

大型电站 煤粉锅炉烟气脱硫技术

DAXING DIANZHAN
MEIFEN GUOLU YANQI TUOXIAO JISHU

张 磊 刘树昌 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

大型电站 煤粉锅炉烟气脱硫技术

DAXING DIANZHAN
MEIFEN GUOLU YANQI TUOXIAO JISHU

张 磊 刘树昌 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书密切结合生产实际,主要介绍了我国大型火电机组煤粉锅炉的脱硫技术。全书共七章,内容包括石灰石—石膏湿法烟气脱硫机械设备与系统、脱硫岛设备与检修、脱硫装置自动控制及电气系统与设备、石灰石—石膏湿法脱硫装置的调试与性能试验、石灰石—石膏湿法脱硫装置的运行以及海水脱硫系统与运行。

本书可作为大型火力发电厂脱硫人员的培训教材,也可作为电站脱硫设备设计、制造和研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大型电站煤粉锅炉烟气脱硫技术/张磊,刘树昌主编.
—北京:中国电力出版社,2009
ISBN 978-7-5083-8770-3

I. 大… II. ①张…②刘… III. 火电厂—煤粉锅炉—烟气
脱硫 IV. X773.013

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 069687 号

中国电力出版社出版、发行

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

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 479 千字 1 插图

印数 0001—3000 册 定价 45.00 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

中国煤炭资源丰富，资源蕴藏量居世界第三，生产和消费居世界第一。近年来，中国煤炭工业发展很快，2002~2008年，中国煤炭产量平均每年增加2亿t，年均增长11%，对保障中国经济社会的快速发展起到了重要作用。中国煤炭工业协会发布的2008年全国煤炭工业统计快报数据显示，2008年我国煤炭产量完成27.16亿t。中国电力企业联合会（中电联）发布的2008年全国电力工业统计快报数据显示，2008年我国发电生产耗用原煤13.4亿t。由此可以看出，发电耗煤量接近50%的煤炭产量。基于以煤为主的能源结构在较长时期内不会产生根本改观的现实，国家提出了加快电力工业结构调整，发展大型、高效、清洁燃煤机组的大政方针。

二氧化硫排放是造成我国大气污染及酸雨不断加剧的主要原因，所以国家一直高度重视燃煤电厂二氧化硫的排放控制。我国的火电厂烟气脱硫技术最早始于20世纪60年代初。当时为了防止锅炉尾部受热面的低温腐蚀，采用了在过热器前喷入白云石粉的措施，以减少烟气中二氧化硫的浓度，降低烟气酸露点，保护低温空气预热器在正常工作温度下不受或少受腐蚀。进入20世纪70年代后，我国电力工作者先后开展了十多项不同规模、不同工艺的试验研究，取得了一些阶段性研究成果，也积累了宝贵的经验。

2006年，国务院有关部门出台了脱硫机组上网电价提高1.5分/(kW·h)的电价政策及中央环保专项资金支持电厂脱硫贷款贴息等优惠政策，这极大地调动了电厂脱硫的积极性。仅2006年一年，我国就建成电厂脱硫装机7000多万kW，超过了前10年电厂脱硫装机4600万kW的总和，实现了历史性突破。截至2007年底，我国发电装机容量达到71329万kW。其中，火电达到55442万kW，约占总容量的77.73%；装备脱硫设施的燃煤机组占全部火电装机容量的比例达到45%。截止到2008年底，我国发电设备容量达79253万kW。其中，火电达到60132万kW，约占总容量的75.87%。据国家环保部门公布的数据，除新建燃煤电厂同步建设脱硫设施外，2008年我国新增燃煤脱硫机组容量已达8600万kW。经初步计算，全国装备脱硫设施的燃煤机组占全部火电装机容量的比例已达到66%。

《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》提出，到2010年，二氧化硫排放总量应削减10%，即到2010年，全国二氧化硫排放总量控制目标为2294.4万t，其中电力为951.7万t。“十一五”期间，国家将安排221个重点项目，约1.37亿kW现有燃煤机组需实施烟气脱硫。所以，控制火电厂的二氧化硫排放已经成为我国环保工作的重点。2007年5月，国家发展改革委员会、国家环保总局印发了《燃煤发电机组脱硫电价

及脱硫设施运行管理办法（试行）》的通知（发改价格〔2007〕1176号文），在完善脱硫电价政策的同时也加大了对燃煤电厂脱硫设施的监管和违规行为的处罚力度。根据国家环境保护总局下发的《主要污染物总量减排核算细则（试行）》（环发〔2007〕183号文）规定，如发现被检查企业的脱硫设施非正常运行一次，监察系数取0.8；非正常运行两次，监察系数取0.5；非正常运行三次，监察系数取0。也就是说，被检查企业的脱硫设施非正常运行三次，脱硫设施的脱硫效率将被认定为0。

石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺的英文名称为 Flue Gas Desulphurization，简称FGD。DL/T 5196—2004《火力发电厂烟气脱硫设计技术规程》中规定，200MW及以上燃煤机组应采用石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺。正是由于石灰石—石膏湿法烟气脱硫技术的成熟及煤种适应性广，该脱硫工艺已得到广泛应用。目前，国内已投产的超超临界百万千瓦机组都采用石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺。然而，石灰石—石膏湿法烟气脱硫系统在火电厂中为“新生事物”，在实际运行维护过程中未得到充分重视，相关技术培训尚欠缺，生产技术人员、运行操作人员的业务水平较有限，因此烟气脱硫设施运行过程中出现运行维护不到位而影响脱硫效率、造成脱硫停运而导致环保污染的事件时有发生。所以，加强运行维护人员的技术培训，提高脱硫设施的运行稳定性是当务之急，同时也是编者编写此书的主要目的。

本书主要介绍了我国大型火电机组煤粉锅炉的脱硫技术。全书共分七章：第一章总体概述了烟气脱硫技术的发展状况；第二章详细介绍了石灰石—石膏湿法烟气脱硫设机械设备与系统；第三章具体讲解了脱硫岛设备与检修；第四章重点介绍了脱硫装置自动控制及电气设备与系统；第五、六章深入分析了石灰石—石膏湿法脱硫装置的调试、性能试验与运行；第七章着重介绍了海水脱硫系统与运行。

本书由山东省电力学校副教授张磊和华能山东发电有限公司基建部经理、高级工程师刘树昌主编，华能曲阜电厂工程师王学训参编。华电国际高级工程师滕斌担任本书主审。

本书的编写过程中得到了邹县发电厂、费县发电厂、日照发电厂等的支持和帮助，在此表达诚挚的谢意。

由于水平有限，加之时间仓促，书中谬误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2009年3月

前言

第一章 绪论	1
第一节 火电厂烟气脱硫介绍.....	1
第二节 1000MW 机组脱硫设备概况	14
第二章 石灰石—石膏湿法烟气脱硫机械设备与系统	27
第一节 脱硫的一般概念	27
第二节 1000MW 机组脱硫岛主要系统	31
第三章 脱硫岛设备与检修	67
第一节 烟气系统的主要设备	68
第二节 吸收系统的主要设备	98
第三节 石灰石浆液制备供给系统的主要设备.....	119
第四节 脱硫废水处理系统主要设备的特点.....	134
第五节 石灰石制备、储存及输送系统主要设备.....	146
第六节 石灰石—石膏脱硫装置的防腐.....	148
第七节 湿法烟气脱硫装置的设备检修工艺汇总.....	161
第四章 脱硫装置自动控制及电气系统与设备	167
第一节 脱硫装置自动控制及系统与设备.....	167
第二节 1000MW 机组脱硫仪表及控制技术规范	180
第三节 1000MW 机组脱硫电气设备技术规范	194
第四节 在线监测系统简介.....	207
第五章 石灰石—石膏湿法脱硫装置的调试与性能试验	212
第一节 石灰石—石膏湿法脱硫装置的调试.....	212
第二节 石灰石—石膏湿法脱硫装置的性能试验.....	219
第三节 烟气脱硫装置性能试验大纲.....	221
第六章 石灰石—石膏湿法脱硫装置的运行	229
第一节 石灰石—石膏湿法脱硫装置的启动与停运.....	232
第二节 石灰石—石膏湿法脱硫装置的运行调节.....	239
第三节 脱硫装置运行对锅炉与汽轮机的影响.....	240
第四节 脱硫装置运行中的检查维护与日常管理.....	241
第五节 脱硫装置的常见故障、原因与处理措施.....	248

第六节	系统冲洗水·····	253
第七节	1000MW 机组烟气脱硫运行 ·····	258
第七章	海水脱硫系统与运行·····	283
第一节	海水烟气脱硫工艺·····	283
第二节	海水脱硫试验·····	284
第三节	海水脱硫系统启停与正常调节·····	288
第四节	脱硫系统（FGD）的运行维护 ·····	295
第五节	脱硫系统事故处理·····	299
参考文献 ·····		305

第一章

绪 论

当前火电厂减排二氧化硫的主要途径有煤炭洗选、洁净煤燃烧技术、燃用低硫煤和烟气脱硫。

煤炭洗选属物理净化法，目前仅能除去煤炭中的部分无机硫，而对于煤炭中的有机硫则无法去除。我国高硫煤产区中，煤中有机硫成分都较高，很难用煤炭洗选的方法达到有效控制二氧化硫排放的目的。

洁净煤燃烧技术在国际上是近 10 年开发的新技术，目前工业发达国家，如美国、日本、西欧走在世界前列。近几年，我国在这方面也取得了不少成果，但目前尚处于发展阶段。

燃用低硫煤对现有火电厂来说，由于受煤炭资源、运输、设备和不同区域环境状况的限制，仅靠燃用低硫煤，不但难以达到全面控制二氧化硫排放的目的，而且直接影响到电厂的安全生产运行。因此，国家已制定鼓励火电厂烟气脱硫的优惠政策，以支持火电厂燃用中高硫煤，并安装烟气脱硫装置。这将有利于国家煤炭资源的合理配置和利用，有利于全国环境质量的提高，有利于脱硫事业的发展。

烟气脱硫是目前国际上广泛采用的控制二氧化硫的成熟技术。因地制宜，采用不同的烟气脱硫工艺可有效地控制火电厂二氧化硫的排放，满足国家和地区环境质量标准的要求。由于火电厂生产用煤量大，锅炉热效率和煤炭转换成电能的效率都较高，脱硫工艺本身对环境的影响可有效加以控制，因此采取烟气脱硫治理火电厂二氧化硫污染所取得的环境效益显著。如果参照工业发达国家的做法，拉开低硫煤与高硫煤的价格差距，并通过政策、标准等加以引导，则烟气脱硫较易被燃用中高硫煤的电厂所接受。根据我国国情，烟气脱硫应是火电厂控制二氧化硫排放的主要途径。

第一节 火电厂烟气脱硫介绍

一、脱硫技术应用

(1) 煤炭洗选：使用前脱硫。目前仅能除去煤炭中的部分无机硫，而对于煤炭中的有机硫尚无经济可行的去除技术。

(2) 烟气脱硫：燃烧后脱硫。在锅炉尾部电除尘后至烟囱之间的烟道处加装脱硫设备，目前 95% 以上的燃煤锅炉采用烟气脱硫设备实施脱硫，该方式也是控制二氧化硫和酸雨污染最有效、最主要的技术手段。目前国内外应用最广泛的方法也是烟气脱硫。烟气脱硫

(FGD) 设备及工艺原理如图 1-1 所示。

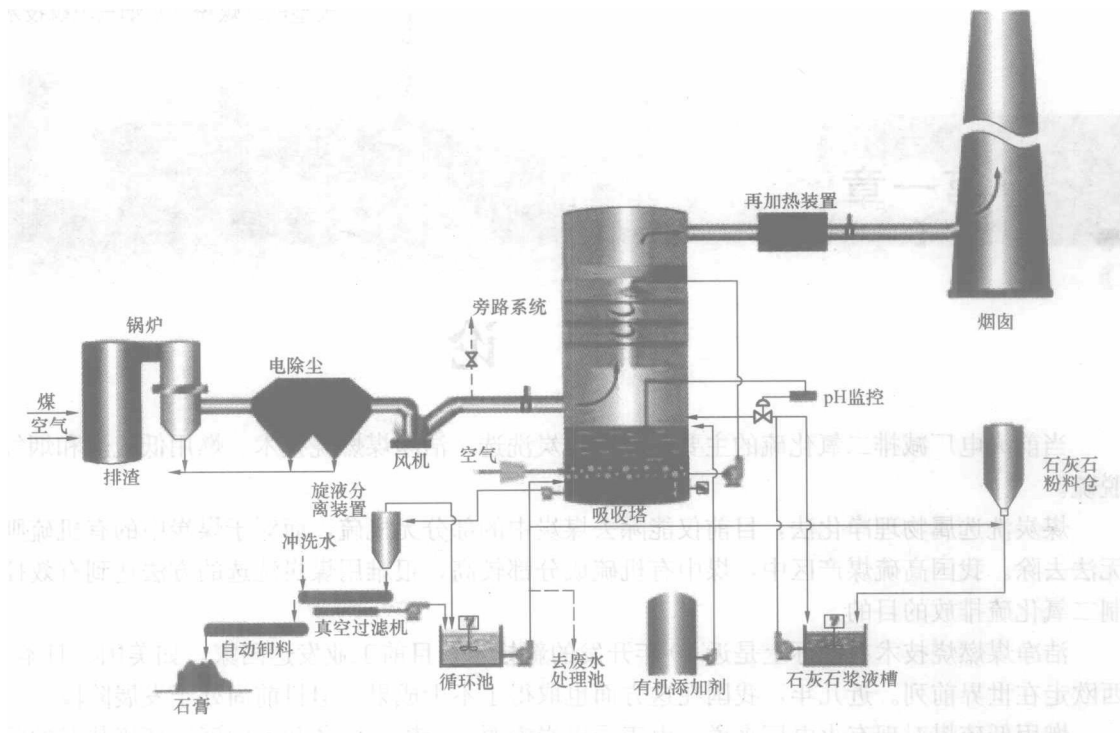


图 1-1 烟气脱硫 (FGD) 设备及工艺原理

二、烟气脱硫分类

(一) 按有无液相介入分类

在电力界，尤其是脱硫界常以有无液相介入来对烟气脱硫进行分类，并可分为湿法、半干法、干法、电子束法和海水法。

1. 湿法

湿法即进入湿吸收剂排出湿物质，它是利用碱性溶液为脱硫剂，应用吸收原理在气、液、固三相中进行脱硫的方法；脱硫产物和残液混合在一起，为稀糊状的流体。湿法脱硫的操作温度在 $44\sim 55^{\circ}\text{C}$ 。烟气湿法脱硫设备及工艺原理见图 1-2。

石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫的主要特点如下：

(1) 脱硫效率高。石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫工艺脱硫率高达 95% 以上，脱硫后的烟气不但二氧化硫浓度很低，而且烟气含尘量也大大减少。大机组采用湿法脱硫工艺，二氧化硫脱除量大，有利于地区和电厂实行总量控制。

(2) 技术成熟、运行可靠性好。国外火电厂石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫装置投运率一般可达 98% 以上，由于其发展历史长、技术成熟、运行经验多，因此不会因脱硫设备而影响锅炉的正常运行。特别是新建的大机组，若采用湿法脱硫工艺，则使用寿命长，可取得良好的投资效益。

(3) 对煤种变化的适应性强。无论是含硫量大于 3% 的高硫煤，还是含硫量低于 1% 的低硫煤，石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫工艺都适用。

(4) 占地面积大，一次性建设投资相对较大。石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫工艺比其他工艺的占地面积大，所以现有电厂在没有预留脱硫场地的情况下采用该工艺有一定的难度，

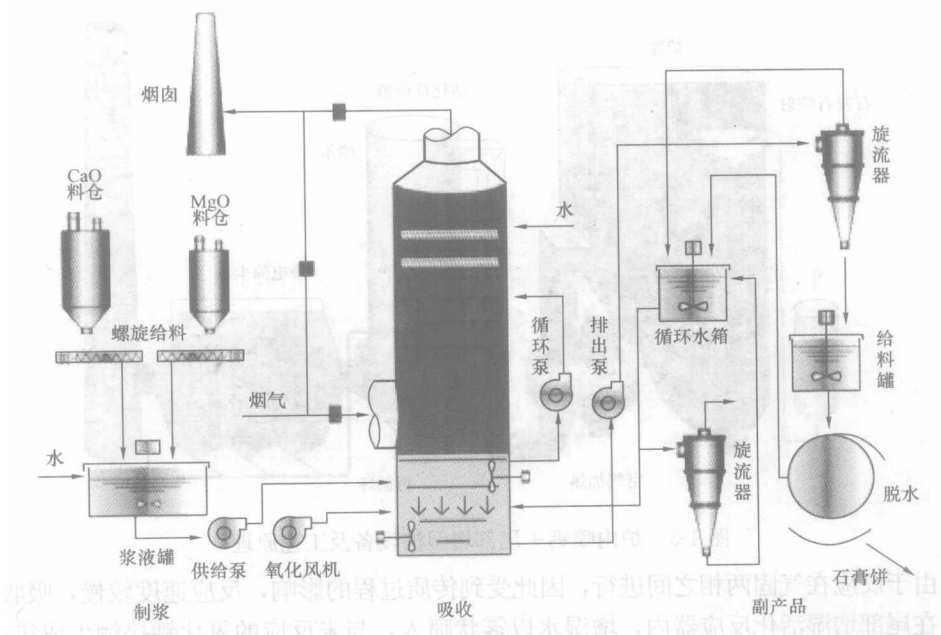


图 1-2 烟气湿法脱硫设备及工艺原理

其一次性建设投资也比其他工艺高。

(5) 吸收剂资源丰富、价格便宜。作为石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫工艺吸收剂的石灰石,在我国分布很广,资源丰富。许多地区石灰石品位都非常好,碳酸钙含量在 90%以上,优者可达 95%以上。脱硫工艺的各种吸收剂中,石灰石价格最便宜,破碎磨细较简单,钙利用率较高。

(6) 脱硫副产物便于综合利用。石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫工艺的脱硫副产物为石膏。在日本和德国,脱硫石膏年产量分别为 250 万 t 和 350 万 t 左右,基本上都能综合利用,可作为水泥缓凝剂或加工成建材产品。脱硫副产物综合利用,不仅可以增加电厂效益、降低运行费用,而且可以减少脱硫副产物的处置费用,延长灰场的使用年限。

(7) 技术进步快。近年来,国外对石灰石(石灰)—石膏湿法工艺进行了深入的研究与不断的改进,如吸收装置由原来的冷却、吸收、氧化三塔合为一塔,塔内流速大幅度提高,喷嘴性能进一步改善等。通过技术创新,该工艺占地面积较大、造价较高的问题逐步得到解决。石灰石(石灰)—石膏湿法脱硫是目前世界上技术最为成熟、应用最多的脱硫工艺,特别是在美国、德国和日本,应用该工艺的机组容量约占电站脱硫装机总容量的 80%以上,而应用的单机容量也已达 100 万 kW。

2. 半干法

半干法即进入湿吸收剂排出干物质,它是指有液相和气相介入脱硫,且脱硫产物为干粉状。半干法的操作温度控制在 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。烟气半干法脱硫又可分炉内喷钙+尾部增湿法、SDA 旋转喷雾法、双循环流化床法等。

(1) 炉内喷钙+尾部增湿法。炉内喷钙+尾部增湿法设备及工艺原理如图 1-3 所示。炉内喷钙+尾部烟气增湿活化脱硫工艺是在炉内喷钙脱硫工艺的基础上,在锅炉尾部增设增湿段,以提高脱硫效率。该工艺多以石灰石粉为吸收剂,石灰石粉由气力喷入炉膛 $850\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 的温度区,而后石灰石受热分解为氧化钙和二氧化碳,氧化钙则与烟气中的二氧化硫反应生成亚

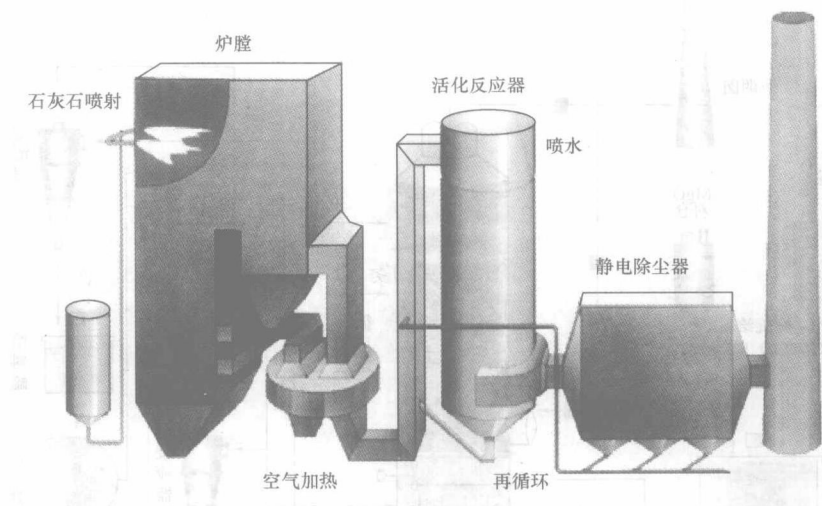


图 1-3 炉内喷钙+尾部增湿法设备及工艺原理

硫酸钙。由于反应在气固两相之间进行，因此受到传质过程的影响，反应速度较慢，吸收剂利用率较低。在尾部增湿活化反应器内，增湿水以雾状喷入，与未反应的氧化钙接触生成氢氧化钙，进而与烟气中的二氧化硫反应。当钙硫比控制在 2.0~2.5 时，系统脱硫率可达 65%~80%。由于增湿水的加入使烟气温度的下降，因此一般控制出口烟气温度高于露点温度 10~15℃。增湿水由于烟温加热被迅速蒸发，而未反应的吸收剂、反应产物呈干燥态随烟气排出，被除尘器收集下来。该脱硫工艺在芬兰、美国、加拿大、法国等国家得到应用。

炉内喷钙+尾部增湿法介于炉内脱硫和烟气脱硫两者之间，在炉膛内喷石灰石粉，排出的烟气进入尾部烟气增湿塔进行活化反应，从而实现两次脱硫。

(2) SDA 旋转喷雾法。SDA 旋转喷雾法烟气脱硫系统包括烟气系统、喷雾干燥吸收系统、石灰消化系统、脱硫灰循环系统、工艺水系统、排放系统、灰渣处理及仪用空气系统等，其设备及工艺系统分别见图 1-4 和图 1-5。

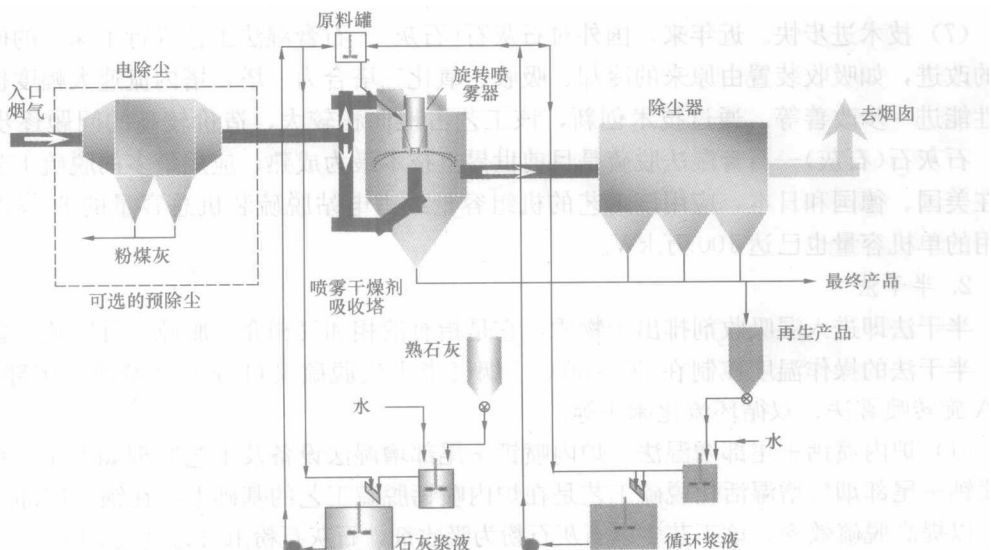


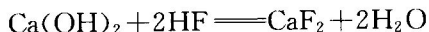
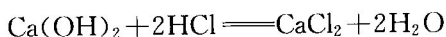
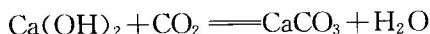
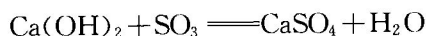
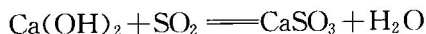
图 1-4 旋转喷雾法设备及工艺原理

1) 烟气系统。FGD 系统的烟气从两台静电除尘器 ESP1 引入, 会合后再分别进入吸收塔的底部和顶部, 在吸收塔内进行脱硫。脱硫后的净烟气分别进入两个静电除尘器 ESP2, 经除尘后通过烟囱排放至大气。

2) 吸收塔系统。吸收塔系统是整个 FGD 系统的核心, 脱硫反应在该系统中进行。原烟气通过中心和顶部分配器, 使烟气在吸收塔内均匀合理地分布, 与布置在塔顶的雾化器喷出的石灰浆液滴充分混合, 烟气中的 SO_2 和其他有害气体与脱硫剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应, 生成 CaSO_3 和 CaSO_4 颗粒, 通过静电除尘器 ESP2 将烟气中的粉尘颗粒收集下来, 脱硫除尘后的净烟气通过烟囱排出。

吸收塔内反应干燥后, 生成 CaSO_3 和 CaSO_4 的大颗粒, 沉降到吸收塔斗内, 经仓泵送入灰库储存。

吸收塔脱硫 SO_2 的反应原理如下:



(3) 双循环流化床脱硫工艺。如图 1-6 所示, 双循环流化床半干法烟气悬浮脱硫装置主要由石灰消化输送系统、脱硫塔及烟气系统、脱硫灰循环系统、喷粉增湿系统、塔底渣处理系统、电气及控制系统等组成。该工艺将生石灰粉直接运到电厂, 经干式消化后制成消石灰

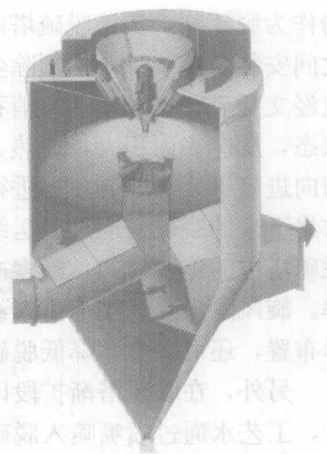


图 1-5 旋转喷雾法脱硫塔剖面

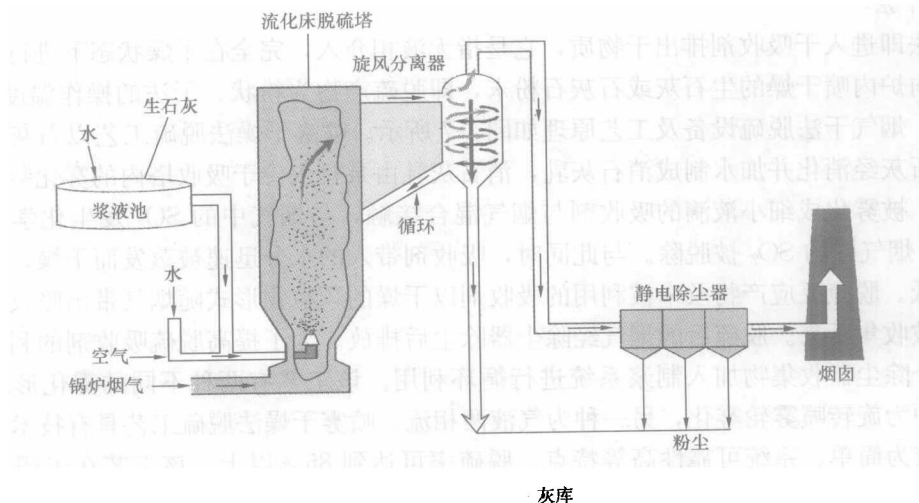
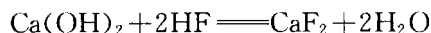
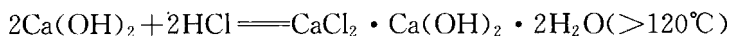
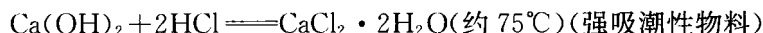
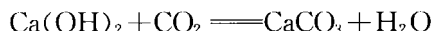
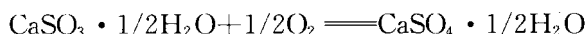


图 1-6 双循环流化床半干法设备及工艺原理

粉作为脱硫剂,实施脱硫塔内喷粉增湿的半干式脱硫洗涤反应。在预除尘器和脱硫电除尘器之间安装脱硫装置,从预除尘器出来的 130~160℃ 的烟气从流化床脱硫塔下部进入,烟气流经文丘里管被加速,与消石灰粉及回送的脱硫灰充分混合。由于脱硫塔内的脱硫剂呈流化状态,反应表面积大,传热、传质快,且颗粒不断碰撞,随后夹带大量固体颗粒的烟气通过切向进口进入旋风分离器进行气固分离,烟气进入静电除尘器除尘后由引风机排出,被分离收集下来的脱硫灰通过回送绞龙返回脱硫塔底部,继续参加脱硫反应,大大缩短了脱硫剂在脱硫塔中的停留时间,经多次循环后,吸收剂得到充分利用,从而提高了钙利用率和脱硫效率。旋风除尘器采用下排气结构,可有效降低除尘器阻力;同时,使脱硫装置整体呈“Π”形布置,还可以有效降低脱硫系统的占地面积,使结构紧凑。

另外,在脱硫塔渐扩段以上设置喷水装置,采用性能优良的双流体雾化喷嘴分层布置设计,工艺水通过喷嘴喷入脱硫塔,在不同负荷下均可获得相近的最佳尺寸的雾化液滴,使吸收剂颗粒表面在塔内沿轴向保持湿润,降温增湿的烟气与吸收剂在床内相混合,吸收剂颗粒和烟气中的 SO₂、SO₃、HCl、HF 等在有水分和氧气的情况下,在吸收剂颗粒的液相表面发生反应,生成亚硫酸钙、硫酸钙等。

循环流化床脱硫塔中, Ca(OH)₂ 与烟气中的 SO₂ 和几乎全部的 SO₃、HCl、HF 等完成化学反应,主要化学反应方程式如下:



3. 干法

干法即进入干吸收剂排出干物质,它是指无液相介入,完全在干燥状态下进行脱硫的方法,如向炉内喷干燥的生石灰或石灰石粉末,即脱硫产物为粉状。干法的操作温度在 800~1300℃。烟气干法脱硫设备及工艺原理如图 1-7 所示。喷雾干燥法脱硫工艺以石灰为脱硫吸收剂,石灰经消化并加水制成消石灰乳,消石灰乳由泵打入位于吸收塔内的雾化装置。在吸收塔内,被雾化成细小液滴的吸收剂与烟气混合接触,与烟气中的 SO₂ 发生化学反应生成 CaSO₃,烟气中的 SO₂ 被脱除。与此同时,吸收剂带入的水分迅速被蒸发而干燥,烟气温度随之降低。脱硫反应产物及未被利用的吸收剂以干燥的颗粒物形式随烟气带出吸收塔,进入除尘器被收集下来。脱硫后的烟气经除尘器除尘后排放。为了提高脱硫吸收剂的利用率,一般将部分除尘器收集物加入制浆系统进行循环利用。该工艺有两种不同的雾化形式可供选择,一种为旋转喷雾轮雾化,另一种为气液两相流。喷雾干燥法脱硫工艺具有技术成熟、工艺流程较为简单、系统可靠性高等特点,脱硫率可达到 85% 以上。该工艺在美国及西欧一些国家有一定应用范围 (8%)。脱硫灰渣可用作制砖、筑路,但多为抛弃至灰场或回填废旧矿坑。

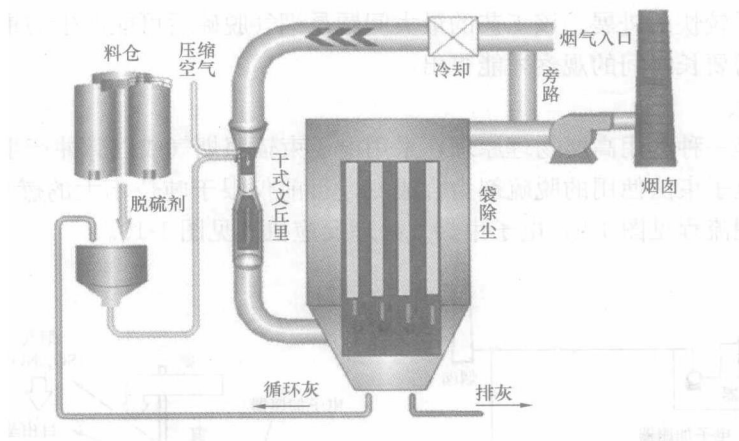


图 1-7 烟气干法脱硫设备及工艺原理图

4. 海水法

海水法即采用海水对烟气进行脱硫的方法，此方法受地域条件限制和海域环境影响，需经环境影响评价后确定，此外，还有氯化物严重腐蚀设备的问题。脱硫残液 pH 很低，必须配置参数合理的水质恢复系统才能达到环保要求的排放条件。烟气海水法脱硫设备及工艺原理如图 1-8 所示。

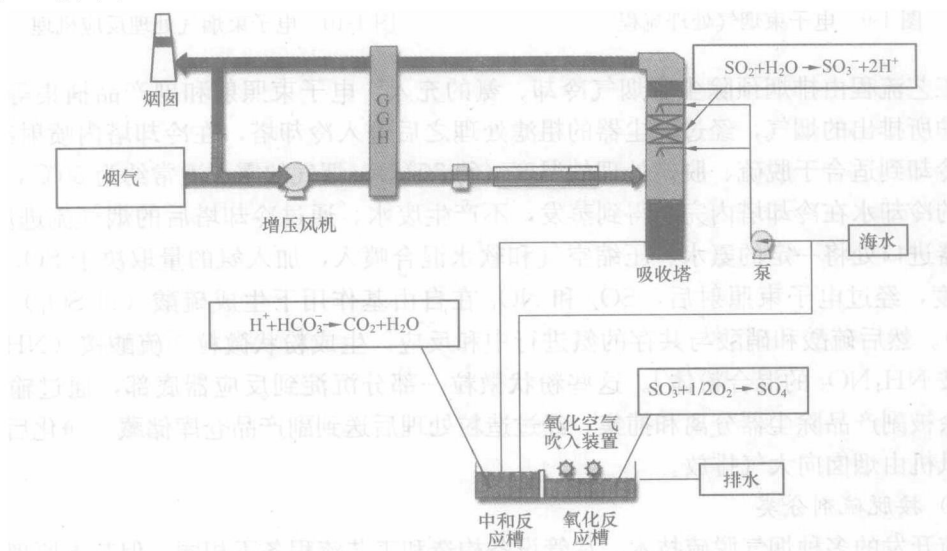


图 1-8 烟气海水法脱硫设备及工艺原理

海水脱硫工艺是利用海水的碱度达到脱除烟气中二氧化硫的一种脱硫方法。在脱硫吸收塔内，大量海水喷淋洗涤进入吸收塔内的燃煤烟气，烟气中的二氧化硫被海水吸收而除去，净化后的烟气经除雾器除雾、经烟气换热器加热后排放。吸收二氧化硫后的海水与大量未脱硫的海水混合后，经曝气池曝气处理，使其中的 SO_3^{2-} 被氧化成为稳定的 SO_4^{2-} ，并使海水的 pH 值与 COD 调整达到排放标准后排放大海。海水脱硫工艺一般适用于靠海边、扩散条件较好、用海水作为冷却水、燃用低硫煤的电厂。海水脱硫工艺在挪威比较广泛用于炼铝厂、炼油厂等工业炉窑的烟气脱硫，先后有 20 多套脱硫装置投入运行。海水脱硫工艺在电

厂的应用取得了较快的进展。该工艺的最大问题是烟气脱硫后可能产生的重金属沉积和对海洋环境的影响需要长时间的观察才能得出。

5. 电子束法

电子束法是一种利用高能物理原理,采用电子束辐照烟气或以脉冲产生电晕对烟气实施脱硫的方法。电子束法使用的脱硫剂为合成氨,目前仅限于吨位不大的燃煤锅炉烟气脱硫。电子束烟气处理流程见图 1-9,电子束烟气处理反应机理见图 1-10。

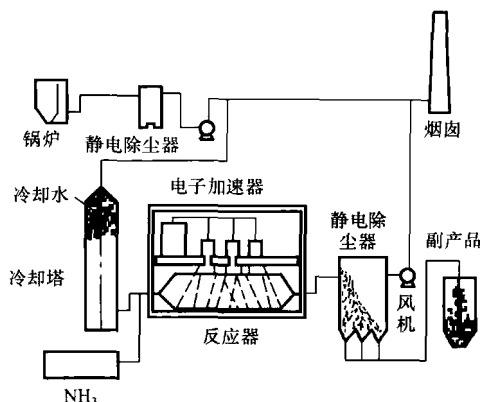


图 1-9 电子束烟气处理流程

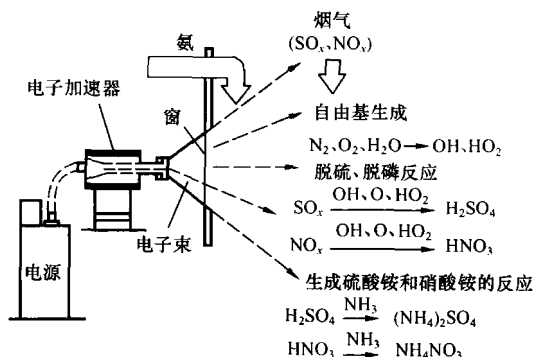


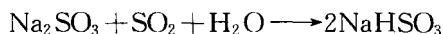
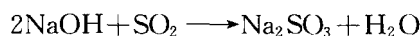
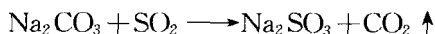
图 1-10 电子束烟气处理反应机理

该工艺流程由排烟预除尘、烟气冷却、氨的充入、电子束照射和副产品捕集等工序组成。锅炉所排出的烟气,经过除尘器的粗滤处理之后进入冷却塔,在冷却塔内喷射冷却水,将烟气冷却到适合于脱硫、脱硝处理的温度(约 70℃)。烟气的露点通常约为 50℃,被喷射呈雾状的冷却水在冷却塔内完全得到蒸发,不产生废水。通过冷却塔后的烟气流进反应器,在反应器进口处将一定的氨水、压缩空气和软水混合喷入,加入氨的量取决于 SO_x 浓度和 NO_x 浓度,经过电子束照射后, SO_x 和 NO_x 在自由基作用下生成硫酸 (H_2SO_4) 和硝酸 (HNO_3)。然后硫酸和硝酸与共存的氨进行中和反应,生成粉状微粒 [硫酸铵 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) 与硝酸铵 NH_4NO_3 的混合粉体]。这些粉状微粒一部分沉淀到反应器底部,通过输送机排出,其余被副产品除尘器分离和捕集,经过造粒处理后送到副产品仓库储藏。净化后的烟气经脱硫风机由烟囱向大气排放。

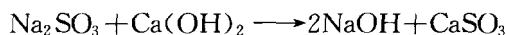
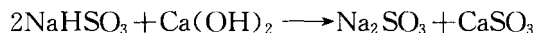
(二) 按脱硫剂分类

目前开发的多种烟气脱硫技术,尽管设备构造和工艺流程各不相同,但基本原理都是以碱性物质作 SO_2 的吸收剂。

1. 脱硫过程



2. 再生过程(用石灰乳)



以石灰石、生石灰为基础的钙法如图 1-11 所示,以氧化镁为基础的镁法如图 1-12 所示,以合成氨为基础的氨法如图 1-13 所示,以有机碱为基础的碱法如图 1-14 所示、以亚硫酸钠、氢氧化钠为基础的钠法如图 1-15 所示。

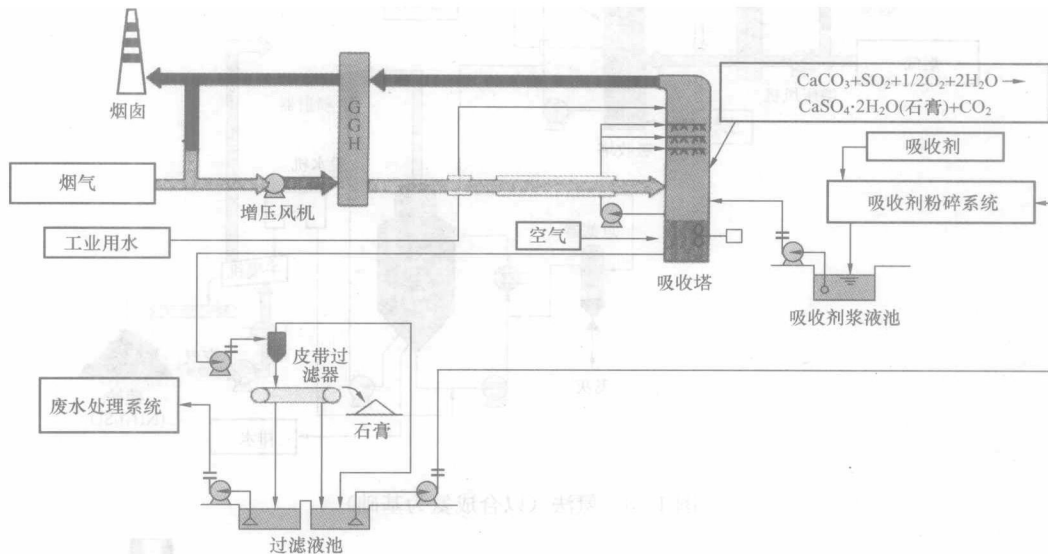


图 1-11 钙法 (以石灰石、生石灰为基础)

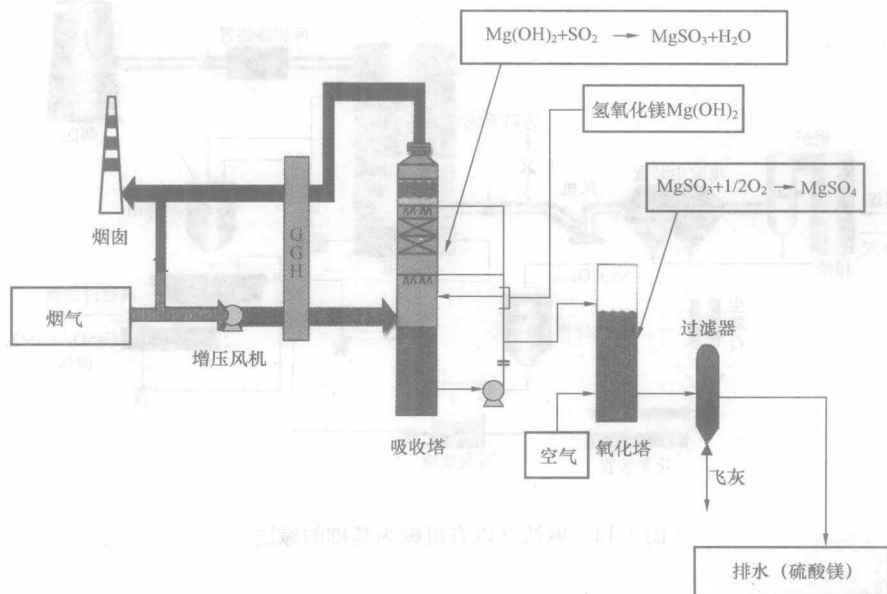


图 1-12 镁法 (以氧化镁为基础)

(三) 常用脱硫技术

近年来,世界各发达国家在烟气脱硫 (FGD) 方面均取得了很大的进展,目前国际上已实现工业应用的燃煤电厂烟气脱硫技术主要有:

(1) 湿法脱硫技术, 占 85% 左右, 其中石灰—石膏法约占 36.7%, 其他湿法脱硫技术

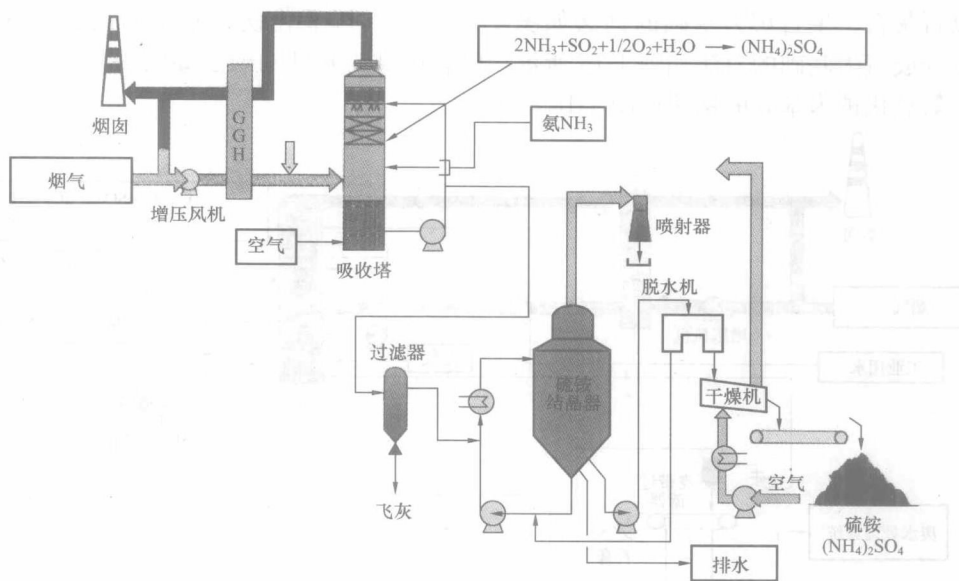


图 1-13 氨法（以合成氨为基础）

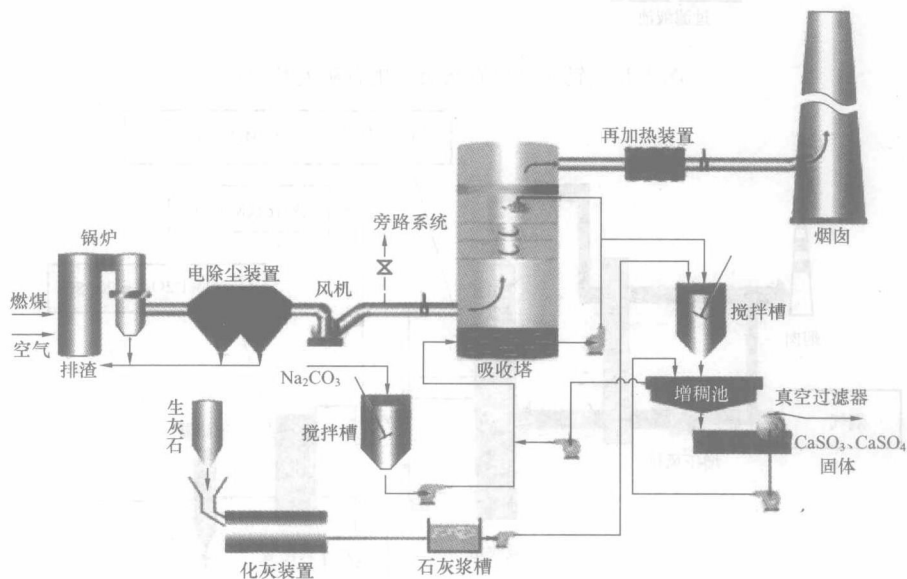


图 1-14 碱法（以有机碱为基础的碱法）

约占 48.3%。

- (2) 喷雾干燥脱硫技术，约占 8.4%。
- (3) 吸收剂再生脱硫法，约占 3.4%。
- (4) 炉内喷射吸收剂/增温活化脱硫法，约占 1.9%。
- (5) 海水脱硫技术。
- (6) 电子束脱硫技术。
- (7) 脉冲等离子体脱硫技术。