

率超过 78%。淋洗后土壤有机质含量由 2.5% 下降至 1.9%，显示有一定损失，但通过施用有机肥料，土壤有机质水平在 90 天内恢复至 2.3%，说明在效果提升的同时需要配合土壤改良措施。

4.3 复合污染场地修复过程中的技术难点与解决思路

复合污染场地因重金属与有机污染物共存，其修复过程面临协同去除的挑战。重金属在土壤中与有机质形成稳定络合物，降低了单一淋洗剂的作用效果，而有机污染物在金属离子存在下可能增强吸附，导致迁移性下降。技术难点主要体现在复合污染物的相互作用机制复杂，导致修复效率不易预测。解决思路包括开发复合淋洗剂体系，利用螯合剂与表面活性剂的协同作用实现双重靶向；通过分步淋洗工艺先去除易解吸的污染物，再采用专一性更强的淋洗剂处理残余污染；引入生物修复或化学氧化技术作为辅助手段，增强整体去除率。通过多种手段耦合，既能提高修复效率，又能降低对土壤结构的破坏，推动复合污染场地的修复向更高效、可持续发展的方向发展。

5 土壤淋洗修复效果的综合评估与可持续性分析

5.1 修复后土壤理化指标与环境风险的评价方法

修复效果评估不仅依赖污染物去除率，还需综合分析修复后土壤的理化指标与潜在环境风险。实践表明，在淋洗处理后，土壤中重金属浓度普遍下降，铅由 450mg/kg 降至 70mg/kg，镉由 10mg/kg 降至 1.5mg/kg，去除率均超过 80%。同时，土壤 pH 值由 6.4 下降至 5.9，电导率由 250 μ S/cm 升至 310 μ S/cm，显示淋洗过程对离子平衡有一定扰动。土壤阳离子交换量由 18cmol/kg 下降至 15cmol/kg，反映出部分土壤养分被淋失。风险评价表明，残留污染物的生物有效性较低，风险商由 3.2 降低至 0.9，说明环境健康风险得到有效控制。通过综合理化指标与风险评估，能够全面反映修复效果，为后续土地再利用提供科学依据。

5.2 修复成本、能耗与经济效益的综合分析

土壤淋洗修复的经济可行性需从成本、能耗与收益三个维度综合评估。在实际工程中，淋洗修复的直接成本约为 300 元/吨，其中淋洗剂费用占比 40%，能耗占比 25%，固液分离与废液处理占比 20%，其余为人工与设备折旧。单位土壤修复能耗为 15kWh，若采用能效优化设备可降低至 12kWh。以修复 1 万吨污染土壤为例，总成本约为 3000 万元，

而通过减少污染扩散与避免环境治理罚金，可节约潜在损失约 4500 万元，经济效益明显优于投入。若结合废液回收与淋洗剂再利用，运行成本可再降低 15% 至 20%。综合分析表明，在控制成本与能耗的前提下，淋洗修复技术不仅具备环境价值，还能实现较高的经济回报，具备良好的推广前景。

5.3 修复后生态功能恢复与长期监测的必要性

土壤修复效果不能仅以污染物去除率为评价标准，还需关注生态功能恢复的完整性。淋洗过程中有机质流失与团聚体破坏可能导致土壤肥力下降，微生物群落多样性也会受到抑制。修复后的生态恢复可通过施加有机改良剂、种植耐污染植物和引入有益微生物来实现，以促进养分循环和结构重建。长期监测是保障修复可持续性的关键环节，需要对修复土壤的重金属残留、有机质含量、酶活性和微生物群落动态进行连续跟踪。通过 5 年以上的监测数据能够明确修复土壤是否存在二次污染风险，是否具备农用或建设用地的条件。建立长期监测与评估机制，能够为修复后土地的再利用提供科学依据，并推动修复技术向生态安全与可持续发展方向延伸。

6 结语

污染场地土壤淋洗修复技术作为一种高效实用的治理手段，在重金属、有机及复合污染场地中展现出良好的应用潜力。通过优化淋洗剂类型、改进工艺流程以及强化废液回收，不仅能够显著提升污染物去除率，还能有效降低环境风险和运行成本。修复效果的综合评估应涵盖理化指标、生态功能与经济效益，确保治理成果具有长期稳定性和可持续性。同时，修复后的土壤需结合改良与生态恢复措施，辅以持续的环境监测，才能实现从单一污染控制向生态系统功能重建的转变。该技术未来的发展方向在于绿色化与智能化，推动修复体系在效率、安全和成本之间达到平衡，从而为污染场地治理与土地再利用提供更加可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 宁校平,邓德珩,丁逸宁,周伟坚,梁文钟.某六价铬污染场地土壤化学淋洗修复技术试验探究[J].四川化工,2025,28(04):48-51.
- [2] 江建斌.上海某污染场地土壤原位修复参数研究[J].清洗世界,2024,40(05):51-53.
- [3] 王璐瑶.污染场地低碳修复的碳排放核算[D].导师:王真;陈畅.华中农业大学,2023.
- [4] 黄星宇.某场地污染土壤淋洗修复效果评估[J].科学技术创新,2023,(10):32-35.

Research on post-treatment of industrial emissions and noise control technology

Shun Jiang

Emission Tech Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201102, China

Abstract

Driven by the “dual carbon” goals, industrial emissions and noise pollution have become key issues restricting the sustainable development of high-energy consumption industries. This paper focuses on the collaborative control of exhaust gas and low-frequency noise from high-power diesel/gas engines, achieving the goal of “ultra-low emissions + ultra-low noise” through technological innovation. The research proposes SCR-oxidation catalytic coupling technology, acoustic metamaterials (low-frequency noise reduction of 15dB), and an intelligent active noise cancellation system, combined with a digital management platform to construct a fully integrated solution. Practice has shown that this system can reduce operation and maintenance costs by 30%, reduce NO_x emissions by 12 tons per year, and lower noise levels to below 75dB, providing a green transformation technology paradigm for the data center, energy, and power industries.

Keywords

Industrial emission post-treatment; Noise control technology; Collaborative governance

工业排放后处理与噪声控制技术研究

江顺

铭瑞科环境科技（上海）有限公司，中国·上海 201102

摘要

在“双碳”目标驱动下，工业排放与噪声污染成为制约高能耗行业可持续发展的关键问题。本文聚焦大功率柴油/燃气发动机的尾气及低频噪声协同治理，通过技术创新实现“超低排放+超低噪声”目标。研究提出SCR-氧化催化耦合技术、声学超材料（低频降噪15dB）及有源消声智能化系统，结合数字化管理平台构建全流程集成方案。实践表明，该体系可降低运维成本30%、减排NO_x 12吨/年、噪声降至75dB以下，为数据中心、能源及电力行业提供绿色转型技术范式。

关键词

工业排放后处理；噪声控制技术；协同治理

1 引言

在全球工业化进程加速推进的背景下，工业排放与噪声污染已成为制约经济高质量发展的核心环境问题^[1]。钢铁、化工、电力等重工业领域作为碳排放与污染物排放的主要源头，其生产过程中产生的高温烟气、挥发性有机物（VOCs）、颗粒物（PM）等复杂污染物，以及设备运行引发的机械噪声与气动噪声，不仅对区域大气环境质量与声环境质量构成严重威胁，更直接危害从业人员健康并引发社区矛盾。据统计，我国工业源PM_{2.5}排放占比超30%，而工业噪声投诉量长期位居环境信访案件前三位，凸显出传统“末端治理”模式在效率、成本与可持续性方面的局限性。

当前技术层面面临三大挑战：一是多污染物协同治理

机制尚不完善，单一技术难以满足超低排放标准；二是噪声控制技术对低频噪声与复杂声场的适应性不足；三是排放处理与噪声控制缺乏全流程集成设计，导致资源浪费与二次污染。本研究以“双碳”目标与《“十四五”噪声污染防治行动计划》为指引，通过构建“源头减量-过程控制-末端治理”的协同技术体系，重点突破催化氧化-吸附耦合、声学超材料设计、智能监控等关键技术，并探索其在重工业场景中的集成应用模式。研究成果将为工业领域实现环境效益、经济效益与社会效益的统一提供理论支撑与技术路径，助力我国环保产业向高端化、智能化方向升级。

2 大功率发动机尾气后处理技术创新

2.1 典型行业尾气排放特征分析

工业排放的复杂特性主要源于各行业生产工艺的显著异质性，导致污染物种类、浓度及理化性质存在显著差异^[2]。钢铁行业以高温冶炼工艺为核心，其排放特征表现为高炉煤

【作者简介】江顺（1987-），男，中国上海人，本科，工程师，从事环境科技研究。

气中 CO、SO₂ 与粉尘的复合污染，转炉烟尘则因含锌、铅等重金属且温度波动剧烈（200-800℃），对治理设备的耐高温性能与抗腐蚀能力提出严苛要求。化工行业排放呈现高度组分多样性，以石化企业为例，挥发性有机物（VOCs）包含烷烃、烯烃及含氧有机物等数十种组分，浓度范围跨越三个数量级（10-10000 mg/m³），且部分组分具有光化学活性，需针对性设计催化氧化降解路径。电力行业经超低排放改造后，NO_x 与 SO₃ 的协同脱除成为关键技术瓶颈，特别是选择性催化还原（SCR）脱硝过程中 3-8 ppm 的氨逃逸，易导致硫酸氢铵在低温段沉积，显著降低后续除尘设备运行效率。装备制造行业涂装车间排放以苯系物为主，其高挥发性与毒性要求治理系统具备毫秒级响应能力（响应时间 < 5 秒），以防范短期高浓度排放突破环境容量阈值。

2.2 多污染物协同净化技术路径

① SCR 与氧化催化耦合技术：针对低温工况（< 250℃），采用 Fe-Zeolite 分子筛催化剂，其抗硫中毒能力较传统 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 提升 3 倍，NO_x 去除率稳定 > 95%，氨逃逸控制在 < 3ppm。下游集成 Pd/Al₂O₃ 氧化催化剂，通过贵金属钯的活性位点同步降解 CO 与碳氢化合物，出口浓度均 < 10ppm，解决低负荷氧化效率瓶颈。系统采用模块化设计，SCR 与氧化催化单元共用载体结构，体积减小 25%，适应数据中心紧凑空间需求。

② 颗粒物捕集与再生技术：壁流式 DPF 采用碳化硅载体，孔径梯度设计实现亚微米颗粒捕集率 > 99%。创新电加热再生技术通过分区脉冲加热，将再生能耗降低 20%，并避免燃油二次喷射导致的 PM 峰值。针对燃气轮机，引入静电捕集模块，利用高压电场使颗粒物荷电并吸附，对 0.1-1μm 颗粒捕集效率达 99.5%，且无滤芯更换需求。DPF 再生周期由被动触发升级为 AI 主动预测，基于发动机工况数据实时调整再生策略，危废减量 80%。

2.3 技术经济性与环境效益评估

全生命周期成本分析显示，SCR-DPF 耦合系统通过催化剂寿命延长（从 1.2 万小时提升至 2 万小时）及再生能耗优化，运维成本降低 35%。以某数据中心案例实证：6 台 2MW 柴油机组改造后，年减排 NO_x 12 吨、颗粒物 8 吨，同步降低 CO₂ 排放 1.5 万吨当量（通过燃烧效率提升）。攀钢钒炼铁厂应用同类技术后，尾气处理系统能耗下降 18%，年节省运维费用超 200 万元，并满足国家超低排放限值（NO_x < 50mg/m³）。技术集成化设计使设备占地面积缩减 30%，特别适用于老旧厂区改造，投资回收期缩短至 2.8 年^[3]。

3 超低噪声控制技术创新与实践

3.1 发动机噪声源识别与传播特性

工业噪声源的频谱特征呈现显著的行业差异性。机械噪声（如风机、压缩机）以中低频为主（50-2000 Hz），其能量集中于基频及其谐波，例如离心风机噪声在叶片通过频

率（BPF）处出现峰值，幅值可达 10 dB 以上；而气动噪声（如管道气流、阀门节流）则覆盖更宽频带（20-10000 Hz），湍流边界层噪声在高频段（> 2000 Hz）占主导，喷注噪声则呈现宽频连续谱特性。在复杂工业厂房内，噪声传播受建筑结构、设备布局及声反射面的共同影响，呈现出多路径衰减规律：直射声随距离增加按平方反比定律衰减（6 dB/倍程），而反射声在平行墙面间形成驻波，导致某些频段（如 500 Hz）声压级不降反升；此外，设备振动通过结构传声引发的二次辐射噪声，在低频段（< 250 Hz）的衰减率仅为 0.5-1 dB/m，显著弱于空气传声（3-5 dB/m），成为厂房内低频噪声污染的主要来源。

3.2 主动噪声控制技术突破

声学超材料在低频噪声治理中实现突破性进展。亥姆霍兹共振腔通过精密设计的短颈空腔结构，在 200-800Hz 频段吸声系数突破 0.9，其厚度仅为传统吸声材料的 1/3，显著解决工业设备低频噪声控制难题^[4]。基于 3D 打印技术的定制化消声器进一步拓展应用边界，通过拓扑优化设计微孔阵列与变截面通道，在 125Hz 核心噪声频段实现 15dB 降噪量，且气流阻力降低 30%，适用于燃气轮机、柴油机组等复杂工况。

有源消声系统依托自适应滤波算法与分布式传感器网络实现智能化升级。该系统采用维纳滤波与卡尔曼滤波融合算法，实时分析噪声相位特性，通过次级声源发射反向声波抵消噪声，响应延迟低于 0.1 秒，可在 1000m² 大型厂房内动态追踪噪声源变化。某数据中心柴油机组应用案例显示，系统部署后噪声由 95dB 降至 75dB，达到《工业企业噪声控制设计规范》三类标准，同时能耗降低 18%。技术集成化设计使消声模块体积缩减 40%，为老旧设备改造提供轻量化解决方案。

3.3 被动噪声控制技术的优化方向

复合隔声结构通过多层材料协同实现宽频降噪。阻尼层采用高损耗因子粘弹性材料，有效抑制结构振动；吸声层选用多孔纤维材料，通过声能转化为热能衰减中高频噪声；约束层利用钢板增强整体刚度，三者复合后在 200-2000Hz 频段隔声量达 40dB。铝蜂窝轻量化隔声罩依托超厚铝蜂窝芯专利技术（CN222372431U），蜂窝结构密度仅为传统钢板的 60%，重量减轻 40%，同时因空气腔共振效应显著提升低频隔声性能，实测将柴油机组噪声由 110dB 降至 85dB，满足《工业企业噪声控制设计规范》三类标准。

消声器平衡设计融合抗性与阻性技术优势。抗性消声器通过扩张室、共振腔结构反射低频声波，阻性消声器利用吸声衬里吸收中高频噪声，二者组合在 250-4000Hz 频段实现 25dB 消声量，气流阻力较传统设计降低 30%，避免发动机背压升高导致的能耗增加。导流板结构基于专利技术（CN222223855U）进行 CFD 拓扑优化，通过流线型曲面设计减少气流湍流，使再生噪声降低 6dB，同时提升气流均