

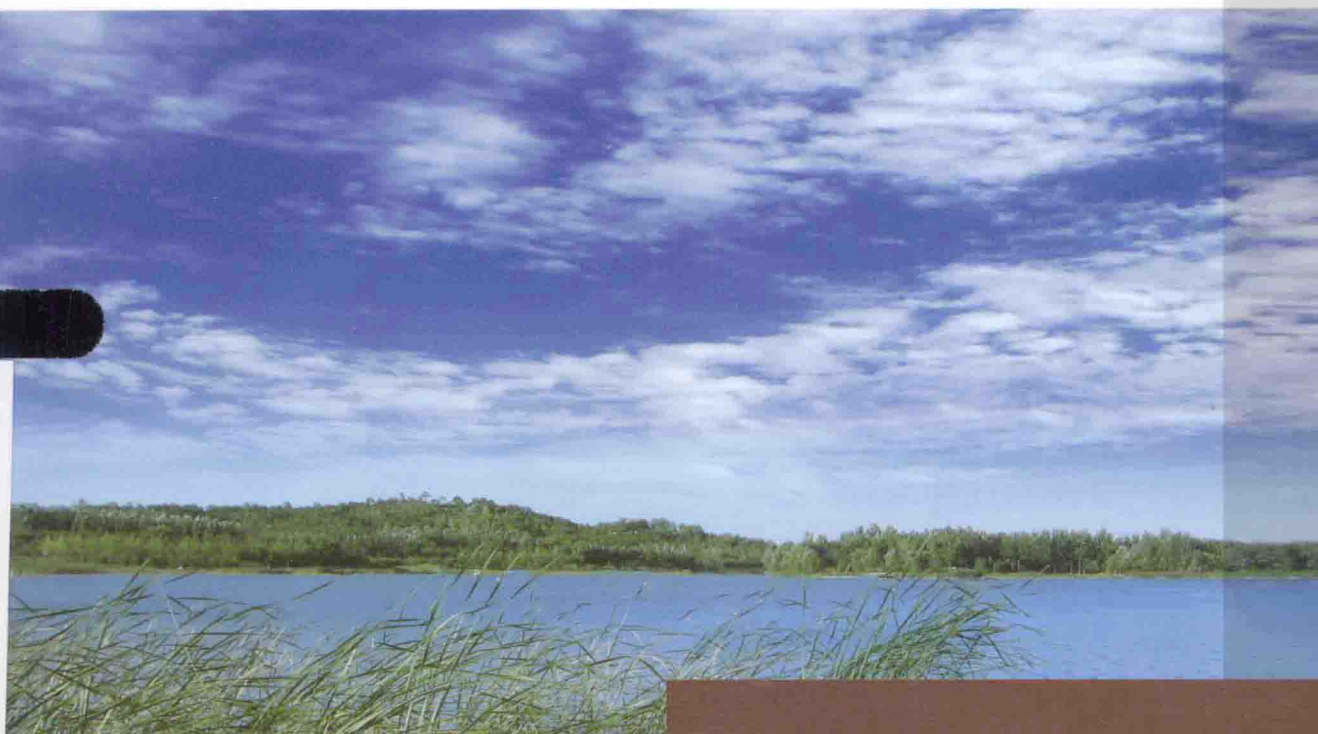
环境工程案例教程丛书

大气污染控制工程 案例教程

潘 琼 主编

郭 正 主审

DAQI WURAN KONGZHI GONGCHENG
ANLI JIAOCHENG



化学工业出版社

大气污染控制工程 案例教程

潘 琼 主编
郭 正 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书列举了常规工业锅炉、电厂锅炉、水泥生产、有色金属行业、钢铁行业、玻璃制造、喷漆行业、海洋石油废气、化肥生产、陶瓷行业及实验室废气等 11 个生产项目过程中的废气产生的过程, 废气污染的理论知识、主要产排污环节和排放情况, 废气的收集情况及典型净化系统案例介绍, 选取目前成熟的常用大气污染控制技术为主, 以其基本理论为起点, 强调工程设计原理、方法、主要工艺和设备选型, 突出工程应用的特点。

本书可供大气污染控制等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员等参考, 也可供高等学校环境工程及相关专业使用, 同时为环保公司相关从业人员提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大气污染控制工程案例教程 / 潘琼主编. — 北京: 化学工业出版社, 2013. 10

(环境工程案例教程丛书)

ISBN 978-7-122-18281-4

I. ①大… II. ①潘… III. ①空气污染控制-案例-教材 IV. ①X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 201274 号

责任编辑: 刘兴春
责任校对: 王素芹

文字编辑: 刘莉珺
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 395 千字 2014 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究



前言

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》和教育部等七部门《关于进一步加强职业教育工作的若干意见》的精神,以就业为导向改革与发展职业教育已经成为社会共识,高等职业教育要快速发展,职业教育主动服务经济社会的意识必须增强,培养生产服务一线技能人才特别是高技能人才尤为重要。因此,职业教育改革要把教学活动与生产实践、社会服务、技术推广及技术开发紧密结合起来,培养从事环境工程治理、环境保护设备设计、操作与管理的技术人员。

《大气污染控制工程案例教程》是部分教师和环保企业人员在工程设计中收集并整理的适用技术案例,有的设计已应用于工程治理中,有较为完备的运行数据,具有一定的经济技术可行性。本书借鉴有一定代表性的案例,进行环境工程实践教学改革的探索,同时为环保公司相关从业人员提供参考。

全书将大气污染治理工程按照行业分类,列举了常规工业锅炉、电厂锅炉、水泥生产、有色金属行业、钢铁行业、玻璃制造、喷烤漆行业、海洋石油废气、化肥生产、陶瓷行业及实验室废气共 11 个生产项目过程中的废气产生的过程,废气污染的理论知识、主要产排污环节和排放情况,废气的收集情况及典型净化系统案例介绍,选取目前成熟的常用的大气污染控制技术为主,以其基本理论为起点,强调工程设计原理、方法、主要工艺和设备选型,突出工程应用的特点。

本书由潘琼担任主编,参加编写人员及分工如下:长沙环境保护职业技术学院潘琼负责第 2 章、第 9 章,长沙环境保护职业技术学院李欢负责第 1 章、第 7 章、第 10 章,长沙环境保护职业技术学院汤杨负责第 3 章、第 11 章,湖南省环境科学研究院陈亮负责第 4 章,湖南永清环保股份有限公司姚超良负责第 5 章、第 6 章、第 8 章。书稿最后由长沙环境保护职业技术学院的郭正主审。

在本书编写过程中,许多企业和环境科学研究所给予了大力支持,长沙环境保护职业技术学院李亚丽对全书进行了认真的审校,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,实践经验不足,书中难免出现疏漏之处,热诚欢迎读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月

目 录

1 燃煤工业锅炉烟气治理的典型案例	1
1.1 燃煤工业锅炉大气污染的基础知识	1
1.1.1 工业锅炉概念及类型	1
1.1.2 工业锅炉污染源分析	2
1.1.3 工业锅炉大气污染物排放标准	3
1.1.4 工业锅炉大气污染控制技术	4
1.2 案例 1: 某煤矿工业锅炉脱硫除尘项目	9
1.2.1 工程设计	9
1.2.2 案例评析	17
1.3 案例 2: 某厂热风炉除尘脱硫改建项目	18
1.3.1 工程设计	18
1.3.2 案例评析	22
1.4 案例 3: 某厂 40t/h 锅炉除尘脱硫项目	22
1.4.1 工程设计	22
1.4.2 案例评析	30
1.5 案例 4: 某厂工业锅炉除尘脱硫项目	30
1.5.1 工程设计	30
1.5.2 案例评析	33
2 电厂锅炉燃煤烟气治理的典型案例	34
2.1 电厂锅炉燃煤大气污染的基础知识	34
2.1.1 火电厂的主要生产工艺	34
2.1.2 火电厂的耗煤量	36
2.1.3 火电厂的大气污染核算	36
2.1.4 火电工业的排污节点	38
2.1.5 火电厂的大气污染治理	38
2.2 燃煤电厂锅炉除尘器的选型设计案例	42
2.2.1 案例 1: 燃煤电厂锅炉电除尘器的选型设计案例	42
2.2.2 案例 2: 燃煤电厂锅炉电除尘改电+袋除尘工程的选型设计案例	46

2.2.3	案例 3: 电热厂电除尘器改为袋式除尘器工程的选型设计案例	47
2.3	燃煤电厂锅炉烟气脱硫技术典型案例	49
2.3.1	石灰石-石膏湿式烟气脱硫工艺	49
2.3.2	案例 4: 华北某发电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫工程	52
2.3.3	案例 5: 某火电机组石灰石-石膏法烟气脱硫技术工程	57
2.3.4	燃煤电厂锅炉烟气脱硫技术案例评析	59
3	水泥行业废气治理的典型案例	61
3.1	水泥行业大气污染的基础知识	61
3.1.1	水泥生产基本工艺	61
3.1.2	水泥工业大气污染物	62
3.1.3	各生产设施废气排放特征及排放量	65
3.1.4	水泥工业污染防治政策与排放要求	71
3.1.5	水泥工业除尘技术的发展	72
3.2	案例 1: 某水泥厂干法回转窑窑尾废气治理工程	75
3.2.1	工程设计	75
3.2.2	案例评析	80
3.3	案例 2: 某水泥厂回转窑“电改袋”除尘系统改造工程	80
3.3.1	工程内容	80
3.3.2	案例评析	85
3.4	案例 3: 某水泥厂窑尾除尘系统改造——电改“电-袋”除尘	85
3.4.1	工程内容	85
3.4.2	案例评析	90
4	有色冶金工业废气治理的典型案例	91
4.1	有色金属行业废气基础知识	91
4.1.1	有色冶金工业概况	91
4.1.2	典型有色冶金工业废气污染概况	92
4.2	案例 1: 粗铅冶炼烟气治理	107
4.2.1	工程设计	107
4.2.2	案例评析	111
4.3	案例 2: 铝工业废气治理	111
4.3.1	工程设计	111
4.3.2	案例评析	114
4.4	案例 3: 有色工业粉尘治理	114
4.4.1	工程设计	114
4.4.2	案例评析	119
5	钢铁行业废气治理的典型案例	120
5.1	钢铁行业废气产污节点分析	120

5.1.1	钢铁行业废气的污染状况及特点	120
5.1.2	钢铁行业主要生产工艺和排污节点	121
5.2	钢铁行业废气防治系统的典型案例	124
5.2.1	工程概况	124
5.2.2	设计参数	124
5.2.3	废气处理工艺	125
5.2.4	技术特点	127
5.2.5	技术指标及条件	130
5.2.6	主要设备及运营管理	131
5.3	案例评析	133
5.3.1	项目的技术水平	133
5.3.2	项目的环境效益	133
5.3.3	项目的经验总结	135
5.3.4	项目的推广模式	136
6	玻璃行业废气治理的典型案例	137
6.1	玻璃行业废气产污节点分析	137
6.1.1	玻璃生产工艺流程	137
6.1.2	玻璃行业废气排污节点	139
6.1.3	玻璃行业废气治理主要工艺	140
6.2	玻璃行业废气防治系统的典型案例	141
6.2.1	工程概况	142
6.2.2	设计参数	143
6.2.3	废气处理工艺	145
6.2.4	技术特点	150
6.2.5	技术指标	151
6.2.6	主要设备及运营管理	152
6.3	案例评析	154
7	喷漆废气治理的典型案例	157
7.1	喷漆废气基础知识	157
7.1.1	喷漆废气污染源分析	157
7.1.2	喷漆废气处理方法	160
7.2	案例 1: 某厂喷漆车间大气污染物治理工程	162
7.2.1	工程设计	162
7.2.2	案例评析	167
7.3	案例 2: 某公司喷漆线有机废气治理工程	168
7.3.1	工程设计	168
7.3.2	案例评析	171
7.4	案例 3: 某家具厂喷漆废气治理工程	171

7.4.1	工程设计	171
7.4.2	案例评析	177
8	海洋石油废气治理的典型案例	178
8.1	海洋石油工业废气产污节点分析	178
8.2	海洋石油工业废气防治系统的典型案例	180
8.2.1	工程概况	180
8.2.2	设计参数	180
8.2.3	废气处理工艺	181
8.2.4	技术特点	182
8.2.5	技术指标	183
8.2.6	主要设备	184
8.3	案例评析	184
8.3.1	项目技术水平	184
8.3.2	项目经验总结	185
8.3.3	项目的推广前景	185
9	陶瓷工业废气治理的典型案例	187
9.1	陶瓷工业的废气污染	187
9.1.1	陶瓷工业的废气污染	187
9.1.2	陶瓷工业的基本生产工艺	190
9.1.3	陶瓷工业废气治理技术	191
9.2	陶瓷行业废气产污节点分析	196
9.3	陶瓷行业除尘设备选型	197
9.4	陶瓷行业废气防治系统的典型案例	197
9.4.1	陶瓷废气治理典型案例	197
9.4.2	陶瓷废气治理技术案例评析	201
10	实验室废气治理的典型案例	203
10.1	实验室废气基础知识	203
10.1.1	实验室废气污染源分析	203
10.1.2	实验室废气处理方法	204
10.2	典型案例：某高校实验室废气治理项目	206
10.2.1	工程设计	206
10.2.2	案例评析	212
11	化肥行业废气治理的典型案例	214
11.1	化肥行业废气治理的基础知识	214
11.1.1	氮肥工业	214

11.1.2	磷肥工业	221
11.1.3	钾肥生产	226
11.2	案例 1: 某化肥厂尿素生产工艺造粒塔粉尘治理工程	227
11.2.1	工程设计	227
11.2.2	案例评析	232
11.3	案例 2: 某氮肥厂普里森装置回收弛放气中的氢气生产双氧水	233
11.3.1	工程内容	233
11.3.2	案例评析	236
11.4	案例 3: 某化肥厂碱吸收法处理硝酸废气	236
11.4.1	工程内容	236
11.4.2	案例评析	238
11.5	案例 4: 某磷肥厂动态泡沫床处理普钙含氟废气	238
11.5.1	工程内容	238
11.5.2	案例评析	239

参考文献	240
-------------	-----

燃煤工业锅炉烟气治理的典型实例

1.1 燃煤工业锅炉大气污染的基础知识

1.1.1 工业锅炉概念及类型

1.1.1.1 什么是工业锅炉

工业锅炉是为工矿企业提供蒸汽或热水（热水锅炉）以满足生产工艺、动力以及采暖等需要的锅炉。

注：热水锅炉和工业锅炉是两个概念。

蒸汽主要用于工业企业生产工艺过程以及采暖和生活用的锅炉，按照我国标准规定，工业锅炉的最大额定蒸汽压力为 2.45MPa（表压），最大连续蒸发量为 65t/h。

1.1.1.2 工业锅炉分类

(1) 层燃锅炉

我国层燃链条炉排锅炉居多，该型锅炉主要在节能、环保性能方面需要进一步提高。在对原煤进行洗选筛分并同时改进燃烧设备的基础上将有更大的发展空间。对于目前仍采用的手烧炉、间歇燃烧方式的小型固定炉排锅炉，必将淘汰，取而代之以新开发的新型锅炉。

(2) 循环流化床锅炉

循环流化床燃烧技术具有强化传热、燃烧效率高、燃料适应性广和排放污染物少等特点，在 $\geq 10\text{t/h}$ 燃煤工业锅炉中应积极发展应用，该型锅炉是种很有发展前途的清洁燃烧技术。

(3) 燃油、燃气锅炉

燃油或燃气工业锅炉，不仅可以提高锅炉热效率，而且可以显著减少污染物排放。但其受制于初期投资和日常运行成本。加之国家在推广节油替代政策，预计燃油锅炉的发展会受到抑制，但随着国家环保力度的加大，加之西气东输和利用国际天然气资源等工程的实施，大多数城市开始推广应用清洁能源，大量的燃气锅炉将替代原有的燃煤锅炉，燃气锅炉的市场前景相当广阔。预计今后燃气锅炉将占年产工业锅炉总容量的 15%~20%。

(4) 垃圾焚烧锅炉

当前我国城市生活垃圾成分有了明显的变化，纸质、塑料、木质、纤维等可燃物和其他有机物大大增加，其质量已基本具备焚烧的条件，城市垃圾焚烧发电已成为可能，为发展垃圾焚烧锅炉创造了条件。采取垃圾焚烧使垃圾体积减小 90%，重量减小 70%以上，用回收

热量产生蒸汽,效率约达85%,转变成电能大约为30%。

(5) 水煤浆锅炉

水煤浆是一种由35%左右的水、65%左右的煤以及1%~2%的添加剂混合制备而成的新型煤基流体洁净环保燃料。水煤浆既保留了煤的燃烧特性,又具备了类似重油的液态燃烧特性。水煤浆外观像油,流动性好,储存稳定、运输方便,燃烧效率高,污染排放低。国内燃用水煤浆实践证明:约1.8~2.1t水煤浆可替代1t燃油,可节约成本约600元。

1.1.2 工业锅炉污染源分析

工业锅炉对大气的污染源于燃料燃烧产生的烟气,烟气中含有烟尘,硫和氮的氧化物等有害物质。

1.1.2.1 烟尘

无论是液体燃料还是固体燃料本身都含有一定数量的灰分,燃烧过程总会伴有尘粒产生。烟尘按其粒径大小可分为降尘和飘尘两种,粒径在 $10\mu\text{m}$ 以上容易沉降的为降尘;粒径小于 $10\mu\text{m}$ 长期飘浮在空中的为飘尘,其中 $0.05\sim 1\mu\text{m}$ 的极细粉尘根本就不沉降,长期飘浮在空中,它是由燃料中的挥发物在高温缺氧状况下分解游离出来的颗粒。飘尘中除了炭粒外,还有灰粒,灰粒是燃料中的不可燃物质,含量最多的是 SiO_2 、 Al_2O_3 ,以及少量的 FeO 、 CaO 微量的金属微粒。飘尘排出后可长期飘浮于大气中,容易使人患呼吸道疾病、心脏病、儿童软骨症。此外,飘尘易吸附 SO_2 、 SO_3 等有害物质,人吸收后会引起呼吸道和肺部炎症。

1.1.2.2 二氧化硫(SO_2)

在固体和液体燃料中都含有硫的成分,因此,燃料燃烧后会产生一定量的二氧化硫排入大气。当大气中的 SO_2 日平均浓度达 $3.5\text{mg}/\text{m}^3$ 时,对人会诱发气喘、肺病、心血管病,还能促使老年人死亡率增加; SO_2 气体排入大气,还可能造成酸雨、酸雪,影响农作物的正常生长,腐蚀建筑物。 SO_2 已成为目前世界上较难解决的环境污染问题。

1.1.2.3 二氧化碳(CO_2)

燃料能过燃烧放热的元素主要是碳和碳氢化合物,它们与氧进行化学反应即燃烧后,都会产生 CO_2 , CO_2 浓度增加会产生“温室效应”,引起全球气候发生变化,改变全球降雨量分布。

1.1.2.4 氮氧化物(NO_x)

燃烧所产生的氮氧化物主要是 NO ,产生的 NO_2 很少,但是 NO 排放大气中很快就变成 NO_2 。 NO 和 NO_2 都是有毒气体,其中 NO_2 的毒性很大,大大高于 NO 。氮氧化物的形成来自两方面:一是源于空气的“热力型 NO ”;二是源于燃料的“燃料型 NO ”。 NO 是一种有毒气体,它和血红蛋白的亲合力很强, NO 和血红蛋白结合,影响与氧的结合,人体就会因缺氧而麻痹、痉挛; NO_2 是一种红棕色恶臭气体,对肺部有损坏作用。

1.1.2.5 热污染

锅炉运行中总会给环境增加热量,每台锅炉运行时的散热和烟热等直接排放大气中的热量为燃料总发热量的10%~15%,还有40%~50%的热量通过冷却水排入水体,对大气和水体造成热污染,影响生态环境的正常运转。

1.1.2.6 噪声污染

锅炉的噪声源于鼓风机、引风机、水泵、油泵、卸压排气口等机械运转发生的摩擦和撞击声;炉膛内燃料燃烧的声音;流体流动或水击等产生的噪声。噪声会使人产生噪声性耳

聋，长期在噪声环境下工作，对人的健康将产生不良的影响。

1.1.2.7 废水污染

锅炉的水处理、锅炉排污等都会排出一定量的废水，若不经处理直接排放，会造成江河湖海的污染，危害人类及动植物的生长。

1.1.3 工业锅炉大气污染物排放标准

目前工业锅炉大气污染物排放标准有相应的国家标准及地方标准，在进行工业锅炉大气污染控制工程设计时需正确引用标准，以下就现行几种常遵循的标准做简要概述。

1.1.3.1 《锅炉大气污染物排放标准》（GB 13271—2001）

该标准是目前全国大部分区域所引用和参照的标准，该标准 2001 年 11 月 12 日发布批准，自 2002 年 1 月 1 日起实施，该标准适用于除煤粉发电锅炉和单台出力大于 45.5MW（65t/h）发电锅炉以外的各种容量和用途的燃煤、燃油和燃气锅炉排放大气污染物的管理，以及建设项目环境影响评价、设计、竣工验收和建成后的排污管理。使用甘蔗渣、锯末、稻壳、树皮等燃料的锅炉，参照本标准中燃煤锅炉大气污染物最高允许排放浓度执行。

《锅炉大气污染物排放标准》（GB 13271—2001）规定了锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值（详见表 1-1）及锅炉二氧化硫和氮氧化物最高允许排放浓度（详见表 1-2）等。

表 1-1 锅炉烟尘最高允许排放浓度和烟气黑度限值

锅炉类别		适用区域	烟尘排放浓度/(mg/m ³)		烟气黑度 (林格曼黑度)/级
			I 时段	II 时段	
燃煤锅炉	自然通风锅炉 ($<0.7\text{MW}, 1\text{t/h}$)	一类区	100	80	1
		二、三类区	150	120	
	其他锅炉	一类区	100	80	1
		二类区	250	200	
		三类区	350	250	
燃油锅炉	轻柴油、煤油	一类区	80	80	1
		二、三类区	100	100	
	其他燃料油	一类区	100	80 ^①	1
		二、三类区	200	150	
		燃气锅炉		全部区域	

表 1-2 锅炉二氧化硫和氮氧化物最高允许排放浓度

锅炉类别	适用区域	SO ₂ 排放浓度/(mg/m ³)		NO _x 排放浓度/(mg/m ³)	
		I 时段	II 时段	I 时段	II 时段
燃煤锅炉	全部区域	1200	900	—	—
燃轻柴油、煤油锅炉	全部区域	700	500	—	400
其他燃料油锅炉	全部区域	1200	900 ^①	—	400 ^①
燃气锅炉	全部区域	100	100	—	400

1.1.3.2 《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2003）

该标准适用于使用单台出力 65t/h 以上除层燃炉、抛煤机炉外的燃煤发电锅炉；各种容量的煤粉发电锅炉；单台出力 65t/h 以上燃油发电锅炉；以及各种容量的燃气轮机组的火电厂。单台出力 65t/h 以上采用甘蔗渣、锯末、树皮等生物质燃料的发电锅炉，参照该标准中

以煤矸石等为主要燃料的资源综合利用火力发电锅炉的污染物排放控制要求执行。该标准不适用于各种容量的以生活垃圾、危险废物为燃料的火电厂。

该标准分 3 个时段, 对不同时期的火电厂建设项目分别规定了排放控制要求: 1996 年 12 月 31 日前建成投产或通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目, 执行第 1 时段排放控制要求; 1997 年 1 月 1 日起至本标准实施前通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目, 执行第 2 时段排放控制要求; 自 2004 年 1 月 1 日起, 通过建设项目环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目 (含在第 2 时段中通过环境影响报告书审批的新建、扩建、改建火电厂建设项目, 自批准之日起满 5 年, 在本标准实施前尚未开工建设的火电厂建设项目), 执行第 3 时段排放控制要求。

1.1.3.3 地方标准

为了贯彻《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国大气污染防治法》和《上海市实施〈中华人民共和国大气污染防治法〉办法》, 加强锅炉大气污染物的排放控制, 促进行业技术进步和可持续发展, 防治污染, 保障人体健康, 维护良好的生态环境, 改善环境质量, 结合各地的实际情况, 制定了相应的锅炉大气污染物排放的地方标准。

上海市于 2007 年 6 月 13 日发布, 自 2007 年 9 月 1 日实施了《锅炉大气污染物排放标准》(DB 31/387—2007), 本标准将上海市划分为 A、B 两个区域, A 区为内环线以内的区域、风景名胜區、自然保护区和上海市人民政府按照环境空气质量功能区要求确定需要特殊保护的区域; B 区为除 A 区以外的其他区域。工业锅炉 (含生活锅炉) 按所在区域执行相应的排放限值。该标准对电站锅炉不划分区域。

北京市于 2007 年 8 月 13 日发布, 自 2007 年 9 月 1 日实施了《锅炉大气污染物排放标准》(DB 11/139—2007), 该标准按新建、扩建、改建锅炉和在用锅炉两类, 分别规定了锅炉的大气污染物排放限值。同时对在用锅炉划分为 I、II 两个时段: 第 I 时段为自本标准实施之日起至 2008 年 6 月 30 日; 第 II 时段为自 2008 年 7 月 1 日起。

广东省于 2010 年 6 月 9 日发布, 自 2010 年 11 月 1 日实施了《锅炉大气污染物排放标准》(DB 44 /765—2010), 该标准适用于各种容量的用于生活和生产的燃煤、燃油、燃气热水锅炉、蒸汽锅炉和热载体炉, 除煤粉发电锅炉外的单台出力不大于 45.5MW (65t/h) 的燃煤、燃油、燃生物质的发电锅炉。该标准将广东省划分为 A、B 两个区域, A 区为珠江三角洲经济区、珠江三角洲经济区外的环境保护重点城市建成区。珠三角经济区的行政辖域包括广州、深圳、珠海、东莞、中山、江门、佛山和惠州市的惠城区、惠阳、惠东、博罗, 肇庆的端州区、鼎湖区、高要、四会。范围为东经 $111^{\circ}59.7' \sim 115^{\circ}25.3'$ 、北纬 $20^{\circ}17.6' \sim 23^{\circ}55.9'$ 。B 区为除 A 区以外的行政区域。按所在区域执行相应的排放限值。

此外, 除上述地方已制定锅炉大气污染物地方排放标准外, 还有天津、石家庄等地都制定了相应的地方标准, 还有部分区域的地方标准正在制定中。

1.1.4 工业锅炉大气污染控制技术

1.1.4.1 工业锅炉除尘技术

根据目前国内外科技水平, 控制锅炉烟尘污染的措施有: 改进锅炉的燃烧方式和进行合理的燃烧调节, 以减少烟尘中的可燃物、降低烟尘的初始含尘浓度; 采用一定高度的烟囱, 提高烟囱的烟气速度, 通过高空扩散, 稀释烟尘浓度; 加装高效除尘装置, 降低烟尘排放浓

度。锅炉除尘按其除尘原理分为 6 大类。

(1) 重力沉降室

① 原理 依靠重力的作用使尘粒从气流中分离出来。沉降室是一个断面较大的空室，含尘气体由断面较小的风管进入沉降室后，气流速度大大降低，尘粒便在重力作用下缓慢向灰斗沉降。

② 优点 结构简单、造价低、施工容易、维护管理方便、阻力小。

③ 缺点 占地面积大，除尘效率低（50%~80%）。仅适用于捕集密度大，颗粒粗（粒径大于 $50\mu\text{m}$ ）的粉尘，对 $30\mu\text{m}$ 以下的灰尘，几乎无捕集能力。只作为初级除尘。

(2) 惯性除尘器

① 除尘机理 利用尘粒在运动气流中具有惯性力，通过突然改变含尘气流的流动方向，或使其与某种障碍物碰撞，使尘粒的运动轨迹偏离气体流线而达到分离的目的。

② 优点 惯性除尘器用于净化密度和粒径较大的金属或矿物性粉尘具有较高除尘效率。

③ 缺点 对黏结性和纤维性粉尘，则因易堵塞而不宜采用。由于净化效率低，常用作多级除尘中的初级除尘。

(3) 旋风除尘器

① 原理 旋风除尘器是利用气流旋转过程中作用在尘粒上的离心力，使粉尘从含气流中分离出来的。

② 结构 进气口、筒体、锥体、排出管（内筒）。

③ 外旋涡 含尘气体由除尘器进气口沿切线方向进入后，沿外壁由上向下做旋转运动，这股向下旋转的气流称为外旋涡。

④ 内旋涡 外旋涡到达锥体底部后，转而向上，沿轴心向上旋转，最后从排出管排出。这股向上旋转的气流称为内旋涡。

(4) 湿式除尘器

① 原理 通过惯性碰撞和截留，尘粒与液滴或液膜发生接触；微细尘粒通过扩散与液滴接触；加湿的尘粒相互凝并；饱和状态的高温烟气在湿式除尘器内凝结时，要以尘粒为凝结核，可以促进尘粒的凝并。

② 优点 设备简单；效率高；可捕集小粒径的尘粒；操作时灰尘不易飞扬。

③ 缺点 未经很好处理的废水，排入河流或城市排水系统，将形成“三废”搬家；含酸废水对设备和土建基础有腐蚀作用。

(5) 过滤式除尘器

① 原理 过滤式除尘器是利用含尘气流通过过滤材料时，将粉尘分离捕集的装置，在通风除尘系统中应用最多的是以纤维织物为滤料的袋式除尘器。

② 优点 具有很高的净化效率，除尘效率高达 99% 以上；可捕集粒径 $0.3\mu\text{m}$ 的细微尘粒；与电除尘器相比，袋式除尘器结构简单、投资少；操作简便，运行稳定可靠；可以过滤高比电阻灰尘，这是电除尘器难以净化的含尘气流；大型袋式除尘器每小时能处理几十万到几百万立方米的烟气量，可以满足大型工业锅炉的除尘要求。

③ 缺点 袋式除尘器阻力大，约 $1000\sim 1500\text{Pa}$ ，电能消耗大，运行费用高；滤袋寿命不够长，需经常更换，使运行费用增加；使用温度不宜超过 250°C ，限制了其应用范围；不宜过滤灰粒黏性大或纤维状含尘气体。

(6) 电除尘器

① 原理 电除尘器是含尘烟气在通过高压电场进行电离的过程中，使尘粒荷电，并在

电场静电力的驱动下作定向运动,使尘粒沉积在集尘极上,从而将尘粒从烟气中分离出来的一种除尘设备。

② 优点 除尘性能优异,捕集粒径范围为 $0.01\sim 100\mu\text{m}$,当灰尘粒径 $>0.1\mu\text{m}$ 时,除尘效率可达 99% 以上;烟气流动阻力很小,为 $100\sim 300\text{Pa}$,降低了引风机的耗电量;电耗功率低,净化 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 烟气耗电 $0.2\sim 0.6\text{kW}\cdot\text{h}$;可净化高压和负压烟气;能耐高温,最高可达 500°C 。

③ 缺点 设备造价高,安装、运行要求严格;对烟气的波动(如流量、温度、烟气成分、含尘浓度等)很敏感;对灰尘的比电阻有严格要求;维修技术要求高;占地面积大。

1.1.4.2 工业锅炉脱硫技术

工业锅炉脱硫技术发展至今,方式有 200 多种,但真正成熟运用技术也仅有十余种,适合工业锅炉的烟气实用脱硫技术就更少。主要有钠法、双碱法、钙镁法、简易石灰法以及脱硫除尘一体化方式。

下面对适宜于工业锅炉的几种脱硫技术分别进行介绍分析和比较。

(1) 钠法

该法运用钠基作为脱硫剂脱除烟气中的 SO_2 ,脱硫效率最高,占地最省,设备投资最低,系统简单,但运行费用较高,适合自有碱液或废碱液的企业使用。目前常用的碱液有 NaOH 和 Na_2CO_3 。

(2) 双碱法(钠钙循环再生)

该技术借鉴了石灰石/石灰-石膏法技术成熟、运行费用低的优点而克服了其液气比高、容易结垢的缺点,用其固硫。借鉴了钠法技术脱硫效率高、不结垢的优点,克服其运行费用高的缺点,用其脱硫。因此,这种脱硫技术是两种脱硫技术的完美结合。同时为节省投资,对脱硫废物经简单处理后直接达标排放;比较适合中小型工业锅炉进行脱硫改造。

① 工艺基本原理 钠碱循环再生法烟气脱硫技术是利用氢氧化钠溶液作为启动脱硫剂,配制好的氢氧化钠溶液直接打入脱硫塔洗涤脱除烟气中 SO_2 来达到烟气脱硫的目的,由于钠基脱硫剂碱性强,吸收二氧化硫后反应产物溶解度大,不会造成过饱和结晶,造成结垢堵塞问题。另一方面脱硫产物被排入再生池内用氢氧化钙进行还原再生,再生出的钠基脱硫剂再被打回脱硫塔循环使用。

钠碱循环再生法烟气脱硫工艺同石灰石/石灰等其他湿法脱硫反应机理类似,主要反应为烟气中的 SO_2 先溶解于吸收液中,然后离解成 H^+ 和 HSO_3^- 。

② 工艺流程介绍 来自锅炉的烟气先经过除尘器除尘,然后烟气经烟道从塔底进入脱硫塔。在脱硫塔内布置若干层(根据具体情况定)旋流板的方式或其他方式,使其具有良好的气液接触条件。从塔顶喷下的碱液在旋流板上进行雾化使得烟气中的 SO_2 与喷淋的碱液充分吸收、反应。经脱硫洗涤后的净烟气经过除雾器脱水,脱水后进入换热器或与原热烟气混合,升温后的烟气通过烟囱排入大气。具体流程见图 1-1。

主要工艺过程是,清水池一次性加入氢氧化钠制成脱硫液,用泵打入吸收塔进行脱硫。在脱硫过程中,烟气夹杂的飞灰同时被循环液湿润而捕集,从吸收塔排出的循环浆液流入沉淀池。沉淀池的设计使浆液流经时有足够长的沉淀时间,灰渣经沉淀定期清除,可回收利用,如制砖等。上清液溢流进入反应池与投加的石灰及适量起软化作用的 Na_2CO_3 进行反应,置换出的氢氧化钠溶解在循环水中,同时生成难溶解的亚硫酸钙、硫酸钙和碳酸钙等,可通过曝气、沉淀、过滤后清除。

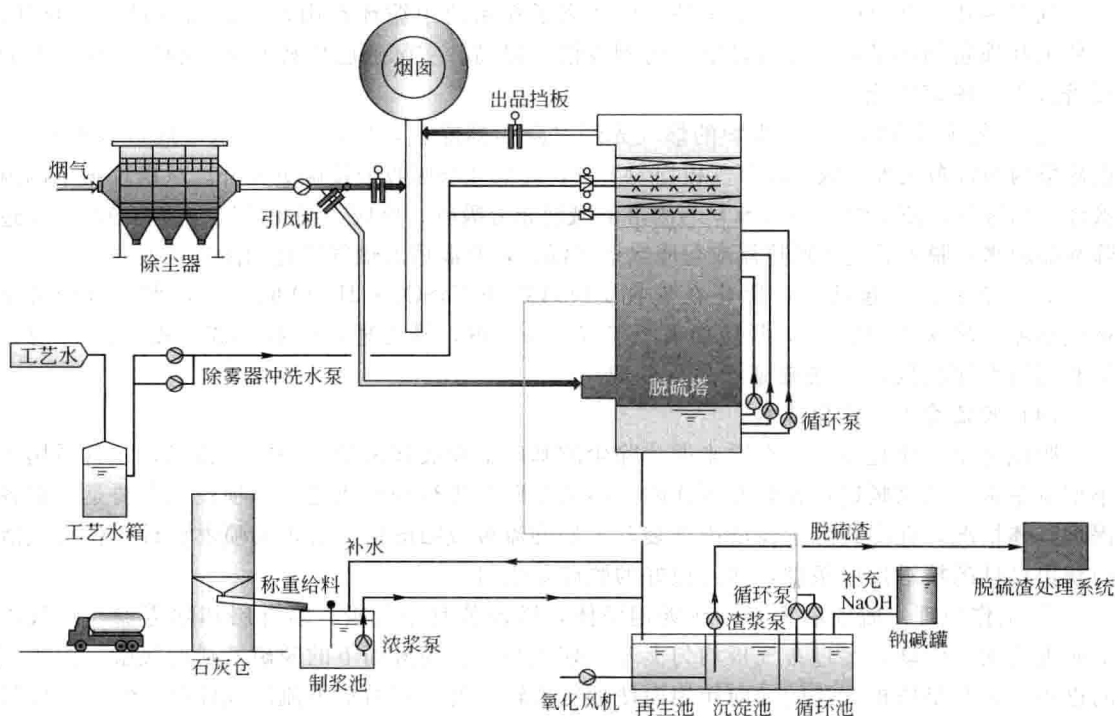


图 1-1 双碱法工艺流程

此法的关键是再生，采用软化或延长再生时间促进再生，通过调整系统各项参数阻止结晶结垢的形成，保证系统的安全运行。

③ 工艺特点 与石灰石/石灰湿法脱硫工艺相比，钠碱循环再生法有以下优点：a. 用 NaOH 脱硫，循环水基本上是 NaOH 的水溶液，在循环过程中对水泵、管道、设备均无腐蚀与堵塞现象，便于设备运行与保养；b. 吸收剂的再生和脱硫酸渣的沉淀发生在塔外，这样避免了塔内堵塞和磨损，提高了运行的可靠性，降低了操作费用；c. 钠基吸收液吸收 SO_2 速度快，故可用较小的液气比，达到较高的脱硫效率，一般在 90% 以上，这样也可降低投资，减少运行费用；d. 具有脱硫、除尘一体化效用。

缺点是： Na_2SO_3 氧化副反应产物 Na_2SO_4 较难再生，需不断补充 NaOH 或 Na_2CO_3 而弥补碱的消耗量。另外， Na_2SO_4 的存在也将降低石膏的质量。

(3) 钙镁法

石灰石（石灰）-石膏法是目前采用较多的湿法脱硫工艺，该法技术成熟，脱硫效率高，但简易的石灰法最大的缺点是脱硫副产品易在吸收塔和工艺系统中产生结垢和堵塞，而钙镁法的出现及时弥补了这一缺陷，它是在简易石灰法基础上发展而来的一种实用脱硫技术。

① 工艺基本原理 钙镁法，又称加镁石灰湿法脱硫（MgLime Wet FGD），是一项成熟的高效湿法烟气脱硫技术。该工艺结合了镁基优良脱硫性能和钙基原料价格低廉的特点，利用氧化镁的反应产物亚硫酸镁（ MgSO_3 ），大大提高了对 SO_2 的捕获能力。亚硫酸镁是可溶解盐，其溶液能与酸反应，可避免与烟气接触的浆液 pH 值急剧下降，因而大大降低了 SO_2 从气体中进入液体的阻力，从而极大地增强了脱除烟气中 SO_2 的能力。在浆液中因为有亚硫酸镁的存在，进而降低了液体中钙离子 [硫酸钙（石膏）] 的浓度，阻止了钙盐在吸收塔内部或管壁沉淀积垢且因是软性吸收剂，因而减少了对喷嘴的磨损。

同时利用石灰 (CaO) 还原镁基, 使镁离子在系统中循环利用, 所以加少量的氧化镁, 主要消耗廉价的钙基, 而系统性能却得到成倍的提高。实际上已代替石灰的脱硫作用, 因而显著改善了脱硫性能。

② 工艺流程介绍 来自锅炉的烟气先经过除尘器除尘, 然后经烟道从塔底进入脱硫塔。脱硫塔内布置布气板, 烟气经布气板均匀上升, 使其能与吸收液接触更充分。从塔顶喷下的碱液经喷嘴雾化, 使得烟气中的 SO_2 与喷淋的碱液充分吸收、反应。经脱硫洗涤后的净烟气经过除雾器脱水, 脱水后进入换热器或与原热烟气混合, 升温后的烟气通过烟囱排入大气。

③ 工艺特点 包括: a. 阻止在吸收反应过程中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的产生, 大大减轻甚至避免结垢、堵塞等问题; b. 脱硫剂来源丰富, 易获得, 易处理; c. 技术成熟度高; d. 总投资和运行费用较低; e. 脱硫副产品易处理。

(4) 脱硫除尘一体化技术

脱硫除尘一体化技术是在原来湿式除尘的基础上发展起来的一种实用技术, 尤其适用于小型电站锅炉及供暖锅炉在装有湿式除尘器的基础上进行脱硫改造。该项技术主要是根据各锅炉具体情况, 在湿式除尘器塔内加装若干层旋流板或喷淋层。合理的喷淋设计, 使得气液间获得最佳的接触反应条件, 达到很好的脱硫除尘目的。

① 工作原理 脱硫塔为麻石或碳钢塔体, 塔内装有布气板、喷淋层和除雾器。烟气由塔底进入向上流动, 经过布气板均匀上升。烟气与上面喷淋而下的脱硫液逆向接触, 由于切向进塔, 尤其是塔板叶片的导向作用而使烟气旋转上升, 将沿板下流的液体喷成雾滴, 使气液间有很大的接触面积。液滴被气流带动旋转, 产生的离心力强化气液间的接触, 最后甩到塔壁上沿壁下流, 经过溢流装置到下一层塔板上, 再次被气流雾化而进行气液接触。如上所述, 液体在与气体充分接触后又能有效地分离, 避免雾沫夹带, 其气液负荷比常用塔板大 1 倍以上。又因塔板上液层薄, 开孔率大而使压降较低, 达到同样脱硫除尘效果压降约降低 50%, 综合性能优于常用塔板。

由于塔内提供了良好的气液接触条件, 气体中的 SO_2 被碱性液体吸收 (脱硫) 效果好; 旋流板塔同时具有很好的除尘性能, 气体中的尘粒在旋流板上被水雾黏附而除去, 此外, 尘粒及雾滴受离心力作用甩到塔壁后, 亦使之被黏附而除去, 从而使气流带出塔的尘粒和雾滴很少, 达到脱硫、除尘一体化的效果。

② 工艺流程介绍 锅炉烟气经文丘里除尘器后切向进入脱硫塔, 在脱硫塔内布置若干层旋流板, 同时进行脱硫和除尘, 也可采用空塔喷淋, 减少系统阻力, 减少结垢堵塞的可能性。在脱硫塔主塔上部加装除雾器, 烟气脱水后经脱硫副塔后进入烟气升温装置, 烟气升温的方式根据不同厂家的具体情况具体选择, 升温后的烟气经引风机导入烟囱排走。具体流程见图 1-2。

脱硫除尘一体化的流程大都是一样的, 但就针对不同的现场情况, 脱硫塔内的布置形式可能有所不同。比如, 在脱硫塔内下部也可安装一层旋流板作为布气板, 一方面是起均匀布气的作用, 另一方面是起到原来麻石水膜除尘器的作用; 在布气板的上面布置若干层喷淋层喷碱液, 碱液中的碱性成分充分吸收烟气中的二氧化硫, 达到脱硫的目的; 另外喷嘴将碱液雾化后也可以充分捕捉烟气中的粉尘颗粒, 极大的提高除尘效率。在脱硫塔喷淋层的上部安装除雾器, 除雾器的选择主要有两种形式, 一是旋流板除雾器, 另一种是折流板除雾器。经脱水后的净烟气需要烟气升温后再排入烟囱, 烟气升温的方式有很多种, 但针对中小型锅炉可以直接勾兑锅炉的预热空气或利用过热蒸汽通过管式换热器等方式来给烟气加热。

③ 主要工艺特点 包括: a. 脱硫除尘效率高 (脱硫效率 65%~85%; 除尘效率能达到