

污泥在 SO₂ 废气治理中的技术路径与低碳化前景

罗秋妍 曾月俊 李文轩 覃佳勇 黄圆圆 黄鑫 李云翔 黄在银*

广西民族大学 化学化工学院, 广西 南宁 530006

[摘要]随着工业烟气超低排放需求的提升,吸附剂技术在 SO₂ 废气治理与硫资源回收领域展现出显著潜力。传统湿法脱硫虽脱硫效率高 ($\geq 95\%$),但面临石膏脱水困难、高能耗及二次污染问题;干法脱硫则受限于酸性气体脱除不充分、煤尘堵塞及凝结水影响。基于“以废治废”理念,污泥基吸附剂因其低成本、来源广、高吸附性能成为研究热点。通过化学活化和改性技术,污泥炭可优化孔隙结构与表面活性位点,实现 SO₂ 高效吸附。然而,其工业化应用仍受限于再生技术瓶颈、共存气体干扰及长期稳定性不足。未来需聚焦多尺度孔道设计、低温再生工艺及多技术耦合,同时结合政策驱动与碳交易机制,推动污泥基吸附剂在钢铁、火电等高污染行业的规模化应用,为“双碳”目标下废气治理提供经济环保的解决方案。

[关键词]污泥基吸附剂; SO₂ 废气治理; 资源化协同; 吸附再生技术

DOI: 10.33142/nsr.v2i1.15887

中图分类号: X7

文献标识码: A

Technical Pathway and Low-carbon Prospects of Sludge in SO₂ Waste Gas Treatment

LUO Qiuyan, ZENG Yuejun, LI Wenxuan, QIN Jiayong, HUANG Yuanyuan, HUANG Xin, LI Yunxiang, HUANG Zaiyin*

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

Abstract: With the increasing demand for ultra-low emissions of industrial flue gas, adsorbent technology has shown significant potential in the field of SO₂ waste gas treatment and sulfur resource recovery. Although traditional wet desulfurization has a high desulfurization efficiency ($\geq 95\%$), it faces difficulties in gypsum dehydration, high energy consumption, and secondary pollution issues; Dry desulfurization is limited by insufficient removal of acidic gases, coal dust blockage, and the influence of condensed water. Based on the concept of "treating waste with waste", sludge based adsorbents have become a research hotspot due to their low cost, wide source, and high adsorption performance. Through chemical activation and modification techniques, sludge char can optimize its pore structure and surface active sites, achieving efficient adsorption of SO₂. However, its industrial application is still limited by bottlenecks in regeneration technology, coexisting gas interference, and insufficient long-term stability. In the future, we need to focus on multi-scale pore design, low-temperature regeneration processes, and multi technology coupling, while combining policy driven and carbon trading mechanisms to promote the large-scale application of sludge based adsorbents in high pollution industries such as steel and thermal power, providing economic and environmental solutions for waste gas treatment under the "double carbon" goal.

Keywords: sludge-based adsorbent; SO₂ waste gas treatment; resource based collaboration; adsorption regeneration technology

在当前的环境下,我们仍然面临着大气污染问题的严峻挑战,特别是二氧化硫(SO₂)排放对环境和人类健康构成了重大威胁。随着工业化的快速发展,SO₂的排放量持续攀升,主要源自燃煤电厂、工业锅炉以及机动车辆等。SO₂不仅会引发酸雨,破坏自然生态,还对人类的呼吸系统和心血管系统造成损害。因此,有效地控制SO₂排放已成为环境保护领域亟待解决的关键问题^[1]。目前,SO₂的治理主要依赖于湿法脱硫技术,例如石灰石-石膏法和氨法,这些方法虽然脱硫效率高(超过95%)且工艺成熟,但它们也面临着高投资和运维成本、副产品如石膏的市场限制以及硫酸铵中氨的逃逸等问题;同时存在二次污染。治理SO₂的核心挑战在于缺乏多污染物协同治理的能力、高资源和能源消耗(与“双碳”目标相冲突)、对复杂工况的适应性差以及二次污染的风险。为了应对这些挑战,迫切需要通过副产品的高值转化(例如硫资源的回收利用)、多效催化体系的设计、低碳工艺的优化以及智能调

控技术的突破,推动SO₂治理技术向高效、低碳和资源化利用的方向发展。随着工业烟气超低排放需求的提升,吸附剂技术在污染源治理和硫资源回收领域将发挥关键作用,主要体现在其高效性和选择性,操作的灵活性和环境兼容性,以及对多种污染物的协同治理潜力。未来的发展将集中在高性能吸附材料的创新、结合催化转化技术的吸附-催化一体化,以及智能化和低碳化工艺^[2]。

近年来,由于其成本低廉、来源广泛、吸附性能卓越等优点,污泥基吸附剂逐渐成为废气治理研究的焦点。通过深入探讨污泥基吸附剂的制备方法、改性技术及其吸附机制,可以揭示其在SO₂废气治理中的潜力,并为实际应用提供理论依据和技术指导^[3]。因此,研究污泥制备吸附剂及其在SO₂废气治理中的应用具有重要的现实意义和紧迫性。这不仅有助于解决污泥处理的难题,促进资源的循环利用,还能为SO₂废气治理提供一种经济、环保的方案,推动大气污染治理技术的发展。本文基于污泥活性炭

的制备工艺优化、改性技术突破及其在 SO_2 废气治理中的吸附机制与应用实践,系统梳理了国内外研究进展与关键挑战。通过归纳分析多污染物协同吸附理论体系、孔隙结构调控策略以及再生技术的创新路径,揭示了污泥基吸附剂在“以废治废”模式下的环境与经济协同效益。本综述旨在为污泥资源化技术的深化研究提供理论支撑,同时为开发高效、低碳的 SO_2 废气治理方案及推动“双碳”目标的实现注入新思路与实践参考。

1 从技术瓶颈到资源化治理

1.1 现有 SO_2 治理技术的局限性

1.1.1 主流技术瓶颈分析

(1) 湿法脱硫(石灰石-石膏法)

湿法脱硫技术在实现高效脱硫和副产物利用方面展现出显著优势。然而,由于多种因素的影响,如入口烟尘浓度超标($>30\text{mg}/\text{m}^3$)、石膏浆液氧化不充分导致半水硫酸钙含量高、设备运行参数设置不当(例如旋流器压力不足、沉砂嘴尺寸过大)等,这些问题导致石膏脱水困难、效率低下以及含水率高。

表1 脱硫石膏与运行正常时期石膏对比

名称	二水合硫酸钙	半水硫酸钙	CaCO_3	氧化镁	含水率/%
标准指标	≥ 90.00	≤ 50.50	< 3.00	≤ 0.10	≤ 10.000
石膏样品1	88.58	0.61	1.73	0.76	13.58
石膏样品2	92.56	0.28	0.92	0.52	9.96

通过对比脱硫石膏与正常运行期间的石膏,结果如表1所示。其中,石膏样品1代表脱硫石膏,而石膏样品2代表正常运行期间的石膏。从表中可以明显看出,半水硫酸钙这种含有结晶水的水合物含量较高,导致石膏的含水率增加,从而出现了脱水困难的问题。

此外,高能耗、复杂的设备维护、设备腐蚀与结垢风险。湿法脱硫对入口烟气条件较为敏感,且脱硫废水含有高浓度的氯离子和重金属等污染物,处理工艺复杂,需要额外投资建设废水处理设施等问题也限制了其进一步发展^[3]。

(2) 干法脱硫(活性炭吸附)

干法脱硫技术因其无废水排放、适应复杂工况以及工艺的灵活性而备受关注。但是预处理阶段的高压损耗限制了气体的停留时间,使得氯、氟等酸性气体的脱除不够彻底,这降低了后续脱硫过程的效率。药剂反应动力学较慢,需要通过多级预处理(例如两级除氯)来提高脱除效率。在低温条件下(如 TRT 后),煤气容易析出凝结水,这会浸泡药剂,导致结块失效(需要设置排水口和耐腐蚀管路)。即便经过除尘处理,煤尘的残留量($\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$)仍可能堵塞药剂孔隙(如活性炭孔道),缩短使用寿命并增加更换频率,同时带来煤尘堵塞及药剂成本的问题。此外,药剂成本和再生难题对前端除尘的要求极为严格,这些挑战

尚未得到解决^[4]。

1.2 吸附法在处理 SO_2 废气领域的优势与研究现状

1.2.1 吸附法优势

吸附法是当下实现 SO_2 资源化回收利用的极具前景的方法之一。该方法通常涉及使用具有高表面积和特定化学性质的材料,以选择性地捕获来自烟气中的 SO_2 。吸附剂是吸附法处理工艺中的关键环节。除了要求吸附剂具有高选择性外,根据不同的目的,还要求吸附剂具备其他多种性能。例如,在低浓度或低压力下具有较大的吸附量,合适的比表面积和孔径分布,易于吸附和脱附,易于再生,以及良好的温度稳定性(如耐腐蚀、耐热,不腐蚀吸附装置,不改变吸附质的性质),使用寿命长,价格经济。吸附剂除了用于吸附外,还可作为催化剂、催化剂载体、填充剂和复合材料。无论是哪种情况,都要求制作工艺简单,管理方便,吸附剂质量稳定^[5]。沸石、金属有机框架和金属氧化物因其高表面积和对 SO_2 的特异性亲和而被广泛使用。从工业应用的角度来看,金属氧化物吸附剂成本最低,且相对容易再生。相比之下,活性炭和分子筛的再生效果较差,而金属有机框架(MOFs)材料对于大规模工业应用来说成本过高^[6]。

1.2.2 国外研究现状

在最近几年中,国外针对吸附剂的开发及其在 SO_2 废气治理中的应用研究呈现出多维度深化的趋势。Deng 等以高炉渣(BFS)为载体负载硫化纳米零价铁(S-nZVI),制备复合材料 S-nZVI@BFS 用于高效去除水溶液中 Cr(VI) ,通过吸附、还原与沉淀三重机制高效去除 Cr(VI) ,同时 BFS 的碱性缓冲能力稳定固定 Cr(III) ,显著提升了材料的环境安全性及去除容量(184 mg/g)。^[7]处理原理如图1

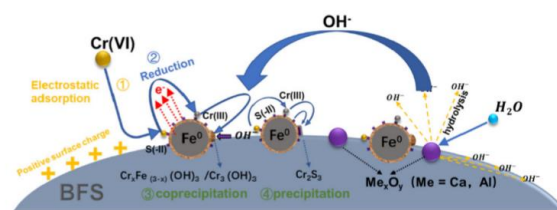


图1 高炉渣负载硫化纳米零价铁还原固定水溶液中 Cr(VI) 处理原理图

Zewdie 等开发了沸石是一种独特的材料,由于其微孔、高孔隙率、结构多样性和可回收性,具有巨大的 CO_2 收集潜力^[8]。Zhao 等创新性地建立了尖晶石型吸附剂上吸附和再生过程的动力学方程,揭示了吸附再生动力学研究的基础研究对 SO_2 的实际应用具有重要意义^[9]。

1.2.3 国内研究现状

在过去的数十年间,国内的学者们在环境科学与工程等学科领域对利用吸附法处理 SO_2 废气进行了深入研究,

并取得了丰富的成果，尤其在吸附剂的开发和应用方面。不同的研究者从不同的视角对吸附过程及其性能进行了详尽的分析。如，刘铮以活性炭为吸附剂，以丙酮为代表的 VOCs 和以 SO_2 为代表的无机气态污染物为吸附质，在活性炭多孔材料微尺度分析的理论基础上，定量系统地分析有机和无机气态污染物与微尺度材料表面物理化学性质之间的关系，从宏观和微观不同角度深入探讨丙酮和二氧化硫气体在活性炭多孔介质内复杂的表面物理化学状态和相互作用机制，从而科学地揭示吸附的微尺度构成关系^[6]。李民堂等设计了一种结合深冷技术和活性炭纤维或活性炭吸附的系统，用于处理化工尾气，该系统在有机物的冷凝分离以及活性炭纤维或活性炭吸附技术方面展现了创新性（如图 2）^[10]。

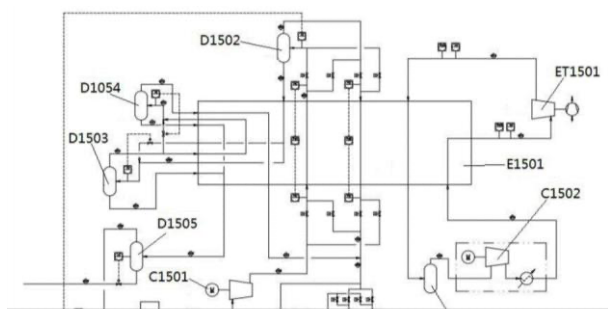


图 2 一种深冷加活性炭纤维或活性炭吸附处理化工尾气的系统

然而，从我国目前的发展情况来看，制备吸附剂用于治理 SO_2 废气的发展相对缓慢。相关理论研究主要集中在对于吸附剂材料的选择与优化、在复杂工业废气环境中的长期稳定性、与其他污染物的协同吸附机制，以及大规模工业化应用时的成本效益等方面的深入研究相对不足。未来，需要进一步加强这些方面的研究，以促进吸附剂在治理 SO_2 废气领域的广泛应用。

1.3 污泥吸附剂的技术进展与前景

陈春云等人以剩余活性污泥为原料、 ZnCl_2 为活化剂，考察了活化剂用量及活化时间对污泥吸附剂产率的影响，与商品活性炭相比，商品活性炭空隙比污泥吸附剂的小，商品活性炭主要为微孔，而污泥制备吸附剂主要为过渡孔，这将有利于增强污泥吸附剂的液相扩散性能^[11]。Izabayo Emelyne 基于剩余污泥的含碳性质，本研究拟将剩余活性污泥转化为富碳炭(CS, carbon-rich char)，并进一步对其进行活化和改性，与其他活性污泥基吸附剂相比，进行了磁改性的污泥吸附剂对苯酚具有较高的亲和力，24 小时去除效率为 54.7%，其具有最高的单层吸附容量 104.24 mg/g，表现出快速吸附行为，160 分钟可达到 72% 的平衡吸附率^[12]。

此外，研究还发现，磁改性污泥吸附剂不仅提高了吸附效率，还增强了其再生性能，使得吸附剂在多次使用后仍能保持较高的吸附能力。这一发现为污泥吸附剂的循环

利用提供了可能，进一步推动了污泥资源化利用的进程。

同时，国内外学者也在不断探索其他污泥基吸附剂的制备与应用，如通过热解、化学活化等方法制备的污泥炭、污泥衍生生物炭等，这些新型污泥吸附剂在二氧化硫废气治理中也展现出良好的应用前景。可见，污泥吸附剂作为一种新型、高效的二氧化硫废气治理材料，其技术进展和典型案例为我们提供了宝贵的经验和启示，也为未来的研究指明了方向。

2 总结与展望

2.1 研究评述与总结

在 SO_2 废气治理的研究领域，国内外的研究呈现出互补性和阶段性特征。国外的研究主要集中在吸附材料的基础理论创新和多技术融合，例如 MOFs 材料的结构调控、纳米零价铁复合材料的开发（如 S-nZVI@BFS 对 Cr(VI) 的协同吸附-还原机制），以及尖晶石型吸附剂再生动力学的理论突破。研究注重吸附机理的原位表征（如 XPS、FTIR）与生命周期评价（LCA），强调从分子尺度揭示吸附路径与环境效益的量化分析。此外，国外学者在生物电化学系统与光催化-吸附耦合技术方面取得进展，推动治理技术向低碳化与多污染物协同控制方向发展。国内的研究则更注重工艺优化与资源化实践，尤其在污泥基吸附剂领域成果显著。例如，通过 ZnCl_2 活化法提升污泥炭比表面积（ $394.1\text{m}^2/\text{g}$ ），实现苯系物高效吸附（二甲苯饱和容量达 152.9mg/g ）；磁性改性技术（如 Fe_3O_4 负载）增强吸附剂再生性能（再生 5 次效率保持 76.2%）。国内学者还结合工业需求开发了深冷-吸附集成系统（图 2），有效处理高浓度 SO_2 废气。然而，研究短板体现在基础理论深度不足（如吸附路径动态表征缺失）、工业化转化率低（实验室材料机械强度与工程稳定性不足），以及对高 SO_2 排放行业（火电、冶金）的案例研究较少。

值得关注的是，国内外面临的共同挑战包括：吸附效率与选择性瓶颈：污泥基吸附剂对 SO_2 的吸附容量（如 99.3mg/g ）仍低于商业活性炭（ $150\sim 200\text{mg/g}$ ），且易受 NO_x 、 CO_2 及水蒸气干扰；再生技术矛盾：热再生导致孔隙坍塌（微孔损失率 $>30\%$ ），化学再生存在二次污染风险（如酸洗废液处理）；工业化障碍：复杂烟气条件（温度波动、粉尘残留 $\leq 10\text{mg/Nm}^3$ ）降低吸附剂寿命，规模化设备（如流化床）的连续运行效率不足固定床实验值的 60%；环境风险管控缺失：重金属浸出（如 ZnCl_2 活化剂残留）与固废再生利用标准尚未完善。未来方向需突破多学科壁垒，通过在材料设计、技术耦合、政策驱动的模式下，通过碳交易机制激励企业采用污泥基吸附剂，推动“以废治废”模式落地。

2.2 现存问题及未来发展方向

吸附效率与选择性上，污泥活性炭对 SO_2 的吸附容量仍低于传统活性炭，且易受 NO_x 、 CO_2 等共存气体干扰；

再生技术瓶颈问题，热再生导致孔隙坍塌，化学再生存在二次污染风险；环境风险上，重金属浸出问题缺乏系统性解决方案；工业化障碍问题，实验室成果向工程应用的转化率低，长期稳定性数据不足。

未来研究需从关键方向突破，深入未知科学领域，推动跨学科合作，利用先进技术，重视研究伦理：多尺度孔道设计：结合化学活化与生物炭掺杂，构建分级孔隙（微-中-大孔）以增强 SO_2 扩散与化学吸附，如通过 KOH 与 H_3PO_4 协同活化调控表面官能团；我国每年产生污泥超 6000 万吨，传统填埋与焚烧方式易引发重金属渗漏、二噁英排放等二次污染。本研究通过污泥活性炭制备技术，将污泥转化为高附加值吸附材料，实现固废减量化（减重 70% 以上）与无害化（重金属固定率 $>85\%$ ）。吸附剂再生技术的理论突破是本研究另一重要贡献。现有再生理论多基于热力学平衡（如 Langmuir 脱附模型），但忽略了再生过程中材料结构退化与二次污染风险。本研究通过对比热再生、化学再生（如多组分溶液洗脱）及生物再生（如微生物降解）的效率差异，构建了“能耗—效率—稳定性”综合评价模型。此外，通过引入生命周期评估（LCA）理论，量化污泥活性炭从制备、使用到再生的全链条环境效益，为吸附材料的可持续性评价提供了方法论支持。此外，推动污泥活性炭与光催化、生物滴滤或微生物燃料电池的耦合，有助实现 SO_2 高效去除与能源回收双重目标。

污泥活性炭吸附 SO_2 技术的规模化应用必须同时考虑“高效性”和“可持续性”。未来，我们应重点研究其在钢铁、火电等高污染行业的实际应用案例，并结合智能监测技术（例如原位 FTIR、XPS 表征）实时优化吸附过程。同时，政策层面应鼓励“以废治废”的模式，通过碳交易机制或补贴政策提高企业的采纳意愿。通过技术创新与制度设计的双重推动，污泥活性炭有望成为实现“双碳”目标下废气治理的核心材料之一。

2.3 研究意义

2.3.1 理论意义

本研究不仅在污泥资源化与废气吸附材料领域的交叉理论研究中取得了显著进展，深入探讨了污泥活性炭的孔隙结构、表面官能团与 SO_2 吸附性能之间的结构-功能关系，从而揭示其内在的构效机制；此外，在多污染物协同吸附理论方面也做出了重要贡献，为在复杂废气体系中应用污泥活性炭提供了坚实的方法论支持。通过这一系列的研究，不仅为学术界提供了新的理论视角，也为工业界在废气处理技术的选择和应用上提供了科学依据和实践指导。

2.3.2 实际意义

本研究针对 SO_2 废气治理成为了当前全球环境问题亟待解决的严峻挑战的问题，提出了一种创新的低成本且可持续的吸附剂解决方案。有效降低企业环境保护的经济负担，而且通过采用环保材料和优化吸附工艺，实现了对

SO_2 的高效吸附。此外，本研究还深入探讨了如何将污泥资源化技术产业化，以期减轻因污泥填埋和焚烧所带来的环境压力，为实现国家碳达峰与碳中和的宏伟目标提供坚实的技术支持和实践路径，为构建绿色、低碳、可持续发展的社会贡献力量。

3 结语

目前，污泥活性炭吸附技术正在 SO_2 废气治理领域展现了其独特的“以废治废”优势。通过深入研究该技术的理论与实践，我们不仅完善了多污染物协同吸附的理论体系，更重要的是，明确了其在制备工艺和工程应用方面的关键进展，为其进一步发展奠定了坚实的基础。

尽管目前吸附效率、再生技术以及重金属稳定性等问题构成了阻碍其工业化大规模应用的瓶颈，但随着研究的不断深入，聚焦于多尺度孔道设计、低温再生技术、多种技术协同治理以及环境风险管控体系的构建，有望逐一解决这些难题。跨学科合作能够整合不同领域的专业知识与技术手段，加速技术的创新与突破；而政策的大力支持则可为技术的推广应用提供有力保障，从资金扶持到标准制定，全方位推动污泥活性炭吸附 SO_2 技术从实验室走向实际生产。

污泥制备吸附剂治理 SO_2 废气技术蕴含着巨大的环保与经济潜力，其规模化应用不仅能够有效解决大气污染问题，助力改善环境质量，还能通过资源的循环利用，推动“双碳”目标的实现，为可持续发展战略注入强劲动力。相信在各方的共同努力下，该技术必将在未来的环境保护事业中大放异彩，为人类创造更加清洁、美好的生活环境。

基金项目：国家自然科学基金 No.22263001；国家级及省级大学生创新创业项目经费 S202410608362X、202410608007X。

【参考文献】

- [1] 魏夜香. 多源数据支持下的中国二氧化硫时空分布及驱动力研究[D]. 山西: 山西大学, 2024.
- [2] 龙伟荣. 火电厂湿法烟气脱硫石膏脱水问题分析及改进措施[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(2): 1-3.
- [3] 黎媛萍, 邹斌, 贾舜尧, 等. 污泥基生物炭的制备及其在环境污染治理中的应用[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2024(1): 68-73.
- [4] 姒伟华, 李志伟. 高炉煤气精脱硫干法工艺改进[J]. 一重技术, 2024(6): 1-3.
- [5] Xiaoling Zhao. SO_2 动力学研究尖晶石型吸附剂上的吸附和再生[J]. Chemical Engineering Science, 2024(306): 1-3.
- [6] 刘铮. 活性炭吸附法净化丙酮和二氧化硫的研究[D]. 湖南: 中南大学, 2014.
- [7] Xiaofeng Zhu, Bicheng Zhu, Chuanjia Jiang, et al. Superb

adsorption capacity of hierarchical calcined Ni/Mg/Al layered double hydroxides for Congo red and Cr(VI) ions[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2017(321):11-18.

[8] Abdul Wahab,Amjad Farooq,Faisal Faiz,et al. Innovative adsorbent for sulphur dioxide: synergy of activated carbon, polyionic liquids, and chitosan[J]. *Adsorption*,2025(31):1-11.

[9] Xiaoling Zhao,Jinjin Lia,Zhipeng Yang,et al. Study of the kinetics of SO₂ adsorption and regeneration over the spinel-type adsorbent[J]. *Chemical Engineering Science*,2025(306):1-5.

[10]李民堂,王增礼,张崇森.一种深冷加活性炭纤维或活性炭吸附处理化工尾气系统的制作方法:2020730095[P]. 2020-5-12. [Z]

[11]陈春云,王鹏,庄源益.剩余污泥吸附剂的制备及其吸附性能研究[J]. *环境科学与技术*,2006(8):88-90.

[12]Izabayo Emelyne.改性剩余活性污泥吸附剂的制备及在含酚焦化废水处理中的应用[D]. 陕西:陕西科技大学,2021.

作者简介:罗秋妍(2004—),女,壮族,广西,本科在读,广西民族大学化学化工学院,研究方向:生物炭吸附剂材料的制备及其应用。