

环保背景下烟气脱硫技术应用及经济效益

李 维 (华能伊敏电厂, 内蒙古 呼伦贝尔 021134)

摘 要: 燃煤电厂锅炉排放的烟气含有大量 SO_2 、 NO_x 及颗粒物, 是当前大气污染的主要来源。传统烟气治理采用“脱硫-脱硝-除尘”分段式处理模式, 存在工艺复杂、能耗过高、二次污染等问题。湿法烟气脱硫具有脱硫效率高、效果稳定等优势。文章通过系统分析湿法脱硫(石灰石-石膏法)、半干等主流技术的脱硫效率, 对比 SCR、SNCR 脱硝工艺在反应温度、催化剂应用方面的技术特征, 为电厂实现超低排放提供技术支持, 技术应用后取得良好的经济效益。

关键词: 火电厂; 脱硫脱硝; 除尘; 经济效益

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 028-0067-03

Application and Economic Benefits of Flue Gas Desulfurization Technology under the Background of Environmental Protection

Li Wei (Huaneng Yimin Power Plant, Hulun Buir Inner Mongolia 021134, China)

Abstract: The flue gas emitted from coal-fired power plant boilers contains a large amount of SO_2 , NO_x and particulate matter, which is the main source of air pollution. The traditional flue gas treatment adopts a segmented treatment mode of “desulfurization - denitrification - dust removal”, which has problems such as complex process, excessive energy consumption and secondary pollution. Wet flue gas desulfurization has advantages such as high desulfurization efficiency and stable effect. This article systematically analyzes the desulfurization efficiency of mainstream technologies such as wet desulfurization (limestone-gypsum method) and semi-dry desulfurization, and compares the technical characteristics of SCR and SNCR denitrification processes in terms of reaction temperature and catalyst application, providing technical support for power plants to achieve ultra-low emissions. Good economic benefits have been achieved after the application of the technologies.

Key words: Thermal power plant; Desulfurization and denitrification; Dust removal; Economic benefits

为应对日益严格的环境法规, 高效、经济的烟气净化技术成为电厂环保领域的重要任务, 因此, 提高电厂生产效率、降低污染物成为新时期电厂的重点工作内容。当前, 我国电厂主要依赖于既有的烟气脱硫技术, 虽然取得了一定的治理成绩, 但在实际应用时仍存在一些问题。因此, 进一步提升烟气脱硫脱硝除尘技术水平, 对于电厂的环保及经济效益具有重要意义。

1 烟气脱硫脱硝除尘的重要性

随着电厂机组数量、装机容量、用电需求的增加, 各类能源消耗速度也随之提升, 其中以煤炭最为突出, 其燃烧排放物也成为主要污染物。从国际能源署(IEA)于2025年3月24日发布的《全球能源回顾2025》报告中了解到, 2024年全球能源需求增长2.2%, 明显高于2013年-2023年年均1.3%的能源需求增长率。因此, 平衡能源利用与环境保护成为一项重要难题, 对于电厂长久发展具有深远意义。

在此形势下, 烟气脱硫脱硝除尘技术成为电厂重要的技术方案。该技术的合理化利用, 可有效减少煤炭能源燃烧时污染物排放量, 例如: 所产生的二氧化硫、氮氧化物, 缓解电厂生产与环境保护之间的矛盾。此外, 煤炭烟气中含有二氧化硫等污染物的另一主要

原因是燃烧不充分, 而新型脱硫脱硝除尘技术可以有效解决这一问题, 并促进能源利用率、降低生产成本及烟气排放。在国家颁布了一系列环保政策下, 电厂通过科学、合理的运用烟气脱硫脱硝除尘技术, 可进一步贯彻落实国家的环保建设要求, 促进生产全流程环保属性的提升。

2 烟气脱硫脱硝除尘技术

2.1 烟气脱硫

烟气中的 SO_2 是威胁空气环境的主要污染物之一。近年来, 电厂为了有效治理空气污染问题, 努力减少其生产环节所排放的 SO_2 , 以提升电厂生产的可持续发展^[1]。烟气脱硫技术是目前较为有效减少 SO_2 排放的处理技术, 具有广泛的应用前景。

一是干法脱硫, 其原理是通过利用吸收塔内放置的颗粒状脱硫剂达到烟气脱硫的目的, 其具体方法、工艺步骤、技术场景、效率及适用场景见表1。循环流化床法的核心反应是 $\text{SO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (后续氧化为 CaSO_4), 其优势在于可高质量完成低浓度 SO_2 烟气的脱硫处理, 且投资及运维成本低于湿法脱硫; 炉内喷钙增湿活化法的脱硫效率偏低, 在实际应用时还需通过增添湿化器等方式提升石灰利用率, 此

表 1 不同类型干法脱硫技术对比表

技术名称	工艺步骤	技术特点	脱硫效率	适用场景
循环流化床法	①烟气经空气预热器升温至 120 ~ 180℃； ②通过文丘里管进入流化床吸收塔； ③ SO ₂ 与氢氧化钙反应脱硫	转化率高、投入成本低、操作简便、占地面积小	85% ~ 95%	中小型燃煤锅炉
炉内喷钙增湿活化法	①炉膛上部高压喷入流化石灰粉（900 ~ 1200℃）； ②尾部增湿活化（喷水提高湿度）； ③二次反应生成 Ca(OH) ₂ ；④粉末回收	操作简单、环保成本低、占地面积小；改进后可循环底渣与飞灰提高效率	70% ~ 85%	中小型燃煤锅炉
电子束烟气法	①预除尘 + 烟气冷却； ②喷氨及混合软化水； ③电子束照射氧化 SO ₂ 、NO _x ； ④生成硫酸铵 / 硝酸铵副产品	协同脱除 SO ₂ 与 NO _x （效率 > 95% 和 80%）；全自动化运行；无废水排放；副产物可制化肥	>95%	大型火电厂、多污染物协同治理

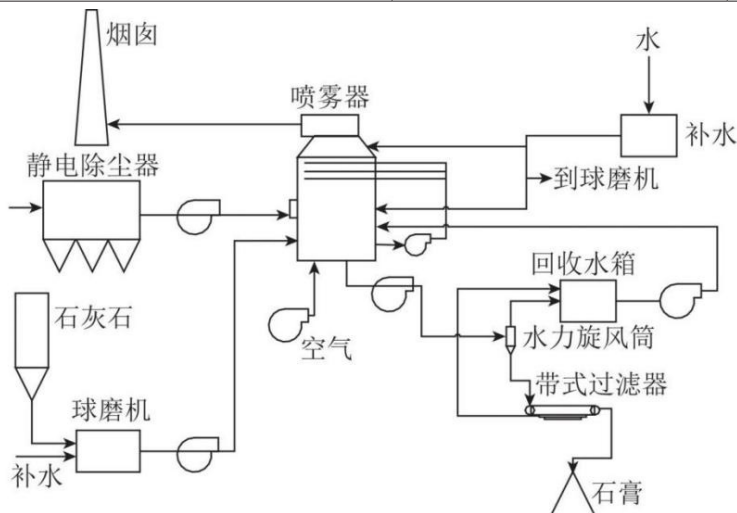


图 1 石灰石烟气脱硫原理图

外，还需配置高效除尘器，以及时回收未反应的石灰粉；相较于常规技术，电子束烟气法的应用成本更高，在实际应用时还需配套使用氨供应系统^[2]。

二是湿法脱硫。在烟气脱硫处理中，湿法脱硫也是常见的一种烟气脱硫技术，其运行原理如图 1 所示。应用形式如下：①海水烟气脱硫，其工艺步骤为烟气冷却至 50~60℃→喷淋海水吸收 SO₂（逆流接触）→曝气氧化生成硫酸盐→海水恢复处理达标排海，其技术特点为无需化学添加剂、运行成本低、无固体废弃物、依赖海水碱度（pH 8.0±0.5）、应用时需满足海域扩散条件。经分析华能威海电厂（680MW 机组）、深圳西部电厂（300MW 机组）以及福建后石电厂（600MW 机组）等典型项目发现，其脱硫效率约为 95% ~ 99%，其适用场景包括冶金行业，如炼油厂、炼铝厂等，以及沿海电厂等。该脱硫方法的吸收反应原理是 $SO_2 + H_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow HSO_4^-$ （海水碱性中中和生成 SO_4^{2-} ），在实际应用时，需配置鼓风机，其目的是将 HSO₃⁻ 强制氧化成 -4 价的离子，以避免二次污染；②石膏脱硫法，是一种价格低廉的 CaCO₃ 吸收烟气中的 SO₂ 的脱硫技术，其反应分为两个阶段，阶段一是吸收反应，其核心是在吸收塔内的石灰石浆液（CaCO₃）与烟气中

的 SO₂ 接触，生成可溶的亚硫酸钙（CaSO₃），同时鼓入的空气会强制氧化亚硫酸钙，并生成硫酸钙；阶段二是协同反应，其核心是烟气中的 SO₃、HCl、HF 等酸性气体与浆液中的二价的钙离子反应，生成硫酸钙、氯化钙和氟化钙。其工艺流程为烟气预处理→吸收塔反应→石膏脱水处理→废水处理→净烟气排放。

2.2 烟气脱硝

脱硝技术也分为干式和湿式 2 种。干式和湿式脱硝的技术原理与湿法脱硫的技术原理具有高度的一致性。实践中干式脱硝法的技术特点在于烟气脱硝效果有限、经济性偏低；湿法脱硝法特点是支持对废渣的二次回收，适用于锅炉烟气脱硫脱硝^[3]。

2.3 烟气除尘

第一，脉冲放电等离子体烟尘处理一体化技术。脉冲放电等离子体烟尘处理一体化技术，是一种被广泛应用的先进技术。其原理是通过高压脉冲放电产生低温等离子体，并利用高能电子和活性自由基对烟气中的污染物进行氧化协同脱除，其反应过程如下：①电压为 120kV、脉宽为 500ns 的高压脉冲于电极间形成强电场，使气体分子（如 O₂、N₂、H₂O）电离，生成高能电子和活性自由基；② SO₂ 被氧化为 SO₃，进

一步与水反应生成 H_2SO_4 ，同时， NO 被氧化为 NO_2 ，并与 NH_3 反应生成硝酸铵 (NH_4NO_3)；③等离子体场中带电粒子使烟尘颗粒带电，电场力将其捕集至集尘极，以达到协同除尘的目的^[4]。

第二，还原法脱硫脱硝除尘一体化技术。还原法脱硫脱硝除尘一体化技术，是环保领域的一项新兴技术，其适用场景是燃烧劣质煤炭而形成的废气，其创新之处在于该技术是通过采用自然界中的还原法，从而有效治理煤炭燃烧烟气，尤其是因燃烧劣质煤炭资源所产生的高污染属性的废气。该技术的优势在于造价低廉、发展前景广阔、适用性强等特点。

第三，催化法烟气除尘一体化技术。该技术的反应机制为在金属氧化物（如）或活性炭负载催化剂作用下， SO_2 被氧化为 SO_3 ；催化反应产生的活性自由基使烟尘颗粒带电，然后利用静电场或电场力捕集烟尘颗粒，以达到除尘的目的。其技术优势特点包括支持高效协同除尘、具有低温适应性即部分催化剂（如 $\text{MnO}_2/\text{CeO}_2$ ）可在 200–300℃ 低温区间运行、副产物为可资源化物质且无废水以及废渣、能耗偏低、催化剂寿命长且支持再生后重复使用。

3 烟气脱硫脱硝除尘技术应用取得的经济效益

3.1 降本增效的烟气净化新工艺

引入烟气净化新工艺，既可以显著改善烟气除尘效果，又可以降本增效。在进行烟气脱硫脱硝除尘技术研究时，可引入活性炭/活性焦一体化脱硫脱硝技术、低温 SCR 脱硝 + 半干法脱硫协同工艺、电子束法多污染物协同治理等主流烟气净化新工艺，并结合自身工艺特点，对其进行本土化改造，以进一步提升烟气净化效果。此外，还可以引入低碳节能技术，如余热回收技术、可再生能源驱动技术等，进一步释放技术创新效能。在引入烟气净化新工艺时需要注意的是考虑技术的适配性、成本压力以及副产物处理等。例如，考虑石膏堆积、新型工艺投资成本高等问题对烟气净化新工艺的引入以及持续性应用的影响，同时结合地方政策、自身工艺水平以及环保建设要求等制定应对措施，比如，通过申请环保专项补贴、探索第三方托管运营模式等，解决新型工艺投资成本高的问题。

3.2 提升环境保护与经济效益的“双赢”

目前，我国各地区都制定了严格的烟气污染物排放标准（ SO_2 、 NO_x 、粉尘），企业未达标排放需要缴纳高昂的排污费或环境税，超标排放面临严厉的环保行政处罚（巨额罚款），严重或持续超标可能导致机组被强制停产、限产整顿，造成巨大的发电损失和收入损失。高效烟气脱硫（FGD）、脱硝（SCR/SNCR）和除尘（ESP/FF）技术的广泛应用，不仅大幅改善

了环境质量，也为电厂自身带来了显著的经济效益。以某 600MW 超临界燃煤机组为例，改造前，该机组虽然达标排放，但无法满足国家最新的超低排放标准（ $\text{SO}_2 < 35\text{mg/m}^3$ ， $\text{NO}_x < 50\text{mg/m}^3$ ，粉尘 $< 10\text{mg/m}^3$ ），面临超标排放的巨额罚款（按日计罚，数额巨大）和可能的限产、停产风险。改造后，稳定达到超低排放标准，完全避免了环保罚款。更重要的是，按照国家政策，达到超低排放标准的燃煤机组可享受环保电价补贴（目前约每千瓦时电增加 1 分钱左右）。以该机组年利用小时数 5500h、负荷率 85% 计算，年发电量约 28 亿千瓦时，仅此一项，年增加电费收入约 2800 万元人民币。且副产品脱硫石膏，每年还还创造了额外利润，实现了环境保护与经济效益的“双赢”，长期使用具有显著经济效益。

3.3 提升企业社会责任与形象

在环保意识日益增强的今天，企业的环保行动无疑是其社会责任的重要体现。电厂采用烟气脱硫技术后，不仅展现了其对环境的责任感，更提升了其在社会和大众心中的形象。良好的环保表现极大提升了电厂的社会形象和声誉，减少了周边居民的投诉和潜在的环保诉讼风险，也是赢得市场认可的关键。这一系列举措不仅彰显了企业的行业领先地位，也为长远发展奠定了坚实基础。

4 结语

在日益严峻的环保要求下，烟气脱硫技术已从单纯的环境治理手段，发展成为推动产业绿色转型升级、塑造企业负责任形象的关键点。电厂的快速发展使得有害排放物问题愈发突出，烟气脱硫技术的广泛应用已成为高排放行业的必然选择，只有通过资源回收利用、降低合规成本、提升企业绿色竞争力等途径，才能提升电厂生产的环保效益，促进电厂的可持续发展。

参考文献：

- [1] 丁少良, 邵峥. 烟气脱硫技术及脱硫脱硝除尘与环保策略 [J]. 应用能源技术, 2023, (05): 6-10.
- [2] 秦晓宇. 化工生产中的烟气脱硫、脱硝及除尘技术分析 [J]. 化工管理, 2021, (26): 174-175.
- [3] 刘鹏飞, 李萍. 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术研究 [J]. 资源节约与环保, 2024, (11): 60-63.
- [4] 曹茂雪. 烟气脱硫技术及脱硫脱硝除尘环保一体化技术研究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(06): 100-102.
- [5] 徐雯. 燃煤电厂湿烟羽治理工艺研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

作者简介：

李维（1984.06—），男，辽宁法库人，本科，初级职称，研究方向：脱硫脱硝、除灰电除尘及环保。