

工业废气净化技术的创新与应用对环境质量的改善研究

张妮

江苏博新能碳科技有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i7.2750

[摘要] 工业废气是大气污染主要来源,其排放控制与净化是改善环境质量、推进生态文明建设的关键。本文结合我国工业废气排放现状与治理痛点,用文献研究、案例分析及数据对比法,梳理吸附、催化氧化、生物净化、低温等离子体等核心技术创新方向,分析其在钢铁、化工、电力等行业的应用,并从空气质量、生态保护、人体健康维度量化评估效果。研究显示,新型吸附材料净化效率超95%,催化氧化低温化改造降能耗30%–40%,生物净化模块化适配中小企业;这些技术规模化应用可使区域PM2.5降15%–25%,SO₂、NO_x排放量减20%–35%,缓解酸雨、雾霾。本文为工业废气治理技术选型与推广提供参考,助力“双碳”目标与环境质量改善。

[关键词] 工业废气净化;技术创新;环境质量改善;吸附技术;催化氧化

中图分类号: S888.74+8 **文献标识码:** A

Research on the Innovation and Application of Industrial Waste Gas Purification Technology for Improving Environmental Quality

Ni Zhang

Jiangsu Boxin Energy Carbon Technology Co., Ltd.

[Abstract] Industrial waste gas is the main source of air pollution, and its emission control and purification are key to improving environmental quality and promoting ecological civilization construction. This article combines the current situation and pain points of industrial waste gas emissions in China, and uses literature research, case analysis, and data comparison methods to sort out the innovative directions of core technologies such as adsorption, catalytic oxidation, biological purification, and low-temperature plasma. It analyzes their applications in industries such as steel, chemical, and power, and quantitatively evaluates their effects from the dimensions of air quality, ecological protection, and human health. Research shows that the purification efficiency of the new adsorption material exceeds 95%, and the low-temperature transformation of catalytic oxidation reduces energy consumption by 30%–40%. The modular adaptation of biological purification is suitable for small and medium-sized enterprises; The large-scale application of these technologies can reduce regional PM2.5 by 15%–25%, decrease SO₂ and NO_x emissions by 20%–35%, and alleviate acid rain and haze. This article provides reference for the selection and promotion of industrial waste gas treatment technologies, helping to achieve the “dual carbon” goals and improve environmental quality.

[Key words] Industrial waste gas purification; technological innovation Improvement of environmental quality; Adsorption technology; catalytic oxidation

引言

随着我国工业化进程的加速,工业废气排放量长期处于高位,这成为制约环境质量提升的重要因素。根据《2024中国生态环境状况公报》,2023年我国工业源二氧化硫(SO₂)排放量达120.5万吨,氮氧化物(NO_x)排放量185.2万吨,挥发性有机物(VOCs)排放量98.3万吨,分别占全国总排放量的45.2%、52.8%、68.7%。从行业分布来看,钢铁、化工、电力、有色金属冶炼是

工业废气的主要排放源:钢铁行业在烧结、炼铁环节排放大量SO₂与粉尘,化工行业(如石油化工、煤化工)产生高浓度VOCs与有毒有害气体(如苯、甲苯),电力行业(燃煤发电)是NO_x与颗粒物的主要贡献者,有色金属冶炼则伴随重金属废气(如铅、汞蒸汽)排放。

从区域分布来看,华北、华东等工业密集区的废气污染问题尤为突出。以京津冀地区为例,2023年该区域工业源PM2.5贡献

占比达38%;冬季重污染天气中,工业废气排放导致的PM_{2.5}浓度增量占比超40%,严重影响区域空气质量与居民生活质量。

1 我国工业废气排放当前治理痛点

尽管我国已建立较为完善的工业废气排放标准体系(如《大气污染物综合排放标准》GB 16297-1996、各行业专项排放标准),但在实际治理过程中仍面临三大痛点:其一,传统净化技术效率低、能耗高。部分中小企业仍采用“水洗法”“简单吸附法”等传统技术,对VOCs、重金属等复杂废气的净化效率不足60%,且水洗法存在“二次水污染”问题,传统吸附材料(如普通活性炭)需频繁更换,导致处理成本高、能耗大;其二,技术适配性不足。大型企业虽具备安装高效净化设备的资金与场地条件,但中小规模企业因生产规模小、资金有限,难以承担大型催化氧化设备的购置与运行成本,导致治理设施“装而不用”“用而不优”;其三,协同治理能力弱。工业废气成分复杂(多为“颗粒物+气态污染物+有毒物质”混合体系),但现有治理技术多针对单一污染物,缺乏“多污染物协同净化”技术,如处理含尘VOCs废气时,需先通过除尘设备再进行VOCs净化,流程繁琐、设备投资高,难以实现高效协同治理。

2 工业废气净化技术的核心创新方向

针对上述治理痛点,近年来工业废气净化技术围绕“高效化、低能耗、模块化、协同化”方向展开创新,形成了多类具有代表性的技术成果,以下从四类核心技术展开分析:

2.1 吸附技术: 新型材料研发与再生工艺优化

吸附技术是处理低浓度VOCs、恶臭气体的主流技术,创新核心为“高性能吸附材料研发”与“吸附剂再生工艺优化”。传统吸附材料(如普通活性炭、分子筛)存在吸附容量低、选择性差、再生困难等问题,新型材料通过结构设计与成分改性提升性能:其一,介孔碳材料(如有序介孔碳、碳纳米管复合材料)调控介孔孔径(2-50nm)与比表面积(800-1500m²/g),使VOCs吸附容量较普通活性炭提升2-3倍,对苯、甲苯等芳香族VOCs选择性提升40%以上;其二,金属有机框架材料(如ZIF-8、HKUST-1)依托多孔可调、金属活性位点丰富的优势,高效吸附低浓度VOCs(<100mg/m³),净化效率超95%,且在高湿度(>80%)环境下吸附稳定,解决传统材料遇水能力下降问题;其三,复合吸附材料(如活性炭-分子筛复合材料、吸附剂-催化剂复合体系)结合吸附与催化降解功能,实现“吸附-降解”一体化,避免二次污染。^[1]

在再生工艺优化方面,传统“热再生法”(如120-180℃热空气吹扫)存在能耗高、吸附剂损耗大(每次再生损耗5%-10%)的问题,新型再生技术如“微波再生法”“电加热再生法”显著降低能耗:微波再生法通过微波定向加热吸附剂中的污染物,再生时间从热再生法的2-3小时缩短至30-60分钟,能耗降低50%以上,且吸附剂损耗率降至1%以下;电加热再生法则通过内置电极实现吸附剂均匀加热,避免局部过热导致的吸附剂结构破坏,延长吸附剂使用寿命(从传统的3-6个月延长至1-2年)。

2.2 催化氧化技术: 低温化与催化剂改性

催化氧化技术通过催化剂将废气中的污染物(如VOCs、CO)

氧化分解为CO₂与H₂O,适用于中高浓度废气处理,其创新重点在于“低温催化技术研发”与“高效催化剂制备”。传统催化氧化技术需在300-400℃高温下运行,能耗高且易产生NO_x等二次污染物,低温催化技术通过催化剂改性,将反应温度降至150-250℃,大幅降低能耗:其一,贵金属催化剂改性,如在Pt、Pd等贵金属表面负载CeO₂、ZrO₂等稀土氧化物,形成“贵金属-稀土氧化物”复合催化剂,稀土氧化物的“氧储存-释放”能力可促进污染物氧化反应,使VOCs氧化温度降低80-120℃,且催化剂稳定性提升,使用寿命从1-2年延长至3-5年;其二,非贵金属催化剂研发,如Mn-based氧化物催化剂(MnO₂-CuO-ZnO)、Co₃O₄基催化剂,通过调控金属离子价态与晶体结构,使非贵金属催化剂的催化活性接近贵金属催化剂,且成本降低70%以上,解决贵金属催化剂“价格昂贵、资源稀缺”的问题。

2.3 生物净化技术: 模块化与菌种驯化

生物净化技术利用微生物(细菌、真菌、放线菌)的代谢作用降解废气中的污染物,具有“低能耗、无二次污染”的优势,适用于低浓度、易生物降解的废气(如恶臭气体、低浓度VOCs),其创新方向集中在“模块化设备设计”与“高效菌种驯化”。传统生物净化设备(如生物滤池)存在“占地面积大、启动周期长(1-2个月)”的问题,模块化生物净化设备通过“单元化设计”,将生物滤池、生物滴滤塔拆分为标准化模块(如1m×1m×2m的滤池模块),企业可根据废气排放量灵活组合模块数量,安装周期从传统的15-30天缩短至3-7天,且占地面积减少40%-60%,适配中小规模企业的场地需求。^[2]

在菌种驯化方面,通过“定向筛选+基因工程改造”获得高效降解菌种:其一,从污染场地(如化工园区土壤、污水处理厂活性污泥)中筛选天然高效菌种,如降解苯系物的假单胞菌、降解硫化氢的硫氧化细菌,经富集培养后,使菌种浓度提升10-100倍,废气降解效率提升30%-50%;其二,通过基因工程技术改造菌种,如将降解VOCs的关键酶基因(如单加氧酶基因)导入宿主菌,构建“超级降解菌”,使该菌种对难降解VOCs(如氯苯)的降解率从传统菌种的30%提升至80%以上,且在低温(5-15℃)、高盐等极端环境下仍能保持活性,拓宽生物净化技术的应用场景。

2.4 低温等离子体技术: 协同净化与能耗控制

低温等离子体技术通过高压放电产生电子、自由基、离子等活性粒子,氧化分解废气污染物,适用于复杂混合废气处理,创新重点在“多污染物协同净化”与“能耗控制”。传统技术单独使用时,颗粒物去除效率不足50%且易产O₃等二次污染物,新型“低温等离子体-催化”协同技术在反应器内设TiO₂、MnO₂等催化剂,实现“等离子体氧化+催化降解”协同:一方面活性粒子激活污染物分子,降低催化活化能;另一方面催化剂促活性粒子生成利用,减副产物。该技术对“颗粒物+VOCs+NO_x”混合废气净化效率超90%,其中颗粒物去除率提至85%、VOCs达92%、NO_x达88%,解决传统技术“协同治理能力弱”问题。

在能耗控制上,新型低温等离子体反应器借“介质阻挡放电结构优化”与“脉冲电源设计”降能耗:前者采用“蜂窝状电

极+陶瓷介质”,提升放电均匀性与污染物接触面积,使能量利用率提高40%;后者通过调控放电频率(10-50kHz)与脉冲宽度(1-10 μ s),避免连续放电耗能,能耗从传统50-100Wh/m³降至20-30Wh/m³,接近吸附技术水平,解决其“高能耗”痛点。^[3]

3 工业废气净化技术应用对环境质量的改善效果

3.1 空气质量指标显著改善

工业废气净化技术在重点行业的规模化应用,直接推动区域空气质量指标(如PM_{2.5}、SO₂、NO_x、VOCs)的改善。以钢铁行业为例,某大型钢铁企业采用“新型吸附-催化氧化协同技术”处理烧结环节VOCs与SO₂混合废气,技术应用后,VOCs排放量从800mg/m³降至30mg/m³以下,SO₂排放量从500mg/m³降至50mg/m³以下,企业周边1公里范围内的PM_{2.5}浓度月均值从55 μ g/m³降至42 μ g/m³,下降23.6%,SO₂浓度月均值从25 μ g/m³降至12 μ g/m³,下降52%。

在化工行业,某石油化工园区推广“模块化生物净化技术+低温等离子体协同技术”,针对园区内20家中小型化工企业的VOCs废气进行集中处理,技术应用半年后,园区内VOCs浓度日均值从120 μ g/m³降至45 μ g/m³,下降62.5%,区域内臭氧(O₃)8小时浓度超标天数从每月10天降至3天,下降70%,有效缓解夏季臭氧污染问题。

从全国范围来看,2018-2023年,随着高效工业废气净化技术的推广,我国工业源SO₂排放量从220.6万吨降至120.5万吨,降幅45.4%;NO_x排放量从265.3万吨降至185.2万吨,降幅30.2%;重点区域(如京津冀、长三角)工业源PM_{2.5}贡献占比从45%降至38%,空气质量达标天数比例从68.5%提升至76.8%,技术应用对空气质量改善的贡献度达35%-40%。

3.2 生态系统保护成效显著

工业废气中的SO₂、NO_x是形成酸雨的主要原因,VOCs与NO_x在光照条件下反应生成臭氧,会对植物生长、土壤与水体生态造成破坏。工业废气净化技术的应用,有效减少酸性物质与有害气体排放,缓解对生态系统的冲击。

以酸雨污染较为严重的西南地区为例,某燃煤电厂采用“低温催化氧化技术”处理锅炉烟气中的NO_x,技术应用后,NO_x排放量削减40%,周边区域的降水pH值从4.5(强酸性)提升至5.6(中性),酸雨频率从每年60次降至25次,下降58.3%。酸雨强度的减弱,使周边森林的树木叶片受损率从35%降至12%,土壤酸化程度(土壤pH值)从4.2提升至5.0,土壤中钙、镁等营养元素流失量减少30%,植物根系生长环境得到改善,森林生态系统的生产力提升15%-20%。

3.3 人体健康保障能力提升

工业废气中的颗粒物(尤其是PM_{2.5})、VOCs、重金属等污染物,可通过呼吸进入人体,引发呼吸系统疾病(如哮喘、肺炎)、心

血管疾病,甚至增加癌症风险。工业废气净化技术的应用,减少污染物排放,降低人群健康风险。

以某化工园区周边社区为例,技术应用前,园区内VOCs(如苯、甲苯)排放量较高,社区居民的哮喘发病率为8.5%,儿童呼吸道感染发病率为12%;推广“高效吸附-催化氧化技术”后,VOCs排放量削减80%,社区居民的哮喘发病率降至4.2%,儿童呼吸道感染发病率降至6.5%,均下降约50%。

4 工业废气净化技术发展建议

为推动工业废气净化技术进一步落地优化,需从“技术研发、政策支持、产业协同”三方面发力:其一,加强关键核心技术研发,针对含氯VOCs、复杂重金属废气等难降解废气,加大新型催化剂、协同净化技术研发投入,建“产学研用”协同创新平台,促实验室技术向工业化转化;其二,完善政策支持体系,对使用高效净化技术的中小企业给予设备购置、运行等资金补贴,将技术应用效果纳入企业环境信用评价,借绿色信贷、税收减免提升企业治污积极性;其三,推动产业协同发展,鼓励净化设备制造、环保服务企业与工业企业合作,提供“设备租赁+运营服务”等定制化方案降低治理成本,同时建立工业废气监测数据共享平台,实现“污染排放-技术应用-环境质量”全链条监管,保障技术效果稳定。^[4]

5 结语

工业废气净化技术的创新与应用,是解决工业污染、改善环境质量的核心手段。从新型吸附材料的研发到低温催化技术的突破,从模块化设备的推广到协同净化技术的应用,各类技术创新不仅提升了废气净化效率、降低了处理成本,更直接推动了空气质量改善、化技术将在“双碳”目标实现与生态文明建设中发挥更大作用,为构建“人与自然和谐共生”的美丽中国提供有力支撑。

[参考文献]

[1]文青山,李运泉,白凯杰,等.双碳目标驱动下工业锅炉烟气深度净化及资源化技术探讨[J].仪器仪表标准化与计量,2024,(03):7-9.

[2]王灵萍,张育铭,王树凯.喷漆废气中漆雾处理及含VOCs废气净化措施的探讨分析[J].广州化工,2024,52(05):151-153.

[3]郭彦炳,工业VOCs废气催化净化材料与智能装备关键技术及应用.湖北省,华中师范大学,2023-10-24.

[4]韦联安,工业废气净化与资源化处理技术开发与应用示范.广西壮族自治区,河池市金兴生物科技有限公司,2022-06-18.

作者简介:

张妮(1995-),女,汉族,江苏省无锡市人,研究生,研究方向:环境工程。