

基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略

杨智彬

佛山 顺德 528313

DOI:10.61369/EAE.2025060014

摘要：本文围绕垃圾焚烧烟气多污染物协同控制展开，分析典型污染物排放特征及我国环保标准演进，介绍活性炭吸附等控制技术及集成创新实践，阐述基于大数据的调控策略、全生命周期监管等管理策略，探讨多目标优化冲突等挑战及应对，强调其对环保达标的关键意义与应用前景。

关键词：垃圾焚烧烟气；多污染物协同控制；环保达标

Management Strategy of Multi Pollutant Collaborative Control Technology for Waste Incineration Flue Gas Based on Environmental Standards

Yang Zhibin

Shunde, Foshan 528313

Abstract : This article focuses on the collaborative control of multiple pollutants in waste incineration flue gas, analyzes typical pollutant emission characteristics and the evolution of environmental protection standards in China, introduces control technologies such as activated carbon adsorption and integrated innovation practices, elaborates on management strategies based on big data and full life cycle supervision, explores challenges and responses such as multi-objective optimization conflicts, and emphasizes its key significance and application prospects for environmental compliance.

Keywords : waste incineration flue gas; collaborative control of multiple pollutants; environmental compliance

引言

近年来，国家对包括钢铁和水泥行业在内的高排放行业推动超低排放改造，生态环境部分别于2018—2019年先后印发了《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》（2018）和《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（2019），旨在进一步强化水泥、钢铁、垃圾焚烧等行业污染物排放管控，推动绿色发展。垃圾焚烧烟气中典型污染物排放特征各异，对环境和人体危害大。我国垃圾焚烧烟气环保标准不断完善，与国际先进标准有异同。在此背景下，深入研究多污染物协同控制技术及管理策略至关重要，从技术集成创新、智能监控到全生命周期监管等多方面发力，能有效实现环保达标，推动垃圾焚烧行业可持续发展。

一、垃圾焚烧烟气污染物特征与环保标准体系

（一）主要污染物排放特征分析

垃圾焚烧烟气中的典型污染物各具排放特征。二噁英由含氯有机物在燃烧过程中经复杂反应生成，其排放具有毒性高、稳定性强的特点，可在环境中长期留存并通过食物链富集，对生态环境和人体健康构成严重威胁^[1]。重金属如汞、铅、镉等，源于垃圾中的各类含金属物质，在焚烧高温下挥发进入烟气，它们在环境中难以降解，排放后会造成土壤、水体污染。酸性气体主要有氯化氢、二氧化硫等，氯化氢来自含氯垃圾的焚烧，二氧化硫多由垃圾中硫元素氧化产生，其排放会导致酸雨等环境问题。对这

些污染物排放特性的深入分析，有助于准确评估它们的环境风险等级，为后续制定针对性的协同控制技术与管理策略提供依据。

（二）环保标准体系演进及管控要求

我国垃圾焚烧烟气环保标准体系经历了显著演进。早期标准对污染物的管控指标相对有限，随着环保意识增强与技术发展，标准不断完善。目前，国家大气污染物排放标准对多种污染物提出了更为严格的限值要求。对比欧盟、日本等国际先进标准，在部分污染物如颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等的排放限值上，国家标准与之逐渐趋同，但在二噁英等持久性有机污染物的管控细节上仍存在差异^[2]。我国现行标准对垃圾焚烧企业的管控要求更为全面，不仅规定了污染物排放限值，还对监测频次、达标判定

等作出详细规定，以确保垃圾焚烧烟气排放达到环保要求，推动行业绿色可持续发展。

二、多污染物协同控制技术机理与应用

(一) 协同控制技术原理与能效分析

活性炭吸附技术基于其发达的孔隙结构，对烟气中的二噁英、重金属等污染物具有良好的吸附性能，通过范德华力将污染物吸附在其表面^[3]。布袋除尘利用纤维织物的过滤作用，拦截烟气中的颗粒物，实现高效除尘。SCR 脱硝则是在催化剂作用下，氨气与氮氧化物发生反应生成氮气和水，从而降低氮氧化物排放。在不同工况下，这些技术的组合对污染物去除效率和能耗有显著影响。例如，较高的烟气温度可能提升 SCR 脱硝效率，但会增加活性炭吸附的能耗。合理优化技术组合与运行参数，能够在保障污染物高效去除的同时，降低整体能耗，实现基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的能效最大化。

(二) 技术集成创新与工程实践

在垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的技术集成创新与工程实践方面，半干法脱酸与 SNCR 技术的耦合应用是关键探索。以某垃圾焚烧厂为例，通过优化工艺参数，将半干法脱酸的反应温度精准控制在适宜区间，提升酸性气体脱除效率。同时，对 SNCR 技术的还原剂喷射位置与量进行精细调控，确保在最佳反应窗口进行脱硝反应。在此基础上，建立技术经济性评价模型，全面考量设备投资、运行成本及污染物减排效果等因素。经实践验证，该耦合系统展现出良好的稳定性，不仅实现高效的多污染物协同脱除，满足环保达标要求，还在一定程度上降低综合成本，为垃圾焚烧行业多污染物协同控制提供了可行的技术路径与实践范例^[4]。

三、协同控制技术管理体系构建

(一) 全过程管理机制设计

1. 运行参数优化调控策略

基于大数据分析建立焚烧工况 – 污染物排放响应模型，为运行参数优化调控策略奠定基础。通过对大量垃圾焚烧过程中的各类数据进行深度挖掘与分析，明确焚烧工况与污染物排放之间的内在联系，从而构建精准的响应模型。在此基础上，制定关键参数动态调整规则^[5]。这些参数涵盖温度、氧量、停留时间等，依据模型所揭示的关系，当监测到污染物排放有异常趋势时，系统能及时、自动地调整关键参数，确保垃圾焚烧始终处于高效、环保的运行状态。动态调整规则需充分考虑不同垃圾成分、焚烧设备特性等因素，做到因情而异、精准调控，在实现环保达标的同时，保障垃圾焚烧过程的稳定与高效。

2. 全生命周期监管制度

全生命周期监管制度旨在对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术进行全面、动态的监督管理。从技术引入阶段开始，需严格审查技术方案的环保达标可行性，确保选用的协同控制技术从源头满足环保要求。在项目建设与设备安装过程，要监督施工质量

与技术标准的契合度，保障技术能有效落地。运行阶段，建立实时监测体系，跟踪污染物排放数据，及时发现并纠正技术运行偏差。针对设备老化或技术升级需求，制定合理的更新改造监管措施。通过建立完善的档案管理系统，记录技术全生命周期的各项信息，为评估、改进协同控制技术提供数据支撑，从而确保垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术始终基于环保达标运行^[6]。

(二) 技术管理创新路径

1. 智能监控系统开发

为有效达成垃圾焚烧烟气多污染物协同控制，智能监控系统开发至关重要。设计基于物联网的污染物在线监测平台，该平台可借助传感器等设备实时收集垃圾焚烧过程中各类污染物的排放数据，如二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等^[7]。通过物联网技术，将这些数据快速、准确地传输至管理终端，确保相关人员能及时获取最新排放信息。同时，设定科学合理的预警阈值，当排放数据接近或超出标准范围时，系统即刻发出预警信号，提醒工作人员及时采取相应措施，从而实现对垃圾焚烧烟气排放的动态监管，为协同控制技术的精准实施与管理提供有力的数据支持和技术保障，助力环保达标。

2. 设备效能评价体系

为实现基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制，设备效能评价体系至关重要。通过建立综合评价模型，纳入脱除效率、能耗强度等 20 项指标^[8]，能全面且精准地评估设备在多污染物协同控制中的表现。脱除效率直接反映设备对各类污染物的去除能力，关乎环保达标程度；能耗强度则体现设备运行的能源利用效率，与运行成本紧密相关。在此基础上，提出设备更新决策支持算法，借助模型评估结果，结合设备运行状况、技术发展趋势等因素，为设备更新提供科学、合理的决策依据，助力垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的高效实施，在保障环保达标的同时，实现设备效能的优化与提升。

四、管理策略实施保障体系

(一) 协同技术应用典型案例

1. 长三角区域示范项目

在长三角区域示范项目中，以上海老港项目为典型案例。该项目对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术进行应用，通过解析其运营数据，有力验证了协同控制技术的显著成效。具体来看，协同控制技术实现了二噁英减排 83% 的实证效果^[9]。这一成果表明，在长三角区域垃圾焚烧处理过程中，采用多污染物协同控制技术能有效达成环保达标目标，为整个区域的垃圾焚烧烟气处理提供了成功范例。项目数据的解析不仅验证了技术的可行性，更为其他地区垃圾焚烧厂实施相关管理策略提供了重要的数据支撑与实践经验借鉴，推动基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术在更大范围内的推广应用。

2. 国际先进管理经验借鉴

德国杜塞尔多夫厂在垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理方面表现卓越，其管理体系具有诸多可借鉴之处。在智能化运

维方面，该厂借助先进的监测设备与数据分析系统，实时掌握设备运行状况及污染物排放数据，以便及时发现并解决潜在问题，确保协同控制技术高效稳定运行。在人员培训机制创新上，杜塞尔多夫厂注重培养员工的专业技能与环保意识，定期开展技术培训与交流活动，使员工能够熟练操作先进设备，并深入理解环保达标要求。通过智能化运维与人员培训机制创新，有力保障了垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的有效实施，为基于环保达标的相关管理策略提供了成功范例^[10]。

（二）技术瓶颈与解决方案

1. 多目标优化冲突破解

在基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略中，多目标优化冲突是一大关键挑战。脱酸效率与运行成本通常相互制约，提升脱酸效率可能大幅增加成本，而控制成本又可能影响脱酸效果。运用帕累托前沿分析法可有效平衡这一矛盾。通过构建脱酸效率与运行成本的多目标函数模型，结合实际工艺数据进行分析，能得到一系列非劣解，即帕累托最优解集。这些解代表了在不同侧重下两者的最佳平衡状态，管理者可根据实际需求和资源状况，从帕累托最优解集中选择最适宜的方案，在确保环保达标的前提下，合理控制运行成本，实现垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的高效管理。

2. 二次污染防控技术

开发飞灰螯合稳定化处理工艺、提出重金属浸出浓度控制新方法时，二次污染防控存在技术瓶颈。垃圾焚烧飞灰成分复杂，传统螯合剂难以精准针对各类重金属，影响稳定化效果，增加二次污染风险。同时，处理过程中若条件控制不当，如 pH 值、反应时间等，会导致重金属再次溶出。解决方案可从两方面着手。一方面研发新型高效螯合剂，通过对飞灰成分深入分析，利用分子设计技术，提高螯合剂对重金属的选择性和螯合能力。另一方面，构建智能化处理系统，实时监测处理过程中的关键参数如 pH 值、温度等，精准调控反应条件，确保重金属稳定固化，有效防控二次污染，实现垃圾焚烧烟气多污染物协同控制与环保达标。

（三）政策标准配套建设

1. 激励性政策工具设计

构建激励性政策工具，对于基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的实施意义重大。打造政策工具

箱，纳入环保电价补贴与绿色信贷等关键要素。环保电价补贴方面，依据垃圾焚烧企业对多污染物协同控制的实际成效，给予相应的电价补贴，促使企业主动优化技术，提升环保水平。绿色信贷则引导金融机构对采用先进协同控制技术的企业提供利率优惠、额度放宽等金融支持。在此过程中，精确测算政策实施的边际效应，明确每一项激励政策对企业技术应用、污染物减排等方面的具体影响，以便动态调整政策力度与方向，确保激励性政策工具能切实推动垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的有效应用与持续发展。

2. 标准动态修订机制

建立基于最佳可行技术（BAT）的标准更新模型并提出五年周期性修订建议，对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的落地实施至关重要。通过该模型，能够依据行业技术发展的最新成果，如新型污染物处理工艺的研发应用，及时调整污染物排放限值等标准内容。每五年进行一次全面修订，既能确保标准不过时，始终契合当下环保需求，又不会因过于频繁修订而使企业难以适应。在修订过程中，广泛收集行业内的反馈，包括垃圾焚烧企业在实际执行标准中的困难与经验，以及科研机构在环保技术创新方面的进展，从而使修订后的标准更具科学性、合理性与可操作性，助力垃圾焚烧行业在环保达标的道路上稳健前行。

五、总结

垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略在环保达标方面具有关键意义。通过系统总结四大创新维度，为技术管理提供了全面且创新的思路，涵盖从技术优化到管理模式革新等多个层面。分级分阶段的策略实施路径，使得策略推进更具规划性与可操作性，能够依据不同阶段特点和需求，稳步实现环保达标目标。而人工智能与区块链技术在环保设施管理中的融合应用前景广阔，有望为垃圾焚烧烟气多污染物协同控制带来新的突破与发展，提升管理的智能化与透明化水平，助力环保事业朝着更加高效、可持续的方向迈进。这些策略和技术的结合，将为垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理注入新活力，为实现环保达标提供坚实保障。

参考文献

- [1] 刘凯.水泥熟料对城市生活垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的研究 [D].南京师范大学, 2021.
- [2] 阙正斌.垃圾焚烧烟气污染物多级脱除优化研究 [D].华北电力大学(北京), 2023.
- [3] 李思奇.垃圾焚烧厂典型痕量元素排放与分布 [D].华北电力大学(北京), 2021.
- [4] 崔纪翠.中国生活垃圾焚烧发电厂烟气污染物排放分析及预测 [D].天津大学, 2021.
- [5] 韩昭阳.基于时空耦合的垃圾焚烧大气污染物预测与治理策略研究 [D].天津理工大学, 2024.
- [6] 侯海瑞.催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用 [J].化工装备技术, 2022, 43(05):11-14.
- [7] 张皓航, 孙畅亿, 林曼, 等.垃圾焚烧发电烟气多污染物协同治理新工艺 [J].广州化工, 2023, 51(15):94-96.
- [8] 龚德强.SNCR 脱硝技术处理垃圾焚烧烟气的工程应用研究 [J].清洗世界, 2023, 39(01):1-3.
- [9] 梁梅.生活垃圾焚烧烟气脱硫技术应用分析 [J].有色冶金节能, 2021, 37(06):41-45.
- [10] 阙正斌, 李德波, 肖显斌, 等.中国垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除技术研究进展 [J].洁净煤技术, 2023, 29(06):115-127.