



生活垃圾焚烧飞灰的特性及建材化利用路径研究

张秀锦¹, 张艺涛¹, 庞俊峰^{2,3}, 龙宏菲¹, 郭剑波¹, 刘俐媛¹, 陈扬^{1,✉}

1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 2. 东南大学能源与环境学院, 南京 2100182; 3. 光大环保(苏州)固废处置有限公司, 苏州 215101

摘要 生活垃圾焚烧飞灰(简称飞灰)中因含有二噁英,以及 Pb、Cd、Hg 等重金属等物质,属于危险废物。进入“十四五”以后,随着“无废城市”“循环经济”等理念的深化,推进飞灰无害化和资源化管理和处置是飞灰处理处置行业发展的必然趋势。本研究剖析了飞灰的来源和特性,梳理了我国针对飞灰建材化利用相关标准规范,分析了 4 种典型飞灰建材化利用技术路径,包括:水洗-水泥窑协同处置生产水泥熟料、高温烧结生产陶粒、高温熔融生产玻璃体、低温热分解-水洗生产加气砖等,对 4 种建材化利用的技术原理、工艺路线以及应用情况等进行分析和评估,并针对飞灰建材化利用需要解决的关键问题及未来发展趋势进行了探讨。

关键词 生活垃圾焚烧飞灰; 建材化; 处理处置; 利用路径

飞灰是指生活垃圾焚烧设施的烟气净化系统捕集物和烟道及烟囱底部沉降的底灰^[1]。2022 年,我国已建成 930 家生活垃圾焚烧厂^[2],全国生活垃圾焚烧发电企业实际处理生活垃圾 2.81×10^8 t,人均生活垃圾焚烧处理量约为 $199 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,其中,飞灰产生量约为垃圾焚烧量的 2%~5% (炉排炉)或 8%~13% (循环流化床)^[3],即全国飞灰产生量约在 664×10^4 t~ 1.543×10^4 t 之间。飞灰中含有二噁英,以及 Pb、Cd、Hg 等重金属,《国家危险废物名录》将其归为废物类别 HW18 焚烧处置残渣^[4-5]。随着生活垃圾焚烧发电的推广,飞灰数量还将逐年上升,如果管理和处置不当,将会对环境及人体健康产生重大危害。例如,飞灰中以汞为代表的重金属及其化合物,因其具有挥发性,环境风险巨大;Pb、Cu 容易释放到环境中,将导致土壤及地下水污染^[6]。

我国飞灰的主要处理处置方式有固化稳定化后填埋和无害化处理后资源化利用两种^[7]。固化稳定化技术主要有水泥固化法和化学药剂法两类^[8]。根据《生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范(试行)》(HJ 1134—2020),飞灰可以进入填埋场填埋处置,但新标准刚性填埋场处理成本过高,柔性危险废物填埋场选址困难,地级以上城市以及具备焚烧处理能力的县(市、区)不再新建原生生活垃圾填埋场^[9]。此外,推进“无废城市”建设,坚持“减量化、资源化、无害化”原则,要求最大限度减少填埋量,因此飞灰填埋处置非长久之计,难以持续。因此,飞灰的资源化和高值化利用,是解决我国资源困境和环境污染压力的必由之路,也是结构性减碳的重要途径。近年来,国家相关部委和部分地方政府不断出台政策文件或制订地方立法,鼓励飞灰资源化利用。

根据化学成分特点,飞灰具有良好的资源利用价值,但利用飞灰制备的土壤改良剂或吸附剂存在重金属浸出等环境风险,相比之下,在处置量、环境效应和经济效益等方面,飞灰建材化利用更具前景^[10],即利用飞灰直接代替传统建筑材料生产原料,或将其转化为建筑材料生产原料来生产建材,包括生产水泥、混凝土、陶粒、岩棉等^[11]。随着土地资源的日益紧张,实现飞灰的无害化处理及资源化利用,是我国稳步推进“无废城市”建设、实现我国实现绿色循环经济战略的关键工作。经调研,结合我国应用实际,本研究在对飞灰来源及特性进行分析的基础上,针对飞灰建材化利用技术路径及未来发展趋势进行了探讨。

收稿日期: 2024-04-08 录用日期: 2024-06-12

基金项目: 中国科学院大学资助项目(E1E40504X2)

第一作者: 张秀锦(1995—),男,硕士研究生, zhangxiujin21@mailsucas.ac.cn ✉通信作者: 陈扬(1971—),男,博士,教授, chenyang@ucas.ac.cn

1 飞灰的来源和特性

随着经济发展和人口增加，我国生活垃圾产生量逐年增加。目前，焚烧已成为我国生活垃圾的主流处理方式。2020 年，国家发展改革委等部委印发《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》，到 2023 年基本实现原生生活垃圾“零填埋”，满足条件的地区加快发展以焚烧为主的垃圾处理方式。根据 2012~2022 年国家统计年鉴的数据，我国 2011~2022 年生活垃圾焚烧量和焚烧率的变化如图 1 所示。

飞灰外观上呈现为灰白色或深灰色的粉末，具有粒径不均、含水率低、孔隙率高及比表面积大等特点，其 85% 以上的颗粒粒径集中在 20~125 μm ^[5,12-14]。我国部分地区飞灰的化学成分如表 1 所示。

由表 1 可知，飞灰的成分包括 CaO、SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃ 等化合物，占 50%~60%；NaCl、KCl 等盐类，占 20%~30%。因此，飞灰的主要成分是 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 等，和陶瓷、水泥等建材产品的成分相似，具有建材化利用潜力。飞灰的建材化利用，不仅能有利于飞灰的安全处理处置，还能减少建筑材料天然原料的消耗。

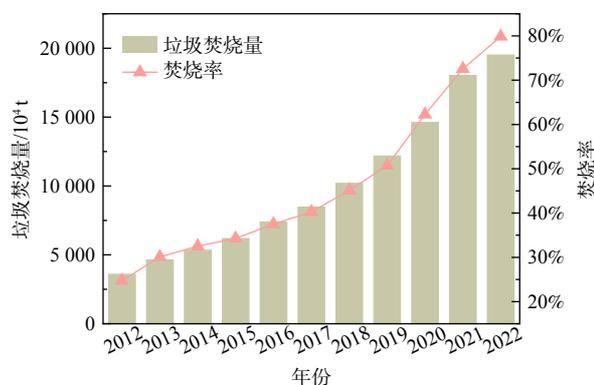


图 1 我国 2012~2022 年生活垃圾焚烧量和焚烧率的变化

Fig. 1 Changes in China's municipal solid waste incineration volume and incineration rate, 2012~2022

表 1 我国部分地区飞灰的化学成分^[15-20]

Table 1 Chemical composition of MSWI fly ash in some areas of China %

| 飞灰来源 | 炉型 | CaO | Cl | Na ₂ O | SO ₃ | K ₂ O | SiO ₂ | MgO | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ |
|------|-----|------|------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|
| 辽宁省 | GT | 45.3 | 21.5 | 9.9 | — | 8.2 | 2.1 | 1.2 | 0.8 | 0.4 |
| 江苏省 | GT | 54.6 | 18.6 | 8.5 | 5.7 | 5.1 | 2.5 | 0.8 | 0.8 | 0.5 |
| 广东省 | GT | 44.4 | 23.7 | 10.0 | 6.6 | 5.1 | 4.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |
| 湖南省 | GT | 38.1 | 18.0 | 1.32 | — | 8.6 | 5.8 | — | 1.0 | 2.8 |
| 安徽省 | GT | 44.6 | 29.1 | 6.6 | 7.7 | 6.1 | 2.2 | 0.8 | 0.6 | 0.5 |
| 北京市 | GT | 48.8 | 21.0 | 8.0 | 6.3 | 5.6 | 3.8 | 1.9 | 1.2 | 1.1 |
| 天津市 | GT | 38.4 | 20.2 | 7.9 | 7.3 | 8.1 | 4.9 | 2.6 | 2.5 | 1.4 |
| 上海市 | GT | 38.2 | — | — | 4.9 | 0.1 | 17.6 | 1.8 | 0.4 | 1.1 |
| 大连市 | GT | 42.5 | 31.8 | 7.2 | 3.2 | 5.6 | 4.5 | 1.7 | 1.1 | 2.2 |
| 杭州市 | GT | 34.4 | 24.3 | 11.4 | 5.3 | 7.7 | 3.4 | 2.3 | 1.8 | 2.6 |
| 威海市 | GT | 61.5 | 17.7 | 1.2 | 5.9 | 5.1 | 2.7 | 1.1 | 1.9 | 0.5 |
| 安徽省 | CFB | 39.1 | 11.6 | 5.8 | 4.3 | 3.8 | 12.6 | 2.8 | 4.2 | 7.2 |
| 太原市 | CFB | 26.2 | 4.9 | 5.2 | 5.1 | 3.5 | 18.1 | 4.1 | 4.1 | 11.9 |
| 忻州市 | CFB | 35.3 | 1.1 | 0.2 | 3.8 | 0.4 | 17.7 | 2.8 | 2.4 | 17.4 |
| 东莞市 | CFB | 16.6 | 10.3 | 4.0 | 8.3 | 4.2 | 27.5 | 3.1 | 5.0 | 11.0 |
| 天津市 | CFB | 30.9 | 7.9 | 2.5 | 0.8 | 1.5 | 30.7 | 4.7 | 3.1 | 17.9 |

2 飞灰建材化利用标准规范

近年来，国家和地方政府制定了一系列政策标准规范，鼓励指导飞灰建材化的技术研究和工程示范。国家及地方飞灰建材化利用相关标准如表 2 所示。

表 2 国家及地方飞灰建材化利用相关标准

Table 2 National and local standards for the utilization of fly ash in building materials

| 标准类型 | 标准号 | 名称 | 技术类型 |
|------|------------------|----------------------------|---------|
| 国家标准 | GB 30485—2013 | 水泥窑协同处置固体废物污染控制标准 | 水泥窑协同处置 |
| | GB/T 30760—2014 | 水泥窑协同处置固体废物技术规范 | 水泥窑协同处置 |
| | GB 18485—2014 | 生活垃圾焚烧污染控制标准 | 水泥窑协同处置 |
| | GB/T 41015—2021 | 固体废物玻璃化处理产物技术要求 | 高温熔融 |
| 行业标准 | HJ 662—2013 | 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范 | 水泥窑协同处置 |
| | HJ 1091—2020 | 固体废物再生利用污染防治技术导则 | — |
| | HJ 1134—2020 | 生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范（试行） | 总体 |
| | JC/T 2591—2021 | 水泥窑协同处置飞灰成套装备技术要求 | 水泥窑协同处置 |
| 团体标准 | T/CCAS 010—2019 | 水泥窑协同处置飞灰预处理产品水洗氯化物 | 水洗产物 |
| | T/ZGZS 0301—2020 | 表面处理污泥、生活垃圾焚烧飞灰烧结制备衍生轻集料 | 高温烧结 |
| | T/CIET—058—2023 | 生活垃圾焚烧飞灰预处理技术规范 | — |
| | T/CIET—059—2023 | 生活垃圾焚烧飞灰预处理产物 浸提氯化物 | — |
| | T/CIET—060—2023 | 生活垃圾焚烧飞灰预处理产物 替代掺合料 | — |
| 地方标准 | DB12/T 779—2018 | 高温烧结处置生活垃圾焚烧飞灰制陶粒技术规范（天津市） | 高温烧结 |
| | DB32/T 3558—2019 | 生活垃圾焚烧飞灰熔融处理技术规范（江苏省） | 高温熔融 |

飞灰建材化利用相关技术目录如表 3 所示。

表 3 飞灰建材化利用相关技术目录

Table 3 Catalogue of technologies related to the utilization of fly ash for building materials

| 时间 | 部门 | 文件 | 相关内容 |
|---------|---------|------------------------------------|---------------------------------|
| 2017.12 | 环境保护部 | 国家先进污染防治技术目录（固体废物处理处置领域） | 将“水泥窑协同处置生活垃圾焚烧飞灰技术”纳入技术目录 |
| 2021.01 | 生态环境部 | 国家先进污染防治技术目录（固体废物和土壤污染防治领域）（2020年） | 将“生活垃圾焚烧飞灰高温等离子体熔融技术”列入技术目录 |
| 2023.05 | 工业和信息化部 | 国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录（2023年版） | 将“水泥窑协同处置飞灰技术和成套装备”编入工业固废综合利用方向 |
| 2023.09 | 科学技术部 | 国家绿色低碳先进技术成果目录（固体废物处理处置及资源化领域） | 将“生活垃圾焚烧飞灰高温烧结生产建材基材技术”纳入技术成果目录 |

由表 2、表 3 可以看出，目前在飞灰建材化利用领域，只有水泥窑协同处置飞灰技术应用较多，技术相对成熟并且具有相对完善的标准规范，其他技术得到的建材在产品属性、应用场景等方面暂时缺乏相关标准支撑，一定程度上限制了其推广和应用和创新动力。未来需要不断推进构建技术标准和管理体系，为不同技术产业化的规范发展和市场拓展提供支撑。

3 飞灰建材化利用技术路径

3.1 水洗-水泥窑协同处置生产水泥

飞灰中含有 40% 以上的 CaO 以及 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 等物质，接近普通硅酸盐水泥。水泥生产的原料是石灰石、黏土混合物与其他材料，因此飞灰可以替代石灰石生产水泥^[21]。

我国飞灰具有氯元素高的特点^[10]，根据《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》（HJ 662—2013），入窑物料中氯元素含量不应大于 0.04%，汞的最大允许投加量不应大于 0.23 mg·kg⁻¹·cli⁻¹。飞

灰中氯含量最高达 20% 以上, 若不加处理直接处置, 飞灰处置量非常小, 必须先进行脱氯处理^[22]。通过水洗预处理, 能够有效降低飞灰中的氯盐含量。裴程林等^[23] 研究发现液固比和过程制浆对飞灰循环水洗效果的影响最大, 当液固比为 3:1, 水洗时间为 20 min, 对飞灰进行 4 次淋洗和 1 次制浆时, 水洗效果最好, 飞灰中氯含量降至 0.59%。魏云梅等^[24] 研究发现水洗时通入 CO₂ 可有效降低反应体系的 pH, 促进难溶性氯的转化, 提高飞灰的脱氯率。位百勇等^[25] 模拟国内首条生活垃圾焚烧飞灰工业化处置示范线水洗实验, 发现北京不同地区飞灰氯含量不同, 水洗过程需根据情况调节水灰比, 才能保证水洗灰中的氯 ≤ 0.5%。水洗处理具有简单、经济、效率高等优点, 但飞灰水洗液的处理成本较高, 如处理不当容易引发二次污染, 而且工业盐来源广泛, 成本低廉, 使得飞灰水洗液得到的产品盐缺乏有效的消纳途径。

水泥窑具有温度高、停留时间长、热容量大、碱性环境、无废渣排放等特点, 是固废处置的理想方式, 高温下可彻底分解飞灰中二噁英, 同时能将飞灰中大部分有害重金属固化, 但对于 Hg、Ba 和 Pb 等挥发性较高的重金属固化效果较差^[26]。赵向东等^[27] 对飞灰水泥窑协同处置生产线进行工业化试验研究, 结果表明, 超过 99% 的重金属可被有效固化为水泥熟料的矿物晶格之中。张国亮等^[28] 所在公司的水泥窑生产线协同处置飞灰量为 5~6 t·h⁻¹, 约占生料的 3%~4%, 所产水泥熟料可浸出重金属含量符合《水泥窑协同处置固体废物技术规范》(GB 30760—2014) 中限值, 水泥产品符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007) 有关要求。

水洗-水泥窑协同处置飞灰工艺路径如图 2 所示。飞灰采用三级或多级水洗脱盐后, 灰浆通过离心或压滤进行固液分离, 固体进入烘干机, 烘干后与石灰石、黏土等一起进行研磨、均质, 进入回转窑窑尾, 烧制水泥产品。

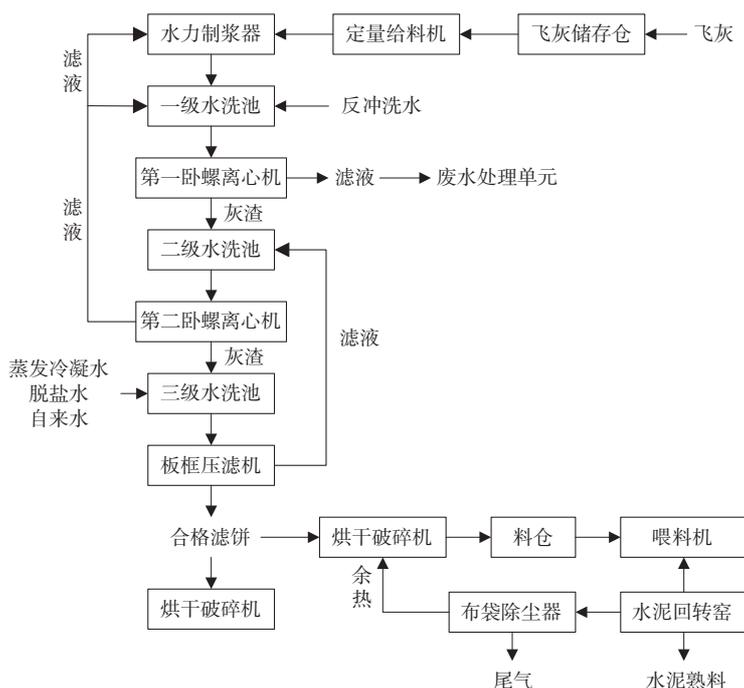


图 2 典型水洗-水泥窑协同处置飞灰工艺流程图^[22]

Fig. 2 Typical washing-cement kiln co-disposal fly ash process flow diagram

目前国内水洗-水泥窑协同处置飞灰技术已相对成熟, 已经实现工业化, 但此技术路径依赖现有的水泥窑生产线, 不适用于没有水泥窑的地区; 另外, 采取该工艺也会受到水泥市场可消纳量的影响。

3.2 高温烧制生产陶粒

陶粒作为一种人造轻质骨料, 以其轻质、高强的优点, 在建筑材料领域是天然材料的优质替代品^[29]。根据《中华人民共和国水法》《中华人民共和国河道管理条例》等相关政策, 国家实行河道采砂许可制度, 限制在日常建筑过程中河砂的开采, 而陶粒可用于代替天然河砂配制轻集料混凝土、轻质砂浆, 因此飞灰烧制陶粒拥有巨大的市场前景。

飞灰中含有 SiO_2 和 Al_2O_3 , 可以与污泥、建筑渣土等固废协同处置生产陶粒。高温烧结是利用低于飞灰熔点的温度 (约 $900\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$) 加热飞灰, 在高温烧结下固体颗粒间发生熔化与黏结作用, 形成致密化且具有一定强度的稳定烧结体, 难挥发重金属被固化在烧结体的致密矿物晶格中。魏国侠等^[30] 利用疏浚污染底泥和飞灰混合烧制陶粒, 结果表明, 底泥和飞灰比 4:1, 焙烧温度为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时, 烧制出陶粒的筒压强度为 4.56 MPa , 吸水率为 15.3% , 堆积密度为 $735\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。胡超超等^[31] 利用飞灰和电解锰渣, 辅以粉煤灰烧制陶粒, 结果表明, 最佳原料配比为 12% 飞灰、43% 电解锰、45% 粉煤灰, 预热温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧温度为 $1140\text{ }^\circ\text{C}$, 烧制出陶粒的颗粒强度为 769 N , 堆积密度为 $687\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 h 吸水率为 6.44% 。朱熠鑫等^[32] 将脱氯飞灰与建筑弃土配伍后高温烧结陶粒, 结果表明, 飞灰配比与烧结温度共同影响陶粒的孔隙和晶体结构, 当飞灰掺量为 20%, 烧结温度为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 陶粒的性能最佳, 其抗压强度为 7.94 MPa , 密度为 $1245.50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 1 h 吸水率为 7.92% 。

飞灰制陶粒技术工艺路径如图 3 所示。飞灰加热至 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 与其他生料在回转窑中混合煅烧, 物料完成加热、干燥挥发及分解等过程, 物料水分蒸发、有机成分分解成无机化合物, 挥发至气相中; 固体废物经过分解, 产生 CO_2 、 H_2O 和少量的微细碳颗粒, 其中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等成分则在高温状态下部分熔融并相互反应合成硅酸盐、铝酸盐等物质。飞灰中的二噁英经过高温焚烧及急冷降温完成消解。

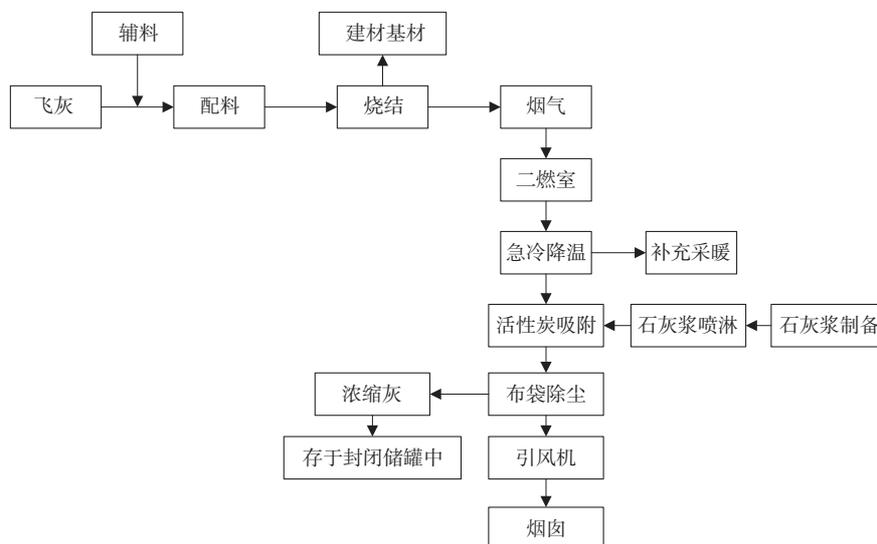


图 3 典型飞灰制陶粒技术工艺流程^[33]

Fig. 3 Typical fly ash to ceramic granule technology process flow

此类技术的优点是可以生产工程建筑所需要的建筑材料, 可以代替砂石料等; 另外, 该技术也可以协同处置其他固体废物, 飞灰可以按照一定比例进行配比添加, 需要进行良好的控制, 以保证产品质量, 并消除陶粒生产过程中的环境污染。

3.3 高温熔融生产玻璃体

高温熔融技术具有减量化效果好、二次排放低、热效率高、熔渣质量高等优势, 是飞灰处理中最有发展前景的技术之一^[34-36]。

飞灰中的 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 是生产微晶玻璃的良好原料^[37]。高温熔融是利用 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温, 彻底分解飞灰中的二噁英, 之后迅速降温冷却, 形成熔融玻璃体, 借助玻璃体致密的 Si-O 四面体结构, 实现重金属的稳定化。形成的玻璃体具有良好的机械性能和热力特性, 可用于生产微晶玻璃等附加值较高的建材^[37]。但高温熔融设备投资成本和能耗高, 对工艺条件和烟气净化系统要求严格, 制约其规模化推广。樊国祥^[38] 研究了矿物添加剂对飞灰熔融过程中重金属特性的影响, 结果表明, 矿物添加剂对飞灰熔融促进效果明显, 锂辉石、萤石、重晶石、四硼酸锂对飞灰熔点的降低幅度分别约为 60 、 130 、 90 和 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 。李保庆等^[39] 以飞灰和废玻璃为主要原料通过熔融法协同制备微晶玻璃, 发现随着 MgO 含量的增加, 微晶玻璃的玻

璃转变温度和析晶峰温度都逐渐降低,当 MgO 的含量为 8.0% 时,微晶玻璃的性能较好,除吸水率外,各项性能均优于天然大理石、花岗岩和商业微晶玻璃。胡明等^[40]的实验结果表明,添加石英砂可以显著降低飞灰的熔融温度,石英砂配加比例分别为 20%、30% 和 40% 时,飞灰熔融温度分别约为 1 500、1 400、1 300 ℃。李志川等^[41]以飞灰为主原料,配伍粉煤灰和废玻璃,制备了全废物基 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 微晶玻璃,其重金属浸出浓度低于规定的浸出限值。

飞灰高温熔融玻璃化工艺流程如图 4 所示。飞灰和添加剂按比例配伍混合,经造粒机造粒后输送至等离子体熔融炉和电弧系统,经加热 1 300 ℃~1 500 ℃,飞灰中的二噁英被彻底摧毁分解,飞灰充分熔融反应后,气相经高温氧化室氧化后进入烟气净化系统,液相熔体通过溢流口连续排入冷渣池,经水骤冷后形成玻璃体。含 HCl、SO₂ 等的高浓度酸性气体和含重金属的氯盐颗粒物的熔融尾气采用急冷、吸附等工艺处理。

高温熔融技术的优点是重金属稳定化效果好,可以做程序的消毒环境污染,但缺点是设备投资成本和能耗高,尤其是等离子体弧为代表的熔融技术还要考虑等离子体火炬的寿命、耐火材料性能等,另外,该技术对工艺条件和烟气净化系统要求较高,尤其是形成玻璃化后的产物的最终去向需要综合考量。

3.4 低温热解-水洗生产建材原料

低温热解-水洗技术与高温烧结/熔融技术相比,资源消耗更低,不依赖其他产业即可完成处置,是飞灰建材化的最新处置工艺。

低温热解是指在缺氧或无氧气氛下,通过低于 500 ℃ 的低温热分解反应,将有机污染物从飞灰基质挥发分解,对二噁英脱除效率可达 99%。陈彤^[4]研究发现,在惰性气氛下低温热处理飞灰过程中,二噁英的降解主要有脱氯和分解两个过程,前者是高氯代二噁英分子的 C-Cl 键断裂变成低氯代二噁英,后者是二噁英分子的 C-O 键断裂分解成单苯环的氯苯或氯酚;在温度低于 300 ℃ 时,以脱氯过程为主,高于 300 ℃ 时,两种降解途径同时存在;低温热处理 60 min 可以达到降解飞灰中二噁英的目的,而且随着时间的增加,降解率呈增加趋势。王肇嘉等^[43]分析不同飞灰二噁英解毒技术,指出具有较大工业化应用前景的是水泥窑协同处置和低温热解技术,低温热解技术具有二噁英脱除效果高,能耗及投资成本相对较低等优点,局限性是存在二噁英从固相转移至气相,还需集成其他气相二噁英降解技术。李唯实等^[44]以八氯代二苯并对二噁英作为目标污染物探究低温热处理法降解飞灰中二噁英的机理,研究显示,低温热处理降解飞灰中二噁英的关键基团为-OH。

飞灰低温热解-水洗工艺流程如图 5 所示。飞灰经输送系统送至低温热分解系统内,在 300~400 ℃ 绝氧环境下进行二噁英解毒处理,解毒后的飞灰送入飞灰水洗单元进行水洗脱氯,水洗后的灰渣经闪蒸干燥后可

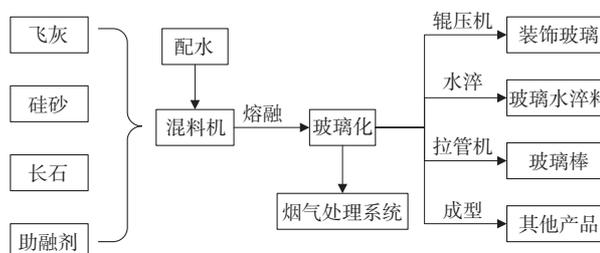


图 4 典型飞灰高温熔融玻璃化工艺流程^[42]

Fig. 4 Typical fly ash high temperature melt vitrification process flow

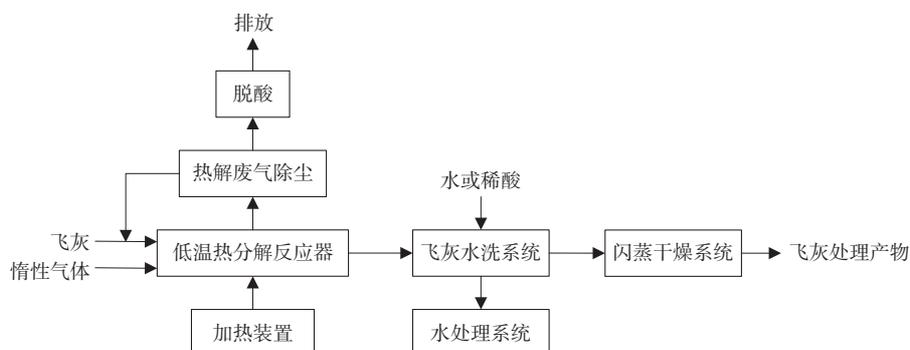


图 5 典型飞灰低温热解-水洗工艺流程

Fig. 5 Typical fly ash low temperature pyrolysis-washing process flow

用作建材原料。可以用于骨料、加气砖等用途,但是也需要经过实践的检验。

低温热解技术的优点是不依赖其他产业即可完成处置,重点去除飞灰中的二噁英等敏感成分,总体设备投资和运营费用较低,市场前景较为广阔,缺点是水洗液的处理产物的最终去向、用途需要综合考量。

3.5 建材化利用技术比较

基于前期调研,对我国飞灰建材化利用技术进行了归纳和整理,以明确具体路径、产品、技术优缺点、投资运行成本及工业化应用情况,如表4所示。

表4 飞灰建材化技术比较分析
Table 4 Comparison of various MSWI fly ash building materialization technologies

| 对比项目 | 水洗-水泥窑协同处置 | 高温烧结 | 高温熔融 | 低温热解-水洗 |
|-------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 具体路径 | 水洗预处理后投入水泥窑生产水泥 | 飞灰与辅料配伍烧结生产陶粒 | 飞灰和辅料配伍熔融生产岩棉、微晶玻璃等 | 惰性气氛下低温热解二噁英,水洗脱氯后用作骨料、加气砖等建材原料 |
| 反应温度 | 1450℃ | 900℃~1100℃ | 1300℃~1400℃ | 300℃~500℃ |
| 产品 | 水泥熟料 | 陶粒 | 微晶玻璃、岩棉 | 免烧砖、加气砖 |
| 减量化 | — | 减容率低于熔融 | 减容率最高 | 低 |
| 无害化 | 1) 重金属固化 2) 二噁英高温分解 | 1) 重金属固化 2) 二噁英高温分解 | 1) 重金属固化 2) 二噁英高温分解 | 二噁英脱附分解 |
| 技术优点 | 1) 不占用土地 2) 飞灰无害化程度高 3) 处置成本低 | 1) 可协同处置其他废物 2) 产品需求较大 | 1) 减量化高 2) 重金属稳定性高 3) 产品附加值高 | 1) 能耗低 2) 成本低 3) 二噁英脱除彻底 |
| 技术缺点 | 1) 协同处置产能受限 2) 依赖水泥窑生产线 | 1) 重金属固化不如熔融 2) 投资成本高 | 1) 投资成本高 2) 能耗高 | 1) 电厂预留空间局限性 2) 烟气处理 |
| 设备投资 | 高 | 高 | 最高 | 低 |
| 运行成本 | 低 | 较高 | 高 | 较低 |
| 工业化应用 | 工业化 | 示范阶段 | 示范阶段 | 示范阶段 |

由表4可以看出,目前,我国水洗-水泥窑协同处置飞灰相对成熟,已进入工业化应用阶段,但其本身具有水泥熟料生产线的地区依赖性,而且受房地产投资下行等客观因素影响,水泥需求下滑。高温烧结/熔融处置成本较高,实现工业化应用还需要克服技术和成本难题。低温热解二噁英技术原理简单,可以作为推进建材化应用前的预处理工艺选择。

4 结论

本研究根据飞灰的来源特性、建材化相关标准规范及已有的研究进展,梳理评估了飞灰建材化利用路径及相应产物。

1) 水洗-水泥窑协同处置生产水泥熟料相对成熟,标准体系相对完善,是目前拥有水泥生产线地区的首选飞灰处置技术。但要对飞灰中关键元素,如氯、汞等有进料率要求;另外,受水泥生产线的地域分布、市场需求量等因素的影响,在进行技术选择时应进行综合考量。

2) 高温烧结生产陶粒可以协同处置污泥等其他固体废物,陶粒有望代替河砂使用,尤其是国家针对天然砂石料开采进行限制的特定背景下,该种方式具有良好的应用前景,但该方法飞灰添加量少,二次飞灰较多,所产陶粒要保证产品质量,也会受到市场销路的影响。

3) 高温熔融飞灰生产玻璃体效果好,产品附加值高,玻璃体可作为筑路沙石骨料使用或者制成岩棉、泡沫玻璃,但项目投资和运行成本较高,其玻璃化产品缺乏明确的市场准入标准,影响产品的生产、使用和推广。

4) 低温热解-水洗飞灰生产建材原料,能耗和成本相对低,可在电厂内进行处理,处置后飞灰可用作骨料、加气砖等建材原料。

综上所述,未来还需要国家、行业及企事业单位一起努力,通过经费投入、技术研发、政策标准制定、全过程监管等的手段,共同推进飞灰建材化利用产业的良性发展,因地制宜,多措并举,符合国家危险废物利用处置相关发展规划、产业政策的要求,符合减量化、再利用、资源化的循环经济理念,在经济成本和环境保护中寻找最佳平衡点。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范(试行)HJ 1134-2020[Z]. 2020.
- [2] 生态环境部环境工程评估中心. 2022 年生活垃圾焚烧发电行业绿色发展水平评估报告[Z]. 2023.
- [3] 刘辉,孟菁华,史学峰. 生活垃圾焚烧飞灰重金属稳定化技术综述[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(5): 3.
- [4] 陈彤. 城市生活垃圾焚烧过程中二噁英的形成机理及控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 王军,蒋建国,隋继超,等. 垃圾焚烧飞灰基本性质的研究[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2283-2287.
- [6] 裴廷权,王里奥,丁世敏,等. 垃圾焚烧飞灰中重金属的浸滤特性及影响因素[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(4): 23-26.
- [7] 倪海凤,且增,周鹏,等. 国内城市生活垃圾焚烧飞灰研究现状及进展[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(3): 24-30.
- [8] 张春飞,丁朝阳. 生活垃圾焚烧飞灰处置技术研究进展[J]. 环境科技, 2023, 36(2): 53-59.
- [9] 生态环境部,发展和改革委员会. 危险废物重大工程建设总体实施方案(2023-2025 年)[EB/OL]. [2024-04-10]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202305/W020230509677912275839.pdf>, 2023.
- [10] 朱延臣,顾军. 生活垃圾焚烧飞灰主要处置技术及其发展趋势[J]. 中国环保产业, 2021(6): 59-62.
- [11] 马斌斌,杨晓,王宇峰. 城市生活垃圾焚烧飞灰资源化处置技术及产品概述[J]. 环境化学, 2023, 42(8): 2669-2687.
- [12] 胡艳军,孙铁. 不同粒径垃圾焚烧飞灰中重金属富集特性表征[J]. 环境化学, 2012, 31(11): 1717-1723.
- [13] WANG L, JIN Y Y, NIE Y F. Investigation of accelerated and natural carbonation of MSWI fly ash with a high content of Ca[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 174(1-3): 334-343.
- [14] 张春飞,朱宝飞,胡彦毅,等. 两种生活垃圾焚烧炉飞灰的理化特性分析[J]. 环境科技, 2022, 35(5): 8-13.
- [15] 綦懿,李天如,王宝民,等. 生活垃圾焚烧飞灰固化稳定化安全处置及建材资源化利用进展[J]. 建材技术与应用, 2021(1): 16-22.
- [16] 赵峰娃,马晓东,达永琪,等. 不同生活垃圾焚烧炉飞灰特性及重金属浸出毒性[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S02): 524-529.
- [17] 郑仁栋,袁璐璐,唐素琴,等. 杭州市生活垃圾焚烧飞灰特性分析[J]. 环境卫生工程, 2016, 24(4): 44-45.
- [18] 吕紫娟,王伟,孙英杰,等. 山东胶东地区城市生活垃圾焚烧飞灰重金属污染特性研究[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(1): 9-17.
- [19] 孙进,谭欣,张曙光,等. 我国 14 座生活垃圾焚烧厂飞灰的物化特性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 124-128.
- [20] 陈宋璇,王云,王昊. 垃圾焚烧飞灰无害化处置产业现状及技术进展[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 71-80.
- [21] 蒋旭光,常威. 生活垃圾焚烧飞灰的处置及应用概况[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(1): 11.
- [22] 黄庆,王伟,马东光,等. 浅谈水泥窑协同处置生活垃圾焚烧飞灰技术[J]. 科技与创新, 2023(6): 140-142.
- [23] 裴程林,魏加学,陈群,等. 飞灰循环梯度水洗脱氯的研究及应用[J]. 广东化工, 2023, 50(12): 152-155.
- [24] 魏云梅,姚瑞轩,陈爽,等. 生活垃圾焚烧飞灰加速碳酸化深度除氯与水洗除氯对比研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4184-4192.
- [25] 位百勇,张国亮,黄岚,等. 北京地区生活垃圾焚烧飞灰理化和水洗特性分析[J]. 环境工程, 2019, 37(4): 163-166.
- [26] 黄健. 水泥窑炉协同处置垃圾焚烧飞灰过程中重金属挥发特性研究[J]. 水泥, 2017(6): 12-15.
- [27] 赵向东,练礼财,张国亮,等. 国内首条水泥窑协同处置飞灰示范线技术研究[J]. 中国水泥, 2015(12): 69-72.
- [28] 张国亮,李忠峰,黄岚,等. 水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰技术工程应用[J]. 水泥, 2017(S1): 8-12.
- [29] 赵飞燕,张小东,杜艳霞,等. 粉煤灰陶粒的制备技术及研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56(4): 16-23.
- [30] 魏国侠,王承智,孙磊,等. 污染底泥与焚烧飞灰混烧陶粒实验研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(2): 134-138.
- [31] 胡超超,王里奥,詹欣源,等. 城市生活垃圾焚烧飞灰与电解锰渣烧制陶粒[J]. 环境工程学报, 2019, 13(1): 177-185.
- [32] 朱熠鑫,叶珍,任凌伟,等. 城市生活垃圾焚烧飞灰协同建筑弃土烧制陶粒试验[J]. 环境工程, 2023, 41(12): 206-212+130.
- [33] 中华人民共和国科学技术部. 《国家绿色低碳先进技术成果目录》技术清单说明[Z]. 2023.
- [34] CHENG T W. Effect of additional materials on the properties of glass-ceramic produced from incinerator fly ashes[J]. Chemosphere Oxford, 2004, 56(2): 127-131.
- [35] 汪琴琴. 高温熔融过程中生活垃圾焚烧飞灰对耐火材料的侵蚀机制及配方优化[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- [36] MA W C, SHI W B, SHI Y J, et al. Plasma vitrification and heavy metals solidification of MSW and sewage sludge incineration fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 408: 124809.
- [37] 方正,王俊杰,赵震乾,等. 城市生活垃圾焚烧飞灰熔融制备微晶玻璃技术现状分析及其研究进展[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(4): 506-509.
- [38] 樊国祥. 矿物添加剂对垃圾焚烧飞灰熔融过程中重金属特性的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [39] 李保庆,郭艳平,党海峰. MgO 对飞灰屏玻璃协同制备微晶玻璃析晶及性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 135-139+134.
- [40] 胡明,杨仕桥,邵哲如,等. 生活垃圾焚烧飞灰等离子体熔融玻璃化技术研究[C]//2019 中国环境科学学会科学技术年会, 中国环境科学学会, 中国陕西西安, 2019: 10.
- [41] 李志川,杨一博,马蒸钊,等. 利用生活垃圾焚烧飞灰制备全废物基微晶玻璃[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 1925-1932.
- [42] 李胜春,朱春江. 生活垃圾焚烧飞灰电熔法玻璃化工艺技术研究[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2023, 51(2): 7-12+16.
- [43] 王肇嘉,秦玉,顾军,等. 生活垃圾焚烧飞灰二噁英控制技术研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 116-123.
- [44] 李唯实,李丽,文卓钰,等. 低温热处理生活垃圾焚烧飞灰中二噁英的降解机理[J]. 环境科学研究, 2023, 36(6): 1227-1235.

(责任编辑:陶雪)

Exploring municipal solid waste incineration fly ash: characteristics and building material application pathway

ZHANG Xiujin¹, ZHANG Yitao¹, Pang Junfeng^{2,3}, LONG Hongfei¹, GUO Jianbo¹, LIU Liyuan¹, CHEN Yang^{1*}

1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210018, China; 3. Everbright Environmental (Suzhou) Solid Waste Treatment Limited, Suzhou 215101, China

*Corresponding author, E-mail: chenyang@ucas.ac.cn

Abstract Municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash is classified as hazardous waste because it contains dioxins, lead, cadmium, mercury and other harmful substances. Promoting the safe and resource-based management of the fly ash treatment and disposal industry has become an inevitable trend of development since the "14th Five-Year Plan" was implemented, with the concepts of "zero waste city" and "circular economy" becoming more profound. This article analyzes the source and characteristics of fly ash, sorts out the pertinent standards and specifications for the use of fly ash as building material in China, and analyzes four typical paths for utilizing fly ash as building materials, including: Washing and co-disposal of cement kilns to produce cement clinker, high-temperature sintering of ceramic granules, high-temperature fusion to produce vitreous, and low-temperature pyrolysis-washing and production of gas bricks. Furthermore, this article also analyses and evaluates the four building material uses in terms of the technical principles, process routes and applications, and provides an analysis and assessment of the situation. The technical principles, process routes and applications of the four types of building materials utilization were analyzed and evaluated. Additionally, the main problems to be addressed and the future development trend of fly ash building materials utilization were discussed.

Keywords municipal solid waste incineration fly ash; building materialization; treatment and disposal; utilization pathways