

二氧化硫污染治理技术的研究进展与未来展望

王晨晨 苏奇祥 黄龙祥 农熙悦 曾月俊 黄在银*

广西民族大学 化学化工学院, 广西 南宁 530006

[摘要] 二氧化硫(SO_2)作为主要大气污染物之一,对生态环境和人类健康构成严重威胁。本文系统梳理了 SO_2 污染的来源与分布特征,重点分析了湿法脱硫、干法脱硫、生物脱硫及电化学氧化等治理技术的研究进展。传统湿法脱硫技术(如石灰石-石膏法)效率高但能耗大,干法脱硫技术(如活性炭吸附)无废水但效率较低;而新兴的生物脱硫和电化学氧化技术兼具高效性与资源化潜力,体现了“污染治理与资源化结合”的可持续发展理念。未来, SO_2 污染治理将向多技术协同、智能化控制和新型材料研发方向发展,同时需政策支持与技术创新的协同推进,以实现高效、节能、资源化的治理目标,助力“双碳”战略实施。本文旨在为 SO_2 污染治理技术的优化与应用提供参考。

[关键词] 二氧化硫污染; 污染治理技术; 资源化利用; 环境治理

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17718

中图分类号: X701

文献标识码: A

Research Progress and Future Prospects of Sulfur Dioxide Pollution Control Technologies

WANG Chenchen, SU Qixiang, HUANG Longxiang; NONG Xiyue; ZENG Yuejun; HUANG Zaiyin*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract: Sulfur dioxide (SO_2), as one of the major atmospheric pollutants, poses a serious threat to the ecological environment and human health. This article systematically reviews the sources and distribution characteristics of SO_2 pollution, with a focus on analyzing the research progress of control technologies such as wet desulfurization, dry desulfurization, biological desulfurization, and electrochemical oxidation. Traditional wet desulfurization technologies (such as limestone-gypsum process) are efficient but consume a lot of energy, while dry desulfurization technologies (such as activated carbon adsorption) produce no wastewater but are less efficient. Emerging biological desulfurization and electrochemical oxidation technologies, on the other hand, combine high efficiency with resource recovery potential, embodying the sustainable development concept of "combining pollution control with resource recovery". In the future, SO_2 pollution control will develop towards multi-technology collaboration, intelligent control, and new material research and development. At the same time, it requires policy support and collaborative promotion of technological innovation to achieve the goals of efficient, energy-saving, and resource-oriented control, thereby supporting the implementation of the "dual carbon" strategy. This article aims to provide references for the optimization and application of SO_2 pollution control technologies.

Keywords: sulfur dioxide pollution; pollution control technology; resource utilization; environmental governance

引言

SO_2 是大气污染的主要污染物之一,对生态环境和人类健康造成严重危害。它不仅会直接损害呼吸系统,还会通过大气化学反应生成硫酸盐气溶胶,加剧雾霾污染^[1]。随着工业化的快速发展, SO_2 排放问题日益严峻,特别是在以煤炭为主要能源的国家,燃煤电厂、冶金等行业成为 SO_2 排放的主要来源^[2]。因此,开发高效、经济的 SO_2 治理技术,已成为环境领域的重要课题。

当前, SO_2 污染治理技术已形成多元化体系。传统的湿法脱硫技术(如石灰石-石膏法)脱硫效率高,但存在能耗大、废水处理难等问题;干法脱硫技术(如活性炭吸附)流程简单、无废水排放,但效率相对较低^[3]。近年来,生物脱硫、电化学氧化等新兴技术快速发展,在实现污染物高效去除的同时,还能将 SO_2 转化为有价值的资源,体现了“污染治理与资源化结合”的可持续发展理念^[4]。然而,这些技术在稳定性、成本等方面仍需进一步优化。

在全球推进“碳达峰、碳中和”的背景下, SO_2 治理面临新的挑战。一方面,超低排放标准要求开发更高效的深度治理技术;另一方面,节能降耗、资源循环的理念促使传统技术不断升级。同时,智能化技术的发展为 SO_2 污染控制提供了新的解决方案。

本文系统梳理了 SO_2 污染特征及其治理技术的研究进展,重点分析了湿法脱硫、干法脱硫、生物脱硫和电化学氧化等技术的原理、特点和应用现状,探讨了各类技术的优化方向,并展望了未来发展趋势,以期对 SO_2 污染治理提供参考。

1 SO_2 的污染来源与分布特征

SO_2 的污染来源与分布特征是一个复杂的环境问题,涉及自然和人为双重因素。自然源虽然包括火山喷发和海洋释放等过程,但其对全球 SO_2 污染的贡献相对有限。相比之下,人为活动产生的 SO_2 排放占据了主导地位,特别是在我国这样的工业大国。以煤炭为主的能源结构使得燃

煤电厂成为 SO_2 排放的最大来源，其排放的烟气中 SO_2 浓度通常较高，治理难度大^[5]。冶金行业如铜、镍冶炼过程中产生的低浓度 SO_2 烟气同样不容忽视，这类烟气往往成分复杂，含有多种重金属污染物，需要特殊的处理技术^[6]。

从时空分布来看， SO_2 污染呈现出明显的季节性和区域性特征。冬季由于取暖需求增加，燃煤量上升，导致 SO_2 排放量显著增加，这在北方地区尤为明显。空间分布上，京津冀、长三角等工业发达地区的 SO_2 污染问题更为突出，这些地区的污染物还容易通过大气传输影响周边区域，形成区域性复合污染^[14]。

值得注意的是， SO_2 在大气中不仅会直接危害人体健康，还会通过化学反应生成二次污染物。 SO_2 可被氧化为 SO_3 ，进而形成硫酸盐气溶胶，这些细颗粒物是雾霾的重要组成部分。在治理技术方面，传统的湿法脱硫虽然效率较高，但存在废水处理难题；而新兴的干法脱硫技术如活性焦吸附法则显示出较好的应用前景^[7]。此外，紫外荧光法等精准监测手段的应用，为 SO_2 污染的溯源和治理提供了更可靠的数据支持^[8]。

2 SO_2 治理技术的研究进展

2.1 湿法脱硫技术

湿法脱硫技术因反应速率快、脱硫效率高，在大型工业烟气治理中居核心地位，其中石灰石-石膏法应用最广。其原理是利用石灰石浆液作为吸收剂，在吸收塔内与烟气中 SO_2 反应： SO_2 先溶于水生成亚硫酸，再与碳酸钙反应生成亚硫酸钙，最后通过强制氧化转化为石膏。这一系列液相反应高效进行，脱硫效率通常稳定在 90% 以上，部分优化系统可达 95% 以上，能满足多数工业烟气深度治理需求。但石灰石-石膏法存在明显短板：一是脱硫废水含高浓度氯离子、悬浮物及重金属离子，现有处理工艺成本高且可能产生二次污泥；二是副产物石膏因受烟气中粉尘、重金属污染，纯度降低，约 30% 只能堆存，既占用土地又有淋溶污染风险。

近年来，针对上述问题的优化研究取得了多项突破。在吸收塔结构优化方面，研究者通过改进喷淋层布置（如采用多层螺旋式喷淋）和增加湍流促进器（如多孔挡板），强化了气液传质效率，使脱硫剂利用率提升 10%~15%，同时降低了液气比，减少了水泵能耗。研究团队针对燃煤电厂高硫煤燃烧产生的高含硫烟气脱硫难题，通过计算流体力学开展研究，提出基于塔内筛板构件及喷淋系统优化的多手段耦合增效方法。他们建立涵盖喷淋吸收-筛板鼓泡吸收的 SO_2 多形式吸收脱除耦合模型，发现通过塔内筛板构件及喷淋系统优化多手段协同增效后，可实现不同工况下脱硫塔 SO_2 脱除效率提升 3%~8%^[9]。添加剂的创新应用也成为重要方向，例如在吸收剂中引入柠檬酸、酒石酸等有机酸，可通过络合钙离子促进石灰石溶解，缓解塔内结垢现象，使系统连续运行周期延长至 30d 以上；而添加镁盐（如 MgSO_3 ）则能提高吸收液对 SO_2 的溶解度，

尤其在低浓度 SO_2 烟气中，脱硫效率可再提升 5%~8%。

2.2 干法脱硫技术

干法脱硫技术以无液相参与、脱硫产物为干态固体为显著特征，因其设备简单、无废水排放的优势，在中小型锅炉、垃圾焚烧炉等低浓度 SO_2 治理场景中得到广泛应用。目前主流技术包括活性炭吸附法、喷雾干燥法和循环流化床法等，其核心是通过固体吸收剂或干燥反应产物实现 SO_2 的脱除。

钙基吸附剂（ACS）作为干法脱硫领域的重要研究方向，以其低成本原料（粉煤灰、 CaO 、废石膏）和独特的化学吸附机制展现出显著优势。Wang Kai-Qi 等通过一步初浸渍法制备的 ACS 吸附剂在 150℃ 条件下表现出卓越的 SO_2 脱除性能，吸附容量高达 44.26 mg/g，这主要归功于其特殊的纤维网状结构和优化的中孔分布（平均孔径 22.34nm），为 SO_2 吸附提供了丰富的活性位点^[10]。该材料的脱硫机理表现为多级化学吸附过程： SO_2 首先被吸附在材料表面，与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成亚硫酸钙（ CaSO_3 ）；在 O_2 存在条件下进一步氧化为更稳定的硫酸钙（ CaSO_4 ）。特别值得注意的是，研究揭示了 O_2 和 NO 的协同催化作用，烟气中的 NO 可氧化生成 NO_2 或硝酸盐物种，作为强氧化剂显著促进 SO_2 向硫酸盐转化，使初期脱硫效率达到 100%。这种基于化学转化的脱硫机制不仅实现了高效的 SO_2 去除，其最终产物硫酸钙更可直接用于建材或安全填埋，无需复杂再生过程，完美诠释了“以废治废”的环保理念，为工业烟气治理提供了兼具高效性和可持续性的创新解决方案。

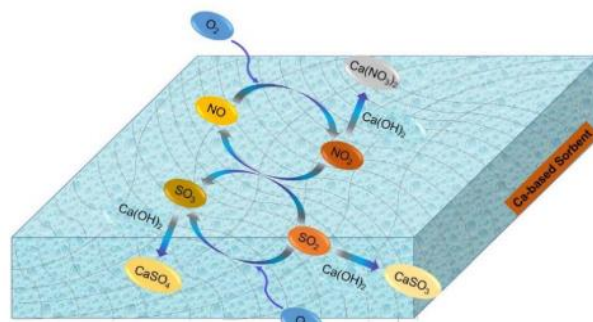
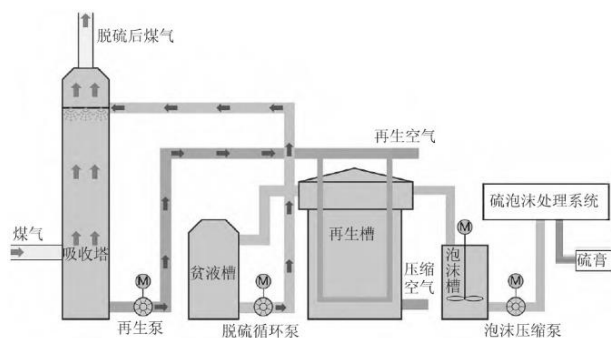


图1 通过 NO 和 O_2 的存在增强的脱硫反应路线^[10]

2.3 生物脱硫技术

生物脱硫技术兼具速度快、周期短、设备简单与专一性强、效率高、污染少的特点，是目前世界广泛研究的新型脱硫方法。该法主要依靠特定微生物的代谢活动，将硫化物转化为硫酸盐或其他非硫化物形式。梅山钢铁焦炉煤气 DDS 生物脱硫技术采用具仿血红蛋白载氧特性的 DDS-Fe 催化剂与特种脱硫菌，经吸收、再生和生化降解三阶段反应，将煤气中 H_2S 和有机硫转化为单质硫，还避免了传统湿法脱硫副盐积累问题，为焦化行业提供可推广的绿色解决方案^[11]。

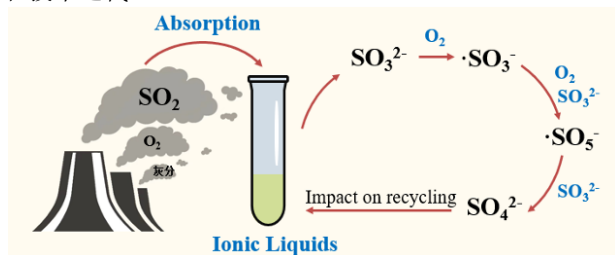
图2 DDS生物脱硫技术工艺流程^[12]

工业烟气中常含有重金属和有机污染物,可能抑制微生物生长,导致系统处理效率波动。针对这些问题,研究者提出了多种优化方案。程灿等通过添加缓冲剂和温度调控装置,将生物反应器的适应性扩展到 pH=2.0~5.0 和 25~45℃范围^[12]。未来研究应聚焦高效反应器设计、功能菌群定向驯化及多技术协同系统开发,推动生物脱硫技术在钢铁、陶瓷等高排放行业规模化应用。

2.4 电化学氧化技术

电化学氧化作为一种新兴的 SO₂ 治理方法,因其高效性和资源化潜力受到广泛关注^[13]。该技术核心是用电催化剂将 SO₂ 直接氧化为硫酸,既高效去除污染物,又转化为有工业价值的硫酸产物^[14]。

张雨蕾研究团队在离子液体电化学氧化 SO₂ 方面获重要进展^[15]。团队研究三种离子液体在含 O₂ 条件下对 SO₂ 的氧化行为,发现[TMG][Lac]体系一次吸收-解吸循环后 SO₂ 氧化率达 6.2%,且 SO₂ 氧化程度与吸收温度和时间正相关,温度从 25℃升至 60℃时氧化率可提高 2-3 倍。为抑制该副反应,引入乙二醇作氧化抑制剂,添加 10wt% 乙二醇可使 SO₂ 氧化率降低 40%以上。此项研究为电化学氧化副反应控制提供新思路,对提升 SO₂ 资源化利用效率意义重大。此外,反应器设计、能耗优化及硫酸产物分离提纯等工程问题亟待解决。未来研究可结合膜分离技术或耦合其他脱硫工艺(如吸附、生物脱硫),提升系统经济性和适用性。总体而言,电化学氧化技术为 SO₂ 治理开辟资源化新路径,但从实验室走向工业现场需跨学科协作和技术迭代。

图3 离子液体脱硫过程中 SO₂ 的氧化^[15]

3 未来展望

未来 SO₂ 污染治理将呈现多技术协同发展的趋势。在

技术创新方面,新型吸附材料和催化剂的研发将重点突破现有技术的效率瓶颈,特别是针对低温条件和复杂烟气成分的适应性提升。多种治理技术的系统集成将成为主流发展方向,通过联合脱硫脱硝等协同工艺实现多污染物同步去除,同时降低能耗和运行成本。

智能化转型将深刻改变传统治理模式。高精度传感技术与物联网平台的结合,可实现排放源的实时监测和治理工艺的动态优化,推动污染控制向精准化、智能化方向发展。政策层面需要进一步完善标准体系,通过差异化管控和经济激励措施,促进先进技术的推广应用。

4 结论

SO₂ 污染治理技术已形成多元化体系,传统湿法脱硫效率高但能耗大,干法脱硫无废水但效率较低,生物脱硫和电化学氧化等新兴技术则兼具高效性与资源化潜力。未来发展趋势将聚焦于多技术协同优化、新型材料研发及智能化控制,以提高适应性并降低成本。同时,政策支持与技术创新需协同推进,推动治理技术向高效、节能、资源化方向发展,助力“双碳”目标实现。通过跨学科合作与工程化应用,SO₂ 污染治理将迈向更高效、可持续的新阶段。

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目-202510608002X; 国家自然科学基金项目-22263001。

[参考文献]

- [1] Tengyu Liu, Arthur W. H. Chan, Jonathan P. D. Abbatt. Multiphase Oxidation of Sulfur Dioxide in Aerosol Particles: Implications for Sulfate Formation in Polluted Environments. [J]. Environ. Sci. Technol, 2021, 55(8): 4227-4242.
- [2] 兰文港, 孔万林, 臧昆鹏, 等. 杭州城郊大气二氧化硫和气溶胶浓度演变特征及潜在源分析 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 287-297.
- [3] 徐刚强, 张珂, 刘涛. 工业废气主要污染物治理措施研究 [J]. 青海环境, 2024, 34(2): 92-95.
- [4] LIGY PHILIP, MARCA. DESHUSS ES. Sulfur Dioxide Treatment from Flue Gases Using a Biotrickling Filter-Bioreactor System [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(9): 1978-1982.
- [5] 贾玉成. 中国环境科学学会年会论文集 [C]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2021.
- [6] 叶新军, 邵志超, 高泽磊, 等. 低浓度二氧化硫烟气分质高效治理技术应用 [J]. 硫酸工业, 2017(9): 42-44.
- [7] 王慧红, 刘碧涛. 活性焦联合脱硫脱硝技术在烟气治理中的应用 [J]. 资源节约与环保, 2020(4): 5.
- [8] 王峻. 微型化二氧化硫分析设备关键技术研究 [D]. 河北: 河北工程大学, 2022.
- [9] 赵毅, 房慧德, 刘侃. 湿法脱硫塔喷淋层布置研究综述 [J]. 山东化工, 2018, 47(3): 46-48.
- [10] Kai-Qi Wang, Xian-Ming Gao, et al. An efficient

calcium-based sorbent for flue gas drydesulfurization: promotion roles of nitrogen oxide and oxygen[J].RSC Adv,2023,13(2):1312-1319.

[11]王军.梅山钢铁焦炉煤气 DDS 生物脱硫技术的应用研究[J].低碳世界,2024,14(5):10-12.

[12]程灿.陶瓷行业烟气中 SO₂ 及 NO_x 治理方法的研究进展[J].四川化工,2023(1):17-20.

[13]黄成吉.电化学脱硫技术综述 [J].华中电

力,2004(5):52-55.

[14]张正阳,王海北,孙留根.电化学方法处理二氧化硫研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2020(3):4-6.

[15]张雨蕾.离子液体烟气脱硫过程中二氧化硫的氧化及抑制氧化研究[D].北京:北京化工大学,2023.

作者简介:王晨晨(2004—),男,汉族,河北邯郸,本科在读,广西民族大学化学化工学院,研究方向:环境化学。