

生活垃圾焚烧过程中重金属迁移规律及控制方法研究

李亦婷

广州粤环环保科技有限公司 广东广州

【摘要】随着城市化进程加快，生活垃圾处理问题越发突出，焚烧作为减量化、无害化与资源化重要手段被广泛采纳。但是，焚烧中重金属释放与迁移对环境、人体健康构成重要威胁。本文系统分析生活垃圾焚烧中重金属迁移方式及分布特征，基于现有研究，分析不同燃烧条件下重金属形态转化机制。同时，归纳总结当前主流重金属污染控制技术，涉及源头减量、过程调控及末端治理等方式，为提升垃圾焚烧设施环境管理水平提供依据。

【关键词】生活垃圾；焚烧；重金属；迁移规律；控制方法

【收稿日期】2025 年 5 月 8 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20250014

Migration patterns and control methods of heavy metals during municipal solid waste incineration

Yiting Li

Guangzhou Yuehuan Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 With the acceleration of urbanization, the issue of municipal solid waste (MSW) disposal has become increasingly prominent. Incineration, as a key method for waste reduction, harmlessness, and resource recovery, has been widely adopted. However, the release and migration of heavy metals during incineration pose significant threats to the environment and human health. This paper systematically analyzes the migration pathways and distribution characteristics of heavy metals in MSW incineration. Based on existing research, the mechanisms of heavy metal speciation transformation under different combustion conditions are examined. Furthermore, current mainstream heavy metal pollution control technologies are summarized, including source reduction, process optimization, and end-of-pipe treatment, providing a basis for improving the environmental management of waste incineration facilities.

【Keywords】 Municipal solid waste; Incineration; Heavy metals; Migration patterns; Control methods

引言

生活垃圾焚烧技术在进行垃圾减容、能源回收方面具有明显优势，但产生的二次污染物，尤其重金属排放问题不容小觑。重金属有着难降解、易富集、毒性强等特点，焚烧中经历蒸发、冷凝、吸附等多种物理化学变化，最终进入飞灰、炉渣或烟气中，引起环境污染。因此，深入研究重金属焚烧中迁移规律，明确影响因素，探索有效的控制方式，是实现垃圾焚烧全过程绿色管理的关键。

1 生活垃圾焚烧过程中重金属迁移规律

生活垃圾焚烧处理中，重金属元素在高温环境

下发生复杂的物理与化学转化，呈现了显著的迁移与分布规律。不同重金属因理化特性差异，在炉渣、飞灰及烟气内分布各异，对环境控制提出了差异化管控要求。

1.1 初始赋存状态决定迁移特性

生活垃圾中重金属原始存在形式主要是无机盐、氧化物或有机络合物，化学性质决定焚烧中反应行为。不同形态重金属热解中表现出不同挥发性与转化趋势。例如，铅、镉等低沸点金属以氯化物或硝酸盐形式存在，易在高温下气化进入烟气中；而铬、镍等高熔点金属多以氧化物方式稳定存在于灰渣内，

作者简介：李亦婷（1994-）女，汉，广东湛江人，本科，助理工程师，研究方向：生活垃圾焚烧废气污染物治理。

不易挥发。同时,部分重金属和有机质结合构成络合物,燃烧初期便分解释放出金属元素,影响迁移路径。因此,垃圾中重金属初始赋存状态是判定最终归宿的关键^[1]。

1.2 焚烧温度影响重金属分布

焚烧温度是主导重金属迁移行为的重要物理参数。炉温低于 850℃时,多数重金属无法完全蒸发,仍保留底灰内,迁移到烟气的比例低,随着温度升到 1000℃以上,铅、镉、锌等金属逐渐气化,随烟气进入后续处理系统。冷却过程中,金属蒸气容易冷凝成细小颗粒,并附着于飞灰表面,导致飞灰中重金属浓度升高。相反,如砷、汞等金属即便较低温度下也具有一定挥发性,其迁移不受常规焚烧温度区间限制。由此可见,控制焚烧温度可以提高燃烧效率,还能调节重金属在不同焚烧产物内分布比例^[2]。

1.3 烟气组分与飞灰特性协同作用

烟气成分对重金属迁移发挥催化或抑制作用。氯、硫等非金属元素在高温环境下与重金属发生反应,生成易挥发金属氯化物或硫酸盐,促进其从固相向气相转移。例如,氯存在会增强铅、镉气化程度,易进入烟气系统。与此同时,飞灰物理化学性质对吸附能力影响明显,相较表面积大、孔隙结构发达的飞灰颗粒具有强烈的捕集能力,可以吸附气态重金属。同时,碱性成分如 CaO 一定程度上中和酸性气体,降低重金属氯化物生成,间接降低挥发性。因此,烟气组成与飞灰特性综合作用,直接影响重金属在焚烧系统内的情况。

1.4 不同金属迁移行为的显著差异

各类重金属在生活垃圾焚烧中的迁移行为,会根据物理化学性质差异表现出不同。例如,汞(Hg)具有较低沸点与较强挥发性,焚烧高温条件下几乎完全以气态形式挥发,随烟气迁移,并在烟气净化系统内重新凝结或被吸附。而铬(Cr)则具有较高的熔点与稳定性,一般以氧化物或复杂矿物形式存在,不易挥发,主要富集在炉渣内。差异性使得重金属焚烧系统内分布具有选择性。所以,重金属控制中,应按照不同金属迁移特征制定针对性分类控制方案,如加强烟气内挥发性重金属采集措施,注重炉渣内稳定性金属的固化处理,以达到整体污染物的有效治理。

2 重金属污染的控制方法

2.1 源头分类与减量控制

生活垃圾内重金属来源于废旧电池、废弃电子产品、化妆品包装、含金属的医疗废弃物等。基于生态环境部发布的《2023 年全国固体废物污染防治年报》,我国城市生活垃圾内铅、镉、汞平均含量分别是 15.6 mg/kg、1.8 mg/kg 与 0.2 mg/kg,部分电子垃圾混入比例高时,重金属浓度高出数倍甚至十倍以上。高浓度重金属若未经分拣而直接进入焚烧系统,会增加烟气净化系统负担,造成飞灰中重金属富集程度上升,给后续处置带来严峻环境风险。因此,构建科学的垃圾分类体系,尤其推动“有害垃圾”专项回收机制,是控制重金属输入的重要方式。经过居民区设置专用收集容器、加强社区宣传引导、完善转运和处理链条,有效分流含重金属废弃物。数据显示,北京、上海等城市,有害垃圾回收率从 2019 年不足 5%提升到 2024 年 20%以上,降低了焚烧中重金属负荷。同时,配套建设专业化、资源化设施,如废电池金属提取厂、电子废弃物拆解中心,有助于把重金属从垃圾流内分离并转化成可再利用资源,进行系统管理^[3]。

2.2 优化焚烧运行参数

焚烧温度、空气配比及停留时间是影响重金属迁移行为的重要参数。研究得出,不同类型重金属具有不同热力学特性,挥发性随温度变化而具有差异性。例如,镉(Cd)的沸点是 767℃,锌(Zn)是 907℃,铅(Pb)是 1749℃,焚烧过程中表现出不同程度气化情况。炉温控制在 850~1000℃区间时,使铅、锌等金属部分保留再底灰中,减少向飞灰转移比例。繁殖,温度过高,超过 1200℃,导致更多重金属气化进入烟气系统,提升了后续治理难度。同时,空气过量系数(α 值)对炉内气氛影响直接。实验数据得出, $\alpha=1.4\sim1.6$ 范围内,炉内保持适度氧化条件,能够抑制还原性气体生成,降低重金属氯化物形成概率,减少挥发性。同时,延长烟气停留时间(一般大于 2 秒),有助于重金属蒸气和其他颗粒物出现碰撞吸附或冷凝沉积,提高捕集效率。采取精细化运行管理,结合在线监测和自动控制系统,动态调节焚烧过程,保障燃烧效率同时,调控重金属分布方式,降低环境释放风险^[4]。

2.3 高效烟气净化系统配置

现代垃圾焚烧厂采用多级协同净化工艺,应对

复杂形态下重金属排放问题。目前主流配置成“干法脱酸+半干法喷雾干燥+湿法洗涤”组合方式,辅以活性炭喷射与布袋除尘装置。其中,干法脱酸依靠石灰粉等碱性物质快速中和 HCl 、 SO_2 等酸性气体,间接影响重金属氯化物生成;半干法利用喷雾干燥塔进行高效脱除,降低酸性组分对重金属迁移的推动作用;湿法洗涤用于深度去除残余酸性气体和重金属离子,尤其适用于汞、砷等处理困难的元素。活性炭因高比表面积与丰富微孔结构,被广泛用于吸附气态汞 (Hg^0),研究得出,活性炭喷射量达 $3-5 \text{ kg/t}$ 垃圾时,会有 80% 以上汞去除率。布袋除尘器是最后一道防线,能有效捕集携带重金属的细颗粒物,去除效率达 99% 以上。近年来,一些先进焚烧厂引入了活性焦、改性炭材料等新型吸附剂,提升了重金属捕集能力。整体来看,多段净化系统覆盖重金属从气态到固态多种存在方式,削减了最终排入环境的概率,确保烟气稳定达标排放^[5]。

2.4 飞灰安全处置与资源化利用

焚烧飞灰是重金属高度富集产物,一般含有铅、镉、锌、铜等多种有毒金属,浸出毒性高于炉渣。按照《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2021),飞灰中铅、镉限值分别是 100 mg/L 和 1.0 mg/L (TCLP 浸出测试),具体检测中会超出此标准数倍。因此,必采取固化/稳定化措施后方可进行最终处置。目前常用的稳定化方法为水泥固化、磷酸盐稳定、硅酸盐包覆等。水泥固化通过水化反应构成致密结构,涉及重金属颗粒,降低迁移能力,但有着增容效应明显的问题。磷酸盐法经过金属磷酸盐沉淀反应,构成低溶解度的结晶相,稳定效果优越,适用处理高浓度重金属。硅酸盐基材料,如粉煤灰、矿渣微粉等利用玻璃体结构包裹重金属,提升长期稳定性。研究显示,经磷酸镁水泥稳定处理后,飞灰内铅、镉的浸出浓度分别降到 10 mg/L 与 0.1 mg/L 以下,满足填埋入场要求。同时,部分企业探索稳定化飞灰用于路基材料、制砖原料等建材替代作用,但应用前需进行精准环境风险评估。所以,随着重金属稳定化技术进步、政策监管加强,飞灰安全处置与资源化利用逐步走向规范化、高效化^[6]。

2.5 监测与管理制度建设

建立系统的在线监测系统与重金属排放标准,是实现生活垃圾焚烧中重金属有效控制的重要措施。

具体从以下几个方面进行系统构建、实施:

首先,配置高精度的烟气重金属在线监测设备,如基于冷凝萃取、光谱分析或质谱检测技术等在线监测系统,用来连续监测烟气中汞、铅、镉、铬等典型重金属的浓度。这些设备要具备自动校准、数据远传、异常报警等功能,保证监测数据准确性与时效性。其次,建立标准化监测技术规程及重金属排放限值体系是关键。按照国家或地方环保标准,根据实际焚烧工艺情况,制定科学合理的重金属排放限值与监测频次^[7]。比较国内外相关标准体系,完善限值指标,提升排放控制严谨性及可操作性。再次,搭建数据集成管理平台,实现监测数据的集中采集、实时分析与历史分析。平台中具备多源数据融合能力,可以对焚烧温度、烟气成分、飞灰含量等重要参数展开综合比对,识别异常排放行为,及时生成预警提示,为运维管理带来决策依据。基于技术手段与制度建设的协同推进,实现对生活垃圾焚烧中重金属排放的实时、高效、可控管理,保障焚烧处理环境安全性和持续合规性^[8]。

3 结语

综上所述,生活垃圾焚烧中重金属迁移受多种因素共同影响,行为复杂且具不确定性。掌握重金属不同工况下迁移规律,是制定科学防控方案的前提。从源头减控、过程优化与末端治理相结合方式,能够控制重金属污染,提升焚烧设施整体环境效果。通过进一步加强重金属迁移模型构建和新型控制材料研发,促进垃圾焚烧行业向绿色低碳方向发展。

参考文献

- [1] 王慧忠,汪美英等.浅析农村水域污染特征及其防治措施[J].滁州学院学报,2010,1(2):74-76.
- [2] 钱洁.浅谈上海郊区农村水环境问题及保护治理对策[J].中国水运,2011,11(3):172-201.
- [3] 陶春,高明等.农业面源污染因子及控制技术的研究现状与展望[J].土壤,2010,42(3):336-343.
- [4] 张志伟.农村水污染问题初探[J].法制与社会,2009,(21):283-283.
- [5] 辛美静,仲兆平,金保升,赖贻葵.城市生活垃圾焚烧处理中重金属污染的形成与控制[J].能源研究与利用,2002(05):14-16+23.

- [6] 李波;林勤保;宋欢;吴海军;李小梅;陈月.微波消解-ICP-AES 测定食品塑料包装中钛、铅、铬和镉[J].化学研究与应用,2011(02):252-256.
- [7] 吴芳寿.生活垃圾发电对大气环境影响的测试分析[J].中国新技术新产品,2024,(24):126-128.
- [8] 刘青,吴凯凯,曾宪坤.生活垃圾焚烧飞灰资源化技术研究

进展[J].江西科学,2024,42(06):1256-1262.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS