



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

火电厂燃煤机组 脱硫脱硝技术

周菊华 主 编
孙海峰 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
全国电力职业教育规划教材

电力生产概论	柏学恭
电业安全	张良瑜
电力机械基础	魏书印
热工基础	李 诚
热能动力专业基础	唐复勇
锅炉运行	李增枝
循环流化床锅炉设备	牛 勇
汽轮机运行	王志伟
循环流化床单元机组集控运行	韩 云
发电厂动力设备	程翠萍
火电厂热力系统	张灿勇
发电厂动力设备及运行	刘玉莲
火电厂辅助生产设备及系统	黄成群
火电厂燃煤机组脱硫脱硝技术	周菊华
热工测量及仪表	张东风
火电厂热工检测技术	程 蓓
单片机应用技术	许红兵
电厂金属材料	王进汝
电厂水处理及化学监督	刘 晓
燃料运输系统及设备	任永红
热力设备检修工艺基础(第二版)	赵鸿逵
热力设备检修实训指导	顾惠新
汽轮机辅机检修	陈 晔
管阀及其检修	袁佩玉
泵与风机检修	柏学恭
新能源发电技术	于国强
核能及新能源发电技术	张灿勇
火电厂运行、检修案例精选	唐复勇
金工实习	李 滨
火力发电专业英语	周菊华
动力专业英语创新教程	杨 杉

ISBN 978-7-5123-0667-7



9 787512 306677 >

定价: 32.00元



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

火电厂燃煤机组 脱硫脱硝技术

主 编 周菊华
副主编 孙海峰
编 写 杨巧云 李珈英 刘 晓
主 审 孟广波 姜雨泽



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材，共分两大篇。第一篇全面阐述了石灰石—湿法（FGD）烟气脱硫技术的基本理论和基本原理。分别介绍了浆液制备系统、SO₂吸收系统、脱硫烟气系统、石膏脱水系统、脱硫废水处理系统、脱硫控制系统中的主要设备及各系统的工艺流程，对脱硫装置的运行和脱硫设备的检修也进行了详细阐述。此外，还介绍了其他典型的脱硫工艺。

第二篇首先简要介绍了火电厂氮氧化物的排放与控制技术，着重阐述了选择性催化还原法（SCR）烟气脱硝技术的基本理论和基本原理。分别对选择性催化还原脱硝工艺，SCR系统还原剂及主要设备，SCR系统催化剂，SCR装置的安装、调试与运行等内容进行了详细介绍。此外，还介绍了SCR装置在国内部分燃煤机组中的应用实例等。

本书可作为高职高专电力技术类环境工程、火电厂集控运行、热能动力装置、热工检测与控制技术专业和相关动力类专业的必修课或限选课教材，也可作为相关工种职工技能鉴定培训教材。同时适用于从事火电厂烟气脱硫脱硝的工程技术人员和相关环保企业脱硫脱硝技术人员阅读和参考，也可作为大学本科院校环保和热能专业师生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

火电厂燃煤机组脱硫脱硝技术/周菊华主编. —北京：中国电力出版社，2010.6

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-0667-7

I. ①火… II. ①周… III. ①火电厂—煤烟污染—烟气脱硫—职业教育—教材②火电厂—煤烟污染—烟气—脱硝—职业教育—教材 IV. ①X773.013

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 135773 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 474 千字
定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

前言

近年来,我国国民经济增长迅速,对电力的需求增长更快,作为主要电源供应的燃煤发电机组逐年增加,电力工业煤炭的消耗量约为全国原煤产量的40%,与燃煤有关的区域性和全球性的环境问题越来越突出。燃煤火力发电装置排放的对人类生存环境构成直接危害的主要污染物有粉尘、 NO_x 及 SO_2 。因此,大力发展燃煤火电厂的烟气脱硫脱硝技术,推广烟气脱硫脱硝装置对于控制 SO_2 、 NO_x 排放、保护环境、走科学和可持续发展的道路具有重要意义。通过多年来的运行实践,石灰石—湿法烟气脱硫和选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝技术具有技术成熟、效率高、运行可靠等优点。

目前,无论是正在运行的,还是在建的火力发电机组,控制 SO_2 、 NO_x 的排放,建设脱硫脱硝装置都是势在必行的。为了适应社会和行业技术的发展,在电力和动力类高职、中职学生中普及烟气脱硫脱硝技术知识,培养职业技能型环保人才,对推动我国洁净煤发电技术的发展和应用显得尤为重要。火力发电厂人员或有关专业学生掌握 SO_2 、 NO_x 的产生、危害及脱硫脱硝方法也是非常必要的。本书是结合当前节能减排形势和教学需要,根据电力职业技术学院环境工程、集控运行、热能动力装置和热工检测与控制技术等专业的教学计划和环保技术课程的教学大纲编写的。通过学习,使学生具有综合职业能力和适应职业变化的能力。

本书共分两篇,第一篇有九章,全面系统地阐述了石灰石—湿法烟气脱硫技术的基本理论和基本原理。各子系统的主要设备及工艺流程,脱硫装置的运行和脱硫设备的检修。对海水脱硫、旋转喷雾干燥法脱硫、炉内喷钙加尾部增湿活化脱硫、电子束法烟气脱硫工艺也进行了简单的叙述。

第二篇有七章,全面系统地阐述了选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝技术的基本理论和基本原理。分别对选择性催化还原脱硝工艺,SCR系统还原剂及主要设备,SCR系统催化剂,SCR装置的安装、调试与运行等内容进行了详细介绍。此外,还介绍了SCR装置在国内部分燃煤机组中的应用实例等。

内容按照我国电力工业发展趋势,在取材方面,尽量反映燃煤机组脱硫脱硝装置的现状、特点,同时又注意吸收国内外脱硫脱硝装置的先进经验和最新技术。

本书由武汉电力职业技术学院周菊华主编,华电长沙发电有限公司孙海峰副主编,其中周菊华编写第一~第六章、第九~第十二章和第十六章,杨巧云编写第七章,李珈英编写第八章和第十四章,刘晓编写第十三章,孙海峰编写第十五章。全书由周菊华统稿。沈阳工程学院孟广波担任第一篇主审,山东电力研究院姜雨泽担任第二篇主审,主审老师详细审阅了书稿,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此深表感谢。

本书在编写过程中，得到中国电力出版社、武汉电力职业技术学院及相关院校的老师 and 电力行业（特别是华能汕头电厂、深圳西部电厂、华电长沙发电有限公司、湖北青山热电厂）同行们的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中缺点和疏漏之处在所难免，恳切希望使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编者

2010年8月

目 录

前言

第一篇 火电厂燃煤机组脱硫技术

第一章 绪论	1
第一节 概述.....	1
第二节 石灰石—石膏湿法烟气脱硫技术工艺原理及特点.....	5
复习思考题.....	14
第二章 石灰石浆液制备系统及设备	16
第一节 石灰石成分.....	16
第二节 石灰石破碎系统.....	17
第三节 石灰石浆液制备系统.....	18
第四节 石灰石供浆系统.....	21
第五节 主要设备.....	22
复习思考题.....	25
第三章 吸收系统及设备	27
第一节 吸收塔.....	27
第二节 喷淋系统.....	34
第三节 浆液循环系统.....	38
第四节 除雾器及冲洗系统.....	40
第五节 氧化系统及搅拌器.....	45
复习思考题.....	51
第四章 烟气系统及设备	52
第一节 FGD 烟气系统组成及原理.....	52
第二节 增压风机.....	54
第三节 烟气换热器.....	56
第四节 烟气挡板.....	61
第五节 湿烟囱.....	64
复习思考题.....	68
第五章 烟气脱硫副产物处置系统及设备	69
第一节 石膏脱水系统.....	69
第二节 旋流器.....	74
第三节 脱水机.....	76

第四节	烟气脱硫废水处理系统	80
第五节	脱硫石膏的综合利用	84
第六节	防止结垢、磨损、腐蚀和冰冻的对策	87
复习思考题	.....	91
第六章	其他烟气脱硫工艺	92
第一节	海水脱硫	92
第二节	旋转喷雾干燥法脱硫	98
第三节	炉内喷钙加尾部增湿活化脱硫	100
第四节	电子束法烟气脱硫	102
复习思考题	.....	105
第七章	脱硫装置的运行	106
第一节	脱硫装置的启动与停运	106
第二节	脱硫装置的运行维护	111
第三节	脱硫装置的事故处理	118
复习思考题	.....	122
第八章	运行参数的检测及控制系统	123
第一节	运行参数的检测与测点布置	123
第二节	脱硫装置的控制系統	129
第三节	脱硫装置的顺序控制、保护与连锁	134
复习思考题	.....	136
第九章	石灰石湿法烟气脱硫装置检修	137
第一节	石灰石制备、储存及输送系统	137
第二节	二氧化硫吸收系统	143
第三节	烟气系统	150
第四节	副产品处理系统	153
复习思考题	.....	156

第二篇 火电厂燃煤机组脱硝技术

第十章	烟气脱硝技术概述	158
第一节	NO _x 的危害及燃煤 NO _x 的生成	158
第二节	NO _x 排放控制法规	161
第三节	降低 NO _x 排放的燃烧技术	162
第四节	烟气脱硝技术	167
第五节	国内外烟气脱硝装置的应用情况	172
复习思考题	.....	173
第十一章	选择性催化还原 SCR 脱硝原理与工艺	174
第一节	SCR 反应的基本化学原理	174
第二节	选择性催化还原脱硝工艺	176

第三节 影响 SCR 的反应条件和工艺参数	185
复习思考题	190
第十二章 SCR 系统还原剂及主要设备	191
第一节 SCR 系统还原剂	191
第二节 注氨系统及设备	200
第三节 SCR 反应器	204
复习思考题	214
第十三章 SCR 系统催化剂	215
第一节 催化剂的种类及固体催化剂	215
第二节 催化剂的性能	218
第三节 催化剂的再生	223
第四节 整体式块状载体	225
第五节 商用 SCR 催化剂	228
第六节 SCR 催化剂基本参数	234
复习思考题	237
第十四章 SCR 装置的控制系統	239
第一节 控制原理与方法	239
第二节 SCR 控制系统要求	247
第三节 烟气在线监测系统	249
复习思考题	251
第十五章 SCR 装置的安装、调试与运行	253
第一节 SCR 脱硝设备的安装	253
第二节 SCR 脱硝系统的调试	260
第三节 SCR 脱硝系统的运行	263
第四节 SCR 脱硝装置的运行维护	269
第五节 SCR 装置的运行对锅炉的影响	271
第六节 SCR 系统的性能测试	273
第七节 氨的特性及相关安全问题	280
复习思考题	281
第十六章 SCR 装置在国内燃煤机组中的应用实例	283
第一节 华电长沙电厂	283
第二节 福建后石电厂	290
第三节 安徽铜陵电厂	295
第四节 厦门嵩屿电厂一期	298
复习思考题	301
参考文献	302

第一篇 火电厂燃煤机组脱硫技术

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、燃煤电厂 SO₂ 的排放现状及危害

大气是参与水和各种元素循环的重要环境因素，在保持地球热平衡方面及保护地球上生物体免受过强宇宙射线、紫外线照射方面起着重要作用，但是随着社会经济的发展，城市化和工业化进程的加速，大量燃料的燃烧、工业废气和汽车尾气的排放，使大气环境质量日趋恶化，它不但破坏自然生态平衡，还直接威胁人类健康乃至生命。大气污染已被列为全球性十大环境问题之首。而在全球范围内普遍发生的大气污染物中，按先后顺序考虑治理的大气污染物是 SO₂、可吸入颗粒物 (PM₁₀)、O₃、NO_x (NO 和 NO₂)、铅、CO₂、石棉及反应性烃，其中 SO₂ 被列为首位。据联合国环境规划署 (UNEP) 的最新估算指出，天然硫排放量占全球硫排放总量的 50%。但在局部地区，人为排放量占该地区总排放量的 90% 以上，而天然硫排放量仅占 4%，其余 6% 来自其他地区。众所周知，人为源和天然源排放的 SO₂ 和 NO_x 是形成酸雨或称酸沉降的“元凶”。因此，控制人为 SO₂ 和 NO_x 排放的重要性是显而易见的。

我国是一个发展中国家，是世界上最大的煤炭生产和消费国。在能源结构上原煤占能源消费总量的 70%，是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一。我国在取得经济高速发展的同时，也正承受着巨大的资源和环境压力，SO₂ 排放量多年都在 2000 万 t 上下，2006 年排放量达 2588.8 万 t，2007 年排放量达 2430 万 t，2008 年排放量达 2321 万 t，2009 年排放量达 2214 万 t，2010 年中国 SO₂ 排放量将力争比 2009 年再削减 40 万 t，新增燃煤电厂脱硫装机容量 5000 万 kW。在电力能源结构中，煤电约占 3/4，而且在相当长的时期内不会有很大的变化。燃煤火电厂在将一次能源煤炭转换为二次能源电力的过程中，会产生废气、废水、灰渣及噪声等污染物，其废气中的 SO₂ 是大气污染物之一，SO₂ 的大量排放既严重污染环境又造成硫资源的巨大浪费。为了治理大量燃煤造成的严重酸雨危害，国家不断加大 SO₂ 排放的治理力度，要求新建电厂必须配套建设脱硫装置，预留脱硝装置的位置。已投产发电机组限期改造，加装脱硫装置。

当前，我国控制酸雨和 SO₂ 污染所采取的政策和措施有：

- (1) 把酸雨和 SO₂ 污染综合防治工作纳入国民经济和社会发展规划；
- (2) 根据煤炭中硫的生命周期进行全过程控制；
- (3) 调整能源结构，优化能源质量，提高能源利用率；
- (4) 重点治理火力发电厂的 SO₂ 污染；
- (5) 研究开发 SO₂ 治理技术和设备；
- (6) 实施排污许可证制度，进行排污交易试点。

1. SO₂ 污染源

SO₂ 是当今人类面临的主要大气污染物之一。SO₂ 的主要来源分为两大类：天然污染源和人为污染源，见表 1-1。在我国人为污染源中，燃煤排放的 SO₂ 最多，约占排放总量的 87%，且集中在城市和工业区上空，造成了城市及工业区的严重污染。

表 1-1 SO₂ 天然污染源和人为污染源特点比较

分 类	发 生 源	特 性 及 影 响	产 生 量
天然源	(1) 海洋硫酸盐雾； (2) 缺少氧气的水和土壤释放的硫酸盐； (3) 细菌分解的有机化合物； (4) 火山爆发； (5) 森林失火	(1) 全球性分布在广阔的地区，以低浓度排放在大气中，不易稀释和被净化； (2) 一般不会产生酸雨现象； (3) 人力无法控制	1/3
人为源	(1) 矿物燃料燃烧，占 3/4 以上； (2) 金属冶炼； (3) 石油生产； (4) 化工生产； (5) 采矿等	(1) 比较集中，在占地球表面不到 1% 的城市和工业区上空占主导地位； (2) 是发生酸雨的基本原因； (3) 人力可以控制	2/3

2. SO₂ 的危害

SO₂ 的污染属于低浓度、长期的污染，对生态环境是一种慢性叠加性危害，它的存在对自然生态平衡、人类健康、工农业生产、建筑物及材料等方面都造成一定程度的危害。

(1) SO₂ 对人体的危害。空气中 SO₂ 对人体健康的影响主要是通过呼吸道系统进入人体，与呼吸器官作用，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。大量资料表明，SO₂ 与大气中其他污染物协同作用，对人体健康的危害更大。

(2) SO₂ 对植物的危害。植物对 SO₂ 特别敏感，主要通过叶面气孔进入植物体内，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，就会破坏植物的正常生理机能，从表面看，叶片出现伤斑、发黄、枯卷、落叶、落果或生长缓慢等，严重时则会枯死。同时会使植物对病虫害的抵抗力下降，造成间接危害。

(3) 引起酸雨。给人类带来最严重的问题是酸雨。大气中的 SO₂、NO_x 与氧化性物质 O₃、H₂O₂ 和其他自由基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（即酸雨）返回地面。酸雨对生态系统造成危害，它会使湖泊变成酸性，导致水生生物死亡；使土壤酸化和贫瘠化，农作物和树木叶片发黄、落叶，造成农作物减产。酸雨还加速建筑物和材料的腐蚀，从而破坏各种材料、建筑物、人工制品和文物古迹等。

我国的大气污染属典型的煤烟型污染，以粉尘和酸雨危害最大。目前，煤炭燃烧产生的 SO₂ 所造成的污染面积已占国土面积的 40% 左右。

二、SO₂ 的排放标准

我国于 1991 年颁布 GB 13223—1991《燃煤电厂大气污染物排放标准》，1996 年该标准重新修订发布，替代 GBJ 4—1993 的火电厂大气污染物排放标准部分，更名为 GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》，于 1997 年 1 月实施。

标准分年限规定了火电厂最高允许 SO₂ 排放量、烟尘排放浓度和烟尘黑度，规定了第Ⅲ时段火电厂 SO₂ 与 NO_x 的最高允许排放浓度。其适用于单台出力在 65t/h 以上除层燃炉和抛煤炉以外的火电厂锅炉与单台出力在 65t/h 以下的煤粉锅炉的火电厂的排放管理，以及建设项目环境影响评价、设计、竣工验收及其建成后的排放管理。

2003 年修订的《火电厂大气污染排放标准》将 SO₂ 排放浓度限制为小于 400mg/m³，同

时, 还要满足地区总量的控制要求。经过近几年的发展, 脱硫装置的运行经验、管理经验都比较成熟, 为此重新修订的标准是: ①新建、改建和扩建的火电厂锅炉 SO_2 排放浓度限制为小于 $200\text{mg}/\text{m}^3$; ②属资源综合利用的煤矸石火电厂锅炉执行 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 的限值; ③对燃用除高炉煤气外的其他气体执行 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 排放限值, 燃用高炉煤气时执行 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 排放限值。

到 2015 年 1 月 1 日, 不再区分电厂位置, 对已安装烟气脱硫装置的火电厂锅炉, 加强运行管理, 优化运行, 执行 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放浓度限值, 对位于西部非两控区的燃用特低硫煤(燃煤硫分小于 0.5%) 预留烟气脱硫场的坑口电厂, 安装烟气脱硫装置, 执行 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放浓度限值。对以煤矸石等为主要燃料的资源综合利用火电厂锅炉, 采用炉内加石灰石脱硫及烟气脱硫, 执行 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放浓度限值。

从世界各国的经验来看, 美国、日本和欧盟国家均对新建电厂提出了严格的要求, 美国 2005 年的电站锅炉 SO_2 排放标准要求新建燃煤电厂脱硫效率必须大于 95%, 并有相应的排放量限制。欧盟现行的《大型燃烧装置大气污染物排放限制指令》(2001/80/EC) 要求新建大型燃烧装置的排放浓度必须小于 $200\text{mg}/\text{m}^3$, 实际上是要求安装高效率的脱硫装置。日本的燃煤电厂基本上安装了脱硫装置。

三、 SO_2 污染的控制途径

控制 SO_2 的方法分为燃烧前脱硫、燃烧中脱硫和燃烧后脱硫三类。

1. 燃烧前脱硫

燃料(主要是原煤)在使用前, 脱除燃料中硫分和其他杂质是实现燃料高效、洁净利用的有效途径和首选方案。燃烧前脱硫也称为燃煤脱硫或煤炭的清洁转换。主要包括煤炭的洗选、煤炭转化(煤气化、液化)及水煤浆技术。

2. 燃烧中脱硫

燃烧过程中脱硫主要是指当煤在炉内燃烧的同时, 向炉内喷入脱硫剂(常用的有石灰石、白云石等), 脱硫剂一般利用炉内较高温度进行自身煅烧, 煅烧产物(主要有 CaO 、 MgO 等)与煤燃烧过程中产生的 SO_2 、 SO_3 反应, 生成硫酸盐或亚硫酸盐, 以灰的形式随炉渣排出炉外, 减少 SO_2 、 SO_3 向大气的排放, 达到脱硫的目的。

3. 燃烧后脱硫

燃烧后脱硫也称烟气脱硫(Flue Gas Desulfurization, FGD), 是将烟气中的 SO_2 进行处理, 达到脱硫的目的。烟气脱硫技术是当前应用最广、效率最高的脱硫技术, 是控制 SO_2 排放、防止大气污染、保护环境的一个重要手段。工业发达国家从 20 世纪 70 年代起相继颁布法令, 强制火电厂安装烟气脱硫装置, 促进了烟气脱硫技术的发展和完善。

四、火电厂烟气脱硫的工艺特点

(1) 烟气脱硫的基本原理是以一种碱性物质作为 SO_2 的吸收剂(脱硫剂)。石灰石是大规模烟气脱硫较为有效廉价的理想吸收剂之一, 用石灰石制成的吸收剂浆液与烟气接触来进行脱硫反应。目前, 以石灰石作为 SO_2 吸收剂的脱硫装置在国内外火电厂烟气脱硫中得到了最广泛的应用。

(2) 烟气脱硫是指脱除烟气中的 SO_2 , 有的脱硫工艺同时可脱除 SO_3 , 有的工艺则不能有效地脱除 SO_3 。但由于烟气中 SO_3 的含量仅为 SO_2 的 3%~5%, 在锅炉烟气中 SO_3 一般只占到几分之一(按容积), 因此, 通常并不考虑 SO_3 的脱除率。

(3) 由于燃煤电厂所产生的烟气量巨大, 一般达每小时数十万到数百万立方米, 烟温通

常为 120~150℃，而烟气中的 SO₂ 浓度却十分低，通常每立方米（标况）烟气中只有数千毫克的 SO₂，而 SO₂ 脱除率要求在 90% 以上。因此，烟气脱硫装置庞大，运行费用也较高。

(4) 烟气脱硫工艺会产生脱硫副产物，因此，实施烟气脱硫技术的同时需考虑脱硫产物的有效回收与处理，以防二次污染。

五、火电厂烟气脱硫装置的特殊性

火电厂烟气脱硫装置与火力发电设备相比较，其特点及运行规律有显著不同。

1. 脱硫装置多样性

由于燃煤电厂锅炉等主机设备的运行工况、煤质的排烟条件、现场条件、环保要求、脱硫吸收剂的来源、脱硫副产品的性质及其利用等方面的差异，尽管工艺流程基本相同，但制造厂家设计的脱硫装置结构和参数等均存在较大的差别，这与火电机组的产品单一、主机设备系列化有很大的不同。

2. 化学过程的工艺特点

火力发电设备的突出特点是存在大量耐高温的承压部件，以及防磨、防爆装置等，工艺过程以燃烧和传热为主要特征；而脱硫装置的设计和运行以强化传质，控制反应环境，处理大量的化学反应产物，防止设备腐蚀、结垢、冰冻与堵塞等为主要特征，更接近化工过程。

3. 运行的目标不同

脱硫装置运行的目标是控制烟气排放的 SO₂ 浓度及一定时间间隔内 SO₂ 的排放总量，而发电设备运行的目标是精确地向电网提供电能，因而，两者的运行方式和要求的指标是不同的。脱硫装置的运行取决于锅炉设备的运行工况，而脱硫装置的运行工况对锅炉设备也存在不同程度的影响。

六、烟气脱硫装置的类型

根据吸收剂及脱硫产物在脱硫过程中的干湿状态，火力发电行业一般将脱硫技术分为湿法、干法和半干（半湿）法。

(1) 湿法烟气脱硫技术是用含有吸收剂的浆液在湿态下脱硫和处理脱硫产物，该方法具有脱硫反应速度快、脱硫效率高、吸收剂利用率高、技术成熟可靠等优点，但也存在初投资大、运行维护费用高、需要处理二次污染等问题。应用最多的湿法烟气脱硫技术为石灰石湿法，如果将脱硫产物处理为石膏并加以回收利用，则为石灰石—石膏湿法，否则为抛弃法。抛弃法的设备简单、操作较容易，设备投资及运行费用可降低。当烟气浓度较低，脱硫产物无回收价值或投资有限，且大气污染排放控制严格时，可考虑抛弃法，但废渣需要占用场地堆放，容易造成二次污染。

其他湿法烟气脱硫技术还有氨洗涤脱硫和海水脱硫等。

(2) 干法烟气脱硫工艺均在干态下完成，无污水排放，烟气无明显温降，设备腐蚀较轻，但存在脱硫效率低、反应速度慢、石灰石利用率较低等问题，有些方法在设备大型化的进程中困难很大，技术尚不成熟（主要有炉内喷钙等技术）。

(3) 半干法通常具有在湿态下进行脱硫反应，在干态下处理脱硫产物的特点，可以兼备干法和湿法的优点。主要包括喷雾干燥法、炉内喷钙尾部增湿活化法、烟气循环流化床脱硫法、电子束辐照烟气脱硫脱氮法等。

七、石灰石湿法烟气脱硫装置在我国火力发电厂的应用

目前，在众多的脱硫工艺中，石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺（简称 FGD）应用最广。

该工艺最早由英国皇家化工工业公司研制出来，经过欧美等国家几十年来的生产实践和不断完善，各项经济技术指标基本成熟，市场占有率达 80% 以上。

FGD 的特点如下：

- (1) 烟气脱硫效率高，一般大于 95%；
- (2) 钙硫比 (Ca/S) 低，一般不大于 1.05，吸收剂利用率高；
- (3) 系统简单，装机容量大，设备利用率高，技术成熟可靠，技术进步快；
- (4) 适用煤种广，烟气量范围大，可与大型燃煤机组单元匹配；
- (5) 石灰石吸收剂来源广，资源丰富，价格便宜，破碎磨细简单；
- (6) 脱硫副产品为二水石膏，可用于生产建材产品和水泥缓凝剂等，不产生二次污染；
- (7) 脱硫装置比较复杂，占地面积相对较大，初投资较高；
- (8) 厂用电率较高 (约为 1%~1.8%)，需要脱硫废水处理设备。

目前我国石灰石湿法烟气脱硫技术正朝着进一步简化结构、减少投资、提高自动化程度和管理水平、降低运行和维护费用的目标努力。

第二节 石灰石—石膏湿法烟气脱硫技术工艺原理及特点

一、脱硫装置的构成

一个典型的石灰石湿法烟气脱硫系统一般包括 8 个子系统：石灰石浆液制备系统、SO₂ 吸收系统、烟气系统 (含烟气加热装置)、石膏脱水及储存系统、废水处理系统、公用系统、事故浆液排放系统和电气与监测控制系统，如图 1-1 所示。

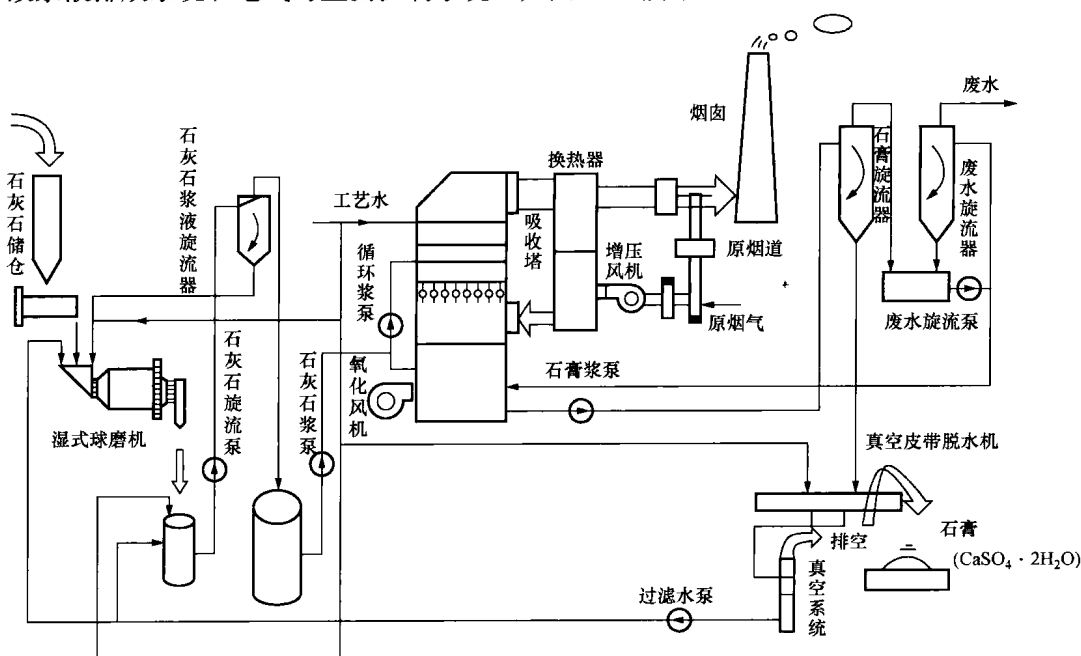


图 1-1 典型石灰石湿法烟气脱硫装置

(1) 石灰石浆液制备系统。制备并为吸收塔提供满足要求的石灰石浆液。石灰石制备系统的主要设备包括石灰石储仓、湿式球磨机、石灰石浆液罐和浆液泵。

(2) SO_2 吸收系统。通过石灰石浆液吸收烟气中的 SO_2 ，生产亚硫酸产物，氧化空气将其氧化，并以石膏的形式结晶析出。同时，由除雾器将烟气中的液滴除去。 SO_2 吸收系统的主要设备包括吸收塔、石灰石浆液循环泵氧化风机以及除雾器等。

(3) 烟气系统。为脱硫系统运行提供烟气通道，进行烟气脱硫装置的投入和切除，降低吸收塔入口烟气温度、提升净烟气的排烟温度。烟气系统的主要设备包括烟道挡板、烟气换热器和增压（脱硫）风机等。

(4) 石膏脱水及储存系统。将来自吸收塔的石膏浆液浓缩脱水，生产副产品石膏，并储存和外运。石膏脱水及储存系统的主要设备包括石膏浆液排出泵、石膏浆液箱、石膏浆液泵、废水旋流器、真空皮带脱水机及石膏储仓等。

(5) 废水处理系统。处理脱硫系统产生的废水（正常情况下主要是石膏脱水系统产生的废水），以满足排放要求。主要设备包括氢氧化钙制备和加药设备、澄清池、絮凝剂加药设备、过滤水箱、絮凝箱、沉降箱及澄清器等。

(6) 公用系统。为脱硫系统提供各类用水和控制用气。主要设备包括工艺水箱、工艺水泵、工业水箱、工业水泵、冷却水泵及空气压缩机等。

(7) 事故浆液排放系统。包括事故储罐系统和地坑系统，用于储存 FGD 装置大修或发生故障时由 FGD 装置排出的浆液。包括事故浆液储罐、地坑、搅拌器和浆液泵。

(8) 电气与监测控制系统。主要由电气系统、监控调节系统和连锁环节等构成，其功能是为系统提供动力和控制用电；通过 DCS 系统控制全系统的启停、运行工况调整、连锁保护、异常情况报警和紧急事故处理；通过在线仪表监测和采集各项运行数据，还可完成经济分析和生产报表。包括电气设备、控制设备以及在线仪表等。

二、石灰石湿法烟气脱硫工艺过程的描述

FGD 系统采用石灰石作为脱硫吸收剂，石灰石破碎与水混合，磨细成粉状，制成吸收浆液（当采用石灰为吸收剂时，石灰粉经消化处理后加水搅拌制成吸收浆液）。制备好的吸收剂浆液储存在吸收剂浆罐（或池）中，由输送泵送到吸收塔底部浆罐中。

来自锅炉引风机出口的原烟气经 FGD 增压风机（Booster up Fan, BUF）提升压头。进入气—气加热器（Gas Gas Heater, GGH）的降温侧，高温原烟气降温后进入吸收塔。排烟通过吸收塔时，烟气中的 SO_2 被喷淋浆液所吸收，进入液相（伴随有部分 SO_2 被氧化），烟气在吸收塔内同时被冷却和被水汽所饱和。脱硫后的烟气在离开吸收塔之前需通过除雾器（Mist Eliminator, ME）除去烟气中夹带的浆体液滴。离开除雾器的清洁、饱和烟气再返回到 GGH 的加热侧，提升烟温，然后经 FGD 系统出口烟道，由烟囱排向大气。

吸收 SO_2 的浆液落入吸收塔底部反应罐，通过脱硫循环泵与补充的石灰石浆液再次从吸收塔内的喷淋系统喷出，洗涤烟气中的 SO_2 。混合浆液在反应罐中沉淀析出。在石灰石强制氧化工艺过程中，将压缩空气喷入反应罐中，使已吸收的 SO_2 转化成硫酸盐，以石膏形式沉淀析出。

随着烟气中的 SO_2 不断被吸收，反应罐中源源不断地沉淀出固体副产物，因此必须从反应罐中将生成的固体副产物送往脱水系统，以维持物料平衡。废弃的亚硫酸钙（ CaSO_3 ）副产物在脱水系统中，从馈出的浆液中分离出来，生成石膏外售或者加工成成品出售。

湿法 FGD 工艺属于煤燃烧后的脱硫技术，其特点是整个脱硫系统位于空气预热器、除尘器之后，脱硫过程在溶液中进行，脱硫剂和脱硫生成物均为湿态，其脱硫过程反应温度低

于露点，所以脱硫后的烟气一般需再加热才从烟囱排出。湿法 FGD 过程是气液反应，其脱硫反应速度快，脱硫效率和吸收剂利用率高，运行可靠性高，适合于火力发电厂锅炉排烟脱硫。

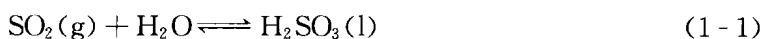
三、脱除 SO₂ 的化学反应机理

从烟气脱除 SO₂ 的过程在气、液、固三相中进行。石灰石浆液吸收 SO₂ 是一个气液传质过程。该过程可用薄膜理论解释，分为如下几个阶段：

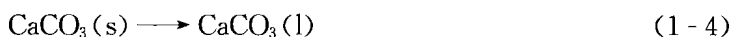
- (1) 气态反应物从气相内部迁移到气—液界面；
- (2) 气态反应物穿过气—液界面进入液相，并发生化学反应；
- (3) 反应组分从液相界面迁移到液相内部；
- (4) 进入液相的反应组分与液相组分发生反应；
- (5) 已溶解的反应物的迁移和由反应引起的浓度梯度产生的反应物的迁移。

整个反应过程主要由气态和液态的扩散及伴随的化学反应完成，液态中发生的化学反应可加快物质交换速度。因此，脱硫过程是一个复杂的物理、化学过程。用以下化学反应式来描述脱硫过程的一些主要步骤。

气相 SO₂ 被液相吸收（石灰石为吸收剂）



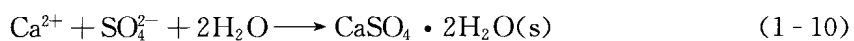
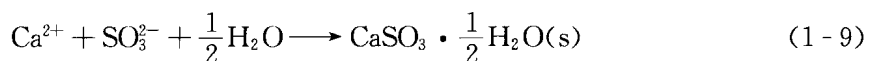
吸收剂溶解和中和反应



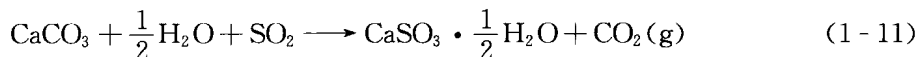
氧化反应



结晶析出



总反应式



反应式中 (S) 指固体，(g) 指气体，(l) 指水溶液。

石灰石湿法 FGD 工艺过程的脱硫反应速率取决于上述 4 个步骤。下面将分述这 4 个步骤的特点。

1. 气相 SO₂ 被液相吸收的反应（石灰石为吸收剂）

SO₂ 是一种极易溶于水的酸性气体，在反应式 (1-1) 中，SO₂ 经扩散作用从气相溶入

液相中，与水生成亚硫酸 (H_2SO_3)， H_2SO_3 迅速离解成亚硫酸氢根离子 (HSO_3^-) 和氢离子 (H^+)，见式 (1-2)。只有当 pH 值较高时， HSO_3^- 的二级电离才会产生较高浓度的 SO_3^{2-} ，见式 (1-3)。式 (1-1) 和式 (1-2) 都是可逆反应，要使 SO_2 的吸收不断进行下去，就必须中和式 (1-2) 中电离产生的 H^+ ，即降低吸收液的酸度。碱性吸收剂的作用就是中和 H^+ ，见式 (1-5)。当吸收液中的吸收剂反应完后，如果不添加新的吸收剂或添加量不足，吸收液的酸度将迅速提高，pH 值迅速下降，当 SO_2 溶解达到饱和后， SO_2 的吸收就告终止。

2. 吸收剂溶解和中和反应

上述一系列反应步骤中关键的是式 (1-4) 和式 (1-5)，即 Ca^{2+} 的形成。 CaCO_3 是一种极难溶的化合物，其中和作用实质上是向介质提供 Ca^{2+} 的过程，这一过程包括固体 CaCO_3 的溶解 [见式 (1-4)] 和进入液相中 CaCO_3 的分解 [见式 (1-5)]。固体石灰石的溶解速度，反应活性以及液相中 H^+ 浓度 (pH 值) 影响中和反应速度和 Ca^{2+} 的形成，氧化反应以及其他一些化合反应也会影响中和反应速度。

在上述化学反应步骤中， Ca^{2+} 的形成是一个关键的步骤，之所以关键，是因为 SO_2 正是通过 Ca^{2+} 与 SO_3^{2-} 或与 SO_3^- 化合得以从溶液除去。

由反应式 (1-5) 生成的亚硫酸根 (SO_3^{2-}) 可以进一步中和剩余的 H^+ [见式 (1-6)]，但反应式 (1-6) 是否发生取决于浆液的 pH 值。浆体液相中的 H_2SO_3 、 HSO_3^- 、 SO_3^{2-} 和 H^+ (pH 值) 浓度存在一个平衡关系，图 1-2 显示了 H_2SO_3 、 HSO_3^- 、 SO_3^{2-} 相对含量与 pH 值的函数关系。当 pH 值低于 2.0 时，被吸收的 SO_2 大多以 H_2SO_3 的形式存在于液相中，当 pH 值为 4~5 时， H_2SO_3 主要离解成 HSO_3^- ，当 pH 值高于 6.5 时，液相中主要是 SO_3^{2-} 离子。吸收塔内浆液的 pH 值基本上为 5~6，所以溶解在循环浆液中的 SO_2 主要以 HSO_3^- 的形式存在。

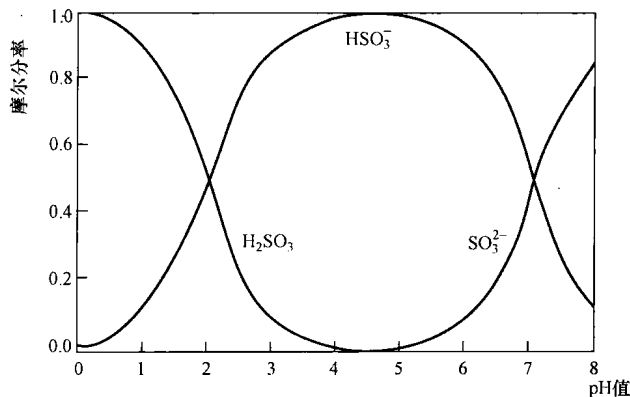


图 1-2 亚硫酸平衡曲线

为了更有效地捕集 SO_2 ，至少必须从式 (1-1) ~ 式 (1-3) 中去掉一种反应产物，以保持平衡继续向右移动，从而使 SO_2 继续不断地进入溶液。所以，一方面通过加入 CaCO_3 消耗 H^+ ；另一方面通过加入氧气 (O_2) 使 HSO_3^- 氧化反应生成硫酸盐。

3. 氧化反应

亚硫酸的氧化是湿法石灰石 FGD 工艺中的另一个重要反应 [见式 (1-7) 和式