度为 $5\text{g}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $6\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 3200 万元。

运行费用

根据 2012 年 9 月-2013 年 8 月单套实际运行情况，单套水、电、粉、气、人员管理等运行费用约为 60 万元/年，每套年维修费用约 3 万元。副产物净炉气全

部用来烧石灰窑，替代天然气或煤炭。经内部核算，每套一年副产物价值约为500万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产物净炉气品质良好。该净化工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：安徽威达环保科技股份有限公司

联系人：殷涛

地址：合肥市庐阳区紫溪路278号财富广场B座1301

邮政编码：230000

电话：15605605600

E-mail: yintao_weida@163.com

典型案例（二）

案例名称

密闭电石炉气净化提纯工程

项目概况

本净化工程于 2012 年 3 月运行至今。

主要工艺原理

从电石炉出来的高温炉气温度一般在 $600^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间，主、副烟道分别用一段直径为 $\text{O}350\text{mm}$ 水冷管套将高温烟气引入净化系统，使得进入旋风除尘器的烟气温度的 600°C 左右。烟气在除去粗颗粒（除尘效率 50% 左右）后进入冷却器。冷却器的形式为盘管水冷却器。进气方式设计为下进上出，设计指标为冷却器的进口烟气温度为 400°C ，通过冷却，冷却器的出口烟气温度为 250°C 。选用防爆高温反吹布袋除尘器，为了防止焦油析出和滤袋的破损，设定进入除尘器的烟气温度在 250°C 左右。首先，滤料选用的是能够长期在 250°C 高温工况下运行的玻纤滤料，瞬间温度能够承受 300°C 。对于除尘器的清灰，由于是负压系统，并且除尘器里不允许空气进入，所以采用引风机出口的净化气体然后再循环到进风主管道，这样清灰气体就形成了一个闭路系统，很好的避免了漏气危险，另外又能高效清灰。干法除尘系统出口炉气经加压至 10000pa ，送往调温器，始终控制温度 80°C 左右，进入催化吸附器，催化吸附器内装有 TQL-1 多功能催化剂，除去 HCN 和硫化物等杂质，净化气经水冷却器冷却至 35°C ，送往变压吸附系统。变压吸附阶段四个塔轮流切换操作，每个吸附塔经过吸附、均压降、逆放、抽空，然后进行均压升，终充等过程，解析气排空。半产品气即净化气进入 PSA-CO 工序，本阶段每个塔经过吸附、降压、置换、逆放、抽空、升压、终充等过程，将其中 CO 分离，最后得到产品 CO。

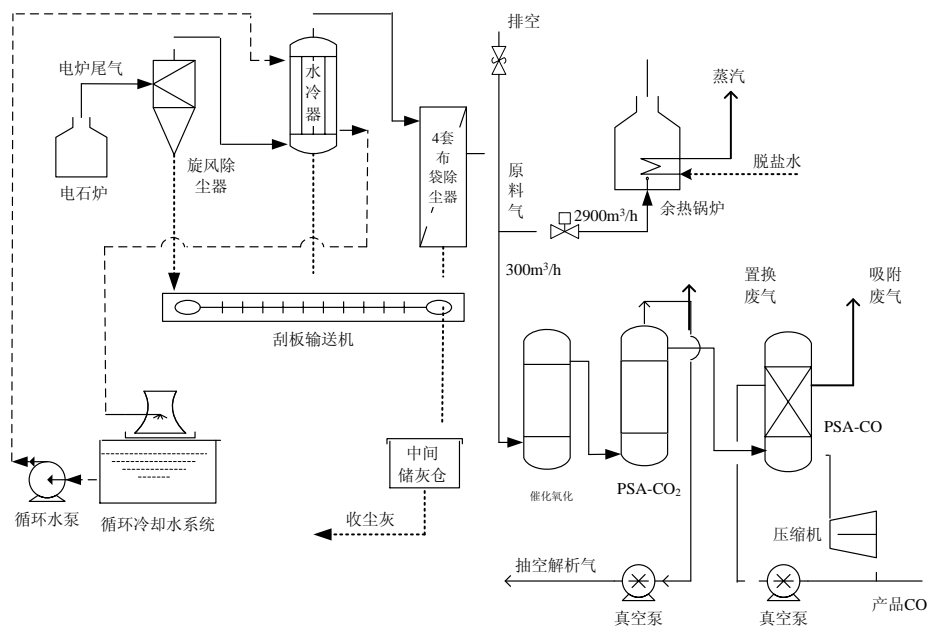


图 2-81 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

● 干法除尘系统关键技术。针对电石炉尾气温度高、粉尘含量高的特点，在除尘系统首端，设计了一套旋风除尘室，其作用有两个：一方面将炉气中的高温碳颗粒收集下来，避免其进入除尘器而烧毁滤袋；另一方面可将一部分的烟气粉尘收集下来，减少了过滤器处理的粉尘负荷。在降温方面引入了先进的降温技术，即热管换热技术，它能高效降温，并且能够在工况波动的情况下有效的进行控温。为避免灰尘粘在管壁上，每套热管系统上都配置了换热面自清系统，及时清理换热面上的浮灰。使换热管长期保持一定的换热效果，从而使进入除尘器的炉气温度控制在 240~260℃ 之间，实现烟气的精确控温，通过此技术解决了电石炉高温烟气预除尘难题。

● 干法催化氧化净化技术。用催化氧化的方法能够协同有效脱磷、脱硫、脱砷、脱氰及脱氟，整个工艺简捷、高效，并且中毒或失效后的催化剂易于再生，可重复利用。净化后尾气中磷含量 $<1\text{mg}/\text{m}^3$ 、硫含量 $<10\text{mg}/\text{m}^3$ 、砷含量 $<0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 、氟化氢含量 $<1\text{mg}/\text{m}^3$ 、氰化氢 $<1\text{mg}/\text{m}^3$ ，能够保证后续综合利用工艺的顺利进行。

● 干法除尘+催化氧化净化+变压吸附的密闭电石炉尾气工艺，既消除了密闭电石炉生产中的污染，又获得具有高价值的化工原料气，通过变压吸附提纯后，产品气 CO 含量大于 98%，可生产高附加值的产品。



图 2-82 干法除尘装置



图 2-83 催化氧化净化装置



图 2-84 变压吸附提纯装置

主要技术指标

本项目对密闭电石炉尾气干法除尘新技术进行了工业化验证,经除尘后的电石炉尾气可直接用于余热锅炉或气烧石灰等。进一步采用催化氧化工艺及变压吸附提纯工艺,气体净化后的氟、硫、磷、氰、砷等杂质含量小于 $1\text{mg}/\text{m}^3$,提纯后 CO 浓度大于 98%,净化气体质量可达到化工生产原料气的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2500 万元。

运行效益

本项目采用干法除尘技术每吨电石比纯湿法技术减少 1.25 吨循环水用量。以 10 万吨密闭电石炉(石灰由气烧窑供应)为例每年可节约标煤 2.28 万吨,减排二氧化碳 5.19 万吨。今后几年,如果采用净化后的尾气作为生产甲醇、二甲醚、醋酸等,采用该技术每吨电石回收利用 300Nm^3 一氧化碳,节约标煤 0.142 吨,减排二氧化碳 0.589 吨。以 10 万吨密闭式电石炉配套的甲醇、二甲醚装置为例每年将回收利用 3000 万 Nm^3 一氧化碳,节约标煤 1.42 万吨,减排二氧化碳 5.89 万吨,具有良好的经济和社会效益。

用户意见

本项目投运至今,各项技术指标优良,无任何环保事故,系统净化效率达到设计要求,各项耗能指标达到或优于设计要求。该工程带来了显著的经济环境效益,是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:昆明理工大学

联系人:宁平

地址:云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码:650500

电话:13708409187

E-mail: ningping58@sina.com

典型案例（三）

案例名称

12×40.5MVA电石炉炉气净化项目

项目概况

本项目于2011年3月与主机同步开始设计，2011年5月与主机同步开工建设，2011年8月首套密闭电石炉炉气净化装置与1#主机同步完成试运行，2011年12月全部12套密闭电石炉炉气净化装置与主机同步完成试运行。2012年1月4套净化装置全部投入使用。

主要工艺原理

电石炉炉气从炉盖引出后经过水冷烟道、一级旋风冷却器和三级复合式冷却器降温到220~260℃，通过粗气风机送入布袋除尘器，经过布袋除尘后经净气风机增压后送到水洗净化系统，除尘器清灰采用氮气脉冲清灰，为了系统的安全，在净气风机后设置安全放空系统、冷却器。除尘器收集的粉尘通过星型卸灰阀、埋刮板输送机送到炉尘仓暂时储存，然后外运。

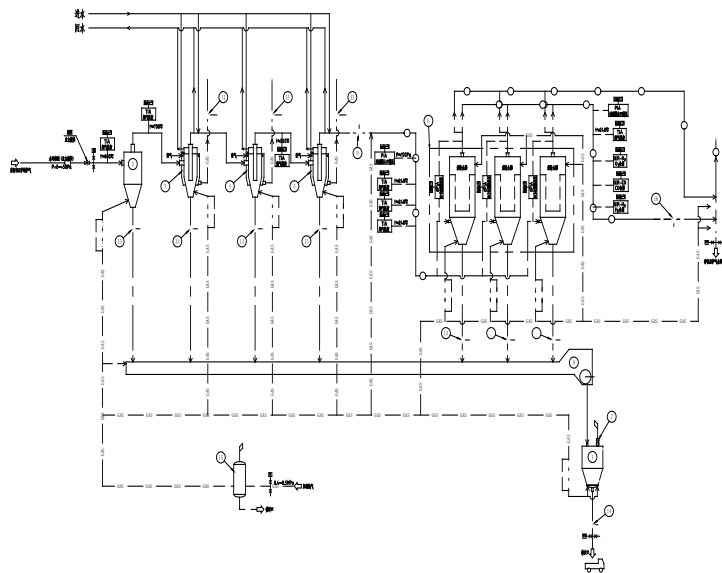


图 2-85 本项目除尘工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 特殊设计的高效旋风沉降室能除去大多数粉尘颗粒，降低炉气的热负荷和尘负荷。
- 两级热管空冷器内使用强化的热管降温技术，不但达到了高效热交换降温的效果，而且由于热管管壁保持较高的温度，避免烟气中焦油析出。采用辅助氮气炮定时喷吹，确保热管稳定高效工作。
- 两级风机设计使整个系统绝大部分处于微正压状态，有利于防止系统气体泄漏，同时有利于炉压的调节。
- 低过滤风速，充裕的过滤面积，完全满足一个单元检修时的运行要求；同时可适应炉气风量的大范围波动。

- 布袋除尘器采用先进的氮气脉冲清灰技术，确保其稳定高效运行，整个系统电耗低、滤袋损耗大为下降。
- 整个系统各处温度稳定可控，避免焦油析出与粉尘黏结堵塞管道。
- 系统安全性好，可对炉气中“CO”、“O₂”、“H₂”含量进行连续分析监测。
- 系统自动化程度高，能够根据炉气参数的变化自动调整各设备运行参数，整个过程无需手动调节。
- 特殊的卸灰和输灰设计保证了灰路的可靠畅通。
- 可靠的系统密闭性设计及运行规程使安全运行没有后顾之忧。



图 2-86 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足《大气污染综合排放标准》(GB 16297-1996)的要求，除尘效率达到 99.9% 以上(粉尘入口浓度为 150g/Nm³，出口浓度 20mg/Nm³)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 320 万元。

运行费用

根据 2013 年 1~8 月实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约 100 万元/年，年维修费用约 3500 元。副产物炉气粉尘全部作为商品销售。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统除尘率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该除尘工程为我公司带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：合肥合意环保科技工程有限公司

联系人：汪为忠

地址：安徽省合肥市包河区大连路 1 号

邮政编码：230001

电话：0551-63359156

E-mail: heec@163.com

三、典型有毒有害工业废气净化关键技术

41.挥发性有机气体(VOCs)循环脱附分流回收吸附净化技术

吸附是一项传统的浓集分离技术，在化工、环保等领域得到广泛的应用。吸附分离过程中的脱附回收是整个过程的核心之一。活性炭吸附蒸汽直接脱附工艺已在国内外很多场合应用，但存在冷凝水二次污染及水溶性、水解性物料回收率低等突出问题。

我国相关单位自 2006 年开始活性炭吸附惰性气体循环脱附分流回收技术的研发工作，并于 2008 年进行了工程示范，通过多个工程的持续改进已在解决气体循环加热与冷却回收间的矛盾，脱附过程安全性、脱附过程能源的综合利用等方面取得突破，形成了稳定可靠的循环脱附分流回收技术工艺及装备体系。与传统的蒸汽脱附不同，本技术采用惰性气体作为传热和脱附的介质，配合装置中的预处理脱水系统，回收有机溶剂液体中水分的含量很低，部分情况下可直接返回生产工艺回用，对于水溶性较大的溶剂更具回收优势。同时由于不像传统的蒸汽再生系统那样需要较多量的水蒸汽作为动力输送蒸汽并在后续的冷凝器中被冷凝而消耗，系统的总体能耗较低。另外，由于采用气体脱附回收，对于一些通常操作条件下易水解或水蒸气脱附较困难的沸点较高的有机气体组分也有良好的脱附回收效果。气体循环脱附分流回收吸附净化工艺装置能对大多数种类有机物污染气体中的有机物进行回收，同时实现气体的达标排放。

该技术对有机气体成分的净化回收效率一般大于 90%，也可达 95% 以上。单位投资大致为 9~24 万元/千 (m^3h^{-1})，回收有机物的成本大致为 700~3000 元/吨，投资回收年限在 2~5 年。该技术通过 5 年的开发示范，目前已成熟、稳定，可实现自动化运行。但由于有机气体处理设备安全设施配置要求较高等因素、投资费用相对一般的环保净化设备较高。该技术适用于石油，化工及制药工业，涂装、印刷、涂布，漆包线、金属及薄膜除油，食品，烟草，种子油萃取工业，及其他使用有机溶剂或 $\text{C}_4\text{-C}_{12}$ 石油烃的工艺过程。

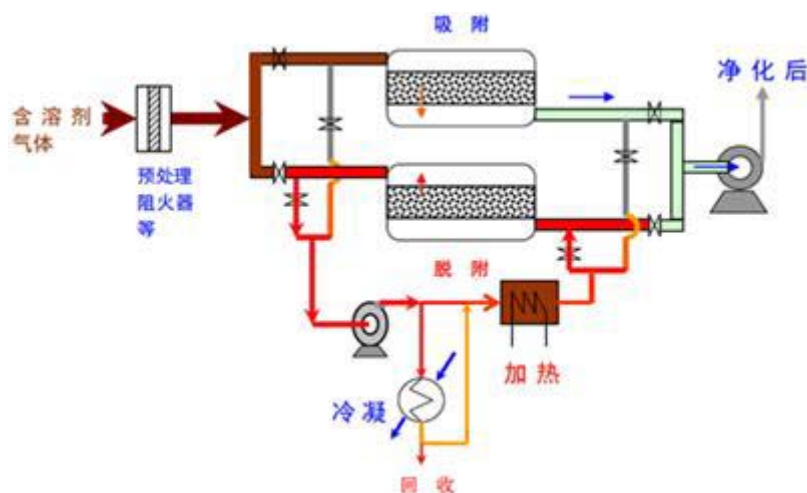


图 3-1 气体循环脱附分流回收吸附工艺原理示意图

典型案例（一）

案例名称

集装箱涂装烘房有机气体净化工程

项目概况

本项目于 2008 年 5 月开始设计制造，2008 年 10 月建成运行。

主要工艺原理

工程的废气设计流量 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ，气体中主要含有二甲苯（50~60%）、100 号溶剂油（20%）及丁酮和乙酸丁酯等。气体循环加热脱附回收工艺的原理示意图如图所示。整个系统由来气预处理、吸附、循环加热脱附、冷凝回收和自动控制等主要部分构成。含有机溶剂气体通过预处理后进入吸附段吸附后达标排放，吸附段通常并联设置有 2 座或两座以上的吸附罐并通过切换阀控制实现气体的连续吸附操作。吸附到设定程度的吸附罐通过切换阀切换形成再生循环回路。循环回路可通过充入惰性气体置换系统内气体得方式减少气相中的含氧量，从而减少再生过程中某些类型溶剂的氧化副产物的生成。通过循环风机和加热器可形成循环气流加热吸附罐进行脱附，同时通过分流冷凝系统冷凝回收溶剂。

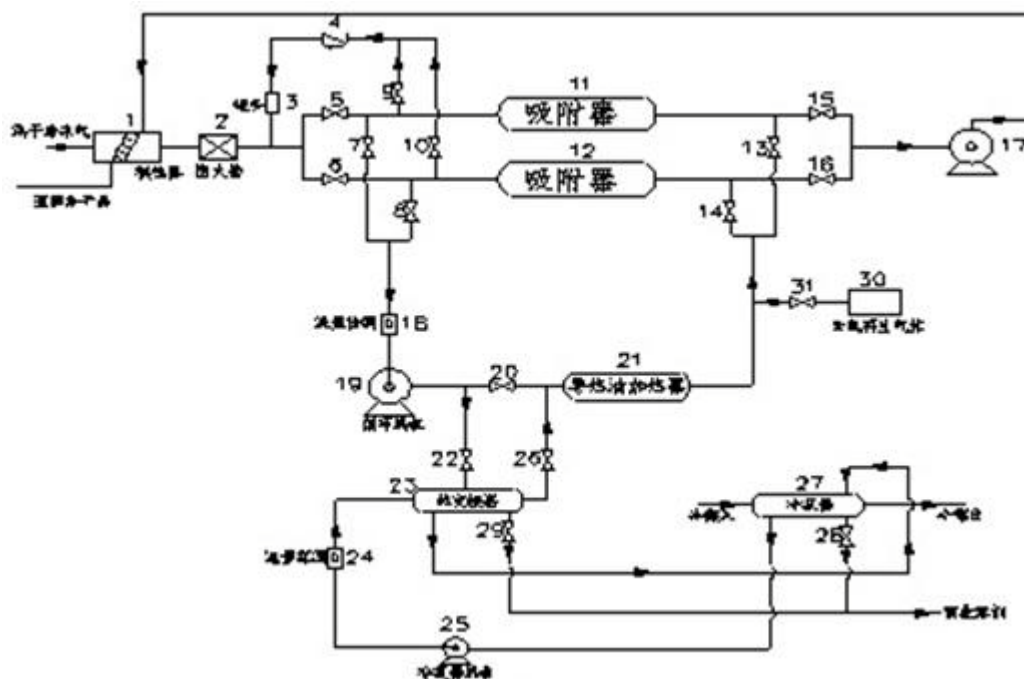


图 3-2 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用热气体循环脱附分流冷凝吸附净化回收工艺。
- 冷凝后气体的冷量回收技术。
- 全系统能量回收系统有效减少烘房加热的能耗。
- 系统污染排放量仅为传统蒸汽直接脱附工艺的 1/40。



图 3-3 案例现场图

主要技术指标

本项目系统排气指标满足大气污染综合排放标准（GB16297-1996）的要求，非甲烷总烃效率达到 97%以上（非甲烷总烃入口浓度为 $634\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $18.7\text{mg}/\text{Nm}^3$ ）。第三方测试结果表明，回收溶剂的纯度在 99%以上，含水量 0.08%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 125.6 万元。

运行费用

根据 2009 年 2~5 月正常生产负荷的实际运行情况，水、电、气、管理等运行费用约为 19.44 万元/年，年维修费用约 2.4 万元。产物回收溶剂全部回用于生产过程。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，回收的溶剂已回用于生产过程。该工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：同济大学

联系人：刘涛

地址：上海四平路 1239 号

邮政编码：200092

电话：021-65981926

E-mail: apce999@tongji.edu.cn

典型案例（二）

案例名称

氯仿废气回收工程

项目概况

本项目于 2011 年 5 月开始设计制造，2011 年 8 月建成运行。

主要工艺原理

吸附净化过程由以下步骤完成：

1) 吸附：氯仿废气经过预处理后，进入活性炭吸附罐，氯仿被活性炭捕集、吸附并浓缩，经净化后的废气经防爆密闭离心风机排入大气。为满足连续生产的需要，采用自动切换的方式使两台吸附罐连续轮流吸附实现系统的连续运行。

2) 解吸脱附：活性炭吸附有机物达到饱和状态后，停止吸入有机废气。考虑到生产过程中有可能有空气混入排放的废气中，为保证系统解析的安全，解析前用氮气对解析系统进行吹扫，去除系统内的氧气。然后通过活性炭床送入热氮气进行吹脱，将有机物自活性炭中解吸，罐中活性炭恢复其活性，即再生。脱附出的高浓度气体进入冷凝器冷凝回收。通过一定时间的热氮气脱附，活性炭内部的有机物基本挥发出来，从而达到脱附再生的目的。热氮气脱附完成后打开氮气循环保护系统对活性炭床层进行降温，床层温度接近常温后停止冷却。

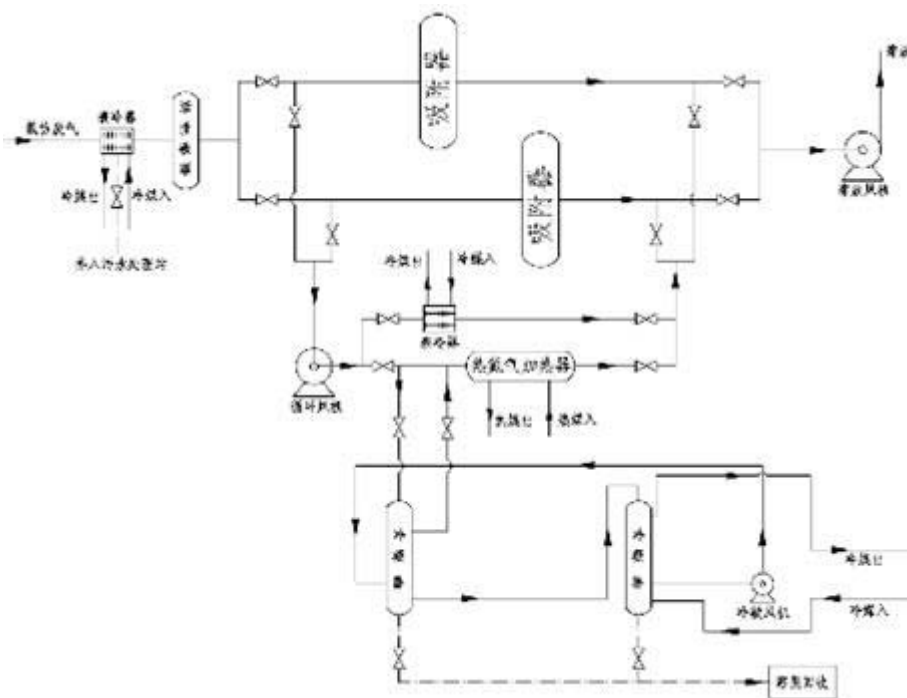


图 3-4 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用热气体循环脱附分流冷凝吸附净化回收工艺。
- 冷凝后气体的冷量回收技术。
- 三级安全系统确保系统的安全运行。
- 预处理技术有效控制高浓度气体的负荷波动，确保净化回收效率的稳定。



图 3-5 案例现场图

主要技术指标

本项目系统排气指标满足大气污染综合排放标准（GB16297-1996）的要求，三氯甲烷净化效率平均达到 98% 以上(三氯甲烷入口浓度为 $200\text{mg}\sim 260\text{g}/\text{Nm}^3$ ，平均出口浓度 $52\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 158.6 万元。

运行费用

根据 2011 年 10 月-2013 年 4 月正常生产负荷的实际运行情况，水、电、气、管理等运行费用约为 31.18 万元/年，年维修费用约 2.8 万元。产物回收溶剂全部回用于生产过程。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，回收的溶剂已回用于生产过程。该工程的实施还大大减少了我公司废气 RTO 总净化系统的处理负荷和腐蚀问题，带来了较好的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：同济大学

联系人：刘涛

地址：上海四平路 1239 号

邮政编码：200092

电话：021-65981926

E-mail: apce999@tongji.edu.cn

42. 高效吸附-强化脱附回收 VOCs 技术

吸附回收技术利用固体吸附材料选择吸附废气中的 VOCs，吸附饱和的材料经脱附工艺处理，进而回收处理 VOCs。吸附回收技术常用于高浓度 VOCs 废气排放控制过程。

在国家“十一五”863 重大项目课题（2006AA06A310），“十二五”863 课题（2012AA063101）的支持下，我国相关单位开发了高效吸附-强化脱附回收 VOCs 技术。

关键技术包括：（1）高吸附性能的活性炭纤维、颗粒活性炭、蜂窝炭和耐高湿整体式分子筛 VOCs 吸附材料；（2）高效安全吸附技术（高性能吸附材料、安全气氛吸附）；（3）强化脱附技术（惰性气体脱附、电焦耳脱附等）。

主要包括：（1）预处理：排放废气中可能含有少量粉尘，因此在吸附净化前端一般需加装高效纤维过滤器或高效干湿复合过滤器，对废气粉尘进行拦截净化。（2）吸附阶段：预处理后的废气在主风机的作用下进入吸附装置中吸附。吸附系统采用两个以上的吸附罐，其他吸附罐正常吸附，另一吸附罐处于脱附再生阶段；吸附后的气体经烟囱排放。（3）脱附阶段：脱附过程中，脱附气体（如惰性气体、水蒸汽）被导入吸附罐中，对吸附饱和的吸附材料床层进行吹扫，通过高温惰性气体与吸附材料上的有机溶剂进行作用置换，形成惰性气体或水蒸汽和有机气体的混合气体，气体在冷凝器中冷却液化成有机物，分离后的有机溶剂流到溶剂储槽中。惰性气体脱附后的吸附材料床层经再生处理后，直接用于下一轮的尾气吸附处理。

技术应用典型规模：尾气排风量 $800\text{m}^3/\text{h}\sim 100000\text{m}^3/\text{h}$ ；尾气浓度 $2000\sim 150000\text{mg}/\text{m}^3$ 。

该技术已经在石油、化工、电子、包装印刷、机械制造、家具制造业等行业高浓度有机废气的回收治理中得到应用。设备投资 100~150 万元(以处理风量为 $10000\text{m}^3/\text{h}$ 计)，运行费用 40~80 万元，回收溶剂价值 80~200 万，主体设备寿命 10~15 年。

该技术既可用于新建厂有机废气治理，也可用于现有厂吸附回收工程改造，运行成本较国内现有技术低 20%~30%。可经济有效地解决重点行业高浓度有机废气排放控制问题，并实现有机废气回收利用。

中国科学院生态环境研究中心、嘉园环保股份有限公司、防化研究院、中节能天辰（北京）环保公司开发的挥发性有机污染物 VOCs 吸附回收技术与设备无需昂贵的工程投资，仅需在现有设施的基础上进行简单工程改造即可有效回收处理 VOCs；该系统运行安全稳定，无需复杂的人工操作，所用吸附材料寿命长，耐水性强，再生方法简单，处理成本低廉，具有非常好的实用性。

实际应用案例：

某精细化工有限公司废气治理工程，处理风量 $10000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成分为甲苯、四氯乙烯，浓度约 $1500\text{mg}/\text{m}^3$ ，总 VOCs 回收效率 $\geq 95\%$ 。

某装饰材料有限公司废气治理工程，处理风量 20000m³/h，废气主要成分包含甲苯、丁酮、DMF 等，总浓度约 1000mg/m³，总 VOCs 回收效率≥95%。

某化工有限公司甲苯吸附回收治理工程，处理风量 3600m³/h，废气主要成分为甲苯，总浓度约 35g/m³，总 VOCs 回收效率≥90%。

某集装箱喷漆废气回收工程，处理风量 190000m³/h，废气主要成分以甲苯、二甲苯为主，总浓度约 1500mg/m³，总 VOCs 回收效率≥90%。

某干复机废气回收工程，处理风量 27000m³/h，废气主要成分为乙酸乙酯，总浓度约 1500mg/m³，总 VOCs 回收效率≥90%。

典型案例（一）

案例名称

集装箱喷漆废气回收工程

技术及项目概况

本项目于 2011 年 2 月开始设计制造，2011 年 6 月建成运行。

主要工艺原理

主要的工艺过程：

1) 预处理：喷漆废气首先经特制的专用干湿复合过滤器去除粉尘、易固化物、水雾等易引起活性炭堵塞降低活性炭吸附性能的尘杂。

2) 吸附：有机废气经预处理后，经合理布风，均匀进入活性炭吸附罐，有机废气被活性炭捕集、吸附并浓缩，经净化后的废气经防爆密闭离心风机排入大气。为满足连续生产的需要，设置两台以上的吸附罐，确保一台处于备用或脱附状态，采用自动切换的方式使吸附罐连续轮流吸附-脱附，实现系统的连续运行。

3) 饱和水蒸汽脱附：活性炭吸附有机物达到饱和状态后，停止吸入有机废气。蒸汽被导入吸附床中，对活性炭进行吹扫，将附着在活性炭的有机物置换到水蒸气中，形成水蒸汽和有机气体的混合蒸气，混合蒸气经冷凝器冷凝后进入分层槽，利用回收溶剂与水不溶的物理性质进行分层，分层后上层溶剂自流进入储槽以备再利用。分层后的水排入业主的污水处理系统。水蒸汽脱附后的吸附床经再生处理后，用于下一轮的尾气吸附处理。

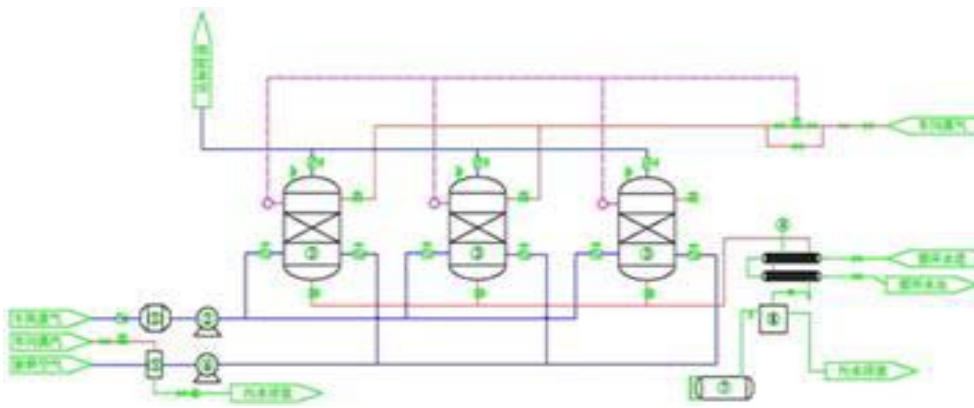


图 3-6 本项目工艺流程图

技术或设计创新特色

- 采用特制专用的独特油水分离装置，溶剂分离效果好，回收溶液纯度高。
- 采用专用颗粒炭作为吸附材料，具有比表面积大，微孔发达，孔隙率高，吸附、脱附性能好，净化效率高。
- PLC 全自动化控制方式，特设电脑触摸屏实时监控、记录。
- 全套设备结构紧凑，布局合理，外形美观大方。
- 多重安全预警系统：非稳态控制、温度预警、停机警报及故障应急处置措施等，可确保系统的安全运行。

- 大口径通风盖板阀，在固定吸附床内压力达到一定值时阀板可自动顶开，起到安全阀的作用，避免吸附床压力过载造成危险。
- 预处理设备对粉尘、漆雾去除效率高，可有效保护吸附材料。



图 3-7 案例现场图

主要技术指标

本项目总治理风量为 $190000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，喷漆废气浓度约 $1500\text{mg}/\text{m}^3$ （甲苯、二甲苯为主），每天约可回收油漆稀释剂约 5 吨。本项目系统排气指标满足大气污染综合排放标准（GB16297-1996）的要求，有机废气净化效率平均达到 95% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资 1500 万元。

运行费用

项目共计四套溶剂回收装置，水、电、蒸汽、管理等运行费用和维修费用共计约为 400 万元/年。产物回收溶剂全部回用于生产过程。

用户意见

项目投运至今，各项技术指标优良，运行稳定、安全、无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，回收的溶剂已回用于生产过程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：郝郑平

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮政编码：100085

电话：010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

典型案例（二）

案例名称

印刷行业干复机废气回收工程

技术及项目概况

本项目于 2012 年 4 月开始设计制造，2012 年 9 月建成运行。

主要工艺原理

主要的工艺过程：(1)干复机排放的废气经集中后，经过预处理过程中的表冷降温 and 滤网预滤，在离心风机的作用下进入吸附装置中进行吸附。吸附系统采用三吸附罐系统，两个吸附罐正常吸附工作，另一吸附罐处于脱附再生阶段；运行过程通过 PLC 自动控制三个吸附罐的吸、脱附过程之间的自动切换。吸附后的气体达标，直接排放。(2)脱附阶段：脱附过程中，蒸汽被导入吸附罐中，对吸附饱和的活性炭床进行脱附解析，脱附后的水蒸汽和含乙酸乙酯的气体在列管冷凝器中冷却液化成水和有机物的混合液。水和有机物的混合物流入油水分离器中，并在其中自动分离，分离后的有机溶剂流到溶剂储槽中。而分离后的废水经曝气和 PH 调节、SBR 生物处理后与生活污水一同纳管排放。水蒸汽脱附后的炭床经再生处理后，直接用于下一轮的尾气吸附处理。(3)再生过程：蒸汽脱附后，活性炭中会吸附大量的水，严重影响下一轮对尾气的处理效果，因此需要对活性炭进行再生处理。再生过程中采用 80~110℃ 的热风对颗粒炭进行热脱附，将颗粒炭中的水分烘干，再进行冷风降温，以达到吸附剂吸附的工作温度。

技术或设计创新特色

- 采用特制专用的独特油水分离装置，溶剂分离效果好，回收溶液纯度高。
- 采用专用活性炭作为吸附材料，具有比表面积大，微孔发达，孔隙率高，吸-脱附性能好，净化效率高。
- PLC 全自动化控制方式，特设电脑触摸屏实时监控、记录。
- 全套设备结构紧凑，布局合理，外形美观大方。
- 多重安全预警系统：非稳态控制、温度预警、停机警报及故障应急处置措施等，可确保系统的安全运行。
- 大口径通风盖板阀，在固定吸附床内压力达到一定值时阀板可自动顶开，起到安全阀的作用，避免吸附床压力过载造成危险。
- 预处理设备对粉尘去除效率高，可有效保护吸附材料。
- 该工程配套了渗透汽化膜处理装置，对回收的乙酸乙酯进行脱水，脱水后的乙酸乙酯含水率小于 0.2%，可直接回用。
- 该工程配套了冷凝水治理系统，采用物理加热曝气+SBR 工艺对蒸汽脱附冷凝水进行治理，治理后的废水达到纳管排放的要求。

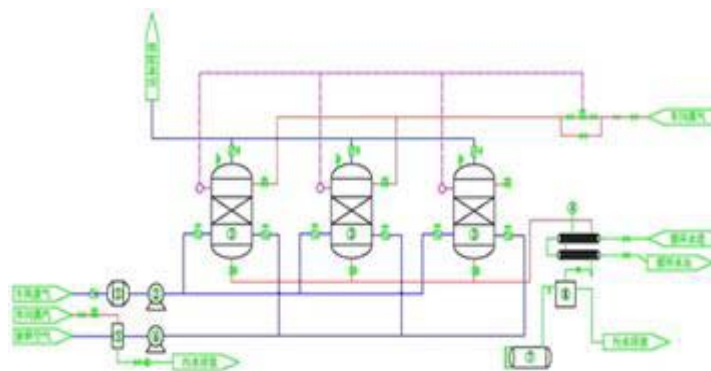


图 3-8 本项目工艺流程图



图 3-9 案例现场图

主要技术指标

该项目治理风量为 $27000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，废气浓度 $2700\text{mg}/\text{m}^3$ （纯乙酸乙酯）。每天约可回收提纯后的乙酸乙酯 1.5 吨。本项目系统排气指标满足大气污染综合排放标准（GB16297-1996）的要求，有机废气净化效率平均达到 96% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资 450 万元。

运行费用

项目水、电、蒸汽、管理等运行费用和维修费用共计约为 90 万元/年。日回收乙酸乙酯 1.5 吨，溶剂含水率低于 0.2%，回收溶剂全部回用于生产过程。

用户意见

项目投运至今，各项指标优良，自动化程度高，操作维护简单，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，耗能指标达到或优于设计要求，回收的溶剂已回用于生产过程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：郝郑平

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮政编码：100085

电话：010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

43. 活性炭吸附回收 VOCs 技术

吸附技术是最为经典和常用的气体净化技术，也是目前工业 VOCs 治理的主要技术之一，被广泛应用于治理含挥发性有机物的废气。吸附法净化气态污染物是指：利用固体吸附剂对气体混合物中各组分吸附选择性的不同，而分离气体混合物的方法，主要适用于低浓度气态污染物的净化。

有机废气吸附回收装置采用吸附、解析性能优异的活性炭作为吸附剂，可以吸附工业企业生产过程中产生的有机废气，并将有机溶剂回收再利用，实现了清洁生产 and 有机废气的资源化回收利用。吸附法具有净化效率高、设备简单、投资低等特点，不仅可以较彻底地净化废气，而且在不使用深冷、高压等手段下，可有效地回收有价值的有机物组分。在净化空气、降低污染排放，实现环境效益的同时，能够获得较高的经济效益。

吸附净化有机废气的吸附材料一般包括颗粒状活性炭、活性炭纤维和蜂窝状活性炭等。

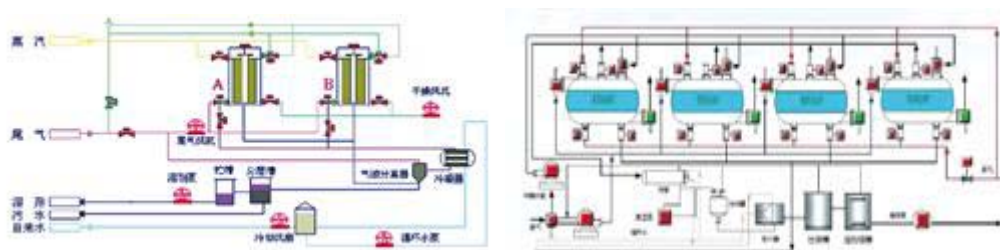


图 3-10 活性炭纤维吸附回收工艺流程图 图 3-11 颗粒状活性炭吸附回收工艺流程图

活性炭吸附回收技术是循环经济的一种良好应用，在不使用深冷、高压等手段下，达到节能降耗的目的，同时使净化效率达到 90% 以上，显著减少了二氧化碳等温室气体的排放，市场潜力巨大。可广泛应用于包装印刷、石油、化工、化学药品原药制造、涂布、纺织、集装箱喷涂及合成材料等行业有机废气的治理。环保部发布的《挥发性有机物（VOCs）污染防治技术政策》中明确提出：在工业生产过程中鼓励 VOCs 的回收利用，并优先鼓励在生产系统内回用；对于含高浓度 VOCs 的废气，宜优先采用吸附回收、冷凝回收技术进行回收利用，并辅助以其他治理技术实现达标排放；对于含中等浓度 VOCs 的废气，可采用吸附技术回收有机溶剂，或采用催化燃烧和热力焚烧技术净化后达标排放；对于含低浓度 VOCs 的废气，有回收价值时可采用吸附技术、吸收技术对有机溶剂回收后达标排放；不宜回收时，可采用吸附浓缩燃烧技术、生物技术、吸收技术、等离子体技术或紫外光高级氧化技术等净化后达标排放。

典型案例（一）

案例名称

高性能纤维生产线尾气吸附回收装置

项目概况

本项目包括二套碳氢清洗剂吸附-解吸附单元（回收工艺采用二级吸附）；一套废水处理单元。2012年9月开始进行产品设计，设备、安装后于2013年3月开车试运行。2013年5月，经第三方检测，回收率达95%以上。

主要工艺原理

（1）吸附-解吸附系统

含溶剂的气体经过滤器去除其中的颗粒杂质冷却至35℃以下，进入第一个吸附器由活性炭纤维进行二级吸附，经过二级吸附的后达标排放，一级吸附饱和的活性炭纤维，用水蒸汽进行脱附，脱附出的溶剂和水蒸汽一起进入冷凝器进行冷凝至35℃以下，箱体冷凝液经螺旋板冷凝器冷却至35℃以下，碳氢清洗剂和冷凝水一起进入分层槽，经重力分层，上层的碳氢清洗剂液体自动溢流至储槽，然后经输送泵送出吸附回收装置，下层的冷凝水排入废水处理系统。脱附结束后启动干燥风机进行降温除湿，吹出的带有水汽的干燥风，与一级吸附后的气体混合，经过除雾装置除水后进入二级吸附。

以上过程均由PLC程序控制，自动切换，交替进行一级吸附、脱附、干燥和二级吸附几个工艺过程的操作。

（2）系统废水处理单元

系统废水处理单元采用活性炭纤维吸附方法处理废水。达标水直接排放或作为循环水补水。

关键技术或设计创新特色

- 在蒸汽管线上增加蒸汽流量计和气动调节阀，通过自动控制系统对解吸蒸汽的流量进行控制，保证在解吸过程中蒸汽的流量和压力稳定，减少解吸时高压蒸汽对碳纤维床层的冲击破坏。在控制面板上安装的积算仪可显示蒸汽瞬时流量和累计质量流量。

- 解决了原工艺中干燥风不达标和干燥水雾处理问题，达到装置全程环保运行。

- 采用新型结构列管冷凝器，冷却效果更好。



图 3-12 案例现场图

主要技术指标

本项目设备运行良好，处理能力 2000m³/h；溶剂损耗量 2 吨/天。经第三方检测机构检测，有机物去除率 90~95%，系统回收率达 95%，运行噪声不大于 85dB。

投资及运行效益分析

投资费用

本设备总投资约 455 万元。

运行费用

本项目年运行费用消耗约 182.93 万元（包括电耗、蒸汽消耗、更换吸附质、设备折旧）。治理设备回收的有机溶剂直接回用于生产。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故。该项目带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京同益中特种纤维技术开发有限公司

联系人：赵鹏

地址：北京通州马驹桥景盛南 2 街 17 号

邮政编码：101102

电话：010-56710323

典型案例（二）

案例名称

乙酸乙酯有机尾气活性炭纤维吸附回收装置

项目概况

本套乙酸乙酯有机废气处理装置于 2012 年 4 月安装到位并正式试车，运行稳定后，协同甲方相关负责人对回收装置的出口气体进行了测试，并对回收乙酸乙酯的数量进行统计，结果表明净化效率 $\geq 99\%$ ，日回收乙酸乙酯量约 1.75 吨。

主要工艺原理

吸附原理：由于固体表面上存在着未平衡和未饱和的分子引力或化学键力，因此当此固体表面与气体接触时，就能吸引气体分子，使其浓聚并保持在固体表面，此种现象称为吸附。吸附法就是利用固体表面的吸附能力，使废气与大表面的多孔性固体物质相接触，废气中的污染物被吸附在固体表面上，使其与气体混合物分离，从而达到净化的目的。根据气体分子与固体表面分子作用力的不同，吸附可分为物理吸附和化学吸附，前者是分子间作用力的结果，后者是分子间形成化学键的结果。活性炭或活性炭纤维吸附就是采用物理吸附。

关键技术或设计创新特色

本项目从浓度和风量的匹配计算，我们为干式复合机配置了一套全自动的活性炭纤维吸附回收装置，这样设计考虑了风速、动态饱和吸附率、能源消耗和设备的成本，可以达到一个最佳的效率。

- 热能利用方面，吸附后的洁净排风设计了回风三通阀，通过和空冷系统的热交换，可以作为甲方的烘箱进风，节约了烘箱加热所需要的能量；解吸释放出的热能，通过交换系统，作为精馏系统和废水处理系统的预加热，实现了热能的最大程度的循环利用。

- 废水经过处理后，作为循环水系统的补水，解决了二次污染的问题，同时降低了新鲜水的补充。

- 在控制方面，全部使用西门子 PLC 变频及控制系统，提高的系统的精度及使用寿命，大大降低了系统的自然损耗。

- 解吸过程，结合蒸汽流量计及蒸汽调节阀，有效的降低了蒸汽的耗量，同时有效解决了碳纤维解吸后存水的问题，大大提高了碳纤维的使用寿命。

- 在碳纤维的使用上，选用了比表面积达到 $1350\text{m}^2/\text{g}$ 的高强度活性炭纤维，该纤维具有吸附率强、单丝强度高、疏水性能好、使用寿命长的特点。

- 安全性方面，对溶剂的闪点、风管内的风速、不同溶剂的吸附放热的速度等方面综合考虑；使用了阻火器，避免设备的回火，大大提高了设备整体的安全性和可靠性。



图 3-13 案例现场图

主要技术指标

本项目设备运行良好，处理能力 $40000\text{m}^3/\text{h}$ ；溶剂损耗量 2 吨/天。吸附系统的有机溶剂气体的吸附效率达到 90~95%，系统回收率达 95%，运行噪声不大于 85dB。

投资及运行效益分析

投资费用

溶剂损耗量 2.5 吨/天，投资额 188 万元。

运行费用

该装置年回收乙酸乙酯 1.75 吨/天，每年运转 300 天，溶剂按平均 7800 元/吨，则年收益不低于 409.5 万元；年运行费用消耗约 216.8 万元（包括电耗、蒸汽消耗、更换吸附质）。

用户意见

该设备在整修试车的过程中，回收设备运行稳定可靠，过程自动控制等达到了设计要求。自设备正式运行后，运行情况良好，回收率稳定，脱水溶剂指标低于 0.1%（复合 0.05%、印刷 0.08%），回收的溶剂已经全部回用于生产。净化率可达 90% 以上；运行噪声不大于 85dB。该项有机废气治理技术带来了显著的环境效益、经济效益和社会效益，值得推广。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：成都清洋宝柏包装有限公司

联系人：黄立强

地址：四川省成都市郫县红光镇

邮政编码：611743

电话：023-68571105

44. 高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧 VOCs 治理技术

吸附浓缩-催化燃烧技术利用固体吸附材料对工业废气中的 VOCs 进行富集,对吸附饱和的材料进行脱附,脱附出的 VOCs 进入(蓄热)催化燃烧工艺处理,进而降解 VOCs。

在国家“十五”863 课题(2001AA324050),“十一五”863 重大项目课题(2006AA06A310)的支持下,我国相关单位开发了高效吸附-脱附-(蓄热)催化燃烧 VOCs 治理技术。

采用的关键技术主要包括:

(1) 高效的吸附材料: 高吸附性能的活性炭纤维、颗粒活性炭、蜂窝炭和耐高湿整体式分子筛 VOCs 吸附材料;

(2) 高效的催化材料: 纳米孔材料、稀土分子筛催化材料;

(3) 高效的除漆雾技术、安全吸附技术、脱附技术;

(4) 高效的催化氧化技术、蓄热催化燃烧技术。

工艺流程主要包括:

(1) 预处理: 排放废气中可能含有少量粉尘,因此在吸附净化前端一般需加装高效纤维过滤器或高效干湿复合过滤器,对废气粉尘进行拦截净化。

(2) 吸附阶段: 去除尘杂后的废气,经合理布风,使其均匀地通过固定吸附床内的吸附材料层过流断面,在一定停留时间内,由于吸附材料表面与有机废气分子间相互作用发生物理吸附,废气中的有机成份吸附在活性炭表面积,使废气得到净化;净化装置设置两台以上吸附床,即废气从其他几台经过,确保一台处于脱附再生或备用,保证吸附过程连续性,不影响实际生产。

(3) 脱附-催化燃烧: 达到饱和状态的吸附床应停止吸附转入脱附再生。启动脱附风机、开启相应阀门和远红外电加热器,对(蓄热)催化燃烧床内部的催化剂预热,同时产生一定量热空气,当催化床层温度达到设定值时将热空气送入吸附床,吸附材料床层受热解吸出高浓度有机气体,经脱附风机引入催化燃烧床。当废气浓度较高、反应温度较高时,补冷风机自动开启,确保催化燃烧床安全、高效运行。

该技术已经在石油、化工、电子、机械、涂装等行业大风量、低浓度或浓度不稳定的有机废气治理中得到应用,处理风量典型规模 20000~500000m³/h。设备投资基本上是 200~300 万元(以处理风量为 50000m³/h),运行费用 30~50 万元,主体设备寿命 10~15 年。

该技术既可用于新建厂有机废气治理,也可用于现有厂治理工程改造,运行成本较国内现有技术低 15~20%。可经济有效地解决重点行业大风量、低浓度或浓度不稳定的有机废气治理。

实际应用案例:

某货柜制造公司废气治理工程,处理风量 450000m³/h,废气主要成分包含甲苯、二甲苯等,漆房浓度约 800mg/m³,烘房浓度约 2000mg/m³,总 VOCs 去除效率:漆房≥93%,烘房≥98%。

某药业公司车间废气治理工程，处理风量 $24000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成分包含甲苯、乙酸乙酯、四氢呋喃、甲醇、乙醇等，浓度约 $400\text{mg}/\text{m}^3$ ，总 VOCs 去除效率 $\geq 90\%$ 。

某电子喷涂废气治理工程，处理风量 $390000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成分为苯、甲苯、二甲苯，总 VOCs 去除效率大于 93% 。

某印刷包装材料公司废气治理工程，处理风量 $120000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成分为甲苯、乙酸乙酯、异丙醇，浓度约 $600\text{mg}/\text{m}^3$ ，总 VOCs 去除效率大于 93% 。

某油漆公司粉尘和挥发性有机废气治理项目，处理风量 $100000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成份为甲苯、二甲苯，浓度约 $500\text{mg}/\text{m}^3$ ，总 VOCs 去除效率大于 93% 。

某包材印刷公司废气治理工程，处理风量 $400000\text{m}^3/\text{h}$ ，废气主要成分为甲苯，浓度约 $500\text{mg}/\text{m}^3$ ，总 VOCs 去除效率大于 93% 。

典型案例（一）

案例名称

油漆生产车间废气吸附-脱附-（蓄热）催化燃烧装置

项目概况

本次治理废气来自于五个排风口，其中排风口 B2, B3, B4 排气口的粉尘量比较大，将 B3、B4 合并为一条排气口，并在废气前端设置一套脉冲式滤筒除尘设备，设计风量为 20000m³/h，在 B2 排气口前端设置一套滤筒除尘设备，设计风量为 10000m³/h，此外应业主要求考虑车间扩容 20% 的，五个风口总设计风量 10 万 m³/h。

主要工艺原理

(1) 预处理：因废气排风口 B2, B3, B4 排气口的粉尘量比较大，将 B3、B4 合并为一条排气口，并在废气前端设置一套脉冲式滤筒除尘设备在 B2 排气口前端设置一套滤筒除尘设备，经过滤除尘设备除去大部分粉尘的废气，和 B1 汇合为一条支路再进入高效纤维过滤器进一步除去细微粉尘。

(2) 吸附：经预处理后的有机废气经过合理布风，均匀通过填充高性能蜂窝状活性炭的吸附固定吸附床，有机成分被吸附在活性炭微孔内，净化气达标排放。

(3) 脱附浓缩-催化氧化：吸附饱和后的活性炭床采用循环热风脱附，脱附下的高浓度 VOCs 进入催化氧化床，在催化剂的催化氧化作用下，VOCs 于低温下被氧化成 H₂O 和 CO₂，并释放出大量热量，催化氧化反应后的尾气经过混流换热器后用于脱附饱和活性炭。

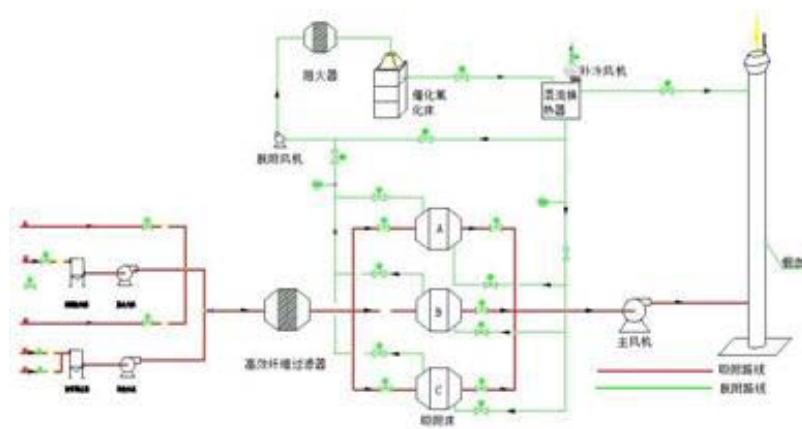


图 3-14 本项目工艺流程图



图 3-15 案例现场图

技术或设计创新特色

- 被国家环保总局评选为“国家重点环境保护实用技术”。
- PLC 全自动化控制，配套可操作触摸屏，操作简便，节能省力。
- 无焰氧化，安全高效，可布置在防爆生产场合。
- 高性能活性炭吸附剂，比表面积大，吸-脱附性能好，过风阻力小。
- 吸附床内配套消防系统，充分保证设施安全。
- 多重安全预警系统：非稳态控制、温度预警、停机警报及故障应急处置措施等。
- 净化设施阻力小，可有效降低风机功率及噪音。
- 净化效率高，保证达标排放。

主要技术指标

本项目总治理风量 $100000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，废气浓度为 $500\text{mg}/\text{m}^3$ （甲苯、二甲苯），粉尘浓度 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 。本项目的废气甲苯、二甲苯、非甲烷总烃、颗粒物符合《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）二级标准，通过了第三方检验机构验收。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资约为 500 万元。

运行费用

项目每年电费、管理费用约为 60 万元/年。

用户意见

项目投运至今，各项技术指标优良，操作维护简单、无任何环保事故，VOCs 净化效率达到设计要求，各项能耗指标达到或优于设计要求，装置带来了显著的社会效益和环境效益，值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：郝郑平

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮政编码：100085

电话：010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

典型案例（二）

案例名称

印刷机 VOCs 废气治理催化燃烧装置

项目概况

本次治理废气来自于 4、5 车间的印刷机。本项目于 2012 年 10 月开始设计、制造，2012 年 2 月建成运行。

主要工艺原理

(1) 吸附：经预处理后的有机废气经过合理布风，均匀通过填充高性能蜂窝状活性炭的吸附固定吸附床，有机成分被吸附在活性炭微孔内，净化气达标排放。

(2) 脱附浓缩-催化氧化：吸附饱和后的活性炭床采用循环热风脱附，脱附下的高浓度 VOCs 进入催化氧化床，在催化剂的催化氧化作用下，VOCs 于低温下被氧化成 H_2O 和 CO_2 ，并释放出大量热量，催化氧化反应后的尾气经过混流换热器后用于脱附饱和活性炭。

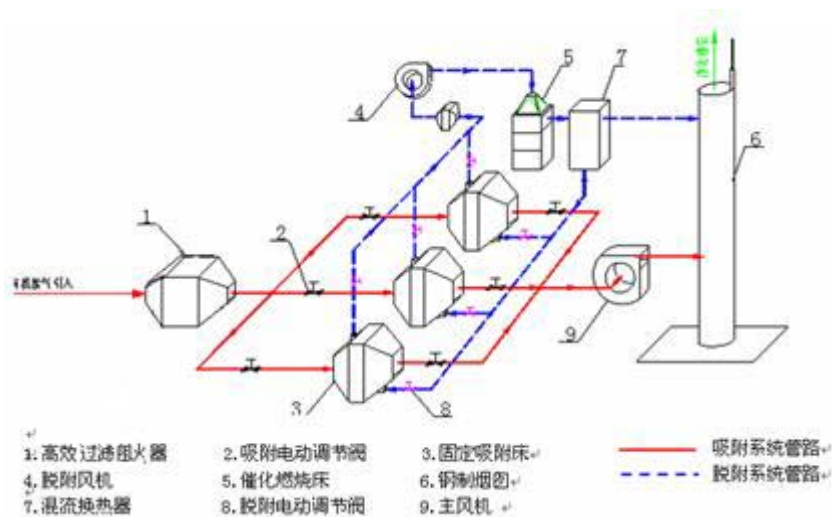


图 3-16 本项目工艺流程图



图 3-17 案例现场图

技术或设计创新特色

- 本技术被国家环保总局评选为“国家重点环境保护实用技术”。
- PLC 全自动化控制，配套可操作触摸屏，操作简便，节能省力。
- 无火焰氧化，安全高效，可布置在防爆生产场合。
- 高性能活性炭吸附剂，比表面积大，吸-脱附性能好，过风阻力小。
- 多重安全预警系统：非稳态控制、温度预警、停机警报及故障应急处置措施等。
- 净化设施阻力小，可有效降低风机功率及噪音。
- 净化效率高，保证达标排放。

主要技术指标

本项目总治理风量 400000Nm³/h，废气浓度约 500mg/m³，采用三套设备进行治理。废气甲苯、二甲苯、苯、非甲烷总烃符合《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) 二级标准。

投资及运行效益分析

投资费用

工程总投资约为 1500 万元。

运行费用

项目每年电费、管理费用约为 150 万元/年。

用户意见

项目投运至今，各项技术指标优良，操作维护简单、无任何环保事故，VOCs 净化效率达到设计要求，各项能耗指标达到或优于设计要求，带来了显著的社会效益和环境效益，值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：郝郑平

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮政编码：100085

电话：010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

45. 高效 VOCs 催化燃烧技术

催化燃烧技术是使用高性能的氧化催化剂,使固定源尾气中的 VOCs 在催化剂作用下在较低的反应温度下被完全氧化,产生的反应热可以回收利用,达到节能目的,该技术的优点是净化效率高,反应温度低(200°C~650°C),适用于热废气,无二次污染,一直被认为是最有效和最有应用前景的 VOCs 净化技术,现已成为 VOCs 治理的主流技术。

含有 VOCs 的固定源尾气,通过换热器的换热和加热器(仅开车或 VOCs 含量偏低时启动)的加热,使尾气加热到催化剂的起燃温度(~250°C)后进入催化反应器,在催化剂的催化氧化作用下,VOCs 被氧化成 H₂O 和 CO₂,并释放出大量热量,催化氧化反应后的高温尾气经过余热利用后通过烟囱排空,使尾气排放达到我国相关的大气污染物排放标准。

针对 VOCs 净化催化剂开发过程中要解决的两个关键难题(低温催化活性和高温稳定性;减少贵金属用量以降低生产成本)。运用纳米技术开发了具有自主知识产权的净化催化剂的关键材料—高性能与稳定性有机结合的稀土储氧材料、高温稳定的大比表面氧化铝复合氧化物;运用系统工程学原理解决了均质、稳定、高净化效率的整体式催化剂的制备工艺(真空涂覆-负压抽提技术)和基于纳米组装技术的活性组分一次真空涂覆技术,从而制备了高性能的净化催化剂。在净化催化剂的组成设计方面,提出了“稀土-非贵金属-微量贵金属”的催化剂活性组分设计方案,降低了贵金属用量,从而显著降低了催化剂生产成本。

我国自主开发的高效 VOCs 催化净化技术,已成功应用于丙烯酸行业、氯碱行业、香精香料行业、涂装行业和有机化工行业等,排放气体均达到我国相关的大气污染物排放标准。

典型案例

案例名称

8 万吨/年丙烯酸尾气的催化燃烧装置

项目概况

本项目于 2006 年 10 月投入并成功运行。

主要工艺原理

含有 VOCs 的丙烯酸尾气，通过热交换器的换热和加热器（仅开车或 VOCs 含量偏低时启动）的加热，使尾气加热到催化剂的起燃温度（~250℃）后进入催化反应器，在催化剂的催化氧化作用下，VOCs 被氧化成 H₂O 和 CO₂，并释放出大量热量，催化氧化反应后的高温尾气经过废热锅炉和热交换器余热利用后通过烟囱排空，使尾气排放达到我国相关的大气污染物排放标准。

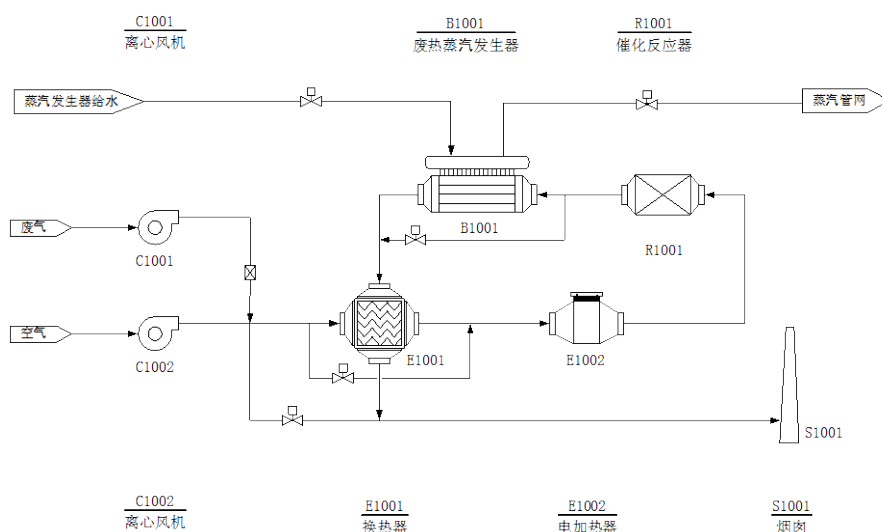


图 3-18 本项目工艺流程图



图 3-19 案例现场图

关键技术或设计创新特色

- 贵金属纳米粒子的高分散负载技术；
- 提高催化剂的抗高温、抗水、抗酸蚀等技术；
- 整体式催化剂的可控涂覆技术；
- 高效节能的大风量 VOCs 催化燃烧装置的设计。

主要技术指标

含有 VOCs 的丙烯酸尾气，经过催化燃烧装置后的尾气排放符合《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）和《危险废物焚烧污染物控制标准》（GB18484-2001）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约为 1000 万元。

运行费用

根据 2011 年 1 月-2012 年 12 月的实际运行情况，每年运行费用约为 700 万元/年，废热锅炉产生的蒸汽每年新增经济效益约为 1300 万元。

该项目的实际净经济效益约为 600 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，VOCs 净化效率达到设计要求，各项能耗指标达到或优于设计要求，该催化燃烧装置为我公司带来了显著的社会效益和经济效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：华东理工大学工业催化研究所

联系人：卢冠忠、郭杨龙

地址：上海市梅陇路 130 号

邮编：200237

电话：021-64252923

E-mail: ylguo@ecust.edu.cn

46. 中高浓度 VOCs 蓄热催化燃烧 (RCO) 净化技术

催化燃烧法是应用广泛的工业有机废气净化技术, 该技术使用催化剂在 $200^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 温度范围内将有机物催化氧化为二氧化碳和水, 具有净化效率高、安全可靠、操作简便等优点。但是常规的催化燃烧为了维持较高的反应温度, 需要持续的电加热或者燃料燃烧供热, 且常用的换热器热回收效率较低 (通常一级换热 $30\sim 50\%$, 二级换热 $60\sim 70\%$), 因此系统运行费用较高; 而且当有机废气的浓度和风量波动时, 系统净化效率相应发生波动, 操作弹性较小。

在 863 课题“大气挥发性有机物排放控制技术与应用示范”等项目支持下, 以催化燃烧技术为基础, 结合流向变换原理, 发展形成了蓄热催化燃烧 (RCO) 技术, 依次开发了两床式、三床式和旋转阀式设备。旋转阀式 RCO 设备与两床式和三床式设备相比, 具有转化率稳定, 设备占地少, 控制简单等优点。在旋转阀式 RCO 设备中, 首先利用堇青石-莫来石复相材料的蓄热和放热性能, 加热未反应的有机废气, 在蓄热催化一体化材料上发生催化氧化反应, 气体中的挥发性有机物转化为二氧化碳和水, 并释放反应热, 反应后的气体将热量传递给蓄热材料, 以高于进口气体 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温度排放。

该技术的热回收效率可达 90% ; 有机物净化效率 95% 以上; 适用的有机物浓度范围为 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 以上, 无二次污染物排放; 单位投资大致为 $50\sim 100$ 万/ 10000m^3 ; 稳定运行只消耗系统风机功率, 同时可以副产热水或蒸汽。

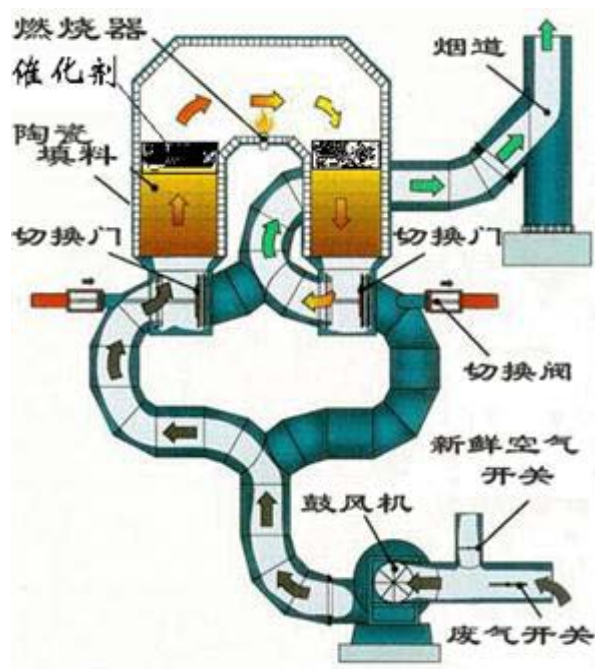


图 3-20 结构原理图

典型案例

案例名称

15000m³/h 干式机烘干工艺有机废气净化工程

项目概况

本项目于 2013 年 6 月建设完成并投入运行，主要从事聚氨酯二榔皮的加工制造，在加工过程中使用丁酮（MEK）、乙酸乙酯（EAC）、醋酸丁酯（BAC）、乙二醇丁醚（BCS）、甲基异丁基酮（MIBK）等有机溶剂，烘干过程中有机废气挥发到环境中。经收集后有机废气风量为 15000m³/h，浓度为 5000~8000mg/m³。

主要工艺原理

本项目采用 RCO 技术净化烘干有机废气，主要工艺原理如下：有机废气经收集管道进入旋转阀式 RCO 设备，首先经过蓄热体（堇青石-莫来石复相材料），蓄热体将热量传递给未反应的有机废气，气体温度被加热到催化剂反应温度，然后在蓄热催化一体化材料上发生催化氧化反应，气体中的挥发性有机物转化为二氧化碳和水，并释放反应热，反应后的气体将热量传递给另一侧的蓄热材料，最后以高于进口气体 20~40℃ 的温度排放。

设备内部的蓄热催化床分成八等份（也可设计成十二或者十六等份），床层固定不动，其中大约三份是进气区，三份是排气区，一份是吹扫区，一份是盲区。由旋转阀控制气体进出，实现蓄热催化床内的流向变换。吹扫风机对吹扫区进行吹扫，防止未净化的气体在转入排气区时排走。盲区是不通气的，防止气体混合。从 RCO 设备出来的气体少量通过排气筒排放，大部分返回到烘干生产线中，减少烘道电加热器的工作时间和功率。同时 RCO 设备内有机物氧化反应释放的热量，需要通过散热风机鼓入环境空气进行散热，以维持适宜的催化燃烧温度，RCO 设备内部设计非接触式气气换热器（根据情况也可设计成气液换热器），换热器出口气体温度为 180~200℃，可以企业贴板干燥工序（此工序需要 85~90℃ 的热水）和吊挂干燥工序的热源（此工序需要 40~50℃ 的热空气）。

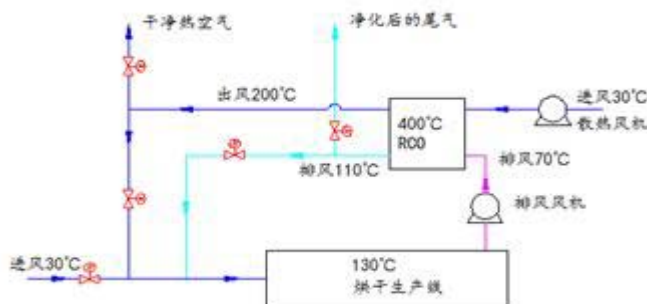


图 3-21 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进蓄热式催化燃烧工艺，净化效率高达 98% 以上。
- 高效的热量回收率，热回收效率 ≥ 95%。
- 运行费用低，在有机废气达到一定浓度时，基本不需要再进行辅助加热，节省了能耗。

- 不产生氮氧化物等二次污染物。
- 全自动控制，操作方便。



图 3-22 案例现场图

主要技术指标

根据第三方检测机构出具的检测报告，本项目系统出口烟气指标满足《合成革与人造革工业污染物排放标准》（GB21902-2008）中聚氨酯干法工艺废气的排放标准的要求，有机废气净化效率达到 98% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 170 万元。

运行费用

根据 2013 年 7~8 月实际运行情况，预计年运行费用约为 17.1 万元，年维修费用约 2 万元。由于进气中有机物浓度高，燃烧释放的热量大，反应室需要外界鼓空气降温，降温用的空气出口温度为 180~200℃，可用于生产 80~90℃ 的热水 4t/h，供贴板干燥工序用；气液换热器出口的低品位热风可以用于吊挂干燥工序。原先企业生产热水和热风均用锅炉蒸气，RCO 设备运行后可有效减少锅炉燃煤用量。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，副产热风，可生产热水，用于产品加工。该净化工程为我公司带来了显著的环境和经济效益，拟在其他生产线推广应用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：华南理工大学

联系人：叶代启

地址：广东省广州大学城外环东路 382 号 B4 楼

邮政编码：510006

电话：020-39380516

E-mail: cedqye@scut.edu.cn

47.治理 VOCs 的 RTO 及余热利用技术

挥发性有机物 VOCs (Volatile Organic Compounds) 主要由烷烃、烯烃和芳香烃以及各种含氧烃、卤代烃、氮烃、硫烃、低沸点多环芳烃等组成, 有臭味, 多数物质有致癌性, 在大气中形成的气溶胶是 $PM_{2.5}$ 的重要来源, 占大气 $PM_{2.5}$ 的 25%~35%, 而且 VOCs 还是光化学烟雾的诱导物质。印刷、石油化工、家具制造、电子制造、汽车制造、机械加工、涂装等是 VOCs 高排放量行业, RTO 及余热利用技术是处理 VOCs 理想方法之一。RTO 有多室直立式 T-RTO 和回转式 R-RTO 两种结构形式, 主体为设置有蜂窝陶瓷蓄热体的蓄热室和燃烧室。VOCs 在燃烧室内氧化成高温的 CO_2 和水蒸气, 高温气体流经低温蓄热体时进行热交换, 吸热升温的蓄热体对后续进入的低温 VOCs 废气进行加热。蓄热体循环进行“吸热-放热”过程把 VOCs 加热到氧化反应温度, 无需外部热源。两室或多室的蓄热室结构, 在切换阀或回转阀的控制下, 经“蓄热-放热-清扫”循环过程, 实现 VOCs 无害化燃烧及与蓄热体的热交换。RTO 系统配备余热回收设备, 可生产蒸汽、热水或电力。在 863 课题资助下, 我国相关单位研发蜂窝陶瓷蓄热体先进制造技术, 自主开发了 RTO 设备, 建立了相关示范工程, VOCs 转化效率达到 95% 以上、余热回收率可达到 90% 以上。

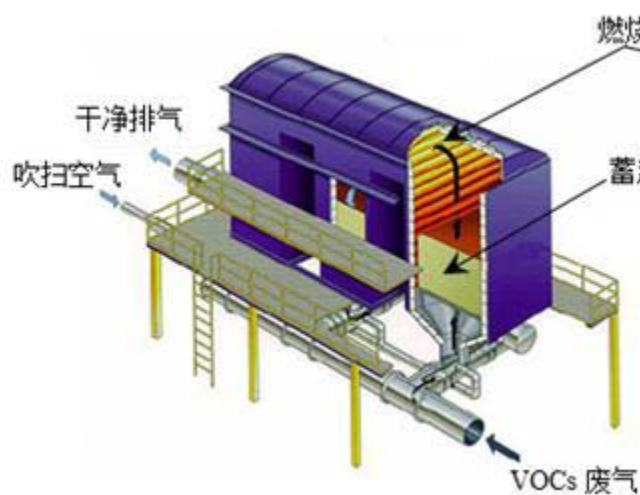


图 3-23 直立式 RTO

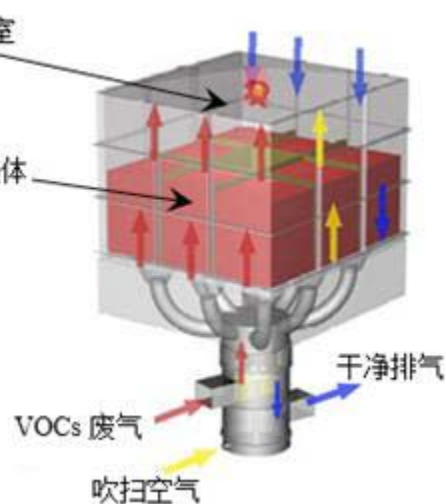


图 3-24 回转式 RTO

典型案例（一）

案例名称

100000Nm³/h 顺酐及高热值有机废气处理工程

项目概况

本项目于 2012 年 6 月签订建设项目合同，2012 年 10 月完成项目设计、制造和系统集成，2013 年 8 月完成系统安装调试。

主要工艺原理

RTO 系统主体结构为设置有蜂窝陶瓷蓄热体的蓄热室和燃烧室，为满足蓄热要求，设置有两个或多个蓄热室，每个蓄热室依次经历“蓄热-放热-清扫”程序。有机物废气 VOCs 氧化产生的高温气体流经低温蓄热体时，蓄热体升温“蓄热”，并把后续进入的有机废气加热到接近热氧化温度后，进入燃烧室进行热氧化，使有机物转化成 CO₂ 和 H₂O。净化后的高温气体，经过另一蓄热体，与低温蓄热体进行热交换，温度下降。ECU 控制系统按一定规则控制各蓄热体单元切换阀的开闭，实现蓄热体“吸热-放热”的循环切换。RTO 系统配备合适设备可实现 VOCs 燃烧的余热利用。

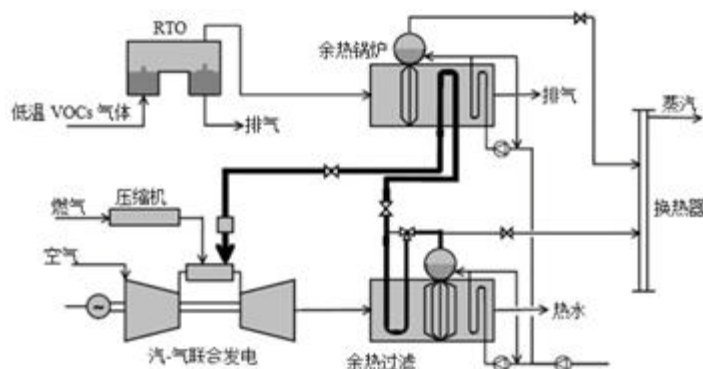


图 3-25 RTO 余热利用系统结构图

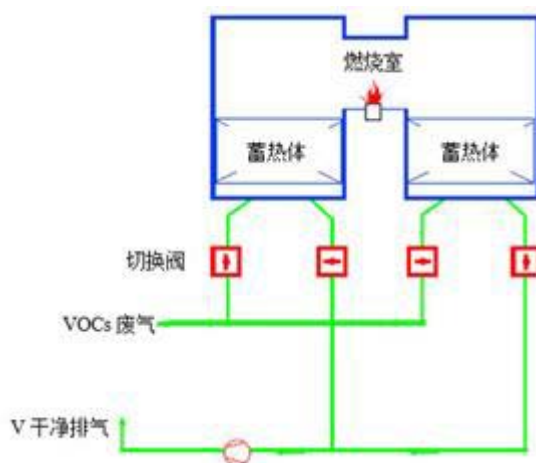


图 3-26 RTO 技术原理图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的多室循环运行工艺技术；

- 基于废气成分与热值大风量多室 RTO 制造工艺技术；
- 采用可靠的机械硬密封阀门；
- 降低震荡的废气分散流动技术；
- 高精度控制系统，SIMENS S300 系统。



图 3-27 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口废气指标满足 DB11/447-2007 标准的要求，CO 脱除率 98.3%，VOCs 脱除效率达到 97.2%(CO 入口浓度 $12300\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $209\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；VOCs 入口浓度为 $640\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $18\text{mg}/\text{Nm}^3$)，系统热能回收率达到 95% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1610 万元。

运行费用

系统开始运行时用燃气着火将 5 个蓄热室加热，后期的热循环由废气氧化后放出的热量来维持。系统每小时产生 13.5 吨过热蒸汽（5MPa、350℃），过热蒸汽驱动蒸汽机，产生动力替代了 600 千瓦。

用户意见

本项目设计制造的 9 室 RTO 设备，设计合理、控制精确，生产蒸汽用于 600kW 汽轮机驱动和乏汽并网出售，具有良好的经济效益。经检测，CO 的脱除率达到了 98.3%，非甲烷有机废气的脱除率达到了 97.2%。系统调试运行良好，达到了设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京奥福（临邑）精细陶瓷有限公司

联系人：张兆合

地址：北京市通州区翠景北里 1 号瑞都国际 2210 室

邮编：101101

电话：010-80581851/80582400

E-mail: zhangzh@trendaofu.com

典型案例（二）

案例名称

50000Nm³/h 汽车喷涂车间 RTO 工程

项目概况

本项目于 2009 年 4 月签订建设项目合同，2009 年 11 月完成项目设计、制造和系统集成，2010 年 3 月完成系统调试。

主要工艺原理

回转式 RTO (R-RTO) 具有结构紧凑、占地面积小、控制精度高等特点，是治理工业挥发性有机废气 VOCs 排放的发展方向。R-RTO 系统主体结构为设置有蜂窝陶瓷蓄热体的蓄热室和燃烧室，为满足蓄热要求，设置有两个或多个沿圆周布置的蓄热室，每个蓄热室依次经历“蓄热-放热-清扫”程序。有机物废气 VOCs 氧化产生的高温气体流经低温蓄热体时，蓄热体升温“蓄热”，并把后续进入的有机废气加热到接近热氧化温度后，进入燃烧室进行热氧化，使有机物转化成 CO₂ 和 H₂O。净化后的高温气体，经过另一蓄热体，与低温蓄热体进行热交换，温度下降。ECU 控制系统控制驱动马达使回转阀按一定速度旋转，实现蓄热体“吸热-放热”的循环切换。

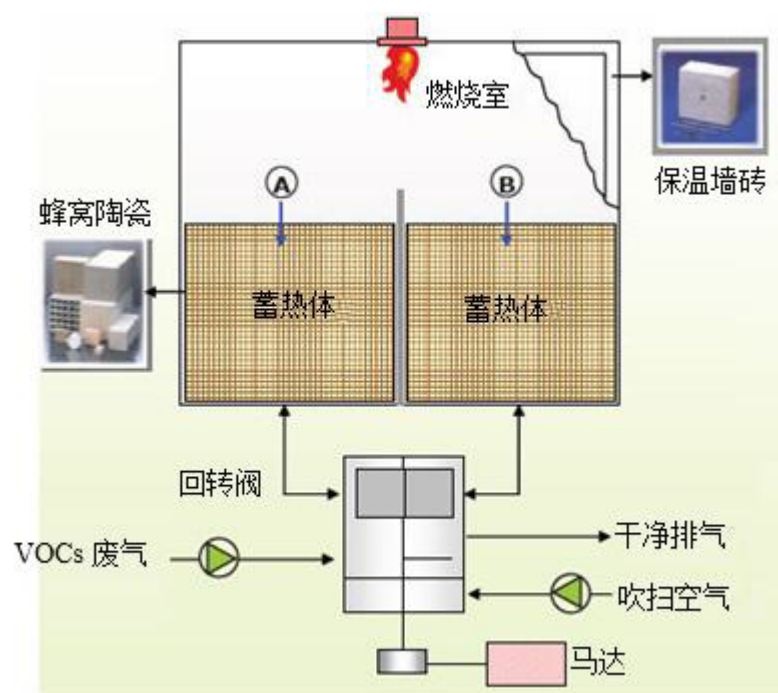


图 3-28R-RTO 结构原理图

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的转炉工艺，占地面积小。
- 高效先进的换热系统，换热效率高，热损失小。
- 燃料消耗量小。
- 独特的旋转式进出气控制阀，气流更加稳定。
- 系统适应性强，操作稳定，简便可靠。



图 3-29 案例现场图

主要技术指标

本项目系统出口烟气指标满足 DB11/447-2007 标准的要求，VOCs 脱除效率达到 99.1%以上(VOCs 入口浓度为 $922.3\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $8.9\text{mg}/\text{Nm}^3$)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1067 万元。

运行费用

系统开始运行时，使用燃气将蓄热室加热，后期热循环由废气氧化后释放的热量完成，不再添加燃料，燃料消耗量约 $150\text{Nm}^3/\text{年}$ ，费用约 250 元/年（天然气按 $1.667\text{元}/\text{Nm}^3$ 计）。

用户意见

本项目设计制造的回转式 RTO 设备，设计和安装均达到用户要求。经检测，VOCs 脱除率达到了 99.1%，系统运行和维护成本低，具有较高的技术水平。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京奥福（临邑）精细陶瓷有限公司

联系人：张兆合

地址：北京市通州区翠景北里 1 号瑞都国际 2210 室

邮编：101101

电话：010-80581851/80582400

E-mail: zhangzh@trendaofu.com

48. 低浓度多组分工业废气生物净化技术

生物净化技术利用微生物代谢活动,将废气中污染物降解转化为无毒无害的最终物质(如 CO_2 和 H_2O),具有反应条件温和、运行费用低、无二次污染等优点,为这类废气的高效净化提供了新途径。

在 863 计划课题(2002AA649310、2006AA06A310、2009AA062603)、国家国际科技合作项目(2011DFA92660)等项目的连续资助下,我国相关单位构建了针对多种气态污染物的复合功能菌剂,开发了适用于不同类型多组分工业废气的生物净化新工艺与新设备,以及应对不同工艺需求的高效生物填料,在废气生物净化的反应和传质过程强化方面获得突破,解决了现有生物法存在的污染物间降解互为抑制、难降解/低水溶性组分去除率低、运行稳定性差等瓶颈问题,构筑了具有完整自主知识产权的适用于低浓度多组分工业废气的生物净化技术,并在石油加工、医药、化工、污水处理等典型行业领域建立了多项废气生物净化的示范工程。

该技术对 H_2S 的去除率可达 95% 以上,对大部分 VOCs 的去除率达 80%~90%。与传统生物技术相比,拓宽了生物处理法的应用范围,并且缩短了停留时间,减小了设备体积。

典型案例

案例名称

45000m³/h 废气处理工程

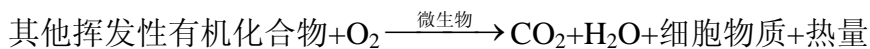
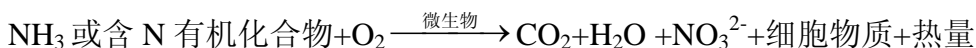
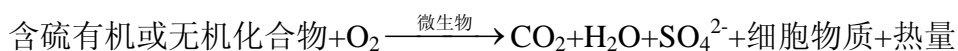
项目概况

本项目废气处理规模为 45000m³/h，于 2010 年 6 月开始设计，2010 年 8 月开工建设，2011 年 5 月完成调试并进入稳定运行阶段。

主要工艺原理

废气成分主要为 H₂S、NH₃ 和 VOCs，臭气成分和风量比较稳定，风量较大但浓度低，因此，采用生物氧化为主、化学吸收为辅的净化工艺进行处理，通过生物处理去除废气中的绝大部分污染物，化学吸收单元则可在进气浓度发生异常时，为系统的稳定达标排放提供进一步保证。主体技术生物滴滤箱由滤床、营养液循环喷淋系统、参数控制系统等组成。废气进入生物箱体后，通过附着在填料上的微生物的代谢作用，废气中的污染物被降解为简单的无机物。其中，VOCs 分解为 CO₂、H₂O 以及其他简单的无机物；含氮污染物中的氮元素转化为硝酸盐或氮气；含硫恶臭污染物中的硫元素转化为硫酸盐。

其反应式分别为：



生物装置需定期投加营养液，营养液富含 N、P、K 及其它微量元素，以满足微生物代谢活动；营养液的更换周期与污染物浓度相关，可通过调试进行确定；通过更换营养液还可排除系统中累积的代谢产物和老化的生物膜，更换下来的营养液排入废水好氧处理系统进行处理。通过投加碱液维持系统 pH 值相对稳定。填料层采用板式结构，以改善气流分布，污染负荷与生物量、养分合理匹配，减少气流短路。



图 3-30 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 投加高效降解菌剂，并采用现场培菌机进行现场培菌，使系统在 2 周内迅速启动并进入正常运行。
- 采用具有高比表面积和生物固着力的亲水性纹翼填料，单位体积生物量

高，压降低，不易堵塞，且耐老化，堆集重度小，克服了传统滴滤填料微生物附着难、单位生物量低等缺陷。

- 配置液位、pH、电导率、温度等参数控制系统。利用 PLC 自动控制技术，使废气生物处理装置长周期稳定运行且管理方便。



图 3-31 案例现场图

主要技术指标

生物处理单元对 H_2S 和 NH_3 的去除率均能达到 95% 以上，VOCs 去除率达 90%。根据第三方检测结果，净化后气体达到《恶臭污染物综合排放标准》（GB14554-93）中的厂界三级标准浓度。

投资及运行效益分析

投资费用

工程主体设备投资 250 万元。

运行费用

本项目年运行费用共计 35.5 万元。

用户意见

项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统净化效率达到设计要求。该废气生物净化工程为我公司带来了显著的环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江工业大学环境科学与工程研究所

联系人：王家德

地址：浙江省杭州市下城区潮王路 18 号

邮编：310032

电话：0571-88320915

E-mail: jdwang@zjut.edu.cn

49.变温吸附有机废气治理及溶剂回收技术

变温吸附有机废气治理及溶剂回收技术能够在有效减排的同时，实现 VOCs 的回收和资源化，是工业有机废气治理中最常用的技术。其主要原理在于采用活性炭或碳纤维为吸附材料，在吸附器内，废气中有机成分得到净化，尾气达标排放。同时通过热空气、水蒸气使有机废气脱附，经过冷却后回收利用。通过设置多组吸附器循环切换使用，实现装置连续自动运行。实践证明，采用变温吸附技术回收净化生产过程中产生的有机废气，具有回收净化效率高、设备装置结构紧凑、安全节能，回收有机溶剂可用于再生产，节约资源，环境效益与经济效益显著，投资回收期短等特点，可广泛地应用于化工、石油、医药、农药等行业废气排放场所的环保治理和废气资源回收。

本技术的有机物净化效率一般大于 90%，最高可达 99.99% 以上；非甲烷总烃排放浓度一般小于 $120\text{mg}/\text{m}^3$ ，最低可达 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；单套设备投资大致为 150~800 万元。

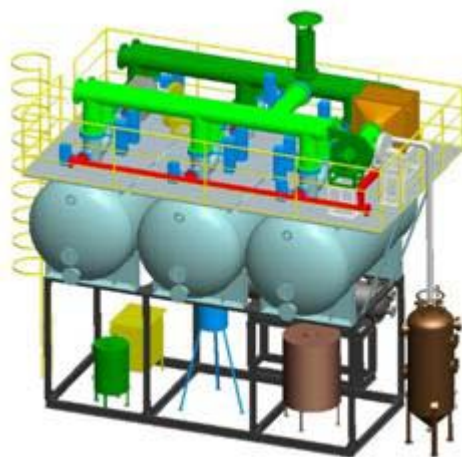


图 3-32 活性炭纤维吸附回收装置图 3-33 活性炭吸附回收装置

典型案例

案例名称

10万吨/年顺丁橡胶装置有机废气治理工程

项目概况

本项目已投运。

主要工艺原理

变温吸附有机废气治理及溶剂回收装置设置多个吸附器，共用一套管路系统。有机废气经预处理后由吸附器下部进入吸附器内，由外向内穿过活性碳纤维（活性炭），净化后的气体由吸附器顶部排出，达标排放。当达到动态吸附饱和后，吸附器自动切换到脱附状态，蒸汽由吸附器顶部进入，由内向外穿过活性碳纤维（活性炭层），将被吸附的有机物质脱附出来并带出吸附器进入冷凝器，有机废气和水蒸气的混合物被冷凝下来流入分层槽，利用重力分层原理进行分层回收；脱附干净的吸附器进入干燥再生工序。少量冷凝水进入化学污水处理系统。

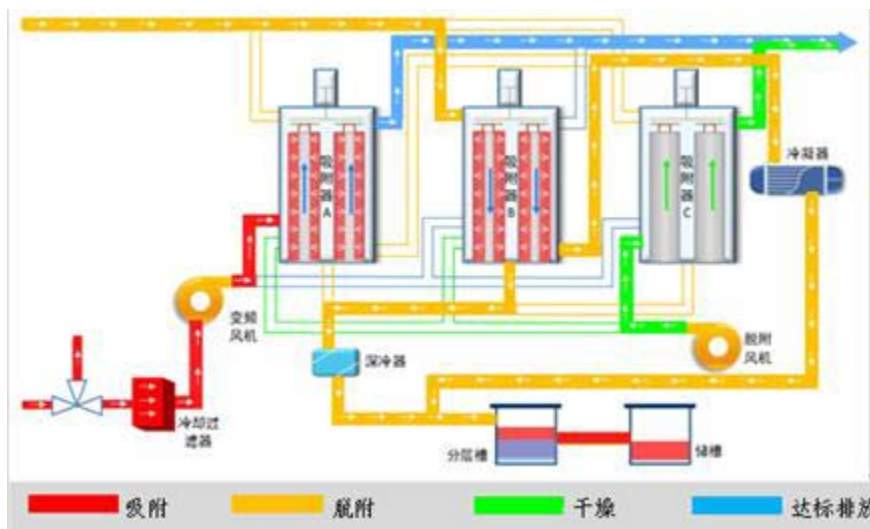


图 3-34 变温吸附有机废气治理及溶剂回收装置工艺原理图

关键技术或设计创新特色

- 采用专用活性炭/活性碳纤维作为吸附材料，具有极大的比表面积和吸附容量，能适应多种吸附工况，并实现长期稳定吸附；
- 采用多级吸附工艺，加强装置对有机废气的吸附回收效果，实现环保达标；
- 采用负压抽干技术，显著缩短干燥时间、提高脱附效率；
- 按照 Ex DIIBT4 防爆等级设计制造，安全可靠，适用于有爆炸危险的场所；
- 采用大功率风机实现彻底干燥，水分残留极少，确保吸附能力发挥到极致；
- 回收溶剂自动计量系统，结合“运行参数优化程序”，使得客户能在最短的时间内优化出最佳运行参数，降低运行费用。



图 3-35 案例现场图

主要技术指标

根据项目验收报告，本项目系统出口尾气指标满足 GB16297-1996 标准的要求，治理效率达到 95%以上（非甲烷总烃入口浓度为 $2000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，出口浓度 $70\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，远低于 $120\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的国家标准）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 500 万元。

运行费用

本项目水、电、水蒸气、管理等运行费用和维修费用共计 160 万元/年。装置回收的溶剂可全部作为生产原料或作为商品销售。

用户意见

本项目投运至今，运行情况良好，治理效果达到国家相关标准；故障率低、结构紧凑、便于维修；能耗低、运行成本低，拥有卓越的性能，能够得到良好的经济效益和社会效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清本环保工程（杭州）有限公司

联系人：李爽

地址：浙江省杭州市萧山区鸿达路 86 号

邮政编码：311215

电话：0571-83892392

邮箱：shuang_li@fpi-inc.com

50. 冷凝与变压吸附联用有机废气治理技术

冷凝与变压吸附联用有机废气治理技术是目前较为成熟的油气回收技术,适用于装卸车船、港口、油库等油气储、运、销石油挥发造成的有机废气的净化和回收,也适用于石化、化工等行业化学品装卸、储运过程中高浓度有机废气的净化和治理。本技术采用多级冷凝技术,使废气中的有机成分在常温下凝结成液体析出,经初步净化的废气进入活性炭吸附器进行富集,吸附饱和后采用负压脱附方式提取高浓度废气,并送回前端冷凝装置。冷凝与变压吸附联用处理工艺确保废气达标排放。本技术属于组合式有机废气治理技术,克服单纯冷凝技术在应用过程中能耗大、运行成本高的现象,同时弥补单纯吸附技术在应用过程中,设备体积大、吸附温升对安全运行有影响、长期运行吸附材料易失活等问题,具有工艺简明、净化效率高、运行成本低等特点。

本技术的有机物净化效率一般可达 97% 以上、尾气排放浓度 $\leq 20\text{g}/\text{m}^3$; 其他单项组分的排放浓度及排放速率,均满足并优于 GB16297-1996 和 GB14554-93 相关指标; 单位投资大致为 0.4~0.8 万/ m^3 , 单位小时运行成本为 0.1~0.2 元/ m^3 。

典型案例

案例名称

500m³ 石油储运行业变压吸附技术回收油气治理工程

项目概况

本项目已投运。

主要工艺原理

本装置为撬装设备，包含油气集气装置（鹤管），冷凝装置和吸附浓缩装置。有机废气首先经过引气泵，进入到预冷装置，利用第三级冷凝余气的冷量初步降温，然后进入到第一级冷凝，除去水气和一部分油气重组分（C6-C8 等）；之后余气体继续进入第二级冷凝，将 C5-C6 冷凝液化；之后余气体继续进入第三级冷凝，将 C4、C3 冷凝液化，对于含量微量的 C2 经过吸附罐富集，继续返回冷凝级。三级冷凝之后的余气，进入到活性炭罐，烃类残余分子被活性炭吸附，空气达标排放。在整个过程中，两个活性炭罐交替进行吸附、脱附工作，以实现装置连续工作。各级冷凝液化的回收物经过气液分离，暂存到回收物储罐，积累到一定液位自动泵入用户指定容器派用。经过吸附罐气体成分进入到活性炭吸附装置进一步进行净化，达到环保排放要求。

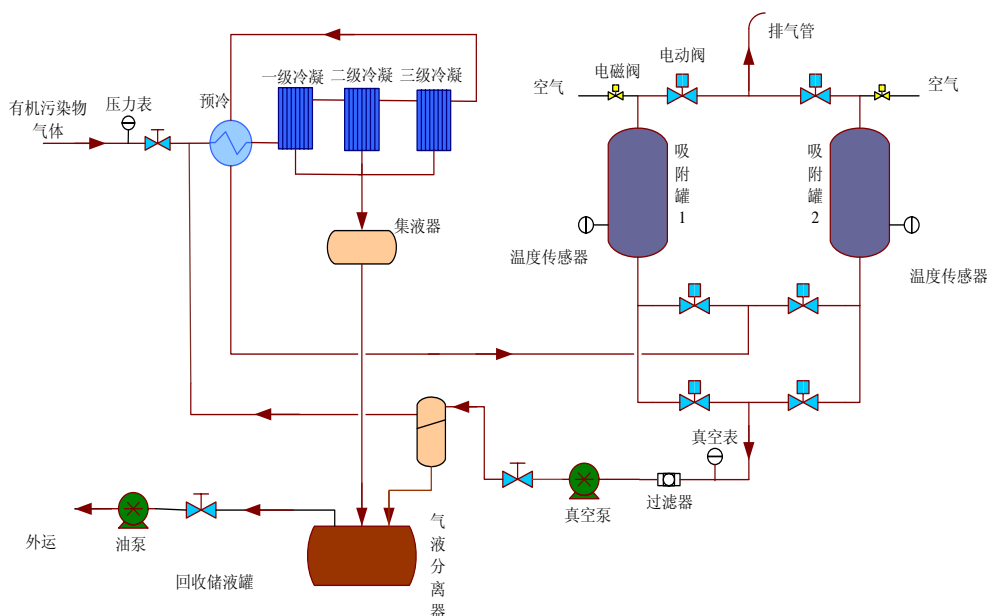


图 3-36 本项目工艺原理图

主要技术指标

根据项目验收报告，本项目系统出口尾气指标满足 GB16297-1996、GB20950-2007 标准的要求，非甲烷总烃治理效率高达到 98%（非甲烷总烃入口浓度为 205.1g/Nm³，出口浓度 19.5mg/Nm³）。

关键技术或设计创新特色

- 撬装模块设计，设备就位后，接入供电电缆即可运行，无须另外配置；
- 操作简单，既可在触摸屏的人机界面操作，也有一键按钮启停模式；

- 专项防爆设计，防爆等级为 Exd II BT4，防护等级不低于 IP65，安全可靠；
- 采用低霜工艺设计，设备连续运行 8 小时无需除霜。



图 3-37 鹤管密闭集气装置图 3-38 案例现场图

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 600 万元。

运行费用

本项目水、电、管理等运行费用和维修费用共计 20 万元/年。装置回收的溶剂可全部作为商品销售。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清本环保工程（杭州）有限公司

联系人：李爽

地址：浙江省杭州市萧山区鸿达路 86 号

邮政编码：311215

电话：0571-83892392

邮箱：shuang_li@fpi-inc.com

51. 转轮与蓄热式燃烧联用 VOCs 治理技术

燃烧法是利用挥发性有机物的可燃性，在一定的温度下将其通入到焚烧炉中进行燃烧，最终生成 CO_2 和 H_2O ，达标排放的方法。通常用于有机物成分复杂，不含高回收价值有机物或含有高沸点难回收化合物的情况。燃烧法是VOCs治理技术中发展较早，应用成熟、适用范围最为广泛的一种方法，装置可通过燃烧热量的利用，为企业创造一定的经济价值。

燃烧法根据燃烧温度和方式的不同一般分为直接燃烧法（TO）、催化燃烧法（CTO）和蓄热式燃烧法（RTO）。其中蓄热式燃烧技术具有处理效果彻底、不产生二次污染、节能降耗等优点。我国近年来取得了一些成功应用案例。但蓄热式燃烧技术在大风量低浓度工况下应用时，往往因装置体积较大、系统能耗过高而受到限制。

在此基础上，通过引进国外技术，进行消化吸收在创新开封的转轮与蓄热式燃烧联用有机废气治理技术，使用内含蜂窝状沸石分子筛的转轮作为浓缩装置，将低浓度的VOCs废气，浓缩转换成低风量、高浓度的废气，再进行燃烧处理。燃烧处理后的多余热能被虚热砖保存，将自动运用于预热进入燃烧机的高浓度废气，以及用于提供脱附浓缩转轮污染物所需的热气，热回收效率可达95%以上。本技术适用于任何风量大、浓度低的工况场所，适用范围广泛，具有处理效率高、能耗低、安全性强、结构紧凑等特点，无任何二次污染，废气治理效率超过95%，可达到99%以上。

典型案例

案例名称

半导体行业转轮浓缩与蓄热式燃烧联用有机废气治理工程

项目概况

本技术通过引进并进行再创新和本地化应用，本项目已投运。

主要工艺原理

针对现场排放的废气属于大风量、低浓度的特点，将废气进行集中收集后，采用高浓缩倍率沸石转轮浓缩设备将废气浓缩 15 倍，使风量降低到原有的 15 分之一，浓缩后的废气进入蓄热式燃烧炉进行处理。由燃料燃烧加热升温，被分解成 CO_2 和 H_2O ，反应后的高温烟气进入特殊结构的陶瓷蓄热体，95% 的废气热量被蓄热体吸收，温度降到接近进口温度。不同蓄热体通过切换阀或者旋转装置，随时间进行转换，分别进行吸热和放热，对系统热量进行有效回收和利用，热回收效率可达 95% 以上。废气出口设置热交换器，进一步回收燃烧产生的热量，最大限度起到节能的目的。

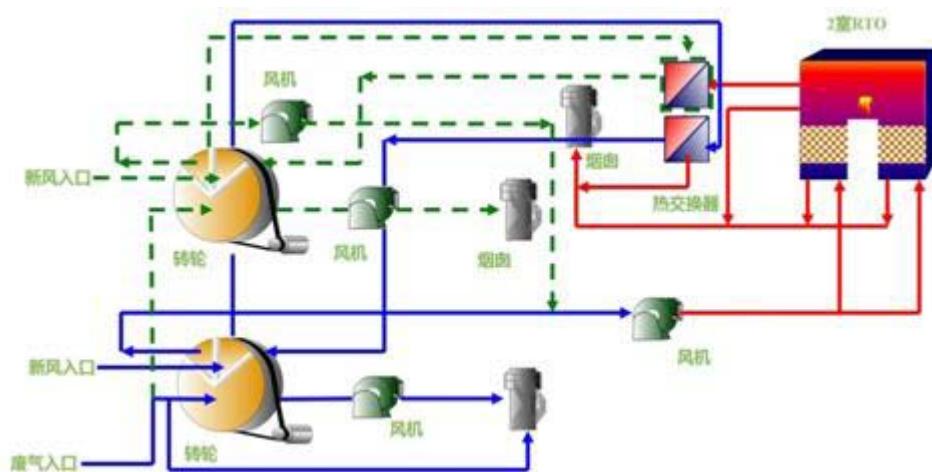


图 3-39 本项目工艺原理图

主要技术指标

根据在线监测仪器连续检测结果，本项目系统出口尾气指标满足 GB16297-1996 标准的要求，非甲烷总烃治理效率高达到 95%（入口浓度为 200ppm，出口浓度 10ppm）。

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的转轮浓缩技术，可将废气浓缩倍数介于 10 倍到 25 倍之间时；
- 根据客户需求，可设计两室、三室、多室或旋转式 RTO 装置，最高处理 100,000 m^3/h 风量；
- 高效的三级换热系统和余热回收系统，热量利用率达 95% 以上，有效降低系统能耗；
- 采用“蓄热式焚烧炉尾气切换峰值净化系统”，将阀门切换期间泄露的 VOCs 气体重新收集送入处理装置，处理更完全；

- 可实现无人值守连续运行，确保长时间有效运转；
- 整体系统采用模块化设计，同时可结合转轮系统效果，减少占地面积；



图 3-40 案例现场图

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1500 万元。

运行费用

本项目水、电、管理等运行费用和维修费用共计 80 万元/年。

用户意见

本项目投运至今，运行情况良好，治理效果经在线监测仪器 24 小时不间断监测，优于国家相关标准；本装置处理效率高、结构紧凑、自动化程度高等优点，对生产过程、职业健康环境和环境保护工作起到了很大的作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清本环保工程（杭州）有限公司

联系人：李爽

地址：浙江省杭州市萧山区鸿达路 86 号

邮政编码：311215

电话：0571-83892392

邮箱：shuang_li@fpi-inc.com

52.适用于煤化工行业酸性气体净化的硫磺回收工艺技术

煤化工硫磺回收装置原料气中硫化氢浓度低，含有甲醇、氨、氢氰酸等杂质，在“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”的基础上，在863计划课题(2012AA063101)支持下，我国相关单位自主研发形成了适合我国煤化工硫磺回收的工艺技术。

煤化工硫回收装置的原料酸性气中 H_2S 浓度约30%， CO_2 浓度通常在65%左右，其原料酸性气以低温甲醇洗酸性气为主，同时伴有水煤气膨胀气、变换汽提酸性气、酚回收酸性气、气化闪蒸气等。为了应对煤化工酸性气条件的苛刻性，三维公司采用“无在线炉硫磺回收工艺技术”结合多种尾气处理工艺进行设计。

采用的组合工艺如下：采用“无在线炉硫磺回收+尾气处理工艺技术”，即无在线炉硫磺回收+加氢还原工艺、吸收法脱硫工艺、循环流化床锅炉工艺。

同时，针对煤化工企业原料酸性气特点，进行了以下的技术创新：

- (1) 对原料酸性气进行预热；
- (2) 伴烧氢气、天然气、装置驰放气等；
- (3) 采用富氧Claus或纯氧Claus技术；
- (4) 制硫反应炉采用双区炉膛设计；
- (5) 将超低 H_2S 浓度酸性气($H_2S < 3\%$)直接引入尾气处理部分，大幅度缩减制硫部分主要设备规格；
- (6) 开发了新型尾气吸收用溶剂和设备，降低 CO_2 共吸收率和溶剂循环量。

典型案例（一）

案例名称

硫磺回收装置

项目概况

本项目硫回收装置为 EPC 总承包项目，装置采用适合煤化工的“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”，主要由硫磺回收、尾气处理、胺液再生、液硫脱气、液硫成型五部分组成。

硫磺回收装置年产硫磺约 21820 吨。装置运行时间按 8000 小时计，小时产量为 2.727t/h。硫磺回收装置于 2010 年 7 月 3 日投用，2010 年 7 月 10 日产出合格产品硫磺。

工艺技术原理

（1）制硫工艺

采用工艺路线高温热反应和两级催化反应的克劳斯硫回收工艺，将全部原料气引入制硫燃烧炉， H_2S 在炉中约 65% 发生高温反应生成气态硫磺。未完全反应的 H_2S 和 SO_2 再经过两级转化器，在催化剂的作用下，进一步完成制硫过程，转化率可达 95% 以上。

（2）尾气处理工艺

尾气处理采用加氢还原吸收工艺，将硫回收尾气中的元素 S、 SO_2 、COS 和 CS_2 等，在很小的氢分压和极低的操作压力下，用特殊的尾气处理专用加氢催化剂，将其还原或水解为 H_2S ，再用醇胺溶液吸收，吸收了 H_2S 的富液经再生处理，富含 H_2S 气体返回上游硫回收部分，经吸收处理的净化气中的总硫 $< 80ppm$ 。

（3）溶剂吸收工艺

溶剂吸收是利用化学吸收剂在非平衡状态下 MDEA 对 H_2S 的选择性优于 CO_2 。因质子传递， H_2S 与 MDEA 进行的反应几乎是瞬间完成的化学反应：

关键技术或设计创新特色

- 硫回收装置采用酸性气预热及 40% 富氧工艺技术。
- 采用富氧高旋流超强力制硫燃烧器，该设备通过特殊设计的燃烧装置产生理想的炉内化学平衡反应，避免将有毒物质(氮氧化物、碳黑、BTEX 等)带入后续工艺，进而通过与先进的尾气加氢还原工艺组合处理，使装置达到 99.9% 以上的硫磺回收率。
- 进一级转化器的过程气温度由高温掺合阀自动控制。尾气处理用烟气废热做热源，外供氢源，全过程不设在线加热炉，工艺节能、降耗、省投资。
- 装置设计将制硫炉的自动点火、进料、停车、吹扫、停电保护；尾气焚烧炉的自动点火、进料、停车、吹扫、停电保护等安全连锁引入 DCS，提高了装置运行的安全性和自动化水平。



图 3-41 案例现场图

主要技术指标

装置标定结论:

(1) 性能考核期间, 低温甲醇洗酸性气 H_2S 含量分析值为 31% 低于设计值 40.4%, 但制硫炉运行正常;

(2) 尾气吸收塔出口流量 FI207 超量程, 说明装置是在超负荷运行, 但尾气处理部分和胺液再生部分能够实现稳定运行;

(3) 本装置考核期间生产负荷为 108.67%, 硫磺产品质量中硫含量达到 99.99%;

(4) 尾气中 SO_2 排放浓度平均为 $720\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 11236 万元, 其中工程费约 10297 万元。

用户意见

本项目是世界首套、规模最大的煤制烯烃项目, 是我国十一五核准的煤基甲醇制烯烃工业化项目, 具有重要的示范意义。本装置运行平稳、操作方便, 各项指标均达到设计要求, 实现达标排放。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 山东三维石化工程股份有限公司

联系人: 赵瑞新

地址: 山东省青岛市市南区山东路 2 号甲华仁国际大厦三层

邮政编码: 266071

电话: 0532-81701009

邮箱: zhaoruixin@sdswnway.com.cn

典型案例（二）

案例名称

1200 万 Nm^3 煤制天然气工程第一、二期系列硫回收装置

项目概况

本装置制硫部分采用适合煤化工工艺的“两级克劳斯无在线炉硫磺回收工艺”，尾气部分采用氨法脱硫工艺。

硫回收装置分三期滚动建设，三期硫回收均采用两级克劳斯无在线炉硫磺回收+尾气氨法脱硫工艺，其中氨法脱硫一期同步实施，按三期规模设计。三个系列硫回收规模相同，每系列年产硫磺约 53333 吨（~160t/天）。

一期工程硫回收装置为 E（设计）+P（主要设备采购）项目，于 2012 年 5 月建设完成，2012 年 9 月底短期开工，产出合格硫磺产品；2013 年 6 月短期开工；2013 年 11 月正常开工。

二期工程为三维工程 E（设计）+P（全部设备及材料采购）项目，目前装置基本建成，尚未投产。

主要工艺技术原理

制硫工艺：采用工艺路线高温热反应和两级催化反应的克劳斯硫回收工艺，将全部原料气引入制硫燃烧炉，在炉中按制硫所需的 O_2 量严格控制配风比，使 H_2S 在炉中发生高温反应生成气态硫磺。未完全反应的 H_2S 和 SO_2 再经过两级转化器，在催化剂的作用下，进一步完成制硫过程，转化率达到 95% 以上。尾气处理工艺：尾气处理采用氨法脱硫工艺。

关键技术或设计创新特色

- 将两股低 H_2S 浓度酸性气直接引入尾气焚烧炉处理，大幅度缩减制硫部分主要设备规格；
- 三级硫冷凝器自产常压蒸汽，冷凝液循环使用，降低尾气中的硫分压，提高总硫收率。



图 3-42 案例现场图

主要技术指标

硫回收率 $\geq 95\%$ (wt); 硫磺产品质量: 纯度 $\geq 99.9\%$ (wt); 装置能耗: -18823MJ/t (硫磺)。

投资及运行效益分析

投资费用

本项目一期工程总投资约 8517 万元, 其中工程费约 8067 万元。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 山东三维石化工程股份有限公司

联系人: 赵瑞新

地址: 山东省青岛市市南区山东路 2 号甲华仁国际大厦三层

邮政编码: 266071

电话: 0532-81701009

邮箱: zhaoruixin@sdswnway.com.cn

53.石化、化工行业酸性气体净化无在线炉硫磺回收及尾气加氢还原吸收工艺技术

硫磺回收及尾气处理采用两级 Claus+尾气加氢还原吸收工艺,该工艺利用装置余热为热源,全过程不设在线加热设备。2010 年该工艺获得中国石油和化工勘察设计协会的专有技术称号(ZYJS2010-001s)和中国环保产业协会重点适用技术(2008-A-002, 2012-067)。

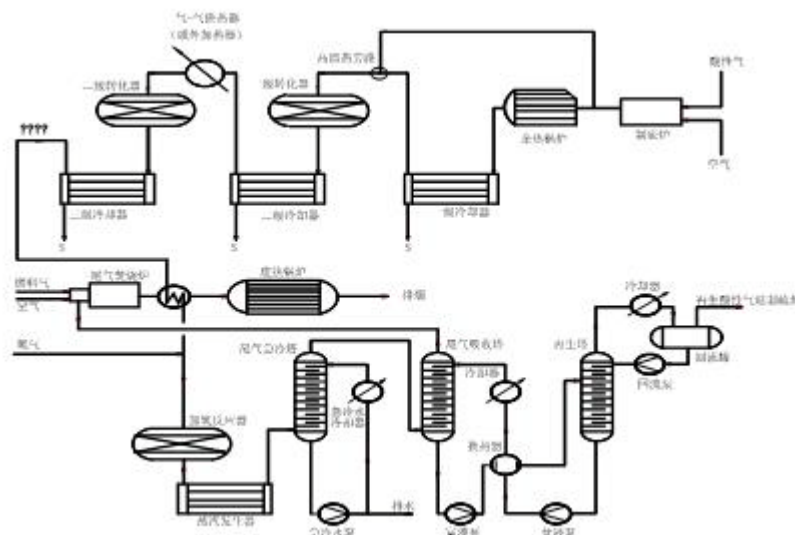


图 3-43 “无在线炉硫磺回收及尾气加氢还原吸收工艺”流程

三维公司的硫磺回收及尾气处理工艺与国内外同类工艺相比,具有以下特点:

(1)该工艺技术秉承无在线炉的理念,对于大型硫回收装置,将中压蒸汽再热方式引入工艺流程模式中,与高温掺合、气-气换热再热模式共存。

(2)优化中压蒸汽过热器的流程设计,避免低负荷工况下中压过热蒸汽超温。

(3)开发与硫回收相关的专利技术。

(4)在设备大型化设计中,不断积累经验,取得卓越成效。国内第一部《石油化工管壳式余热锅炉》(SH/T 3158-2009)由山东三维石化工程股份有限公司主编,该标准涵盖了管壳式余热锅炉类设备的材料选择、设计计算、结构设计、制造、检验、安装和验收。

(5)使用低温型尾气加氢催化剂,由于加氢反应器入口温度可以降低 60°C 左右,有效地降低了硫回收装置的能耗指标。

典型案例（一）

案例名称

240t/d 硫回收装置

项目概况

本项目硫回收装置采用“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”，装置设计能力日产硫磺 240 吨，总硫收率 $\geq 99.9\%$ ；单位产量(硫磺)计算能耗为： -8260.53MJ/t ；装置由制硫、尾气处理、尾气焚烧、中压除氧水供给等工序组成；装置 2005 年 12 月 19 日实现中交，2005 年 12 月 24 日投料安全运行，其后停运原有 100kt/a Claus-pol 引进技术的装置，对 Claus-pol 尾气处理部分按“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”进行改造，改造后全装置硫回收能力达到了 180kt/a。该项目 2010 年被中国环境保护产业协会确认为“国家重点环境保护实用技术示范工程”。

主要工艺原理

1)制硫工艺

采用工艺路线成熟的高温热反应和两级催化反应的克劳斯硫回收工艺，将全部原料气引入制硫燃烧炉，在炉中按制硫所需的 O_2 量严格控制配风比，使 H_2S 在炉中约 65% 发生高温反应生成气态硫磺。未完全反应的 H_2S 和 SO_2 再经过两级转化器，在催化剂的作用下，进一步完成制硫过程，转化率可达 95% 以上。

2)尾气处理工艺

尾气处理采用加氢还原吸收工艺，将硫回收尾气中的元素 S、 SO_2 、COS 和 CS_2 等，在很小的氢分压和极低的操作压力下(约 0.02~0.03MPa)，用特殊的尾气处理专用加氢催化剂，将其还原或水解为 H_2S ，再用醇胺溶液吸收，吸收了 H_2S 的富液经再生处理，富含 H_2S 气体返回上游硫回收部分，经吸收处理的净化气中的总硫 $< 80\text{ppm}$ 。

3)溶剂吸收工艺

溶剂吸收是利用化学吸收剂在非平衡状态下 MDEA 对 H_2S 的选择性优于 CO_2 。因质子传递， H_2S 与 MDEA 进行的反应几乎是在瞬间完成的化学反应。

关键技术或设计创新特色

- 因硫回收装置尾气处理的溶剂来自全厂溶剂集中再生，必须为硫回收尾气处理提供足够贫的溶剂，才能满足尾气排放 SO_2 浓度 $\leq 400\text{mg/m}^3$ 的要求。为此，溶剂再生采用了两段再生的新技术，再生塔中断抽出的贫溶剂供全厂脱硫用，塔底获得的精贫溶剂供硫回收尾气处理用，该技术的使用达到了预期效果。
- 尾气焚烧炉采用二次配风技术，有效抑制焚烧过程中 NO_x 的生成，烟气中 NO_x 控制在 $< 100\text{mg/m}^3$ 范围内。
- 将溶剂再生塔的再沸器首次改为釜式并与塔底液面等位设置，有效地解决了热虹吸式再沸器的气蚀问题，同时无需传统高低位设置的双液面控制。
- 装置总硫收率高，达到 99.8% 以上。

- 装置顺控及自动联锁实现全自动控制。



图 3-44 案例现场图

主要技术指标

装置标定结论：

- 1) 标定期间液硫产量达到 10.3t/h，达到设计负荷的 103%，满足了设计要求；
- 2) 产品硫磺达到《工业硫磺》GB/T2449-2006 优等品要求；
- 3) 装置大负荷生产情况下烟道外排尾气中 SO₂ 的量很低，最大时为 290mg/Nm³，达到设计要求，并完全符合《大气污染物综合排放标准》、《辽宁省酸性水与废气排放标准》的要求；
- 4) 各个反应器的催化剂性能非常好，转化率均超过了设计要求；
- 5) 公用工程消耗和能耗情况：实际消耗-169.1kg 标油/t 硫磺，低于设计值 -159.1kg 标油/t 硫磺。各种公用工程的消耗和产出均达到了设计要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程概算总投资（含溶剂集中再生及酸性水汽提装置）约 18659 万元，其中工程费约 15549 万元。实际结算投资 14674.84 万元。

运行费用

硫磺是一种重要的化工原料，设计年产量为 86520 吨，其质量要求符合国家工业硫磺标准 GB/T2449-2006 中一级品的要求。

用户意见

本项目设计的硫磺回收装置，符合国家标准规范的要求，投资省、占地少，各项经济技术指标均达到了设计要求。排放尾气完全符合《大气污染物排放标准》、《辽宁省酸性水与废气排放标准》的要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：山东三维石化工程股份有限公司

联系人：赵瑞新

地址：山东省青岛市市南区山东路 2 号甲华仁国际大厦三层

邮政编码：266071

电话：0532-81701009

邮箱：zhaoruixin@sdswnway.com.cn

典型案例（二）

案例名称

40000 吨/年硫磺回收装置

项目概况

本项目拆除原有 5000 吨/年硫磺回收装置所有的基础、设备及管线，在原位置上新建 4 万吨/年硫磺回收装置。装置采用“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”。

本项目于 2011 年 6 月 28 日开工建设，2012 年 2 月 29 日建成，历时 237 天。改建后的硫磺回收装置于 2012 年 4 月 16 日引酸性气进料投产，并生产出合格工业硫磺，一次开工成功。2012 年 5 月 23 日又成功将 S-zorb 装置再生烟气引入尾气处理单元，装置开工至今，运行安全平稳。

根据 2012 年 7 月 11 日至 13 日标定考核表明：装置设备运行正常，各生产指标合格，生产出的工业硫磺达到一级品指标，装置总硫收率 99.92% (wt%)，排放废气中二氧化硫含量仅 343mg/m³，完全符合国标《大气污染物综合排放标准》规定的二氧化硫排放浓度不超过 960mg/m³ 的要求；该装置工艺技术先进、自动化控制水平高，装置运行指标在中石化同类装置处于先进水平。

主要工艺原理

技术原理

（1）制硫工艺

采用工艺路线成熟的高温热反应和两级催化反应的克劳斯硫回收工艺，将全部原料气引入制硫燃烧炉，在炉中按制硫所需的 O₂ 量严格控制配风比，使 H₂S 在炉中约 65% 发生高温反应生成气态硫磺。未完全反应的 H₂S 和 SO₂ 再经过两级转化器，在催化剂的作用下，进一步完成制硫过程，转化率可达 95% 以上。

（2）尾气处理工艺

尾气处理采用加氢还原吸收工艺，将硫回收尾气中的元素 S、SO₂、COS 和 CS₂ 等，在很小的氢分压和极低的操作压力下(约 0.02~0.03MPa)，用特殊的尾气处理专用加氢催化剂，将其还原或水解为 H₂S，再用醇胺溶液吸收，吸收了 H₂S 的富液经再生处理，富含 H₂S 气体返回上游硫回收部分，经吸收处理的净化气中的总硫 < 80ppm。

关键技术或设计创新特色

- 采用“无在线炉硫磺回收及尾气处理工艺技术”，第一次将催化汽油吸附脱硫装置(S-zorb)含硫尾气和催化裂化烟气脱硫装置的再生气引入硫磺回收装置处理，有较高的技术难度。
- 关键设备设计采用公司的专利技术，如高温气-气换热用挠性薄管板换热器、硫磺回收装置多功能尾气焚烧炉、石油化工装置加热炉耐露点腐蚀复合衬里等。
- 采用低温型尾气加氢催化剂，优化工艺设计，装置运行平稳，排放达标。



图 3-45 案例现场图

主要技术指标

- (1) 自 2012 年 4 月 16 日开工运行，在目前装置负荷不足 30%的情况下，装置操作平稳，显示装置有较大的操作弹性；
- (2) 装置能耗达到-104.95kg 标油/t；
- (3) 通过标定期间的环保监测，在 S-Zorb 再生烟气并入尾气加氢的情况下，烟气 SO₂ 排放浓度为 200mg/m³~280mg/m³，SO₂ 排放量为 4.5kg/h，NO_x 排放浓度为 31mg/m³，排放量为 0.26kg/h。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 9894 万元，其中工程费约 8906 万元。

运行费用

作为环保装置，每年处理含有高浓度 H₂S 的酸性气等含硫气体 8.395 万吨，总硫收率 99.92%。排放的 SO₂ 仅为 51.76t/a，排放浓度和排放量均低于《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996) 的要求，大大减少了对环境的污染，其社会环境效益非常显著。

硫磺是一种重要的化工原料，设计年产量为 40000 吨，其质量要求符合国家工业硫磺标准 GB/T2449-2006 中一级品的要求。

用户意见

本装置工艺采用“无在线炉硫磺回收与尾气处理工艺”，能够处理清洁酸性气、污水汽提含氮酸性气、S-zorb 再生烟气。装置工艺技术较先进，装置操作平稳，仪表控制齐全。通过标定期间的环保监测，在 S-zorb 再生烟气并入尾气加氢的情况下，烟气 SO₂ 排放浓度为 200mg/m³~280mg/m³，SO₂ 排放量为 4.5kg/h，NO_x 排放浓度为 31mg/m³，排放量为 0.26kg/h，实现达标排放的要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：山东三维石化工程股份有限公司

联系人：赵瑞新

地址：山东省青岛市市南区山东路 2 号甲华仁国际大厦三层

邮政编码：266071

电话：0532-81701009

邮箱：zhaoruixin@sdswnway.com.cn

54.生活垃圾及工业危废焚烧烟气净化系统技术

我国自主研发了垃圾焚烧及工业危废焚烧尾气净化技术。目前主流采用“活性炭吸附+干法脱酸塔+袋式除尘器”或“活性炭吸附+干法脱酸塔+袋式除尘器+湿法脱酸”的工艺路线,干法净化工艺是将碱性反应物以干粉形式喷入反应塔中,中和反应的生成物以固态形式收集,通过除尘器除尘后的酸性气体从袋式除尘器出口出来,再进入湿式脱酸塔进行二级脱酸,实现生活垃圾及工业危废焚烧烟气净化后污染物达到国家排放标准限值要求。

同时,为了减少焚烧烟气水气(气溶胶)的排放和消除民众对垃圾焚烧炉的恐慌,在焚烧烟气净化系统中创造性开发集成了烟气脱白技术,通过降低烟温除湿,再经换热装置提高烟温后排除,达到肉眼看不到烟囱的白烟(水蒸气)。

典型案例（一）

案例名称

30 吨/天的工业危废集中焚烧烟气净化系统工程

项目概况

本项目于 2013 年 3 月投运至今系统运行稳定，烟气净化系统各项指标达到排放要求。

主要工艺原理

本项目采用“活性炭吸附+干法脱酸塔+袋式除尘器+湿法脱酸”工艺，急冷塔出来后在反应脱酸塔前的连接烟道中喷入活性炭，与烟气混合后进入脱酸反应塔用于吸附烟气中是有害物质；烟气从脱酸反应塔底部进入，在脱酸反应塔的底部被增湿补充水系统加湿，然后与熟石灰粉高效反应后至顶部出口排出，进入袋式除尘器；反应塔出来后经过烟道后烟气进入布袋除尘器并在滤袋表面形成结构膜，在滤袋表面再次进行脱酸及吸附反应；烟气从布袋除尘器出来后进入湿式脱酸塔进行湿法脱酸。烟气通过整套脱酸工艺后达标排放。由布袋除尘器收集下来的飞灰，由气力输灰装置送入储灰仓。

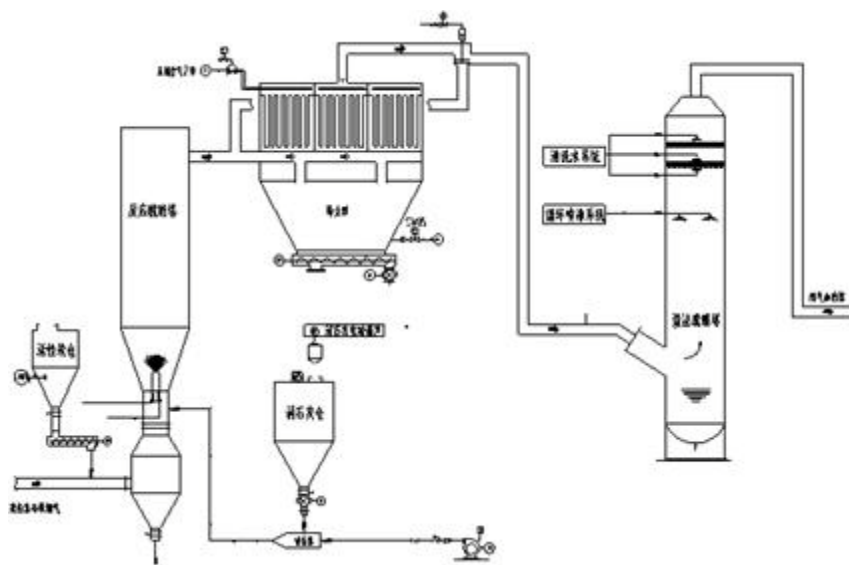


图 3-46 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 改进传统的干法/半干法脱酸工艺，结合湿法脱酸，脱酸效率大幅提高，同时湿法脱酸进一步降低了 $PM_{2.5}$ 细颗粒物的排放，能够满足欧盟 2000 标准；
- “活性炭吸附+干法脱酸塔+袋式除尘器+湿法脱酸”工艺，达到多污染协同处理，在脱酸除尘的同时，降低重金属、二恶英等污染物的排放浓度，满足排放要求。
- 系统可扩展性好，自动化程度高，系统根据实时排放浓度，自动调节药粉和药剂的添加和喷射量，节约成本。



图 3-47 案例现场全貌图



图 3-48 案例干法脱酸塔

主要技术指标

表 3-1 本项目主要运行参数

序号	污染物	数值 (mg/Nm ³)
1	烟气黑度	林格曼 I 级
2	烟尘	20
3	一氧化碳 (CO)	60
4	二氧化硫 (SO ₂)	120
5	氟化氢 (HF)	7.0
6	氯化氢 (HCL)	30
8	汞及其化合物 (以 Hg 计)	0.1
9	镉及其化合物 (以 Cd 计)	0.1
10	砷、镍及其化合物 (以 As+Ni 计)	1.0
11	铅及其化合物 (以 Pb 计)	1.0
13	二噁英类	0.1TEQ ng/m ³

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 300 万元。

运行费用

根据实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 80 万元/年，年维修费用约 10 万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱酸、除尘效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该烟气净化工程带来了显著环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：科林环保装备股份有限公司

联系人：周和荣

地址：江苏省苏州市工业园区通园路 210 号科林大厦

邮政编码：215021

电话：0512-62512888

E-mail: kelin@188.com

典型案例（二）

案例名称

350 吨/天生活垃圾焚烧烟气脱白工程

项目概况

本项目投运至今系统运行稳定，烟气脱白效果明显，达到设计要求。

主要工艺原理

本项目烟气脱白工艺是采用一套烟气换热器（GGH）通过布袋除尘器后的 155℃ 高温烟气对洗涤塔后的 48℃ 低温烟气进行加热，被加热后的烟气达 110℃ 后再由烟囱排入大气。

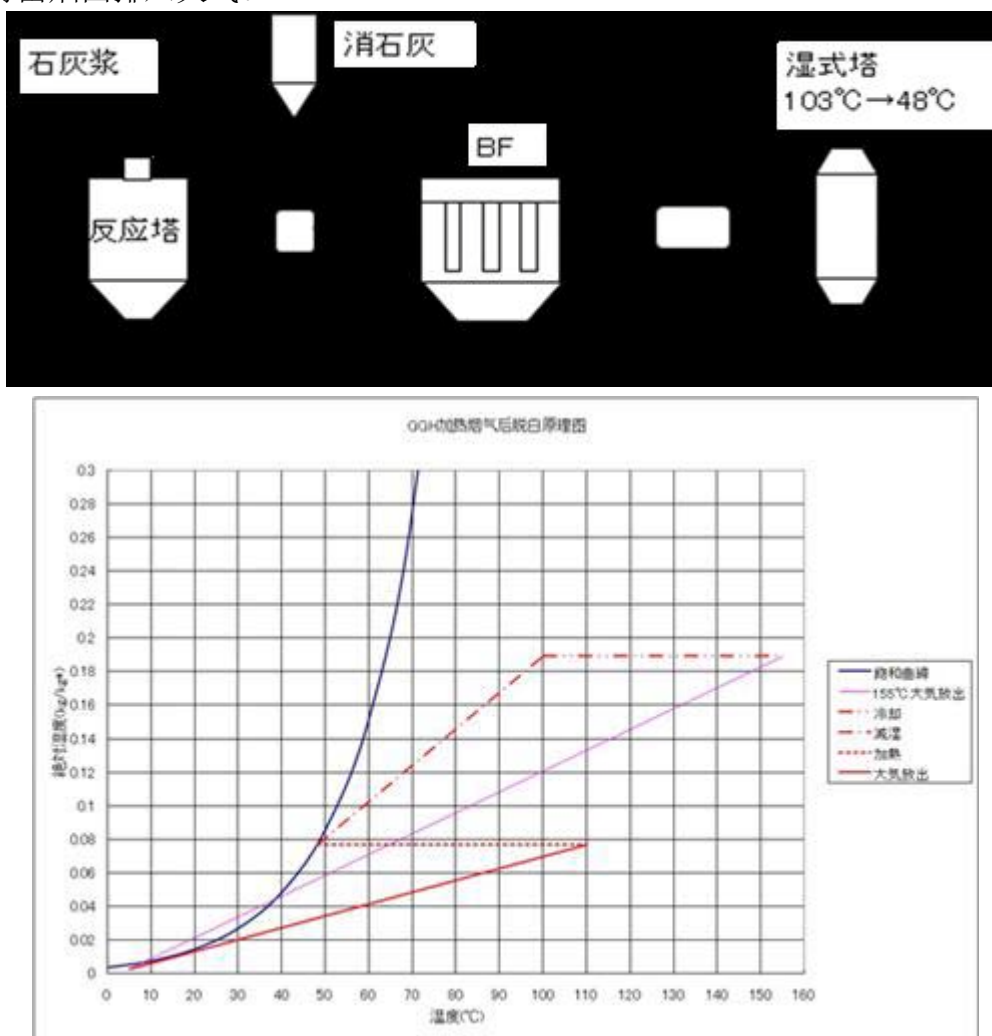


图 3-49 本项目烟气脱白工艺流程

关键技术或设计创新特色

- 循环冷却喷淋洗涤脱白塔
- 防堵耐酸专用烟烟换热器（GGH）



图 3-50 换热器及洗涤塔图 3-51 脱白系统运行效果对比照片

主要技术指标

出口烟气脱白效果：以肉眼观测不到白烟为准；烟气出口水分含量： $<8\%$ （质量比）；系统运行阻力： $<3000\text{Pa}$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 650 万元。

运行费用

根据实际运行情况，水、电、气、管理等运行费用约为 50 万元/年（以冬季 4 个月计），年维修费用约 8 万元。

用户意见

本项目投运至今，烟气脱白效果明显，各项耗能指标达到或优于设计要求。该烟气脱白工程为带来了显著环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：科林环保装备股份有限公司

联系人：周和荣

地址：江苏省苏州市工业园区通园路 210 号科林大厦

邮政编码：215021

电话：0512-62512888

E-mail: kelin@188.com

55.黄磷尾气催化净化技术

在 863 计划课题（黄磷尾气催化氧化净化系列催化剂开发研究：2004AA649040，氰化氢混合废气净化技术与设备 2008AA062602）、国家自然科学基金等项目资助下，形成了黄磷尾气催化净化成套技术，该技术获 2011 年云南技术发明一等奖。该技术以黄磷尾气低温微氧催化氧化净化、催化净化专用催化剂载体、硫氰同步催化水解和低常温转化净化、高效吸收-液相催化氧化耦合净化及催化净化系列专用装备等关键技术为基础，开发了黄磷尾气制取碳一化工原料气、材料制备燃气、发电锅炉燃气、普通锅炉燃气等四种工艺，能够满足不同深度净化要求。除磷化工行业外，本成果应用领域已拓展到电石、钢铁等排放 CO 工业废气的行业，对相关行业节能减排具有重要借鉴意义和推动作用。



图 3-53 黄磷尾气净化用部分成套设备

典型案例（一）

案例名称

黄磷尾气净化后用于碳一化工合成气工程

项目概况

本项目净化工程于 2008 年 9 月建成投产，安全稳定运行至今。

主要工艺原理

黄磷尾气（含 HCN、PH₃、H₂S、COS、CS₂ 等有害杂质）经换热器加热至 150℃~200℃后送至催化水解反应器，90%以上的 HCN 和 85%以上的 COS、CS₂ 可分别被水解成为 NH₃ 和 CO、H₂S 和 CO₂；之后，混合气进入选择性催化氧化反应器，PH₃ 和 H₂S 被催化氧化成 P₂O₅ 和 S，催化氧化单元中根据净化成本和净化气杂质指标要求采用不同的催化剂净化，使用 ZP-1 催化剂净化后 PH₃、H₂S 含量分别低于 20mg/Nm³，满足普通锅炉燃气要求；使用 ZP-2 催化剂净化后 PH₃、H₂S 含量分别低于 10mg/Nm³，满足电厂锅炉燃气要求；使用 ZP-3 催化剂净化后 H₂S 含量低于 1mg/Nm³，PH₃ 含量低于 0.1mg/Nm³，满足材料制备燃气要求。经过催化氧化净化后的混合气中仍含有一定量的 H₂S、HCN、COS 和 CS₂，HCN 在精脱氧反应器中进一步去除，出口气流中 HCN 含量可降至 1.9 mg/m³ 以下；经过精脱硫反应器后，气流中 H₂S、COS 和 CS₂ 含量也可降至 0.1 mg/m³ 以下；HCN 水解产生的 NH₃ 在选择性催化氧化反应器中被氧化成 N₂，催化氧化效率可达 90%以上，该气体可满足碳一化工原料气要求。

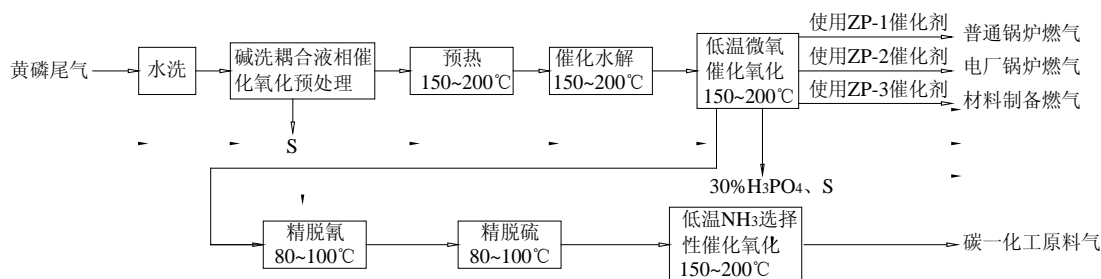


图 3-54 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- **黄磷尾气预转化技术**，即碱洗耦合液相催化氧化工艺，采用石灰乳、烧碱等进行碱洗预处理，将元素磷（P₄）气溶胶转化为易于氧化的 PH₃ 气体，进而采用本技术成果中的低温微氧催化氧化系列技术，实现黄磷尾气的深度净化。碱洗主要目的是脱除氟化物和 S、P、As 等氧化物，P₄ 在碱性条件下转化为 PH₃，与此同时部分 H₂S 被脱除。

- **催化水解工艺**，采用本技术成果多功能水解催化剂，同时催化净化 HCN 和 COS、CS₂，水解产物为 NH₃、H₂S、CO 和 CO₂，其中 NH₃ 和 H₂S 随气流进入后续工序继续处理。催化剂工作温度 150~200℃，HCN 催化转化效率 >95%，COS、CS₂ 催化转化效率 >90%。

● **低温微氧催化氧工艺**，前处理过程中已将 P_4 转变为 PH_3 ，并去除了大部分 H_2S 及其它杂质，利用黄磷尾气中氧气过剩系数为 18 以上的特点，从安全出发，首次开发了在不补氧的条件下（低温微氧） PH_3 、 H_2S 同时催化氧化净化技术，并研制出低温微氧催化剂。利用黄磷尾气中微量的 O_2 ，选择适宜的具有良好活性和选择性的氧化催化剂，将黄磷尾气中的 PH_3 、 H_2S 在低温条件下选择性催化氧化为更易于吸附分离的 P_2O_5 和 S ，以免 CO 被氧化。催化剂再生过程还可回收磷、硫资源。

● **低常温精脱氰与精脱硫工艺**，采用 HCN 专用深度净化技术，工作温度 $50\sim 150^\circ C$ ，脱除效率 $>99\%$ ，可使混合气体中 HCN 含量降至 $1.9\text{ mg}/\text{Nm}^3$ 以下， COS 和 CS_2 在催化剂作用下，与微量水反应生成 H_2S ， H_2S 在催化剂作用下，与微量氧反应生成单质硫沉积在催化剂微孔中，达到脱除的目的。脱除效率 $>99\%$ ，可使混合气体中的含硫气体组分均降至 $0.1\text{ mg}/\text{m}^3$ 以下。



图3-55 案例现场图

主要技术指标

2011年5月由第三方检测中心对本净化装置原料气、洗涤净化出口、固定床催化净化出口、水解精脱出口等进行检测的结论：黄磷尾气净化制碳一化工原料气工艺水解精脱出口 HCN 、 PH_3 、 H_2S 、 COS 、 CS_2 、粉尘及焦油等均低于最低检出浓度。根据采用的分析方法标准，各组分最低检出浓度分别为： $HCN0.009\text{mg}/\text{m}^3$ （ $GBZ/T\ 160.29-2004$ ）， $PH_30.001\text{mg}/\text{m}^3$ （ $GBZ/T\ 160.30-2004$ 气相色谱法），硫化物 $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ （ $GBZ/T160.33-2004$ 气相色谱法），粉尘 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ （ $GBZ/T\ 192.1-2007$ ）。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1800 万元。

运行费用

根据 2011 年 1~12 月实际运行情况,水、电、粉、气、管理等运行费用约为 20.04 万元/年,年维修费用约 18.33 元。单位运行成本 65.3658 元/千 m³。该项目年净化黄磷尾气 1.638 亿 Nm³,年产值 5896 万元,年利润 2839 万元。

用户意见

本项目投运至今,各项技术指标优良,无任何环保事故,系统净化效率达到设计要求。该项目经济、社会及环境效益显著。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:昆明理工大学

联系人:宁平

地址:云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码:650500

电话:13708409187

E-mail: ningping58@sina.com

典型案例（二）

案例名称

黄磷尾气净化后用于电厂锅炉发电项目

项目概况

本项目净化工程于 2010 年 3 月运行至今。

主要工艺原理

黄磷尾气（含 HCN、PH₃、H₂S、COS、CS₂ 等有害杂质）经换热器加热至 150~200℃ 后送至催化水解反应器，90% 以上的 HCN 和 85% 以上的 COS、CS₂ 可分别被水解成为 NH₃ 和 CO、H₂S 和 CO₂；之后，混合气进入选择性催化氧化反应器，PH₃ 和 H₂S 被催化氧化成 P₂O₅ 和 S，催化氧化单元中根据净化成本和净化气杂质指标要求采用不同的催化剂净化，使用 ZP-2 催化剂净化后 PH₃、H₂S 含量分别低于 10mg/Nm³，满足电厂锅炉燃气要求。

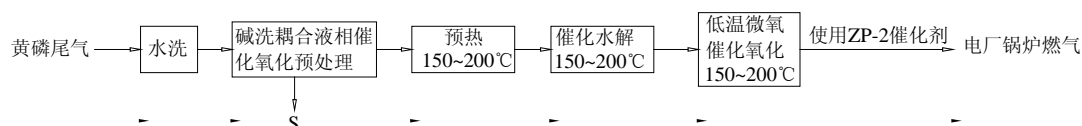


图 3-56 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

- 黄磷尾气预转化技术。
- 催化水解工艺。
- 低温微氧催化氧化工艺。



图3-57案例现场图

主要技术指标

经第三方检测结果表明，净化后黄磷尾气 H₂S、PH₃ 等小于 5mg/m³，要稳定用于该公司自电厂锅炉发电。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1870 万元。

运行费用

净化后每立方黄磷尾气可发电 1.6 千瓦时，每年可节约 7.63 万吨标准煤。

用户意见

该项目投运至今，系统运行安全稳定，各项耗能指标达到或优于设计要求。该工程为公司带来了显著的经济环境效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：昆明理工大学

联系人：宁平

地址：云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码：650500

电话：13708409187

E-mail: ningping58@sina.com

56. 含氰废气净化及资源化利用技术

在 863 计划“氰化氢混合废气净化技术与设备”(2008AA62602)课题支持下,我国开展了液相催化氧化净化过程机理及效果的研究,筛选出适用于液相催化氧化的系列双金属离子催化剂, Pd(II)-Cu(II)催化剂在常温、常压下对尾气中部分杂质气体的脱除效率接近 100%,但也发现单一液相催化反应存在:氧溶解度低、产物与催化剂分离难、多杂质同步净化难等问题,电化学协同液相催化氧化技术是解决单一液相催化反应存在问题,是实现同步净化硫、氰的强化途径。电化学协同能最大限度发挥液相催化优势,液相催化存在的问题正好可通过电化学方式得以解决,不仅能解决还原气氛下液相催化氧溶解度低的问题,还能强化氰吸收净化和强化催化剂再生。该技术实现还原气氛尾气中硫氰气体的同步深度脱除,不仅可缩短工艺流程,降低净化成本,也将推动含 CO 工业废气资源化利用。

关键技术包括:(1)电化学协同液相催化氧化同步净化还原气氛尾气中硫氰技术。通过电化学氧化作用氧化再生催化剂,增强催化剂的催化稳定性,有效解决尾气中氧含量低或氧溶解度不高而导致的氧化转化效率低的问题,并且可以利用电渗析作用实现催化氧化产物的富集浓缩,从而实现同步深度净化硫、氰的资源化利用。适用于碳纤维及炭黑生产、生物质裂解、煤焦化、煤液化、煤气化、高炉炼铁等过程中尾气资源化利用工程;(2)工业废气中氰化氢的催化氧化、电渗析净化技术;(3)工业废气中硫化物液相催化氧化净化技术。工业废气经换热后,进入接触吸收催化氧化同步单元,液相催化氧化溶剂经过滤再生单元循环使用,经吸收净化后的尾气作为原料气回用。

本技术已在国内相关行业实现产业化应用,产生了显著的经济、环境和社会效益。

典型案例

案例名称

炭黑尾气综合利用工程

项目概况

本项目在原有 1.5 万吨/年湿法硬质炭黑生产装置上使用了含氰废气净化及资源化利用技术。

主要工艺原理

H_2S 、 HCN 催化氧化反应可表示为： $\text{H}_2\text{S} + 1/2\text{O}_2 \xrightarrow{\text{催化}} \text{S} + \text{H}_2\text{O}$ ； $\text{CN}^- + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{催化}} \text{CO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ ，但单一液相催化反应存在氧溶解度低、多杂质同步净化难，电化学协同作用时，在阳极室内通过电化学氧化作用氧化再生催化剂，增强催化剂的催化稳定性，有效解决尾气中氧含量低或氧溶解度不高而导致的氧化转化效率低的问题，并且可以利用电渗析作用实现催化氧化产物的富集浓缩，从而实现同步深度净化硫、氰的资源化利用。

关键技术或设计创新特色

- 工业废气中氰化氢的催化氧化、电渗析净化技术，
- 工业废气中硫化物液相催化氧化净化技术，

主要技术指标

工程于2009年9月21日开始运行，每小时处理尾气量为 13000Nm^3 ，年处理尾气量 1.296亿Nm^3 ，净化处理后尾气热值提高 $837.4\text{--}1674.7\text{J/Nm}^3$ ，用作回炉燃烧气置换出优质焦炉煤气，实现了经济效益与环境效益的双赢。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1674 万元(以年处理尾气量 1.296 亿 Nm^3 为例)。

运行费用

年运行费用总计106.68万元，主体设备寿命15年。成本（水、电、粉、气、管理、人工、折旧等运行费用106.68万元，炭黑尾气实现收入214.00万元。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统余热利用效率达到设计要求，各项耗能指标达到或优于设计要求。该尾气综合利用工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：昆明理工大学

联系人：宁平

地址：云南省昆明市呈贡大学城昆明理工大学环境科学与工程学院

邮政编码：650500

电话：13708409187

E-mail: ningping58@sina.com

57.低浓度甲烷蓄热催化氧化利用技术

甲烷是一种优质洁净能源。长期以来,来自天然气、采煤采油伴生气以及石油化工和煤化工过程的中、高浓度甲烷主要用作工业、民用燃料以及化工原料。与此同时,排放量巨大的低浓度甲烷(0.1~1.0vol.%),如煤矿矿井乏风瓦斯和焦炉气等中的甲烷则难于直接作为能源利用,直接排放至大气又因甲烷较高的升温潜势从而加剧温室效应。因此,经济有效地处理低浓度甲烷,开发低浓度甲烷利用技术是环境与能源领域重要的研究方向之一。

甲烷催化氧化技术,空燃比可控,且尾气中 NO_x , CO 和未燃烧碳氢化合物排放大幅下降。流向变换催化氧化技术将预热、反应和热量回收高效集成在单一设备内,流程简化,投资和操作费用低,在甲烷利用方面有着广泛的应用前景。

在国家“十五”863课题(2001AA324050、2005AA001020)的支持下,中国科学院生态环境研究中心等单位开发了高效的低浓度甲烷蓄热催化氧化利用技术。该技术适用于钢铁、有色、机械、石油化工、玻璃、陶瓷、锅炉、垃圾焚烧等行业的各类工业炉窑、民用取热装置、煤层气、焦炉气、乏风利用等。

该技术的原理是:甲烷和空气进行预混和后,均匀通过催化剂床层,在催化剂表面上甲烷的完全氧化过程。技术的工艺流程是:基于流向变换反应器设计,包括两个催化剂固定床及一套以实现周期性流向变换的阀门系统构成,固定床顶端为催化剂床层,底部为高热容的蓄热体。开始反应前将固定床预热到催化剂的活化温度,然后按设定的周期开始流向变换。一个燃烧器预热燃气并组织表面催化燃烧时,另一个燃烧器排烟和回收余热。经过若干个周期之后,反应器形成了一个拟稳态。采用关键技术包括高活性、高热稳定性的甲烷催化氧化材料;高效安全蓄热催化氧化装置。

适用的甲烷处理量:100~10000 m^3/h ,已经在华南地区某工业锅炉改造工程应用。华南地区某工业锅炉改造工程,处理风量:400 m^3/h ,燃烧效率相比同条件下气相燃烧提高8~10%,尾气中一氧化碳浓度低于50ppm,氮氧化物(NO_x)浓度低于10ppm。

该技术既可用于新建低浓度甲烷发电装置,也可用于现有炉窑节能改造,节能效率提高8%~10%。该技术可经济有效地解决典型低浓度甲烷无序排放控制问题,并实现能源有效利用。和火焰燃烧相比,尾气CO排放减少75%以上, NO_x 排放减少80%以上。

我国有关单位开发了低浓度甲烷催化氧化利用技术与设备,仅需在现有设施的基础上进行简单工程改造即可提高燃气的利用效率,降低尾气中 NO_x 和CO排放;该系统运行安全稳定,所用催化材料寿命长,高温稳定,成本低廉,具有非常好的实用性。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:中国科学院生态环境研究中心 联系人:郝郑平

地址:北京市海淀区双清路18号 邮政编码:100085

电话:010-62923564 E-mail:zpinghao@rcees.ac.cn

58. 低温等离子体协同净化机制处理复杂有毒有害工业废气技术

催化、吸收、吸附、生化等净化技术处理含气雾的有机废气、冶炼酸雾、化工生产废气、材料表面处理气雾、餐饮油烟、冶金冷却油雾之类复杂有毒有害工业废气，通常存在催化材料易中毒、吸收效率不高、吸附剂易饱和而且不便再生利用、难以生化降解或系统运行稳定性较差等问题。

在国家 863 计划课题“放电等离子体协同吸收脱除燃煤烟气 SO_2 、 NO_x 、 Hg 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的研究”（2007AA06Z313）、“高效空气净化技术和组件开发及安全评价技术研究”（2010AA064904）和国家自然科学基金课题“低温等离子体净化湿熄焦气雾污染物”（20977003）、“低温等离子体脱除湿法烟气脱硫排气氮氧化物和雾粒的研究”（21377009）等的支持下，我国有关单位研发了低温等离子体协同生化处理气雾中的多种有机污染物。

主要的技术原理：先利用构型优化的低温等离子体反应组件产生强氧化性活性粒子。然后，利用活性粒子全部或部分氧化难降解的有机组分。最后，利用生化作用彻底矿化部分降解的有机组分。

主要的技术指标：在低于 0.5wh/m^3 的能量注入条件下，三氯甲烷、甲苯、苯酚、4-氯酚净化效率高于 90%， O_3 排放浓度低于 0.8mg/m^3 。

包括的关键技术：低温等离子体组件及其强氧化性活性粒子生成技术；低温等离子体氧化与生化氧化协同利用技术。

低温等离子体协同净化机制处理复杂有毒有害工业废气是指借助高压电场分离复杂有毒有害工业废气的气溶胶组分；利用低温等离子体净化或改性复杂有毒有害工业废气的气态污染物组分；利用生化、催化、吸收或吸附等常规净化机制处理低温等离子体改性的污染组分。这种技术方案能够克服了现有低温等离子体技术存在的二次污染和能耗高，以及部分污染物不能高效生化降解、催化技术应对复杂有机废气存在的易中毒、吸收作用不能高效分离水溶性差的污染组分等问题。通过低温等离子体与常规净化作用机制的合理匹配不仅可高效净化污染物，而且降低运行费用，防止二次污染。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：郝郑平

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮政编码：100085

电话：010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

四、机动车尾气排放控制关键技术

59.汽油车尾气催化净化技术

汽车尾气催化净化技术的核心为三效催化剂。其主要成分包括贵金属（Pd、Pt、Rh）、储氧材料（铈锆复合氧化物 $(\text{Ce}, \text{Zr})\text{O}_x$ ，简称CZ）及分散层材料（ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）等。将三效催化剂负载在蜂窝陶瓷载体上，当汽车尾气通过蜂窝陶瓷载体的规则孔道内壁时，与三效催化剂接触便可将汽车尾气中的CO、HC和 NO_x 等主要污染物催化转化成 CO_2 、 H_2O 和 N_2 等无害物质。

其中低铑高钯金属三效催化剂制备关键技术如下：

（1）三效催化剂的主要活性组分为贵金属，因此三效催化剂性能与成本的平衡关键就在于贵金属的利用率。通过引入具有优异储放氧性能的稀土材料和具有大比表面积、高热稳定性的氧化铝材料，提高贵金属的分散度；通过稀土材料和氧化铝材料对贵金属的协同作用，在保证催化剂催化性能满足国V排放标准前提下，降低催化剂中贵金属尤其是Rh的用量，实现技术型成本控制。

（2）贵金属定域化技术：采用独特的分区或分层涂覆工艺，有效调控载体不同位置贵金属的浓度与比例，发动机原始排放针对性更强，同时有利于目标污染物的快速起燃，提高催化剂的催化转化能力。

（3）催化剂涂层耐久性技术：通过引入适量的特种粘结剂，结合特殊涂覆工艺，有效提高了催化剂活性涂层与载体间的粘结强度，催化剂涂层不易脱落，可满足国V排放标准对于催化剂16万公里耐久性要求。

（4）净化器轻量一体化技术：采用自动化封装流水线，结合CCD检测及称重技术、CNG数控技术，实现净化器壳体一体成型，提高封装效率，实现净化器轻量化。通过以上低铑高钯金属三效催化剂制备技术，贵金属定域化技术，催化剂涂层耐久性技术及净化器轻量一体化技术成功开发出满足国V排放标准的低成本高性能汽油车尾气催化净化器。使用该催化净化器，可使汽车尾气排放满足 $\text{CO}<1.0\text{mg/Km}$ ， $\text{THC}<0.1\text{mg/Km}$ ， $\text{NMHC}<0.068\text{mg/Km}$ ， $\text{NO}_x<0.06\text{mg/Km}$ ，净化器寿命 ≥ 16 万公里。 NO_x 排放量更是在国四排放标准基础上再降低25%。

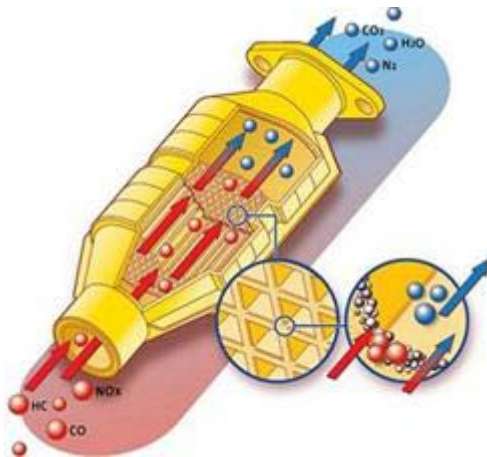


图 4-1 汽车尾气净化器工作原理示意图

典型案例（一）

案例名称

经济型国 IV 催化剂及生产线建设工程

项目概况

本技术属于国家 863 课题（项目编号 2006AA060305、2009AA064803）产学研合作开发成果，本项目于 2007 年 6 月催化剂配方和生产线建设同步开始，2007 年 11 月第一条 300 万升生产线完成建设开始运行，催化剂产品推向国内汽车市场；2009 年 6 月扩建工程启动，2010 年 3 月正式完成 600 万升催化剂生产线建设并开始给国内多家汽车企业提供催化剂产品。

主要工艺原理

满足国 IV 排放标准的经济型催化剂仅采用价格较低的贵金属 Pd 作为活性组分，采用单包体双载体的结构设计，前块为 600 目 $\Phi 101.6 \times 62$ 载体，传热较快，能有效加快催化剂对 HC 与 CO 催化的起燃速度。当前块 Pd 含量为 $70\text{g}/\text{ft}^3$ 时，对还原气体的催化氧化活性最佳；后块采用 $\Phi 101.6 \times 90$ 的大体积载体，提高了催化剂对 NOx 的催化活性，进而通过优化整车匹配技术包括氧传感器的性能与监测以及 OBD 技术等，最终实现多个车型整车排放满足国 IV 排放标准。催化剂生产线主要包括配料线、涂覆线、烘干与焙烧线等，如图 4-2~4-4 所示。其核心技术难点在于如何实现快速、精确的定位涂覆。本项目采取了优化分段（分区）涂覆催化剂工艺，并将涂覆线设计改造为真空涂覆生产线，保证了单批次精度可达到 $\pm 3.0\%$ ，多批次到达 $\pm 5.0\%$ 。

在以上催化剂设计、整车匹配以及生产的基础上，本项目实现了江淮汽车瑞鹰 4GA3、S11+472、S21+473+MT/AMT、A21+481+MT/AMT、T11+481+MT/AMT、A15+477、A21+477；吉利豪情 479（1.3L）；华晨骏捷 1.8LVVT 等 50 个车型国 IV 排放验证。截至项目完成时，已建成年产 600 万升国 IV 催化剂生产线，其中年产 100 万升国 IV 催化剂的涂覆工序采用真空涂覆工艺。利用本课题开发的技术开发的车型，实现了 16 万只催化净化器出口，主要出口到巴西、俄罗斯、伊朗等国家。



图4-2催化剂配料系统



图4-3催化剂涂覆系统



图4-4催化剂烘干、焙烧系统

关键技术或设计创新特色

- 针对陶瓷蜂窝状载体的催化剂特殊涂覆要求,开发出了满足国 IV 排放标准催化剂的定量定位真空涂覆工艺,涂覆精度达到 $\pm 5.0\%$
- 催化剂配方采用低成本的全 Pd 型设计,通过单包体双载体的催化剂结构实现了催化剂低贵金属含量、高性能、长寿命。批量化生产催化剂现已达到国 IV 排放要求,实验室单项技术可达到国 V 排放法规要求。

主要技术指标

根据第三方检测报告,本项目生产的匹配江淮汽车 4GA3、4GB1、4GB2、海马 470、474、4A91、4A90、上海通用无菱 B12、天津夏利 3GA2、TA1;华晨骏捷 1.8L VVT 等 50 余款车型的催化剂已经通过国 IV 排放验证,催化剂寿命超过 10 万公里。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1.3 亿元。

运行费用

根据 2010 年 6 月-2013 年 6 月实际运行情况,水、电、气、管理等运行费用约为 3800 万元/年(含人工费,管理费),年维修费用约 500 万元。催化剂全部作为商品销售。

该项目的实际经济净效益约为 7000 万元/年。

用户意见

本项目投运至今,各项技术指标优良,无任何环保事故,各项耗能指标达到或优于设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:无锡威孚环保催化剂有限公司

联系人:王家明,徐岷

地址:无锡市新区灵江路 9 号

邮政编码:214028

电话:0510-81136868

E-mail: xuxian@wfec.com.cn

典型案例（二）

案例名称

满足国 V 排放标准的汽车尾气净化器研发及产业化项目

项目概况

本技术得到 863 课题（项目编号 2006AA060306、2009AA064804）、国家工信部产业化项目等的支持。本项目一方面负责低铈高钨金属三效催化剂制备技术，贵金属定域化技术及催化剂涂层耐久性技术开发；另一方面负责净化器轻量一体化技术开发及满足国五排放标准的高性能汽油车尾气催化净化器的规模化生产。

主要工艺原理

将具有优异储放氧性能的稀土材料和具有高比表面积改性氧化铝材料，结合特定的粘结剂研磨成浆，吸附贵金属后，利用蜂窝陶瓷载体的吸水性将活性浆料涂覆在蜂窝陶瓷载体规则的孔道内壁，高温焙烧后活性涂层固定在蜂窝陶瓷载体的孔道内壁。将涂覆后的蜂窝陶瓷载体包裹衬垫后压入不锈钢筒体中，旋压并焊接成不同的封装形式即为汽车尾气催化净化器。该净化器连接在发动机出气口与消声器中间，当废气从发动机排气口排出后，与蜂窝陶瓷载体规则孔道内壁的催化剂涂层接触后，发生催化反应，将发动机废气中的 HC、CO 和 NO_x 等有害物质催化转化成 CO₂、H₂O 和 N₂ 等无害物质后排入空气中。

通过筛选粘结剂的种类和确定粘结剂的合理用量，可有效增强涂层材料和蜂窝陶瓷载体间的粘结强度，涂层不易脱落，净化器的使用寿命长。通过控制吸浆高度，调配浆料中材料的比例可实现浆料的分区、分层涂覆。通过引入新的稀土材料和改性氧化铝材料，可提高贵金属在涂层表面的分散度，同时稀土材料和改性氧化铝材料与贵金属的协同作用可提高贵金属的利用率，在确保性能的前提下，显著降低贵金属的用量。通过上述技术参数的调变，可针对不同原始排放的发动机灵活设计三效催化剂方案，结合发动机地盘空间设计不同的封装形式从而开发出针对不同车型的高性能汽油车尾气催化净化器。



图 4-5 本项目工艺流程图

关键技术或设计创新特色

● 通过引入具有储放氧性能的稀土材料和具有大比表面积、高热稳定性的氧化铝材料，提高贵金属的分散度，通过稀土材料和氧化铝材料对贵金属的协同作用，在保证催化剂催化性能满足国 V 排放标准前提下，降低催化剂中贵金属尤其是 Rh 的用量，实现技术型成本控制。

● 采用分区或分层涂覆工艺，可有效调控载体不同位置贵金属的浓度与比例，实现贵金属的定域化设计，发动机原始排放针对性更强，同时有利于目标污染物的快速起燃，提高催化剂的催化转化能力。

● 通过引入适量的粘结剂，结合特殊涂覆工艺，可显著提高催化剂活性涂层与载体间的粘结强度，催化剂涂层不易脱落，满足国 V 排放标准对于催化剂 16 万公里耐久性要求。

● 采用自动化封装流水线，结合 CCD 检测及称重技术、CNG 数控技术，实现净化器壳体一体成型，提高封装效率，实现净化器轻量化。

主要技术指标

根据与中兴 SUV 车型 4G69 发动机配套试验结果，净化器对 HC、CO、NO_x 和 NMHC 的实际排放值为 0.0325、0.558、0.0336 和 0.0286 g/Km，远远满足国 V 排放标准的要求。

根据与华泰 B11 车型上汽 1.8T 发动机配套试验结果，净化器对 HC、CO、NO_x 和 NMHC 的实际排放值为 0.0728、0.4815、0.024 和 0.066 g/Km，远远满足国 V 排放标准的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本项目预计总投资 10000 万元，固定资产投资 5500 万元（土建 4000 万元，设备 1500 万元），研发投入 2000 万元，原材料及辅料购置费用 1800 万元，其他费用 700 万元。项目共投入研发经费近 2000 万元，主要用于技术研发、原材料消耗、新产品试制、中试试验及试制设备仪器购置、技术合作交流、产品检测、产业化设备配置等。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故。所生产产品完全满足国五排放标准，且具有明显成本优势，市场竞争力强。经多家汽车制造厂商使用，反馈良好，市场前景广阔。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江达峰汽车技术有限公司

联系人：王磊

地址：浙江省湖州市长兴县长兴经济技术开发区太湖大道 1403 号

邮政编码：313100

电话：0572-6258099

E-mail: rightman11@163.com

60.柴油车尾气 NO_x 净化技术

柴油车尾气脱硝技术原理与火电厂等固定源烟道气脱硝大致相同，区别在于还原剂 NH₃ 主要由 Urea 分解产生，尿素(Urea)与水以适当比例混合，喷入废气中，能将废气中的 NO_x 还原成 N₂ 和水。在高温环境中（温度高于 300℃），加上催化剂的作用，NO_x 能迅速与氨气反应，生成氮气和水。但柴油车尾气中的 NO_x 成分随发动机工况波动较大，并且尾气温度相对较低处于 150℃~400℃，因此柴油车尾气脱硝的难点在于尿素的供给及喷氨策略。目前，尿素选择性还原 NO_x (Urea-SCR) 体系已成为满足欧 VI 与 US2010 标准的重型柴油车 NO_x 净化的首选技术，已经得到规模化应用。Urea-SCR 多使用含钒催化剂。该催化剂在较宽的温度范围内具备了优异的选择性还原 NO_x 的能力，260~500℃ 的温度范围内 NO_x 的净化率可达 90% 以上，该催化体系的耐硫性能良好，燃油经济性损失可控制在 3% 以内，但其高温下会因载体晶型的转变而逐渐丧失活性。

在欧洲，自 2006 年 2 月 28 日推出首辆装置 Urea-SCR 后处理系统的卡车以来，已有 55 万辆机动车装备了该后处理系统，并形成了 25000 套/月的配套能力。为了保障 EPA2010 的顺利实施，美国已开始了 DEF (Diesel Emission Fluid, 尿素) 添加的布建工作。

近年来，在 863 计划等课题的支持下，在实用化催化剂 (DOC 与钒基 SCR) 开发与生产线建设、新型非钒 SCR 催化剂研制、还原剂添加与匹配控制技术、高性能颗粒物捕集器及再生、后处理装置研制、系统集成等方面形成了一批拥有自主知识产权的研究成果，为解决我国柴油车污染排放提供了有效的解决方案与有力的技术支撑。

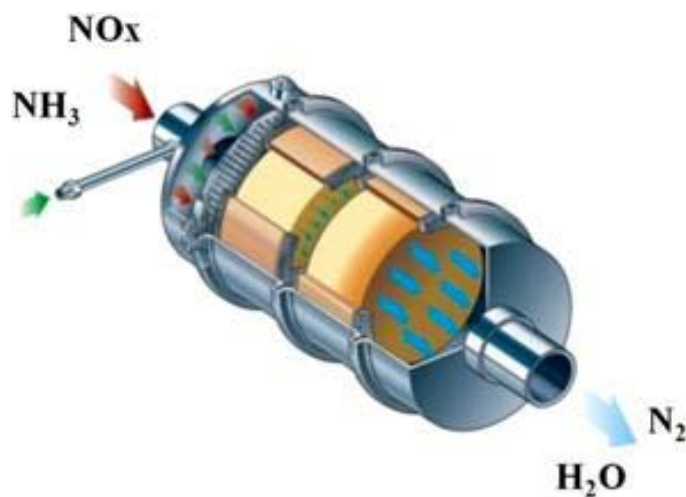


图 4-6 SCR 催化转化器

典型案例（一）

案例名称

满足国 IV 排放标准的重型柴油车尾气净化器研发及产业化

项目概况

本技术属于国家 863 课题(2001AA643040、2006AA060304、2013AA065301, 科技报告编号 400012254 -- 2006AA060304/18) 开发成果。本课题部分成果通过了中国科学院组织的科学技术成果鉴定(中科院成鉴字[2013]第 010 号, 成果名称: 重型柴油车污染排放控制的高效 SCR 技术研发及产业化)。

基本原理

通过机内调整使重型柴油车 PM 排放达标; 在催化转化器内, 柴油车尾气中的 NO_x 与外加还原剂如氨(尿素水解) 发生选择性催化还原反应, 转化为氮气。依据发动机的工作状态及尾气排温特性, 还原剂的添加量由匹配系统精确控制, 以确保 NO_x 的高效还原, 同时防止还原剂的过量添加引发二次污染。整个后处理系统由催化转化器、还原剂存储与添加装置以及匹配控制系统构成, 系统集成如图 4-7 所示。

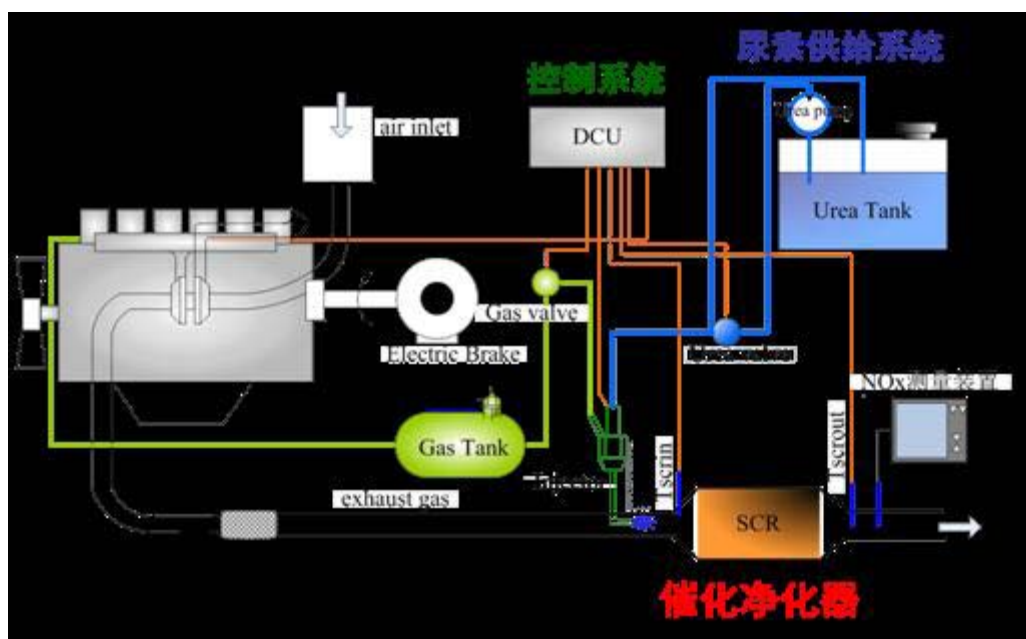


图 4-7 重型柴油车后处理系统结构示意图

关键技术或设计创新特色

- 高效、耐久的 NO_x 选择性还原催化剂;
- 还原剂添加匹配控制技术;
- 后处理系统集成技术。

应用情况简介

2010 年本项目建设了年产 3.6 万套的 SCR 催化剂及封装生产线(图 4-8)。2012 年开始了 30 万套生产线(图 4-9) 扩建, 设备投资约 3000 万元。完成了生产线产品的装车示范与运行(图 4-11), 在中国重汽生产的 5 大系列 22 种重型柴

油车上实现了规模化应用，可满足我国重型柴油车国 IV 排放达标的市场需求；整套后处理系统价格约为 1 万元，较同类进口产品降低 50% 以上。



图 4-8 年产 3.6 万套的中试生产线图 4-9 年产 15 万套的生产线

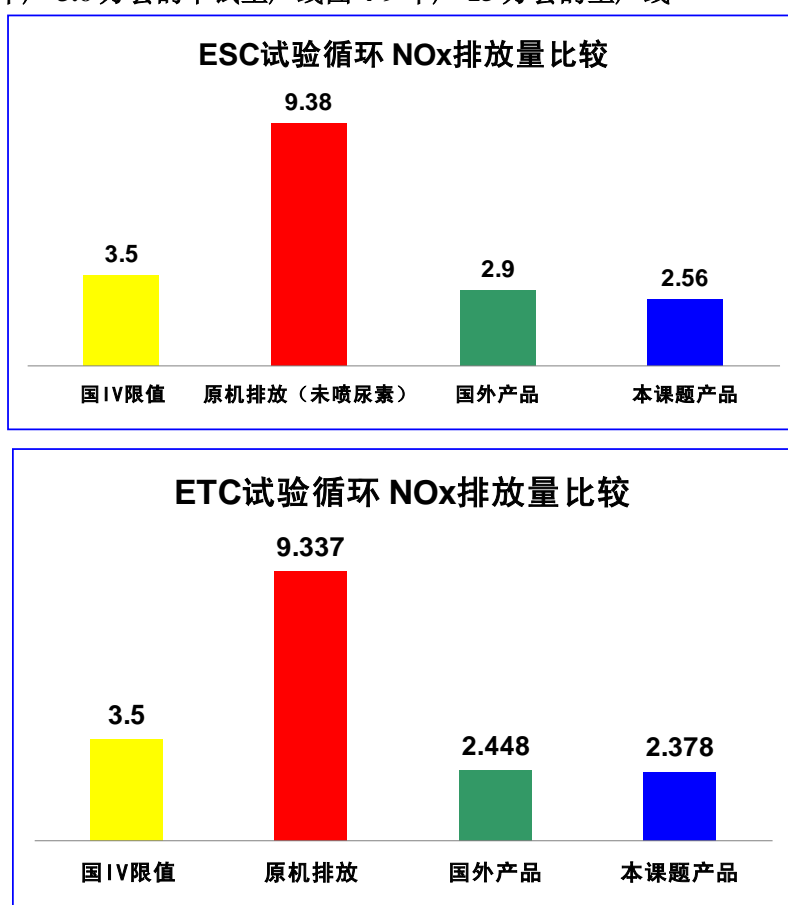


图 4-10 生产线产品国 IV 达标性能检测



图 4-11 后处理系统的集成与示范运行

(二) 经济和社会效益分析

2012 年我国重型卡车销售量为 63.6 万辆，如全部装备后处理系统将会有近 100 亿元的市场规模，可每年削减 NO_x、PM 排放分别约 45 万吨、1200 吨；至十二五末期重型柴油车新车后处理配套将接近 150 亿元。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院生态环境研究中心

联系人：贺泓

地址：北京市海淀区双清路 18 号

邮编：100085

电话：010-62849123

E-mail: honghe@rcees.ac.cn

典型案例（二）

案例名称

澳门中型柴油车尾气脱硝中试

项目概况

本技术属于国家 863 课题（项目编号 2009AA06Z304）产学研合作开发成果，本项目于 2012 年 6 月开始设计，2012 年 9 月完成设备的试运行。



图 4-12 澳门机动车改装车辆

表 4-1 进行 SCR 改装的澳门中型吊车资料（牌照：ML-57-38）

车辆	ISUZU 中型吊车
车型	FUSO FE85PGZSRDA M/T
排量/cc	3907
车重/t	9
发动机	4D34-K55228
购车日期	06/5/29
改装方案	SCR

主要工艺原理

系统由 SCR 催化净化器、喷 Urea 系统和相关控制系统组成，通过对发动机进行 NO_x 标定确定喷 Urea 的策略，并通过 NO_x 传感器的数据对喷 Urea 策略进行修正，并对脱硝效果进行有效跟踪记录。

关键技术或设计创新特色

脱硝效果最高能够达到 60%。

主要技术指标

针对澳门中型吊车进行了 Urea-SCR 脱硝后处理改装，净化器安装于靠近柴油发动机排气口的位置，烟气温度范围 150℃~350℃。中试结果表明，脱硝系统的脱硝效率为 30%~60%，但容易受到柴油车排气温度低和颗粒物堆积的影响。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约：3 万元/辆。

运行费用

预计运行成本：0.12 元/km。

用户意见

初步达到了有效的中型柴油车脱硝后处理改装。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学材料学院

联系人：吴晓东

地址：北京市海淀区清华大学逸夫技术科学楼 2815

邮编：100084

电话：010-62792375

E-mail: wuxiaodong@tsinghua.edu.cn

典型案例（三）

案例名称

15 万套 SCR 催化剂产品的生产线

项目概况

本项目已投资 6000 万元，厂房面积 13000m²，建立了一条年产 15 万套 SCR 催化剂产品的生产线。

主要工艺原理

SCR 系统主要由 SCR 催化转化器、电控单元、尿素罐、尿素泵(尿素溶液供给模块)、计量模块、喷雾器及各种传感器组成。

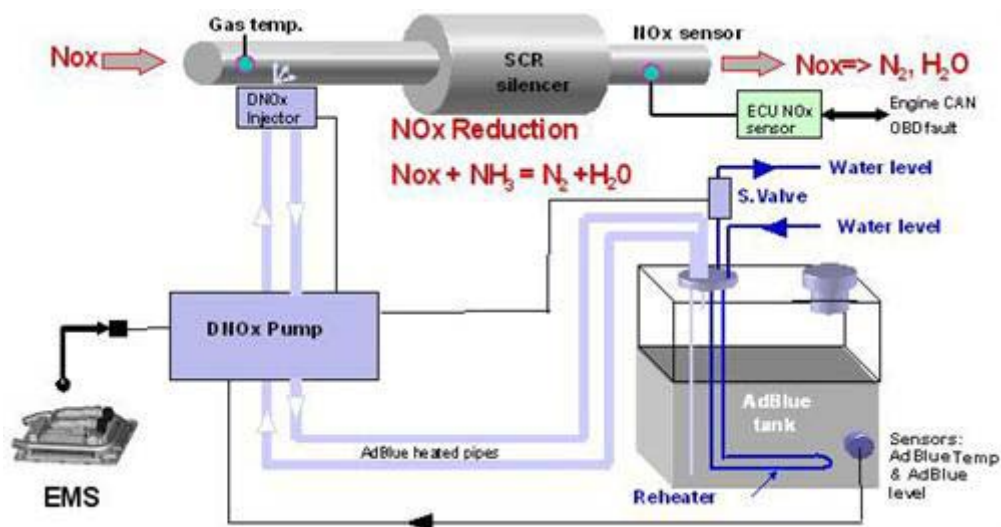


图 4-13 柴油车 SCR 控制系统

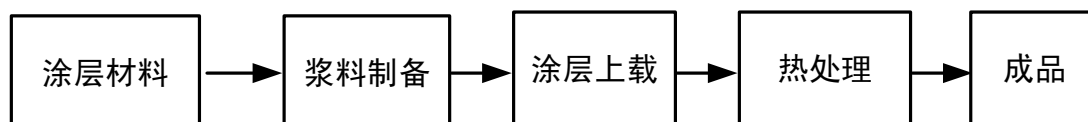


图 4-14 本项目工艺流程图

关键技术

- 优化钒基催化剂的组成和制备方法，开发低钒 SCR 催化剂；
- 开发高水热稳定性及抗硫中毒性能的分子筛型 SCR 催化剂；
- 高固含量和高流动性的分子筛类涂层料液的制备技术。

主要技术指标

典型规模：年产 15 万套。

投资及运行效益分析

总投资：6000 万元（以年产 15 万套为例）；

运行费用总计（水、电、天然气）：600 万/年；

主体设备寿命：10 年。

可对柴油机尾气排放的氮氧化物进行催化还原消除，大幅减少柴油机尾气排放对环境造成的污染。

用户意见

本项目开发的 SCR 催化剂产品，具有很高的氮氧化物催化转化效率和高温稳定性，并能很好地适应国内油品。虽然该产品生产线的投资较大，但由于该产品具有很好的国家政策背景，使得该产品具有庞大的市场，市场风险较小。而且，该产品技术含量很高，为高附加值的产品，具有很高的总投资收益率。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：华东理工大学工业催化研究所

联系人：卢冠忠，郭耘

地址：上海市徐汇区梅陇路 130 号

邮编：200237

电话：021-64253703

E-mail: gzhlu@ecust.edu.cn

61. 柴油车尾气颗粒物过滤消除技术

颗粒物过滤器（DPF）是解决柴油机尾气颗粒物排放问题的最有效方法，对 PM 的捕集效率可达 90% 以上。美国、日本的柴油车和欧洲的轻型柴油车一般都采用 EGR（废气再循环）+DPF 的技术路线控制尾气排放。DPF 的材料形式有堇青石、碳化硅、碳酸铝、泡沫陶瓷、编织陶瓷纤维、金属丝网、金属纤维毡等，流体形式有壁流式、直通式和部分流等。其中，最常用的是壁流式堇青石或碳化硅材质的 DPF 产品。在轻型柴油车方面，日本、北美和欧盟已经将 DPF 作为一种降低柴油机尾气碳烟颗粒必不可少的方法。

但当 DPF 中 PM 积聚到一定量时，会使排气背压过高，此时就需要更换 DPF 或进行再生处理。DPF 的再生方法分为主动再生和被动再生两大类：主动再生是利用外加能量（如：电加热器、燃烧器或发动机操作条件的改变以提高排气温度）使 DPF 内部的温度达到 PM 的燃烧温度而进行的再生；被动再生指利用柴油车排气本身所具有的能量进行再生。

我国在“十二五”863 项目的支持下，开发出了可用于碳烟催化燃烧的催化剂、大尺寸壁流式 DPF 的涂层上载技术等，形成了工业化技术，并在江苏蓝烽新材料科技有限公司得以产业化。所生产的 CDPF 对碳烟的最大燃烧温度低于 430°C，实现了 CDPF 的连续再生，并具有良好的抗硫稳定性。

国内在 SiC 材质 DPF 方面也取得了重要进展，利用交互堵塞的蜂窝通道之间的多孔间壁，捕获柴油机废气中的微粒，具有极强的捕获碳烟超细纳米微粒的能力，同时过滤面积大，压降较低，结构紧凑。重结晶碳化硅材料制成的壁流式颗粒过滤器，具有优异的耐高温、耐腐蚀性能和导热性能，机械强度大，抗热震性强，使用寿命长等优点。另外 ART 型柴油车排气后处理装置正式把握综合解决柴油机车尾气污染物的管控目标，解决低排气温度下的 DPF 再生难题，实现了后处理装置和整机整车的良好匹配。



图 4-15 ART 型柴油车排气后处理装置图



图 4-16 重结晶碳化硅蜂窝陶瓷壁流式微粒过滤器

典型案例（一）

案例名称

10 万件颗粒物过滤器生产线

项目概况

本项目已投资 6000 万元，厂房面积 19000m²，建立了一条年产 10 万件颗粒物过滤器产品的生产线。

主要工艺原理

将 CDPF 安装在柴油发动机的排气系统中，尾气通过专门的通道进入过滤器，经过其内部的壁流式通道，将碳烟颗粒吸附在过滤器上。同时，由于过滤体壁上涂有氧化型催化剂，使碳烟颗粒能在正常的柴油机排气温度的下燃烧，导致碳烟颗粒吸附后可直接被燃烧变成无害气体（理想状态是二氧化碳），从而实现颗粒物过滤器的再生。

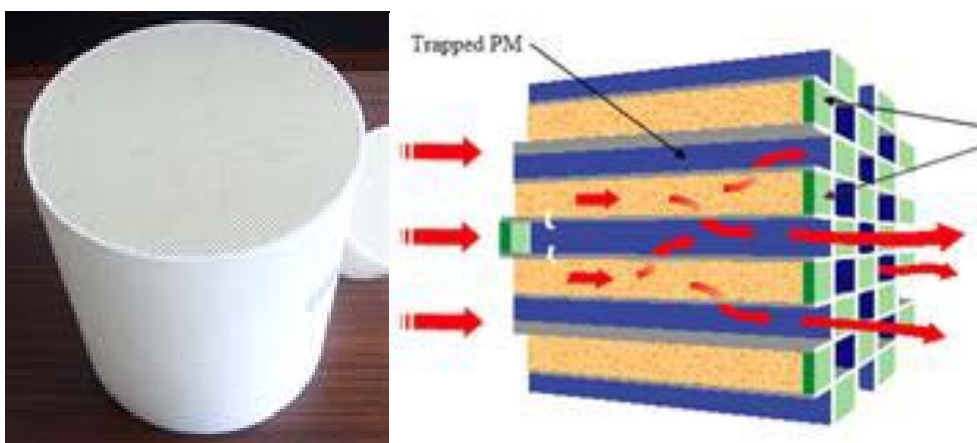


图 4-17 颗粒物过滤器（左）以及用于捕集柴油机碳烟颗粒物原理示意图（右）

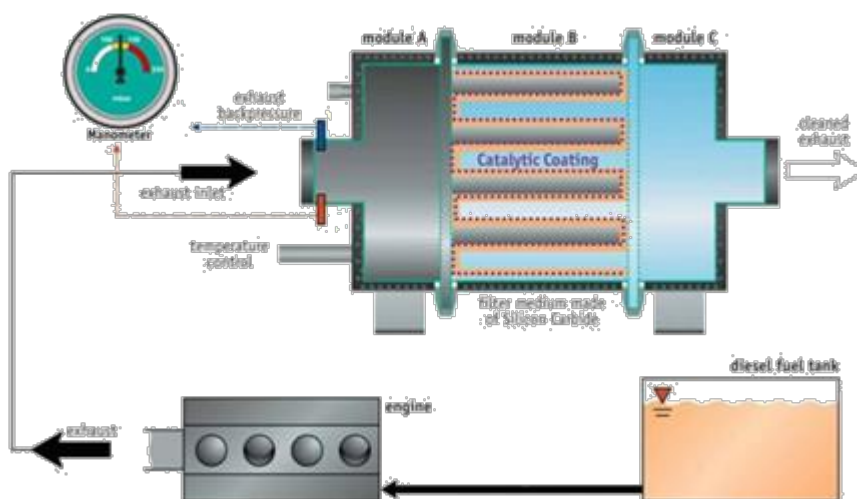


图 4-18 柴油车 CDPF 系统

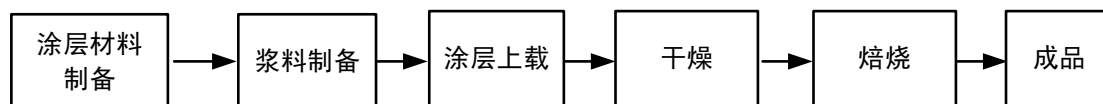


图 4-19 催化燃烧再生颗粒物过滤器的生产工艺流程

关键技术

- 高起燃特性的碳烟燃烧催化剂的设计；
- 高固含量、高流动性的涂层料液的制备；
- 添加合适的造孔剂，使涂层具有与 DPF 相匹配的孔结构。

主要技术指标

典型规模：年产 10 万件。

投资及运行效益分析

总投资：6000 万元（以年产 10 万件为例）；

运行费用总计（水、电、天然气）：2500 万/年；

主体设备寿命：10 年。

可对柴油机尾气排放的碳烟颗粒物进行捕集和消除，降低大气中的 $PM_{2.5}$ 含量，大幅减少柴油机尾气排放对环境造成的污染。

用户意见

本项目开发的 CDPF 产品，具有很高的碳烟颗粒去除效率和高温稳定性。虽然该产品生产线的投资较大，但由于该产品具有很好的国家政策背景，使得该产品具有庞大的市场，市场风险较小。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：华东理工大学工业催化研究所

联系人：卢冠忠，郭耘

地址：上海市徐汇区梅陇路 130 号

邮编：200237

电话：021-64253703

E-mail: gzhlu@ecust.edu.cn

典型案例（二）

主要技术指标和参数

一、基本原理

利用交互堵塞的蜂窝通道之间的多孔间壁，通过碰撞、沉积等物理作用捕获柴油机废气中的微粒，使得颗粒物暂时滞留在DPF内部，通过氧化催化技术将滞留颗粒物进行燃烧，生成二氧化碳和水排出机外，实现颗粒物净化。

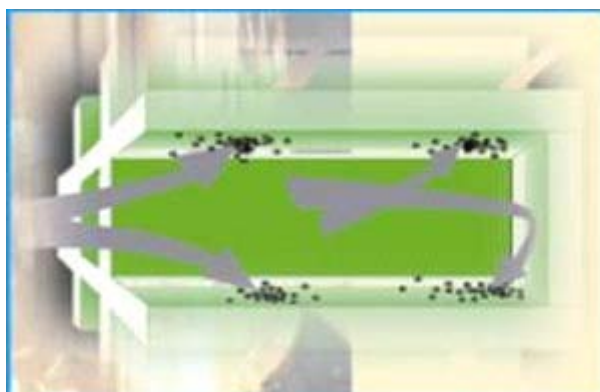


图4-20基本原理图

二、工艺流程

生产工艺路线包括基本原料的选择、制粒及预处理，有机结合剂、助烧结剂、辅助添加剂、造孔剂的选择和制备，原料的混合、泥料的制备与塑性化、模具的制作，单元体挤压成型，坯体的快速干燥定形，单元体的切割与堵孔，最终干燥，低温排胶，高温烧成，单元体的加工与粘合，蜂窝体外形轮廓加工等工艺环节。

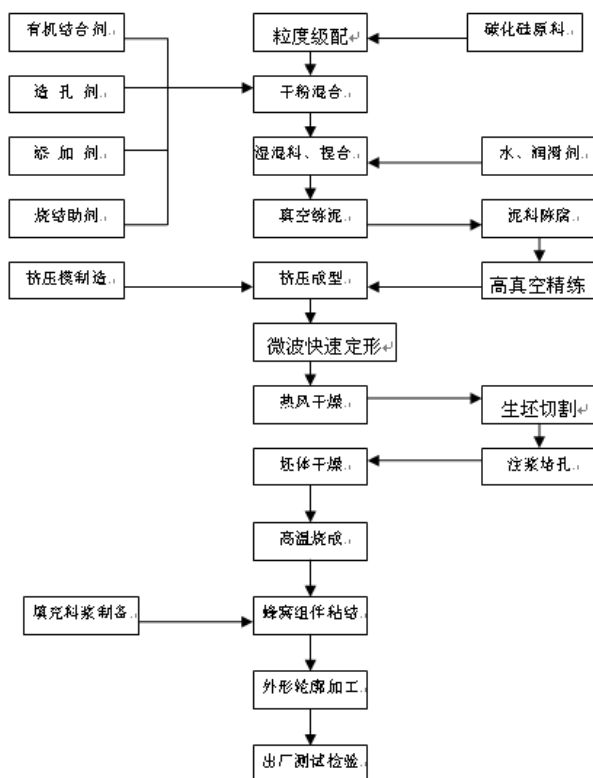


图4-21本项目工艺流程图

三、关键技术

- 烧结技术；
- 堵孔技术。

生产及使用情况

（一）应用情况简介

1、典型规模

年产100万升

2、主要用户名录

- (1) 戴姆勒奔驰载重车配套项目
- (2) 长城汽车DPF 配套项目

（二）投资情况

表4-3 投资情况清单

总投资	1.5 亿
运行费用总计	3800 万
主体设备寿命	15 年以上

（三）经济效益分析

该技术应用于主机厂、整车厂配套，将提高主机整车的行业竞争优势，且投资成本较国内现有技术低30%，运行成本较国内现有技术低50%，再生周期可达到现有其他过滤技术的5~10倍。

（四）环境效益分析

可经济有效地解决柴油机车颗粒物排放污染问题，确保满足不断严格的排放标准，保障人民群众身体健康。

（五）用户意见

本项目研发的柴油机颗粒物过滤器，捕集颗粒物效率高、过滤面积大、再生周期长。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：贵州黄帝车辆净化器有限公司

联系人：黄黎敏

地址：杭州市余杭区泰极路3号

邮政编码：311100

电话：0571-86150999

E-mail: huangdi_01@126.com

典型案例（三）

主要技术指标和参数

一、基本原理

ART型柴油车主动再生微粒过滤器系统是由氧化型催化器（DOC）、微粒过滤器（DPF）、燃料喷射系统、添加剂注射系统、电子监视与控制系统（ECU）组成的。系统通过DOC和DPF，捕获废气中的碳氢化合物（HC）、一氧化碳（CO）和微粒（PM），同时通过监控装置（ECU）对排气系统进行在线监视并进行再生。再生时自动向排气管喷入柴油燃料，燃料蒸汽在DOC中氧化放热使排气温度升高，从而使DPF中积聚的碳灰燃烧掉，实现再生。

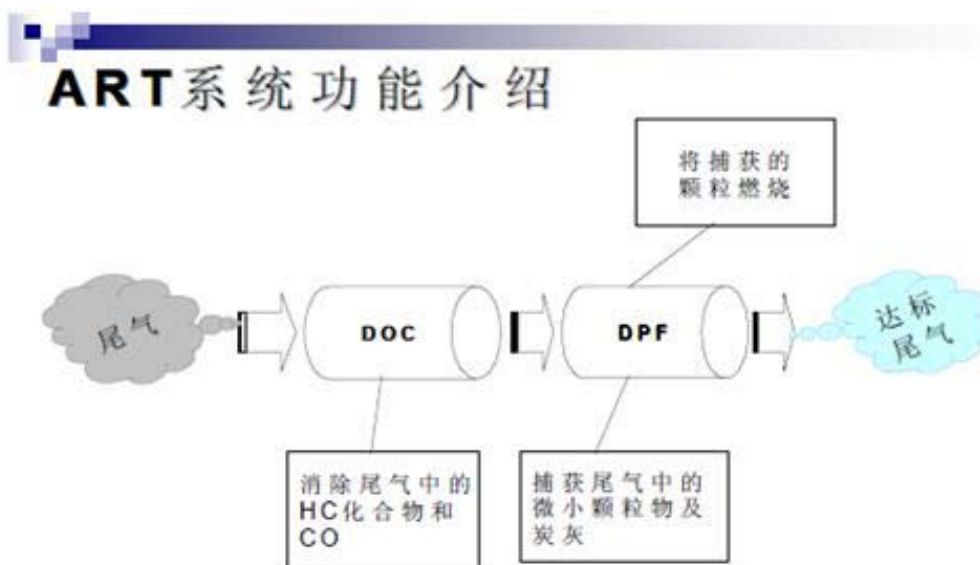


图4-22ART系统功能介绍

二、工艺流程

生产工艺路线包括DOC封装、DPF封装、ECU组件生产组装、低温升温器生产组装、添加剂组件组装、整体性集成等工艺环节。

三、关键技术

- 低温升温技术；
- 电子控制技术。

生产及使用情况

（一）应用情况简介

1、典型规模

年产2万套

2、主要用户名录

- （1）南京在用柴油车“黄改绿”工程
- （2）贵州凯里公交车改造
- （3）湖南湘西矿用车改造
- （4）澳门在用车改造

(5) 贵州遵义公共用车改造

(二) 投资情况

表4-4 投资情况清单

总投资	8500 万
运行费用总计	2500 万
主体设备寿命	5 年以上

(三) 经济效益分析

本技术应用于在用机车船改造，将满足国内外日益严格的排放标准，尤其是对于购买时价值较大残存价值加大的机车具有极高的效益性，产品使用寿命满足国家要求。

(四) 环境效益分析

可经济有效地解决柴油机颗粒物排放污染问题，确保满足不断严格的排放标准，保障人民群众身体健康。

(五) 用户意见

本项目研发的ART型柴油车排气后处理装置，减排效果明显，售后服务齐全，产品独立工作，对机车船无任何损害性影响，环保性和安全性兼具，适合中国高硫油品国情下使用。中国机动车污染防治委员会对本产品的评价如是。

实际应用案例

南京亚青会和青奥会前“黄改绿”工程入围产品。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：贵州黄帝车辆净化器有限公司

联系人：黄黎敏

地址：杭州市余杭区泰极路3号

邮政编码：311100

电话：0571-86150999

E-mail: huangdi_01@126.com

62. 摩托车尾气催化净化技术

降低摩托车尾气排放的方法主要有机内净化和机外净化两种。机内净化是通过稀薄燃烧、电喷等方法控制发动机的燃气空燃比，来降低发动机的原机排放，这种方法成本较高。机外净化是不对发动机原机燃烧作较大的改善，仅在排气系统采取二次补气技术或催化剂技术，以降低尾气排放，这种方法成本低，对发动机性能影响较小。虽然摩托车发动机的最高工作温度较低，燃烧产生的 NO_x 较少，但 HC 和 CO 的排放量却相当高。由于车用发动机的特殊性，仅靠发动机前处理、机内净化及改进燃烧等措施，已不能满足日益严格的排放法规要求。催化转化技术和二次空气供给技术作为降低机动车排气污染的后处理有效措施之一，已越来越受到企业的重视。

自 1974 年起，机动车排气净化开始采用贵金属催化剂(以铂为主，辅以钯、铑)，并得到快速推广应用。但是，由于贵金属资源稀少、价格昂贵，人们也在不断研究开发非贵金属或低含量贵金属催化剂。目前市场上的催化剂一般都是由稀土复合氧化物、改性氧化铝以及贵金属混合而成。

按照新颁布的法规，新定型车必须达到国三标准，并按国三标准批量生产，对所有制造、销售、登记注册的摩托车及轻便摩托车也要限期完成达到国三排放的改造。出口车辆也必须满足出口地当地的排放标准，比如欧洲的欧三标准、美国的 EPA 或 CARB 标准等。

针对摩托车对催化剂涂覆、耐机械振动等性能有较高要求，我国开发了的高性能摩托车尾气催化净化技术，该技术以 Pd 为主要活性组分，以钙钛矿以及稀土复合氧化铝为主要载体材料，通过涂布于金属蜂窝载体内表面，安装于摩托车排气管内，通过发动机自身的排气温度，进行催化氧化还原反应，进而达到尾气净化的目的。该技术涂层牢固，不会影响整车性能，且在一定的温度和氧浓度条件下，对某些污染物的转化效率达到 95% 以上，初始和耐久性能均完全满足国/欧三排放标准。催化剂制造成本约 500~800 元/升，低于原技术的 Pt-Rh 和 Pt-Pd-Rh 催化剂。

典型案例

案例名称

WY125-P 摩托车催化剂开发项目

项目概况

本项目于 2012 年 5 月达成技术开发协议，针对 WY125-P 型号的摩托车进行催化剂匹配开发；2012 年 7 月进行样品试制，并通过匹配测试；2012 年 8 月进行小批试制，10 月进行批量生产。

主要工艺原理

本技术以 Pd 为主要活性组分，以钙钛矿以及稀土复合氧化铝为主要载体材料，通过高效负载方式，将涂层涂布于金属蜂窝载体内表面，安装于摩托车排气管内，通过发动机自身的排气温度，进行催化氧化还原反应，从而达到尾气净化的目的。

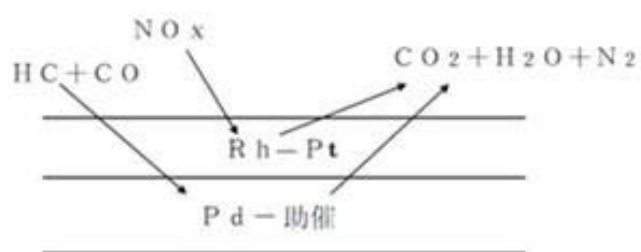


图 4-23 工艺原理图

表 4-5 本项目所采用的催化剂制作工艺流程图

工序	加工	搬运	储存	检验	工序名
	○	⇒	▽	◇	
10		⇒			领料
20	○	⇒		◇	热处理
30	○	⇒		◇	贵金属负载
40	○	⇒		◇	球磨配料
50	○	⇒		◇	一次清洗
60	○	⇒		◇	一次涂覆
70	○	⇒		◇	干燥焙烧
80	○	⇒		◇	二次清洗
90	○	⇒		◇	二次涂覆
100	○	⇒		◇	干燥焙烧
110	○	⇒		◇	激光刻码
120				◇	成品检验
130		⇒	▽		包装入库

关键技术或设计创新特色

- 采用 AA'BB'PdO₃ 型钙钛矿材料为底层涂层。
- 采用稀土复合氧化铝负载 Pt、Rh 作为上层涂层。
- 以高分散度负载技术进行贵金属负载。
- 以 Pt: Pd: Rh = 2: 17: 1 40g/ft³ 贵金属含量, 高 Pd 为主。
- 以单只催化剂替代原前后置两只催化剂配合电控化油器车。

主要技术指标

本技术污染物的起燃温度低于 210℃, 400℃时三种污染物的转化效率超过 95%, 初始和耐久均完全满足国/欧三排放标准。该产品安装于摩托车排气管内, 不影响整车的性能和美观, 制造成本约 300~500 元/升。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 200 万元。

运行费用

本车型的触媒需求量约为 3000~4000 套/月, 月销售额在 25~35 万元左右, 其中原材料、水电气、人工等制造成本约为 22~30 万元。

用户意见

本项目投运至今, 各项技术指标优良, 无任何环保事故, 摩托车各项污染物排放指标均达到设计要求。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 台州欧信环保净化器有限公司

联系人: 陈雪红

地址: 浙江省温岭市城东街道百丈路

邮政编码: 317500

电话: 0576-86168708

E-mail: oxin002@sina.com

63.大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体技术

中重型机动车和工程机械多以柴油和天然气、液化石油气为燃料，为达到即将在全国实施的国 IV 机动车排放法规和非道路移动机械排放法规的要求，以天然气 NG 和液化石油气 LPG 为燃料的气体发动机，多采用蜂窝陶瓷载体附着催化剂制成的三元催化器 TWC 实现对 HC、CO 的氧化和 NO_x 的还原。

按照我国柴油发动机后处理技术路线，中重型柴油机主要采用尿素选择性催化还原 Urea-SCR，配备催化氧化转化器 DOC 和氨催化氧化转化器降低 NO_x 排放。蜂窝陶瓷附着催化剂制成的 DOC 氧化 HC、CO 和 PM 中的可溶性有机组分 SOF，并控制排气中 NO 和 NO₂ 比例，以满足 SCR 快速反应还原 NO_x 的要求，蜂窝陶瓷附着催化剂制成的氨催化氧化转化器控制氨逃逸率，防止二次污染。大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体是各种后处理技术的关键部件。

“十一五”期间，国家通过 863 计划项目开展了大量机动车排气后处理研究工作，获得了可以满足国 IV 排放法规要求的后处理技术，并开展了示范运行和市场化推广，对降低大气污染做出了贡献。未来几年，机动车排放法规从国 IV 到国 V、非道路移动机械排放法规陆续实施，将对排气后处理技术提出了更高的要求，需进一步深入研究大尺寸薄壁蜂窝陶瓷制造技术。目前我国制造的蜂窝陶瓷载体最小壁厚为 0.17mm，可满足国 IV 排放法规要求。

典型案例

主要技术指标和参数

一、基本原理

特殊的蜂窝陶瓷粉体、添加剂配方和混料工艺，特制的成型模具和蜂窝陶瓷制备工艺，制造出壁厚 $\leq 0.17\text{mm}$ 、孔密度 400cpsl、直径 $\geq 285.8\text{mm}$ 的大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体，涂覆催化剂用于重型柴油车尿素选择性催化还原 Urea-SCR 系统，把 NO_x 还原成 N_2 ，满足国 IV 排放法规要求。

二、工艺流程

成型模具设计加工；粉体制备—混料—捏泥—练泥—成型—干燥—焙烧—磨边—切割—围边—成品。

三、关键技术

- 模具制造技术；
- 粉体和添加剂配方；
- 成型工艺技术；
- 干燥、烧制工艺技术。

生产及使用情况

（一）应用情况简介

每条生产线年产能 200 万升，产品已在国内外多个品牌的汽车上达到应用。

（二）投资情况

本项目两条生产线总投资 16000 万元；主体设备寿命 15 年。

（三）经济效益分析

按我国重型柴油车平均 340 万台/年的产能，后处理系统安装 DOC、SCR 和氨逃逸氧化转化器或者 TWC，大尺寸蜂窝陶瓷催化剂载体市场需求约 20000 万升，价值约 100 亿。

（四）环境效益分析

大尺寸蜂窝陶瓷载体属于大气污染治理设备，涂覆合理的催化剂，可使重型柴油车 NO_x 排放达到国 IV 限值甚至更低。

（五）用户意见

本项目提供的 $0.17\text{mm}/400\text{cpsl}$ 、 $\Phi 285.8 \times 150\text{mm}$ 蜂窝陶瓷催化载体，经载体检验，热膨胀系数 $1.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，抗压强度 9.2MPa ，其余各项理化性能指标均符合重型柴油车尾气后处理系统使用要求，涂覆催化剂后，使用效果良好。

实际应用案例

中国重型汽车集团使用的蜂窝陶瓷催化剂载体，年装配柴油车 30 万台， NO_x 排放达到国家 IV 排放法规要求 ($< 3.5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)，载体使用寿命超过 100 万公里。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京奥福（临邑）精细陶瓷有限公司 联系人：张兆合

地址：北京市通州区翠景北里 1 号瑞都国际 2210 室 邮政编码：101101

电话：010-80581851/80582400 E-mail: zhangzh@trendaofu.com

五、居室及公共场所典型空气污染物净化关键技术

64. 中央空调空气净化单元及室内空气净化技术

室内空气污染是我国最严重的环境问题之一。室内环境是人们生活、工作和社交的主要场所，空气质量的优劣将直接影响人类健康。一般情况下，室内污染比室外更严重。一方面，室外的污染物可以进入室内；另一方面，室内本身有许多污染源，如装饰品、烹调过程、吸烟过程等，许多建筑装饰材料、家具及地毯等会释放出多种气态有毒有害气态污染物。室内空气污染轻则使人不适，严重时可导致人死亡。解决室内污染问题，改善工作环境，保护人体健康，对国民经济持续发展具有广泛深远的影响。“十一五”期间，我国通过 863 计划重点开展了室内典型空气污染物净化关键技术与设备的技术研发，研究了公共场所室内空气污染物的解析与调控技术，开发了一批具有自主知识产权的新型环境净化材料和技术，研制出了适用于中央空调的空气净化单元，并形成了室内空气污染净化技术，为提升我国室内空气污染净化技术与装备水平、改善公共场所室内空气质量提供了技术支撑，有效推动了我国室内环境治理技术的快速发展，具有较为广阔的应用前景。



图 5-1 大堂安装的净化风盘图

5-2 餐厅安装的净化组空

典型案例

案例名称

中央空调组合式空调和风机盘管空气净化工程

项目概况

本技术属于 863 计划课题(项目编号 2007AA061405)产学研合作开发成果。本项目于 2010 年 5 月装置完成并运行。

主要工艺原理

针对传统的中央空调系统,集成新型高效吸附、室温催化、光催化、抗菌等技术,设计制造新型中央空调净化单元及设备,通过中央空调调节室内温度的同时进行空气净化达到改善室内空气环境的目的。

在风机盘管系统前端布置抗菌过滤器,有效抑制了细菌的滋生;采用高效率、低阻力的室温催化甲醛净化模块组件,重点去除室内空气污染物中的甲醛;同时安放低阻力结构设计的活性炭模块,在保证低噪音的条件下实现室内苯、甲苯等 VOCs 污染物的净化;在管道和相关空气接触面上涂装有抗菌涂层,抑制了空调系统中的有害微生物生成。

在组合式空调中,根据中央空调的特点进行材料和技术的选择与搭配,按照结构设计集成吸附、光催化、抗菌等技术,设置各级过滤器和净化组件,并依据所需额定风量和适中风压来选配风机。并在加湿段外壳体和该段内壁板采用抗菌材料避免滋生微生物,在过滤段采用附着抗菌材料的无纺布实现抗菌功能。

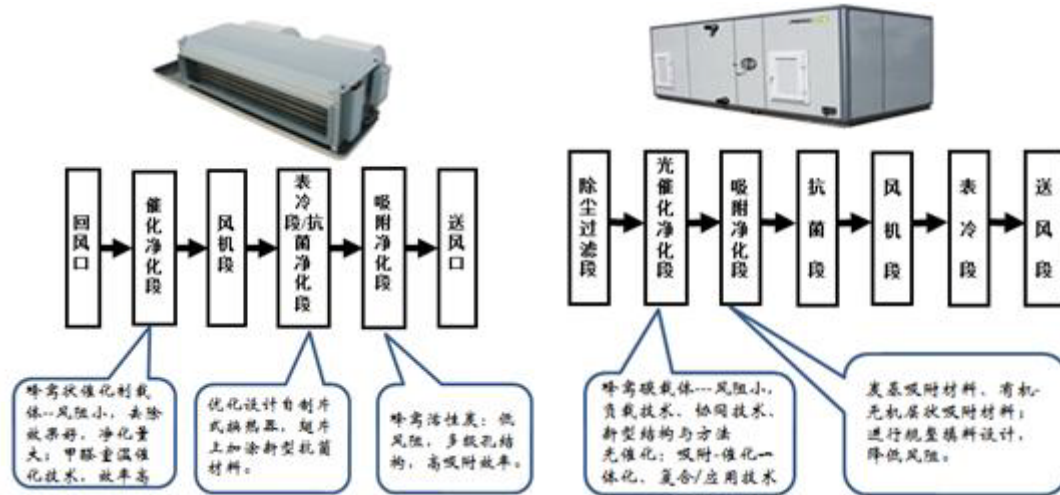


图 5-3 净化功能风机盘管图

图 5-4 净化功能组合式空调

主要技术指标

净化风机盘管:

风量: $\geq 350 \text{ m}^3/\text{h}$; 噪声: $\leq 37 \text{ dB}$; 机外余压: $\geq 12 \text{ Pa}$; 输入电功率: $\leq 55 \text{ W}$; 供冷量: $\geq 2062 \text{ W}$; 供热量: $\geq 3403 \text{ W}$; 净化性能: 甲醛净化效率 90%, 抗菌率 90% (6 小时, 国标 30 m^3 空气舱)。

净化组合空调：在迎面风速 2m/s，甲醛净化效率：送风口处的浓度与回风口处的浓度相比，衰减 20% 以上；苯净化效率：送风口处的浓度与回风口处的浓度相比，衰减 20% 以上。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资与中央空调主机系统市场价格相近。

运行费用

用于空气净化新增电费费用约为 900 元/年，年维修费用约 3000 元。使用空气净化功能后，夏季空调使用期间，可以适当减少新风量，新风减少节省了空调主机的运行负荷，基本可以抵消空气净化的运行费用。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，室内空气质量良好，为宾馆营造了一个良好的室内空气环境，间接提高了宾馆的服务质量，带来经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京同方洁净技术有限公司

联系人：许勇

地址：北京市海淀区王庄路 1 号清华同方科技广场 B 座 21 层

邮政编码：100083

电话：010-82378866

65. 室内空气中有害微生物净化技术

室内空气污染主要由有害微生物、有机污染物及超细颗粒构成，可引起人们出现眼刺激感、哮喘、过敏性皮炎、过敏性肺炎和传染性疾病。细菌和真菌等微生物在室内孳生繁殖而污染空气，已经逐步演变为国内外最重要的公共环境卫生问题之一。

目前应用的抗菌剂主要包括有机抗菌剂、天然抗菌剂和无机抗菌剂，无机抗菌剂因其长效性、不产生耐药性及无毒副作用，特别是其缓释性及良好的耐热性等优点而在抗菌剂中备受重视。传统的银系抗菌剂因为银离子化学性质活泼而容易转变成棕色的氧化银，或者经紫外光催化还原成黑色的单质银，变色后不仅降低了抗菌性，还将使白色或浅色制品无法应用，因此在很大程度上限制了银系抗菌材料的应用。

层状材料负载纳米银离子制备的银系纳米无机抗菌剂通过络合工艺解决了银离子置换效率低的问题，可使置换效率达到 99% 以上，并通过引入烧结助剂及价态稳定机制解决了银离子在高温使用时的变色问题。

典型案例（一）

主要技术指标和参数

一、基本原理

本抗菌剂是以层状材料为载体负载银离子作为抗菌剂，通过采用酸碱调控机制，使银离子与层状材料的交换率达到了 99%以上(如图 5-5)，且交换时间缩短至 2h；并通过引用烧结助剂和“价态稳定机制”，解决了银离子在高温(600℃以上)使用时的变色问题(如图 5-6)。

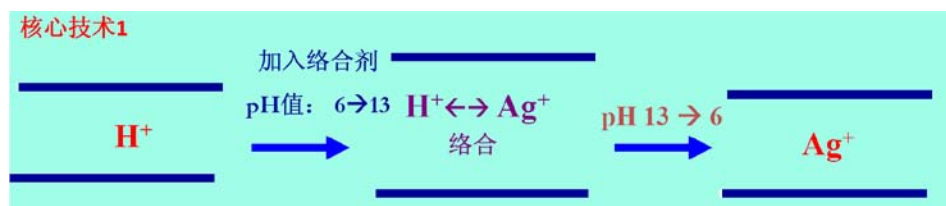


图 5-5 银离子络合插层交换工艺

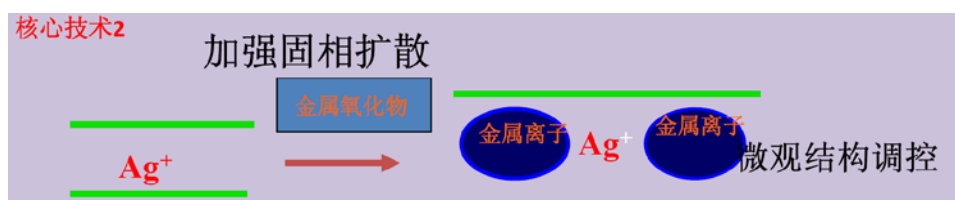


图 5-6 固相反应扩散调控机制保证银离子不变色

二、关键技术

- 常压、低温条件下合成层状材料载体；
- 酸碱调控-络合离子交换；
- 烧结助剂和“价态稳定机制”。

生产及使用情况

（一）应用情况简介

磷酸锆负载银离子制备银系纳米无机抗菌材料技术已转让，建成生产线，形成了系列产品，具备了年产 500 吨纳米银系抗菌剂的生产规模(如图 5-7)。



图 5-7 银系纳米抗菌材料产业化

（二）经济和社会效益分析

室内环境是人们生活、工作和社会的主要场所，目前全球约有近一半的人所处的室内空气有微生物污染。室内空气质量与每个人的健康息息相关，因此新型高效抗菌剂的开发具有巨大的社会效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院过程工程研究所

联系人：张婧坤

地址：北京市海淀区中关村北二条 1 号

邮政编码：100190

电话：010-82544894

E-mail: jkzhang@home.ipe.ac.cn

典型案例（二）

主要技术指标和参数

一、基本原理

细菌在空气中易富集在物体表面，但其并非是以游离的状态存在的。游离的细菌吸附在物体表面之后会产生不可逆的吸附，之后细菌不断增长，细菌分子间会产生分子信号，使细菌细胞不断的富集，同时其外层会产生一层聚合物基质来很好地保护细菌细胞，当其富集到一定程度之后，信号分子会游离出去继续产生新的细菌细胞富集体，大量的细菌细胞富集体连结在一起便形成了菌膜(图 5-8)。由于有外层的聚合物基质的存在，使菌膜相较于游离的细菌更难杀灭。离子液体由于其长链和富电子的环使其在杀灭菌膜方面起到了独特的作用。

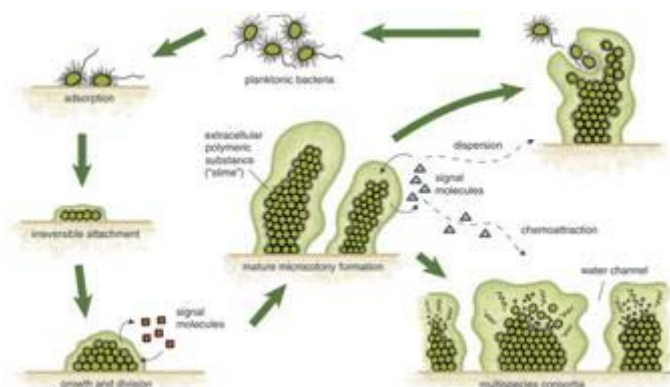


图 5-8 菌膜形成过程

二、关键技术

- 有机无机复合抗菌材料的合成；
- 喷剂的配制；

生产及使用情况

（一）应用情况简介

有机无机复合抗菌喷剂已经在广东进行了中试，其应用于室内空气净化用 HEPA、汽车及高铁内饰等的效果非常显著。



图 5-9 有机无机复合抗菌喷剂产业化

(二) 经济和社会效益分析

有机无机复合抗菌喷剂对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠菌等常见菌种 15min 的抑菌率大于 99%，对军团菌 24h 的抑菌率也大于 99%，防霉为 1 级。有机无机复合抗菌喷剂对室内空气中的微生物生长起到了抑制作用，改善了人们的居住环境。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院过程工程研究所

联系人：张婧坤

地址：北京市海淀区中关村北二条 1 号

邮政编码：100190

电话：010-82544894

E-mail: jkzhang@home.ipe.ac.cn

66. 常温催化氧化净化甲醛技术

现有室内甲醛净化技术主要以吸附技术、光催化技术为主。吸附技术主要采用活性炭、分子筛等高比表面材料来吸附甲醛，但由于吸附材料吸附能力有限，需定期再生或更换，易产生二次污染；光催化技术主要利用纳米 TiO_2 作为光催化剂来分解甲醛，目前还存在需要紫外激发光源、对可见光利用效率低、催化剂易失活等问题。

而催化氧化技术通过空气中的氧气将甲醛分解为无害的 H_2O 和 CO_2 ，是当前室内净化甲醛领域较为优秀的方法之一。但传统催化氧化催化剂操作温度远高于室温，难以满足室内空气净化所需的常温常压、高效、安全、经济的要求。因此，开发室温、常压下能完全催化氧化甲醛为 H_2O 和 CO_2 的材料，是未来室内空气甲醛净化方向研究的热点。在我国 863 课题（项目编号 2007AA061402、2010AA064905、2012AA062702）支持下，我国自主开发了“常温催化氧化甲醛技术及空气净化器，已通过专家鉴定；并于 2011 年度获国家技术发明奖二等奖。

典型案例

主要技术指标和参数

一、基本原理

本技术涉及一种高度分散在多孔性无机氧化物载体上的贵金属 Pt 系列催化剂。这种负载型高分散 Pt 催化剂在载体表面和空气接触，室温条件下就可以活化空气中的氧，使其在室温下完全催化氧化甲醛产生无害的水和二氧化碳，实现了室温条件下对室内空气中甲醛的室温高效催化净化（如图 5-10）。与现有甲醛氧化催化剂和甲醛氧化剂相比，这种负载型高分散 Pt 基催化剂在真正意义上实现了甲醛室温催化氧化（即甲醛氧化反应中催化剂不能作为氧化剂消耗）。

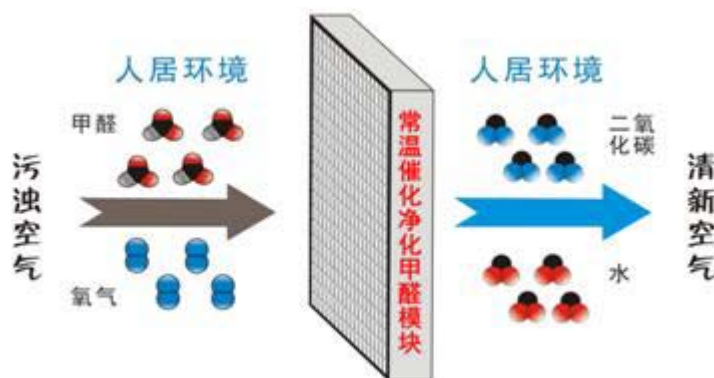


图 5-10 常温催化净化甲醛技术示意图

二、关键技术

- 负载型高分散 Pt 基催化剂制备技术；
- 催化剂原位活化技术。

生产及使用情况

（一）应用情况简介

本技术已转让，并已建成 3 条常温催化净化甲醛材料生产线，开发了 6 款新型空气净化器，净化器年生成能力达到约 10 万台。

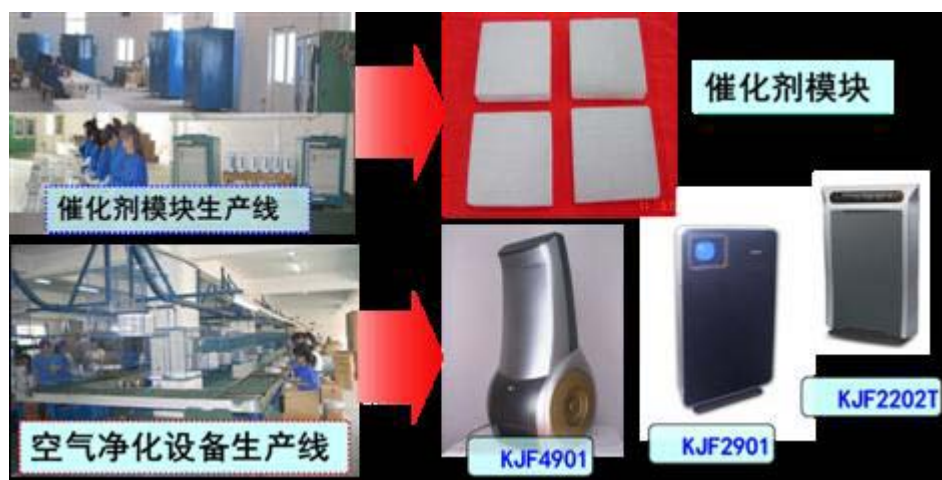


图 5-11 常温催化净化甲醛技术产业化应用

(二) 经济和社会效益分析

新型室内空气净化设备,实现了高效、安全、经济的室内空气净化,大幅度提高了我国室内空气的质量水平,改善了人们生活环境。并成功应用于北京 2008 年奥运会部分室内空气质量保障。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:中国科学院生态环境研究中心

联系人:贺泓

地址:北京市海淀区双清路 18 号

邮编:100085

电话:010-62849123

E-mail: honghe@rcees.ac.cn

67. 担载型金属氧化物催化氧化去除饮食油烟技术

由于我国的饮食习惯多采用将食用油加热至很高温度，再进行煎、炒、烹、炸，所以在烹饪过程中不可避免地产生大量的油烟。经过抽空后排放，除部分进入大气外，其余油烟易冷凝，从而附着在墙壁、排风设备、建筑物等固体表面。油烟不仅极难清洗，同时影响了城市环境和居民的身体健康。

现有的治理技术主要有：惯性分离法、过滤法、静电沉积法、液体洗涤法与复合法、催化氧化法等。这里重点介绍催化氧化法。

典型案例

主要技术指标和参数

一、基本原理

高面积的载体吸附、活性组分催化氧化等功能之间的协同与耦合作用是担载型金属氧化物高效去除油烟的关键。活性炭或分子筛通过表面吸附油烟，镍、锰、钴复合氧化物或贵金属将易挥发组分氧化燃烧，生成无污染的水和二氧化碳；与此同时，多组分氧化物的协同作用可促进催化剂表面的催化氧化能力，防止积碳，从而提高去除效率。

二、工艺流程

饮食油烟经集气罩后，通过格栅分流，进入净化反应器中，通过过滤、吸附，催化吸附氧化后，得到洁净的气体，排入大气环境。

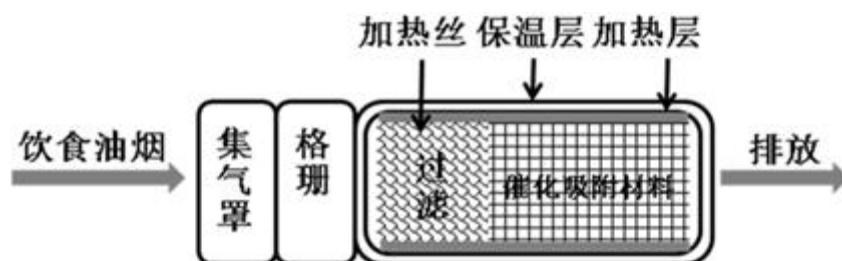


图 5-12 饮食油烟净化工艺流程图

三、关键技术

- 兼具催化氧化与吸附性能的催化吸附材料；
- 净化材料防止积碳、原位再生技术。

研发情况

一、技术来源

本技术属自主研发。

二、主要结果

选择较难催化氧化的 C_3H_8 为油烟代表物，单纯过渡金属氧化物催化氧化 C_3H_8 的去除效果见下图，从测试的结果可以看到，在温度 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时，可实现 100% 的净化效率。

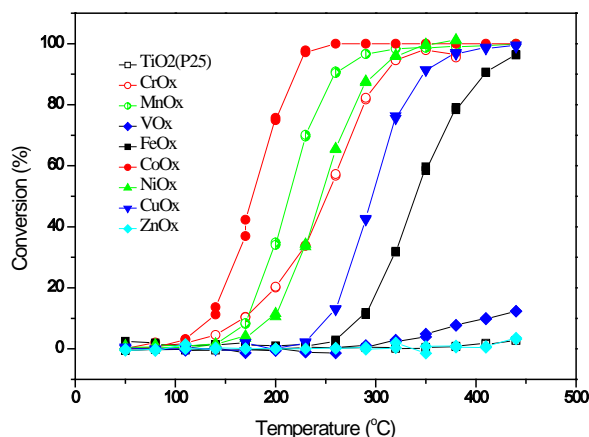


图 5-13 净化材料对 C_3H_8 的催化氧化效率

三、经济效益分析

本技术既可用于家庭、餐馆等中小型油烟处理，也可用于酒店等大型油烟治理，投资成本较同类技术低 50%，运行成本较同类技术低 30%，可再生循环使用。

四、环境效益分析

可经济有效地解决家庭、餐馆、酒店等大中小型油烟污染问题，保障安全与身体健康。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：纳米技术及应用国家工程研究中心

联系人：刘睿

地址：上海市闵行区江川东路 28 号

邮编：200241

电话：021-34291286

E-mail: nercn_liurui@163.com

68.室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧去除纳米金催化技术

在“十五”863 高技术研究发展计划—“中孔稀土复合氧化物催化材料的研究及在环保中的应用”(2001AA324050),“十一五”863 高技术研究发展计划—“大气挥发性有机物排放控制技术与应用示范”(2006AA06A310),973 重点基础研究发展计划—“固定源有毒有害废气净化催化剂中稀土的作用研究”(2010CB732305)等课题的支持下,研究开发出室内污染物一氧化碳、甲醛和臭氧完全氧化/分解去除纳米金催化技术。采用的关键技术包括高性能多孔/多层载体负载纳米金催化材料和室温催化完全氧化、催化分解技术。该技术适用于室内空气中化学污染物一氧化碳、甲醛和臭氧的去除,可用于中央空调、空气净化器等空气净化系统。获已授权技术专利3项。

技术原理是:合成的纳米金催化剂为负载型金催化剂,载体具有多孔或多层结构,有利于反应物一氧化碳、甲醛以及氧化剂氧气的传输,传输过程中反应物以及氧气可与金活性位充分接触活化,完成反应物的氧化过程,使反应物转化为二氧化碳。臭氧通过载体的孔道或层隙,与活性金位接触,催化分解为氧气。所合成的金催化剂具有较高的室温催化稳定性。运用催化反应过程技术,实现了一氧化碳、甲醛以及臭氧在室温下的同时去除。

工艺流程是:(1)预处理:室内空气含有油烟、颗粒物、粉尘等污染物,因此在催化氧化消除化学污染物前,需加过滤器来去除颗粒污染物,以防附着于催化剂上,降低催化剂的催化性能。(2)催化去除:过滤后的空气经过催化剂,通过催化剂的催化作用,实现污染物一氧化碳和甲醛的氧化去除,以及臭氧的分解去除。

该技术已经实现与典型空气净化器的搭载,可用于空气净化器中。也可与其他技术(比如等离子体技术)进行结合或耦合,实现室内化学污染物的高效率去除,可用于中央空调空气净化系统中。

由于人们对室内空气质量的要求越来越严格,该催化氧化/分解去除技术在空气净化系统应用后,可使该空气净化系统获得更好的经济效益。可经济有效地解决室内空气部分化学污染物的污染问题,提升室内空气质量,取得良好的环境效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:中国科学院生态环境研究中心

联系人:郝郑平

地址:北京市海淀区双清路18号

邮政编码:100085

电话:010-62923564

E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

六、无组织排放源控制关键技术

69.综合抑尘技术

扬尘是城市空气中的主要污染物之一，危及环境和人体健康，已成为城市污染治理的难题。我国开发了生物纳膜抑尘技术、云雾抑尘技术及湿式除尘技术等一批综合抑尘关键技术。

生物纳膜抑尘技术是在粉尘产生的源头加入生物纳膜，生物纳膜是层间距达到纳米级的双电离层膜，具有原子能级的特殊结构，且活性极高，遇见其他分子时能很快结合，可有效聚合包括吸入性粉尘在内的工业及建筑粉尘，使粉尘聚合颗粒具有稳定化的表面与界面效应，从而实现粉尘的快速沉降，抑制整个生产线的粉尘产生。

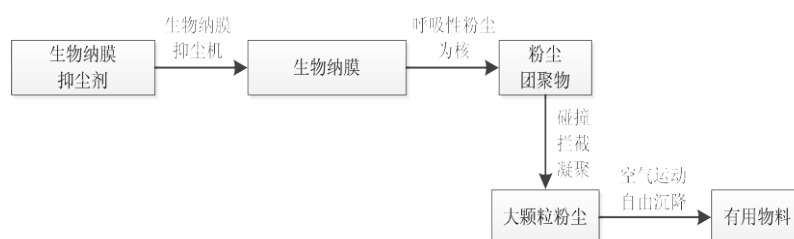


图 6-1 生物纳膜抑尘技术原理



图 6-2 工程现场

喷雾除尘是最有效的除尘方式之一。喷雾除尘装置会产生水雾，水雾与空气中的粉尘颗粒结合，形成粉尘和水雾的团聚物，受重力作用而沉降下来。体积太大的水雾颗粒排挤了含尘的空气，受扰流影响，不易与粉尘颗粒产生碰撞，和粉尘微细颗粒凝聚的可能性微乎其微；而太小的水雾颗粒容易蒸发，也无法捕捉粉尘。体积相同或相近的水雾颗粒和粉尘颗粒碰撞的概率高，水雾颗粒与粉尘颗粒碰撞并凝聚，形成团聚物，团聚物不断变大变重，直至最后自然沉降，达到消除粉尘的目的。云雾抑尘技术配套设备能够连续或间断地自动喷洒云状离子云雾，有效喷射距离远，抗风能力强，形成一道捕捉、团聚粉尘的高效能云雾防尘墙，雾滴微细，耗水量很低，不影响后续工艺和成品的外观、质量，也延长了生产设备的使用寿命。



图 6-3 云雾抑尘前图



6-4 云雾抑尘前后

湿式收尘技术是通过压降来吸收附着粉尘颗粒的空气，在离心力以及水与粉尘气体混合的双重作用下除尘，可以高效地处理各种材料和尺寸的粉尘，包括微米级的细微颗粒物。采用独特的叶轮设计能够产生更高的压降和空气流速，从而提供更高的除尘效率。排风扇的设计也经过了充分估算，确保满足系统升级和提供更高压降的需求。湿式收尘技术的配套设备能提供人工清除、自动清淤、连续排污 3 种淤泥输出方式，独特设计的挡板可以去除残留在空气中的水滴，而且通过改变挡板高度，可以灵活调整除尘效率。在使用过程中，能够根据粉尘颗粒尺寸来确定所需最小压降及适合的功率，实现高效除尘和低成本的最优化组合。



图 6-5 湿式收尘技术原理示意图



图 6-6 应用现场

典型案例（一）

案例名称

1000t/h 综合抑尘系统粉尘治理项目

项目概况

本项目应用对象为大型铁矿山，选矿厂生产规模大（达 1000t/h），产尘点众多，且多为无组织排放。整个项目共计使用抑尘设备 26 台，2012 年 12 月项目开始前期现场勘查、测量，方案设计、论证，2013 年 5 月设备生产及初装完成并进入调试阶段，2013 年 12 月已进入系统试运行。

主要工艺原理

本项目前端主要以生物纳膜抑尘为主导，后端以干雾抑尘和湿式收尘为辅，由 26 台抑尘设备组成一个综合抑尘系统，抑制整个生产线的粉尘散发。

该采矿厂采用粗中细三段破碎外加高压辊磨闭路超细碎。整个生产线作业流程如下：物料经卡车运来后，由给料机进粗碎（颚破×2）；物料由粗碎出来经皮带进行运输，其中经过两个皮带转运站；物料经皮带转运进入圆筒原矿仓，再经由给料皮带进入移动小车，再由移动小车进到中细碎；中细碎出来后经皮带进入筛分车间，合格矿进入合格矿仓，不合格矿经皮带回笼至细碎；合格矿仓出来后进入高压辊磨车间进行超细碎，最后进入主厂房料仓。

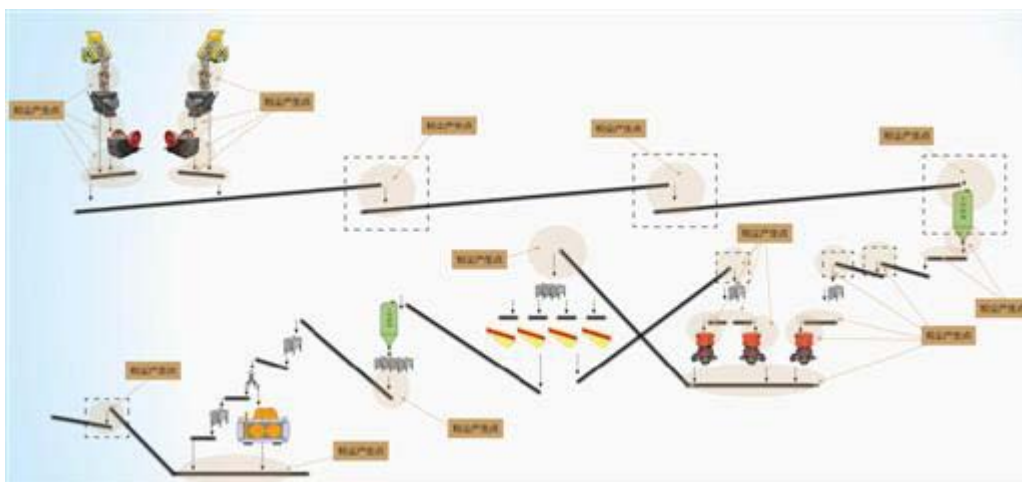


图 6-7 抑尘项目 9 个核心抑尘环节示意图

该项目综合运用了生物纳膜抑尘、干雾抑尘、湿式收尘等源头抑尘技术。在最主要产尘点安装生物纳膜抑尘技术配套设备，出液管，用生物纳膜包裹物料，进行前期抑尘；次要产尘点安装干雾抑尘配套设备，释放接近于粉尘粒径的干雾，进行凝结、沉降；在破碎筛分车间配以湿式收尘设备，对密闭巷道等处理场所进行辅助收尘，以保证最佳的粉尘治理效果。

该项目所配套的抑尘系统总功率为 363KW，比原来的水除尘方案 1600KW 的总功率低了近 77%，极大的降低了运营成本，节能减排效果显著。

关键技术或设计创新特色

- 采用先进的综合抑尘技术，有效解决散料处理过程中的粉尘治理问题，

尤其为无组织排放粉尘治理提供高效且节能环保的解决方案；

- 抑尘效果优于传统方式，且能有效降低 PM_{2.5} 的排放；
- 从产尘源头抑制粉尘产生，将除尘变抑尘，避免了粉尘产生后搜集所需能耗和成本，节能减排；
- 综合抑尘技术能有效回收粉尘并资源化，减少了由于粉尘散发所造成的资源流失，直接增加经济利润；
- 生物纳膜抑尘剂配方环保，能在短期内自行降解。经检测其构成的成分不会对环境造成任何不良影响，同时不会影响物料后期的生产工艺；
- 采用了云智能系统，实现远程实时集中监控，便于运营维护；控制系统能根据环境条件自适应调节产品应用参数，降低使用成本，实现高效除尘。



图 6-8 案例现场图

主要技术指标

(1) 生物纳膜抑尘剂物性参数：外观为淡黄色透明液体，膜层厚度≤250nm，表面张力系数≤0.023N/m（25℃），无毒，无刺激性，可降解，对环境无污染；

(2) 生物纳膜抑尘机主要技术参数：生物纳膜生产量≤50kg/分钟，使用距离(喷洒点距离设备)≤75 米，支持生物纳膜喷洒口数≤10, 处理抑尘物料≤1000t/h，安全防护、耐压测试、绝缘测试和电气装置测试符合要求，水量使用量≤3000L/h。

生物纳膜厚度按 200nm 计算，一台生物纳膜抑尘机最大可产生液膜 3000kg/h，理论最大捕收细微颗粒的延展面积可达到 15000000m²/h。

(3) 项目经检测达到国家相关标准

考核指标：《GB 28661-2012 铁矿采选工业污染物排放标准》2012 年 10 月 1 日实施。

污染物类型	污染物排放标准						工作环境标准
	标准执行范围	有组织排放限值（经排气筒排放）		无组织排放限值（不经排气筒排放）			
		标准涉及生产设施	最高允许排放浓度（mg/m ³ ）	标准及生产设施	监测点 ²	最高允许排放浓度（mg/m ³ ）	工作场所粉尘浓度（8h 平均，mg/m ³ ）
颗粒物（TSP）	2012 年 10 月 1 日 - 2014 年 12 月 31 日	选矿厂的矿石运输、转载、矿仓、破碎、筛分车间或生产设施	50	选矿厂、排土场、废石场、尾矿库	无组织排放源上风向设参考点，下风向设监控点	1.0(扣除参照点浓度)	8

图 6-9 项目执行的标准限值

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2000 万元。

运行费用

根据实际运行情况，1 年内破碎单吨矿石药剂和易损件成本控制在 0.58 元，药剂成本控制在 0.45~0.495 元（矿石含水率在 3% 以上，1000t/h 计算）。

用户意见

本项目除尘效果符合预期，产尘点 5 米内无明显粉尘飘扬，且运营成本低廉，维护简单易行。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：柏美迪康环保科技（上海）有限公司

联系人：孙昕

地址：中国上海金沙江路 1959 号 16 号楼 6 层

邮政编码：200333

电话：021-62282480

E-mail: cindy.sun@bmetech.com

典型案例（二）

案例名称

500t/h 石矿生产线粉尘综合治理项目

项目概况

生产线实际生产能力为 500t/h。生产线中主要破碎设备包括一级颚式破碎机、二级反击式破碎机和三级圆锥破碎机，受生产、工艺布置、产房条件等因素影响，粉尘污染已经成为矿山生产中最主要的污染源。该生产线曾多次进行粉尘综合治理，但效果都不理想。现在用的主要除尘设备为布袋式除尘机组，该机组由于布置吸尘点过多，线路过长，且附属设施过多，操作复杂，维护量大，自动化程度低，导致除尘效果不够理想。

如图 6-10 所示，使用一台生物纳膜抑尘机进行整条生产线的抑尘控制，根据国标 GBZ159-2004《工作场所空气中有害物质检测的采样规范》进行采样点的设置。考虑工作场所中多台破碎设备为主要产尘点，设置 3 个采样点。同时，落料口各设置 2 个采样点。

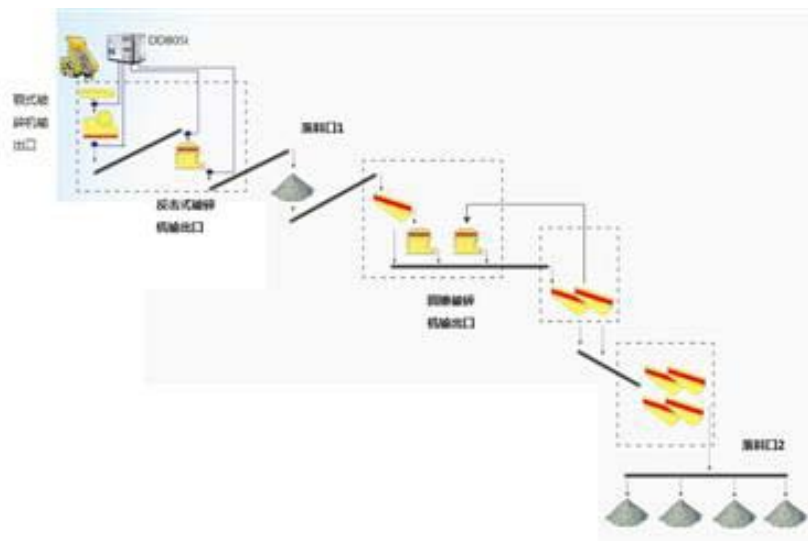


图 6-10 采样点标示图

主要工艺原理

根据空气动力学原理，空气动力学特性的差异决定了粉尘颗粒的自由沉降速度分布。运动的粒子在自由沉降过程中的受力有黏性阻力、粉尘粒子与纳膜之间的静电力、重力等。当自由沉降所受的黏性阻力、静电力与重力比较偏小时，可以实现颗粒沉降。

生物纳膜的纳米晶粒尺寸在纳米数量级，具有高浓度界面及原子能级的特殊结构，且活性极高、极不稳定，遇见其它原子时很快结合的特点，能有效聚合包括吸入性粉尘在内的粉尘，形成 50 μm 以上的较大颗粒物自然沉降。如图 6-11 所示，应用过程中，生物纳膜直接喷向产尘源，形成的纳膜利用自身的电极性和粘附性形成双电子层，实现稳定化的粉尘表面与界面效应，增加颗粒的活动惰性，达到粉尘聚合并快速沉降的效果。

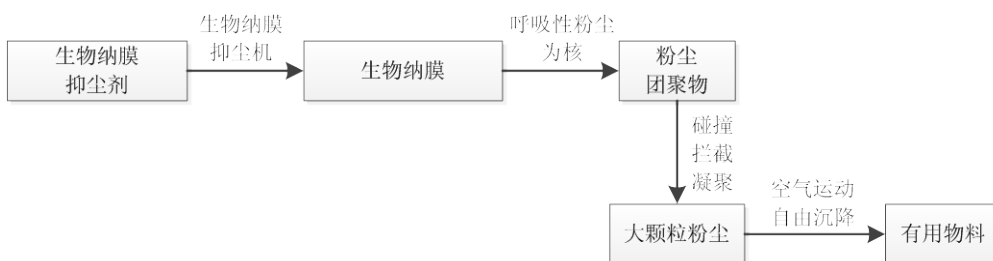


图 6-11 生物纳膜抑尘原理

关键技术或设计创新特色

- **生物配方：**研发基于生物萃取法提取的生物纳膜抑尘剂，无毒无害，可生物降解；
- **纳膜发生装置：**考虑生物纳膜抑尘剂与试剂工作地点的温度、湿度、风速、粉尘浓度有密切关系。需研究全电子化控制纳膜发生器、纳膜传输装置以及温控装置确保纳膜经精确制备；
- **基于无线传感网络的远程控制系统：**构建能在远程环境中监控粉尘浓度的实时检测系统，通过构建一种体积小、成本低廉、安装方便的实施方案，实时获取粉尘浓度数据对除尘试剂进行配比，达到良好的除尘效果。

主要技术指标

本测试检测本产品使用前后矿山生产环境中总粉尘浓度的变化过程。

监测类型		评估			待测物		粉尘		
采样仪器		滤膜、采样器、分析天平、秒表、干燥器、镊子、除静电器			采样方法		定点采样		
样品编号	仪器编号	采样地点	生产情况、工人在此停留时间以及工人个体防护措施	采样流量 (L/min)	滤膜质量 (mg)		采样时间		温度 气压
					采样前 m1	采样后 m2	开始时间	结束时间	
1	滤膜 1-1	鄂式破碎机输出口	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	20	1.0	948.5	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
2	滤膜 1-2	反击式破碎机输出口	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	17	1.0	833.3	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
3	滤膜 1-3	落料口 1	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	19	3.0	1302.6	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
4	滤膜 1-4	圆锥破碎机输出	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	17	1.0	512.6	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
5	滤膜 1-5	落料口 2	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	15	1.0	258.0	7:00	15:00	30°C 1010 hPa

图 6-12 本产品使用前矿山生产工作场所空气中粉尘定点采样记录表

监测类型		评估			待测物		粉尘		
采样仪器		滤膜、采样器、分析天平、秒表、干燥器、镊子、除静电器			采样方法		定点采样		
样品编号	仪器编号	采样地点	生产情况、工人在此停留时间以及工人个体防护措施	采样流量 (L/min)	滤膜质量 (mg)		采样时间		温度 气压
					采样前 m1	采样后 m2	开始时间	结束时间	
1	滤膜 2-1	鄂式破碎机输出口	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	19	3.0	35.832	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
2	滤膜 2-2	反击式破碎机输出口	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	16	1.0	21.736	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
3	滤膜 2-3	落料口 1	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	19	2.0	21.152	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
4	滤膜 2-4	圆锥破碎机输出口	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	15	2.0	68.96	7:00	15:00	30°C 1010 hPa
5	滤膜 2-5	落料口 2	生产率 800kg/小时，一次性防尘面罩	20	2.0	33.54	7:00	15:00	30°C 1010 hPa

图 6-13 本产品使用后矿山生产工作场所空气中粉尘定点采样记录表

测试结果

针对粉尘数据采集结果，采用 GBZ/T 192.1-2007《工作场所空气中粉尘测定 第一部分：总粉尘浓度》工作场所环境的粉尘总浓度计算公式，按式（1）计算空气中粉尘总浓度：

$$C = \frac{m_2 - m_1}{F \times t} \times 1000 \quad (1)$$

式（1）中：C —空气中总粉尘的浓度，mg/m³；

m₂—采样后的滤膜质量，mg；

m₁—采样前的滤膜质量，mg；

F —采样流量，L/min；

t —采样时间，min。

表 6-1 本产品使用前空气中总粉尘浓度变化记录表

样品编号	采样地点	总粉尘浓度 (mg/m ³)		总粉尘浓度变化率
		使用前	使用后	
1	颚式破碎机输出口	98.70	3.60	-96%
2	反击式破碎机输出口	102.00	2.70	-97%

3	圆锥破碎机输出口	62.70	9.30	-85%
4	落料口 2	35.70	4.50	-87%

根据表 6-1 的测试结果表明，使用本技术及产品之后，矿山工作场所中采样地点的粉尘浓度分别下降 96%，97%，98%，85%和 87%，符合总粉尘浓度下降范围在 60%~98%之间的标准。

投资及运行效益分析

随着国家对环保产业支持力度的加大，本技术的推广和使用，将获得更大经济效益和社会效益。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：柏美迪康环保科技（上海）有限公司

联系人：孙昕

地址：中国上海金沙江路 1959 号 16 号楼 6 层

邮政编码：200333

电话：021-62282480

E-mail: cindy.sun@bmetech.com

70.散粮码头中转储运除尘系统装备技术

散粮码头中转储运系统主要由栈桥、转接塔、码头计量塔、筒仓工作塔、转接塔、库内计量塔、立筒仓、熏蒸仓、散粮平房仓、打包站、汽车发放站及集装箱卸粮站等设施组成，散粮输送作业主要由双气室气垫带式输送机和埋刮板输送机承担。

系统主要工艺流程：码头散粮接收、码头散粮发放、立筒仓散粮发放、散粮进熏蒸仓、熏蒸仓散粮发放、散粮进平房仓。除尘系统的主要功能是防止散粮输送过程中尤其是落料点或转接点的粉尘外泄，保证散粮输送设备周边的作业环境达到环保和职业卫生要求。



图 6-14 现场工程照片

典型案例

案例名称

粮食储备库及码头设施项目粉尘控制系统

项目概况

本项目于 2007 年 4 月开始设计，2007 年 10 月开始建设安装，2008 年 5 月完成热调试，脱硫除尘系统运行稳定，各项指标达到设计要求。

主要工艺原理

粮食储备库及码头设施项目粮食中转储运系统一期工程主要由 1#、2#、3#、5#、6#、7#、8#、9#、10#、11#、12#、15#、16#、17#、21# 栈桥，1# 转接塔、码头计量塔、2# 转接塔、筒仓工作塔、3# 转接塔、库内计量塔、5# 转接塔，16 万吨立筒仓、1 万吨熏蒸仓、10 万吨散粮平房仓、打包站、汽车发放站、集装箱卸粮站等设施组成。散粮输送作业主要由双气室气垫带式输送机和埋刮板输送机承担。

本项目散粮粉尘控制系统包括 33 套集中风网除尘系统设备（含吸尘罩、除尘管网、阀门、除尘器、风机、关风器、安全保护装置等）、17 套插入式除尘器、5 套灰仓除尘系统设备（包括灰仓、螺旋输送机、闸门、装车伸缩溜管）、13 套电气控制系统。

关键技术或设计创新特色

- 系统配套的除尘器采用 180 度旋进导流上进风方式，具有良好的初级除尘功能，提高除尘效率并降低能耗；
- 良好的除尘效率及高过滤速度，可以减少除尘器容积、节约一次投入、降低使用费用；
- 耐压及安全性能更好，设备耐压可达 10kPa，对于粉尘防爆区域可配置专有的防爆装置。



图 6-15 除尘系统图



图 6-16 除尘系统配套的除尘器

主要技术指标

作业场所粉尘浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$;

除尘器排气筒粉尘浓度 $\leq 30\text{mg}/\text{m}^3$ 。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1370 万元。

运行费用

根据实际运行情况，水、电、粉、气、管理等运行费用约为 160 万元/年，年维修费用约 15 万元。

与未安装除尘系统相比，年减少粉尘排放 8.5 万吨/以上，收集的粉尘大部分返回粮食转运系统，为企业创造可观的经济效益。

用户意见

本项目投运后，各项技术指标优良，作业场所粉尘浓度达卫生要求，配套除尘器粉尘排放达到环保要求，各项耗能指标达到或优于设计要求，该除尘系统工程带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：科林环保装备股份有限公司

联系人：沈强

地址：江苏省苏州市工业园区通园路 210 号科林大厦

邮政编码：215021

电话：0512-62515239

E-mail: kelin@188.com

七、大气复合污染监测、模拟与决策支持关键技术

71. 大气挥发性有机物快速在线监测系统

大气中挥发性有机物在对流层光化学氧化循环中起到关键作用，是城市和区域大气化学反应的重要前体物，对二次有机气溶胶的形成起到重要作用，直接或间接地控制光氧化剂的生成速度和效率，对大气氧化潜势有重要影响。其特点是浓度低、活性强，在大气环境领域具有重要的研究意义。大气中的有机物 80% 是挥发性有机物（沸点低于 250℃ 的有机化合物，简称 VOCs），组成复杂、浓度和化学活性差异大。大气中的 VOCs 不仅是生成光化学烟雾污染物的主要前体物，对提高城市和区域的大气氧化能力起重要作用，同时也是大气细粒子中有害有毒的有机组分的重要来源，对形成灰霾有重要贡献，一些 VOCs 本身具有毒性和致癌性。因此，对大气中各类 VOCs 进行系统监测十分必要。鉴于大气中 VOCs 成分复杂、浓度低，活性强，如何快速有效地检测这些有害物质是环境检测和环境科学研究的重要课题，也是环境监测仪器研发的方向。

针对我国大气气态有机物监测的关键问题，在 863 计划“大气复合污染关键气态污染物的快速在线监测技术”课题（No.2006AA06A301）的支持下，自主设计开发了大气中挥发性有机物在线监测系统。自主设计研发了低温冷冻捕集和热解析系统，使用超低温冷阱致冷，取代了以往仪器中使用的液氮等低温制冷剂，降低了仪器使用成本，使得该系统更适用于野外观测以及环境监测站。且系统全部采用模块化设计，利于使用、维护和推广。

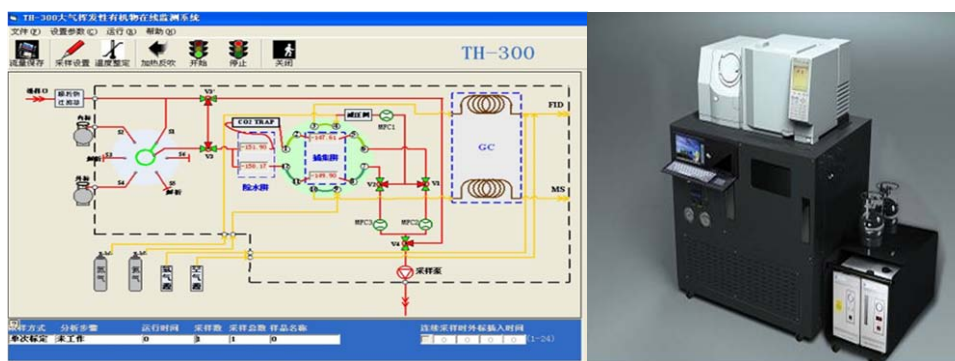


图 7-1 VOCs 快速在线监测系统控制界面图 7-2 VOCs 快速在线监测系统样机

技术特点

- 该系统采用低温富集浓缩技术，结合气相色谱/质谱法（GC/FID/MS）检测大气中挥发性有机物 VOCs（包括含氧挥发性有机物 OVOCs）的一体化在线测量技术及设备。
- 双气路采集样品，同时去除大气中水、臭氧等干扰物。自动加入内标，实现对仪器运行状态的跟踪。
- -150℃ 超低温冷阱，可对目标化合物实现完全捕集。空石英毛细柱捕集阱，有效地解决了极性较强化合物的吸附、化学干扰等问题。10 秒内快速加热保证干扰物去除，获得良好分析效果。

- 双色谱分离柱，FID 和 MS 信号同步接收，一次完成对 C₂-C₁₂ 目标化合物的分析。
- 自行研制的温度控制系统，实时在线监控系统除水、样品采集和加热解析的温度。
- 自行设计和编制的运行软件，可完成采样、冷冻捕集、热解析、分析、加热反吹和系统标定过程的全程自动化控制。

性能验证

目前，该系统已经有了产品化机型，多台在线仪器已经分别在广州亚运会空气质量评估、北京地区大气复合污染研究、无锡大气污染防治规划以及东亚地区大气污染物跨界输送等项目中进行了示范和应用。



图 7-3 现场观测图

成果转化

本系统自 2004 年开始，通过专利实施许可的方式，不断推进在线的大气 VOCs 分析仪器的产业化进程。已建立在线的大气 VOCs 分析仪器的研发和生产基地，并于 2009 年开始实现量产，已经销售数十台。

主要客户

环境监测站、科研单位等。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京大学环境科学与工程学院

联系人：张远航

地址：北京市海淀区北京大学老地学楼

邮政编码：100871

电话：010-62756592

E-mail: yhzhang@pku.edu.cn

72.大气细粒子及其气态前体物一体化在线监测技术

简介

利用多种快速接口组合,设计开发出具有自主知识产权的“大气细粒子及其气态前体物一体化的在线监测系统”,实现细粒子水溶性化学成分及其气态前体物的同步在线监测,包括:气态 HCl、HONO、HNO₃、H₂SO₄,气溶胶中 F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻以及 WSOC 的分析,实现大气细粒子中多种元素快速在线检测。设计开发出能够进行不同粒径段的细粒子样品成分分析装置,用于解析大气细粒子的来源与转化过程,为大气污染区域协同控制提供基础数据,为区域大气细粒子污染调控措施的制定提供科学基础和监测技术。

介绍

大气细粒子快速捕集/离子色谱在线无机盐分析仪。无膜采集大气细粒子/在线快速离子色谱分析其中的水溶性化学成分,数据时间分辨率比传统膜采样高近 100 倍,使研究大气二次粒子形成机理和校验模式输出的高时间分辨率结果成为现实。研制仪器性能高于国外类似产品,但价格仅相当于进口产品的 50% (30 万元左右);在线观测结果还可用于校验高分辨率飞行时间气溶胶质谱 (350 万) 的在线观测结果。已经推广到多家科研单位,具有良好推广和应用前景。

技术特点

细粒子及其气态前体物一体化在线测量技术

▶颗粒物 (PM₁₀、PM_{2.5} 或 PM_{1.0})

激活粒子: >大于 50nm 粒径;

可分析粒子的化学成分为水溶性无机盐: Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、F⁻; K⁺、Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺。

▶水溶性有机物: WSOC;

检测限: SO₄²⁻<0.3、NO₃⁻<0.25、NO₂⁻<0.25、NH₄⁺<0.5μg/m³;

WSOC 的检测限<0.1μg/m³;

时间分辨率: <20min。

▶气态前体物

检测物种: NH₃、HCl、H₂SO₄、HNO₃、HNO₂;

检测限: <1μg/m³;

时间分辨率小于 20 分钟;

不确定性<5%;

大气细粒子污染元素快速在线接口: 可直接应用 ICP/MS, 检测限<1μg/m³。

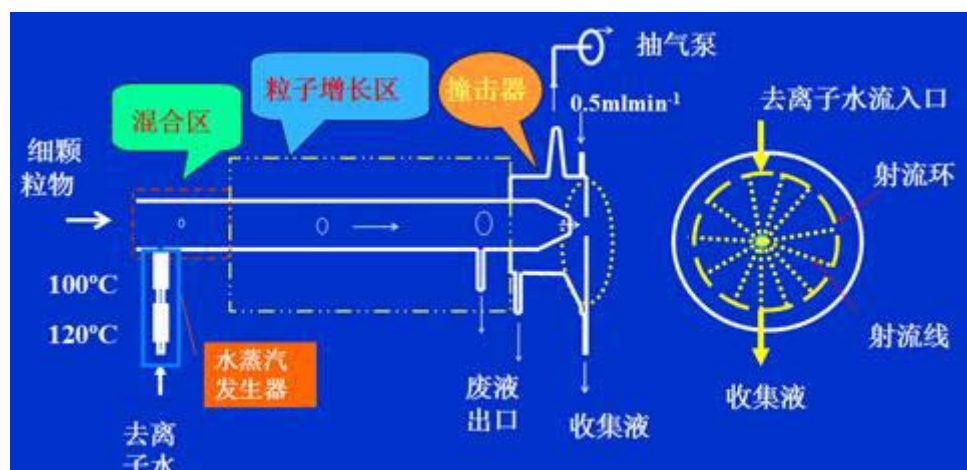


图 7-4 工艺流程图

应用案例

2008 年北京第二十九届奥运会和 2010 年广州第十六届亚运会举办前后，依靠本课题研制的系列仪器设备大气细粒子化学成分在线分析仪、大气挥发性有机物在线分析仪、大气 NO/NO₂ 和 PAN 检测仪、小型化 O₃ 和 NO_x 大气廓线观测仪、及以 DOAS/高塔为基础的大气边界层污染物梯度观测技术与设备，成功进行了奥运空气质量保障监测工作，既对研发仪器的实用性进行了检测和验证，更为我国兑现“绿色奥运”的承诺发挥了基础性作用。课题主要创新成果之一大气挥发性有机物在线分析仪已商品化，投入市场，在广东、湖北、南京等地的环境监测中发挥着重要作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院大气物理研究所

联系人：王跃思

地址：中国北京市朝阳区德胜门外祁家豁子华严里 40 号

邮政编码：100029

电话：010-82080530

E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

73.大气中 NO_x 及其光化产物一体化在线监测仪器及标定技术

简介

利用光解技术和表面化学方法研发准确测量 NO₂ 的技术，与常规化学发光技术结合开发能够准确测定 NO、NO₂、PAN 和 PPN 的技术系统。集成所研制的动态零点化学发光法测 NO 模块，光降解 NO₂ 模块和钼催化转化模块，制造一体化样机，样机可同时在线精确测量大气样品中的 NO、NO₂、NO_y。为评估含氮大气活性成分对 O₃ 产生贡献的准确测算和其产物的进一步演化提供可靠的技术方法和适合国情的仪器设备产品。

介绍

大气 NO/NO₂/NO_x/NO_y 一体化监测仪。利用改进的紫外光分解 NO₂、化学发光检测和臭氧补偿创新技术研制的一体化大气 NO/NO₂/NO_x/NO_y 联合观测仪器，克服了市售流行商品仪器对 NO₂ 测量偏高而对 NO_y 测量偏低和对 NO 测量不准的缺陷，准确的测量结果成功地用于大气臭氧产生/消亡与前体物 NO_x 的机理研究。已经推广用于烟雾箱模拟实验的大气化学机理研究，具有进一步产品化和商品化开发价值。

PAN 测定/标定一体化仪器：除推广测定大气中的 PAN，研究大气化学过程，判断污染传输途径，标气动态生成技术装置已经扩展用于开发生物源 NO 排放观测仪器系统新一代仪器设备。

技术特点

大气中 NO_x 及其光化产物一体化在线监测仪器及标定技术

检测物种：NO、NO₂ 和 NO_y；

检测限：<0.1ppb；

时间分辨率：<5 分钟；

检测物种：PAN 和 PPN；

检测限：<0.01ppb；

时间分辨率：<5 分钟。

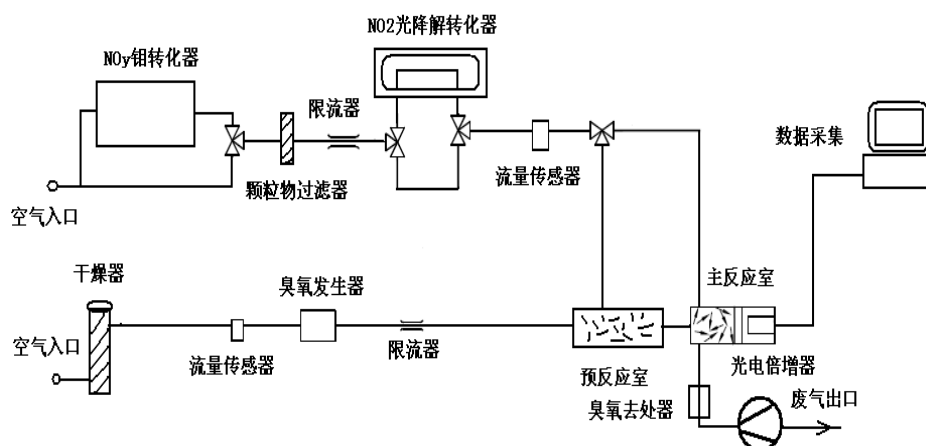


图 7-5 工艺流程图



图 7-6 案例现场图

大气复合污染关键气态污染物的快速在线监测技术自 2006 年启动以来，研发了一系列自主知识产权的技术方法和仪器设备，为建立先进的城市群大气污染三维立体监控体系提供技术设备，缩小了与国际水平的差距，并有效推动了国产化。曾获得国家科技进步二等奖。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院大气物理研究所

联系人：王跃思

地址：中国北京市朝阳区德胜门外祁家豁子华严里 40 号

邮政编码：100029

电话：010-82080530

E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

74.大气细粒子和超细粒子的快速在线监测技术

在 863 计划课题（项目编号 2009AA06A302）的支撑下，研制了双波长三通道气溶胶探测拉曼激光雷达、细粒子谱分析仪、大气 OC/EC 测定仪、以及振荡天平颗粒物质量浓度监测仪（PM₁₀、PM_{2.5}）。在宽范围粒径谱的快速分析技术、稳定的场致电离电荷源技术、超高灵敏大气分子拉曼散射信号探测技术、以及 OC/EC 临界温度的精确选取等关键技术方面取得了突破。

振荡天平颗粒物质量浓度监测仪（PM_{2.5}）。振荡天平法（TEOM）粉尘监测系统是“称重”测量系统，用恒定的流速把样气抽进测量单元并经过不被水浸润的滤片，同时把进样管道加热到高于环境温度(50℃)，避免水汽的影响，在质量变送单元中心的锥形元件是一个空心管，一端固定，另一端悬空可自由振动。可更换的滤膜片放置在自由振动端。锥形元件像音叉一样精确地以其自然频率振动，霍尔元件把振动信号转换为电信号，设计相位匹配的正反馈机构，通过电磁铁的向振动系统补充能量，以克服系统的阻尼消振。自动增益控制电路使振动保持恒定的振动振幅。一个精确的电子计数器测量振动的频率。系统每 2 秒测量一次滤片的质量，即可获得不同时间段的粉尘浓度。结合高效 PM_{2.5} 采样头，可以获得高时间分辨颗粒物质量浓度分布。

双波长三通道拉曼激光雷达。双波长三通道气溶胶探测拉曼激光雷达系统主要由激光器、接收光学系统和数据采集和控制三大部分组成。系统采用同时输出 532nm 和 355nm 的双波长激光器，用两个激光波长上的 Mie 散射探测大气气溶胶的后向散射，短波长能够探测到大气中更细小的粒子，同时用第三个通道探测 355nm 激发的大气中 N₂ 分子的拉曼散射，中心波长在 386.7nm，因为 N₂ 是大气中比较稳定的一种高浓度气体，它在大气中的廓线比较稳定，望远镜接收到的拉曼信号回波只包含有气溶胶的消光，而与气溶胶的后向散射系数无关，因此可以直接得到气溶胶的消光系数。因此，系统能够同时独立的探测大气颗粒物后向散射和消光系数。

大气 OC/EC 测定仪。大气 OC/EC 测定仪课题采用美国 EPA 推荐的 TOT(热光透射)方法，研制大气颗粒物 OC/EC 准确、简便、快速测定技术与设备。系统采用的碳分析方法与传统的热法仪器相同，通过对采集的颗粒物逐步升温的加热过程，使其中的有机碳（OC）和元素碳（EC）在不同的温度下分解，并燃烧生产 CO₂，通过对 CO₂ 的定量化测量确定颗粒物中 OC 和 EC 的含量。本课题主要解决传统热法中临界温度难以确定的难题，并研究基于气体滤波相关（GFC）的非色散红外（NDIR）高灵敏 CO₂ 气体分析技术实现颗粒物中碳素的定量分析。TOT 法 OC/EC 监测的基本原理是在仪器分析的全过程测量采样滤膜的激光透过率，随着 OC、EC 的相继分解，采样膜的透过率会逐步恢复到采样前的值，把透过率恢复时刻作为 OC 和 EC 分割的临界温度，在临界温度之前所测量的 CO₂ 浓度代表 OC 值，在临界温度之后所测量的 CO₂ 浓度代表 EC 值。

大气细粒子谱分析仪。大气细粒子谱分析仪系统由并行工作的光散射粒子计数器（LPS）和扫描粒子迁移谱分析仪（SMPS）两部分组成。LPS 系统完成

0.5~10 μm 粒子粒径和数浓度测量, SPMS 系统实现 5nm~500nm 粒子粒径和数浓度测量。在本课题中重点解决 SMPS 系统中的关键技术研究。SMPS 基本工作过程是空气中的细粒子经过初级过滤, 滤掉大的颗粒物; 其它的气溶胶粒子随气流到达场致电荷源区, 对气溶胶粒子进行电荷加载, 使其带上负电荷; 然后到达差分电迁移分析仪(DMA), 通过计算机精确控制高压电源扫描和流量控制完成特定粒径粒子的筛选与分离; 分离出来的带电粒子被送入凝聚核粒子计数器(CPC)中, 实现粒子的个数统计, 探测到的信号经计算机采集处理最后得到 5nm~500nm 范围内的粒径谱。

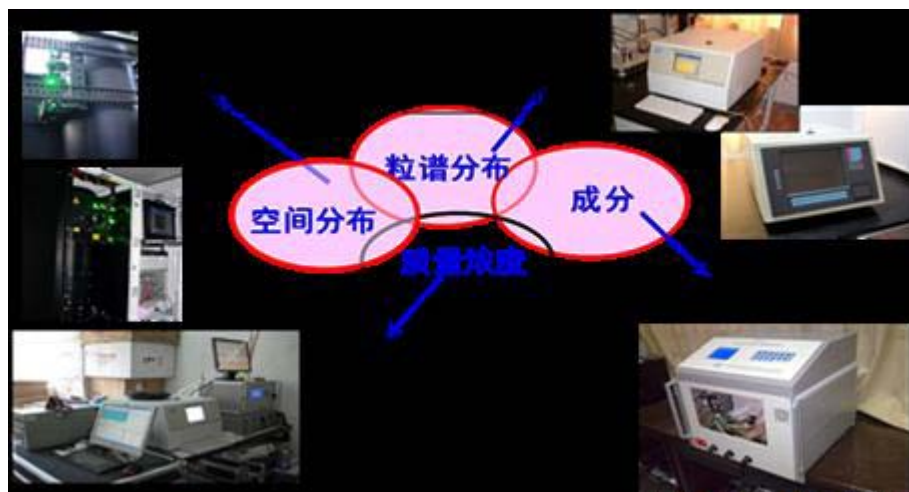


图 7-7 大气细粒子和超细粒子的快速在线监测技术关键技术示意图

技术特点

(1) 宽范围粒径谱的快速分析技术

模块化系统设计, 通过粒子飞行时间测量(TOF)、扫描粒子迁移谱分析(SMPS)以及高效 CPC 粒子浓度测量技术的综合应用, 实现从纳米到微米颗粒物的原位、快速、在线、宽范围粒径谱测量。

(2) 稳定的场致电离电荷源技术

稳定的电荷源是对纳米颗粒物按照不同粒径通过迁移技术进行准确分离的前提。利用基于场致电离的方式实现颗粒物的高效荷电, 克服了传统放射性中和源荷电效率低, 使用受限的问题。

(3) 超高灵敏大气分子拉曼散射信号探测技术

对于大气气溶胶针 532nm 和 355nm 波长的信号探测, 选用高增益、高灵敏度及线性好的光电倍增管并使用 A/D 采集与光电子技术相结合的方法进行探测; 对氮气分子对 355nm 波长的 Raman 散射截面小的问题, 采用高灵敏的光电倍增管并结合光子计数方法进行测量, 来提高氮气分子的 Raman 信号探测能力。

(4) OC/EC 实时在在线精确测定技术

热光透过率法通过测量激光在采样滤膜上的透过率来确定 OC/EC 的临界温度, 结合高精度二氧化碳气体检测技术、分析气体微流量精确控制技术、高精度二氧化碳气体检测技术及高灵敏度、高精度光电探测技术完成对 OC/EC 实时在在线精确测定。

(5) 高灵敏度 CO₂ 的检测技术

在 OC/EC 测量系统要求对 CO₂ 的浓度进行 ppb 量级的检测，高精度二氧化碳气体检测技术。系统通过测量分析炉排出的 CO₂ 浓度来推算大气有机碳/元素碳的浓度，采用 NDIR 原理实现 CO₂ 的高精度检测。

(6) 质量浓度振荡天平精确测量技术

综合利用锥形振荡管的成形技术、微振动传感技术、微振动伺服技术、粒子切割技术、高精度温度控制技术、高精度流量控制技术采用高精度的质量流量控制器，实现大气细粒子质量浓度的精确测量。

性能验证

双波长三通道气溶胶探测拉曼激光雷达、振荡天平颗粒物质量浓度监测仪 (PM₁₀、PM_{2.5})、细粒子谱分析仪以及大气 OC/EC 测定仪等在 2008 年“北京及周边地区奥运大气环境监测和预警联合行动计划”项目中发挥重要作用，为奥运主场馆去的空气质量预报提供了重要参考资料。同时，仪器参加“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”项目外场试验，达到了预期的研究目标。2010 年上海世博会和广州亚运会期间，课题部分成果参加世博会及亚运空气质量监测任务，为世博及亚运会期间空气质量保障工作提供基础数据支持。



图 7-8 现场观测图

成果转化

本技术自 2008 年开始，通过技术转让及专利实施许可的方式，不断推进振荡天平颗粒物质量浓度监测仪产业化进程。已经建立振荡天平颗粒物质量浓度监测仪的研发和生产基地，并在安徽、江苏、北京等全国各省安装了 300 余套大气颗粒物自动监测仪，实现新增产值 3300 余万元以上。

从 2011 年开始，通过技术转让及专利实施许可的方式，不断推进双波长三通道气溶胶探测拉曼激光雷达、米散射激光雷达的产业化进程。截止目前，销售总额超过 2000 万元。

主要客户

环境监测站、科研单位等。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：刘建国

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65591558

E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

75. 臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统

目前测量大气臭氧的主要方法有比色定量法、库伦原电池法、光学吸收光谱法、太阳光谱法和差分激光雷达。差分激光雷达是一种主动遥感技术，该技术在 20 世纪 60 年代中期激光雷达测量水汽时引进，并在 70 年代中期得到进一步发展。差分激光雷达通过选取两束不同波长的激光，这两个波长分别选在待测气体的强吸收截面和弱吸收截面上，利用待测吸收气体对两个激光波长的吸收差别确定两个脉冲激光共同路径上待测气体的浓度。差分激光雷达测量的结果与其它测量手段获得的结果相比，具有高时空分辨率、测量精度高、实时在线等特点，成为测量大气臭氧时空分布的重要手段。在 863 计划课题（项目编号 2009AA06A311）的支撑下，车载臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统为我国开展光化学烟雾和细粒子生成机理研究提供了数据基础，为我国城市群大气复合污染中的颗粒物和光化学烟雾污染防治提供了技术保障。

臭氧激光雷达系统为车载式激光雷达系统，方便野外实验，并且做到了电子元器件的三防(防尘、防湿、防电磁)。激光器电源所需的强电与信号探测采集单元所需的弱点两相分开，消除了两者之间的相互干扰。系统设计总体上分为三大部分：第一部分为光学发射与接收光机系统；第二部分为光电探测组件中的电子学系统，包括激光器电源、信号放大、采集和控制单元；第三部分主要为信号存储与数据处理系统。激光器采用高功率 Nd:YAG 四倍频激光（266nm），输出功率 1.5w，激发 D2 和 H2 获得一级 Stokes 频移波长，使用一套激光器系统，可以同时获得 266nm、289nm、299nm、316nm 四种波长输出。利用四波长发射光学系统、多波长激光扩束镜和导光镜组，实现光源稳定、高效输出。信号检测系统可实现高速度（40MHz 采样率）、超大动态范围（100dB）的信号采集。利用低噪声（<2mv）高压电源模块，高速前置放大器，实现模拟采集和光子计数的同步采集。利用高分辨率的光栅光谱仪代替滤光片作为分光器件，大大提高了后继光学系统的灵敏度和长期稳定性；在完成大气臭氧时空分布探测系统低层大气臭氧廓线反演算法的基础上，优化出最有效的数据处理方法，并对测量结果的误差进行了系统的分析。

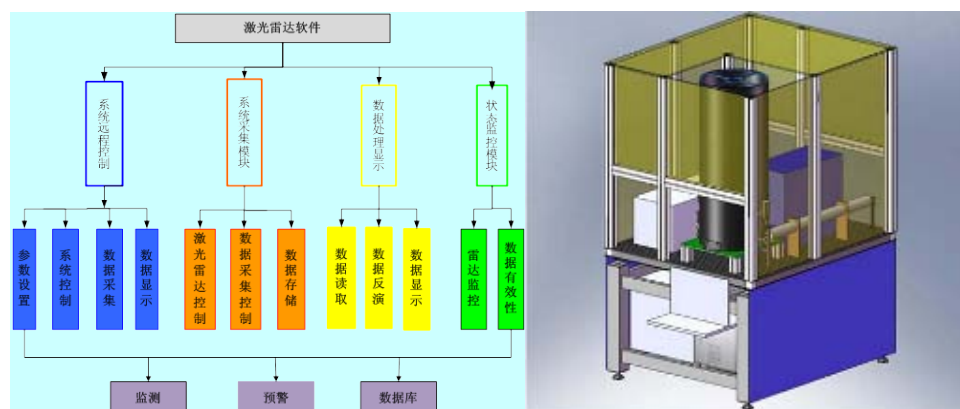


图 7-9 臭氧时空分布探测差分吸收激光雷达系统控制软件及样机结构示意图

技术特点

(1) 拉曼频移激光器

利用 Nd:YAG 的四倍频 266.0nm 泵浦甲烷产生的一级 Stokes 波长 288.38nm, 以及泵浦氢气产生的一级 Stokes 波长 299.05nm 构成差分吸收测量系统, O₃ 在两波长的吸收截面之差为 $1.267 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 。

(2) 收、发光学系统

为了最大限度的减小盲区, 采用离轴发射方式, 在光学发射与光学接收系统之间, 尽可能的减小发射光轴与接收光轴之间的距离; 为了得到相同的几何因子, D2 拉曼管、H2 拉曼管两路光设计为对称分布在接收光学光轴的两侧, 并具有相同的重叠修正系数。

(3) 数据采集和控制技术

288nm 和 299nm 波长两路探测器工作在光子计数模式, 由多道光子计数器完成数据采集; 2 个高灵敏光电倍增管工作在门控方式, 并由激光器发射光路中的光触发二激光管 PD 所同步, 以避免激光发射瞬间的强干扰信号; PD 同时也为多道光子计数器提供了时基信号, 作为零距离信号启动一次激光脉冲的数据采集。

性能验证

在广州亚运会期间及长春绿园区气象站臭氧激光雷达与臭氧探空仪对比实验中, 对所研制的臭氧激光雷达进行了长期观测试验。



图 7-10 在广州（左）与长春（右）现场观测图

图 7-11 分别为该臭氧雷达系统于 2011 年 6 月在长春绿园区气象站与臭氧探空仪测量臭氧廓线对比结果, 可以看出臭氧激光雷达与臭氧探空仪测量结果一致性好, 这说明了探测结果的有效性和可靠性。

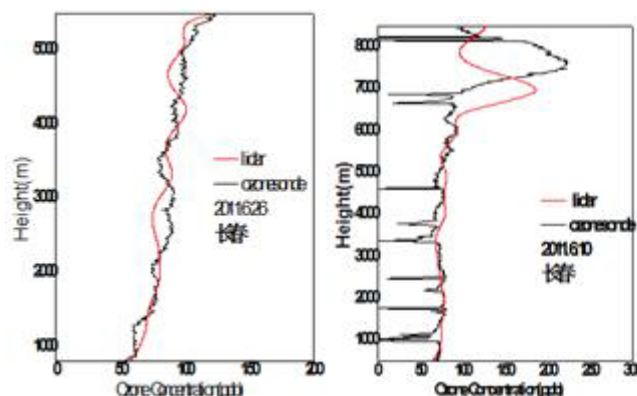


图 7-11 臭氧激光雷达与臭氧探空仪对比结果

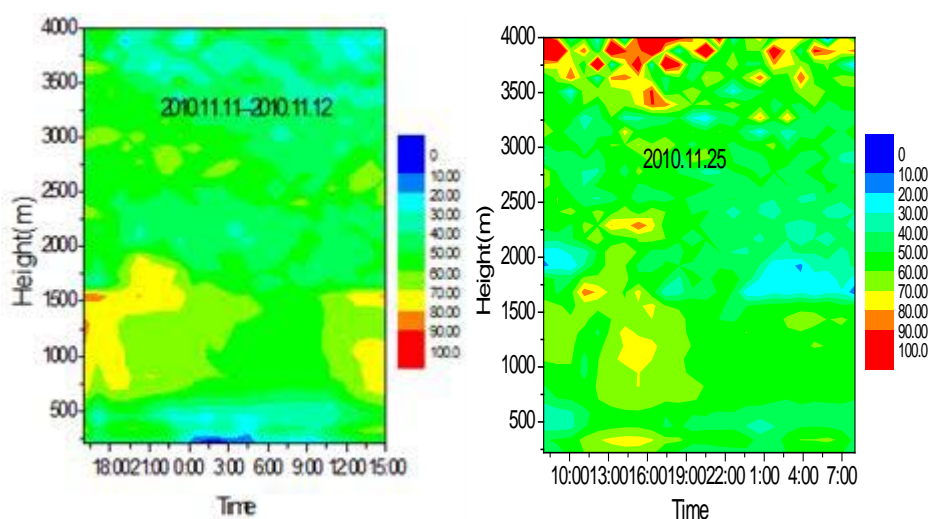


图 7-12 广州亚运会期间臭氧激光雷达测量臭氧时间演化图

用户评价

本课题研制的大气臭氧激光雷达在吉林省长春市开展了为期一个月的测量实验，提供了大量有效可靠的数据，大大促进了对流层臭氧生成和传输机理的研究。该系统性能稳定性好，自动化程度高，该成果将为我国立体监测提供新的技术手段，大气空气污染预警提供设备支持，对我国环境监测技术的发展起到推动作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：刘建国

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65591558

E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

76.便携式多组份气体紫外、红外现场分析仪

在 863 计划“工业源多组份气体污染排放现场监测设备”课题(No.2009AA063006)的支持下,针对工业源(烟气排放、无组织排放、泄漏等)排放的 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 CO_2 、 NO 、硫化物、有机污染物等多种污染气体,自主研发了便携式多组份气体紫外现场分析仪和便携式多组份烟气红外分析仪。在高效紫外吸收光学系统的设计、多组份光谱数据反演算法等方面进行了技术突破;有效解决了应用紫外差分吸收光谱技术满足多种气体测量的仪器小型化难点;研制设计的便携式多组份烟气红外分析仪采用了多次反射池和多波段光学滤波技术结合,实现了多组分气体高灵敏连续自动监测。本项目的开发研究工作,将满足生产厂区、气体泄漏、无组织排放、烟气排放等工业过程对多种污染气体进行现场快速监测,满足国家环境部门对工业排放污染的监督性监测需求。

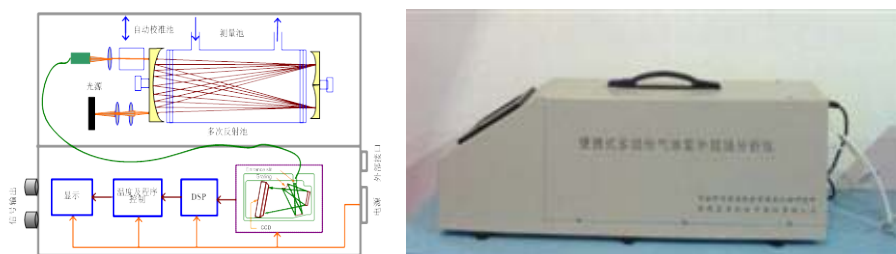


图 7-13 便携式多组份气体紫外现场分析仪

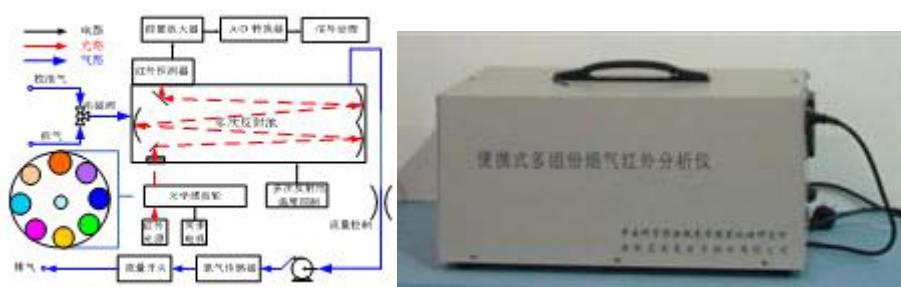


图 7-14 便携式多组份烟气红外分析仪

技术特点

(1)采用独特设计的紫外光谱探测结构,高效光强输入耦合技术、紫外多次反射池技术和光纤光谱探测技术结合,具有小型、便携的特点,实现多组份污染物现场在线测量。

(2)紧凑型高效紫外多次反射池,具有高反射率、高稳定性、高光程体积比特点。

(3)结合二项式系数滤波、多项式拟合滤波以及 Savitzky-Golay 滤波等多种数字滤波方法,解决了紫外波段环境及多组份交叉干扰问题,实现对 Cl_2 、苯系物等污染气体现场测量。

(4)大动态多组分滤波轮技术。通过多滤光片设计达到测量范围和测量精度的有机结合,实现了测量组分浓度的大动态范围的设计。

(5)交叉干扰扣除算法。通过实验测量分析不同气体对各个滤光片的响应特性,获得各个气体对各个滤光片的吸收系数矩阵,在通过解矩阵的方法反演各个气体的吸收浓度系数,实现各种气体间的交叉干扰的扣除。

性能验证

便携式多组份气体紫外现场分析仪和便携式多组份烟气红外分析仪在安徽省、河北等地进行了外场应用和示范。



图 7-15 现场监测示范及应用

成果转化

已建成一条专业的生产线,通过扩大机械加工车间,增加了大量的检测试验调试设备,形成了年产 100 套的生产能力。

主要客户

各类工矿企业、科研院所等。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位:中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人:谢品华

地址:安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码:230031

电话:0551-65593147

E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

77.污染源排放遥测技术系统

在 863 计划“工业源多组份气体污染排放现场监测设备”课题(No.2009AA063006)的支持下，自主研发了污染源排放遥测技术系统。重点解决了高稳定性、高灵敏的紫外可见遥测系统设计、去除多种大气干扰效应的污染气体光谱精确反演技术以及结合风场数据的污染气体排放通量获取技术等关键技术。系统主要应用于污染源(点源、面源、非组织排放源)污染气体排放的监测，便于环境管理部门开展监督性监测，满足国家环境部门对工业排放污染的监督性监测需求。研制的污染源排放遥测系统应用于上海世博会、广州亚运会空气质量保障项目、南京亚青会以及区域大气灰霾污染研究（河北、重庆、河南等），为环境管理部门提供了先进技术手段和科学监测数据，支持相关减排措施的出台。

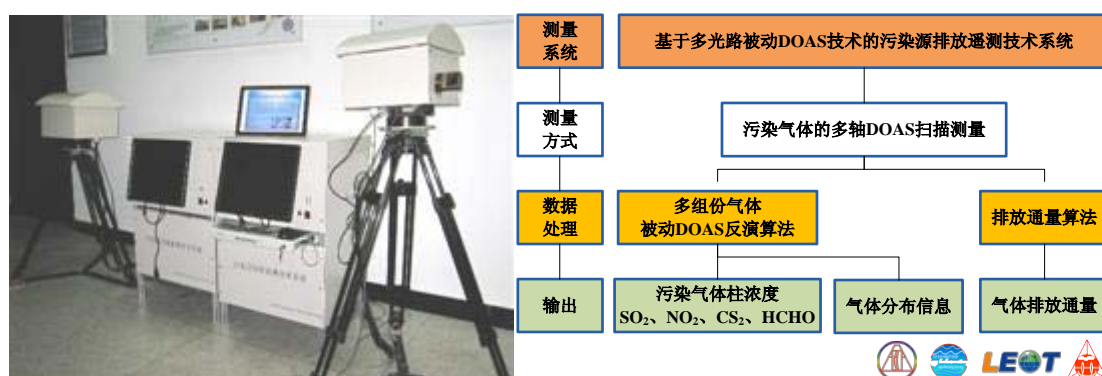


图 7-16 污染源排放遥测技术系统

典型案例（一）

项目名称

长三角区域环境空气质量联动机制研究

项目概况

2010年5月1日至10月31日上海市成功举办了中国2010年上海世界博览会，为了确保博览会期间有良好的空气质量，相关单位，根据上海市环境保护局发布的科研项目指南要求，共同开展《长三角区域环境空气质量联动机制研究》科研项目。本项目承担了其中的“利用光学遥感监测技术开展区域污染输送影响监测”和“重点工业区污染排放及区域空气质量监测”子课题。2010年4月~11月，污染源排放遥测技术系统开始运行。2011年2月，课题顺利完成验收。

主要原理

采用污染源排放遥测技术系统，对高架源或工业面污染源（如高桥石化、吴泾工业区、闵行电厂等），分区域进行其污染气体（SO₂、NO₂）排放量进行监测，掌握主要源的污染排放特征，分析其对空气质量的影响。

关键技术或设计创新特色

- 解决系统的光谱稳定性、低杂散光、低噪声电路等技术；
- 去除多种大气干扰效应的污染气体光谱精确反演技术；
- 结合风场数据的污染气体排放通量方法。

主要技术指标

根据课题验收报告，污染源排放遥测技术系统在上海世博会期间开展了近3个月的监测，获得了高桥石化、吴泾工业区SO₂、NO₂柱浓度分布及排放通量，并提供了重点工业区污染排放及对空气质量影响研究报告。系统为世博会空气质量保障和空气污染预报预警提供支持，并评估控制措施的实际效果，获得了上海市环境监测中心的好评。

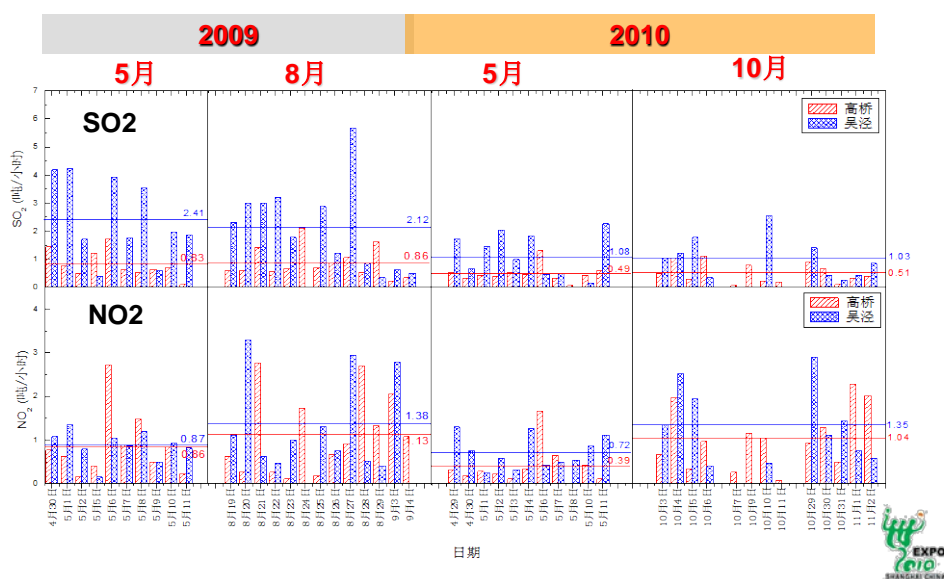




图 7-17 上海世博会期间污染源排放遥测技术系统监测结果

投资及运行效益分析

目前我国对污染源排放测量主要是采用源排放线监测设备（CEMS）获得污染气体的排放量，其主要适用于对高架点污染源，而对于面源、无组织源以及区域源等，只能通过物料平衡法进行统计计算，无法通达实际测量获得。

本系统的成功研制，可应用于污染源的监督性监测，满足国家环境管理部门对工业排放污染的监督性监测需求，同时填补了国内该技术领域的空白。

用户意见

本项目构建的系统监测结果在世博会期间“为空气污染预警及制定减排措施发挥了重要的决策支持作用”。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：谢品华

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65593147

E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

典型案例（二）

项目名称

重要污染源区排放以及区域污染输送的光学遥感监测

项目概况

第16届亚运会、亚残运会于2010年11月12日至27日在广州举行。为此，选择广州开展了监测试验，2010年11月~12月，污染源排放遥测技术系统开始运行。2011年1月，课题顺利完成验收。

主要原理

针对重点工业区，采用环境光学监测技术，建立重点工业区污染源排放移动观测平台，实现对主要污染源和污染物输送通量的连续自动立体监测，获得重点工业区污染源的排放特征以及特定气象场下的污染输送状况，研究其污染排放对主要亚运场馆空气质量的影响。采用基于被动DOAS技术的污染源排放遥测技术系统，针对重点源区域或其中的高架排放源进行排放烟羽的车载移动扫描测量，利用污染气体分子对紫外光谱的吸收特征，通过光谱解析，定性及定量确定排放气体的浓度，通过与风向风速数据结合，快速评估污染源的排放通量。具体针对重点源（广州黄浦电厂区）区域进行车载移动扫描测量，开展SO₂、NO₂污染排放的监测，研究其污染排放特征以及对主要亚运场馆空气质量的影响。

关键技术或设计创新特色

- 解决系统的光谱稳定性、低杂散光、低噪声电路等技术；
- 去除多种大气干扰效应的污染气体光谱精确反演技术；
- 结合风场数据的污染气体排放通量方法。

主要技术指标

根据课题验收报告，污染源排放遥测技术系统在广州亚运会、亚残运会期间开展了近2个月的监测，获得了广州市东部区域和东莞部分区域主要污染物的逐日排放通量，研究其污染排放特征以及对主要亚运场馆空气质量的影响。系统为亚运会空气质量保障和空气污染预报预警提供支持。

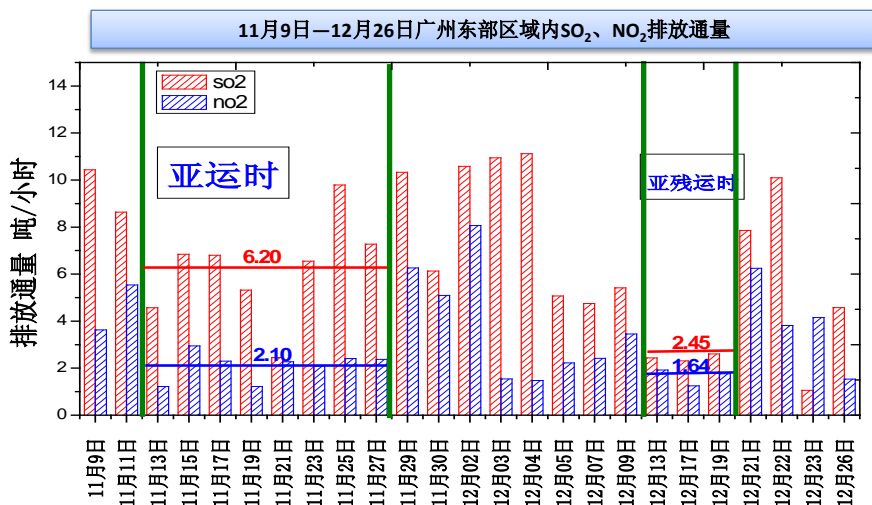




图 7-18 亚运会、亚残运会期间污染源排放遥测技术系统监测结果

投资及运行效益分析

本系统的成功研制，可应用于污染源的监督性监测，满足国家环境管理部门对工业排放污染的监督性监测需求，同时填补了国内该技术领域的空白。

用户意见

本项目构建的系统监测结果，不仅用于识别高浓度区域污染来源，提取可能发生的污染物积累、污染加重的前期信息，支持预警预报，而且用科学数据评估了亚运会空气质量保障方案实施的有效性和污染减排效果，取得的成果将有助于进一步推动我国区域大气环境污染监测技术体系的发展。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：谢品华

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65593147

E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

典型案例（三）

项目名称

重点工业区及周边区域空气污染物传输对重庆市主城区空气质量影响研究

项目概况

采用环境光学监测技术手段进行污染物区域输送以及重点工业区污染气体排放的观测，弥补现有地面监测和模型预报预警能力不足的重要手段，为认识和防治区域污染，制订大气清洁行动计划及空气质量改善提供支持。2012年6月~7月，污染源排放遥测技术系统开始运行。2013年10月，课题顺利完成验收。

主要原理

利用污染源排放遥测技术系统：在内环路、外环路部署车载 DOAS 系统，对重庆市内外环路径上污染气体（SO₂、NO₂）分布及输入输出情况进行移动观测与分析；对主要污染源，开展 SO₂、NO₂ 污染排放的监测，研究其污染排放特征和排放通量以及对空气质量的影响，通过车载系统沿工业企业周边/界面扫描测量，获得沿测量路径的污染气体的分布，通过与风场数据的结果，得到工业区 VOCs、SO₂、NO₂ 污染气体排放种类及排放通量。

关键技术或设计创新特色

- 解决系统的光谱稳定性、低杂散光、低噪声电路等技术；
- 去除多种大气干扰效应的污染气体光谱精确反演技术；
- 结合风场数据的污染气体排放通量方法。

主要技术指标

根据课题验收报告，污染源排放遥测技术系统在重庆开展了 1 个多月的监测，获得了重点工业区 SO₂、NO₂ 排放通量，并分析了对主城区影响；对重庆市内外环路径上污染气体（SO₂、NO₂）分布及输入输出情况进行移动观测与分析。系统为重庆市区域污染防治，制订空气质量改善措施提供技术支撑。



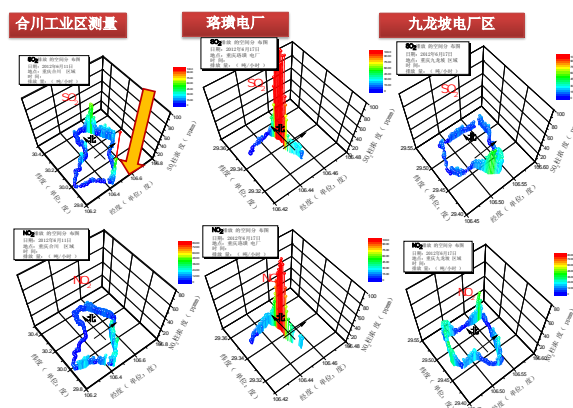


图 7-19 重庆市污染源排放遥测技术系统监测结果

投资及运行效益分析

本系统的成功研制，可应用于污染源的监督性监测，满足国家环境管理部门对工业排放污染的监督性监测需求，同时填补了国内该技术领域的空白。

用户意见

本项目构建的系统监测结果，“为认识重点工业区及周边区域空气污染物传输对重庆市主城区空气质量影响提供大量详实的污染物立体监测数据，为重庆市空气质量改善提供了强有力的科学依据，取得的经验、成果将促进区域空气污染输送通量观测的光学遥感方法技术规范的确立，进一步推动我国区域大气环境污染监测技术体系的发展”。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：谢品华

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65593147

E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

78.重点污染物面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统

在 863 计划课题“大气多组分污染物及其时空分布连续自动监测技术与设备”(2007AA061504)、安徽省科技攻关计划项目—污染源可挥发性有机污染气体浓度及排放通量实时监测技术与设备(09010301016)等支持下,研究了长光程开放光路红外光谱测量与处理技术;设计了双臂扫描干涉光路、基于 He-Ne 激光与 PSD 结合的精确扫描控制电路,研制了波长范围 2~15 μm 、分辨率为 1cm^{-1} 的稳定可靠、高信噪比傅里叶变换红外光谱仪;建立包括 350 余种 VOCs 和温室气体的红外光谱定量数据库;研究了背景光谱实时迭代拟合算法及仪器线型修正方法,开发了基于合成校准光谱技术的多组分气体定量分析算法及软件。在开放光路傅里叶变换红外多组分气体分析方法的基础上,研制了具有自主知识产权的重点污染面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统。系统采用收、发分置的双站式配置,整个设备由红外光源发射单元、红外接收单元、傅里叶变换光谱仪、系统自动控制与数据分析等四部分组成。系统具有连续自动光谱测量与处理、定量分析与显示、数据储存与回放等功能,实现了面源排放 VOCs 及温室气体浓度的非接触、长光程、多组分(可同时分析 10~20 种气体成分)、高灵敏度(主要成分的检测下限 $<10\text{ppb}$)连续自动监测。系统可用于重点污染面源,如石化工业区、大型垃圾处理场、大型养殖场以及石油天然气储运站等排放的 VOCs 及温室气体多组分实时连续自动监测。



a) 红外发射单元 b) 红外接收单元

图 7-20 重点污染物面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统样机

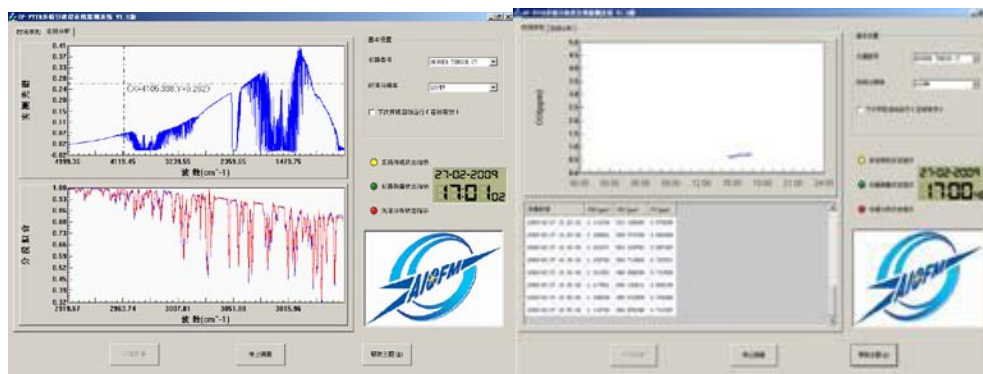


图 7-21 重点污染物面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统软件

典型案例

基本原理

重点污染面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统通过开放式测量,对光路内的污染气体吸收光谱完成在线非接触测量和分析,通过获得的多组分气体吸收光谱,结合基于数字合成校准谱在线定量分析反演算法,计算得到各污染物组分的浓度。

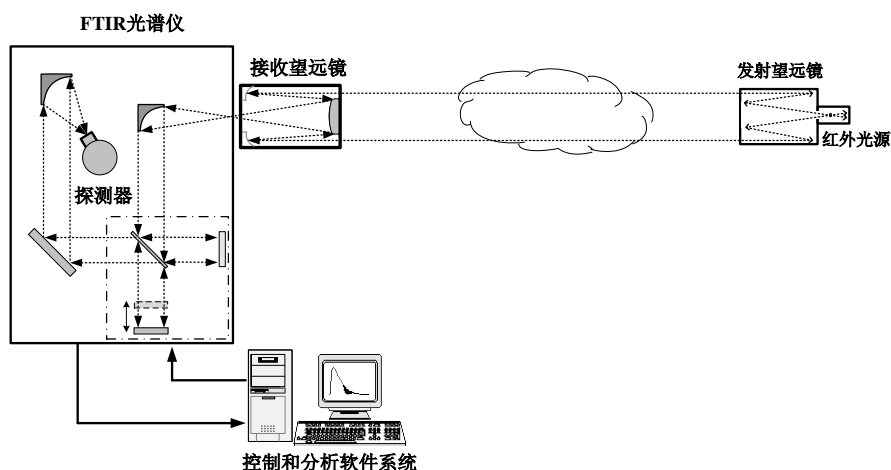


图 7-22 重点污染面源排放 VOCs 及温室气体连续自动监测系统简图

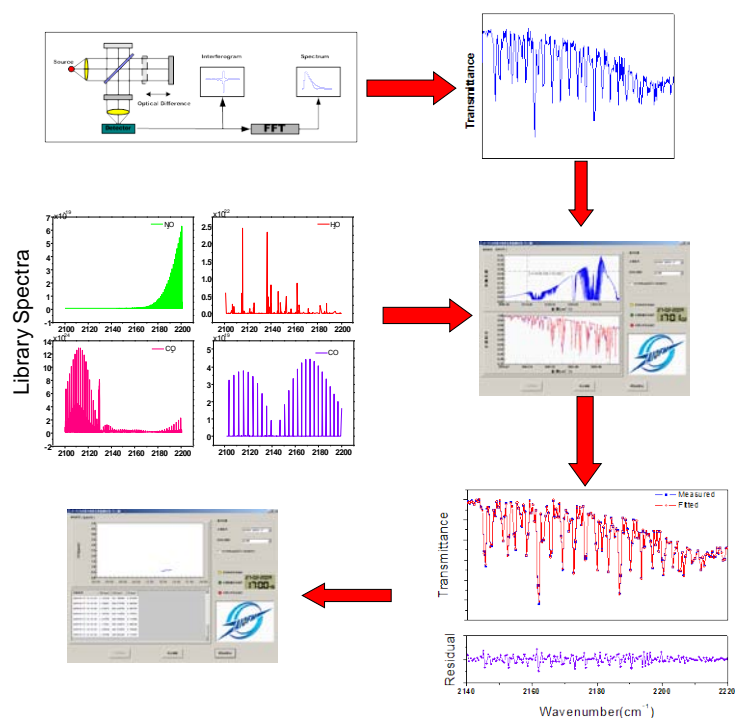


图 7-23 多组分定量分析流程图

关键技术

- 稳定可靠、重复性好的红外干涉仪;
- 用于定量分析的红外特征光谱数据库;
- 基于合成校准谱的多组分定量分析方法。

主要技术指标

- (1) 多组分非接触实时监测 10~20 种 VOCs(并具有可扩展性);
- (2) 主要成份的检测下限<10ppb; 动态范围 ppb 级到 ppm;
- (3) 检测精度优于±5%; 响应时间小于 1 分钟;
- (4) 数据库 300 多种组分;
- (5) CH₄、CO₂、N₂O、NH₃ 等成分检测下限分别达到 100ppb、1ppm、5ppb、5ppb。

生产及使用情况

(一) 2008 年北京奥运观测实验

参加了 2008 年北京市环境保护科技计划课题“利用光学遥感监测技术开展重要污染源区排放以及区域污染输送影响监测”研究,开展了“奥运空气质量保障方案的环境效果评估,奥运期间空气质量监测、预报预警”工作。

监测点位: 某石化区

测量点附近有炼油厂,塑料厂,化工一厂等化工企业。测量系统为开放光程傅里叶变换红外光谱在线分析系统,接收端位于小学主教学楼楼顶,距离地高约 20 米,红外光源发射系统位于远处建筑物顶的平台上,系统总光程为 220 米。

监测时间: 2008 年 6 月~9 月;

测量组分: CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CH₃OH、HCHO、CH₃COCH₃、CO、CO₂、N₂O;

测量光程: 220m。

(二) 2010 年广州亚运观测实验

参加了“重要污染源区排放以及区域污染输送的光学遥感监测”课题,分析区域污染输送通量和时空分布对广州亚运会期间空气质量的影响;研究重点工业污染面源污染物的排放特征,以及对亚运主场馆空气质量的影响;形成颗粒物和臭氧对环境的影响程度分析结果。通过对交通措施实施前后机动车排放的主要污染物进行测量,评估交通流量限制对环境空气质量的作用和影响。结合环保部门的环境空气质量监测与亚运质量保障预测预报开展服务。

监测点位: 广州市黄沙大道;

测量组分: CO、CO₂、CH₄、C₂H₆;

监测时间: 2010 年 11 月~12 月;

测量光程: 160m。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位: 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人: 高闵光

地址: 安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码: 230031

电话: 0551-65591581

E-mail: mggao@aiofm.ac.cn

79.大气污染多组分排放通量快速遥测系统

在 863 计划课题“大气多组分污染物及其时空分布连续自动监测技术与设备”(2007AA061504)和安徽省科技攻关计划项目“污染源可挥发性有机污染气体浓度及排放通量实时监测技术与设备”(09010301016)的支持下,开展了针对工业区域(厂界)VOCs等多组分污染气体排放的掩日通量测量新方法研究。研究了基于掩日法的红外光谱测量与处理技术,提出了基于太阳辐射传输和模拟校准算法的区域排放多组分气体垂直柱浓度分布算法,开发了拥有自主知识产权的基于掩日法的污染气体排放通量遥测算法软件。在掩日法傅里叶变换红外气体通量测量方法的基础上,研制了拥有自主知识产权的大气污染多组分排放通量快速遥测系统,实现了工业区域(厂界)VOCs、SO₂、NO₂、CO、NH₃等多组分气体排放通量的车载快速遥感监测。车载系统主要包括太阳自动跟踪器、光谱仪、光路传输单元、气象仪以及GPS。系统以太阳的红外辐射作为光源,车载快速移动扫描测量污染排放区域,测量其周界大气中污染气体的柱浓度分布,并结合风速、风向等气象参数,计算区域污染气体排放通量。系统污染气体垂直柱浓度测量下限:1~15ppm·m,通量探测下限:0.03~0.1kg/h。该系统可以用于工业区域(电厂,钢铁厂,炼油厂,石化厂,原油储存厂等)多组分污染气体排放通量的监测。



图 7-31 大气污染多组分排放通量快速遥测系统样机

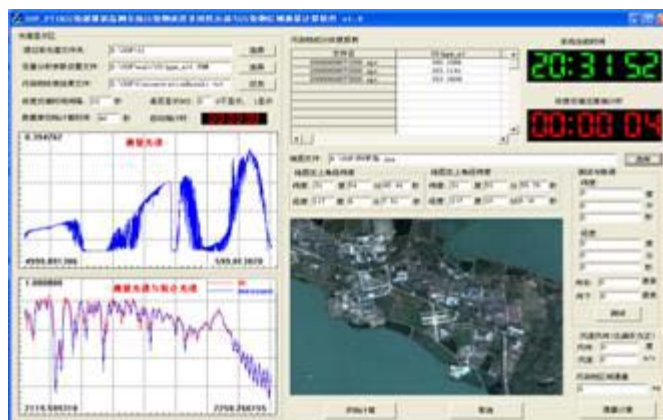


图 7-32 污染物柱浓度反演软件

典型案例

基本原理

太阳跟踪器及光路传输部分将污染气体选择吸收后的太阳光引入光谱仪，从标准数据库中提取污染物分子的标准吸收截面，结合仪器参数（如分辨率，仪器线型函数）和气象参数（温度，压强），计算出污染物的柱浓度，结合气象仪器提供的风速、风向信息，可以计算出污染物穿过某一个垂直平面的通量，GPS系统提供测量点的经纬度位置信息，如果监测车环绕某一区域做一周测量，就可以测量出经过该区域的污染物通量。

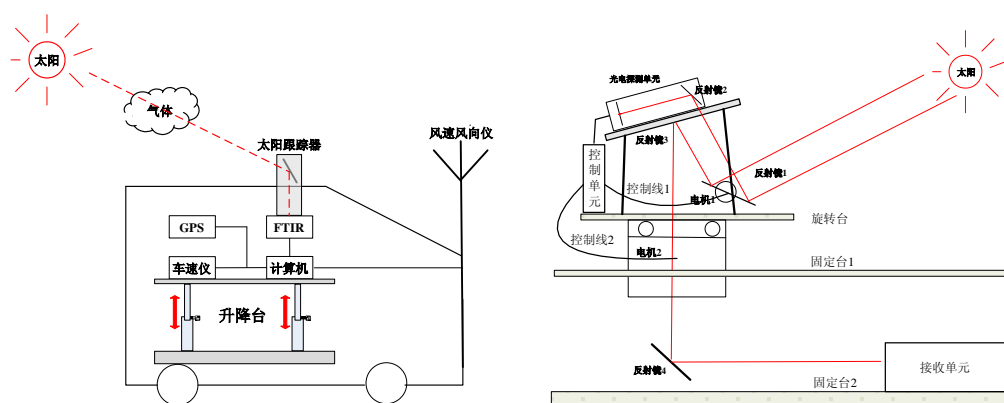


图 7-33 大气污染多组分排放通量快速遥测系统原理图

关键技术

- 简便可靠的车载太阳自动跟踪器的光电设计；
- 车载快速运动测量系统光学设计；
- 掩日法测量光谱的分析处理技术；
- 掩日法测量多组分气体柱浓度及排放通量反演算法。

主要技术指标

- (1) 垂直柱浓度检测限：1~15ppm·m；
- (2) 通量检测限：0.01~0.09kg/h；
- (3) 测量精度：优于 5%；
- (4) 工作方式：连续、自动；
- (5) 数字输出：网线接口，数据、状态和控制功能；
- (6) 测量软件：与中文 WindowsXP 操作系统兼容，具备光谱实时采集，存储和显示功能；
- (7) 光谱分辨率： 1cm^{-1} ；
- (8) 光谱测量范围：2~15 μm 。

应用情况

（一）上海世博会示范运行排放监测

参加了 2010 年“上海市重点工业区及周边区域空气污染传输对世博会区域空气质量的影响研究”课题，开展了 2 个月的观测实验。

观测区域：某两个化工区

测量组分： CO 、 NH_3 、 C_2H_4 、丙烯(C_3H_6)；丙烯酸($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$)、丙烯醛($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$)、苯甲醛($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}$)

观测时间：2010.04.29—2010.05.12；2010.10.03—2010.10.11。

(二) 重庆重点工业区及周边区域观测实验

参加了 2012 年“重点工业区及周边区域空气污染物传输对重庆市主城区空气质量影响研究”课题，采用环境光学监测技术，针对重庆市南北两个区块，开展 VOCs 污染气体的排放监测并获得 VOCs 浓度分布信息，研究其污染排放特征，并分析厂区污染排放的扩散对周边区域的影响。

观测区域：重庆市两个区块

测量组分：甲酸(CH_2O_2)、甲醇(CH_3OH)、甲醛(CH_2O)、苯甲醛($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}$)、 C_3C_9 总烷烃等；

观测时间：2012.06.14—2012.07.14。

用户意见

本项目研制的大气污染多组分排放通量快速遥测系统具有实时、动态、快速、非接触遥测监测范围广、以及对污染物多组分、高选择性检测等优点，除可以用于反映工业区有毒气体柱浓度分布和监测工业区排放通量外，还可以用于污染排放源解析，污染物扩散、输送跟踪监测和突发性污染事件快速监测分析。该成果将为我国多组分污染物排放通量监测方面提供新的技术手段，在大气环境监测领域发挥重要作用。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所

联系人：高闵光

地址：安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

邮政编码：230031

电话：0551-65591581

E-mail: mggao@aiofm.ac.cn

80.区域大气污染源识别与动态源清单技术

识别复合大气污染的来源是污染控制决策和环境管理的基本依据。完整、准确的区域大气污染物排放信息对于识别区域复合大气污染来源和开展区域大气污染控制都具有非常重要的意义。我国目前已有的区域源排放方面的研究工作大多独立而分散，综合、规范、动态的区域排放信息极度缺乏，一方面不能全面反映污染源的排放状况和时空特征，另一方面不能满足预测预警、区域调控、污染控制效果评估的要求。缺乏系统规范的污染源排放信息已成为目前我国大气污染研究和控制决策的瓶颈环节之一，在这一领域亟需技术和标准上的突破和创新。

针对上述问题，在 863 计划“区域大气污染源识别与动态源清单技术及应用”课题(No.2006AA06A305)的支持下，建立了基于技术的动态源清单编制技术，覆盖电力、供热、工业、民用、交通、农业等主要人为源，并涵盖一次颗粒物(包括 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、BC、OC)和主要气态污染物(包括 SO_2 、 NO_x 、NMVOCs、CO、 NH_3)。动态源清单技术基于完整的源分类体系建立能源统计到源分类的映射关系和生产工艺/污染控制技术的动态更替曲线，充分考虑了技术演进对排放量变化的影响，全面构建了反映我国复杂排放源特征和排放变化趋势的大气污染物排放定量方法。

基于开发的动态源清单技术，进一步建立了多尺度大气污染源动态排放信息平台，包括自主开发的动态数据库技术、排放数据库与模型的接口技术，提供适于主流空气质量模型、工程化决策模型和预测预警模型的源清单。动态排放信息平台基于 Java 操作平台开发，通过建立统一的元数据集，对元数据和数据进行分开管理，并利用 MySQL 数据库系统对核心数据进行管理和操作。该系统将输入参数，包括：排放源活动水平(A)、技术分布(X)、无控排放因子(EF)、各种控制技术应用比例(η)、各种控制技术去除效率(C)等，储存在数据库中供 Java 平台维护和调用。建立的动态排放信息平台具有快速响应性和良好的可扩展性，以及用户友好的参数配置界面。



(a) 离线数据库 (b) 在线数据库

图 7-34 多尺度大气污染源动态排放信息平台界面示意图

典型案例

案例名称

中国多尺度排放清单模型(Multi-resolution Emission Inventory for China)

项目概况

中国多尺度排放清单模型在国家 863 重大项目(No. 2006AA06A305)支持下自主开发,旨在为各类大气化学模式和气候模式提供高精度的排放数据。2011 年 10 月,基于 Excel 的离线数据库编制完成;2012 年 2 月,数据库移植到 Java 平台;2012 年 8 月,数据库上线试运行;2012 年 10 月,数据库开放注册,为用户提供下载服务。

主要工艺原理

中国多尺度排放清单模型充分利用了 863 计划项目的研发成果,其采用的主要技术原理如下:

(1) 中国大气排放源分类编码

针对大气污染物产生机理与排放特征,将我国大气排放源分为六大类,分别为电力、供热、工业、民用、交通和农业。每一类下的排放源按行业、燃料/产品、工艺技术和污染控制技术分为四级,进行四级编码。

(2) 污染源活动水平参数采集

在第四级源分类层面收集获取各种排放源的活动水平。排放源活动水平数据一般通过年鉴、行业协会、环境统计等统计资料获取,部分缺失参数通过调查获得。

(3) 排放因子数据库

排放因子数据优先选取国内的排放因子测试结果。当国内测试数据缺失时,选取美国 AP-42 排放因子数据库和欧洲 EMEP/CORINAIR 排放数据库中相近工艺与污染控制技术的排放因子。

(4) 网格化清单技术

构建了包括空间、时间和化学物种分配等功能的网格化排放清单技术方法。空间分配基于设备点位信息、交通流数据、人口分布数据等将排放空间分辨率由过去的 1 度提高到 1~10 公里;时间分配基于逐月发电量、燃料消耗量、工业品产量信息将排放时间分辨率由过去的年提高到月;化学物种分配基于 VOC 排放-源特征谱-化学机制之间的映射关系,计算出 500 多个 VOC 物种,可以满足国际上 6 种主要大气化学模型机制,实现了与模式的无缝链接。

关键技术或设计创新特色

- 建立了基于统一方法学和数据来源的中国区域尺度人为源排放清单模型;
- 基于 Java 操作平台实现了海量数据的有序管理,具有良好的可扩展性;
- 实现中国区域排放清单与气候及空气质量模式无缝链接,提供全国、区域、城市三重嵌套的高分辨率排放数据。

主要技术指标

目前数据库包括 1990-2010 年 SO₂、NO_x、CO、NMVOC、NH₃、CO₂、PM_{2.5}、PM_{coarse}、BC 和 OC 等 10 种污染物的人为源排放数据。数据库提供 0.25 度、0.5 度和 1 度等多种分辨率的逐月排放数据，提供对 SAPRC99、CB05、RADM2 等多种大气化学模型机制的支持。

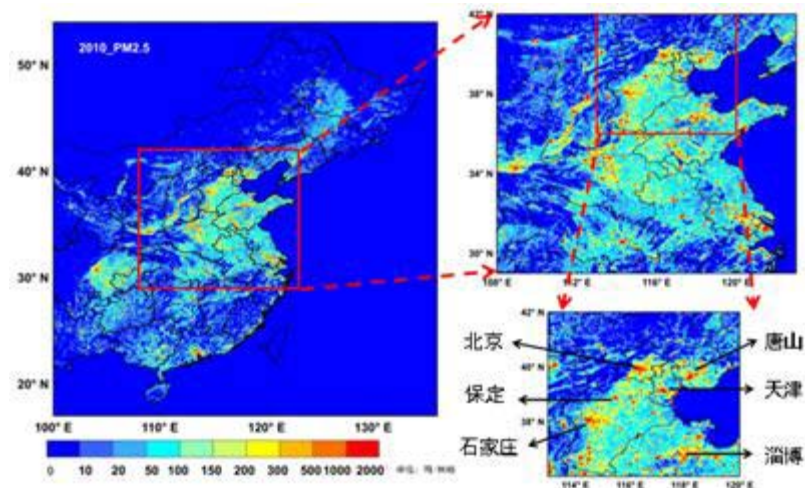


图 7-35 全国、区域、城市三重嵌套的高分辨率排放清单数据产品

投资及运行效益分析

投资费用

本项目总投资约 200 万元。

运行效益

本项目的效益体现在为污染控制政策的规划和评估提供技术支持，具有重大的社会效益和经济效益。

用户意见

清单产品被国内外 90 多家机构采用，包括政府部门、科研机构、高校院所等，广泛应用于污染特征模拟、污染源解析和控制规划评估等。用户均给出了很高评价。



图 7-36 清单产品用户分布

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学环境学院大气污染控制教研所

联系人：贺克斌

地址：北京清华大学环境学院

邮政编码：100084

电话：010-62781889

E-mail: hekb@tsinghua.edu.cn

81. 区域敏感源筛选识别技术

在前期承担科技部 973 计划课题“城市生命体能源代谢与大气污染互动机理研究”（课题编号：2005CB724201）、北京市科委绿色奥运重大项目“区域源排放清单及校验”（课题编号：HB200504-3）、863 计划课题“城市群大气复合污染关键污染物的来源识别技术”（课题编号：2006AA06A305）等支持下，采用气象流场诊断分析与环境数值模拟相结合的方法，在区域污染诊断识别、敏感源筛选等方面取得新突破。开发了气象-轨迹耦合模式（MM5-HYSPLIT）与 K 均值聚类相结合的污染物输送轨迹聚类分析技术，可确定影响目标城市空气质量的污染物输送路径及出现频率。基于 MM5-CAMQ 耦合模式系统建立了污染物输送通道通量梯度识别技术，可确定区域典型污染输送通道最易出现的方位、时段，对输送通道进行自动识别并实现输送通道的三维立体输出。轨迹聚类分析和通量识别结果可作为区域敏感源的定性识别依据。在定性分析的基础上，创建了基于 MM5-CAMx-PSAT 耦合模式系统的敏感源筛选新技术，可同步模拟分析不同地区不同排放源对目标区域污染物浓度的贡献，从半定量的角度识别对目标区域空气质量影响较大的敏感区域和敏感源，最终建立起区域敏感源筛选识别体系。敏感源筛选识别结果可以为区域大气污染优化控制方案的制定提供科学依据，对区域空气质量持续改善具有重要意义。

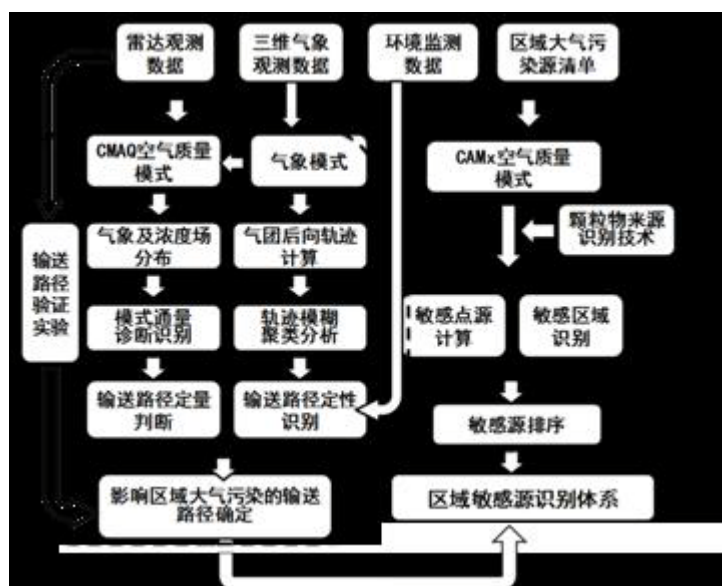


图 7-37 区域敏感源筛选识别技术路线图

典型案例

案例名称

城市群大气复合污染关键污染物的来源识别技术

项目概况

本项目来源于 863 项目子课题“城市群大气复合污染关键污染物的来源识别技术”（课题编号：2006AA06A305）。该课题于 2006 年 12 月启动，2012 年 5 月结题。本课题建立了基于轨迹聚类分析和通量诊断识别的区域污染物输送特征诊断识别技术，创建了基于 MM5-CAMx-PSAT 耦合模式系统的敏感源筛选新技术，并在珠三角地区进行了示范应用。

主要工艺原理

收集了技术示范区域珠江三角洲地区的污染源排放清单、常规气象站及自动监测站数据、空气质量监测数据等，用于模型模拟、验证及敏感源筛选识别。利用 MM5 气象模式为气流轨迹计算和空气质量模式提供气象背景场；运用轨迹模型进行轨迹计算，基于 K 均值聚类方法进行轨迹聚类分析，定性识别污染物输送路径，结合广州的空气质量监测数据，确定影响广州市空气质量的输送路径（如图 7-43）；利用 MM5-CMAQ 耦合模型模拟结果为输送路径的通量梯度诊断识别提供气象和浓度背景场，识别结果用于进行输送路径的三维分布判断（如图 7-44）；由轨迹聚类分析和通量诊断识别结果确定污染物输送路径，为区域污染物输送特征分析及敏感区域识别提供定性判断依据。基于 MM5-CAMx-PSAT 耦合模式系统，从半定量的角度识别出对广州市空气质量影响较大的敏感区域与敏感源，最终建立起区域敏感源识别体系，为珠三角区域大气污染优化控制方案的制定提供决策依据。

关键技术或设计创新特色

- 开发了气象-轨迹耦合模式（MM5-HYSPLIT）与 K 均值聚类相结合的污染物输送轨迹聚类分析技术，可确定影响目标城市空气质量的污染物输送路径及出现频率；
- 建立了污染物输送通道通量梯度识别技术，并完成了相应模块开发，可对污染物输送通道进行自动识别并实现输送通道的三维立体输出；
- 基于轨迹聚类分析和模式通量梯度识别结果，实现敏感区域的定性识别；
- 研究建立基于 MM5-CAMx-PSAT 耦合模式系统的敏感源筛选新技术，避免了传统方法未考虑大气环境系统非线性的缺陷，同时提高了模拟运算效率，实现敏感区域与敏感源的半定量评价，为区域敏感源筛选识别技术研究提供了重要技术保证。

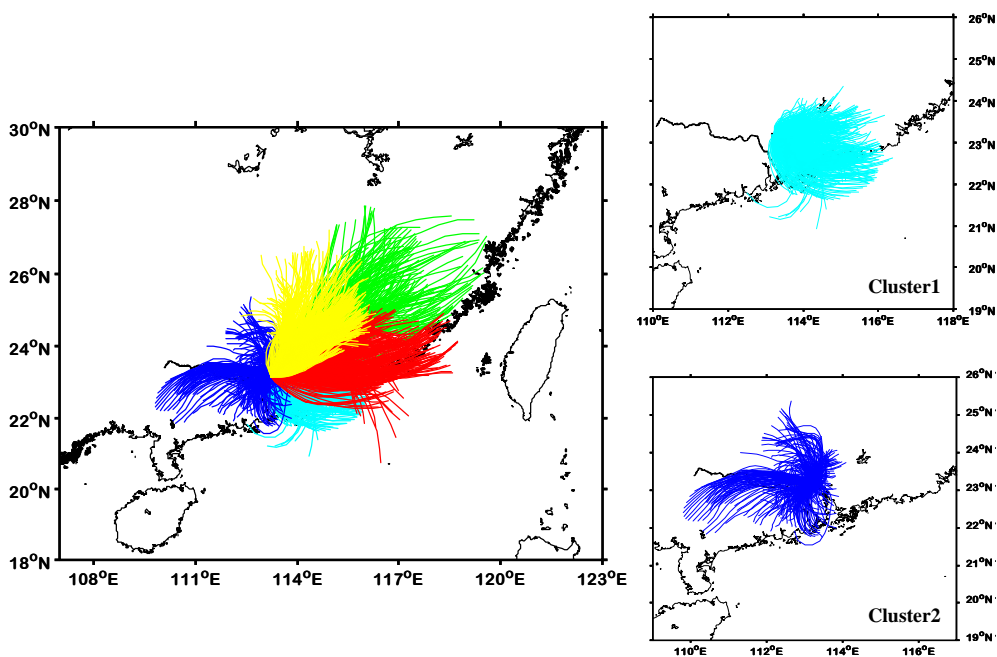


图 7-38 影响广州市的 5 类输送轨迹 (2006 年 9~11 月)
 (青色, Cluster1; 蓝色, Cluster2; 绿色, Cluster3; 红色, Cluster4; 黄色, Cluster5). 右上图为 cluster1 的所有轨迹; 右下图为 cluster2 的所有轨迹。

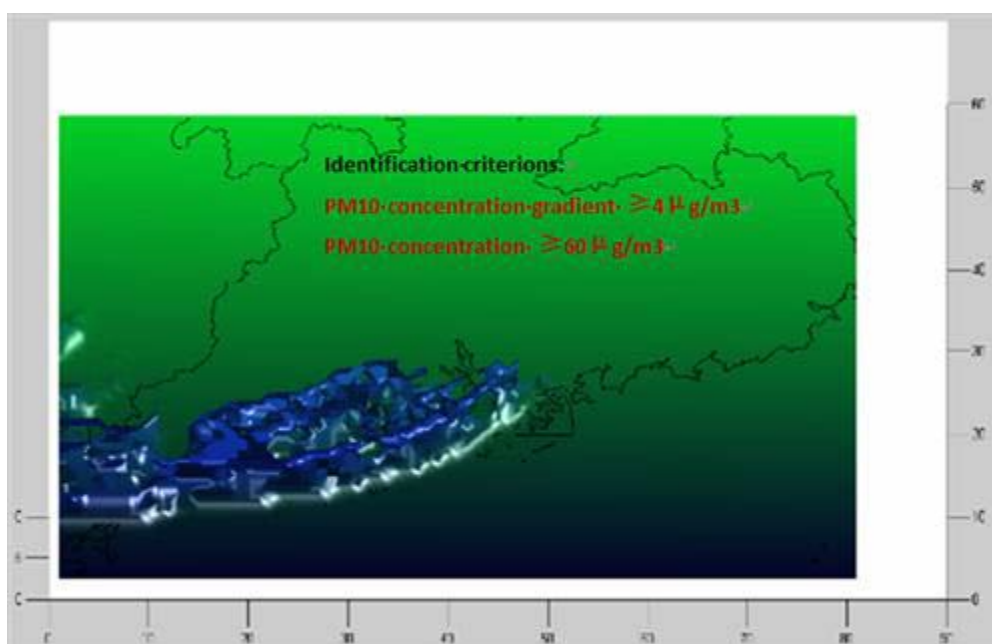


图 7-39 珠江三角洲地区的输送通道识别结果

主要技术指标

- (1) 可有效识别区域污染物的传输规律和特征，确定影响典型城市的污染物输送路径，为深入了解区域污染成因提供科学依据。
- (2) 可确定影响目标区域的典型输送通道空间分布和持续时间，实现了输送通道的自动识别与三维立体输出。
- (3) 实现对目标区域影响较大的敏感区域与敏感源定性的半定量评价。

投资及运行效益分析

目前该技术已在北京、唐山、广州等多个地区进行了示范应用，并计划在全国其他城市进行进一步推广。

用户意见

目前已示范应用的多个地方环保局和相关科研机构均对上述开发的技术予以了高度评价，该技术在北京市的研究结果已被成功应用在《北京市清洁空气行动计划》实施过程中，为政府决策提供了技术支撑。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京工业大学环境与能源工程学院

联系人：程水源

地址：北京市朝阳区平乐园 100 号

邮政编码：100124

电话：010- 67391656

E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

82.空气质量多模式集成预报系统

近年来，在国家科技部、环保部等有关部门在政策、项目和资金的大力支持下，特别是“十一五”以来，在国家 863 计划重大项目“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”资助下，我国在自主模式研发、大气化学资料同化技术、模式共性技术等多方面取得突破，率先构建了国际上首个空气质量多模式集成业务预报系统。该系统以自主研发的嵌套网格空气质量预报模式 NAQPMS 为核心，集成最优插值及集合卡尔曼滤波等大气化学资料同化技术、大气复合污染化学反应模拟技术、污染源识别与追踪等多项共性技术，结合美国的 CMAQ 和 CAMx 模式，构建了适合我国的区域大气复合污染多模式集成预报系统。在实时预报中，除采用算数平均集成各单模式结果外，还采用了权重平均、多元线性回归、BP 神经网络等方法，以有效集成各单模式结果，获得最优的实时预报效果。空气质量多模式集成预报系统在国家大型活动（2008 年北京奥运会、2010 年上海世界博览会、2010 年广州亚运会等）空气质量保障方案制定及空气质量预报预警中发挥了重要作用，取得了良好的经济和社会效益。同时，该系统已在北京、上海、广州、苏州等城市实现业务化运行，服务于城市的空气质量预报。

该系统可提供 3 天短期气象要素和空气质量的精细预报和 7 天的趋势预报，短期预报的不确定性小于 30%；系统可长时间稳定运行，预报时效小于 8 小时，自动化率 100%。该系统可适用于区域、城市空气质量的模拟、预报和预警。

该系统整个投资为 1200 万元，年运行、维护和软件升级成本为 80 万。

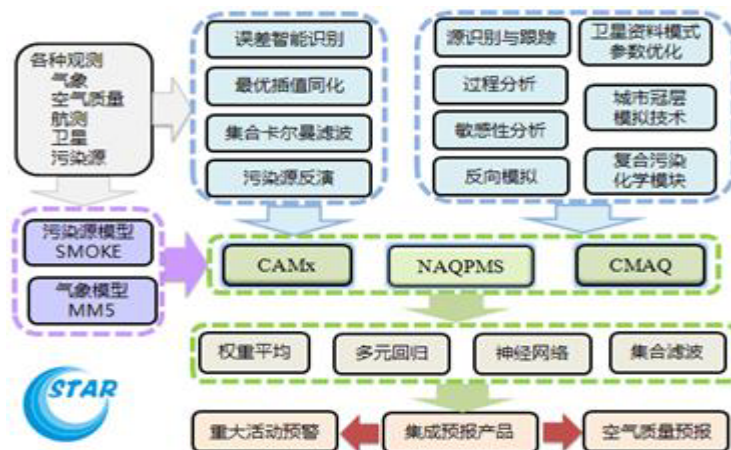


图 7-40 空气质量多模式集成预报技术体系

典型案例

项目名称

2010 年第 16 届亚运会空气质量保障与环境质量评估

项目概况

本项目于 2010 年 6 月开始系统安装、调试。2010 年 8 月，系统开始试运行。2010 年 10~12 月，系统稳定服务于广州市环境监测站的空气质量预报预警工作。2011 年 4 月，项目顺利完成验收。

主要原理

珠三角空气质量多模式集成预报系统的构建充分利用了 863 计划项目的研发成果，其采用的技术和包含的模块如下：

- 1) 中尺度气象预报模式 MM5，提供气象要素预测；
- 2) 污染物排放源处理模式 SMOKE，为空气质量模式提供精细化的本地排放源；
- 3) 区域空气质量模式，包括自主研发的 NAQPMS 模式和美国的 CMAQ、CAMx 模式，提供区域、城市污染物三维时空分布；
- 4) 为提高模式预报的准确性，系统实时引进观测数据，耦合大气化学资料同化技术、污染源反演技术、预报偏差订正技术；
- 5) 系统集成污染来源识别与追踪技术，预测、量化污染物来源，为应急控制措施的实施提供科学依据。

关键技术或设计创新特色

- 大气化学资料同化技术，改进模式初值场从而提高预报准确性；
- 污染源反演技术，有效降低污染排放清单的不确定性；
- 污染来源识别与追踪技术，可有效优化城市污染控制策略；
- 多模式多方法集成预报预警，有效提高预报准确率，降低应急污染防控决策风险；
- 模式高性能并行和自动化运行技术，满足预报时效性，减小预报员负担。

主要技术指标

根据项目验收报告，建立的珠三角空气质量多模式集成预报系统在 2010 年亚运会前后稳定运行，故障率为零，自动化率为 100%。事后评估表明系统较好地预测了亚运期间珠三角特别是广州市的气象和污染物浓度时空变化。

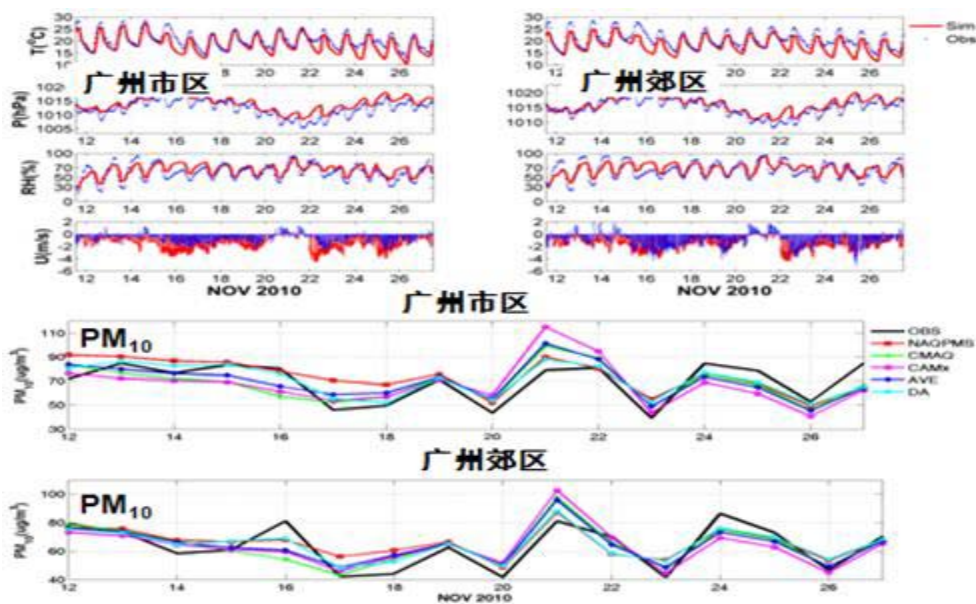


图 7-41 亚运会期间多模式集成预报系统的气象和污染预报效果

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 1200 万元。

运行费用

根据设备功耗情况，电、管理等运行费用约为 30 万元/年，年保修、维修费用约 50 万元。

该项目的经济效益包括政治效益和调控效益。政治效益是通过对外发布满足公众的知情；调控效益为通过预测未来 7 天的污染形势，为污染控制和污染原因分析提供定量数据，保障重大任务的顺利完成，为重污染事件防治提供预警。

用户意见

本项目建构的广东省珠江三角洲空气质量多模式集成预报系统 (EMS-PRD) “具备对污染过程和来源进行跟踪分析及识别的功能”，在 2010 年广州亚运会期间，“应用该系统有效地预报和监控了珠三角地区及主要亚运场馆、运动员村的空气质量状况和演变趋势，该系统为第十六届广州亚运会空气质量保障工作取得圆满成功发挥了关键性作用”。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院大气物理研究所

联系人：王自发

地址：中国北京市朝阳区德胜门外祁家豁子华严里 40 号

邮政编码：100029

电话：010-82995107

E-mail: zifawang@mail.iap.ac.cn

83.城市机动车排放控制决策评估技术

机动车排放因子模型一直是国内外许多城市机动车污染控制决策的基础。在 863 计划课题（2009AA06Z304）和多个城市（例如北京、澳门等）环保局科研课题的支撑下，开发了适用于中国城市特点的机动车排放因子模型。机动车排放因子模型数据主要来自于基于车载排放测试技术的城市实际道路排放测试数据，包括轻型车车载测试和重型车车载测试；以及摩托车的道路遥测数据。但是考虑到测试的样本数今后还需进一步的扩充，在现有较为有限的测试数据基础上，本研究还综合了近年来国内外其他的机动车排放测试成果。在调研城市实际运行工况的基础上，建立机动车微观工况划分方式，分析逐秒的排放和工况数据，从而获取各个技术类型的机动车排放速率曲线。在调研城市各典型道路的微观工况分布的基础上，通过各道路典型工况分布和排放速率曲线，计算各种工况下的排放因子。此外，通过车载排放测试数据和其他研究项目积累数据，建立包括速度修正、负载修正、燃料修正、空调修正等修正参数库。

在此基础上，将机动车排放量化与 GIS 技术相结合，可实现路网机动车排放污染的地图化显示和空间分析评价，为进一步准确量化机动车排放控制的效果提供了可视化的评估平台。本研究采用 ArcGIS 开发模型作为 GIS 分析工具，通过完善路网空间属性数据库，对典型城市区域骨架路网的空间特征进行定量，并结合交通车流数据，分配区域路网的交通流分布，集成机动车排放因子模型的关键输出，获得路网的机动车污染物排放的时空分布特征。在此基础上开发了典型城市机动车排放综合控制决策平台，并在澳门等城市进行了示范应用。该平台可准确、动态和定量显示城市交通流以及路网排放的时空分布特征，为空气质量管理 and 机动车综合控制决策提供直接数据支持，是今后中国城市机动车排放控制科学决策的基础平台。



图 7-42 城市机动车排放因子模型和城市机动车排放综合控制决策平台界面示意图

典型案例

案例名称

澳门机动车排放因子模型和澳门机动车排放综合控制决策平台

项目概况

本项目是国家科技部和澳门政府合作备忘录框架下的共同支持项目，属国家 863 计划课题（编号 2009AA06Z304）。本项目于 2009 年 7 月启动，2011 年 12 月结题。

本项目研究澳门机动车排放特征，建立澳门机动车信息数据库、机动车排放因子模型和排放清单；研究开发适合澳门在用车的控制技术并对其进行示范，在此基础上提出控制技术在澳门车队推广的实施方案；发展基于多模型/数据库耦合的机动车污染控制综合决策支持技术，提出澳门机动车排放控制的系统方案和政策建议。

主要工艺原理

通过大规模的实地调研建立了澳门机动车的分车型保有构成、控制技术组成、车辆活动水平等机动车基础信息数据库。在此基础上，采用先进的车载排放测试系统，选择澳门具有代表意义的典型车型（包括轻型汽油车、柴油出租车、巴士和中重型货车）进行道路车载测试，并针对澳门环保局进行的大规模遥感测试数据进行系统分析，获得了澳门各类车型机动车排放因子第一手的基础数据。在此基础上，本研究开发了基于图形用户界面的澳门机动车排放因子模型（V1.0）。澳门机动车排放因子模型是本项目的重要研究成果，该模型的应用是今后建立高分辨率澳门机动车排放清单、机动车排放污染空气质量模拟、机动车排放对人体健康影响评估和澳门机动车排放控制决策的基础。

将机动车排放量化与 GIS 技术相结合，能够非常方便的实现路网机动车排放污染的地图化显示和空间分析评价，为进一步准确量化机动车排放控制的效果提供了可视化的评估平台。本研究采用 ArcGIS 开发模型作为 GIS 分析工具，通过完善路网空间属性数据库，对区域骨架路网的空间特征进行定量，并结合交通车流数据，分配区域路网的交通流分布，集成机动车排放因子模型的关键输出，获得路网的机动车污染物排放的时空分布特征。在此基础上开发了澳门机动车排放综合控制决策平台。该平台可准确、动态和定量显示澳门交通流以及路网排放的时空分布特征，为空气质量管理 and 机动车综合控制决策提供直接数据支持。

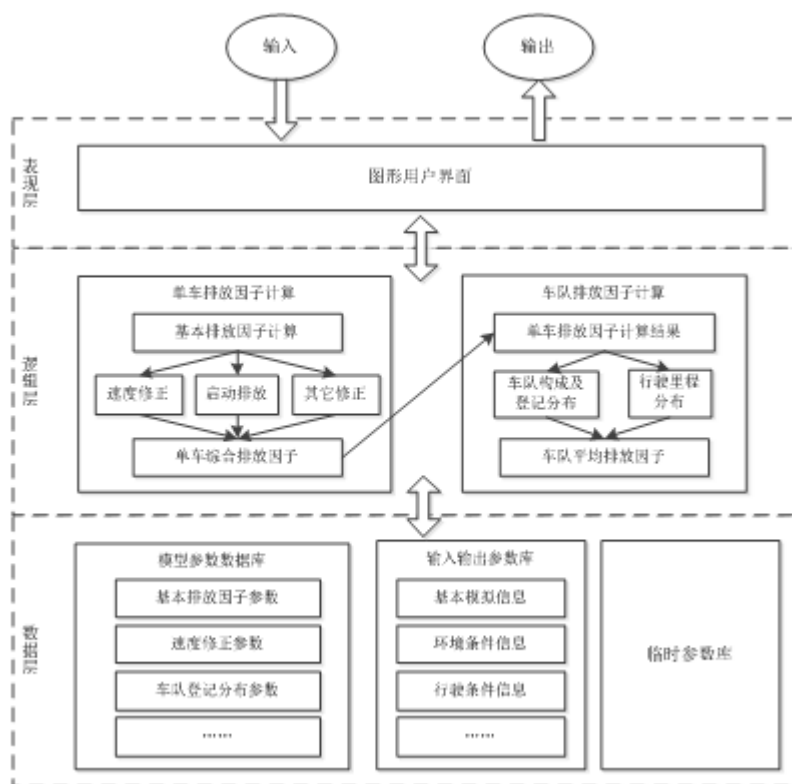


图 7-43 澳门机动车排放因子模型结构图



图 7-44 澳门机动车排放综合控制决策平台原理图

关键技术或设计创新特色

- 集成了适于中国机动车排放特点的排放因子数据库，该数据库包括了目前中国不同控制技术、不同车型的大量的机动车测试数据；
- 排放模型系统技术实现架构采用.NET 业界主流的实现技术；利用先进的EAI 技术实现界面集成、用户集成、数据集成、流程集成。框架技术基于.net framework 2.0 和.net framework 4.0，运用 WPF 技术，全面提升了操作界面的友好性；

- 集成了多模型和多数据库的城市机动车排放综合控制决策平台，可获得详细城市路网的机动车污染物排放的时空分布特征。该平台可准确、动态和定量显示澳门交通流以及路网排放的时空分布特征，为澳门空气质量管理 and 机动车综合控制决策提供直接数据支持。



图7-45城市机动车排放因子模型和城市机动车排放综合控制决策平台界面示意图

主要技术指标

- (1) 可模拟不同车型、不同道路运行工况特征、不同燃料、不同控制技术的机动车空气污染物的排放因子；
- (2) 可显示城市任一重要道路和整体路网的交通流信息及污染物排放信息；
- (3) 可以通过图形用户界面更准确、动态和实时的反映和展示各类机动车排放控制措施实施的效果。

投资及运行效益分析

课题开发的机动车排放因子模型和机动车排放综合控制决策平台两项模型采用当前最先进的软件编程技术和数据库技术，软件图形用户界面友好。是相关政府部门管理人员和相关学术机构研究人员用于城市机动车排放决策的重要工具，在我国其他城市机动车控制中用非常广阔的应用前景。目前课题组开发的相关模型在北京、广州、澳门、南京等大城市进行了示范应用，效果非常好，并计划在西宁、乌鲁木齐、大连等其他城市进行进一步的推广。

用户意见

目前正在示范应用的多个地方环保局和相关科研机构均对上述开发的模型技术予以了极高的评价，在澳门等地还成为了官方使用的模型。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：清华大学

联系人：吴焯

地址：清华大学环境节能楼

邮政编码：100084

电话：010-62796947

E-mail: ywu@mail.tsinghua.edu.cn

84.多源卫星遥感大气污染综合监测技术

在国家科技部、环保部等有关部门的大力支持下，特别是“十一五”以来，在 863 计划重大项目“重点城市群大气复合污染综合防治技术与集成示范”资助下，我国自主研发创建了环境空气质量多源卫星遥感模型与算法，突破了我国重污染环境卫星遥感反演雾霾、气溶胶、可吸入颗粒物、污染气体和温室气体等环境空气质量参数的核心技术，建立了环境空气质量卫星遥感监测技术体系，在国际上首次建立了基于多源卫星数据的环境空气质量卫星监测业务系统，形成了针对国内外主流卫星的气溶胶、灰霾、PM_{2.5}、NO₂、SO₂等 46 种国家急需的遥感产品快速生产能力，创建了环境空气质量卫星遥感监测技术规范，发展了“多星接收-定量反演-专题制作-简报分析”大气环境卫星监测业务化技术体系，填补了我国在大气环境卫星遥感监测领域的空白。

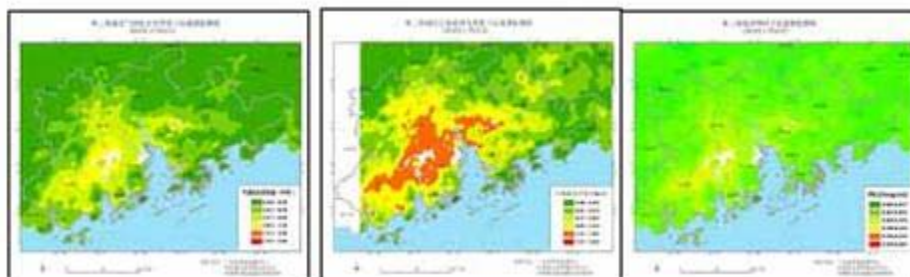
典型案例

项目名称

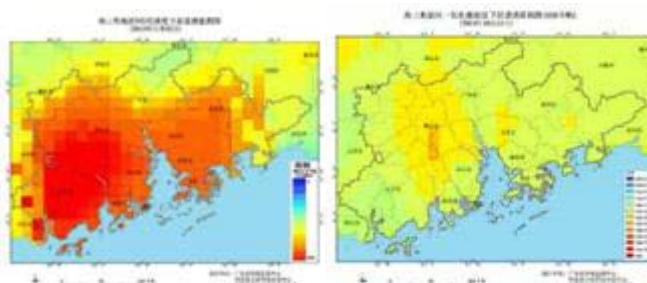
珠三角地区多源卫星遥感大气污染综合监测系统

项目概况

本项目得到了 863 计划及广东省相关项目的支持。



(a) 气溶胶光学厚度 (b) 地面消光系数 (c) PM_{10} 浓度



(d) NO_2 浓度 (e) CO 浓度

图 7-46 珠三角遥感监测系统图

主要原理

珠三角地区多源卫星遥感大气污染综合监测系统利用 863 项目中的技术成果，主要包括以下技术和运行模块：1) 生物质等秸秆焚烧监测；2) 沙尘污染监测；3) 灰霾分布与光学厚度反演，应用于颗粒物污染的总体监测；4) 近地面颗粒物 ($PM_{2.5}$ 和 PM_{10}) 浓度监测，提供区域尺度的近地面颗粒物浓度分布；5) 污染气体 NO_2 和 SO_2 的监测，用于区域汽车尾气和工业排放源的空间监测；6) 温室气体 CO 和 CH_4 等的红外反演算法，用于人为排放的区域尺度监测；7) 空间制图和分析模块，可由于不同大气污染物的专题图制作和空间分析。

关键技术或设计创新特色

- 可快速提供整个区域污染分布情况，用于支持排放源、污染分布和传输监测。
- 解决了国外气溶胶数据分辨率粗的问题，使卫星数据适用于城市空气质量监测。
- 改进了污染气体差分反演算法的精度和计算效率。
- 实现了近地面颗粒物卫星监测，可提供区域颗粒物污染的时空分布信息。
- 设计了反演计算和专题制图等不同模块，自动化和业务化程度较高。

主要技术指标

本技术可提供灰霾和晴空空气溶胶光学厚度， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 CH_4 的分子柱浓度等参数的空间分布。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 600 万元。

运行费用

根据设备功耗情况，电、管理等运行费用约为 50 万元/年，年保修、维修费用约 50 万元。

用户意见

广东环境监测中心和环保部环境卫星中心等环保部门已将本项目中的大气遥感监测系统作为区域污染监测的基本手段。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：中国科学院遥感与数字地球研究所

联系人：陈良富

地址：北京市朝阳区大屯路甲 20 北

邮政编码：100101

电话：010- 64836589/13501247025

E-mail: Lfchen@irsa.ac.cn/Lfchen@radi.ac.cn

85.环境空气监测代表性的印痕分析技术

印痕分析技术为环境监测结果提供详细的时空代表性信息，为监测站网优化、污染来源分析、源反演、观测实验设计等提供技术手段。在科技部 863 计划课题（2006AA06A306）和北京等城市环保局科研课题的支撑下，开发了实用的印痕分析模型。

所谓印痕(footprint)或印痕函数是将湍流观测信息与造成该观测结果的地表“源”或强迫(forcing)项相联系的一个传导函数。印痕分析的要点是将浓度观测等受体信息与造成该浓度的源区域联系起来。因此借助于印痕函数就可以定性或定量地分析观测信息与地面状况的关系。印痕分析方法在发展的初期（20 世纪 90 年代）大多关心的是微尺度的过程，特别是通量观测的区域代表性问题。后续研究发现浓度观测的印痕分布甚至可以达到数百公里的范围，这对区域大气环境过程的深入分析十分有益。印痕分析技术的开发适应了这方面的应用需求。研究还发现可以将以前只注重于地表影响的二维印痕分析推广到三维空间，从而为污染输送的空间通道诊断和来源识别等提供定量分析技术。

该技术由两个主要部分组成，分别为拉格朗日粒子扩散模拟方法和印痕分析方法。其中实现粒子扩散的时间反向模拟是三维印痕技术的关键。该项技术的主要应用方法为，充分利用观测资料 and 现代气象模式为粒子扩散模拟提供边界层风和湍流资料背景场；运用自主开发的拉格朗日粒子模式进行反向扩散模拟；使用后处理模式统计分析印痕分布及与监测浓度的相关性，定性分析区域污染物来源分布。成果可为区域污染来源的动态分析判断提供技术支撑。

大气污染印痕分析技术可有效识别区域污染物的来源特征，为深入了解区域污染成因和污染控制决策提供科学依据。目前分别以珠三角（广州）地区、北京、宁波和无锡等地为研究目标区域，利用该技术建立了系统的印痕分析方法，识别了影响典型城市和区域的污染物来源分布。对认识当地的污染输送性质、环境监测站点优化、工业区规划布局等起到参考作用。该技术还实际应用于广州亚运会的大气环境保障工作。对该技术关键模块的开发已形成计算机软件著作权。技术方法已系统化并可应用于其他区域的大气污染印痕分析。

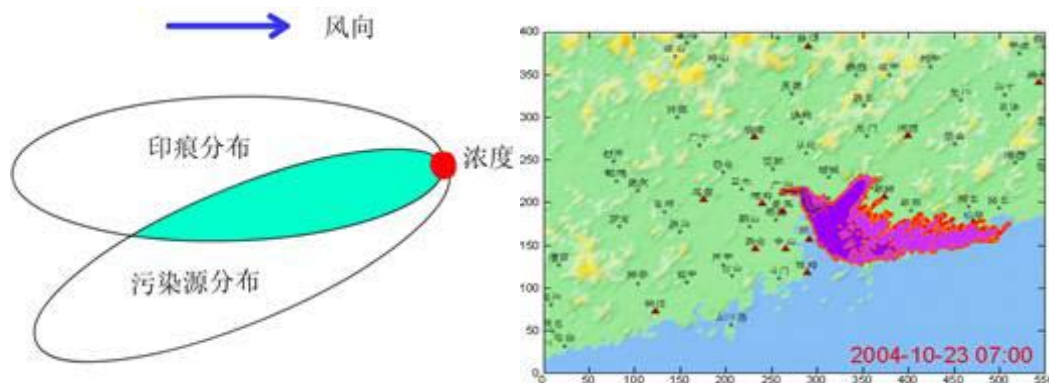


图 7-47 污染源、印痕分布和实际污染浓度关系示意（左）及单个时刻的印痕分布（右）

典型案例

项目名称

珠江三角洲区域大气复合污染监测代表性分析

项目概况

本项目得到 863 计划课题（编号 2006AA06A309、2006AA06A306）的支持。重点研究珠江三角洲区域的环境大气监测情况，分析评估区域大气复合污染状况和特征；评估现有监测站点的空间代表性和功能地位，提出监测网络系统优化方案和新设站点建议。项目于 2006 年启动，2011 年通过验收。

主要原理

以 2006 年为基准分析年，对珠三角 460 余个自动站气象资料进行整理，选出其中 155 个测站以反映整个珠三角的地面观测情况。用这些资料对 2006 年进行逐时的气象场诊断分析。气象场诊断使用 CALMET 模式。当地地形、高空探测资料等也一并进入诊断过程。由 CALMET 模式和参数化方法获得近地面风场、边界层湍流及微气象参数。以这种方法获得全年逐时变化的三维气象参数场。在区域流场分析的基础上，以自主开发的中尺度反向拉格朗日随机粒子扩散模式为核心技术，计算各监测站点逐时次的印痕分布。

印痕计算以 CALMET 诊断模式取得的逐时三维风场序列，以及相应的微气象学参数如摩擦速度、Obukhov 长度和边界层高度等，通过对边界层湍流特征的参数化驱动拉格朗日随机粒子模式进行时间反向扩散计算。对印痕结果的统计分析包括：1) 平均印痕，了解测站周围不同方向和距离的单位排放源对观测浓度的平均贡献率；2) 区域高浓度污染事件的平均印痕分布；3) 单项污染物监测结果的空间代表性。

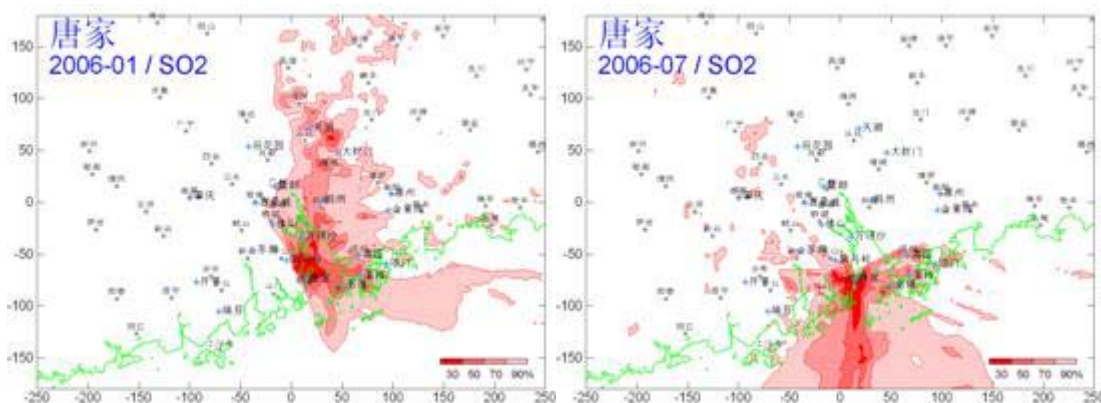


图 7-48 唐家站 1 月和 7 月 SO₂ 浓度监测结果的平均源区

关键技术或设计创新特色

- 拉格朗日随机粒子反向扩散模拟技术，极大提高单站印痕分析效率；
- 基于实际观测的气象场诊断分析，保证大气流动模拟的准确性；
- 时变的气象场与湍流参数化，实现中尺度印痕模拟计算；
- 基于实际监测数据的污染物影响源区域统计分析；
- 不依赖于实际监测资料的印痕统计，分析拟建站点的空间代表性。

主要技术指标

模拟分析了珠三角区域已有主要监测站点和计划新建或调整站点的空间代表性，模拟分析了区域内不同污染物和重污染条件下的源区分布，为该地区环境监测网的布设与优化提供技术支持。

投资及运行效益分析

本课题投资约 40 万元。

用户意见

印痕分析技术对珠三角区域大气环境监测网站的建设完善起到了重要作用，保证了该区域进行的大型研究项目的顺利完成；对宁波地区监测网站的布局完善也起到了重要参考作用。

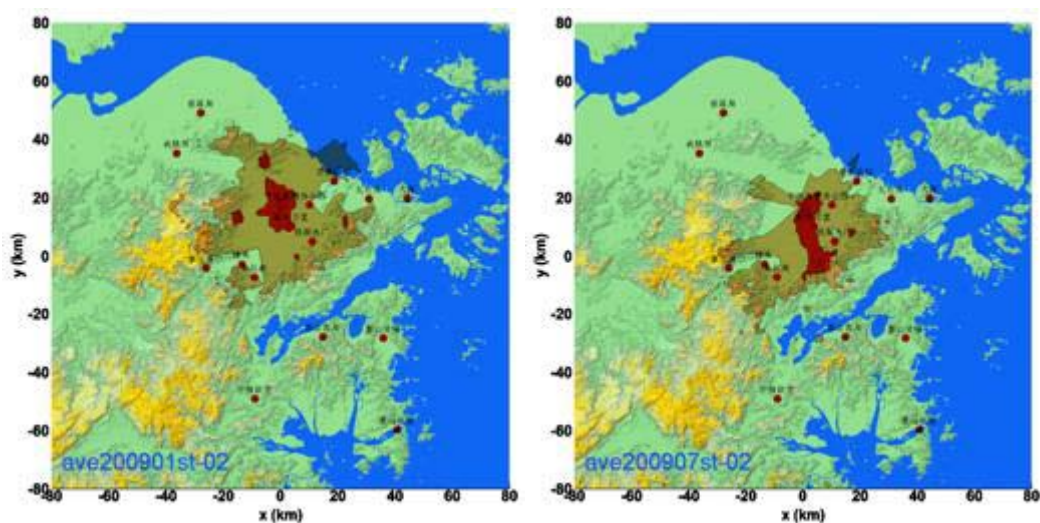


图 7-49 宁波高专监测站冬夏季代表月平均印痕分布

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京大学环境科学与工程学院

联系人：蔡旭辉

地址：北京市海淀区北京大学老地学楼

邮政编码：100871

电话：010- 62751924

E-mail: xhcai@pku.edu.cn

86.大气 PM_{2.5} 水溶性污染组分及其气态前体物在线监测系统

针对我国大气气态有机物监测的关键问题，在 863 计划“大气复合污染关键气态污染物的快速在线监测技术”课题(No.2006AA06A301)的支持下，开发了首套自主知识产权的适合国内环境应用的大气 PM_{2.5} 水溶性污染组分及其气态前体物的在线测量仪器（GAC-IC 系统），自主研发了表面磨砂的旋转环形湿式扩散管和冷凝式旋风撞击的气溶胶捕集装置，在自主开发的软件和硬件的控制下，实现了自动连续观测，数据同步传输等功能，该仪器价格便宜，使用成本低，便于维护。



图 7-50 GAC-IC 系统的软件控制界面及样机图

技术特点

- 连续测量气态 HF、HCl、HONO、HNO₃、SO₂、NH₃ 等和气溶胶中水溶性离子成分 F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等，时间分辨率为 30 分钟；
- 新型湿式环形扩散管具备高捕集效率，对 100ppb 的 SO₂ 的捕集效率在 98% 以上，可长期免维护工作；
- 蒸汽发生装置温度可根据需要调控，自主研发的冷凝式旋风撞击的气溶胶捕集器对气溶胶的捕集效率在 99.5% 以上；
- 摒弃传统光电液面探测器，采用无接触式微压差传感器，系统更加简单并且稳定可靠；
- 采用先进的微量泵代替蠕动泵进行液路传输，大幅减少仪器的维护量，降低运行成本；
- 可根据实验需要，选择只监测气体或气溶胶，可连续无人值守运行 5-7 天，自动出数，数据实时上传；
- 自行设计和编制的运行软件，可完成连续采样，样品自动输送、分析、定量等过程。

性能验证

本系统已有产品化机型，多台在线仪器已经分别在广州亚运会空气质量评估、北京地区大气复合污染研究、京津冀大气污染防治规划以及东亚地区大气污染物跨界输送等项目中进行了示范和应用。

成果转化

本项目自 2013 年开始，正在推进产业化进程。

主要客户

有关科研单位。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京大学环境科学与工程学院

联系人：曾立民

地址：北京市海淀区北京大学老地学楼

邮政编码：100871

电话：010- 62756333

E-mail: lmzeng@pku.edu.cn

87.过氧酰基硝酸酯类（PANs）化合物快速在线监测系统

过氧酰基硝酸酯类化合物（PANs, Peroxyacyl Nitrates）是大气中一类重要的氧化剂，分子式为： $RC(O)OONO_2$ 。PANs 作为光化学烟雾中非常重要的二次污染物，由挥发性有机物（VOCs）和氮氧化物反应生成。PANs 在高温时容易热解，但低温时较稳定，在高空对流层 PANs 能随气流进行远距离迁移，在适当的环境中再热解生成 NO_2 ，作为氮氧化物的存贮库，从而引发光化学反应，参与当地 O_3 的生成，因此 PAN 在对流层化学中扮演着重要的角色。

在 863 计划“大气复合污染关键气态污染物的快速在线监测技术”课题(No.2006AA06A301)的支持下，我国自主设计开发了大气中 PANs 快速在线监测系统。系统中还包括自主设计研发的在线零气生成和在线标定系统，使用一氧化氮与丙酮在线合成标气，取代了以往仪器中使用的液态标气，降低了仪器使用成本，使得该系统更适用于野外观测以及环境监测站长期监测；且系统全部采用模块化设计，利于使用、维护和推广。

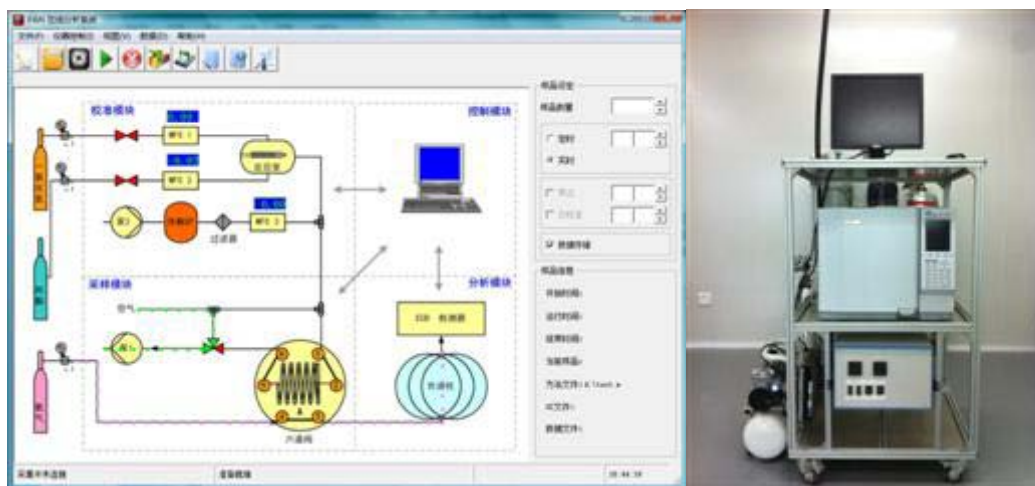


图 7-51 PANs 快速在线监测系统控制界面及样机图

技术特点

- 该系统采用气相色谱法（GC-ECD）检测大气中过氧酰基硝酸酯类化合物 PANs 的一体化在线测量技术及设备。
- 系统采用双气路，一路用于采集样品，一路用于零空气制备，保证采样与标定顺利进行。
- 内置 125℃ 高温热解炉，可使空气中的 PANs 完全热解，产生用于稀释标气的零空气。10 分钟快速加热保证干扰物去除，获得良好制备效果。
- 高效色谱分离柱，一次完成对常见 PANs 的分析。时间分辨率高达 5 分钟，检测线达到 5pptv。
- 自行研制的温度控制系统，实时在线监控色谱柱柱温。
- 自行设计和编制的运行软件，可完成采样、分析、热解和系统标定过程的全程自动化控制。

性能验证

目前，本系统已经有了产品化机型，多台在线仪器已经分别在北京奥运空气质量保障、上海世博会空气质量评估、广州亚运会空气质量评估、北京地区大气复合污染研究等项目中进行了示范和应用。

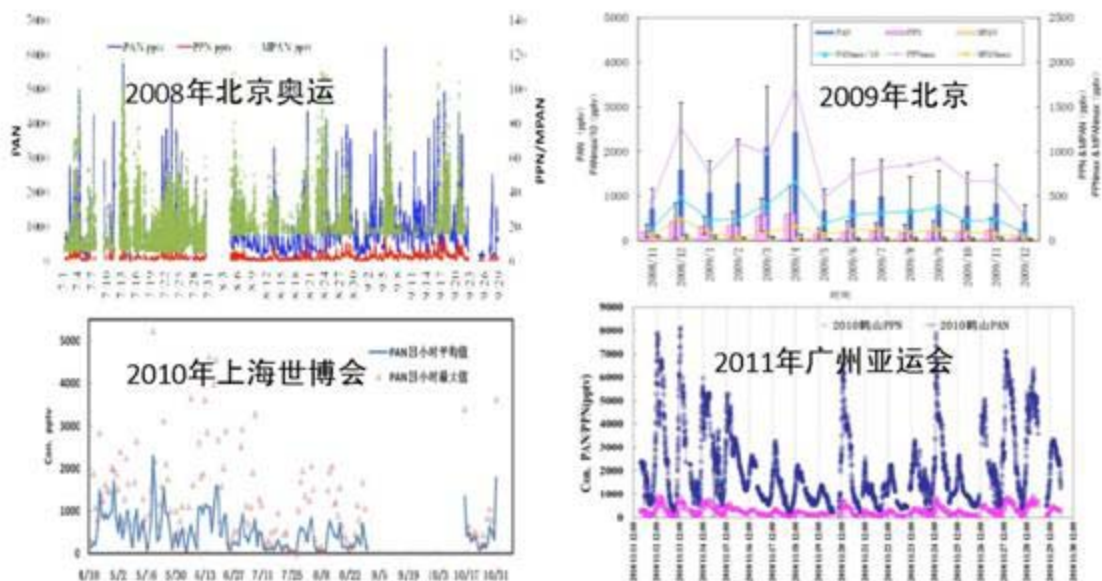


图 7-52 现场观测数据图

成果转化

本项目自 2013 年开始，不断推进其产业化进程。

主要客户

有关科研单位。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：北京大学环境科学与工程学院

联系人：曾立民

地址：北京市海淀区北京大学老地学楼

邮政编码：100871

电话：010- 62756333

E-mail: lmzeng@pku.edu.cn

八、清洁生产关键技术

88.水煤浆代油洁净燃烧技术

水煤浆是 20 世纪 70 年代为解决石油危机而发展和应用的一种代油燃料，目前国内外不少电站锅炉和工业锅炉使用水煤浆作为燃料。其技术原理是把煤磨成细粉与水少量添加剂混合成悬浮状高浓度浆液，像油一样采用全封闭方式输送和储存，用泵输送，并用喷嘴喷入锅炉炉膛雾化燃烧，具有煤炭的物理特性和石油的流动性、稳定性。水煤浆代油洁净燃烧技术不仅具有明显的经济效益，而且对国家能源安全和国民经济的长远发展具有重要意义。

自六五以来，在国家重点攻关项目、国家自然科学基金项目等支持下，我国自主研发了水煤浆清洁代油燃料技术，并在国内外得到推广。该技术获 2009 年国家科学技术进步奖二等奖。该技术可实现 100% 代油，不仅可以采用水制水煤浆，还可采用低热值或具有一定毒性的废水制水煤浆，变费为宝；各种水煤浆燃烧效率均可达到 98% 以上，大型锅炉上燃烧效率达 99% 以上，同时锅炉效率达到煤粉锅炉水平。

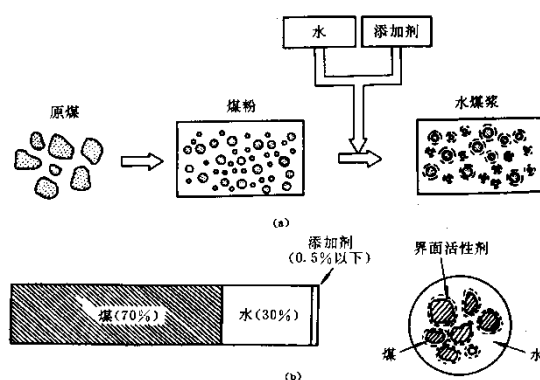


图 8-1 水煤浆制备原理图



图 8-2 水煤浆物理特性

典型案例（一）

案例名称

1×670t/h 水煤浆锅炉新建工程

项目概况

本项目于 2004 年 3 月开始设计，2004 年 7 月开工建设，2005 年 2 月世界首套最大全烧水煤浆锅炉完成 168 试运行至今，实现长期连续运行。

主要工艺原理

本项目 2#炉设计以燃水煤浆为主，并采用烟气再循环作为全烧油的备用方案。为国内首创 670t/h 超高压水煤浆锅炉。锅炉本体呈 II 型布置，水煤浆喷雾悬浮燃烧，采用直流燃烧器正四角布置切向燃烧，烟气挡板调节再热汽温，喷水减温控制过热汽温，回转式空气预热器，刮板式捞渣机连续固态排渣，平衡通风，全钢构架，露天布置。

锅炉炉膛横截面宽深比为 1.1，采用正四角布置直流燃烧器的切圆燃烧方式，并确定采用一次风和二次风双切圆布置，其中一次风和二次风切圆直径分别为 800mm 和 1000mm，且均为逆时针旋转。燃烧器最上层布置了燃尽风（OFA）并采用反切，切圆直径为 800mm；反切目的是强化水煤浆后期燃烧，有利于焦碳的燃尽，同时反切还有利于消除切圆扭转残余，降低炉膛出口烟温偏差。

燃烧器设计既能全烧油，又能全烧浆，也可以油、水煤浆混烧。每角燃烧器沿高度分上、下两组，上组和下组分别布置三层和二层油、水煤浆两用燃烧器（自下而上称 A、B、C、D、E 层）

关键技术或设计创新特色

- 世界最大全烧水煤浆锅炉；
- 采用水煤浆再燃和分级配风技术，将锅炉 NO_x 排放降至 450mg/m³ 以下；
- 采用撞击式多级雾化水煤浆喷嘴，在结构设计上将 Y 型雾化、T 型雾化和撞击雾化有机结合，雾化性能好，单只喷嘴最大容量 8t/h；
- 燃烧器设计可满足全烧水煤浆或全烧重油或油浆混烧工况；
- 可满足锅炉负荷 40%~100% 负荷范围。



图 8-3 案例现场图

主要技术指标

锅炉自 2005 年投运以来，纯烧水煤浆时锅炉效率可达 92.03%，水煤浆燃烧效率达 99.6%。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程投资约 2 亿元。

运行费用

根据 2005 年 2 月-2013 年 2 月实际运行情况，本工程年代油 35 万吨，年节约燃料成本 5.6 亿元。

用户意见

本项目采用水煤浆代油清洁燃烧技术，锅炉燃烧状况良好，燃油、全烧水煤浆都达到了额定出力和预定的设计参数，锅炉效率比设计值分别提高了 1.35%、2.16%。该技术使用情况良好，锅炉运行正常、稳定、可靠。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江百能科技有限公司

联系人：刘茂省

地址：杭州市文三路 478 号华星时代广场 C 座 2 层

邮政编码：310012

电话：0571-89939250-600

E-mail: liums@pyneo.com

典型案例（二）

案例名称

3×150t/h 水煤浆锅炉新建工程

项目概况

本项目于 2007 年 8 月开始设计，2007 年 12 月开工建设，2008 年 2 月首套 150t/h 水煤浆锅炉完成 168 试运行，第二台 150t/h 水煤浆锅炉于 2010 年 4 月完成 168 试运行，第三台 150t/h 水煤浆锅炉于 2012 年 7 月完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目水煤浆锅炉为中温高压、自然循环、平衡通风、固态排渣、室外半露天布置、全钢构架、“Π”型布置汽包水煤浆锅炉。锅炉本体呈 Π 型布置，水煤浆喷雾悬浮燃烧，采用直流燃烧器正四角布置切向燃烧，设计掺烧部分沼气。刮板式捞渣机连续固态排渣，平衡通风，全钢构架，露天布置。采用浙江百能科技有限公司生产的水煤浆低 NO_x 燃烧器，它具有强化着火和稳定燃烧的优点。具体地说，燃烧器为四角直流布置，一次风分三层，二次风分四层，SOFA 分两层。自下而上喷口的布置为二、一、二、一、二、一、二、下 SOFA、上 SOFA。分别称为下二次风、下一次风、中下二次风、中一次风、中上二次风、上一次风、上二次风、下 SOFA、上 SOFA。SOFA 反切，其目的是为了减小炉膛出口烟温偏差，防止过热器局部超温。采用了空气分级燃烧技术，在水平和垂直方向上形成欠氧的燃烧环境，抑制燃烧过程中 NO_x 的形成。两组 SOFA 燃烧器内喷口可以实现上下左右摆动，上下摆动可根据炉内燃烧情况调节 SOFA 喷入炉膛高度，进一步细化控制、抑制氮氧化物的生成；左右摆动可以调节锅炉炉膛出口烟温偏差，也能根据实际情况强化燃烧。

关键技术或设计创新特色

- 采用水煤浆水平和垂直空气分级燃烧技术，将锅炉 NO_x 排放降至 300mg/Nm³ 以下；
- 开发了撞击式多级蒸汽雾化水煤浆喷嘴，在结构设计上将 Y 型雾化、T 型雾化和撞击雾化有机结合，雾化性能好；
- 喷嘴负荷调节范围可满足 50%~110% 额定负荷；
- 燃烧器设计掺烧沼气，充分利用该厂工艺产生废气；
- 可满足锅炉负荷 40%~100% 负荷范围，实现 40% 负荷不投油稳燃。



图 8-4 案例现场图

主要技术指标

锅炉投运后进行了详细热态调试及 168 试运行。从热态试验及 168 试运行结果看锅炉燃烧状况良好，全烧水煤浆和掺烧沼气都达到了额定出力和预定的设计参数，采用垂直及水平空气分级水煤浆燃烧技术后，锅炉 NO_x 排放可降低到 300mg/Nm³ 以下，锅炉效率达 90% 以上，满足长期连续运行的要求。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 2.5 亿元。

运行费用

三台锅炉自投产至今，已累计代油 40 万吨，节约燃料成本 6.4 亿元。

用户意见

本项目采用水煤浆代油清洁燃烧技术，锅炉燃烧状况良好，全烧水煤浆及掺烧沼气都达到了额定出力和预定的设计参数，锅炉 NO_x 排放可降低到 300mg/Nm³ 以下，满足长期连续运行的要求，大大降低了公司燃料成本。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江百能科技有限公司

联系人：刘茂省

地址：杭州市文三路 478 号华星时代广场 C 座 2 层

邮政编码：310012

电话：0571-89939250-600

E-mail: liums@pyneo.com

89. 燃煤电站锅炉多重空气分级低 NO_x 燃烧技术

目前, 国内外控制 NO_x 排放技术大致分为两类: 一类是烟气净化技术, 即把已生成的 NO_x 还原为 N₂, 从而脱除烟气中 NO_x; 另一类是低 NO_x 燃烧技术 (炉内脱氮技术), 即通过运行方式的改进或者对燃烧过程进行控制, 抑制燃烧过程中 NO_x 的生成反应, 从而降低 NO_x 的最终排放量。这些技术可以单独使用, 也可以组合使用, 以达到不同的 NO_x 排放控制要求。

多重空气分级低 NO_x 燃烧技术糅合了高浓淡比可调式煤粉浓淡低 NO_x 燃烧器、偏置周界风、一二次风大小切圆 (二次风偏转径向空气分级燃烧)、主燃区 CCOFA 空气分级技术、全炉膛 SOFA 深度垂直空气分级燃烧等目前世界上成熟的低 NO_x 燃烧技术, 其主要原理在于根据 NO_x 生成的原理, 通过精细化配风设计, 将 NO_x 生成所需的“高温”、“高氧”两个条件错开。控制燃烧前期迅速着火, 并保证着火前期为低氧环境, 有效降低挥发分 NO_x, 将燃烧器区域分为一次燃烧区域和二次燃烧区域, 一次燃烧区域内送入所有燃料和大部分燃烧所需空气 (约 70%~80%), 使得燃料燃烧初期为还原性气氛, 大部分燃料 N 在此区域以 N₂ 形式释放, 其余空气 (约 20%~30%) 在二次燃烧区域送入, 保证燃烧完全。国外从上个世纪 70 年代已经开始采用分级燃烧来降低 NO_x 排放。目前国外的大型电站锅炉通过燃烧一次措施可以很容易地使 NO_x 排放控制在 150~200ppm (折合 307~410mg/Nm³)。而我国在 20 世纪 90 年代后期开始研究低 NO_x 燃烧技术, 随后, 国家科技部、环保部、财政部等有关部门在政策、项目和资金上给予了大力支持, 特别是“十五”、“十一五”以来, 在国家重点基础发展规划项目“973”计划课题 (煤燃烧过程中污染防治的机理, 编号: G1999022204)、国家重点基础发展规划项目“973”计划课题 (煤粉炉再燃区间同时脱硫脱氮机理研究, 编号: G1999022204-03)、国家高技术研究发展计划“863”计划课题 (利用超细煤粉再燃降低煤粉炉 NO_x 排放, 编号: 2002AA527053)、浙江省科技计划重大项目课题 (锅炉多煤种、低负荷浓淡燃烧技术, 编号: 991101040) 等的连续资助下, 我国在降低 NO_x 排放的同时不降低锅炉效率等多方面取得突破, 使燃煤锅炉的 NO_x 控制技术及其产业化取得了重大进展, 如“可调煤粉浓淡低 NO_x 燃烧及低负荷稳燃技术”获 2004 年国家科学技术进步奖二等奖, 提高了低 NO_x 燃烧技术改造工程建设质量和运行管理水平。

该套技术用于烟煤、贫煤、无烟煤、褐煤、水煤浆等多种燃料, 可以达到 40%~80% 的 NO_x 脱除率, 同时保证锅炉高效燃烧, 改善锅炉结焦状况, 提高锅炉煤种适应性和低负荷稳燃性能。单位投资大致为 20~40 元/kW; 无需增加运行成本。该技术成熟、稳定, 适用于燃煤电站锅炉清洁燃烧。

典型案例（一）

案例名称

2×200MW 机组低 NO_x 燃烧器改造工程

项目概况

本项目于 2006 年 1 月开始设计，2006 年 5 月开工建设，2006 年 7 月首套低 NO_x 燃烧器完成 168 试运行，至 2007 年 10 月最后 1 台锅炉低 NO_x 燃烧器完成 168 试运行。

主要工艺原理

本技术沿用原中间仓储式钢球磨煤机制粉系统，温风送粉。把炉膛从下往上依次分为主燃区、再燃区和燃尽区三部分。在主燃区送入 75% 的燃料在过氧条件进行充分燃烧。再燃区将其余的 25% 的煤粉燃料送入，并控制燃料/氧化学当量比小于 1，形成还原性气氛，再燃燃料与主燃烧区生成的 NO_x 进行还原反应，最终生成 N₂。在燃尽区加入其余空气，过量空气系数恢复到正常值 ($\alpha=1.15$ ，氧量 2.7%)，使未完全燃烧产物充分燃烧，以保证燃尽效果。主燃区由下二次风、下一次风、中二次风、上一次风、上二次风和三次风 6 层喷口组成主燃区，通过调整主燃区喷口之间配风，实现分级低氧燃烧。调整现有第三层一次风喷口（即原上一次风喷口）布置高度，拉大上一次风喷口与上面燃尽风喷口之间的距离，使用上一次风喷口作为再燃喷口（下面称为再燃喷口）。保证再燃喷口与燃尽风喷口间的还原性气氛，形成再燃还原区，还原主燃区形成的 NO_x。三次风喷口上沿与再燃喷口下沿间距保持 800mm 以上，为主燃燃料的燃烧提供更多的时间，同时减少三次风射流对再燃射流的影响。采用“煤粉对冲风大小切圆”的炉内空气动力场组织方法。下一次风喷口、中一次风喷口和下二次风对冲布置，再燃喷口中心线均顺时针偏转 2.03°，形成逆时针直径为 500mm 假想切圆。其他喷口中心线均顺时针偏转 3.25°，形成逆时针直径为 800mm 假想切圆。在炉内形成风包粉燃烧，减少煤粉撞到水冷壁上引起结渣，同时实现空气水平分级，减少 NO_x 生成。

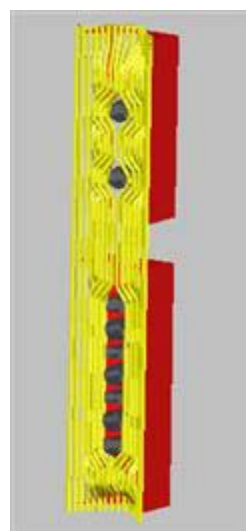
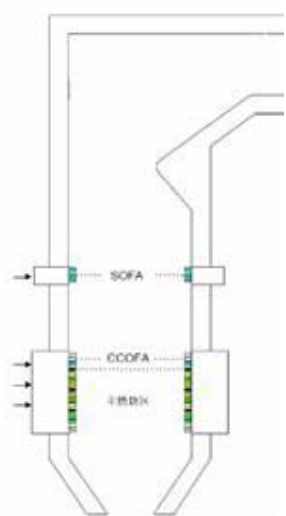


图 8-5 多重空气分级低 NO_x 燃烧技术示意图 图 8-6 多重空气分级低 NO_x 燃烧器

关键技术或设计创新特色

- 采用高浓淡比可调式煤粉浓淡低 NO_x 燃烧器+偏置周界风+二次风偏转水平空气分级燃烧+全炉膛 SOFA 深度垂直空气分级燃烧等多种降 NO_x 技术综合利用，实现精细化空气分级，最大限度挖掘低氮燃烧 NO_x 减排潜力的同时保证燃烧效率不受影响；
- 采用高浓淡比可调式煤粉浓淡低 NO_x 燃烧器+偏置周界风，燃烧器煤种适应范围较改前增大；
- SOFA 设置位置精确定位，有足够的空间让煤粉燃尽+合理的空气动力场布置，保证燃尽效果；
- 采用偏置周界风+二次风偏转水平空气分级燃烧+全炉膛 SOFA 深度垂直空气分级燃烧技术，在炉内形成“风包粉”燃烧模式及降低燃烧器区域壁面热负荷和截面热负荷可以更好的防磨损、结渣和高温腐蚀；
- SOFA 设有水平、垂直摆动机构，变负荷工况下的汽温、NO_x 排放、飞灰含碳量、炉膛出口烟温左右偏差适应性好；
- 新增 SOFA 风门执行机构可自动/手动控制，自动化程度高，可靠性好；
- 改造工作简单易操作，改造范围小、费用省。



图 8-7 案例现场图

主要技术指标

根据项目验收报告，本项目锅炉低 NO_x 燃烧器改造后 NO_x 排放浓度约 247~318mg/Nm³@6%O₂，小于性能保证值 350mg/Nm³；锅炉效率约 91.71~92.78%，高于设计保证值 91.0%(改造前 NO_x 浓度为 >700mg/Nm³)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 3500 万元。

运行费用

根据 2007 年 10 月以来的实际运行情况，低氮燃烧器没有增加运行成本，年减排氮氧化物排放 4276 吨。

用户意见

4 台 HG-410/9.8-YW15 型单汽包自然循环、固态排渣、四角喷燃、高压煤粉

锅炉采用低 NO_x 燃烧技术，锅炉 NO_x 排放量可降至 300mg/Nm³（干基，折算到 6%O₂），脱硝效率超过 50%，改造后的锅炉效率≥92%。该技术使用情况良好，锅炉运行正常、稳定、可靠。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：浙江百能科技有限公司

联系人：刘茂省

地址：杭州市文三路 478 号华星时代广场 C 座 2 层

邮政编码：310012

电话：0571-89939250-600

E-mail: liums@pyneo.com

典型案例（二）

案例名称

330MW 发电机组低氮燃烧器改造工程

项目概况

本项目于 2012 年 7 月开始设计，2012 年 10 月与主机 B 级检修同步开工建设，2103 年 01 月 4#主机同步完成 168 试运行。

主要工艺原理

本项目采用高效低 NO_x 燃烧器+二次可控燃烧组合降 NO_x 技术，主要工艺原理如下：该新型高效低 NO_x 燃烧器+二次可控燃烧组合降 NO_x 技术通过下述手段对 NO_x 排放进行控制，并确保锅炉原有性能，具有巨大的效益。

（1）低 NO_x 燃烧器

采用水平浓淡的低 NO_x 煤粉燃烧器来改造锅炉一次风主燃烧器。在煤粉喷嘴前，通过偏流装置使煤粉浓缩分离成浓淡两股，利用燃料水平分级燃烧原理有效降低着火初期的 NO_x 生成量。喷嘴设扰流钝体，一方面可卷吸高温烟气回流，另一方面使浓相煤粉在绕流时偏离空气，射入高温回流烟气区域，同时强化出口气流着火和燃烧。这样，在燃烧器钝体下游，可形成高浓度煤粉在高温烟气中的浓淡偏差欠氧燃烧，从而有效控制燃烧初期的 NO_x 生成量。喷口周围保留适当喷口面积的周界风，推迟周界风向一次风内的混入，并防止喷口结渣及喷口高温变形或烧坏。

（2）炉内二次可控燃烧系统

将有组织燃烧风量沿炉膛垂直方向分级供入，对主燃区有组织空气量与理论空气量的比值进行调整，同时调整 SOFA 燃尽风率。在主燃烧器上方增加 SOFA 燃尽风喷口，四角布置。

运行时可根据锅炉运行状况（燃尽、NO_x 排放、烟温偏差及过热器汽温偏差等）对 SOFA 喷口摆动角度的进行适当调整，可有效进行烟气消旋，减少炉膛出口烟温偏差，并保证过热器管壁壁温正常。

各个燃尽风的供风风道均由各角二次风主风道引出，由单独 SOFA 燃尽风道向各燃尽风喷口供风，保证供风阻力小，在风道上设置有单独风门挡板。主燃烧区二次风喷口面积根据主燃烧器区有组织二次风减少的情况进行相应缩小，相应增加了一、二次风喷口之间的间距，推迟一二次风之间的混合，有利于控制 NO_x 的生成。

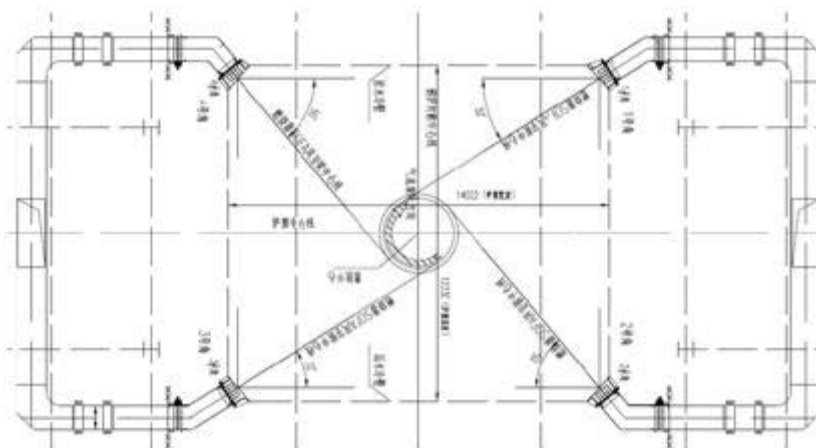


图 8-8 本项目 SOFA 风布置图

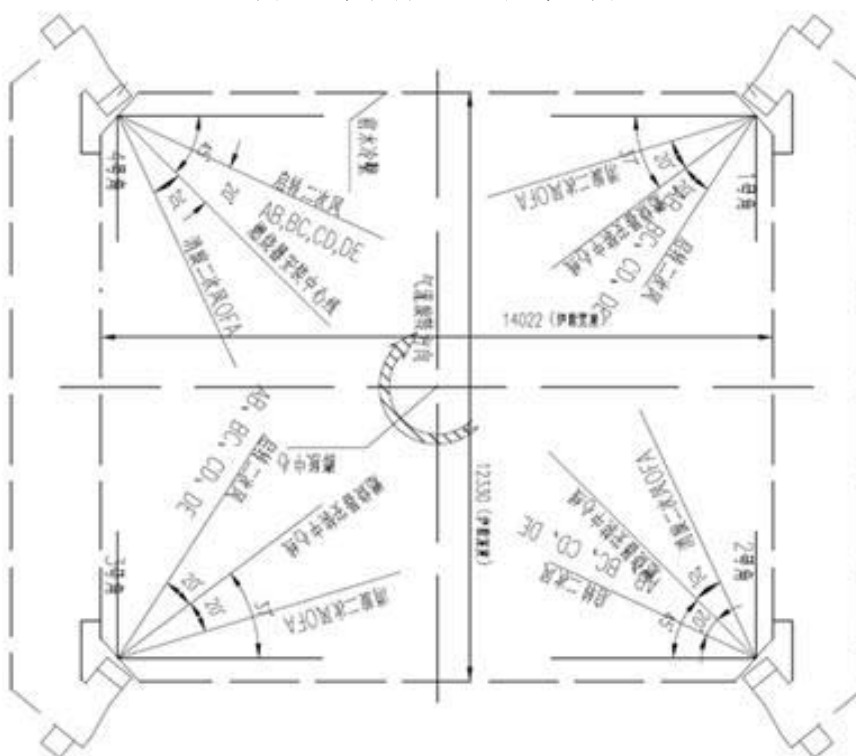


图 8-9 本项目主燃烧区各喷口切圆布置图

关键技术或设计创新特色

- 采用高效低 NO_x 燃烧器+二次可控燃烧组合降 NO_x 技术；
- 一次风粉射流切园相对较小，将水平浓淡燃烧器的浓相煤粉小角度反切，二次风射流角度偏离一次风，设置贴壁风；
- 优化调整一次风浓缩比，推迟浓淡煤粉气流的混合，减少燃烧过程中含 N 基团与 O₂ 反应机会，有效降低 NO_x 生成量；
- 建立燃煤锅炉炉内燃烧过程的计算模型，利用数值计算对技术方案进行调整和优化；
- 系统布置紧凑，风道走向简捷。



图 8-10 案例现场及改造后 DCS 画面

主要技术指标

根据性能验收报告，本项目系统出口烟气指标满足合同规定的要求，脱硝效率达到 60% 以上(改造前 NO_x 浓度为 540mg/Nm³, 改造后 NO_x 浓度 210mg/Nm³)。

投资及运行效益分析

投资费用

本工程总投资约 649.6 万元。

运行费用

除设备折旧外，无其他运行费用。

用户意见

本项目投运至今，各项技术指标优良，无任何环保事故，系统脱硝效率达到设计要求。该低氮改造工程为我公司带来了显著的经济环境效益，是值得推广应用的示范工程。

技术信息咨询单位及联系方式

联系单位：福建龙净环保股份有限公司（武汉龙净环保工程有限公司）

联系人：龚北平

地址：武汉市洪山区珞瑜路 716 号华乐商务中心 26 楼

邮政编码：430070

电话：13971351536

E-mail: gongbeiping@163.com