

HUODIANCHANG YANQI TUOLIU SHEBEI
JI YUNXING WEIHU

火电厂烟气脱硫设备 及运行维护

韩祥 姜艳华 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUODIANCHANG YANQI TUOLIU SHEBEI
JI YUNXING WEIHU

火电厂烟气脱硫设备 及运行维护

韩祥 姜艳华 主 编
刘军峰 雷建平 张宝强 副主编
王敦 杨凌 李瑞涛 张雷 韩丽 参 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书阐述了我国控制二氧化硫污染问题的有关政策,简要介绍了我国目前主要的二氧化硫控制技术,重点介绍了目前应用最普遍的二氧化硫控制技术——石灰石湿法烟气脱硫系统与设备,讲述了工艺系统、设备和材料等各个方面,论述了石灰石湿法烟气脱硫系统的调试验收、日常运行与维护和对发电机组运行情况的影响,并以某烟气脱硫工程为例,对石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统设备及运行进行了具体说明。

本书可以满足新建火力发电厂(含老电厂扩建脱硫工程)脱硫运行岗位职工培训的需求,也可供相关学校和电力培训中心等教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂烟气脱硫设备及运行维护/韩祥,姜艳华主编. —北京:中国电力出版社,2016.8

ISBN 978-7-5123-8950-2

I. ①火… II. ①韩… ②姜… III. ①火电厂—烟气脱硫—机械设备—运行 ②火电厂—烟气脱硫—机械设备—维修 IV. ①X773.013

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 034980 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29.75 印张 732 千字

印数 0001~1500 册 定价 98.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

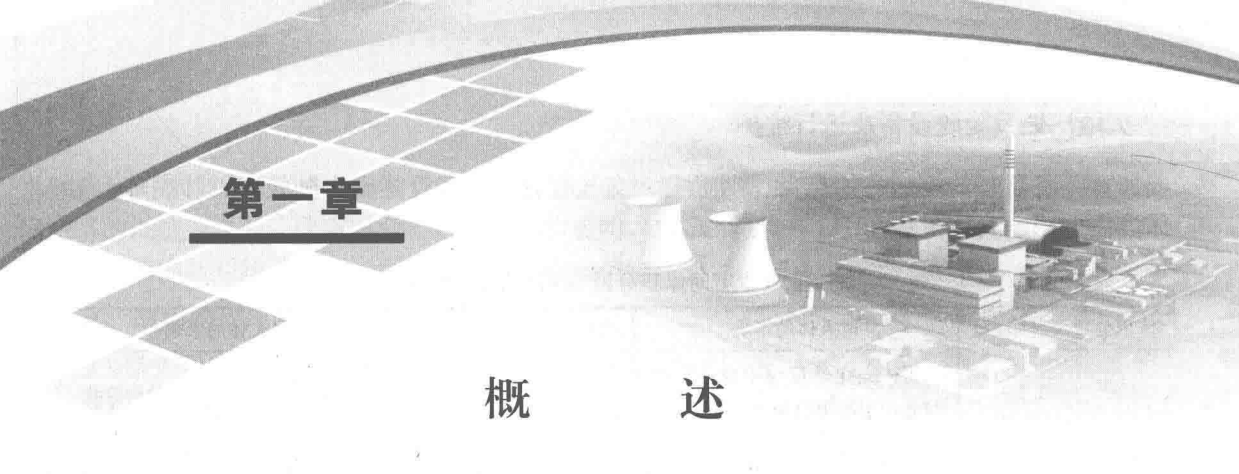
版 权 专 有 翻 印 必 究

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 SO ₂ 的危害	1
第二节 我国 SO ₂ 的排放概况	4
第三节 国家环境保护政策	6
第四节 SO ₂ 的排放标准	7
第五节 SO ₂ 控制技术的研究、开发及应用	7
第二章 石灰石湿法烟气脱硫系统与设备	14
第一节 石灰石/石膏湿法烟气脱硫技术简述	14
第二节 石灰石浆液制备系统及设备	25
第三节 吸收系统及设备	28
第四节 烟气系统及设备	40
第五节 脱硫副产物处置系统及设备	48
第六节 检测仪表	54
第七节 脱硫装置的控制系统	65
第八节 脱硫装置的顺序控制、保护与连锁	99
第三章 FGD 系统的防腐材料	101
第一节 FGD 系统内的主要腐蚀环境及常用的防腐材料	101
第二节 镍基耐蚀合金	103
第三节 橡胶衬里	106
第四节 合成树脂涂层	111
第五节 鳞片衬里防腐	116
第六节 玻璃钢	119
第七节 其他耐蚀材料	124
第八节 防腐材料的比较与选用	132
第四章 FGD 系统调试、验收、性能试验	135
第一节 系统检验、试验和验收	135
第二节 工厂检验及试验	136

第三节	I&C 设备的检查和试验	142
第四节	现场检验和试验	144
第五节	烟气脱硫装置的性能试验	157
第五章	脱硫系统的运行	163
第一节	FGD 运行前的试验	163
第二节	FGD 脱硫系统启、停操作	166
第三节	脱硫系统设备的启停条件、连锁及启停次序	171
第四节	脱硫装置的运行特性及注意事项	194
第五节	FGD 装置的运行调整	209
第六节	FGD 系统事故处理	210
第七节	典型 FGD 系统的运行检查	226
第八节	防止结垢、腐蚀、磨损和冰冻的对策	232
第九节	运行管理	237
第六章	FGD 系统对发电机组运行的影响	244
第一节	FGD 系统对发电机组运行的影响及原则性调节方法	244
第二节	FGD 系统运行对锅炉机组运行的影响	245
第三节	FGD 系统对汽轮机系统的影响	254
第七章	典型 FGD 系统维护	257
第一节	典型 FGD 烟气系统维护管理	257
第二节	典型 FGD 制浆系统维护重点	267
第三节	典型 FGD 工艺水系统维护难点	267
第四节	石膏系统常见故障及处理	275
第五节	脱硫废水处理系统常见故障及处理	279
第八章	脱硫系统超低排放	291
第一节	脱硫系统超低排放的各种技术	291
第二节	脱硫系统超低排放改造注意事项	295
第九章	工程实例	299
第一节	新建脱硫工程实例	299
第二节	脱硫系统超低排放工程实例	307
附录一	公司 2×1000MW 机组辅控规程	327
附录二	相关国家法规和技术标准名称	467
参考文献		468



第一章

概 述

根据国民经济发展的需要,国家制定了新的《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014,2014年7月1日实施),能贯彻《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》《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》等法律、法规,保护环境,防治污染,促进锅炉生产、运行和污染治理技术的进步。该标准规定了锅炉大气污染物浓度排放限值、监测和监控要求。锅炉排放的水污染物、环境噪声适用相应的国家污染物排放标准,产生固体废物的鉴别、处理和处置适用国家固体废物污染控制标准。

根据《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)的要求,2014年7月1日起,火电行业正式执行排放新标准和重点地区特别排放标准,不能达标的机组将被关停处置。截至目前,环境保护部曾就脱硫脱硝违规开出过4.1亿元和5.19亿元罚单,说明必须在规定时间内完成环保技改、实现达标排放。

新标准对我国空气质量的好转有显著作用。根据环境保护部相关负责人介绍,新标准实施后,到2015年,电力行业二氧化硫排放可减少618万t,氮氧化物排放可减少580万t。

与欧盟和美国的排放标准相比,我国许多地方提出的超低排放“50355”(达到燃气发电排放限值:氮氧化物 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 、二氧化硫 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、烟尘 $5\text{mg}/\text{m}^3$)要求更加严格,对PM_{2.5}治理有积极意义。

一位环保行业人士表示:结合现有技术及电厂经济效益,建议对现役机组首先考虑国标方案、稳步推进清洁方案。对新建机组稳步实施清洁方案,试点超清洁方案,按照积极稳妥、分步实施、示范先行的原则,在试验示范基础上,推广应用达到燃气机组排放标准的燃煤电厂烟气超清洁排放技术。这也符合国家发改委、国家能源局、环境保护部联合印发的《能源行业加强大气污染防治工作方案》中关于燃煤电厂超低排放技术的要求。这对火电企业提出了更大的挑战。

第一节 SO₂ 的 危 害

一、SO₂对人类的影响

二氧化硫(SO₂)又名亚硫酸酐,是一种无色不燃的气体,具有强烈的辛辣、窒息性气味,遇水会形成具有一定腐蚀作用的亚硫酸。SO₂是当今人类面临的主要大气污染物之一,其污染源分为两大类:天然污染源和人为污染源。天然污染源由于总量较少、面积较广、容易稀释和净化,对环境危害不太大;而人为污染量大、比较集中、浓度较高,对环境造成的危害比较严重。SO₂主要是通过呼吸道系统进入人体,与呼吸器官发生生物化学作用,引起

或加重呼吸器官的疾病，如鼻炎、咽喉炎、支气管炎、支气管哮喘、肺气肿、肺癌等，对人体健康的影响具体见表 1-1。

表 1-1 空气中不同体积分数 SO₂ 对人体的危害

体积分数 (×10 ⁻⁶)	对人体的影响	体积分数 (×10 ⁻⁶)	对人体的影响
0.01~0.1	由于光化学反应生成分散性颗粒，引起视野距离缩小	10.0~100.0	对动物进行实验时出现种种症状
0.1~1.0	植物及建筑物结构材料遭受损害	20.0	人因受到刺激而引起咳嗽、流泪
1.0~10.0	对人有刺激作用	100.0	人仅能忍受短时间的操作，咽喉有异常感，喷嚏、疼痛、哑嗓、咳痰、胸痛，并且呼吸困难
1.0~5.0	感觉到 SO ₂ 气体		
5.0~10.0	人在此环境下进行较长时间的操作尚能忍受	400~500	立刻引起人严重中毒，呼吸道闭塞而致窒息死亡

SO₂ 往往被飘尘吸附，SO₂ 和飘尘的共同效应对人体的危害更大。吸附 SO₂ 的飘尘可将 SO₂ 带入人的肺部，使其毒性增加 3~4 倍。在光照下，飘尘中的 Fe₂O₃ 等物质可将 SO₂ 催化，通过光化学反应，转化成 SO₃，遇水可形成硫酸雾，并被飘尘吸附。此飘尘经呼吸道吸入肺部，滞留在肺壁上，可引起肺纤维性病变和肺气肿，硫酸雾的刺激作用比 SO₂ 强 10 倍。历史上曾频繁发生与 SO₂ 污染有关的污染事故，见表 1-2。

表 1-2 历史上与 SO₂ 污染有关事故

时间	地点	简况	后果
1930 年 12 月 1~5 日	马斯河谷 (比利时)	烟尘和 SO ₂ ，一周内平均死亡率剧增	6000 多人发病，60 多人死亡
1948 年 10 月 27~31 日	多诺拉 (美)	烟尘和 SO ₂ ，大雾看不见人	5911 人发病，占全镇总人口 43%，死亡 17 人
1949 年	伦敦 (英)	烟尘和 SO ₂ ，一周内因支气管炎死亡的人数增多	较上周多死亡 75 人
1952 年 12 月 5~9 日	伦敦 (英)	烟尘和 SO ₂ ，逆温层，无风，大雾	4 天内死亡 4000 人，2 个月死亡 8000 人
1956 年 1 月 3~6 日	伦敦 (英)	烟尘和 SO ₂	约 1000 人死亡
1957 年 12 月 2~5 日	伦敦 (英)	烟尘和 SO ₂	死亡 400 多人
1961 年	四日市 (日)	烟尘和 SO ₂ ，著名的“四日市哮喘病”	患者 800 多人，死亡 10 人
1960 年 12 月 5~6 日	伦敦 (英)	烟尘和 SO ₂	死亡 700 多人
1970 年	东京 (日)	光化学厌恶加 SO ₂ ，无风	受害者近万人

二、SO₂ 对植物的危害

SO₂ 主要是通过叶面气孔进入植物体，在细胞或细胞液中生成 SO₃²⁻ 或 HSO₃⁻ 和 H⁺。如

果其浓度和持续时间超过本身的自解机能,就会破坏植物正常的生理机能,使其生长缓慢,对病虫害的抵抗力降低,严重时就会枯死。资料表明,当 SO_2 浓度年均达到 $(0.01 \sim 0.08) \times 10^{-6}$ 时,许多植物就开始受到不同程度的伤害,有些植物在更低的浓度下就会遭到损害。

三、酸雨的形成

SO_2 给人类带来最严重的问题是酸雨,这是全球性的问题。大气中的 SO_2 、 NO_x 与氧化性物质 O_3 、 H_2O_2 和其他自由基(光化学)进行化学反应,生成硫酸和硝酸,最终形成 pH 值小于 5.6 的酸性降雨(酸雨)返回地面,它们约占酸雨总量的 90% 以上。酸雨的形成过程复杂,可以简化如下:



四、酸雨对环境的危害

酸雨对环境的危害更大,最为突出的是它会使湖泊变成酸性,导致水生生物死亡。酸性湖水或河水会降低水中含钙量,损坏鱼的脊椎和骨骼,使鱼畸形,造成驼背或缩短。此外,酸性水还会使河底沉积物释放出有毒物质,如铅、镉、镍等。当湖水或河水的 pH 值小于 5.5 时,大部分鱼类很难生存;当 pH 值小于 4.5 时,各种鱼类、两栖动物和大部分昆虫消失,水草死亡。酸雨还浸渍土壤,侵蚀矿物,使铝元素和重金属元素沿着基岩裂缝流入附近水体,影响水生生物生长,或使其死亡。

五、酸雨对生态系统的影响

酸雨对生态系统的影响及破坏主要表现在使土壤酸化和贫瘠化,农作物及森林生长减缓,湖水酸化,鱼类生长受到抑制,对建筑物和材料有腐蚀作用,加速其风化过程等方面。例如 1982 年夏季,重庆连降酸雨,6 月 18 日夜一场酸雨过后,1300 多公顷水稻叶片突然枯黄,犹如被火烤过,纷纷枯死,重庆南山马尾松死亡率达 46%,四川峨眉山金顶 40% 的冷杉已有死亡。

六、酸雨对各类建筑、设施的影响

酸雨还加速了许多建筑结构、桥梁、水坝、工业装备、供水管网、地下储罐、水轮发电机组、动力和通信设备等材料的腐蚀,对文物古迹、历史建筑、雕刻的重要文物设施造成严重损害。

另外酸雨对人体健康也会产生间接的影响,酸雨使地面水呈酸性,地下水中的有害金属含量也增高,饮用这种水或食用酸性河水中的鱼类,会对人体健康产生危害,同样也会波及到野生动物。

七、我国酸雨的大体分布

2001 年,降水年均 pH 值小于 5.6 的市县主要分布在华东、华南、华中和西南地区,北

方只有吉林图们市，陕西渭南市、铜川市、略阳县（略阳县位于秦岭南麓，陕甘川三省交界地带）和天津市降水年均 pH 值小于 5.6。监测的 274 个城市中，降水 pH 值范围在 4.21~8.04 之间、年均降水 pH 值小于 5.6（含 5.6）的城市有 101 个，占统计城市数的 36.9%，出现酸雨的城市有 161 个，占 58.8%。

研究表明，我国酸雨的化学特征是 pH 值低， SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和钙离子（ Ca^{2+} ）质量浓度远远高于欧美国家，而硝酸根（ NO_3^- ）质量浓度则低于欧美，酸性降水中，硫酸根（ SO_4^{2-} ）的当量比约为 6.5：1，属典型的硫酸型酸雨，可见，控制 SO_2 排放总量是抑制我国酸雨污染发展的关键所在。

第二节 我国 SO₂ 的排放概况

一、我国 SO₂ 污染现状

我国是一个以煤为主要能源来源的国家。据统计，我国约 80% 的电力能源、70% 的工业燃料、60% 的化工原料、80% 的供热和民用燃料都来自煤。煤是一种低品位的化石能源，我国的原煤中灰分、硫分含量较高，大部分煤的灰分在 25%~28% 之间，硫分含量变化范围较大，从 0.1%~10% 不等，见表 1-3。

表 1-3 我国不同煤种硫的平均含量

煤种	样品数	煤干燥基含硫量（%）		
		平均值	最低值	最高值
褐煤	91	1.11	0.15	5.20
长烟煤	44	0.74	0.13	2.33
不黏结煤	17	0.89	0.12	2.51
弱黏结煤	139	1.20	0.08	5.81
气煤	554	0.78	0.10	10.24
肥煤	249	2.33	0.11	8.56
焦煤	295	1.41	0.09	6.38
瘦煤	172	1.82	0.15	7.22
贫煤	120	1.96	0.12	9.58
无烟煤	412	1.58	0.04	8.54
样品总数	2093	1.21	0.04	10.24

燃煤排放到大气中的 SO_2 ，若与空气中的 O_3 、 NO_2 等发生光化学反应（光化学反应是指在光的作用下进行的化学反应，如感光成像、光合作用。对大气低层污染气体也会发生相应反应，它和热化学反应不同，热化学反应靠彼此分子碰撞产生能量），会迅速转化为 SO_3 ，进而与水气结合，形成腐蚀和刺激性较强的硫酸，被降水洗脱降到地面，即为通常所说的酸雨（acid rain）。我国的酸雨是硫酸型的，我国每年因酸雨引起的损失超过千亿元。

我国目前的 SO_2 年排放总量大大超出了环境自净能力,造成近 $1/3$ 的国土遭受酸雨污染的严重影响。我国 SO_2 排放量与煤消耗量有密切关系、1983~1991 年两者的相关系数达到 0.96。随着燃煤量的增加,燃煤排放的 SO_2 也不断增长,2005 年我国 SO_2 排放总量达 2500 多万 t,已成为世界上 SO_2 排放量最大的国家,其中火电厂 SO_2 排放量约 1600 万 t。图 1-1 所示为我国 1991~2007 年 SO_2 的排放情况。

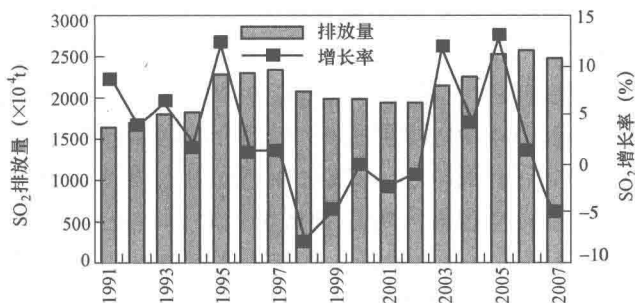


图 1-1 1991~2007 年我国逐年排放 SO_2 情况

有研究表明,按照我国目前的能源政策,2010 年和 2020 年,一次性能源供应结构中煤的比重仍分别占 68.3%和 63.1%。若不采取有效的削减措施,2020 年我国 SO_2 排放量将达到 3500 万 t。

二、以火力发电为主的能源结构的长期性

(一) 我国全面小康社会的经济发展目标

我国全面小康社会的经济发展目标是,到 2020 年实现 GDP 比 2000 年翻两番,也即 2001~2020 年 GDP 年均增长速度达到 7.2%左右,人均 GDP 达到 3200 美元左右。在未来 20 年,我国电力需求增长需要持续保持较快的发展速度,电力装机容量快速增长。据统计,全国电力装机从 2002 年底的 3.57 亿 kW 增加到 2008 年底的 7.92 亿 kW,年均投产装机超过 7000 万 kW,创造了中国乃至世界电力建设史上的新纪录。

(二) 我国能源结构与发达国家相比仍然不同

在我国一次能源和发电能源构成中,煤占据了绝对的主导地位,这与多数工业发达国家的一次能源构成中以石油和天然气为主的特点大不相同。而且在已探明的一次能源储备中,煤炭仍是主要能源,在距地表 1200m 以内的储存量就达 10 000 多亿 t,约占一次能源探明总储存量的 90%,估计煤炭资源总量为 40 000 亿 t;而石油资源为 930 亿 t、天然气预计在 $(3.730 \sim 3.864) \times 10^{13} \text{ m}^3$,水能为 6.76 亿 kW。有关专家预测,到 2050 年,煤在一次能源中所占比例仍在 50%以上,这充分表明在很长一段时间内,我国一次能源以煤为主的格局不会发生变化。

(三) 我国发电装机容量和各类发电所占的比例

根据最新统计数据,2014 年,我国发电设备总容量站上 13 亿 kW 台阶,达 13.6 亿 kW。其中,非化石能源发电装机 4.45 亿 kW,占总装机容量的 33%左右;火电装机突破 9 亿 kW,达 9.16 亿 kW,占比 67%左右。

第三节 国家环境保护政策

《中华人民共和国环境保护法》是最主要的国家法规（见附录二），其次是2002年6月29日第九届全国人大常委会第二十八次会议通过的《中华人民共和国清洁生产促进法》。该法规定：“第一条为了促进清洁生产，提高资源利用效率，减少和避免污染物的生产，保护和改善环境，保障人体健康，促进经济社会与社会可持续发展，制定本法。第二条本法所称清洁生产是指不断采取改进设计、使用清洁的能源和原料，采用先进的工艺技术与设备、改善管理、综合利用等措施，从源头削弱污染，提高资源利用效率，减少或避免生产、服务或产品使用过程中污染物的产生和排放，以减轻或消除对人类健康和环境的危害……。第十八条新建、改进和扩建项目应当进行环境影响评价，对原料使用、资源消耗、资源综合利用以及污染物的产生与处置等进行分析论证，优先采用资源利用率高以及污染物产生量少的清洁生产技术、工艺和设备……。采用能够达到国家或者地方规定的污染物排放标准和污染物排放总量控制指标的污染防治技术……。应当实行清洁生产审核”等。

另外，在《中华人民共和国电力法》《中华人民共和国煤炭法》等一些法律中，也包括了与控制酸雨有关的条文。

2003年1月，国务院签署命令，公布了《排放费征收使用管理条例》，该条例于2003年7月1日实施。条例规定：装机容量在300MW以上的电力企业排放SO₂的数量由省、自治区、直辖市人民政府环境保护行政主管部门核定。与原有法规相比，这一条例的新意主要体现在四个方面：按照排污要素的不同，将原来的超标收费改为排污收费和超标收费并行；根据收费体制的变化，明确排污费必须纳入财政预算，列入环境保护专项资金进行管理；个体工商户也将成为排污费的缴纳对象；规定排污费必须用于重点污染源防治，区域性污染防治，污染防治新技术、新工艺的开发示范和应用。

2005年5月19日，国家发展和改革委员会印发《关于加快火电厂烟气脱硫产业化发展的若干意见》，简称《意见》。预计在未来10年内，我国约有3亿kW装机的烟气脱硫装置投运和建设。

《意见》提出了加快火电厂烟气脱硫产业发展的主要任务，即通过三年的努力，建立健全火电厂烟气脱硫产业化市场监管体系，完善火电厂烟气脱硫技术标准体系和主流工艺设计、制造、安装、调试、运行、检修、后评估等技术标准、规范；主流烟气脱硫设备的本地化率和烟气脱硫设备的可用率达到95%以上；建立有效的中介服务体系 and 行业自律体系。

《意见》就脱硫工程后评估提出了明确要求。后评估是针对已建成投产的脱硫工程进行评估，通过对所采用的烟气脱硫技术的先进性、整套装置的可靠性、投资的经济性、本地化率等进行公正的评价，对以后将要建设的烟气脱硫工程起到借鉴和指导作用。

《中华人民共和国环境保护法》由中华人民共和国第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议于2014年4月24日修订通过，自2015年1月1日起施行。其中“第六十条企业事业单位和其他生产经营者超过污染物排放标准或者超过重点污染物排放总量控制指标排放污染物的，县级以上人民政府环境保护主管部门可以责令其采取限制生产、停产整治等措施；情节严重的，报经有批准权的人民政府批准，责令停业、关闭。第六十九条违反本法规定，构成犯罪的，依法追究刑事责任。”因此没有脱硫设施的新建及改造项目将会面临严

格的处罚。

第四节 SO₂ 的 排 放 标 准

《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)自 2012 年 1 月 1 日起实施,标准中明确规定了火电厂 SO₂的排放标准:“燃煤锅炉须执行烟尘排放低于 30mg/m³、氮氧化物排放低于 100mg/m³ 的标准,重点区域执行烟尘排放低于 20mg/m³、二氧化硫 50mg/m³、氮氧化物 100mg/m³ 的标准”。具体见表 1-4 及表 1-5。污染物排放控制要求如下:

(1) 自 2014 年 7 月 1 日起,现有火力发电锅炉执行表 1-4 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气浓度排放限值。

(2) 自 2012 年 1 月 1 日起,新建火力发电锅炉执行表 1-5 规定的烟尘、二氧化硫、氮氧化物和烟气浓度排放限值。

表 1-4 火力发电锅炉大气污染物排放浓度限值

燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值 (mg/m ³)	污染物排放 监控位置
燃煤锅炉	烟尘	全部	30	
	二氧化硫	新建锅炉	100 200	
			200 400	
	氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	全部	100 200	
	汞及其化合物	全部	0.03	

表 1-5 火力发电锅炉大气污染物特别排放限值

燃料和热能 转化设施类型	污染物项目	适用条件	限值 (mg/m ³)	污染物排放 监控位置
燃煤锅炉	烟尘	全部	20	
	二氧化硫	全部	50	
	氮氧化物 (以 NO ₂ 计)	全部	100	
	汞及其化合物	全部	0.03	

第五节 SO₂控制技术的研究、开发及应用

进入 20 世纪 70 年代以后,SO₂控制技术逐渐由实验室阶段转向应用性阶段。据美国环保署 (EPA) 1984 年统计,世界各国开发、研制、使用的 SO₂ 控制技术已达 184 种,而目

前的数量已超过 200 种。这些技术概括起来可分为三大类：燃烧前脱硫、燃烧中脱硫及燃烧后脱硫（烟气脱硫/FGD）。

燃烧前脱硫技术的种类见表 1-6。

表 1-6 燃烧前脱硫技术的种类

序号	分类	细分类	技术类别	方法	备注
1	煤炭洗选		物理	重力法	广泛使用
2				浮选法	广泛使用
3				重液体富集法	广泛使用
4				磁性分离法	
5				静电分离法	
6				凝聚法	
7				细煤粒—重介质	旋风分离法
8			化学	BHC 法	碱水液法
9				Meyers	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 氧化法
10				LOL 氧化法	O_2 /空气氧化法
11				PETC	氧化法
12				KVB	NO_2
13				氯解法	Cl_2 分解
14				微波法	
15				超临界醇抽提法	
16				TRW	美国
17				CSIRO	澳大利亚
18			微生物法	氧化亚铁硫杆菌	属化学方法
19				氧化硫杆菌	属化学方法
20				古细菌	属化学方法
21				热硫化叶菌	属化学方法
22	煤炭转化	气化	高温化学反应	用水蒸气空气氧气	生成混合可燃气
23			固态排渣鲁奇	Lurgi 加压移动床	第一代技术
24			常压流化床	Winkler	第一代技术
25			常压气流床	K-T	第一代技术
26			两段移动床		第一代技术
27			液态排渣	Lurgi	第二代技术
28			熔渣气流床	Texaco	第二代技术
29			HYGAS 气化		第二代技术
30			干排灰气化	U-gas	第二代技术
31			加压气流床	K-T	第二代技术
32			熔盐催化气化		第三代技术
33			核能余热气化		第三代技术

续表

序号	分类	细分类	技术类别	方法	备注
34	煤炭转化	液化	直接液化	两段催化加氢	转化为液态燃料
35			直接液化	煤-油共炼	转化为液态燃料
36			间接液化		转化为液态燃料
37			水煤浆 CWM	250~300 μ m 的细粉 加水 30%~35%	喷射 30~50 μ m 雾滴

燃烧中脱硫技术的种类见表 1-7。

表 1-7 燃烧中脱硫技术的种类

序号	技术类别	细分类	缩写	备注
1	型煤固硫技术			
2	煤粉炉直接喷钙			如 LIFAC, 若尾部增湿加催化剂
3	流化床燃烧脱硫技术	常压鼓泡流化床	BFB	
4		常压循环流化床	CFB	
5		增压循环流化床	PCFB	
6		增压鼓泡流化床		

烟气脱硫 FDG 分类见表 1-8。

表 1-8 烟气脱硫 (FGD) 分类

序号	类别	细分类		备注
1	湿法 FGD 技术	石灰石 (石灰) /石膏法		
2		海水法		
3		氨 (NH ₃) 法		
4		双碱法		
5		氢氧化镁法 MOH		
6		氧化镁 MO		
7		氢氧化钠法		
8		威尔曼-洛德法	WELLMAN-LORD	
9		CD-121FGD 工艺		日本千代田公司
10		优化双循环湿式 FGD 工艺	RC 公司	美国
11			LLB 公司	德国
12		液柱塔	三菱公司	日本
13		高速水平流 FGD 技术	日立	日本
14		喷雾塔 FGD 技术	川崎	日本
15		合金托盘技术	B&W	美国
16		文丘里湿式石灰石/石膏技术	DUCON	
17			德国 SHU 公司	加 HCOOH

序号	类别	细分类		备注
18	湿法 FGD 技术		德国	吸收塔有特色
19		镁-石膏工艺	日川崎重工	加入 MgO
20		在吸收剂里加乙二酸		防止结垢堵塞
21		在吸收剂里加二元酸		防止结垢堵塞
22		在吸收剂里加苯甲酸		防止结垢堵塞
23		在吸收剂里加结垢防止剂		防止结垢堵塞
24		海水脱硫技术		
25		纯海水脱硫技术	ABB 公司	挪威
26		F-FGD 工艺	ABB-Flakt 公司	挪威
27		在海水中添加吸收剂	Bechtel 公司	美国
28		氨 NH ₃ 法		
29		CE 氨法		
30		NKK 氨法		
31		Bischoff 氨法	Lentjes Bischoff	德国
32		NADS 氨-肥法		
33		磷氨肥法 PAFP		中国
34		双碱法		美国
35		氧化镁/氢氧化镁法		美国
36		钠碱法	韦尔曼-洛德法	美国
37		W-L 法 (典型循环钠碱法)	Wellman-Lord	美国
38		柠檬酸钠法	华东理工大学	中国
39		碱性硫酸铝法		
40		氧化锌法		
41		氧化锰法		
42		湍流式	浙江大学	中国
43		冲击液柱式	浙江大学	中国
44		旋流塔板除尘脱硫一体化	浙江大学	中国
45		硫化碱法	奥托尼普公司	中国 Outokumpu
46	电子束法			
47	脉冲电晕法	在 EBA 法基础上 PPCA	增田闪一	日本
48		荷电干式喷射吸收剂脱硫	CDSI 公司	美国
49		炉内喷钙尾部增湿	LIFAC	美、日、加、欧洲
50		LIFAC 脱硫技术	AVO 公司 Tempella	芬兰
51		LIMB		美国
52		烟气循环流化床 CFB-FGD	鲁奇公司	德国
53		Lurgi CFB-FGD		德国、奥地利
54		RCFB-FGD 技术 (第二代)		德
55		GSA 脱硫装置		丹麦
56		NID 增湿灰循环 FGD 技术	ABB 公司	
57		喷雾干燥法		
58		干法脱硫技术		设备庞大, 效率低

一、目前我国主要的脱硫方法

石灰石/石膏湿法、旋转喷雾干燥法、常压循环流化床法、海水脱硫法、炉内喷钙尾部烟气增湿活化法、电子束法、烟气循环流化床法等共十多种工艺的脱硫装置,我国已实现商业化运行或进行了工业示范。可以说,世界上已有的先进、成熟的火电厂脱硫工艺在我国基本都有,但主流的脱硫技术仍为石灰石/石膏湿法脱硫技术。

受国家环保政策对烟气含二氧化硫排放控制要求到位的推动,实施烟气脱硫的市场需求呈井喷状扩大,大量的资金投向烟气脱硫项目,如何利用好这笔财富使之产生出最好的社会、环境效益成为一个重要的研究课题。

燃煤产生的污染是我国大气污染的主要来源之一。在一次能源消费量及构成中,煤所占的比重高达70%,而我国的耗煤大户主要是燃煤电厂,其二氧化硫排放量占工业总排放量的55%左右,因此,削减和控制燃煤特别是火电厂燃煤二氧化硫污染,是目前我国大气污染控制领域最紧迫的任务。

二、国内引进烟气脱硫技术的情况

国内引进烟气脱硫技术的情况(1995~2004年)见表1-9。

表 1-9 国内引进烟气脱硫技术情况

序号	脱硫技术种类	设计脱硫率 (%)	用户	投运时间 (年、月)	技术来源	机组容量 (MW) / 烟气量 (m ³ /h)
1	石灰石/石膏法湿法	95/80	重庆华能珞璜电厂 1、2 期	1992、1993	日本三菱重工	2×(2×360)/4×1 087 200
2	石灰石/石膏法湿法	82	山东潍坊化工厂	1995	日本三菱重工	2×35t/h/100 000
3	石灰石/石膏法湿法	70	南宁化工集团	1995	日本川崎重工	35t/h/50 000
4	石灰石/石膏法湿法	70	重庆长寿化工厂	1995	日本千代田	35t/h/61 000
5	石灰石/石膏法湿法	80	太原第一热电厂	1996.3	日本日立	200/600 000
6	石灰石/石膏法湿法	95.7	杭州半山电厂	2001.3	德国 Steinmüller	2×125/1 230 000
7	石灰石/石膏法湿法	95	国华北京第一热电厂 1 期	2001	德国 Steinmüller	2×410t/h/1 100 000
8	石灰石/石膏法湿法	95.7	重庆电厂	2001	德国 Steinmüller	2×200/1 960 000
9	石灰石/石膏法湿法	81	广州连州电厂	2000.12	奥地利 AE 公司	2×125/1 090 000
10	石灰石/石膏法湿法	80	江苏扬州电厂	2002	日本川崎重工	200/975 000
11	石灰石/石膏法湿法	95	北京京能热电厂	2002	国电龙源 (FBE) 技术	200/919 523
12	石灰石/石膏法湿法	90	贵州安顺电厂	2003	日本川崎重工	2×300/2×1 256 682
13	石灰石/石膏法湿法	90	浙江钱清电厂	2003.7	浙电设计院 (美 B&W 技术)	125/550 000
14	石灰石/石膏法湿法	95	国华北京第一热电厂 2 期	2003.7	国电龙源 (FBE) 技术	2×410t/h/1 100 000

序号	脱硫技术种类	设计脱硫率 (%)	用户	投运时间	技术来源	机组容量 (MW) / 烟气量 (m ³ /h)
15	石灰石/石膏法湿法	95	山东黄台电厂	2003~2004	国电龙源 (FBE) 技术	2×300/—
16	石灰石/石膏法湿法	95	江苏夏港电厂	2003~2004	国电龙源 (FBE) 技术	2×135/—
17	石灰石/石膏法湿法	90	广东瑞明电厂	2003.10	广电设计院 (AE 公司技术)	2×125/1 081 000
18	石灰石/石膏法湿法	90	太原第二热电厂	2003	武汉凯迪 (AE 技术)	200/806 059
19	石灰石/石膏法湿法	95	江苏镇江电厂	2004	武汉凯迪 (美 B&W 技术)	2×135/—
20	石灰石/石膏法湿法	95	郑州裕中能源有限责任公司	2007	北京博奇 (日本川崎技术)	2×300/—1 210 800
21	石灰石/石膏法湿法	95	郑州裕中能源有限责任公司二期工程	2012.3~2012.7	上海电气石川岛技术	2×1000MW
22	电子束	80	四川成都热电厂	1996.10	日本荏原	200/300 000
23	电子束	85	杭州协联热电厂	2002.11	国华 (日本荏原)	3×130t/h/305 400
24	荷电干式喷射脱硫	70	杭州钢铁集团	1997	美国 AIANCO	35t/h/60 000
25	荷电干式喷射脱硫	70	山东德州电厂	1995	美国 AIANCO	75t/h/10 000
26	荷电干式喷射脱硫	75	广州造纸厂	2000	美国 AIANCO	2×50/2×230 000
27	海水脱硫	90	深圳西部电力公司	1998	挪威 ABC 公司	300/1 100 000
28	海水脱硫	90	福建后石电厂	1999~2000	日本富士化水株式会社	2×600/2×1 915 900
29	LIFAC 法	75	南京下关电厂	1998~1999	芬兰 Tempella 公司	2×125/2×543 600
30	LIFAC 法	65	浙江钱清电厂	2000	芬兰 Tempella 公司	125/550 000
31	烟气循环流化床	85	广州恒运电厂	2002.10	武汉凯迪 (德国 WULFF 公司)	210/783 400
32	烟气循环流化床	90	云南小龙潭电厂	2001	丹麦 Smith-müller	100/487 000
33	氨-硫铵法	90	胜利油田化工厂	1979	日本东洋公司	—/210 000
34	碱式硫酸铝法	95	南京钢铁厂	1981	日本同和公司	—/51 800
35	旋转喷雾干燥	80	沈阳黎明发动机制造公司	1990	丹麦 Niro	35t/h/50 000
36	旋转喷雾干燥	70	山东黄岛电厂	1994	日本三菱重工	200/300 000