

# 燃煤烟气二氧化硫控制技术研究综述

刘恩泽, 刘洁

华北电力大学环境科学与工程系, 河北 保定

收稿日期: 2026年3月28日; 录用日期: 2026年4月26日; 发布日期: 2026年5月15日

## 摘要

中国以煤为主的能源结构在保障国家能源安全的同时,也带来了严峻的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)排放挑战。尽管“十四五”期间大气污染防治成效显著,SO<sub>2</sub>浓度降至历史低位,但燃煤总量依然庞大,且区域复合污染、移动源排放等问题凸显,使得SO<sub>2</sub>治理仍是“十五五”期间的重点任务。文章系统综述了SO<sub>2</sub>的来源、危害及我国当前的污染控制现状,并在此基础上,全面梳理了国内外烟气脱硫技术的发展历程与技术体系。重点围绕燃烧前、燃烧中和燃烧后三大脱硫路径,深入分析了干法、半干法、湿法等主流工艺的技术原理、系统构成、优缺点及适用场景。此外,特别对石灰石-石膏法、钠碱法、氨法、镁法、海水法等湿法技术进行了对比评述,并针对资源化脱硫的新趋势,详细阐述了矿浆法,尤其是面向地域矿产特色的氧化锌法脱硫工艺及其副产物处理技术。最后,展望了未来烟气脱硫技术向高效协同、节能降耗、智能控制及深度资源化方向发展的趋势,为相关领域的研究与实践提供参考。

## 关键词

二氧化硫, 烟气脱硫, 湿法脱硫, 资源化利用, 氧化锌法

# A Review of Research on Sulfur Dioxide Control Technology for Coal-Fired Flue Gas

Enze Liu, Jie Liu

Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei

Received: March 28, 2026; accepted: April 26, 2026; published: May 15, 2026

## Abstract

While China's coal-dominated energy structure ensures national energy security, it also poses a severe challenge in terms of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) emissions. Although significant progress has been made in air pollution control during the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period, with SO<sub>2</sub> concentrations dropping to historic lows, the total volume of coal consumption remains substantial. Furthermore, issues

such as regional composite pollution and emissions from mobile sources have become increasingly prominent, making SO<sub>2</sub> control a key priority for the 15<sup>th</sup> Five-Year Plan period. This paper provides a systematic review of the sources and hazards of SO<sub>2</sub> as well as the current status of pollution control in China. Building on this foundation, it comprehensively examines the development history and technical frameworks of flue gas desulfurization (FGD) technologies both domestically and internationally. Focusing on the three major desulfurization pathways—pre-combustion, in-combustion, and post-combustion—the article conducts an in-depth analysis of the technical principles, system configurations, advantages, disadvantages, and applicable scenarios of mainstream processes such as dry, semi-dry, and wet methods. In particular, it provides a comparative review of wet desulfurization technologies such as the limestone-gypsum process, soda-alkali process, ammonia process, magnesium process, and seawater process. Furthermore, in response to the emerging trend of resource-recovery desulfurization, the paper elaborates on the slurry method, with a special focus on the zinc oxide desulfurization process—tailored to regional mineral resources—and its byproduct treatment technologies. Finally, this paper outlines future trends in flue gas desulfurization technology toward high-efficiency synergy, energy conservation and reduced consumption, intelligent control, and advanced resource recovery, providing a reference for research and practice in related fields.

## Keywords

Sulfur Dioxide, Flue Gas Desulfurization, Wet Desulfurization, Resource Recovery, Zinc Oxide Process

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 二氧化硫的来源、危害与控制紧迫性

作为典型的煤烟型污染物, 二氧化硫(SO<sub>2</sub>)的来源与一个国家的能源消费结构密切相关。我国“多煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了煤炭在能源体系中的主体地位。至 2025 年, 全国原煤产量虽保持高位, 煤炭消费占能源总量的比重有所下降, 但其作为能源安全“压舱石”的角色在短期内难以被完全替代[1]。火电、钢铁、化工等工业部门作为煤炭消费的核心领域, 长期构成了 SO<sub>2</sub> 人为排放的主要来源。尽管随着超低排放等政策的强力推进, 工业源 SO<sub>2</sub> 排放已得到有效遏制, 但移动源, 尤其是非道路移动源(如工程机械、农业机械、船舶)的 SO<sub>2</sub> 排放问题正逐渐成为新的关注焦点。据统计, 2024 年全国移动源 SO<sub>2</sub> 排放已全部来自非道路领域, 这标志着污染治理的重心正在发生结构性转变[2]。

SO<sub>2</sub> 的危害具有显著的复合性。在健康层面, SO<sub>2</sub> 极易溶于人体体液, 生成亚硫酸、硫酸等强腐蚀性物质, 直接刺激上呼吸道黏膜。短期高浓度暴露可引发急性呼吸系统症状, 而长期慢性暴露则与支气管炎、肺气肿等呼吸系统疾病的发病率上升密切相关。世界卫生组织已将 SO<sub>2</sub> 列为第三类致癌物, 其与大气中的重金属颗粒物结合后, 可深入肺泡, 增加肺纤维化风险。在生态层面, SO<sub>2</sub> 是形成酸雨的主要前体物[3]。我国酸雨长期以硫酸型为主, 虽得益于《大气污染防治行动计划》等政策的实施, 全国酸雨污染显著减轻, SO<sub>2</sub> 浓度在“十四五”期间实现大幅下降, 但酸雨类型正由单一的硫酸型向硫酸-硝酸混合型转变, 显示出氮氧化物协同控制的紧迫性[3]。此外, SO<sub>2</sub> 对农作物具有直接毒害作用, 破坏叶绿素, 干扰光合作用; 对金属和建筑材料则通过形成酸性溶液产生严重腐蚀, 造成巨大经济损失。更为关键的是, SO<sub>2</sub> 作为 PM<sub>2.5</sub> 的重要前体物, 其氧化生成的硫酸盐气溶胶是大气细颗粒物的重要组成部分, 加剧了以京

津冀及周边、长三角等区域为代表的复合型大气污染[4]。

综上所述,  $\text{SO}_2$  来源的广泛性、危害的复合性以及治理的系统性, 决定了它仍将是未来一段时期内大气污染防治的核心议题。随着环境空气质量标准预期收严, 持续削减  $\text{SO}_2$  排放、推动烟气脱硫技术创新, 依然是环境保护领域亟待解决的关键课题。

## 1.2. 我国二氧化硫污染现状与治理成效

至“十四五”末期, 我国  $\text{SO}_2$  污染控制取得了历史性成就。全国地级及以上城市  $\text{SO}_2$  年均浓度降至个位数水平, 表明我国已成功实现了从“总量控制”向“精细化管理”的跨越[5]。回顾排放历程,  $\text{SO}_2$  排放总量呈现先升后降的态势, 在经历了 21 世纪初的快速增长后, 随着国家层面减排力度的加大, 排放峰值被有效遏制, 并持续下降。这得益于一系列强有力的政策措施, 其中能源与产业结构深度调整是核心驱动力: 一方面, 清洁能源消费比重显著提升, 煤炭消费占比稳步下降; 另一方面, 对钢铁、焦化、水泥等重点行业的超低排放改造大规模推进, 累计完成改造的产能规模巨大, 大幅削减了工业源排放[6]。

在标准层面, 我国燃煤机组的排放限值已达到国际领先水平, 东部新建燃煤机组的  $\text{SO}_2$  排放限值严于多数发达国家, 全国煤电脱硫机组装机容量占比超过 96%。在来源结构上, 道路机动车已基本实现近零排放, 非道路移动源成为新的治理靶向。然而, 区域间改善的不均衡性依然存在, 京津冀及周边、汾渭平原等区域的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度虽显著下降, 但复合污染问题依然突出, 面临的新挑战不容忽视[7]。首先, 高达 48.5 亿吨的煤炭消费总量构成了潜在的排放压力; 其次, 酸雨污染类型由硫酸型向硫酸-硝酸混合型转变, 对氮氧化物的协同控制提出了更高要求; 最后, 即将收严的新标准对现有治理技术提出了新考验。展望未来, “十五五”期间的大气治理将以更严苛的新标准为引领, 在“双碳”目标驱动下, 实现更精准、更协同的  $\text{SO}_2$  减排。

## 2. 烟气脱硫技术概述

烟气脱硫技术的研究与开发始于 20 世纪初, 历经百年发展, 全球研发的技术种类繁多, 但最终实现规模化工业应用的仅十余种。根据脱硫工艺在燃烧过程中的不同阶段, 可将其系统性地划分为三大类: 燃烧前脱硫、燃烧中脱硫和燃烧后脱硫(即烟气脱硫, FGD)。其中, FGD 因其不干预燃烧过程、适应性强、脱硫效率高, 成为当前应用最广的主流技术[8]。按脱硫产物处理方式, 可分为抛弃法和回收法; 按吸收剂及产物的干湿状态, 则可分为湿法、半干法和干法。

### 2.1. 燃烧前脱硫: 源头削减

燃烧前脱硫是指在煤炭燃烧之前, 通过物理、化学或生物等方法预先脱除煤中硫分的技术。该技术从源头上削减了  $\text{SO}_2$  的生成潜力, 具有处理对象集中、二次污染可控等优点。

物理法脱硫是工业化应用最广的方式, 利用煤中有机质与无机硫(主要为黄铁矿)在密度、磁性、表面润湿性等方面的差异, 通过重力分选、浮选、磁选等手段实现分离。其优势在于流程简单、成本低、不破坏煤的化学结构, 可有效脱除 50%~60% 的黄铁矿硫。但其局限性在于难以脱除与煤大分子结构紧密结合的有机硫。化学法脱硫通过化学反应将有机硫转化为可脱除形态, 如碱处理、热解、氧化等。受制于较高的成本, 该方法多停留在实验室研究阶段。生物法脱硫利用特定微生物的代谢作用, 将煤中的硫分转化为可溶性物质或单质硫去除[9]。该技术反应条件温和、能耗低, 符合循环经济理念, 但面临反应速率慢、菌种培育周期长、对复杂煤质适应性不足等瓶颈, 尚未实现大规模工业应用。

总体而言, 燃烧前脱硫已形成以物理法为主体, 化学法和生物法为补充, 微波、超声波等新型物理/

物化耦合技术并行发展的格局。

## 2.2. 燃烧中脱硫：炉内固硫

燃烧中脱硫，又称炉内脱硫，是指在煤炭燃烧过程中向炉内添加脱硫剂(如石灰石、白云石等)，使燃料释放的  $\text{SO}_2$  在高温下与脱硫剂反应，生成硫酸盐或亚硫酸盐，随灰渣排出。该技术将脱硫过程与燃烧过程合二为一，无需建设独立的烟气处理设施，具有工艺流程简单、初始投资低的优势。然而，其固有局限也十分突出：脱硫剂利用率低导致钙硫比高，增加灰渣处理负担；脱硫产物与飞灰混合可能影响粉煤灰的综合利用价值；高温下部分硫酸盐可能重新分解，限制了脱硫效率的提升[10]。

## 2.3. 燃烧后脱硫：主流技术路径

燃烧后脱硫，即烟气脱硫(FGD)，是目前全球应用最广、技术最成熟的  $\text{SO}_2$  控制技术。其核心原理是利用碱性吸收剂与烟气中的  $\text{SO}_2$  接触反应，将其脱除。根据吸收剂和产物的干湿形态，如表 1 所示，可细分为干法、半干法和湿法三大类[11]。

**Table 1.** Classification and comparison of desulfurization methods

**表 1.** 脱硫方法分类对比

技术类型	脱硫效率	钙硫比	主要优点	主要局限
干法	80%~95%	1.5~2.0	投资成本较高，运行成本中等。无废水、多污染物协同、产物可资源化。	设备庞大、吸收剂利用率低、投资高。
半干法	85%~90%	1.2~2.0	投资成本中等，运行成本较低。流程简单、无废水、占地较小。	效率低于湿法、副产物利用难。
湿法烟气	95%以上	1.0~1.1	投资成本较高，运行成本中等偏高。效率高、技术成熟、适用煤种广。	有废水、设备腐蚀、烟囱雨风险。

### 2.3.1. 干法烟气脱硫

干法脱硫指脱硫剂添加和脱硫产物处理均在干燥状态下进行。典型技术如活性炭/活性焦吸附法，利用活性炭的吸附和催化氧化作用，将  $\text{SO}_2$  转化为硫酸储存于孔隙中，吸附饱和后通过加热再生释放高浓度  $\text{SO}_2$ ，可用于制备硫酸或硫磺[12]。该技术可实现无废水、多污染物协同脱除，但存在反应速率慢、设备庞大、投资运行成本高等问题。

### 2.3.2. 半干法烟气脱硫

半干法脱硫兼具干法与湿法的特点：吸收剂以湿态参与反应，产物则以干态排出。主流工艺包括旋转喷雾干燥法(SDA)和烟气循环流化床法(CFB)。该技术系统简单、无废水、占地小、投资较低，但脱硫效率通常低于湿法，吸收剂利用率有待提高[13]。

### 2.3.3. 湿法烟气脱硫

湿法烟气脱硫是目前全球应用最广、技术最成熟的工艺，约占世界已建 FGD 装置总量的 85%。其核心优势在于气液接触面积大、反应速率快、脱硫效率高(可达 95% 以上)，尤其适用于大型燃煤电厂等大容量燃烧设备。其技术发展正从单一的  $\text{SO}_2$  控制向多污染物协同脱除、副产物资源化利用、系统节能降耗等方向演进[14]。

## 3. 主流烟气脱硫技术评析

表 2 为目前主流烟气脱硫在超低排放要求下的技术经济指标比较。

**Table 2.** Comparison of technical and economic indicators of mainstream flue gas desulfurization technologies under ultra-low emission requirements**表 2.** 主流烟气脱硫技术在超低排放要求下的技术经济指标比较

	石灰石 - 石膏湿法	钠碱法	氨法	镁法	海水法	半干法	干法
脱硫效率(%)	≥98 (可达 99.5 以上)	≥98	≥98	95~98	≥90	85~95	80~95
可达 SO <sub>2</sub> 排放浓度(mg/m <sup>3</sup> )	≤35 (可低至 ≤25)	≤35	≤35	≤50	≤100	35~100	50~150
投资成本 (元/kW)	200~400	150~300	200~350	180~350	120~250	150~250	250~450
运行成本 (元/kWh)	0.005~0.015	0.010~0.025	0.008~0.016	0.008~0.018	0.003~0.008	0.008~0.018	0.010~0.020
钙/钠/镁硫比 (摩尔比)	1.0~1.1 (钙)	1.02~1.05 (钠)	1.0~1.2 (氨)	1.01~1.05 (镁)	—	1.2~2.0 (钙)	—
水耗(相对值, 湿法 = 1.0)	基准 1.0	0.9~1.0	0.5~0.8	0.8~0.9	1.2~1.5	0.3~0.5	0.1~0.3
占地(相对值, 湿法 = 1.0)	基准 1.0	0.8~0.9	0.8~1.0	0.8~0.9	0.9~1.1	0.7~0.9	0.6~0.8
副产物类型	脱硫石膏 (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> / Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (需再生或抛弃)	硫酸铵肥料	MgSO <sub>3</sub> / MgSO <sub>4</sub>	酸性海水	干态混合渣	硫酸/硫磺
副产物价值(元/吨)	50~80	低(约 20~50) 或需处置费	600~800	100~300 (制硫酸镁)	无	较低/填埋	300~500 (硫酸)
废水产生	有(需零排放处理)	有(再生过程产生)	无	较少	有(需中和)	无	无
吸收剂来源与成本	石灰石/石灰, 廉价易得	烧碱/纯碱, 价格较高	液氨/氨水, 价格波动大	氧化镁/氢氧化镁, 中等	海水, 免费	石灰/消石灰, 廉价	活性焦, 昂贵
主要适用场景	大型电厂、所有煤种	中小锅炉、化工、燃气尾气	合成氨/化肥厂等有氨源企业	镁资源丰富的地区、中小型机组	沿海地区	缺水地区、中小机组	缺水、多污染物协同、焦化

### 3.1. 石灰石 - 石膏法

作为湿法脱硫的基准技术, 石灰石 - 石膏法占世界已建脱硫装置的 85% 左右。其优势在于吸收剂石灰石资源丰富、价格低廉, 脱硫效率高(>95%), 副产石膏可资源化利用。其核心反应涉及吸收、中和、氧化、结晶四个环节[15], 最终生成二水硫酸钙(工业石膏)。典型系统由烟气、吸收氧化、浆液制备、石膏脱水及废水处理等单元构成。该技术虽成熟可靠, 但仍面临系统占地大、设备易结垢腐蚀、一次性投资高及脱硫废水处理等问题。通过优化浆液 pH 值、添加添加剂、控制石膏晶体粒径等手段, 可有效缓解上述问题[16]。

尽管石灰石 - 石膏湿法脱硫技术已高度成熟, 但其仍面临两大核心瓶颈: 脱硫废水零排放与副产物石膏高值化利用。

1) 脱硫废水零排放: 湿法脱硫产生的废水具有高盐、高硬、强腐蚀性、成分复杂的特点, 是燃煤电

厂实现全厂废水零排放的主要障碍。传统中和-絮凝-沉淀工艺难以去除氯离子和重金属,且产生大量污泥。前沿方向包括:膜浓缩+蒸发结晶分盐技术、高低温烟气耦合闪蒸技术等[16]。

2) 石膏高值化利用:我国工业副产石膏综合利用率仅约60%,大量脱硫石膏仍以堆存为主,存在环境风险。前沿方向包括:制备高强石膏、硫酸钙晶须等高附加值产品;与CO<sub>2</sub>矿化利用耦合,实现硫-碳协同固定。

### 3.2. 钠碱法脱硫

钠碱法以NaOH或Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>为吸收剂,其优势在于吸收液活性高、传质速率快,系统在碱性条件下运行,无结垢堵塞问题。反应分为吸收和再生两个阶段,通过加入石灰乳可实现吸收剂的再生。该技术脱硫效率高(>95%),但对吸收剂价格敏感,运行成本较高,且对设备材质有防腐要求[17]。

关键瓶颈:吸收剂(NaOH或Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)价格昂贵,运行成本显著高于钙法。若采用抛弃法,副产物Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>无利用价值且需处置;若采用石灰再生工艺,则系统复杂、产生含硫废液,经济性优势减弱。

前沿进展:开发低成本再生吸收剂(如双碱法工艺优化);采用膜分离技术从废液中回收高纯亚硫酸钠,用于印染、化工等行业;探索离子液体耦合钠碱法,提高吸收容量并降低再生能耗。

### 3.3. 氨法脱硫

氨法以氨或氨水为吸收剂,是一种典型的资源回收型技术。其脱硫效率极高(可达98%以上),副产硫酸铵可作为农用肥料。系统由吸收循环、氧化浓缩、结晶干燥等单元构成。该技术无废水排放,但在氨成本较高时存在经济性问题。因此,氨法脱硫最适用于合成氨厂、化肥厂、焦化厂等有稳定氨源的企业,可实现脱硫产物与自身产业链的深度耦合[18]。

关键瓶颈:氨逃逸与气溶胶生成问题突出,易导致二次颗粒物污染;副产物硫酸铵市场价值受化肥行情波动影响大,经济性依赖稳定氨源(如合成氨厂、焦化厂)。

前沿进展:多级洗涤塔和湿式电除雾器联合控制氨逃逸;优化结晶工艺制备大颗粒硫酸铵,提升产品附加值;与二氧化碳矿化耦合,利用硫酸铵母液吸收CO<sub>2</sub>生成碳酸氢铵,实现硫-碳协同固定。

### 3.4. 镁法脱硫

镁法以氧化镁或氢氧化镁为吸收剂,脱硫效率高(95%~98%),吸收剂活性强,设备腐蚀轻,管道不易堵塞。镁盐的高溶解度使其反应活性优于钙法。其副产物亚硫酸镁或硫酸镁可用于造纸或镁肥。但镁矿资源分布集中,原料运输成本高,且副产物回收工艺复杂,经济性有待提升[19]。

关键瓶颈:镁矿资源分布集中(主要在中国辽宁等地),原料运输成本高;副产物亚硫酸镁氧化速率慢,脱水困难,高值化利用途径有限。

前沿进展:添加催化剂(如Mn<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>)加速亚硫酸镁氧化制备七水硫酸镁(农业或工业用);开发氧化镁再生循环工艺,通过热解亚硫酸镁回收MgO并副产高浓度SO<sub>2</sub>;采用改性镁基吸收剂(如MgO和粉煤灰)降低原料成本。

### 3.5. 海水法脱硫

海水法利用海水天然的弱碱性吸收SO<sub>2</sub>,是一种资源节约型技术,无需外购脱硫剂,无固体副产物。其工艺包括吸收和恢复两个阶段,利用海水的缓冲能力和曝气氧化作用,将吸收的SO<sub>2</sub>转化为无害的硫酸盐后排海。该技术投资和运行费用低,但仅适用于沿海地区,且需考虑设备耐氯离子腐蚀问题[20]。

关键瓶颈:仅适用于沿海电厂,受地理条件严格限制;排水需大量曝气氧化并中和剩余碱度,可能影响局部海洋生态;氯离子对设备腐蚀性强。

前沿进展: 与海水淡化工程耦合, 利用反渗透浓海水替代天然海水, 提高吸收容量; 研发高效曝气氧化集成系统, 降低能耗 30% 以上; 引入在线海洋生态监测与智能控制, 实现排水 pH、溶解氧等参数的实时调控, 保障环境安全。

## 4. 资源化脱硫新趋势: 矿浆法及氧化锌法脱硫工艺

随着循环经济理念的深化和环保标准的日益严格, 烟气脱硫技术正朝着高效化、协同化、资源化的方向发展。矿浆法脱硫便是这一趋势下的典型代表, 它利用低品位矿物或冶炼固废配制矿浆替代传统吸收剂, 实现了烟气  $\text{SO}_2$  的高效脱除与硫资源的协同回收[21]。

### 4.1. 矿浆法脱硫技术原理与特点

矿浆法脱硫的核心在于利用矿浆中过渡金属氧化物(如  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等)的催化氧化作用。烟气中的  $\text{SO}_2$  溶于水生成亚硫酸, 在  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等金属离子的催化下, 被烟气中的氧气迅速氧化为硫酸。硫酸随即与矿浆中的矿物组分反应, 生成相应的硫酸盐, 从而将硫资源固定下来。根据所用矿物或废渣的不同[22], 形成了磷矿浆法、软锰矿浆法、赤泥浆法等多种技术路径。矿浆法脱硫的突出优势在于, 以废治废, 大幅降低运行成本; 脱硫过程与生产工艺结合, 实现硫资源高值化利用; 无二次废渣产生, 避免了传统脱硫石膏堆存的环境风险。其局限性在于对原料(矿浆)的稳定性和设备耐磨、防堵塞性有较高要求[23]。

### 4.2. 氧化锌法脱硫工艺: 面向地域特色的解决方案

氧化锌法脱硫是矿浆法的重要分支, 尤其适用于具有含锌物料来源的铅锌冶炼企业或特定区域(如湖南等锌矿资源丰富的地区)。该技术以含氧化锌的物料(如锌焙砂、锌烟尘)为吸收剂, 实现了烟气脱硫与锌冶炼主流程的深度耦合。

反应机理的主反应为氧化锌( $\text{ZnO}$ )与溶解的  $\text{SO}_2$  反应生成亚硫酸锌结晶。在吸收过程中, 生成的亚硫酸锌可进一步与  $\text{SO}_2$  反应生成可溶性的亚硫酸氢锌, 后者再与剩余的  $\text{ZnO}$  反应, 再次生成亚硫酸锌, 形成循环吸收[24]。副反应则是部分亚硫酸盐被烟气中的氧气氧化为硫酸盐[21]。

该系统主要由矿浆制备、吸收脱硫、浆液分离与产物回收三个单元构成。制备好的  $\text{ZnO}$  矿浆在吸收塔内与烟气逆流接触, 吸收  $\text{SO}_2$  后形成的亚硫酸锌浆液经浓缩、过滤, 得到亚硫酸锌滤渣。根据后续处理路径, 滤渣可采用空气氧化法(制备硫酸锌)、热分解法(再生  $\text{ZnO}$  并回收高浓度  $\text{SO}_2$ )或酸分解法(生产硫酸锌和  $\text{SO}_2$ )进行资源化利用。

氧化锌法脱硫的核心优势在于其显著的资源化属性和成本控制能力。它可利用企业自产的氧化锌烟灰作为吸收剂, 省去了脱硫剂采购费用, 还可利用冶炼厂现有设备处理副产物, 降低了额外投资, 烟气中的  $\text{SO}_2$  以亚硫酸锌或硫酸锌形式固定, 最终可转化为具有高附加值的硫酸锌、电解锌或硫酸等产品, 实现了硫资源与锌资源的双重回收, 且无固体废渣产生, 环境友好[25]。

氧化锌法的主要瓶颈在于: 亚硫酸锌氧化速率慢导致吸收效率下降、浆液管道易堵塞、以及氧化锌原料成本波动。前沿进展包括: 通过添加催化剂加速亚硫酸锌氧化; 采用湍流吸收塔强化气液传质; 开发亚硫酸锌热解再生  $\text{ZnO}$  并副产高浓度  $\text{SO}_2$  的闭环工艺, 实现吸收剂的循环利用。

## 5. 结论与展望

本文系统综述了燃煤烟气  $\text{SO}_2$  控制技术。我国在  $\text{SO}_2$  减排方面取得了举世瞩目的成就, 但仍面临结构性压力和新的复合型挑战。烟气脱硫技术已形成以湿法为主导、多技术并存的格局。其中, 石灰石-石膏法凭借其成熟可靠的技术特性占据主导地位, 钠碱法、氨法、镁法、海水法等则在特定工况下各具优势。

展望未来, 烟气脱硫技术将呈现以下发展趋势: 1) 高效协同化, 从单一污染物控制向多污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、粉尘、重金属、二噁英等)协同脱除转变。活性焦干法、湿法脱硫加湿式电除尘等一体化技术将成为主流。2) 深度资源化, 以矿浆法为代表的资源化脱硫技术将得到更广泛的应用。特别是对于有特定资源(如锌、锰、磷矿)和冶金化工企业, 将脱硫产物纳入主产品链, 实现硫资源的高价值回收, 是未来发展的核心方向。3) 节能降耗与智能化, 通过工艺优化、新型高效吸收剂开发、系统能耗管理, 进一步降低脱硫系统运行成本。同时, 引入大数据、人工智能等先进控制技术, 实现脱硫系统的精细化、智能化运行, 提升稳定性和经济性。与双碳战略深度融合, 在碳达峰、碳中和背景下, 脱硫技术需考虑碳捕集。开发低碳的脱硫工艺, 如利用钢渣、磷石膏等固废制备高活性吸收剂, 是实现环境治理与应对气候变化协同的重要路径。

综上所述, 持续的技术创新与系统优化, 特别是向协同控制与资源循环利用方向的深入探索, 将是我国未来实现更高质量、更可持续的大气污染防治目标的关键所在。

## 参考文献

- [1] Chen, Z., Wang, H., Zhuo, J. and You, C. (2017) Enhancement of Mass Transfer between Flue Gas and Slurry in the Wet Flue Gas Desulfurization Spray Tower. *Energy & Fuels*, **32**, 703-712. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03009>
- [2] Meng, L., Li, W., Wang, J., Shi, Y. and Hu, C. (2025) Research Progress on Flue Gas Desulfurization and Denitrification by Activated Carbon Method. *Processes*, **13**, Article 1396. <https://doi.org/10.3390/pr13051396>
- [3] Zhou, L., Liu, Y., Luo, L., Yuan, Z., Yang, L. and Wu, H. (2019) Improving the Removal of Fine Particles by Chemical Agglomeration during the Limestone-Gypsum Wet Flue Gas Desulfurization Process. *Journal of Environmental Sciences*, **80**, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.013>
- [4] Lim, J., Cho, H. and Kim, J. (2021) Optimization of Wet Flue Gas Desulfurization System Using Recycled Waste Oyster Shell as High-Grade Limestone Substitutes. *Journal of Cleaner Production*, **318**, Article 128492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128492>
- [5] Li, Z.H., Xie, C.F., Lv, J., et al. (2018) Effect of Calcium Formate as an Additive on Desulfurization in Power Plants. *Journal of Environmental Sciences*, **67**, 89-95.
- [6] Wu, H., Wang, Y., Liu, Y., Guo, S. and Zhong, Z. (2025) Experimental and Simulation Study of Flue Gas Desulfurization Using the Limestone-Gypsum Wet Method under an Oxygen-Enriched Combustion Atmosphere. *Journal of the Energy Institute*, **119**, Article 101999. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.101999>
- [7] 陈思杨, 郑伟. 湿法脱硫系统脱硫效率低影响因素分析[J]. 东北电力技术, 2026, 47(1): 58-62.
- [8] 斯特格乐图, 谢洁婷, 牛闯. FGD 湿法脱硫系统设计[J]. 北华航天工业学院学报, 2024, 34(3): 11-13+31.
- [9] Chen, H. and Li, W. (2017) Solubilizer Enhanced Biodesulfurization of the Simulated Diesel. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, **31**, 720-725.
- [10] 武广龙. 电石渣-石膏湿法脱硫中亚硫酸钙氧化研究[J]. 化工环保, 2025, 45(3): 401-405.
- [11] 裴德健, 华绍广, 汪大亚, 等. 采选冶过程典型固废的高附加值利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4): 128-132.
- [12] Hu, L., He, S., Zhang, L. and Chen, L. (2025) Based on the Design Structure Matrix Optimization of EPC Project Schedule for Petroleum Refining Engineering. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **61**, 1204-1211. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01969-x>
- [13] 徐锐. 大型石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统可靠性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [14] 石荣桂, 刘强, 崔洁清, 等. 湿法烟气脱硫系统节能优化研究进展[J]. 资源节约与环保, 2024(5): 9-13.
- [15] 张宇环, 喻革. 燃煤电厂石灰石-石膏湿式脱硫设备优化[J]. 清洗世界, 2025, 41(1): 10-12.
- [16] 陆万鹏, 王雅雯, 宗绍梁. 石灰石-石膏湿法脱硫工艺影响因素分析[J]. 节能, 2024, 43(4): 61-63.
- [17] Oberschelp, C., Pfister, S., Raptis, C.E. and Hellweg, S. (2019) Global Emission Hotspots of Coal Power Generation. *Nature Sustainability*, **2**, 113-121. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0221-6>
- [18] 窦睿音, 刘学敏. 中国典型资源型地区能源消耗与经济增长动态关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016,

---

26(12): 164-170.

- [19] Zhao, J.L., Wang, J.Y., Bi, R.Y., *et al.* (2021) General Synthesis of Multiple-Cores@Multiple-Shells Hollow Composites and Their Application to Lithium-ion Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **60**, 25719-25722. <https://doi.org/10.1002/anie.202110982>
- [20] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [21] Bartholomew, T.V. and Mauter, M.S. (2021) Energy and CO<sub>2</sub> Emissions Penalty Ranges for Geologic Carbon Storage Brine Management. *Environmental Science & Technology*, **55**, 4305-4313. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06017>
- [22] 常治铁. SDS + SCR 工艺在焦炉烟气脱硫脱硝中的应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(10): 65-70.
- [23] 闫伯骏, 邢奕, 路培, 苏伟, 姜博, 崔晓旭. 钢铁行业烧结烟气多污染物协同净化技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 767-775.
- [24] 赵宝杰. 国内焦化企业烟气脱硫脱硝技术现状分析[J]. 中国新技术新产品, 2018(5): 127-131.
- [25] 赵雪, 程茜, 侯俊先. 脱硫脱硝行业技术发展综述[J]. 中国环保产业, 2018(9): 14-22.