

垃圾发电过程中重金属污染物迁移规律及控制措施

徐一鸣 魏杰奇 王萌 周芷馨 李天熙

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210035

摘要：随着垃圾发电技术的广泛应用，重金属污染问题日益凸显。本文聚焦垃圾发电过程中重金属污染物的迁移规律及控制措施，系统分析了Hg、Pb、Cd、Cr等典型重金属的赋存形态与来源。通过研究预处理、焚烧、烟气净化及灰渣处置四个阶段的迁移特征，揭示了重金属在不同工艺环节的分布与转化规律。深入探讨了垃圾组分、工艺参数、操作稳定性对迁移的影响机制。从源头削减、过程调控和末端稳定化三个维度提出针对性控制措施，包括分类收集、工艺优化及灰渣固化等技术方法，为垃圾发电重金属污染防治提供科学依据与实践指导。

关键词：垃圾发电过程；重金属污染物迁移；规律；控制措施

引言：垃圾中含有的Hg、Pb、Cd、Cr等重金属在发电过程中发生迁移转化，可能通过烟气、灰渣等途径污染环境。目前重金属在垃圾发电全流程中的迁移规律尚未完全明晰，影响因素复杂多样，控制技术仍需优化。本文基于垃圾发电实际工艺，首先解析重金属的赋存形态与来源，进而研究其在预处理至灰渣处置各阶段的迁移规律，分析关键影响因素，最终提出贴合实际的控制措施，旨在为降低重金属环境风险提供理论支撑。

1 垃圾发电过程中重金属污染物概述

1.1 常见重金属污染物（Hg、Pb、Cd、Cr等）的识别

垃圾发电过程中需重点关注的典型重金属污染物包括汞（Hg）、铅（Pb）、镉（Cd）、铬（Cr）等。汞具有强挥发性，在焚烧温度下易转化为气态进入烟气，其单质及化合物有强烈神经毒性，可通过大气长距离迁移造成全球性污染。铅广泛存在于生活垃圾中，燃烧时易形成颗粒物富集于飞灰，长期接触会损伤造血系统和神经系统。镉的生物蓄积性极强，低浓度暴露也可能引发肾脏损伤和骨骼病变，在焚烧灰渣中残留风险较高。铬的毒性因价态而异，六价铬毒性远高于三价铬，在氧化气氛下易形成可溶性化合物，增加环境迁移风险。

1.2 重金属在生活垃圾中的赋存形态

重金属的赋存形态主要分为以下水溶性、酸溶性和残渣态等类型。（1）水溶性重金属多以离子态或简单络合物形式存在，如氯化镉、硝酸铅等，在垃圾预处理的水分浸出过程中易进入渗滤液，增加污水处理难度。（2）酸溶性重金属通常与碳酸盐、硫酸盐结合，在酸性条件下易溶出，在焚烧系统的酸性烟气环境中可能二次释放。（3）残渣态重金属嵌入垃圾晶格结构或难降解有机物中，如与腐殖质形成的稳定螯合物，常规燃烧条件下不易挥发或溶出，主要残留于底渣。

1.3 重金属的主要来源

生活垃圾中重金属来源具有多样性和复杂性，主要包括以下电子废弃物、废电池、厨余垃圾及日常消费品。

（1）电子废弃物是高风险来源，废旧电路板含铅、镉、铬等，显示器荧光粉含汞，混合处理时极易释放。（2）废电池尤其是铅酸电池和含汞电池，若未经专项处理进入垃圾流，会成为铅、汞污染的主要贡献者。（3）厨余垃圾虽重金属含量低，但有机成分可能通过吸附、络合作用富集镉、铅等。油漆、塑料添加剂、化妆品等也是重要来源，如塑料中的镉稳定剂、颜料中的铬化合物^[1]。

2 垃圾发电过程中重金属污染物迁移规律

2.1 预处理阶段重金属的初步迁移特征

预处理阶段重金属已发生初步迁移。垃圾经破碎设备处理后颗粒尺寸减小，内部重金属随物料破碎暴露并重新分布。水分调节过程中，水溶性重金属通过渗滤液脱离固相基质进入液相，形成固液初步分离。筛分分级通过不同孔径筛网实现粒径分离，使重金属在不同粒径组分中差异化分布。细颗粒因比表面积大吸附能力强，富集更高浓度重金属；粗颗粒重金属含量较低，但总量占比受物料总量影响。机械搅拌与混合作用促使不同组分中重金属接触转移，部分结合态重金属因物理扰动发生形态转化，从稳定态转为活性态，增强后续焚烧环节的迁移活性。

2.2 焚烧阶段重金属的挥发与分布规律

焚烧阶段是重金属迁移转化的核心环节，高温环境促使其形态变化与空间迁移。炉膛内重金属挥发行为随温度升高呈规律性变化，达到特定阈值时从固相挥发进入气相，不同重金属依挥发特性在特定温度区间完成相变。燃烧热分解使重金属与原载体化学键断裂，结合态转为游离态随烟气迁移。气相重金属在烟气冷却过程

中重新分配,部分蒸汽因温度降低超过凝结点形成细颗粒,吸附于粉尘表面成为颗粒结合态;未凝结的气态重金属以分子或气溶胶形式保持气相迁移。炉膛温度梯度导致重金属区域分布差异:高温区($>1000^{\circ}\text{C}$)以气态迁移为主,中低温区($600\text{--}1000^{\circ}\text{C}$)以颗粒态迁移为主,低温区($<600^{\circ}\text{C}$)形态趋于稳定。此阶段完成固相垃圾向烟气、底渣的初次分配,底渣残留高挥发温度重金属,烟气富集易挥发种类,形成气固多相共存迁移状态。

2.3 烟气净化过程中重金属的分离与转移规律

烟气净化系统通过多级协同实现重金属分离转移。除尘设备作为第一道屏障,物理拦截颗粒态重金属,不同类型设备捕集效率存在差异,颗粒态重金属随粉尘进入飞灰,使其浓度显著升高。脱硫过程通过气液或气固反应,使部分气态重金属与脱硫剂发生化学或物理作用,转移至脱硫副产物实现二次分离。净化系统低温段($<200^{\circ}\text{C}$)中,部分气态重金属化学活性增强,与净化剂反应形成稳定化合物进入固相副产物,降低气相含量。不同净化单元分离效率呈梯度差异:前期除尘去除大颗粒结合态重金属,中期脱硫捕集中等挥发性种类,后期深度净化处理低浓度气态重金属,导致重金属在各环节副产物中阶梯式富集。净化后烟气残留重金属以低浓度气态或超细颗粒态为主,随排放进入大气,排放量取决于系统整体效率。此阶段完成烟气向净化副产物的二次分配,迁移载体从烟气转为飞灰、脱硫渣等固体废弃物。

2.4 灰渣处置过程中重金属的残留与浸出规律

灰渣处置阶段重金属迁移表现为残留与浸出特性,底渣与飞灰中重金属在环境作用下缓慢迁移。底渣中重金属经高温熔融后化学键稳定,以稳定态存在,常规处置条件下迁移活性低,主要随物理堆积在处置场内空间迁移。飞灰中重金属因净化过程富集,浓度显著高于底渣,易受环境影响发生浸出迁移。环境水分通过渗透与灰渣接触,溶解可溶性重金属形成离子溶液,随渗滤液迁移,渗透速率受降水和防渗层性能影响。处置环境酸碱变化改变重金属化学稳定性,酸性可能溶解金属氧化物,碱性可能促使氢氧化物沉淀,通过改变溶解平衡促使稳定态转为可溶态,增强迁移能力。灰渣压实程度与孔隙结构影响迁移速率:致密结构减少渗透通道,减缓迁移;松散结构增加路径,加速浸出。微生物活动也可能通过生物转化影响重金属形态,间接改变迁移特性^[2]。

3 重金属污染物迁移的关键影响因素

3.1 垃圾组分差异对重金属迁移的基础影响

垃圾组分构成直接决定重金属初始含量与迁移潜

力。不同类型垃圾的重金属本底浓度差异显著,高风险组分占比越高,系统初始负荷越大。组分的物理化学性质通过改变重金属结合状态影响赋存形态,有机质含量、水分比例等特性调控后续迁移活性。组分均匀性影响重金属分布均质性,不均匀构成易导致局部富集,形成差异化迁移路径。

3.2 工艺参数的核心调控作用

焚烧温度是挥发迁移的关键参数,温度升高加速挥发速率,不同重金属的挥发阈值决定特定温度区间的迁移强度。停留时间通过影响反应充分程度改变迁移进程,足够时长可促进重金属与载体分离转化。空气过剩系数通过调控燃烧气氛影响价态转化,氧化或还原性环境改变重金属化合物稳定性,进而影响挥发与捕集效率。

3.3 操作条件稳定性的干扰效应

操作条件波动破坏迁移稳定规律,温度、压力等参数瞬时变化可能导致挥发与捕集效率异常波动。设备运行状态稳定性影响各环节协同作用,单一设备偏差可能引发迁移路径连锁变化。长期稳定的操作条件决定迁移规律可预测性,是实现有效污染控制的基础^[3]。

4 垃圾发电过程中重金属污染物迁移控制措施

4.1 重金属输入量的管控措施

源头削减是控制重金属迁移的基础性措施,核心在于降低垃圾中重金属的初始含量,应采取以下措施:

(1) 通过建立完善的分类收集体系。明确生活垃圾与高风险重金属废物的分类标准,在社区层面设置专项收集容器,实现两类废物的物理分离。针对重金属富集类废物,建立独立的收运网络,采用专用运输设备进行定向输送,避免其混入常规垃圾流进入焚烧系统。(2) 完善垃圾入厂检验机制。在垃圾接收环节设置快速检测站点,对入厂垃圾进行重金属含量抽检,检测指标覆盖常见的汞、铅、镉、铬等元素。根据检测结果设置科学的重金属浓度准入阈值,对超标垃圾实施分流处理,通过专门渠道送往具备危废处置资质的单位进行处理。强化垃圾预处理环节的筛选净化能力,配置先进的物理分选设备,通过磁选技术分离垃圾中的含铁金属,利用密度分选设备分离重金属富集的高密度组分,提取后的金属类物质进行专项回收处理。(3) 优化垃圾配伍方案。建立入炉垃圾重金属含量数据库,根据实时检测结果动态调整不同来源垃圾的组分比例,通过低重金属含量垃圾的掺混,降低混合垃圾中的重金属加权浓度。建立垃圾来源追溯系统,对工业废料、建筑垃圾等潜在高风险垃圾实施严格的人场管控,要求提供重金属含量检测报告,对超标废物坚决拒绝接收,从源头切断高风险重金

属的输入路径。

4.2 迁移路径的工艺优化措施

过程调控通过优化工艺参数阻断重金属迁移路径，具体措施如下：（1）在焚烧阶段，采用炉膛分区控温技术。通过布置多点温度监测装置实时调控各区域燃烧温度，维持炉膛温度在合理区间，避免局部高温导致重金属过度挥发。精确控制空气过剩系数，根据垃圾组分特性调整一次风和二次风的配比及供给量，营造适宜的燃烧气氛，减少易挥发重金属的气态生成量。（2）优化焚烧炉停留时间参数。通过调整炉排转速控制垃圾在炉膛内的停留时间，确保重金属与灰渣充分分离，使底渣中的重金属残留量控制在较低水平。烟气净化系统采用多级协同控制技术，在除尘环节选用高效布袋除尘器或电袋复合除尘器，通过优化滤料材质选择和清灰周期设置，提高对颗粒态重金属的捕集效率，减少颗粒态重金属的逃逸。（3）在脱硫系统中，根据烟气特性调整吸收剂的种类和配比。优化液气比参数，增强吸收剂与气态重金属的接触反应效率，提升对气态重金属的协同吸附能力。在烟气净化流程的关键节点设置专用吸附单元，选用高效吸附材料，通过精准控制吸附剂的投放量、投放频率和与烟气的接触时间，强化对低浓度气态重金属的深度捕集，进一步降低烟气中重金属的排放浓度。

4.3 灰渣中重金属的稳定化措施

末端处置聚焦于降低灰渣中重金属的迁移活性，其措施如下：（1）对飞灰采用固化稳定化处理工艺。根据飞灰中重金属的种类和含量，选择适宜的无机固化剂，通过机械搅拌实现固化剂与飞灰的均匀混合，形成稳定的晶体结构，将重金属包裹在固化体中限制其溶出。优化固化配比和养护条件，控制固化剂添加比例、养护温度和养护时间，确保固化体的抗压强度和浸出毒性达到处置标准，降低后续处置过程中的迁移风险。（2）底渣

处置前进行预处理。通过水洗工艺去除表面附着的可溶性重金属，采用筛分设备分离底渣中的细颗粒组分，减少易迁移组分含量。建立灰渣分类处置机制，根据重金属含量检测结果实施分级管理，对高风险灰渣采用安全填埋方式处置，填埋场设置多层防渗结构，包括压实黏土衬层、高密度聚乙烯膜和土工布等，形成完整的防渗系统阻断迁移通道。（3）低风险灰渣经检测达标后可进行资源化利用。在利用前进行稳定性评估，严格控制利用过程中的环境释放。定期对灰渣处置场进行监测，布设土壤和地下水监测点，通过铺设完善的防渗层、设置渗滤液收集系统和处理设施，及时收集和处理浸出液，防止重金属随渗滤液扩散迁移污染周边环境^[4]。

结束语：本文系统阐述了垃圾发电过程中重金属的迁移规律与控制措施。研究表明，重金属在预处理阶段初步分离，焚烧阶段完成气固分配，净化阶段实现阶梯式富集，处置阶段存在长期浸出风险。垃圾组分、工艺参数等因素显著影响迁移进程。通过源头分类管控、过程参数优化及末端固化处置的协同措施，可有效阻断重金属迁移路径。

参考文献

- [1]施鉴祝.城市污水处理系统中重金属污染物检测及治理[J].花炮科技与市场,2025,32(3):92-94.
- [2]赵丽,张薏旸,卫杰,黄兴宇,孙超,刘靖宇.垃圾渗滤液中铁和铬在地下水中的迁移转化规律[J].环境科学与技术,2020(3):74-79.
- [3]乔岗杰,刘轩,赵元财,刘红刚,孔凡荣,张锴.燃煤电厂典型重金属排放与控制进展[J].电站系统工程,2020,36(2):1-4+8.
- [4]余传庭.垃圾焚烧发电厂运行中的污染物排放控制策略研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(4):080-083.