

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入场管控,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,张蕙旸,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,张镔.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.