

# 固体废弃物焚烧飞灰的无害化处理及资源化利用研究

姚舒婷 任泽臻

山西大学

DOI:10.12238/eep.v8i6.2741

**[摘要]** 随着城市化进程的加速和固体废弃物产生量的持续增长,焚烧处理成为重要的处置方式,但随之产生的焚烧飞灰因其含有大量有害物质,对生态环境和人体健康构成严重威胁,其无害化处理与资源化利用已成为环保领域的关键课题。本文分析了固体废弃物焚烧飞灰的污染特性,对其包含的重金属、二噁英等有害物质的来源、存在形式及危害机制进行了阐释。并在此基础上详细探讨了多种无害化处理技术,提出了飞灰在建筑材料、土壤改良、吸附材料制备等领域的资源化利用策略。旨在为固体废弃物焚烧飞灰的科学处理与高效利用提供全面的理论依据和实践指导,推动环保产业向绿色、可持续方向发展。

**[关键词]** 固体废弃物; 焚烧飞灰; 污染特性; 无害化处理; 资源化利用

**中图分类号:** U664.9+2 **文献标识码:** A

## Research on Detoxification Treatment and Resource Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash

Shuting Yao Zezhen Ren

Shanxi University

**[Abstract]** With the acceleration of urbanization and the continuous increase in solid waste generation, incineration has become a significant disposal method. However, the resulting incineration fly ash, which contains substantial amounts of hazardous substances, poses a serious threat to both ecological environments and human health. The safe treatment and resource utilization of fly ash have thus emerged as critical issues in the environmental protection field. This paper analyzes the pollution characteristics of solid waste incineration fly ash, elucidating the sources, existing forms, and harm mechanisms of hazardous substances such as heavy metals and dioxins. Building on this foundation, it comprehensively examines various safe treatment technologies and proposes resource utilization strategies for fly ash in areas including construction materials, soil amendment, and adsorbent material preparation. The study aims to provide a comprehensive theoretical basis and practical guidance for the scientific treatment and efficient utilization of solid waste incineration fly ash, thereby advancing the environmental protection industry toward green and sustainable development.

**[Key words]** Municipal solid waste; Incineration fly ash; Pollution characteristics; Detoxification treatment; Resource utilization

### 引言

现阶段,人口高度集中与经济快速发展使得固体废弃物产生量大幅增加。传统的填埋、堆肥等处理方式,因占地广、易引发二次污染等问题,难以满足愈发严格的环保标准与可持续发展的要求。在此情形下,焚烧处理技术因减量化和无害化效果显著,已成为固体废弃物处理的主要手段之一。然而,固体废弃物焚烧过程并非绝对清洁,会产生大量的焚烧飞灰。这些飞灰成分复杂,含有多种重金属、二噁英等有毒有害物质。若处理不当,有害物质会经大气沉降、雨水淋溶等途径进入土壤、水体和大气,对生态系统造成长期潜在危害。因此,基于环保与改善环境

的迫切需求,必须实现固体废弃物焚烧飞灰的无害化处理与资源化利用。

开展固体废弃物焚烧飞灰无害化处理及资源化利用研究具有多方面的重要意义。从环境层面来看,有效处理飞灰可减少其对土壤、水体和大气的污染,维护生态环境安全稳定;就资源角度而言,飞灰中含有一定的可利用成分,资源化利用可实现废弃物循环利用,缓解资源短缺的压力;从经济方面分析,合理的处理和利用方式能降低处理成本,创造经济效益,推动环保产业可持续发展。

### 1 固体废弃物焚烧飞灰的污染特性

### 1.1 重金属污染

固体废弃物焚烧飞灰中含有铅、汞、镉、铬、铜、锌等多种重金属元素,这些重金属主要源自原始固体废弃物。在焚烧过程中受高温影响,重金属会经历挥发、冷凝与富集等过程,最终大部分集中在飞灰中。这些重金属在飞灰中的存在形式多样,包括氧化物、氢氧化物、硫化物以及盐类等。不同形式的重金属,化学稳定性和迁移性各异。具体而言,可交换态与碳酸盐结合态的重金属,环境条件一变就易释放,生物有效性和毒性较高;残渣态的重金属则较为稳定,不易被生物利用。

重金属对环境和人体的危害巨大。在环境中,它们会通过食物链传递和生物放大,在高级生物体内富集,达到一定浓度后会严重影响生物的生理功能。如铅会影响儿童的神经系统发育,导致智力低下、学习能力下降;汞会损害人体神经系统和肾脏,引发震颤、记忆力减退等;镉有致癌、致畸和致突变作用,长期接触会引发骨骼软化、肾功能衰竭等疾病。

### 1.2 二噁英污染

二噁英是多氯二苯并二噁英(PCDDs)和多氯二苯并呋喃(PCDFs)等一类结构和致癌性相似的有机污染物统称。固体废弃物焚烧时,常因燃烧不充分且存在氯元素而生成大量二噁英。

二噁英化学稳定性与热稳定性极强,在环境中极难降解,半衰期可达数年至数十年。它可借助大气沉降、雨水冲刷等进入土壤和水体,并在生物体内蓄积。二噁英毒性远超氰化物,即便微量摄入,也会严重危害人体健康,影响内分泌、免疫和生殖系统,引发癌症、畸形、发育障碍等疾病。

### 1.3 其他污染特性

除重金属与二噁英污染外,固体废弃物焚烧飞灰还有其他污染特性。飞灰的颗粒细小、比表面积大,这使其吸附能力较强,易吸附周围环境中的挥发性有机化合物、多环芳烃等有害物质,进一步增加了其污染风险。

飞灰的碱性较强,pH值偏高。如果直接排放到空气中会改变土壤和水体的酸碱度,破坏生态平衡。而且,高碱性的飞灰会抑制植物生长,影响农作物的产量与质量。尤其是飞灰中含有一定量的可溶性盐,如氯化钠、硫酸钠等,这些盐分会造成土壤盐渍化,降低土壤的肥力和透气性。

## 2 固体废弃物焚烧飞灰的无害化处理技术

### 2.1 熔融固化技术

熔融固化技术是将飞灰高温加热,使其呈熔融状态,待冷却后形成玻璃态或晶态的稳定物质。在高温条件下,飞灰中二噁英等有机污染物会分解并燃烧,进而实现无害化处理的目标。同时,重金属元素会被包裹在熔融后的产物中,形成稳定结构,降低其浸出毒性。

熔融固化技术的处理过程一般在专门的熔炉内开展。先将飞灰和适量的助熔剂混合,助熔剂能够降低飞灰的熔点,提升其熔融特性,常用的助熔剂有硼砂、碳酸钠等。然后通过加热装置将混合物加热到熔融温度,通常这个温度为1200~1500℃。在此温度下保持一段时间,使有机物充分分解,同时使重金属均匀分

布。最后,将熔融后的物质倒入模具中冷却成型,得到玻璃态或晶态的固化产物。

熔融固化技术处理效果良好,能有效去除有机污染物并固定重金属。处理之后,产物体积大幅缩小,减量化效果突出。固化产物强度高、稳定性好,可作为建筑材料使用,如制作道路基层材料、砖块等。但这项技术也存在一些不足。高温处理需要耗费大量能源,处理成本偏高;熔炉设备较为复杂,对操作和维护的要求较高,需要专业技术人员进行管理。所以,该技术适用于对处理效果要求较高且经济实力较强的地区或企业。

### 2.2 化学稳定化技术

化学稳定化技术是通过向飞灰中添加化学药剂,使其与飞灰中的有害物质发生化学反应,生成稳定的化合物,从而降低有害物质的迁移性和毒性,水泥、石灰、磷酸盐等是常用的化学药剂。

以水泥稳定化为例,先将飞灰与水泥按一定比例混合,同时加入适量的水进行搅拌,使水泥充分水化。水泥中的硅酸三钙、铝酸三钙等成分与飞灰中的重金属离子发生水化反应,生成氢氧化物和硅酸盐等稳定产物。这些产物具有较大的比表面积和较强的吸附能力,能够进一步固定重金属离子。经过一定时间的养护,反应充分进行,得到稳定化产物。

化学稳定化技术操作相对简单,处理成本较低,适用于大规模处理飞灰。经过稳定化处理后的飞灰,其重金属浸出毒性显著降低,可满足填埋等处置方式的环境安全要求。然而,该技术也存在一定局限性:其一,化学药剂的添加量需要根据飞灰的成分和性质进行精确控制,否则可能影响稳定化效果;其二,长期来看,稳定化产物的稳定性可能会受到环境因素的影响,存在一定的环境风险。本技术适用于对处理成本较为敏感且对处理效果要求不是太高的场合。

### 2.3 低温热处理技术

低温热处理技术是指在相对较低的温度下对飞灰进行处理,通过控制温度和处理时间,分解飞灰中的有机污染物,同时改变重金属的化学形态,降低其毒性。与高温熔融固化技术相比,低温热处理技术能耗较低,设备投资和运行成本相对较小。

在低温热处理的过程中,将飞灰置于专门的热处理设备中,温度控制在300~600℃。在此温度范围内,飞灰中的二噁英等有机污染物会发生热分解反应,生成二氧化碳、水和一些小分子有机物。对于重金属元素,低温热处理可以使其从易溶态转化为难溶态,减少在环境中的迁移。例如,铅经低温热处理后可能转化为硫酸铅等难溶化合物,降低其浸出毒性。处理过程中产生的废气需要进行有效处理,以避免二次污染。

低温热处理技术的关键在于控制处理温度和时间。温度过低,有机污染物分解不充分,重金属形态转化不完全;温度过高,则可能导致飞灰烧结,影响处理效果。该技术适用于对处理成本较为敏感且对处理效果要求不是极高的场合,如一些小型焚烧厂或经济欠发达地区。

## 3 固体废弃物焚烧飞灰的资源化利用策略

### 3.1在建筑材料领域的应用

#### 3.1.1作为水泥混合材

经过适当处理后的飞灰可作为水泥混合材使用。飞灰中的活性成分,如二氧化硅、氧化铝等,在水泥水化过程中可以参与反应,生成具有胶凝性的物质,提高水泥的强度和耐久性。同时,飞灰的掺入可以减少水泥的用量,降低生产成本,且对水泥的性能影响较小。在实际应用过程中,要对飞灰进行预处理,如烘干、磨细等,以提高其活性和均匀性。控制飞灰的掺量是关键,一般掺量为10%~30%,具体掺量应根据水泥的性能要求进行试验确定。

#### 3.1.2制备砖块

将飞灰与黏土、砂等原料按一定比例混合,经过成型、干燥、烧制等处理,可制成性能良好的砖块。飞灰中的矿物质在烧制过程中会经历一系列物理化学变化,形成稳定的结构,使砖块具有一定的强度和耐久性。与传统砖块相比,利用飞灰制备的砖块不仅节约了原材料,还减少了废弃物的排放,具有显著的环境效益。在制备过程中,需要优化原料配比和烧制工艺,保证砖块的质量符合标准要求。

#### 3.1.3生产道路基层材料

飞灰还可用于生产道路基层材料。将飞灰与石灰、粉煤灰等材料混合,经压实处理可形成具有一定强度和稳定性的道路基层。这种基层材料能够满足道路工程的使用要求,且具有良好的抗渗性和耐久性。利用飞灰制备道路基层材料,能够实现废弃物的资源化利用,降低了道路建设的成本。需要注意的是,在应用时要对材料的性能进行检测和控制,确保道路基层的质量和安全性。

### 3.2在土壤改良方面的应用

#### 3.2.1提供营养元素

固体废弃物焚烧飞灰中含有多种矿物质元素,如钾、磷、钙等,这些元素是植物生长所必需的营养元素。适量添加飞灰可以改善土壤的物理化学性质,提高土壤的肥力。飞灰中的钾元素可以增强植物的抗逆性,促进植物的生长发育;磷元素对植物的根系生长和开花结果具有重要作用;钙元素可以调节土壤的酸碱度,优化土壤结构。

#### 3.2.2调节土壤酸碱度

飞灰的碱性可以中和酸性土壤,调节土壤的pH值,为植物生长创造适宜的环境条件。在酸性土壤地区,添加飞灰可以提高土壤的pH值,提高土壤中有效养分的含量,促进植物对养分的吸收。而且,飞灰的颗粒结构可以改善土壤的通气性和透水性,促进植物根系的生长发育。

#### 3.2.3注意事项

在利用飞灰进行土壤改良时,需注意控制飞灰的添加量。过

量添加飞灰可能导致土壤盐碱化,对植物生长产生不利影响。由于飞灰中含有一定量的重金属元素,在使用前要对其进行无害化处理,确保重金属含量符合土壤环境质量标准,避免对土壤和地下水造成污染。

#### 3.3在其他领域的潜在应用

##### 3.3.1制备吸附材料

在环保领域,飞灰可用于制备吸附材料。通过对飞灰进行改性处理,可以增加其比表面积和孔隙结构,提高其对污染物的吸附能力。改性后的飞灰吸附材料可用于处理废水中的重金属离子、有机污染物等,具有较好的去除效果,如采用酸碱改性、热改性等方法可以改变飞灰的表面性质,增强其对特定污染物的吸附选择性。

##### 3.3.2制备催化剂

在能源领域,飞灰中的某些成分具有一定的催化活性。研究人员正在探索利用飞灰制备催化剂,用于催化反应过程,如催化裂化、催化氧化等。如果能成功开发出高效、稳定的飞灰基催化剂,将为飞灰的资源化利用开辟新的途径。目前,相关的研究还处于起步阶段,需要进一步深入探索飞灰中具有催化活性的成分及其催化机制。

## 4 结语

综上所述,固体废弃物焚烧飞灰的无害化处理及资源化利用是固体废弃物处理领域的重要研究方向。本文所述的各种处理技术和利用策略都具有各自的优缺点和适用范围,在实际应用中需要根据飞灰的性质、处理要求和经济条件等因素,选择合适的处理方法和利用途径。未来,应进一步加强固体废弃物焚烧飞灰无害化处理及资源化利用技术的研究和开发,实现固体废弃物焚烧飞灰的安全处置和高效利用,为保护生态环境做出贡献。

## [参考文献]

- [1]郑旭帆,杜艺,苗恩东,等.城市固体废弃物焚烧飞灰碳化研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(01):187-197.
- [2]李佳,张思奇,倪文,等.垃圾焚烧飞灰的固化及综合利用研究进展[J].金属矿山,2019,48(12):182-187.
- [3]温亚菲,马晓东.水洗焚烧飞灰作混合材所制备的水泥性能及重金属固化能力[J].当代化工研究,2023,(9):19-22.
- [4]牛文峰.垃圾焚烧飞灰资源化研究[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(1)[2024-01-01].
- [5]叶艳.生活垃圾焚烧飞灰的危害及资源化利用方法研究[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2023(9)[2023-9-1].

## 作者简介:

姚舒婷(2004--),女,汉族,山西运城人,山西大学环境与资源学院本科在读,主要研究方向为固体废物资源化利用。