

# 环境工程领域工业烟气多污染物协同脱除新工艺探索

战立伟 王璐瑶 马相如

山东德达环境科技有限公司 山东 济南 250000

**摘要:** 在环境工程领域,工业烟气多污染物协同脱除新工艺聚焦多污染物协同控制。通过吸附-催化耦合、电化学协同等技术,结合纳米材料改性催化剂,实现SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、Hg等污染物高效协同脱除。工艺集成预处理、主反应及后处理模块,强化传质效率并优化反应条件,提升长期稳定性。新工艺兼具高效、低耗及资源化优势,有效支撑工业绿色转型及“双碳”目标实现。

**关键词:** 环境工程领域;工业烟气多污染物;协同脱除新工艺

**引言:** 工业烟气排放是造成大气污染的关键因素,其中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物(PM)及重金属汞(Hg)等污染物协同排放,加剧了酸雨、雾霾等环境问题。传统分质脱除技术存在流程复杂、成本高昂及二次污染风险。环境工程领域亟需开发高效、低耗、资源化的多污染物协同脱除新工艺。本文基于气固多相反应动力学与表面化学理论,探索吸附-催化耦合等创新技术,推动工业烟气净化技术升级与绿色发展。

## 1 环境工程领域工业烟气多污染物协同脱除文献综述与理论基础

### 1.1 国内外研究现状

(1) 湿法/半干法协同脱除技术:国内聚焦钙基吸收剂改性(如添加MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)提升脱硫脱硝效率,工业应用中脱硫率可达95%以上,但脱硝率普遍低于80%;国外侧重工艺优化,如半干法循环流化床技术,实现吸收剂利用率提升30%,但成本较高。(2) 催化氧化协同技术:CuO基催化剂研究中,国内通过负载TiO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub>增强Hg<sup>0</sup>氧化与NO<sub>x</sub>还原活性,在150-300°C区间协同脱除效率超85%;国外探索催化剂抗硫中毒改性,如引入Zr元素形成固溶体,延长使用寿命至5000h以上。(3) 等离子体/光催化协同体系:国内以低温等离子体结合TiO<sub>2</sub>光催化为主,在模拟烟气中实现多污染物同步脱除率超90%,但能耗问题突出;国外开发脉冲等离子体-光催化复合反应器,能耗降低25%,但是尚未规模化应用。

### 1.2 关键科学问题

(1) 多污染物竞争吸附/反应机制:烟气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、Hg<sup>0</sup>等在吸附剂/催化剂表面存在竞争吸附位点现象,导致目标污染物脱除效率相互制约,其微观作用机制尚不明确。(2) 副产物生成与资源化路径:协同脱除易生成硫酸铵、硝酸钙等副产物,现有处理工艺存在纯度低、资源化成本高的问题,缺乏高效回收技术。(3) 工艺放大

与长期稳定性:实验室规模技术在工业放大时,易出现流场不均、催化剂失活等问题,长期运行稳定性不足,难以满足工业连续生产需求。

### 1.3 理论支撑

(1) 气固多相反应动力学:为分析污染物在气固界面的传质、反应速率提供理论依据,可通过建立动力学模型优化反应条件,提升协同脱除效率。(2) 表面化学吸附理论:揭示污染物在吸附剂/催化剂表面的吸附类型、活性位点作用机制,指导材料改性设计,增强对目标污染物的选择性吸附能力。(3) 过程强化技术原理:借助微反应器强化传质效率、通过流场优化改善反应均匀性,为解决工艺放大难题、提升系统稳定性提供理论支撑。

## 2 环境工程领域工业烟气多污染物协同脱除新工艺设计与实验研究

### 2.1 工艺路线选择

(1) 技术路线对比:吸附-催化耦合技术兼具吸附剂对污染物的富集作用与催化剂的高效转化能力,可同步脱除SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、Hg<sup>0</sup>等多污染物,在180-300°C工况下协同脱除效率可达90%以上,且抗硫中毒性能较单一技术提升40%,但存在材料再生成本较高的问题;电化学协同技术利用电极反应氧化还原污染物,反应条件温和(常温常压),无二次污染,不过能耗较高(约50-80kWh/1000m<sup>3</sup>烟气),且处理量难以满足大规模工业需求;生物法通过微生物代谢降解污染物,运行成本低(仅为吸附-催化耦合技术的1/3),但对温度、pH等环境因素敏感,低温(<15°C)或高浓度烟气(SO<sub>2</sub>>3000mg/m<sup>3</sup>)下处理效率骤降。综合技术成熟度、处理效率及工业适配性,优先选择吸附-催化耦合技术作为核心工艺路线。(2) 工艺流程图:预处理模块包含除尘(布袋除尘器,除尘效率>99.5%)、降温(换热器将烟气温度从180-250°C降至120-150°C)及除湿(冷凝除湿器,将烟

气湿度控制在8%~12%)，避免粉尘堵塞设备、高温破坏催化剂活性；主反应模块采用吸附-催化耦合反应器，填充复合功能吸附剂/催化剂，实现SO<sub>2</sub>吸附、NO<sub>x</sub>与Hg<sup>0</sup>催化转化；后处理模块包括催化剂再生（热空气吹扫，再生效率>85%）、副产物回收（硫酸铵结晶装置，纯度>98%）及尾气检测（在线监测系统达标后排放），形成完整闭环工艺<sup>[1]</sup>。

## 2.2 核心材料开发

(1) 复合功能吸附剂/催化剂设计：以Mn-Ce-Fe氧化物为核心组分，采用溶胶-凝胶法制备，通过调控Mn/Ce/Fe摩尔比（优化比例为3:2:1），构建多活性位点（Mn<sup>4+</sup>/Mn<sup>3+</sup>、Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> redox对），增强对SO<sub>2</sub>的吸附容量（达120mg/g）及对NO<sub>x</sub>、Hg<sup>0</sup>的催化活性（NO<sub>x</sub>转化率>92%，Hg<sup>0</sup>氧化率>95%）；引入介孔SiO<sub>2</sub>载体（比表面积>500m<sup>2</sup>/g），提升材料孔隙率，减少传质阻力。(2) 结构化催化剂制备：以堇青石蜂窝载体（孔密度300cps）为基底，采用涂覆法负载Mn-Ce-Fe氧化物涂层（厚度5~8μm），制备整体式蜂窝催化剂，比传统颗粒催化剂压降低30%，且便于规模化装填；探索3D打印技术，以氧化铝陶瓷浆料为原料，打印具有交错流道结构的催化剂载体（流道直径2~3mm），进一步优化流场分布，传质效率提升25%。(3) 新型吸收液配方：研发咪唑类离子液体（如[BMIM][BF<sub>4</sub>]）与乙二醇的混合吸收液，通过调控离子液体浓度（30%~50%），SO<sub>2</sub>吸收容量达0.8mol/mol，且解吸温度低（80~100℃），能耗较传统胺法降低40%；开发尿素-氯化胆碱深共熔溶剂（摩尔比2:1），在常温下对NO<sub>x</sub>的溶解度提升至传统吸收液的3倍，且无挥发性，减少二次污染<sup>[2]</sup>。

## 2.3 实验系统搭建

(1) 模拟烟气发生装置：采用钢瓶气（N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO、Hg<sup>0</sup>标准气）结合质量流量控制器（精度±0.5%）配制模拟烟气，SO<sub>2</sub>浓度可调节范围500~3000mg/m<sup>3</sup>，NO浓度200~1000mg/m<sup>3</sup>，Hg<sup>0</sup>浓度5~50μg/m<sup>3</sup>，烟气总流量500~2000L/h；配备气体混合罐（容积5L）与预热装置（控温精度±1℃），确保烟气成分均匀、温度稳定。(2) 中试规模反应器设计：对比搭建固定床（内径50mm，长度500mm，催化剂装填量1~2L）、流化床（内径80mm，流化床层高度200~300mm）与旋转床（转速0~1500r/min，填料层高度50mm）反应器；固定床操作简便、催化剂磨损小，但传质效率较低；流化床传质充分，适合高浓度烟气处理，但催化剂损耗率较高（约5%/1000h）；旋转床凭借离心力强化气液传质，处理效率较固定床提升40%，但设备制造难度大。根据工艺需求，优先选用旋转床反

应器进行中试实验<sup>[3]</sup>。(3) 在线监测系统：采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR，分辨率4cm<sup>-1</sup>，检测下限1mg/m<sup>3</sup>）实时监测SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>浓度；气相色谱-质谱联用仪（GC-MS，检测限0.1μg/m<sup>3</sup>）分析烟气中Hg<sup>0</sup>及有机副产物；激光散射法颗粒分析仪（测量范围0.1~10μm）监测反应器出口粉尘浓度；整套系统数据采集频率为1次/分钟，可实现多参数同步监测与数据自动存储。

## 3 环境工程领域工业烟气多污染物协同脱除机制与性能优化

### 3.1 反应路径解析

(1) SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>协同氧化中间产物分析：结合密度泛函理论（DFT）计算，揭示Mn-Ce-Fe氧化物表面SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>协同氧化路径—SO<sub>2</sub>优先吸附于Fe<sup>3+</sup>活性位点生成HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>，随后被Ce<sup>4+</sup>氧化为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>（反应能垒降低至0.8eV）；NO则在Mn<sup>4+</sup>位点吸附形成NO<sub>2</sub><sup>-</sup>，与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>反应生成硫酸硝酸复合盐（如NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>·(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>），DFT计算证实该复合盐生成可促进NO吸附（吸附能提升至-5.2kJ/mol）。通过原位漫反射红外光谱（in-situDRIFTS）捕捉到HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>等中间产物，验证理论计算结果。(2) PM捕集与气态污染物协同去除机制：结构化催化剂表面的介孔结构（孔径2~50nm）可通过惯性碰撞、布朗扩散捕集PM<sub>2.5</sub>，同时PM表面的羟基（-OH）与SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>形成氢键，增强污染物吸附能力；此外，PM中的金属氧化物（如Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）可作为辅助活性位点，促进NO氧化为NO<sub>2</sub>，使气态污染物脱除效率提升15%~20%，实现“以尘载污、协同去除”。(3) 能量/物质耦合关系：通过热力学平衡分析（采用HSCChemistry软件），发现主反应（SO<sub>2</sub>+NO+1/2O<sub>2</sub>→SO<sub>3</sub>+1/2N<sub>2</sub>）在120~150℃下吉布斯自由能ΔG<-40kJ/mol，为自发反应；预处理模块的降温过程（烟气温度从200℃降至130℃）可回收热量（约120kJ/m<sup>3</sup>烟气），用于后处理模块的催化剂热再生，实现能量耦合；物质层面，副产物硫酸铵中的N元素来源于烟气中NH<sub>3</sub>还原剂，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>来源于SO<sub>2</sub>，形成物质循环，降低原料消耗。

### 3.2 工艺参数优化

(1) 温度/压力/停留时间的影响：温度升高至130℃时，SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>脱除效率达峰值（分别为96%、92%），继续升温会导致吸附剂脱附加剧；压力控制在0.12MPa时，气态污染物在催化剂表面吸附容量提升25%，过高压力会增加设备能耗；停留时间延长至3.5s时，脱除效率趋于稳定，进一步延长会降低处理量，最优参数组合为130℃、0.12MPa、3.5s。(2) 添加剂的增效作用：添加0.5%H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可生成·OH自由基，加速NO氧化为NO<sub>2</sub>（氧化率提升

30%)，且避免生成二次污染物；通入体积分数0.3%的臭氧，可将 $Hg^0$ 氧化为 $Hg^{2+}$ （氧化率超98%），同时促进 $SO_2$ 转化，使协同脱除效率提升12%–18%，但需控制添加剂用量，避免过量导致设备腐蚀。（3）再生工艺设计：热再生采用180℃热空气吹扫30min，催化剂吸附容量恢复率达85%以上，能耗约5kWh/kg催化剂；化学洗涤再生使用0.1mol/L硫酸溶液，可有效脱除催化剂表面的硫酸铵等副产物，再生效率超90%，但需处理洗涤废液（含硫酸铵，可回收用作肥料），两种工艺可交替使用，延长催化剂寿命至3000h以上<sup>[4]</sup>。

### 3.3 经济性与环境影响评估

（1）全生命周期成本分析（LCCA）：工艺总投资约280万元/10000m<sup>3</sup>/h处理量，其中核心材料（Mn-Ce-Fe催化剂）占比35%，运行成本（能耗、药剂、人工）约12元/1000m<sup>3</sup>烟气，较传统分质处理工艺（约18元/1000m<sup>3</sup>烟气）降低33%，投资回收期约3.5年。（2）二次污染风险评估：产生的废渣（废催化剂，年排放量约50kg/10000m<sup>3</sup>处理量）可通过酸溶回收金属氧化物（回收率超80%）；洗涤废液（含硫酸铵，浓度约5%）经蒸发结晶后纯度达98%，可作为农业肥料，无二次污染排放，风险等级为“低风险”。（3）碳足迹核算：工艺全生命周期碳排

放约80kgCO<sub>2</sub>/10000m<sup>3</sup>烟气，较常规脱硫脱硝工艺（约150kgCO<sub>2</sub>/10000m<sup>3</sup>烟气）降低47%，主要得益于能量回收与副产物资源化，符合“双碳”目标要求。

### 结束语

环境工程领域工业烟气多污染物协同脱除新工艺的研究，是应对大气复合污染、推动工业绿色转型的关键举措。本文通过吸附-催化耦合等创新工艺探索，结合核心材料开发与工艺参数优化，实现了多污染物高效协同脱除、资源化利用及低碳运行。未来需进一步强化工艺放大研究、降低材料成本，并推动示范工程落地，为工业烟气深度净化提供技术支撑，助力“双碳”目标与可持续发展愿景实现。

### 参考文献

- [1] 齐亚兵,唐承卓,贾宏磊.工业烟气湿法脱硫技术的发展现状及研究新进展[J].材料导报,2022,36(S1):88-90.
- [2] 刘俊逸,张晓昀,李杰,等.工业烟气脱硫脱硝及一体化新技术的研究进展[J].应用化工,2021,50(08):229-230.
- [3] 企业组优胜奖工业烟气气动脱硫技术应用及产业化[J].军民两用技术与产品,2015,(19):20-22.
- [4] 朱香玉.工业废气脱硫脱硝技术的比较研究与工程应用[J].纯碱工业,2025,(03):96-97.