

湿法脱硫系统 安全运行与节能降耗

■ 北京博奇电力科技有限公司 编著



湿法脱硫系统 安全运行与节能降耗

■ 北京博奇电力科技有限公司 编著

内 容 提 要

本书是针对目前火电厂烟气脱硫系统运行中普遍存在的问题，并结合编者上百台发电机组脱硫系统的运行、维护经验编写而成。全书共分为两篇，内容涉及脱硫系统概述、脱硫系统主保护、脱硫系统运行对主机的安全性影响及应对措施、脱硫系统运行的安全性、吸收塔的安全运行、脱硫系统主要设备的安全运行、脱硫系统运行化学监督、烟气脱硫系统电耗特点分析及节电降耗、烟气脱硫系统水耗特点分析及节水降耗、烟气脱硫系统其他能耗特点分析及节能降耗。

本书可供火电厂湿法脱硫装置的运行、维护、生产、管理人员工作中学习，也可供相关技术研究人员及设备生产厂家参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

湿法脱硫系统安全运行与节能降耗/北京博奇电力科技有限公司编著. —北京：中国电力出版社，2010.2

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9497 - 8

I. 湿… II. 北… III. ①火电厂-湿法-烟气脱硫-安全技术②火电厂-湿法-烟气脱硫-节能 IV. X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 177158 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14.25 印张 248 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 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

《湿法脱硫系统安全运行与节能降耗》

编 委 会

主任 白云峰

副主任 吴树志 颜炳利 刘 煊

编 委 (按汉语拼音排序)

白云峰 包宗树 黎明照 刘德林

刘青波 刘 煊 路永峰 吴树志

颜炳利 杨继明 张宏建 张 伟

张秀堂 赵 峰

新中国成立 60 年来，尤其是改革开放 30 年以来，中国经济取得了举世瞩目的辉煌成就，电力工业发展突飞猛进。从“十五”开始，中国电力更是进入高速发展期，发电装机容量从 2001 年的 3.38 亿千瓦发展到 2008 年底的 7.93 亿千瓦，其中火电装机占 76.05%，达到 6.03 亿千瓦。中国的电力环保事业也取得了长足进步。中国只用 8 年的时间完成了国外 30 年时间发展起来的脱硫产业，已成为全球最大的烟气脱硫市场。截至 2008 年底，中国火电脱硫装机容量达到 3.79 亿千瓦，约占火电装机总容量的 60%。中国脱硫产业已逐步完成技术国产化和自主研发，形成了以石灰石—石膏法为主导，氨法、氧化镁法、海水脱硫法等为补充的多种烟气脱硫工艺技术格局；逐步从低价竞争走向技术、服务等全方位竞争。

中国政府高度重视环境治理和节能减排工作，提出了科学发展观，走新型工业化道路，建设资源节约型、环境友好型社会的目标，将“改变增长方式和消费模式”、“治理环境污染”以及“修复生态”提到了前所未有的高度，中国的环境保护将日趋完善，环保排放要求也日趋严格。随着脱硫装置大规模投入商业运行，脱硫设施和技术必须面临和适应中国国情：电厂的煤种变化大，需要适应性强的脱硫设备；脱硫设施运营管理基础薄弱，人员素质偏低。

在此背景下，脱硫装置大规模投入商业运行后的一个焦点问题，是如何确保这些国家和企业的环保投入，切实起到有效控制 SO₂ 排放的作用，减少酸雨和阴霾，实现真正的碧海蓝天。从目前整个电力行业脱硫装置的状态和运行水平来看，离实现国家控制目标尚有差距；在历次环保督察中，不断发现有部分燃煤电厂的脱硫装置未正常运行，这不仅给实现中国的国际承诺带来压力，也给自身的可持续发展带来现实的挑战。作为在日本东证主板上市的中国环保企业的总裁，我也经常遇到这样的询问。曾经有日本朋友问我，中国投运了这么多脱硫装置，而市场竞争的价格又这么低，这些脱硫装置的运行情况到底怎么样？这些问题，不能不引起有志于环保事业人士的思考。要控制 SO₂ 排放，不仅要建设脱硫装置，更要把建成的脱硫装置运行维护好，因为这是一份沉甸甸的责任。

我所在的北京博奇电力科技有限公司，在中国经济快速发展和环保政策推动的大背景下，依靠各方厚爱和自身努力，快速发展成为脱硫行业的排头兵。公司的众多业务中，脱硫运行、检修维护业务，是发展较快的业务之一。公司根据长期从事石灰石—石膏湿法脱硫装置研发、设计、调试、运行和检修维护的基础和经验，有幸于2008年作为主要起草单位，组织编制了电力行业标准《火电厂石灰石/石灰—石膏湿法烟气脱硫装置检修导则》。此后不久，应中国电力出版社的邀请，我们以标准编制为基础，进一步总结脱硫装置运行、维护与检修积累的技术和经验，编撰成册，供广大同行分享。经过充分地策划和讨论，最终决定以两本书的形式出版，分别是《湿法脱硫系统安全运行与节能降耗》和《湿法脱硫装置维护与检修》。我们希望通过理论与实践的总结，探讨脱硫装置的运行、维护和检修。

在这里，感谢所有关心和支持环保事业的领导、专家、朋友和同仁，因为有了大家的共同努力，才能让天更蓝，水更绿。环保产业是朝阳产业，有着巨大的市场空间和良好的发展前景；环保产业也是人类最有意义的一个公益事业。付梓之际，唯希望本书能为中国环保事业的健康、稳定发展，提供微薄之力，造福人类，造福子孙。



北京博奇电力科技有限公司董事、总裁、CEO

根据全国电力行业脱硫脱硝技术协作网和中国电力企业联合会统计，到2008年底，我国已经投产烟气脱硫机组3.79亿千瓦，全国火电厂已投运烟气脱硫机组容量占全国燃煤机组容量的60%以上，其余的也基本会在2009～2010年投产运行。在电站烟气脱硫机组中，石灰石/石灰—石膏湿法烟气脱硫工艺占到90%以上。

大量实践证明，烟气脱硫在机理上、技术上是成熟的，其主要风险在设备的制造、运行和维护上。2005年以前，我国脱硫设备基本依靠国外进口，当时脱硫装置造价高达每千瓦1000元。随着国内环保业的快速发展，具备承担脱硫装置实施能力的企业数量迅猛增长，到2006年，脱硫企业已达100多家；脱硫装置成本也随之迅速下降，某些脱硫装置成本甚至降到每千瓦100元左右。过于激烈的竞争，导致脱硫装置设计、生产、安装质量下滑，脱硫装置运行稳定性差、可操作性低，故障率高。这种情况不仅迫使电厂大幅度提高运行成本，而且降低了脱硫装置性能和可靠性，使企业难以完成节能减排任务。

根据全国电力行业脱硫脱硝技术协作网和中国电力企业联合会调查结果，目前，无论从脱硫设备本身，还是从应用上来说，现有脱硫装置的状态和运行水平离实现国家SO₂控制目标还有差距，腐蚀、结垢、堵塞、烟气带水等问题还没有得到很好的解决，在实际运行中脱硫效率有时还达不到设计要求，脱硫装置和设备还需在日常的运行、维护过程中不断地改进、完善和提高。随着脱硫装置投运容量和比例的升高，SO₂排放控制的重点任务逐渐转向如何提高已建成脱硫装置的可靠性和保证性能指标。

脱硫装置是以石灰石和SO₂反应为核心的化工装置，与电站装置有一定的共性，也有独特之处。例如，主要运转设备是浆液泵，浆液介质具有腐蚀、磨损、沉淀、堵塞等特性，大部分浆液接触面都需要防腐，这些都是电站汽水系统所不多见的。因此，脱硫装置既具有化工装置的特点，又要满足电站管理和运行的要求，必须将两方面的特点和要求结合起来，才能运行和维护好。

北京博奇电力科技有限公司承担了十几个湿法烟气脱硫运行维护项目，根据实践中积累的安全运行与节能降耗的经验，以石灰石—石膏湿法脱硫相关的

理论、实践和经验为基础，并结合国内其他脱硫技术的特点，从实际生产需要出发，对湿法脱硫装置安全运行与节能降耗所涉及的参数控制、设备安全等进行了系统、全面的介绍和论述。

本书共分为两篇。第一篇为脱硫系统及主要设备的安全运行，其中，第一章对脱硫系统进行概述；第二章对脱硫系统的主保护及其试验方法进行了介绍，同时也介绍了两炉一塔情况下脱硫系统主保护的优化技术；第三章主要介绍了脱硫系统运行对主机锅炉、厂用电、辅助蒸汽、尾部烟道等的安全性影响及应对策略；第四章从吸收塔浆液 pH 值、浆液密度、烟气温度和系统冲洗等重要运行参数的安全性方面进行了阐述；第五章主要针对吸收塔在运行过程中易出现的一些问题及改进措施进行了论述；第六章主要论述了增压风机、GGH、浆液泵、球磨机、真空皮带机等主要脱硫设备的安全运行；针对脱硫系统运行中出现问题时需要对浆液、石灰石、石膏等进行大量化验分析的情况，第七章主要对脱硫系统的化学监督进行了详细论述。第二篇主要介绍脱硫系统在运行中的节能降耗技术。第八章进行了脱硫系统节能降耗概述；第九章主要对烟气脱硫系统中的电耗特点进行分析，并介绍了降低电耗的措施；第十章主要对烟气脱硫系统中的水耗特点进行分析，并介绍了降低水耗的措施；第十一章主要论述烟气脱硫系统中的其他能耗特点及降低能耗的措施。

本书由北京博奇电力科技有限公司组织编写，编写人员为：第一、四、六章由白云峰、黎明照、张伟编写，第二章由包宗树编写，第三、五、七章由吴树志、刘炜、刘德林、刘清波、路永峰、杨继明、张宏建、张秀堂、赵峰编写，第八、九、十、十一章由颜炳利、刘青波、刘德林编写，全书由刘炜统稿。在编写过程中，刘春田、王延平、王贵智等提供了部分资料，在此也表示感谢。

由于编著者的知识、经验和时间精力所限，书中难免有疏漏、不足之处，请专家、读者多多批评指正。

编 者
2009 年 11 月

序

前言

第一篇 脱硫系统及主要设备的安全运行

● 第一章 脱硫系统概述	2
第一节 湿法脱硫技术简介	3
第二节 湿法脱硫系统及主要设备	7
第三节 湿法脱硫系统启停	12
第四节 脱硫系统运行调整	20
● 第二章 脱硫系统主保护	25
第一节 主保护介绍	25
第二节 主保护试验方法	28
第三节 两炉一塔的主保护	32
● 第三章 脱硫系统运行对主机的安全性影响及应对措施	37
第一节 脱硫系统对锅炉的影响及应对措施	37
第二节 脱硫系统对主机其他系统的影响	46
● 第四章 脱硫系统运行的安全性	52
第一节 吸收塔浆液 pH 值控制对安全性的影响	52
第二节 吸收塔浆液浓度对系统安全运行的影响	57
第三节 烟气温度对安全性的影响	62
第四节 设备冲洗情况对安全性的影响	63
● 第五章 吸收塔的安全运行	65
第一节 吸收塔内部支撑梁冲刷磨蚀	65
第二节 吸收塔浆液起泡问题	67
第三节 吸收塔喷淋管组问题	73
第四节 吸收塔液位问题	75

第五节	吸收塔结垢问题	82
第六节	吸收塔中毒问题	85
第七节	除雾器的堵塞及倒塌	92
第八节	废水浓度高问题	99
第九节	滤液浓度高问题	103
第十节	烟道积水问题	104
● 第六章	脱硫系统主要设备的安全运行	108
第一节	增压风机的安全运行	108
第二节	GGH 的安全运行	116
第三节	浆液泵的安全运行	131
第四节	球磨机的安全运行	147
第五节	真空皮带机的安全运行	153
● 第七章	脱硫系统运行化学监督	159
第一节	化学监督概述	159
第二节	化学分析取样位置及方法	159
第三节	脱硫化学分析项目	163
第四节	主要脱硫分析方法	168
第五节	化学监督与系统安全节能运行	179

第二篇 烟气脱硫系统节能降耗

● 第八章	烟气脱硫系统节能降耗概述	182
● 第九章	烟气脱硫系统电耗特点分析及节电降耗	184
第一节	喷淋塔烟气脱硫系统电耗特点及节电降耗潜力分析	184
第二节	其他典型烟气脱硫系统电耗特点及节电降耗潜力分析	208
第三节	烟气脱硫系统节电降耗措施研究与建议	209
● 第十章	烟气脱硫系统水耗特点分析及节水降耗	210
第一节	烟气脱硫系统水耗特点分析	210
第二节	烟气脱硫系统节水潜力分析与建议	211
● 第十一章	烟气脱硫系统其他能耗特点分析及节能降耗	213
第一节	石灰石、石灰消耗分析	213
第二节	仪用、杂用压缩空气消耗分析	214
第三节	辅助蒸汽消耗分析	214
● 附录	石灰石、石膏浓度对照	216

→ 湿法脱硫系统安全运行与节能降耗

第一篇

脱硫系统及主要设备的安全运行



第一章

脱 硫 系 统 概 述

我国的能源构成以煤炭为主，其消费量占一次能源总消费量的 70% 左右，这种局面在今后相当长的时间内不会改变。火电厂以煤作为主要燃料进行发电，煤直接燃烧释放出大量 SO₂，造成大气环境污染，且随着装机容量的递增，SO₂ 的排放量也在不断增加。加强环境保护工作是我国实施可持续发展战略的重要保证。所以，加大火电厂 SO₂ 的控制力度显得非常紧迫和必要。目前，世界范围内的火电厂脱硫技术工艺多种多样，达数百种之多。按脱硫工艺在燃烧过程中所处位置不同，可分为燃烧前脱硫、燃烧中脱硫、燃烧后脱硫〔烟气脱硫（FGD）〕。

(1) 燃烧前脱硫主要是洗煤、煤的气化和液化。洗煤仅能脱去煤中很少一部分硫，只可作为脱硫的一种辅助手段；煤气化和液化脱硫效果好，是解决煤炭作为今后能源的主要途径，但目前从经济角度看，还不能与天然气及石油竞争。

(2) 燃烧中脱硫的主要方式是循环流化床锅炉。循环流化床锅炉是近年来在国际上发展起来的新一代高效、低污染清洁燃烧技术，具有投资省、燃料适应性广等优点，是一种正在高速发展，并正在迅速得到商业推广的方法。但循环流化床燃烧技术在锅炉容量上受到限制，主要用于 135MW 以下机组。

(3) 燃烧后脱硫即烟气脱硫，是目前唯一大规模商业应用的脱硫方式。烟气脱硫技术很多，主要有石灰石-石膏湿法、旋转喷雾干燥法、炉内喷钙加尾部烟道增湿活化烟气脱硫工艺（芬兰 Tempell 和 IVO 公司的 LIFAC）、海水烟气脱硫工艺、电子束照射加喷氨烟气脱硫工艺、气体悬浮吸收脱硫技术（FLS-GSA）、ABB 新型一体化烟气脱硫工艺（NID）、德国 WULFF 公司回流式烟气循环流化床（RCFB-FGD）脱硫技术等。

石灰石/石灰-石膏湿式洗涤法脱硫工艺是最典型的湿法脱硫工艺。此工艺的主要特点是：脱硫效率高达 95% 以上；技术成熟，运行可靠性高，国外火电厂投运率一般可达 98% 以上；对煤种变化的适应性强，适用于任何含硫量的煤种；占地面积较大，一次性建设投资相对较大；吸收剂资源丰富，价格便宜；脱硫副产物便于综合利用。

石灰石/石灰-石膏湿式洗涤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，应用的单机容量已达 100 万 kW。

近些年来，国内电力行业通过引进技术等方式，已有石灰石-石膏法、烟气循环流化床法、海水脱硫法、脱硫除尘一体化、半干法、旋转喷雾干燥法、炉内喷钙尾部烟气增湿活化法、活性炭吸附法、电子束法等十多种烟气脱硫工艺技术得到应用。与国外情况类似，在诸多脱硫工艺技术中，主流工艺技术仍是石灰石-石膏法烟气脱硫技术。据统计，在投运、在建和已经签订合同的火电厂烟气脱硫项目中，石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺技术已经占到 90% 以上。

第一节 湿法脱硫技术简介

湿法烟气脱硫的特点是脱硫系统位于烟道的末端、除尘器之后，脱硫过程的反应温度低于露点。由于是气液反应，其脱硫反应速度快、效率高、脱硫剂利用率高。如用石灰石做脱硫剂时，当 $\text{Ca}/\text{S}=1.01 \sim 1.05$ 时，即可达到 90% 以上的脱硫率，适合大型燃煤电站的烟气脱硫。湿法脱硫技术主要有石灰石/石灰抛弃法和石灰石-石膏法。

一、石灰石/石灰抛弃法

此法以石灰石或石灰的浆液作脱硫剂，在吸收塔内对 SO_2 烟气进行喷淋洗涤，使烟气中的 SO_2 反应生成 CaCO_3 和 CaSO_4 ，这个反应的关键是 Ca^{2+} 的形成。石灰石系统中 Ca^{2+} 的产生与 H^+ 的浓度和 CaCO_3 的存在有关；而在石灰系统中， Ca^{2+} 的生产与 CaO 的存在有关。石灰石系统的最佳操作 pH 值为 5.2~6.2，而石灰系统的最佳 pH 值约为 8（美国国家环保局）。

石灰石/石灰抛弃法的主要装置由脱硫剂的制备装置、吸收塔和脱硫后废弃物处理装置组成，其关键性的设备是吸收塔。对于石灰石/石灰抛弃法，结垢与堵塞是最大问题，主要原因在于：溶液或浆液中的水分蒸发而使固体沉积；氢氧化钙或碳酸钙沉积或结晶析出；反应产物亚硫酸钙或硫酸钙的结晶析出等。所以吸收洗涤塔应具有持液量大、气液间相对速度高、气液接触面大、内部构件少、阻力小等特点。洗涤塔主要有固定填充式、转盘式、湍流塔、文丘里洗涤塔和道尔型洗涤塔等，它们各有优缺点，脱硫效率高的往往操作的可靠性最差。脱硫后固体废弃物的处理也是石灰石/石灰抛弃法的一个很大的问题，目前主要有回填法和不渗透地存储法，都需要占用很大的土地面积。由于以上缺点，石灰石/石灰抛弃法已被石灰石-石膏法所取代。



二、石灰石-石膏法

此技术与抛弃法的区别在于向吸收塔的浆液中鼓入空气，强制使 CaSO_3 都氧化为 CaSO_4 （石膏），脱硫的副产品为石膏。同时鼓入空气产生了更为均匀的浆液，易于达到 90% 以上的脱硫率，并且易于控制结垢与堵塞。由于石灰石价格便宜，并易于运输与保存，因而自 20 世纪 80 年代以来，石灰石已经成为石膏法的主要脱硫剂。当今国内外选择火电厂烟气脱硫设备时，石灰石-石膏强制氧化系统成为优先选择的湿法烟气脱硫工艺。

石灰石-石膏法的主要优点是：适用的煤种范围广、脱硫效率高、吸收剂利用率高、设备运转率高、工作的可靠性高、脱硫剂石灰石来源丰富且廉价，是目前最成熟的烟气脱硫工艺。但是石灰石-石膏法的缺点也是比较明显的，如初期投资费用较高、运行费用高、占地面积大、系统管理操作复杂、磨损腐蚀现象较为普遍，需对废水进行处理。

石灰石-石膏脱硫工艺是一套非常完善的系统，包括烟气换热系统、吸收塔脱硫系统、脱硫剂浆液制备系统、石膏脱水系统和废水处理系统。系统非常完善和相对复杂也是湿法脱硫工艺一次性投资相对较高的原因。上述脱硫系统的四个大的分系统中只有吸收塔脱硫系统和脱硫剂浆液制备系统是脱硫必不可少的；而烟气换热系统、石膏脱水系统和废水处理系统则可根据各个工程的具体情况简化或取消。国外也有类似的实践，对于不需要回收石膏副产品的电厂，石膏脱水系统和废水处理系统可以不设，直接将石膏浆液输送至堆储场地。湿法脱硫工艺简化能使其投资不同程度地降低。根据初步测算，湿法脱硫工艺简化以后，投资最大幅度可降低 50% 左右，绝对投资可降至简易脱硫工艺的水平，并可进一步提高湿法脱硫工艺的综合经济效益。

三、常用湿法脱硫技术流派介绍

尽管世界上的湿法脱硫技术工艺多种多样，但是原理上都是大同小异，差别主要体现在吸收塔各有特点，而其他系统如烟气系统、吸收剂制备系统、石膏脱水系统、废水处理系统几乎没有差别。湿法脱硫技术可以按吸收塔的不同进行分类，大致可分为单回路喷淋塔、双回路喷淋塔、比晓夫吸收塔、液注塔、鼓泡塔、填料塔等。

1. 单回路喷淋塔

单回路喷淋塔是目前世界上使用最广泛的吸收塔，约 80% 以上的湿法脱硫使用单回路喷淋塔，世界上大多数拥有湿法脱硫技术的专业公司都使用这种吸收塔，主要公司为 KHI、Steinm & Uumller、ALSTOM、AE、IHI、HITACHI、B & W、ABB、GE、MASULEX 等。单回路喷淋塔一般是圆柱形

塔，塔下部为浆液池，氧化区位于浆液池下部，浆液池上方、塔的中下部是烟气入口区，在塔的上部是喷淋层，喷淋层和烟气入口之间、塔的中部为吸收区，喷淋层上方、靠近塔的顶部是除雾器，塔顶的烟气出口一般为侧向。

单回路喷淋塔结构简洁、构造合理，塔中没有填料或格栅，减少了结垢、堵塞现象，也是所有吸收塔中最经济的吸收塔。

2. 双回路喷淋塔

双回路喷淋塔是美国 Research - Cottrell 公司和德国诺尔—克尔兹公司的专利技术。塔的结构和单回路喷淋塔相似，不同的是在吸收塔中循环回路分为下循环和上循环两个回路，采用双循环回路运行。

下循环回路 pH 值低，有利于氧化反应及石膏生成；上循环回路 pH 值高，有利于吸收反应进行，可以得到较高的脱硫效率。由于采用双循环回路，使两个回路中的反应在不同的 pH 值环境下进行，有利于提高 SO₂ 的脱除效率，也有利于减少吸收剂消耗。该工艺的另一个显著特点是由于烟气中的 HCl 几乎在下循环回路完全去除，这样可以将具有腐蚀性的氯化物限制在吸收塔很小的一块区域内，减小了对吸收塔其他区域的腐蚀。

3. 比晓夫吸收塔

比晓夫吸收塔其实也是一种单回路喷淋塔，之所以把它单独列作为一个类别，是因为其独特性，和常规单回路喷淋塔有较大的不同。其主要特点是它把浆液池分为上、下两个区，上部氧化区在低 pH 值环境下运行，提供了最好的氧化条件；下部为新加入的吸收剂区，pH 值较高，有利于吸收反应。比晓夫吸收塔具有双回路喷淋塔分为不同 pH 值区域的优点，但是塔的结构比双回路喷淋塔简单，只需一个回路。

比晓夫吸收塔的另外一个特点是它的脉冲悬浮系统，不需要搅拌器，浆液的搅拌靠脉冲泵，长期关机后可以无障碍启动。

4. 液注塔

液注塔是三菱公司的专利技术，上面介绍的三种吸收塔都属于喷淋塔，而液注塔则是完全不同于喷淋塔的一种吸收塔。

喷淋塔是使吸收剂（浆液）自上往下喷淋，喷淋层一般设置多层；而液注塔是从下往上喷射，形成树状的液注，液注在上升与下落过程中重复接触烟气，完成吸收反应，喷射层为单层设置。

液注塔的结构比喷淋塔更为简单，特别是在喷淋（喷射）层的设置上，喷淋塔的喷淋层为多层，喷嘴的分布和对喷嘴喷射角度都有严格要求；而液注塔对喷射层无严格要求，技术上容易实现。



5. 鼓泡塔

鼓泡塔是千代田化工建设研制开发的湿法脱硫技术。以上介绍的五种吸收塔的脱硫机理是一致的，都是通过烟气与浆液雾滴或液滴顺流或逆流接触进行反应，脱除烟气中的 SO₂，而鼓泡塔的脱硫机理则完全不同，它是将烟气直接通到浆液中，通过烟气在浆液中鼓起的气泡与浆液进行接触反应，能够获得比喷淋塔更高的传质效率。

在吸收塔的结构上，鼓泡塔与喷淋塔最显著的区别是鼓泡塔不设喷淋层，因此系统中没有浆液循环泵，但是鼓泡塔插入浆液中的烟气管有很多根，内部件多，结构较复杂，系统阻力也相对喷淋塔大。目前在国内得到应用的是 CT - 121 工艺的鼓泡塔。

6. 填料塔

填料塔是主要应用于早期的湿法脱硫装置，由于其结垢和堵塞问题难以解决，目前新上的脱硫装置已很少采用填料塔。

四、湿法脱硫工艺特点

1. 湿法脱硫工艺的特点及优缺点比较

(1) 主要特点：

- 1) 吸收剂：石灰石或石灰，价廉。
- 2) 反应产物：石膏（二水硫酸钙），可作建材以及水泥添加剂使用。
- 3) 石膏品质：90%左右纯度。
- 4) 脱硫效率：高，可达95%以上。
- 5) 对煤种适用性：无限制，可用于高、中、低含硫煤种。
- 6) 机组适用性：无限制，尤其适用于大机组。
- 7) 可用率：>95%。
- 8) 电耗：1.2%~1.6%。
- 9) 钙硫比：Ca/S≤1.05。
- 10) 水耗及废水量：与烟气、工艺水等参数有关。

(2) 优点：

- 1) 技术成熟、可靠，国内外应用广泛。
- 2) 脱硫效率高（≥95%）。
- 3) 适用于大容量机组。
- 4) 吸收剂价廉、易得。
- 5) 系统运行稳定，煤种和机组负荷变化适应性广。
- 6) 脱硫副产品石膏可以综合利用。



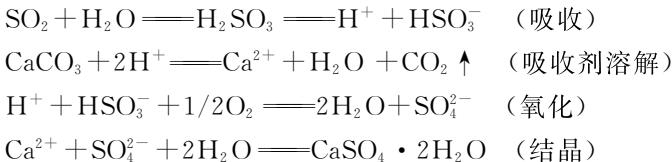
(3) 缺点：

- 1) 系统复杂、运行维护工作量大。
- 2) 水消耗较大，存在废水处理问题。
- 3) 系统投资较大、运行维护费用高，装置占地面积也相对较大。

2. 湿法脱硫工艺反应原理

该工艺的主要反应是在吸收塔中进行的，送入吸收塔的吸收剂——石灰石（石灰）浆液与经烟气再热器冷却后进入吸收塔的烟气接触混合，烟气中的二氧化硫（SO₂）与吸收剂浆液中的碳酸钙（CaCO₃）以及鼓入的空气中的氧气（O₂）发生化学反应，生成二水硫酸钙（CaSO₄ · 2H₂O），即石膏；脱硫后的烟气依次经过除雾器除去雾滴、烟气再热器加热升温后（有的FGD系统未设），经烟囱排入大气。

该工艺的综合化学反应原理如下：



pH值的控制对反应很重要，较高的pH值有利于吸收反应的发生，而较低的pH值有利于氧化和结晶反应的进行。

第二节 湿法脱硫系统及主要设备

一套完整的湿法脱硫工艺系统通常包括SO₂吸收氧化系统（吸收塔系统）、烟气系统、吸收剂制备系统、石膏脱水系统、废水处理系统。

各系统关系如下：在整个脱硫系统中，吸收塔系统是核心，SO₂的脱除、中间产物的氧化以及副产物石膏的结晶全部在吸收塔中完成，其他系统则是为吸收塔系统提供服务，而且根据要求不同，其他系统可以简化或取消。如果取消石膏脱水系统，则变为石膏抛弃法，这时废水处理系统也相应取消。烟气系统的简化主要在于烟气再热器的取舍以及增压风机是否采用，而吸收剂制备系统的简化则是取消石灰石磨制设备（球磨机），直接购买石灰石粉配制浆液（以石灰石作为吸收剂）。

下面以日本川崎KHI折返式喷淋塔为例来介绍石灰石-石膏法脱硫装置系统（见图1-1）。

烟气脱硫(FGD)系统分为以下几个系统：