

面向节能环保目标的烟气多污染物协同控制技术研究

黄超¹, 吕留保^{2*}

1. 云南中陇市政环保工程有限公司, 云南 昆明 650206

2. 云南榮永环保科技有限公司, 云南 昆明 650221

DOI:10.61369/EAE.2026020014

摘 要 : 当前工业烟气复合型污染问题突出, 传统单一治理模式难以适配节能环保与“双碳”目标要求, 现有协同控制技术尚存在诸多短板。本文系统阐释烟气多污染物协同控制的技术内涵, 提出四项优化原则, 从工艺、能耗、装备、运维四方面给出技术升级路径。研究为工业烟气深度治理提供技术支撑, 助力工业节能降碳与大气环境质量改善, 推动节能环保政策落地和“双碳”目标实现, 也为工业绿色转型发展提供了系统性的技术参考与实践思路。

关 键 词 : 烟气污染; 协同控制; 节能环保; 技术升级; 减污降碳

Research on Collaborative Control Technology of Multiple Pollutants in Flue Gas for Energy Conservation and Environmental Protection Goals

Huang Chao¹, Lv Liubao^{2*}

1. Yunnan Zhonglong Municipal Environmental Protection Engineering Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650206

2. Yunnan Shenyong Environmental Protection Technology Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650221

Abstract : The current industrial flue gas composite pollution problem is prominent, and the traditional single treatment mode is difficult to adapt to the requirements of energy conservation, environmental protection, and "dual carbon" goals. There are still many shortcomings in the existing collaborative control technology. This article systematically explains the technical connotation of collaborative control of multiple pollutants in flue gas, proposes four optimization principles, and provides a technological upgrade path from four aspects: process, energy consumption, equipment, and operation and maintenance. The research provides technical support for the deep treatment of industrial flue gas, assists in industrial energy conservation and carbon reduction, improves atmospheric environmental quality, promotes the implementation of energy-saving and environmental protection policies, and achieves the "dual carbon" goals. It also provides systematic technical references and practical ideas for the green transformation and development of industry.

Keywords : smoke pollution; collaborative control; energy conservation and environmental protection; technological upgrade; pollution and carbon reduction

引言

生态文明建设深入推进背景下, 节能环保成为工业高质量发展核心导向, 工业烟气复合型污染已成为大气治理与“双碳”目标推进的重要制约因素。传统单一污染物治理技术存在效率低、能耗高、协同性缺失等弊端, 无法应对多污染物共存的治理挑战。在此背景下, 开展面向节能环保目标的烟气多污染物协同控制技术研究, 破解技术瓶颈, 是推动工业绿色转型、实现减污降碳协同增效的关键举措^[1]。

一、多污染物协同控制的技术内涵

(一) 多污染物同步脱除

工业烟气中的颗粒物、硫化物、氮氧化物等污染物往往共存且相互作用, 单一治理模式难以实现全面达标, 而同步脱除技术依托一体化反应体系, 打破了传统分段治理的技术壁垒, 实现多

种污染物在同一工艺环节中的高效去除。该技术核心在于依托适配的反应介质与工艺条件, 让不同污染物在反应过程中形成互补效应, 避免单一治理带来的流程割裂与二次污染风险, 同时减少治理设备的重复投入, 让烟气治理从分散式操作转向一体化处理, 大幅提升污染治理的整体效率, 满足当前工业烟气复合型污染的治理需求, 从源头降低污染物排放总量, 为大气环境质量改

作者简介: 黄超 (1988.2-), 男, 汉族, 红河州建水县人, 本科, 工程师, 主要从事环境工程方面工作。

通讯作者: 吕留保 (1986.5-), 男, 汉族, 曲靖罗平人, 本科, 工程师, 主要从事环境工程方面工作。

善提供直接技术支撑。也能有效简化烟气治理的整体流程，减少各环节的衔接损耗，让治理系统的运行更具连贯性，适配工业连续生产的治污需求^[2]。

（二）减污降碳协同增效

烟气治理过程本身的能源消耗是工业碳排放的重要组成部分，减污降碳协同增效技术将污染治理与节能降碳深度融合，摒弃了单纯追求脱除效率而忽视能耗的治理思路。在实现污染物有效去除的同时，该技术注重对烟气中余热、余压等能源的回收利用，将回收的能源反哺于工业生产或治理系统自身运行，减少外部能源输入^[3]。同时，通过优化治理工艺与反应条件，降低药剂、电力、水资源的消耗，减少治理过程中的碳排放，让污染治理不再是能源消耗的环节，而是成为工业节能降碳的重要抓手，实现污染物减排与碳排放降低的双重目标，契合“双碳”战略下工业绿色发展的核心要求。也能推动工业能源利用体系的完善，让治污环节融入企业整体节能布局，强化绿色生产的系统性^[4]。

（三）全流程节能降耗

工业烟气治理的能耗损耗贯穿于工艺设计、设备运行、后期运维等各个环节，全流程节能降耗技术以系统思维统筹烟气治理的全生命周期，从源头规避高能耗设计缺陷，在过程中优化运行参数，在后期提升运维效率^[5]。该技术不再局限于单一设备或环节的节能改造，而是通过梳理治理流程中的能耗关键点，优化工艺衔接与设备匹配度，减少流程中的能源损耗，同时采用节能型设备与高效反应材料，提升能源利用效率。此外，通过建立能耗监测体系，实时把控各环节能耗状态，及时调整运行策略，让节能降耗成为烟气治理全流程的固有属性，大幅降低企业的环保治理能耗成本，提升工业生产与污染治理的整体能源利用效率^[6]。也能通过能耗数据的积累与分析，持续优化节能方案，让治理系统的能耗水平处于动态最优状态。

二、节能环保目标下烟气多污染物协同控制技术的优化原则

（一）环保与能效协同原则

在烟气多污染物协同控制技术优化过程中，需摒弃环保达标与能源效率相割裂的传统思维，将污染物深度去除与能源高效利用作为不可分割的整体目标。技术优化既需满足国家最新的烟气污染物排放限值要求，确保各类污染物实现深度脱除，又需兼顾治理过程中的能源消耗，避免为追求环保指标而造成能源的过度浪费^[7]。通过工艺优化、设备升级与参数调控，让技术在实现环保达标的同时，最大限度降低电力、药剂、水资源的消耗，提升能源利用效率，实现环保治理效果与能源利用效率的双向提升，让烟气治理过程既符合生态环保要求，又契合工业节能降碳的发展导向。也需围绕双目标制定优化方案，避免单一维度优化带来的整体效益失衡，保障技术优化的科学性。

（二）工艺与工况适配原则

不同行业、不同企业的工业生产工艺存在显著差异，导致烟气的温度、湿度、污染物组成与浓度等工况条件各不相同，技术

优化需充分考虑这种差异性，避免一刀切的技术应用模式^[8]。针对不同行业的烟气工况特点，对协同控制工艺进行个性化调整与优化，匹配适配的反应材料、设备参数与运行条件，让工艺能够适应复杂多变的烟气工况，避免因工艺与工况不匹配导致的治理效率下降、能耗增加等问题。同时，技术优化需具备一定的灵活性，能够适应企业生产负荷变化带来的烟气工况波动，确保在不同生产状态下，工艺都能保持稳定的治理效果与能耗水平，提升技术的实际应用价值。也需提前预判工况变化趋势，让工艺具备一定的前瞻性适配能力，减少后续调整成本^[9]。

（三）创新与经济平衡原则

技术创新是推动烟气多污染物协同控制技术升级的核心动力，但创新过程需兼顾企业的实际经济承受能力，避免过度追求技术前沿而造成应用成本过高，导致技术难以规模化推广。在开展技术创新时，需立足工业企业的实际需求，优先选择性价比高、易于落地的创新方向，在提升技术治理效果与节能水平的同时，合理控制技术研发、设备购置、安装运维等各环节的成本。同时，注重创新技术的产业化转化，让创新成果能够快速应用于实际生产，为企业带来切实的环境效益与经济效益，实现技术创新的先进性与应用的经济性相平衡，让不同规模的企业都能承担并受益于技术升级。也需推动创新技术的本土化适配，降低技术引进与应用的额外成本，提升技术的市场普及度。

（四）智能与稳定兼顾原则

智能化是烟气多污染物协同控制技术发展的重要趋势，技术优化需积极融入智能技术，但同时需以系统运行的稳定性为基础，避免因过度智能化而导致系统运行风险增加。在引入人工智能、大数据、物联网等智能技术时，需确保智能管控体系与治理工艺、设备深度融合，能够精准监测系统运行状态、动态调整运行参数，提升管控效率与精准度^[10]。同时，注重智能系统的可靠性设计，建立完善的故障预警与应急处理机制，依据烟气治理工况优化智能算法逻辑，提升系统对复杂工况的适配能力，避免因智能系统故障而导致治理系统停运，还需保留人工干预的兜底操作通道，兼顾智能便捷与人工可控，确保智能化升级不会影响系统的长期稳定运行，让智能管控成为提升系统运行效率的手段，而非影响系统稳定性的因素，实现技术的智能化升级与稳定运行相统一。

三、面向节能环保的烟气多污染物协同控制技术升级路径

（一）多元工艺耦合创新

依托不同治理工艺的技术优势，打破单一工艺的应用局限，通过深度融合与创新设计，构建适配复合型烟气污染治理的多元工艺耦合体系。结合不同污染物的去除机理，筛选出互补性强的治理工艺进行有机耦合，优化工艺衔接环节与反应条件，减少不同工艺之间的相互干扰，让耦合后的工艺体系兼具各单一工艺的优势，实现多种污染物的协同深度脱除。同时，在工艺耦合过程中融入源头控污理念，将生产工艺优化与末端治理工艺耦合相结

合，从源头减少污染物生成，降低末端治理负荷，针对不同行业烟气特质定制耦合方案，兼顾低浓度污染物脱除需求，让耦合工艺体系既提升治理效率，又减少治理过程中的能源与资源消耗，形成兼具控污与节能双重效果的工艺体系，适配各行业复杂的烟气治理需求。还需通过工艺模拟仿真优化参数配置，规避耦合过程中的能耗叠加问题，进一步强化工艺体系的节能环保特性，提升实际应用的适配性与高效性。

（二）全流程能耗集约管控

以系统能耗最小化为目标，构建覆盖烟气治理全流程的能耗集约管控体系，从工艺设计、设备运行、过程调控到资源回收，实现各环节的能耗精准把控与优化。梳理治理流程中的关键能耗节点，优化设备匹配度与工艺运行参数，减少设备空转、参数不合理导致的无效能耗，提升能源利用效率。研发并应用高效节能的辅助设备，优化能源分配方案，让能源向治理核心环节集中，同时建立实时能耗监测与分析体系，精准掌握各环节能耗状态，根据烟气工况与治理需求动态调整运行策略，实现能耗的精细化管控。此外，加强烟气中余热、余能的回收利用，制定差异化回收方案，结合烟气温度、成分特性匹配回收技术，将回收的能源转化为治理系统或工业生产的可用能源，实现能源的循环利用，进一步提升能耗集约水平，降低企业整体能源消耗成本。还需建立能耗动态评估机制，实时跟踪能耗管控效果，及时优化管控策略，让能耗集约贯穿治理全周期，持续挖掘节能降碳潜力。

（三）核心材料装备升级

核心材料与装备是烟气多污染物协同控制技术的运行基础，其性能直接决定治理效果与能耗水平，升级工作需聚焦材料与装备的核心性能短板，开展针对性研发与改造。重点研发高活性、长寿命、抗干扰能力强的催化材料、吸附材料与反应介质，依托新材料技术提升材料的环境适应性，通过纳米改性、复合制备等技术强化材料性能，提升材料对多种污染物的同步去除能力，延长材料使用寿命，减少材料更换频率与成本，同时让材料能够适应复杂烟气工况，避免因材料失活导致的治理效率下降。同步推动材料的低成本量产研发，降低规模化应用成本，优化设备结构

设计，采用耐腐蚀、耐磨损的优质材质，提升设备的运行稳定性与使用寿命，同时对现有设备进行节能化改造，提升设备运行效率，降低设备能耗，研发一体化、模块化的新型治理装备，减少设备占地面积与衔接能耗，实现材料与装备的性能协同提升，打造高效低耗的装备体系。

（四）域智能运维构建

依托新一代信息技术，打破传统人工运维的局限，构建覆盖烟气治理系统全维度、全流程的全域智能运维体系，实现运维工作的精准化、高效化与智能化。搭建一体化智能监测平台，整合多类型、高精度监测设备，布设全域监测点位，打通设备数据互通壁垒，实现对烟气工况、污染物浓度、设备运行状态、能耗数据等关键指标的实时、全域采集与传输，确保对系统运行状态的全面掌控。基于监测数据构建智能分析与调控模型，融入机器学习算法优化调控逻辑，实现对系统运行参数的动态、精准调整，让系统始终处于最佳运行状态，提升治理效率与节能水平。建立智能化故障诊断与预警机制，通过大数据分析挖掘设备运行规律，提前预判故障隐患，及时发出预警信号并给出解决方案，同时推行远程智能巡检与运维，实现故障的快速定位与处理，减少人工干预，提升运维效率，降低运维成本，实现系统运维的全域覆盖与智能管控。

四、结语

烟气多污染物协同控制技术是工业烟气深度治理、落实节能环保目标的核心支撑，其发展对推动工业减污降碳、改善大气环境意义重大。本文从内涵、原则、路径三方面构建的技术体系，为破解现有技术短板提供了系统性思路。未来需持续深化技术研发与工程应用，推动技术与各行业工况深度适配，不断提升技术的节能环保效能，强化技术产业化落地与跨行业融合应用，完善技术配套服务体系，为工业绿色高质量发展和“双碳”目标实现筑牢技术保障。

参考文献

[1] 汤薛玉, 卢炜钦, 张杨, 等. 烧结烟气末端综合治理技术研究进展 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2025, 56(12): 5273-5289.
[2] 周小纳, 贺帅, 田晓棠. 在烧结烟气湿法脱硫后应用中低温脱硝技术 [J]. 包钢科技, 2025, 51(06): 15-18.
[3] 郭亮亮, 周鹏, 张阔楠, 等. 不同废塑料焚烧处理及烟气污染物阻控技术研究综述 [J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 210-215.
[4] 杨忠林. 煤化工厂大气污染排放物分析及其治理措施 [J]. 广东化工, 2025, 52(20): 79-81.
[5] 胡建涛, 刘含笑, 孙立, 等. 燃煤电厂烟气污染物协同脱除技术研究展望 [J]. 当代化工研究, 2025, (19): 11-13.
[6] 李津津, 陈卓然, 马修卫, 张智, 杨林军. 燃煤有机污染物排放及其控制技术研究展望 [J]. 化工进展 2019, 38(12): 5539-5547.
[7] 翁青征. 燃煤烟气汞污染及其控制技术 [J]. 节能与环保 2016, (9): 64-65.
[8] 刘子红. 改性活性炭纤维协同脱除燃煤烟气中多种污染物的实验及放大研究 [D]. 华中科技大学, 2014.
[9] 王刚、龔宝娟、张忠申等. 苯、环己烷和己烷在有序介孔碳上的吸附 [J]. 环境科学杂志 2015, 27 (4) : 65-73.
[10] 刘辉, 向怡, 史学峰, 孟菁华. 某垃圾焚烧厂烟气净化工艺选择分析研究 [J]. 环境科学与管理 2016, 41(4): 101-104.