

生活垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除进展： 材料、机理与技术

黎嘉淇, 刘 慧, 谢运敬, 丁子航, 魏军晓*

广东海洋大学化学与环境学院, 广东 湛江

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月20日

摘 要

随着城市化进程的加速, 生活垃圾(MSW)产生量逐年增加, 焚烧作为一种能够快速实现MSW减容减量效果的处理方式, 现已成为我国MSW的主流处理工艺。然而, 面对垃圾组分波动引发的非均质燃烧及日益严苛的环保法规(如欧盟IED指令和中国GB 18485-2014), 传统单一污染物-单一设备的串联式烟气净化模式因系统冗余、能耗巨大及污染物间交叉干扰, 已难以满足深度净化与低碳运行的双重需求。本文系统综述了MSW焚烧烟气多污染物协同脱除技术的理论突破与工程实践, 重点探讨了: 1) 改性钒钛基、锰铈基及功能化金属有机框架等新型催化吸附材料的构效关系与抗中毒机理; 2) NO_x 与二噁英、 Hg^0 与卤素在催化界面上的竞争吸附与协同氧化还原微观机制; 3) 催化滤袋、协同湿法氧化及炉内抑制剂喷射等一体化集成技术的工程应用性能。最后, 结合人工智能优化控制与碳捕集技术展望了下一代智能化、低碳化生活垃圾焚烧烟气净化系统的发展方向。

关键词

生活垃圾, 焚烧, 深度净化, 低碳运行, 多污染物协同脱除

Recent Advances in Integrated Synergistic Removal of Multi-Pollutants from MSWI Flue Gas: Materials, Mechanisms, and Technologies

Jiaqi Li, Hui Liu, Yunjing Xie, Zihang Ding, Junxiao Wei*

School of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: December 15, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 黎嘉淇, 刘慧, 谢运敬, 丁子航, 魏军晓. 生活垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除进展: 材料、机理与技术[J]. 化学工程与技术, 2026, 16(1): 64-75. DOI: 10.12677/hjct.2026.161007

Abstract

With the acceleration of urbanization, the generation of municipal solid waste (MSW) has grown exponentially. Municipal solid waste incineration (MSWI), as a treatment method capable of achieving significant volume reduction (approximately 90%) and energy recovery, has become a core strategy for MSW management worldwide. Facing increasingly stringent global environmental regulations (such as the EU IED directive, and China's GB 18485-2014), the traditional "single pollutant-single control equipment" series treatment mode struggles to meet the dual demands of deep purification and low-carbon operation due to bloated systems, high energy consumption, and negative cross-interference between pollutants. This paper systematically reviews theoretical breakthroughs and engineering practices in integrated synergistic removal technologies for multi-pollutants, focusing on: 1) the structure-activity relationships and anti-poisoning mechanisms of novel catalytic adsorption materials such as modified vanadium-titanium-based, manganese-cerium-based, and functionalized MOFs; 2) the microscopic mechanisms of competitive adsorption and synergistic redox between NO_x and dioxins, as well as Hg^0 and halogens at catalytic interfaces; and 3) the engineering application performance of integrated technologies such as catalytic filter bags, synergistic wet oxidation, and in-furnace inhibitor injection. Finally, combining artificial intelligence optimization control and carbon capture technology, the paper prospects the development direction of the next generation of intelligent, low-carbon MSWI flue gas purification systems.

Keywords

Municipal Solid Waste, Incineration, Deep Purification, Low-Carbon Operation, Integrated Synergistic Removal Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人口增长和消费模式的改变,城市生活垃圾(MSW)的管理已成为全球性挑战。传统的填埋方式面临土地资源紧缺和渗滤液污染风险,而生活垃圾焚烧(MSWI)发电因其高效的减容能力和能源回收优势,被视为可持续废物管理的关键环节[1]。据统计,发达国家的垃圾焚烧处理率已达到相当高水平,中国等新兴经济体也在快速推进 MSWI 设施的建设。然而,公众对焚烧厂周边环境健康风险的担忧(邻避效应)依然存在,这主要源于对焚烧污染物排放的恐惧[2]。MSW 作为一种非均质性“燃料”,其燃烧过程产生的烟气组分极度复杂且波动剧烈。主要的污染物包括氮氧化物(NO_x)、酸性气体(SO_2 , HCl , HF)、持久性有机污染物(POPs)、重金属和挥发性有机物(VOCs)。其中, NO_x 主要来源于 MSW 中含氮有机物的氧化(燃料型 NO_x)及高温下空气中氮气的氧化(热力型 NO_x)。 NO_x 不仅是酸雨和光化学烟雾的前体物,还会破坏臭氧层[1]。酸性气体主要来源于垃圾中的硫、氯(Cl)和氟元素。其中, HCl 浓度通常较高,是造成设备腐蚀的主要原因,且 Cl 元素是二噁英(PCDD/Fs)从头合成的关键原料[3]。POPs 以 PCDD/Fs 为代表,具有极强的致畸、致癌和致突变性。其生成途径包括高温气相合成和低温($250^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$)异相催化(包括从头合成和前驱物合成) [4]。重金属主要包括易挥发性的镉、汞(Hg)和铅等。Hg 因其高挥发性和难溶于水的特性,成为治理的难点,其在生物链中的富集效应对神经系统造成不可逆损伤。此外, VOCs 包括苯系物和卤代烃等,是细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和臭氧的重要前体物。研究表明, MSWI 厂 VOCs 的排放因子不容忽视,

且种类繁多(如卤代烃占比高) [5]。

为了应对日益严峻的环境压力,各国纷纷收紧排放限值。美国 EPA 在 2024 年和 2025 年相继提出了针对大型和小型城市 MSWI 设施的更严格标准,特别是对颗粒物、重金属和 NO_x 的限制[6]。欧盟的工业排放指令(IED)和中国的 GB 18485-2014 (尤其是多地出台的地方标准)均设定了较低的排放限制。传统的烟气净化工艺通常采用“SNCR + 半干法脱酸 + 活性炭喷射 + 布袋除尘 + SCR”的长流程串联组合[7]。这种模式主要面临高能耗与热损失、占地面积大且成本高,以及污染物间的负面耦合等严峻挑战。具体来看,不同净化单元的最佳运行温度窗口不同(如 SCR 需 $\sim 200^\circ\text{C}$ 甚至更高,而布袋除尘需低于 200°C),导致烟气在流程中需反复加热和冷却,造成巨大的能源浪费[8]。多级串联设备占地面积大,基建投资和运行维护成本高昂,特别是在土地资源紧缺的(超)大城市[9]。此外,SCR 催化剂可能将 SO_2 氧化为 SO_3 ,与逃逸的 NH_3 反应生成硫酸氢铵,导致下游设备腐蚀和堵塞;湿法脱硫可能导致 Hg 的再释放等[10]。综上所述,开发能够在单一单元内同时去除多种污染物的协同脱除技术,已成为 MSWI 烟气治理领域的必然趋势。这种技术不仅能简化流程、降低成本,还能利用污染物之间的化学协同效应提高去除效率。

综上所述,尽管多污染物协同脱除技术在降低能耗与简化流程方面展现出了巨大的潜力,但受限于复杂的烟气工况和材料寿命问题,目前其在 MSWI 行业的工业化普及率仍然较低。更为关键的是,现有文献多聚焦于单一污染物的控制策略或特定催化材料的实验室制备,缺乏跨越材料微观改性-界面竞争机理-一体化工程装备的系统性综合评价。开展上述系统性评价工作,旨在厘清不同技术路线在实际工况下的适用边界,揭示制约技术从实验室向工业应用转化的核心技术瓶颈(如多组分竞争吸附导致的催化剂失效和系统长期运行的稳定性等),从而为工艺选择提供科学依据。本文系统总结了材料学中的构效关系、反应动力学机理与宏观工程实践的跨尺度评价框架,并将人工智能(AI)优化控制与碳捕集技术纳入协同治理体系,以期构建下一代兼具深度净化能力与低碳运行效益的智能化 MSWI 烟气处理系统提供理论支撑和实践指引。

2. 多污染物协同脱除的理论机理与微观相互作用

在协同脱除体系中,不同污染物在催化剂或吸附剂表面的行为并非孤立,而是存在着复杂的竞争、抑制或促进关系。深入理解这些微观机理是材料设计和工艺优化的重要基础。

2.1. NO_x 还原与 PCDD/Fs 氧化的竞争与平衡

在钒钛基($\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$)等催化剂表面,同时进行着 NO_x 的选择性催化还原和 PCDD/Fs (及其模拟物如氯苯 CB)的催化氧化。 NH_3 作为还原剂,优先吸附在催化剂表面的 Brønsted 酸性位点上并形成活性 NH_4^+ 物种。研究发现,高浓度的 NH_3 会显著抑制氯苯等有机分子在催化剂表面的吸附,因为两者竞争相似的酸性位点,并且 NH_3 的抑制作用通常强于 NO [11]。然而,PCDD/Fs 占据 V_2O_5 活性位点会阻碍单齿硝酸盐中间体的生成,进而通过 Langmuir-Hinshelwood (L-H)机理降低催化剂活性。此外,甲苯等 VOCs 的氧化中间体可能与 NH_3 反应生成腈类物质,消耗还原剂并降低脱硝效率[11]。一般认为,单体钒物种对氯代有机物的氧化更有效,而聚合钒物种则更有利于 NO_x 的还原[12]。因此,通过调控钒的负载量和分散状态,可以寻找 2 种反应的最佳平衡点。在某些特定催化剂体系(如 Co-MnO_x)中,适量的 NO 存在可以促进活性氧物种的循环,从而辅助有机物的深度氧化。反之,有机物的氧化放热也可能为局部 SCR 反应提供活化能[13]。

2.2. 汞的催化氧化与卤素协同机制

元素汞(Hg^0)的氧化是其被后续脱酸设备捕获的前提。在 MSWI 烟气中, HCl 不仅是污染物,也是 Hg^0

氧化的关键助剂。在 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂表面, HCl 首先吸附并发生 Deacon 反应生成活性氯物种(如 $Cl\cdot$ 或 Cl_2)。这些活性氯化物种具有极强的氧化性, 能将吸附态或气态的 Hg^0 氧化为 $HgCl_2$ [14]。研究表明, Hg^0 的氧化在商用催化剂上遵循 L-H 机理, 即 Hg^0 和 HCl 均需先吸附在催化剂表面, 然后发生反应。预吸附 HCl 能显著提升 Hg^0 的氧化效率, 而 O_2 的存在则促进了表面吸附氯的再生, 维持催化循环[15]。此外, NO 在 Hg^0 的氧化过程中扮演了复杂角色。一方面, NO 被氧化生成的 NO_2 具有强氧化性, 可促进 Hg^0 氧化; 另一方面, SCR 反应中的 NH_3 会消耗表面活性氯, 从而抑制 Hg 的氧化。因此, 在一体化脱除中, 需精确控制 NH_3 的喷射量, 避免过量氨逃逸对脱汞造成负面影响[16]。

2.3. 硫 - 硝 - 汞的交互作用

低温条件下, SO_2 对其他污染物的去除既有促进也有抑制作用。其中, 促进作用主要表现在碳基材料表面, SO_2 的存在有时能促进 NO 向 NO_2 转化, 进而通过“快速 SCR”路径提升脱硝效率。同时, SO_2 也可能在某些金属氧化物表面形成硫酸盐位点, 增强对 Hg^0 的化学吸附[17]。然而, 在锰基等低温催化剂上, SO_2 易与活性金属形成稳定的硫酸盐(如 $MnSO_4$), 覆盖活性位点并堵塞微孔, 导致催化剂永久性失活。这是低温协同脱除技术面临的障碍之一[18]。

3. 协同脱除功能材料的构效关系

材料科学的进步是实现协同脱除的核心驱动力。目前的研发重点集中在拓宽活性温度窗口(特别是低温区)、增强抗中毒能力和引入多功能活性组分等方面。MSWI 过程主要的烟气污染物及其协同脱除技术详见表 1。

Table 1. Comparison of air pollutants in MSWI flue gas and their synergistic removal technologies
表 1. MSWI 烟气中主要污染物及其协同脱除技术对比

污染物组合	协同技术路径	核心材料/药剂	优势	局限性
$NO_x + PCDD/Fs$	催化滤袋	膨体聚四氟乙烯(ePTFE)膜 + V-Ti/Mn-Ce 催化毡	无需再热, 占地小, 能耗低, PCDD/Fs 去除率 > 97%	滤袋成本高, 催化剂易受飞灰遮蔽影响
$NO_x + PCDD/Fs$	改进 SNCR	硫脲、硫酸铵等含 N/S 抑制剂	投资极低, 利用现有设备, 源头阻断 PCDD/Fs 合成	脱硝效率受限 (60%~70%), 可能增加 SO_2 排放
$NO_x + Hg^0$	氧化吸收	$NaClO_2$ 、 O_3 和过硫酸盐	可深度脱汞, 适应性强, 低温运行	氧化剂消耗量大, 需防二次污染, 废液处理复杂
$NO_x + Hg^0 + SO_2$	活性炭吸附/催化	负载 CuO/FeO_x 活性炭	多效合一, 技术成熟, 无二次水污染	碳材料易燃风险, 吸附容量有限, 需定期更换
$NO_x + Hg^0$	低温 SCR 协同	Mn-Ce 和改性 V-Ti 催化剂	利用 HCl 协同氧化 Hg , 无需额外氧化剂	易受 SO_2/H_2O 中毒影响, 碱金属中毒风险高

3.1. 改性钒钛基催化剂

虽然传统的 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂主要用于脱硝, 但通过改性可达到协同脱 PCDD/Fs 和 Hg 的效果。MSWI 布袋除尘后的烟温通常在 $140^{\circ}C\sim 200^{\circ}C$, 低于传统的 SCR 窗口。掺杂过渡金属(如 Ce、Mn、Fe 和 Cu)或稀土元素可丰富表面活性物种, 降低反应活化能。例如, Mn 的引入能促进低温下 NO 至 NO_2 的转化, 从而通过快速 SCR 反应提高效率[19]。此外, 通过构建核壳结构或多级孔结构可优化反应物扩散。研究发现, V/TiO_2 催化剂的酸性位点可作为 NH_3 的“缓冲池”, 调节下游氧化位点的反应环境, 缓解竞

争吸附[20]。而针对碱金属中毒问题,利用硫酸化处理增强表面酸性,或引入助剂(如 Ce 和 Zr)构建固溶体以稳定活性位点已被证明可有效提升抗碱金属中毒能力。例如,硫酸化 CeO_2 在抗碱金属(如 K)中毒方面表现优异[21]。

3.2. 锰-铈复合氧化物

Mn-Ce 系催化剂因其优异的低温氧化还原循环($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 与 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 电对)和储氧能力,现已成为低温协同脱除 NO_x 和 Hg^0 的明星材料。具体来看, MnO_x 作为氧化中心,能高效氧化 NO 和 Hg^0 ; CeO_2 则通过氧空位的快速迁移补充表面耗氧。 Mn_1Ce_1 催化剂在 180°C 下即可实现 97% 的 NO_x 去除率[22]。此外,通过水热法合成特定晶面暴露(如纳米棒和纳米花)的催化剂可显著提升其吸附和催化性能。然而,该类材料的抗硫抗水性较差,通常需掺杂 Fe 和 Co 等元素来提高稳定性[23]。需要指出的是,尽管 Mn-Ce 二元氧化物在实验室条件下表现出卓越的低温氧化还原活性(150°C 下 NO_x 转化率 $>95\%$),但关于其在含硫烟气中的稳定性机制,学术界仍存在显著争议。早期研究普遍认为 CeO_2 可通过优先形成不稳定硫酸盐来保护 Mn 活性位点[24],但近期的原位光谱表明,在低于 300°C 的工况下, Mn 位点表面形成的硫酸锰物种具有极高的热稳定性,难以通过简单的热脱附再生[25]。这种实验室加速老化数据与工业长期低浓度累积中毒现象之间的矛盾是制约该类材料走出实验室的核心瓶颈。

3.3. 功能化碳基材料

活性炭(AC)及其衍生物(如生物炭和碳纳米管)具有廉价和比表面积大等优势。经过 CuO 、 FeO_x 或稀土金属负载改性的 AC 可在 $150^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$ 的温度窗口下同时实现脱硫、脱硝和脱汞。例如,8% CuO -5% MnO_x/AC 在 200°C 下展现了 90% 的 Hg^0 和 78% 的 NO 去除率[26]。此外,利用 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 等高级氧化技术改性生物质炭等表面化学调控技术,可引入大量含氧官能团($-\text{COOH}$ 和 $-\text{OH}$),增强对极性分子(Hg^0 、NO 和 SO_2)的化学吸附。这种非金属催化路径避免了重金属二次污染风险[27]。

3.4. 金属有机框架(MOFs)与新型多孔聚合物

MOFs 凭借其超高的孔隙率和结构可裁剪性,在精细捕获痕量污染物和 CO_2 方面表现出一定潜力。针对烟气高湿环境,通过引入氨基($-\text{NH}_2$)或长链烷基进行修饰,可提升 MOFs 的疏水性和结构稳定性。例如, $\text{NH}_2\text{-H}_2\text{L}_4$ 修饰的 MFM-136 在模拟烟气中暴露 24 小时后,仍可保持优异的 CO_2 捕获能力,且耐受 SO_2/NO_2 侵蚀[28]。此外, UiO-66-NH_2 与共价有机框架复合材料在吸附放射性元素(如 U)和重金属方面显示出协同增强效应,为处理特殊危险废物提供了新思路[29]。

3.5. 工业固废资源化材料

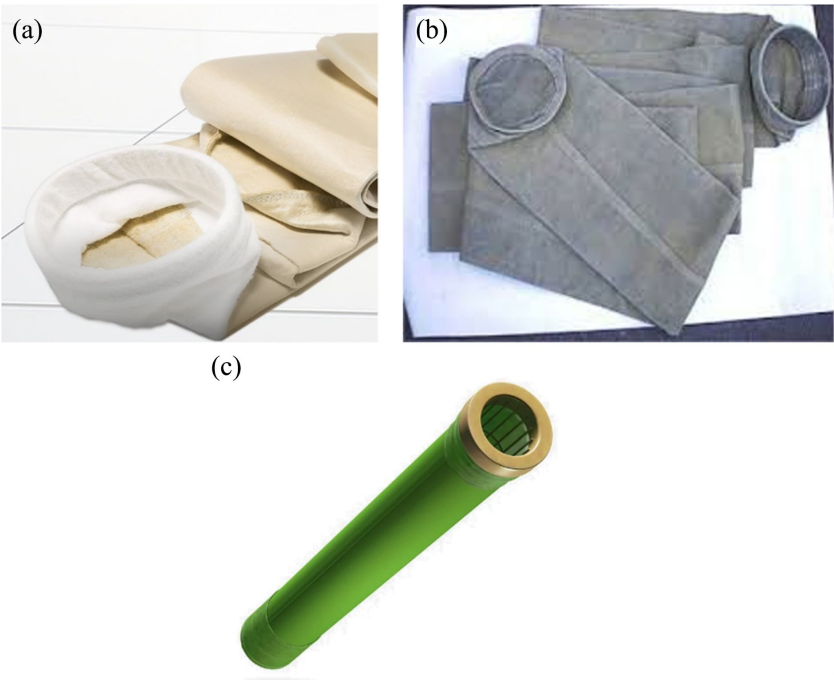
利用 MSWI 自身的飞灰(FA)制备催化剂是“以废治废”理念的体现。MSWI 焚烧产生的飞灰属于危险废物,其富含 Ca、Si 和 Al 等氧化物,经过酸洗去除重金属杂质后,负载过渡金属(如 Zr 和 Ti)可制备成廉价 SCR 催化剂。研究表明,FA/Zr-10%催化剂在 250°C 下的脱硝效率超过 90%,且成本仅为商用催化剂的 1/9 [30]。

4. 一体化协同控制技术与装备的工程实践与经济性分析

4.1. 催化滤袋

催化滤袋将表面过滤(除尘)与催化反应(脱 PCDD/Fs/脱硝)集成于一体,是目前较为成熟的协同控制技术之一。催化滤袋通常采用 ePTFE 微孔膜与负载催化剂的针刺毡基材复合。当焚烧烟气经过催化滤袋时,FA 在膜表面被截留,气态污染物在穿过催化层时发生反应。由于反应在除尘之后进行,避免了 FA

对催化剂的磨损和遮蔽[31]。目前，主流的技术包括 Gore® Remedia® [31]、Mitsubishi Hybrid Bag Filter® (HBF) [32]和 Topsoe CataFlex™ [33] (图 1)。其中，Gore® Remedia®专注于 PCDD/Fs 的催化破坏。其独特的催化毡配方可将 PCDD/Fs 排放降至 0.1 ng I-TEQ/Nm³ 以下，且无需向烟气中喷入碳粉，避免了 FA 中碳含量的增加，利于 FA 资源化[31]。三菱重工的 HBF 技术在滤料中嵌入 V-Ti 催化剂，不仅能脱除 PCDD/Fs，还能配合氨喷射实现脱硝。其最新开发的 PTFE 基材 HBF 相比传统玻纤基材，耐磨性提升，运行压差降低，显著减少了引风机能耗(约 27%)和 CO₂ 排放[32]。Topsoe CataFlex™ 采用双层结构，内层为催化织物。该技术特别强调在无需烟气再加热情况下可实现尾端脱硝，不仅节省了昂贵的 SCR 脱硝反应塔投资，还消除了再加热带来的额外能耗[33]。总之，工程实测表明催化滤袋系统可稳定实现 97%~99% 的 PCDD/Fs 去除率和高达 90%以上的脱硝效率，同时粉尘排放浓度远低于标准中的限值[34]。上述 3 种工艺对比具体见表 2。



注：(a)-(c)依此为 Gore® Remedia® [31]、Mitsubishi Hybrid Bag Filter® (HBF) [32]和 Topsoe CataFlex™ [33]。

Figure 1. Three typical catalytic filter bags
图 1. 3 种典型催化滤袋

Table 2. Technical parameters and performance of typical catalytic filter bags
表 2. 典型催化滤袋技术参数与性能

技术品牌	厂商	基材/结构	关键特性	典型性能指标
Remedia®	W. L. Gore	ePTFE 膜 + 催化毡	专注 PCDD/Fs 破坏， 无需碳喷射	Dioxins < 0.1 ng TEQ/Nm ³
HBF®	Mitsubishi Heavy Ind.	PTFE 纤维 + V-Ti 催化剂	耐磨损，低压差， 脱硝 + 脱 PCDD/Fs	运行成本降低 57%， 寿命延长
CataFlex™	TOPSOE	双层结构(催化内层)	替代尾端 SCR， 无需烟气再热	NO _x 去除率高， 适合空间受限改造

注：催化滤袋技术参数与性能主要基于参考文献[4] [9] [31] [32] [34]-[40]。

4.2. SNCR 与抑制剂技术的耦合

在炉膛内(850℃~1000℃)进行的 SNCR 脱硝的同时可以通过添加特定化学试剂实现多效功能。例如,向 SNCR 系统中加入含硫、氮的化合物(如硫脲和硫酸铵),在高温分解产生 NH_3 用于还原 NO_x 的同时,释放出的 SO_2 或硫基自由基能毒化 FA 中的金属催化剂(如 CuCl_2),阻断 PCDD/Fs 的从头合成路径。实验证明,该方法可同时实现约 65% 的脱硝和高达 80% 的 PCDD/Fs 减排[4]。此外,将含水率适中的市政污泥与 MSW 协同焚烧,污泥中的挥发分氮可作为还原剂降低 NO_x 生成。研究表明,3%~13% 的污泥掺烧比能优化燃烧工况,在降低 NO_x 的同时不影响锅炉效率[1]。因此,含水率适中的市政污泥在一定程度上起到了 NO_x “抑制剂”的作用。

4.3. 湿法洗涤和高级氧化吸收

在湿法脱酸塔前或塔内引入强氧化剂可实现难溶污染物(NO 和 Hg^0)的去除。具体来看,利用 NaClO_2 、 H_2O_2 、 O_3 或过硫酸盐等强氧化剂,将 NO 氧化为 NO_2 ,将 Hg^0 氧化为 Hg^{2+} ,随后在碱性洗涤液中与 SO_2 和 HCl 一并被吸收。例如, Fe^{2+} 催化过氧化物产生的羟基自由基是高效氧化的关键[10]。该技术能利用现有湿法塔进行改造,投资低,且特别适合深度脱 Hg 。然而,需严格控制氧化剂加注量以防止设备腐蚀和二次污染(如余氯)[40]。

4.4. 烟气烘焙预处理(FGT)

除了末端治理,源头燃料改性也是协同控制的新思路。例如,利用 MSWI 自身的低温烟气余热(200℃~300℃)对入炉垃圾(特别是纸张、木材和塑料)进行烘焙预处理。烘焙不仅能提高燃料热值、均匀性和研磨性,还能通过脱氯作用(即释放 HCl)显著减少燃烧过程中 PCDD/Fs 前驱物和酸性气体的生成。研究发现,FGT 处理后的燃料在燃烧时释放的气态污染物更少,且重金属倾向富集于灰渣中[39]。

4.5. 静电 - 催化耦合技术

结合静电除尘和催化技术,利用电场强化颗粒物团聚和离子风效应可显著降低颗粒物中的污染物。例如,通过热泳力和电场力的协同可增强微细颗粒物和冷凝性颗粒物的脱除,同时去除吸附在颗粒上的重金属和有机物[41]。

4.6. 协同脱除技术的经济性分析

尽管上述 5 种协同脱除技术在解决传统烟气净化系统流程冗长与设备冗余方面展现出显著的技术优势,但经济可行性仍是制约其实现大规模工程化应用和推广的关键瓶颈。通常来讲,末端 SCR 方案属于重资产投资,需建设独立的 SCR 反应塔、钢结构支撑、氨区扩容,最昂贵的是蒸汽加热器和气-气换热器系统。单位 NO_x 脱除能力的 CAPEX 约为 \$5500~\\$6100/\text{ton NO}_x\$ [42]。而催化滤袋方案属于轻资产改造,且可节省 30%~50% 的占地面积。其主要成本在于滤袋采购(单价为普通滤袋的 3~5 倍)及部分笼骨更换。无需新增土建和大型设备。其初投资通常仅为新建 SCR 系统的 30%~50% [43]。三菱重工的数据显示,改用 PTFE 基 HBF 后,运行成本降低了 57% [8]。在美国,符合 2024/2025 年 EPA 新标准的设施,预计每年可减少数万吨污染物排放,由此带来的公共健康收益(如减少医疗支出和误工等)估计高达数十亿美元 [6]。基于 EPA Cost Manual 及三菱重工、Topsoe 等厂商的公开数据,建立了涵盖 CAPEX (反应器、换热器、土建)和 OPEX (能耗、药剂、维护)的对比框架,重点对比了催化滤袋与传统末端 SCR 的经济性差异(表 3)。

Table 3. Comparison of economic performance between traditional tail-end SCR and catalytic filter bags
表 3. 传统尾端 SCR 和催化滤袋经济性能对比

成本构成要素	尾端 SCR	催化滤袋	差异分析
能耗(再热)	极高(天然气/蒸汽)	零	SCR 需将烟气从 140℃加热至 230℃~280℃。这是 SCR 最大的运营成本源[44]。
电耗(压损)	中等 (+1000~1500 Pa)	中低 (+200~500 Pa)	SCR 系统增加了换热器和催化剂床层的阻力；催化滤袋阻力略高于普通滤袋。
耗材更换	催化剂寿命 3~5 年	滤袋寿命 3~5 年	滤袋寿命是关键风险点。若因机械破损提前更换，成本激增。
还原剂	氨水/尿素	氨水/尿素	消耗量相当，取决于 NSR。

分析表明，尽管催化滤袋的初次采购成本约为普通滤袋的 3~5 倍，但其消除了尾端 SCR 所需的烟气再热能耗。对于一台 500 t/d 的焚烧炉，省去将烟气从 150℃加热至 230℃甚至更高所需的天然气或蒸汽，可使 OPEX 降低约 57% [45]。经济性交叉点分析显示，对于空间受限且无需深度脱除($\text{NO}_x < 50 \text{ mg/Nm}^3$)的老旧电厂改造项目，协同技术具有压倒性的投资回报率优势。然而，这一经济性优势的前提是滤袋能达到预期的机械寿命(>3 年)。不过，如果由于清灰频繁导致滤袋在 1 年内破损，其全生命周期成本将反超 SCR。

此外，在“双碳”战略目标下，MSWI 电厂正逐步向“负碳”设施转型。有研究开发对 CO_2 具有高选择性且耐水耐硫的 MOFs 材料，有望在同一吸附塔内实现污染物的深度净化与 CO_2 捕集[28]。同时，协同技术通过减少系统压损和热能损耗(如 Topsoe DNX-LT 低温催化剂)直接降低了 MSWI 厂的自用电率，间接降低了碳足迹[33]。

5. 从实验室到工业应用的关键挑战与对策

MSWI 过程的非稳态特性是导致污染物排放超标的主要原因。引入 AI 和数字化技术进行实时优化控制，是提升系统鲁棒性的关键。

5.1. 关键工程挑战

尽管实验室阶段的材料和机理研究取得了显著进展，但将其推向工业应用时仍面临多重关键工程挑战。首先，实验室测试与工业运行之间存在显著的空速数量级差异，实验室通常采用极高气态空速(>30,000~50,000 h^{-1})以消除外扩散限制并测定材料本征动力学活性，而工业催化滤袋运行于极低过滤风速(<1 m/min)的扩散控制区，这导致实验室数据往往高估了粉尘层建立后的实际反应效率与氨气渗透性能[46]。其次，催化剂老化演变机制存在非一致性，现有的标准化测试主要借鉴汽车行业的加速热老化评价标准，难以模拟 MSWI 工况下高频脉冲清灰造成的化学 - 机械双重老化，即机械形变导致的催化剂涂层龟裂、剥落及失活[47][48]。此外，MSW 热值的剧烈波动给过程控制带来难题，基于烟囱出口 CEMS 数据的传统 PID (比例 - 积分 - 微分)反馈控制存在显著的时间滞后，难以实时应对燃烧工况震荡引起的污染物浓度突变，从而导致还原剂喷射延迟、排放超标或氨逃逸飙升等问题[49]。

5.2. 主要对策

5.2.1. AI 驱动的燃烧优化和数字孪生

由于 MSW 组分波动大，传统的 PID 控制难以维持最佳燃烧状态。基于 AI 的预测控制模型，利用贝叶斯优化和长短期记忆网络等机器学习算法，可建立烟气含氧量、炉温和污染物生成的动态关联模型。

该模型能根据入炉垃圾特性实时调整一、二次风配比和给料速度。例如,在北京某电厂的应用显示,基于 AI 的优化控制可将 NO_x 生成量降低 8%~24%,同时提高锅炉热效率,从源头减轻了后续烟气净化系统的负荷[1]。此外,构建烟气净化全流程的数字孪生体,结合 CFD 模拟和在线监测数据,可实时模拟催化剂活性分布、滤袋压差变化和反应器内部流场。这使得运维人员能预测催化剂中毒趋势,制定最优的清灰和再生策略,避免突发性超标排放[50]。

5.2.2. 机器学习在预测 PCDD/Fs 排放方面的初步探究

对 PCDD/Fs 在线监测技术缺乏、离线检测成本高且滞后性强的问题,利用机器学习算法挖掘常规运行数据与 PCDD/Fs 排放之间的非线性映射关系,建立相关软测量模型,已成为当前的研究热点。Yin 等[51]利用中国 MSWI 厂的 12,164 组 CEMS 监测数据,对比了决策树、随机森林(RF)、梯度提升树和人工神经网络等 4 种模型对 PCDD/Fs 排放合规性的分类预测性能。研究发现,RF 模型表现最佳,其预测准确率、精确率、F1 分数和召回率分别达到了 89.26%、94%、93.16%和 93.58%。特征重要性分析和主成分分析进一步揭示,CO 浓度与 PCDD/Fs 排放的相关性最强(Pearson 系数为 29.69%),当 PCDD/Fs 超标时,CO 浓度平均增加 101%。这表明在缺乏直接监测手段时,CO、炉温和颗粒物浓度可作为判定 PCDD/Fs 是否超标的关键替代指标,为 MSWI 厂的运行调控提供快速反馈依据。在更宏观的全球尺度上,Liu 等[52]不仅关注实时运行参数,还引入了焚烧炉的设计与管理属性,构建了基于深度森林和 XGBoost 回归的 PCDD/Fs 排放预测模型。该研究基于中国、日本及欧美地区的 MSWI 厂数据,探究了焚烧炉龄(AOI)、处理能力及日运行时间对 PCDD/Fs 排放浓度的影响。结果表明,AOI 与 PCDD/Fs 浓度呈显著正相关,意味着老旧设施因技术落后或设备老化面临更高的排放风险;而处理能力和连续运行时间则呈负相关。这证实了规模化和连续稳定工况对抑制 PCDD/Fs 生成的积极作用。综上所述,机器学习技术不仅能够基于 CEMS 数据实现 PCDD/Fs 超标的实时预警,还能结合设施运维参数为长周期的排放趋势预测和技术改造提供理论支撑,是未来实现智能化烟气治理的重要工具。

6. 结论与展望

MSWI 烟气多污染物协同脱除技术代表了环境工程领域从末端治理向过程集成与材料功能化转变的前沿方向。低温 V-Ti 基、Mn-Ce 基催化剂及功能化碳材料的研发成功拓宽了反应温度窗口,使得在除尘脱酸后的低温区(150℃~200℃)进行深度净化成为可能。对 NO_x -PCDD/Fs 竞争吸附、 Hg^0 -HCl 协同氧化等微观机理的深入认识,指导了双功能催化剂和多级孔材料的精准设计。催化滤袋、炉内抑制剂协同 SNCR 等技术已在工程上证明了其高效性和经济性,成为新建和改造项目的首选方案。此外,AI 优化控制和低碳技术的融合将引领 MSWI 行业进入智能化和低碳化的新时代。需要指出的是,催化剂的长期抗碱金属中毒性能、低温下的水疏耐受性以及 MOFs 等新材料的规模化制备成本仍是制约其广泛应用的瓶颈。未来,应聚焦于自再生智能材料的开发、复杂烟气多相反应动力学的解析以及全流程碳-污协同控制策略的构建。

基金项目

本文为省级大学生创新创业训练项目(编号: S202410566057)。

参考文献

- [1] Li, Z., Fan, T.W., Lun, M.S. and Li, Q. (2024) Optimization of Municipal Solid Waste Incineration for Low- NO_x Emissions through Numerical Simulation. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 19309. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69019-w>
- [2] Bottini, I., Vecchi, S., De Sario, M., Bauleo, L., Trentalange, A., Michelozzi, P., *et al.* (2025) Residential Exposure to

- Municipal Solid Waste Incinerators and Health Effects: A Systematic Review with Meta-Analysis. *BMC Public Health*, **25**, Article No. 1989. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-23150-z>
- [3] Wang, W., Tian, S., Long, J., Liu, J., Ma, Q., Xu, K., *et al.* (2022) Investigation and Evaluation of Flue Gas Pollutants Emission in Waste-to-Energy Plant with Flue Gas Recirculation. *Atmosphere*, **13**, Article 1016. <https://doi.org/10.3390/atmos13071016>
 - [4] Wielgosiński, G., Czerwińska, J., Szymańska, O. and Bujak, J. (2020) Simultaneous Nox and Dioxin Removal in the SNCR Process. *Sustainability*, **12**, Article 5766. <https://doi.org/10.3390/su12145766>
 - [5] Liu, J., Zhao, D., Wu, F., Luo, H., Hou, D. and Peng, Y. (2025) Impact of Air Pollution Control Devices on VOC Profiles and Emissions from Municipal Waste Incineration Plant. *Toxics*, **13**, Article 1067. <https://doi.org/10.3390/toxics13121067>
 - [6] USEPA (2024) EPA Proposes Stronger Air Pollution Standards for Large Facilities that Burn Municipal Solid Waste.
 - [7] Schüttenhelm, W., Holste, R. and Licata, A. (2000) New Trends in Flue Gas Cleaning Technologies for European and Asian Waste Incineration Facilities. *8th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, Nashville, 22-24 May 2020, 1-17.
 - [8] Suzuki, T., Katsuki, M., Shizukuishi, K., *et al.* (2012) Basic Performance of HBF®(Hybrid Bag Filter) and Operation Reports for Incineration Plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, **49**, 105-111.
 - [9] Zhou, H., Hong, L., Chen, D., Lu, J. and Song, X. (2024) Influences of Non-SCR De-Nox Technologies on Nox and Dioxin Emissions in Full Scale Municipal Solid Waste Incinerators. *Aerosol and Air Quality Research*, **24**, Article 230319. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230319>
 - [10] Wang, Y., Wang, Z. and Liu, Y. (2021) Review on Removal of SO₂, NO_x, Mercury, and Arsenic from Flue Gas Using Green Oxidation Absorption Technology. *Energy & Fuels*, **35**, 9775-9794. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00803>
 - [11] Yang, Y., Hou, Y., Tian, J., Ding, X., Ma, S., Zeng, Z., *et al.* (2024) Changes of Nitrate Activity and Byproduct Distribution Characteristics for Synergistic Nox and Dioxin Abatement over V₂O₅/Ac Catalyst. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 24562-24571. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c02040>
 - [12] Zhai, S., Su, Y., Weng, X., *et al.* (2021) Synergistic Elimination of NO_x and Chlorinated Organics over VO_x/TiO₂ Catalysts: A Combined Experimental and DFT Study for Exploring Vanadate Domain Effect. *Environmental Science & Technology*, **55**, 12862-12870.
 - [13] Wu, Y., Yu, Y., Cai, Q., Zhao, H., Guo, R., Zhou, J., *et al.* (2023) Promotional Effects of FeO_x on the Commercial SCR Catalyst for the Synergistic Removal of NO and Dioxins from Municipal Solid Waste Incineration Flue Gas. *Energy & Fuels*, **37**, 8512-8522. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00738>
 - [14] Zhao, Y., Hao, R., Xue, F. and Feng, Y. (2017) Simultaneous Removal of Multi-Pollutants from Flue Gas by a Vaporized Composite Absorbent. *Journal of Hazardous Materials*, **321**, 500-508. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.044>
 - [15] Liu, R., Xu, W., Tong, L. and Zhu, T. (2015) Mechanism of Hg⁰ Oxidation in the Presence of HCL over a Commercial V₂O₅-WO₃/TiO₂ SCR Catalyst. *Journal of Environmental Sciences*, **36**, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.031>
 - [16] Li, C., Sriram, V. and Lee, J. (2022) A Kinetic Study of Hg(0) Oxidation over Mo-Promoted V-Based SCR Catalyst. *Chemical Engineering Journal*, **427**, Article 131864. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131864>
 - [17] Tseng, H., Wey, M., Liang, Y. and Chen, K. (2003) Catalytic Removal of SO₂, NO and HCL from Incineration Flue Gas over Activated Carbon-Supported Metal Oxides. *Carbon*, **41**, 1079-1085. [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(03\)00017-4](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(03)00017-4)
 - [18] Tian, Z., Ding, X., Pan, H., Xue, Q., Chen, J. and He, C. (2025) A Review of Simultaneous Catalytic Removal of NO_x and VOCs: From Mechanism to Modification Strategy. *Catalysts*, **15**, Article 1114. <https://doi.org/10.3390/catal15121114>
 - [19] An, D., Zhang, X., Cheng, X. and Dong, Y. (2018) Performance of Mn-Fe-Ce/GO-X for Catalytic Oxidation of Hg⁰ and Selective Catalytic Reduction of Nox in the Same Temperature Range. *Catalysts*, **8**, Article 399. <https://doi.org/10.3390/catal8090399>
 - [20] Fu, Y., Xin, Q., Zhang, S. and Yang, Y. (2021) Simultaneous Catalytic Removal of VOCs and Nox with the Dual-Layered Catalyst of CoCeO_x and V₂O₅/TiO₂. *Aerosol and Air Quality Research*, **21**, Article 210214. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210214>
 - [21] Chen, S., Xie, R., Liu, Z., Ma, L. and Yan, N. (2023) Efficient NO_x Reduction against Alkali Poisoning over a Self-Protection Armor by Fabricating Surface Ce₂(SO₄)₃ Species: Comparison to Commercial Vanadia Catalysts. *Environmental Science & Technology*, **57**, 2949-2957. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08570>
 - [22] Xiao, X., Wang, J., Jia, X., Ma, C., Qiao, W. and Ling, L. (2021) Low-Temperature Selective Catalytic Reduction of

- NO_x with NH_3 over Mn-Ce Composites Synthesized by Polymer-Assisted Deposition. *ACS Omega*, **6**, 12801-12812. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01123>
- [23] Kang, D., Shi, Q., Zhang, C., Zhao, P., Lyu, H., Yang, M., *et al.* (2023) Synergistic Removal of NO_x and CB by Co-MnOx Catalysts in a Low-Temperature Window. *Chemical Engineering Journal*, **476**, Article 146369. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146369>
- [24] Zhao, L., Zhang, Y. and Kang, M. (2021) Recent Advances in Heighten Sulfur Resistance of SCR Catalysts: A Review. *Environmental Engineering Research*, **27**, 200642-0. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.642>
- [25] Xu, Q., Yang, W., Cui, S., Street, J. and Luo, Y. (2018) Sulfur Resistance of Ce-Mn/TiO₂ Catalysts for Low-Temperature NH_3 -SCR. *Royal Society Open Science*, **5**, Article 171846. <https://doi.org/10.1098/rsos.171846>
- [26] Izquierdo, M.T., Rubio, B., Mayoral, C. and Andrés, J.M. (2003) Low Cost Coal-Based Carbons for Combined SO_2 and NO Removal from Exhaust Gas. *Fuel*, **82**, 147-151. [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(02\)00249-1](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(02)00249-1)
- [27] Wang, Y., Ma, C., Dou, Z. and Liu, Y. (2023) Simultaneous Removal of SO_2 , NO and Hg_0 Using Porous Carbon/Heat-Coactivated Persulfate System. *Fuel Processing Technology*, **244**, Article 107698. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107698>
- [28] Guo, Y., Xu, L., Zheng, J., Geng, N., Wang, Y., Yao, M., *et al.* (2024) Functionalized Dual/Multiligand Metal-Organic Frameworks for Efficient CO_2 Capture under Flue Gas Conditions. *Environmental Science & Technology*, **58**, 22456-22465. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08500>
- [29] Liu, L., Zhao, B., Wu, D., Wang, X., Yao, W., Ma, Z., *et al.* (2023) Rational Design of MOF@COF Composites with Multi-Site Functional Groups for Enhanced Elimination of U(VI) from Aqueous Solution. *Chemosphere*, **341**, Article 140086. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140086>
- [30] Darmansyah, D., You, S. and Wang, Y. (2024) Modification of Recycled Industrial Solid Waste Incineration Fly Ash as a Low-Cost Catalyst for NO_x Removal. *Aerosol and Air Quality Research*, **24**, Article 230247. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230247>
- [31] GORE (2025) Dioxin & Furan Catalytic Filter Bags—GORE® REMEDIA®.
- [32] MITSUBISHI (2025) Advanced Flue Gas Treatment.
- [33] Nielsen, A.R., Pedersen, K. and Pedersen, A.H. (2021) The TripleCat DNX-LT SCR Catalyst: Maximizing Activity at Low Temperature. <https://fcs.unicore.com/storage/fcs/triplecat-dnx-lt-maximizing-activity-at-low-temperatures.pdf>
- [34] Kang, M., Park, E.D., Kim, J.M. and Yie, J.E. (2009) Simultaneous Removal of Particulates and NO by the Catalytic Bag Filter Containing MnOx Catalysts. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**, 86-89. <https://doi.org/10.1007/s11814-009-0014-0>
- [35] Fritsky, K.J., Kumm, J.H. and Wilken, M. (2001) Combined PCDD/F Destruction and Particulate Control in a Baghouse: Experience with a Catalytic Filter System at a Medical Waste Incineration Plant. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **51**, 1642-1649. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464391>
- [36] Katsuki, M., Suzuki, T., Asai, Y., *et al.* (2024) Commercialization of Hybrid Bag Filter® (HBF) Made of Polytetrafluoroethylene (PTFE) with Capability of Decomposing Dioxins and Reducing Environmental Impact. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, **61**, 1-6.
- [37] TOPSOE (2025) CataFlex™ Catalyst.
- [38] Choi, J., Mun, S., Kim, S., *et al.* (2002) Simultaneous Removal of Particulates and NO_x Using Catalyst Impregnated Fibrous Ceramic Filters. Ajou University.
- [39] Zhu, X., Li, S., Li, J., Zhou, S., Yan, B., Sun, Y., *et al.* (2022) A Component Synergy of Flue Gas Torrefaction of Municipal Solid Waste. *Fuel Processing Technology*, **238**, Article 107517. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107517>
- [40] Yamamoto, Y., Yamamoto, H., Takada, D., Kuroki, T., Fujishima, H. and Okubo, M. (2016) Simultaneous Removal of NO_x and SO_x from Flue Gas of a Glass Melting Furnace Using a Combined Ozone Injection and Semi-Dry Chemical Process. *Ozone: Science & Engineering*, **38**, 211-218. <https://doi.org/10.1080/01919512.2015.1115335>
- [41] Liu, W., Zhao, B., Feng, Q., Zhou, Z. and Lu, J. (2023) Synergistic Effect of Multi-Field Force on Condensable Particulate Matter Properties and Behavior in Flue Gas: A Case Study in a Municipal Solid Waste Incineration Plant. *Aerosol and Air Quality Research*, **23**, Article 220217. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220217>
- [42] Armendariz, A. (2008) The Costs and Benefits of Selective Catalytic Reduction on Cement Kilns for Multi-Pollutant Control. Ph. D. Thesis, Southern Methodist University.
- [43] AQMD (2024) Proposed Rule 1165 Control of Emissions from Municipal Solid Waste Incinerators.
- [44] Jurczyk, M., Mikus, M. and Dziedzic, K. (2016) Flue Gas Cleaning in Municipal Waste-to-Energy Plants—Part I. Infrastructure and Ecology of Rural Areas. 1179-1193.
- [45] Brandin, J.G.M. and Odenbrand, C.U.I. (2018) Deactivation and Characterization of SCR Catalysts Used in Municipal

- Waste Incineration Applications. *Catalysis Letters*, **148**, 312-327. <https://doi.org/10.1007/s10562-017-2229-8>
- [46] National Research Council, Commission on Life Sciences, Board on Environmental Studies, *et al.* (2000) Waste Incineration & Public Health. National Academy Press, 1-313.
- [47] Aokai (2025) Waste Incineration Industry.
- [48] ECFR (2023) 40 CFR Part 1065 Subpart L—Accelerated Aftertreatment Aging.
- [49] Zhao, B., Hu, X. and Lu, J. (2022) Analysis and Discussion on Formation and Control of Dioxins Generated from Municipal Solid Waste Incineration Process. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **72**, 1063-1082. <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2100843>
- [50] Tang, J., Wang, T., Xia, H. and Cui, C. (2024) An Overview of Artificial Intelligence Application for Optimal Control of Municipal Solid Waste Incineration Process. *Sustainability*, **16**, Article 2042. <https://doi.org/10.3390/su16052042>
- [51] Yin, W., Wen, C., Liu, L., Xie, D., Han, J. and Lin, X. (2024) Prediction and Correlation Study of Dioxin Emissions Classifications from Municipal Solid Waste Incinerators. *Atmospheric Pollution Research*, **15**, Article 102066. <https://doi.org/10.1016/j.atm.2024.102066>
- [52] Liu, Y., Zhang, M., Wen, S., Li, J., Chen, Y., Wei, J., *et al.* (2025) Prediction of Dioxins Emissions from Modern WtE Plants with Machine Learning: In View of Capacities, Operation, and Age of Incinerators. *Process Safety and Environmental Protection*, **200**, Article 107353. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107353>