

垃圾焚烧飞灰无害化处理技术应用研究进展

潘冬冬

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 为减少飞灰对环境和人体健康的潜在威胁,需进行垃圾焚烧飞灰无害化处理。本文综述了固化/稳定化处理、热处理技术、水泥窑协同处置技术、安全填埋技术的原理、优缺点,介绍了各项技术的技术经济性、技术要点和发展趋势,提出垃圾飞灰综合利用策略,并从政策支持和技术创新等方面提出飞灰无害化处理技术进步的措施。低温热解+水洗+建材化应用、水泥窑协同处置等处理技术,能耗和成本低,但在技术成熟度、市场应用等方面还有待进一步探索。

[关键词] 垃圾焚烧飞灰; 无害化处理; 固化/稳定化; 热处理; 水泥窑协同; 填埋; 技术经济性

[中图分类号] X799.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0089-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2024.06.014

0 前言

垃圾焚烧飞灰作为一种典型的危险废物,其中的重金属和有机污染物对环境和人类健康构成了严重威胁。随着城市化进程的加快,土地资源紧缺,垃圾焚烧量的增加使得飞灰处理问题日益凸显,围绕飞灰的资源化利用进行布局,对于缓解这一问题至关重要^[1]。本文深入分析了固化/稳定化处理、热处理技术、水泥窑协同处置、安全填埋在飞灰无害化处理中的应用,并对其技术经济性和环境影响进行了综合评估。各技术在处理效率和成本上存在差异,选择适宜的处理技术对于实现飞灰的资源化利用和最小化环境风险具有重要意义。

1 固化/稳定化处理技术

固化/稳定化处理技术分为物理过程和化学反应两种方式,是目前应用较为广泛的飞灰处理技术,常见方法包括水泥固化、化学药剂稳定化、水热稳定

化等^[2-3]。

1.1 水泥固化技术

水泥固化技术是指通过水泥的水化反应固定飞灰中的有害物质,生成稳定的水化产物。该技术以其原料易得性与成本效益性,在飞灰处理中得到广泛应用,但存在固化体体积增大,长期稳定性受环境条件影响,以及在酸性环境下产生腐蚀等问题。二噁英等有机污染物的去除效率亦为该技术的关键考量因素。为提升水泥固化体的稳定性与耐久性,需探索优化水泥与飞灰比例、引入辅助材料等方法,以增强固化体的环境适应性^[4]。水泥固化体的长期稳定性评估需考虑固化体在不同环境条件下的化学稳定性和物理完整性。目前,单一的水泥固化飞灰最终需要进入填埋场填埋处理,容易产生粉尘、废水等,需要采取有效的防治措施,该技术常规处理成本为350~500元/t。另外,由于剧毒二噁英和重金属仍然存在,水泥固化技术存在对环境产生二次污染的隐患。

1.2 化学药剂稳定化技术

化学稳定剂与飞灰中重金属离子相互作用形成难溶化合物,使其在环境中可溶性和可迁移性降低,是化学药剂稳定化技术处理飞灰涉及的关键机理。采用药剂稳定化技术,需要根据飞灰的化学成分,选择合适的稳定剂并精确计算稳定剂的使用量,才能达到最好的稳定效果和控制费用,该方法的常规处理成本为500~650元/t。该方法实现重金属稳定化的关键是飞灰中的重金属离子与磷酸盐、硫酸盐

[收稿日期] 2024-07-15

[基金项目] 焚烧飞灰低温热解成套装备研究(YZ2429)。

[作者简介] 潘冬冬(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事固废处理等相关工作。

[引用格式] 潘冬冬. 垃圾焚烧飞灰无害化处理技术应用研究进展[J]. 绿色矿冶,2024,40(6):89-94.

PAN Dongdong. Research progress on application of harmless treatment technology of waste incineration fly ash[J]. Sustainable Mining and Metallurgy,2024,40(6):89-94.

和硅酸盐等稳定剂反应生成不溶性盐类^[5]。水泥基材的应用通过物理包裹作用,使有害物质的释放受到了进一步的限制。

在实际中应用药剂稳定化技术,需要考虑飞灰组分特性、稳定剂与飞灰的相容性、反应条件的精确控制以及产品的环境安全性等方面因素,评价其环境安全性的重要指标是稳定化产物在不同环境条件下的化学稳定性、物理完整性及其行为。与水泥、沥青和石灰固化技术相比,化学药剂稳定化技术可以在处理飞灰无害化的同时,达到少增容或者不增容的目标。药剂稳定化技术在我国垃圾焚烧厂飞灰处理中得到了广泛的应用,但最终飞灰也仍需进入填埋场填埋处理,因此同样存在对环境产生二次污染的隐患。

1.3 水热稳定化技术

水热稳定化技术是一种涉及离子交换、吸附作用、共沉淀等复杂水热化学反应的高效飞灰无害化处理方法。硅酸盐、铝酸盐水溶液在水热合成过程中与飞灰中的重金属离子发生化学反应,生成稳定的矿物结构。水热稳定化技术采用的高压环境促进了矿物晶体的生长,在提高产品物理稳定性的同时,也增强其吸附重金属离子的能力和化学稳定性,使晶体尺寸增大,形态规整^[6]。此外,水热稳定化过程通过调节 pH 值及溶液化学,使重金属离子的稳定化得到进一步加强。在处理含高浓度重金属和二噁英的飞灰时,水热稳定化技术展现了其独特的优势,尤其适用于无害化项目,因为这些项目对化学稳定性以及降低生态毒性要求较高。

水热稳定化技术的工程应用需要考虑很多环节,如反应器设计、温度控制、压力维持以及产物的分离和纯化等^[7]。因此,高效的能量回收系统和紧凑的反应器设计对降低能耗和提高处理效率至关重要。另外,产物的分离和纯化过程也需进行优化,才能保证水热稳定化产物的质量和应用潜力。针对水热稳定化技术的能耗和设备要求等方面存在的挑战,今后的研究可着重于开发低温水热合成技术,以及利用地热能或其他可再生能源降低能量消耗;另外,还可探索水热稳定化产物在建筑材料领域中的应用,以扩大其应用前景并提高经济价值。

对水热稳定化过程产生的含盐废水需进行专项的环境风险管理,关键在于要识别和控制其潜在的

环境影响。因此,水热稳定化技术未来研究的重点将以开发强化重金属离子固定性、减少化学试剂使用量、降低废水处理负担的更高效化学添加物为主。目前,水热稳定化技术在实际工程中并未大规模产业化应用。

1.4 固化/稳定化处理技术的经济性评估

在进行固化/稳定化处理技术的经济性分析时,必须全面评估初始投入、管理费用、作业效能以及生态收益。一方面,资金投入覆盖了机械采购、基础设施搭建以及科技转移等多个方面;另一方面,运营成本涉及化学品耗材费、能量消耗和劳动力开支这三个主要方面。评价技术处理性能的标准主要基于粉尘处理的迅速性和污染成分的清除效率,而环境收益则考量了产品的稳定性、使用潜力以及其对生态系统的长远影响。在考虑成本效益与生态效益的双重前提下,必须追求化学稳定剂技术与混凝土凝固方法之间的均衡。外围条件同样对技术选择及其实施产生影响,包括地理属性、环保法律规定以及政府奖励政策等。在进行经济评估时必须深入考虑这些因素,这是确保评估成果全面无误的关键所在^[8]。同时对于生态收益以及环境效益,生命周期分析(LCA)是一个关键的分析工具,可衡量各个环节对环境的影响,这些环节涵盖了原料获取、制造过程、产品应用直至最终的废弃物管理^[9]。

2 热处理技术

目前,热处理法根据温度以及处理方式不同,可以分为高温热处理法、低温热处理法。其中,比较有代表性的高温热处理法为高温熔融法^[10],低温热处理法为低温热解+水洗+建材化应用。

2.1 高温熔融技术

高温熔融技术是一种先进的飞灰处理方法,在1200~1600℃的高温条件下使飞灰熔化,形成稳定的玻璃态或陶瓷态物质,有效实现了重金属离子的固化和有机污染物的无害化处理^[11]。该技术通过物理封装作用,将重金属离子束缚于玻璃体结构中,同时利用高温引发的热解和氧化反应促进有机污染物的分解,从而显著降低飞灰的环境风险。由于采用该技术,高温条件下会产生含有Pb、Zn等易挥发重金属和低熔点盐的废气,需设置后续烟气处理装置对烟气进行净化。由于高温熔融技术可以完全去除污染物,更适用于无害化综合处理项目,特别

是对最终产物具有极高稳定性和安全性要求的应用场景。

目前,采用高温熔融技术处置焚烧飞灰稳定运营的项目很少,限制其应用发展的因素有以下几点:①焚烧飞灰中大量低沸点重金属在熔融温度区间1 300~1 500℃发生氯挥发,烟气净化处置压力大,产生大量二次飞灰难以处置;②焚烧飞灰含有大量氯盐(炉排炉15%~25%),在高温熔融过程中会产生氯高温腐蚀,炉体耐材寿命难以保障;③熔融温度在1 300℃以上,吨飞灰消耗电量在800 kW以上,工艺能耗大,运行成本高。高温熔融技术的能源消耗和经济成本较高,估算成本为2 000~2 500元/t,这限制了其大规模商业化应用。

为兼顾高温熔融技术的经济效益与环境影响,今后的研究重点将聚焦能耗优化与成本控制两个方面。为此,当前的主要研究方向如下:①改进熔融炉的设计,采用更为高效的能源利用技术,以及开发新的材料和添加剂从而降低熔融过程中的能源消耗;②对烟气净化系统和飞灰收集技术进行创新,实现对污染物更有效的控制和对资源的回收利用;③对熔融产物的长期稳定性和生态毒性进行深入研究,以及探索熔融玻璃态物质在建材领域的应用,开拓高温熔融技术的市场潜力,并进一步促进环境效益和经济效益的平衡^[12];④尽快出台对此类资源化产品的标准要求,促进产品的后续应用和技术的市场推广。

浙江省嘉兴市某飞灰高温熔融资源化项目,采用飞灰水洗+高温熔融技术,年综合利用危废15.9万t,减少环境废水排放90万t/a,减碳量可达6.86万t/a。

2.2 低温热解+水洗+建材化应用技术

低温热解技术的原理是通过控制气氛,促使飞灰中的有机污染物在低于传统热解温度的条件下裂解,转化为无机物或小分子有机物质,从而达到无害化,是针对飞灰中有机污染物的一种有效处理手段^[13]。该技术尤其适用于处理难以分解的二噁英等有机污染物,通过对温度、气体流量、停留时间等热解条件进行精确控制,可达到优化裂解效能、降低二次污染风险的目的。该技术的创新点在于,在降低能耗的同时,还提出了提高整个热解过程能量利用效率的气体循环和热能回收系统——低温条件下的高效热解。低温热解技术还在设备设计上有所创新,如适应不同类型飞灰的处理需求,采用了特殊的

反应器材料和结构。

生活垃圾焚烧飞灰的高含氯量严重制约飞灰无害化和资源化处置,因此一般需要进行脱氯处理。由于处理成本低,工艺简单,处理效果好,水洗是目前应用最多、最广泛的脱氯处理方式。一般采用三级逆流漂洗工艺,通过水洗可以降低飞灰中的可溶性氯盐和重金属含量^[14]。

从热解单元出来的飞灰进入水洗单元的化浆机,按照一定水灰比将飞灰化成浆料后送入水洗罐进行漂洗,从而将可溶性氯离子溶于漂洗液中,漂洗后的浆液进行压滤,可得到可溶性氯含量低于1%的脱氯飞灰,漂洗废水进入水处理系统处理^[15]。最终以水洗飞灰、骨料、粉煤灰、水泥、沙子为原料生产免烧砖。

采用低温热解技术进行飞灰无害化处理,估算成本为1 000~1 300元/t。我国东南沿海发达地区,可优先考虑投入和运行成本较高的飞灰处理利用技术,实现资源进一步利用。

浙江省湖州市某飞灰资源化项目处置规模 5×10^4 t/a,采用“低温热分解+水洗处理+蒸发结晶分盐”工艺,通过热分解技术去除有害成分二噁英,利用多级逆流水洗进行灰和氯盐的分离,最终通过蒸发结晶进行钠盐、钾盐的提纯,实现飞灰资源化。

浙江省宁波市某飞灰资源化项目,建设3条飞灰中温裂解生产线、1条水洗预处理生产线和1条免烧砖生产线,进行生活垃圾焚烧飞灰资源化利用,最终形成 5×10^4 t/a的资源化利用能力,项目环评已于2023年4月公示,目前正在建设中。

3 水泥窑协同处置技术

3.1 水泥窑协同处置的工艺流程与实践案例

水泥窑协同处置技术利用水泥窑高温环境实现飞灰中有害物质的固化,在水泥生产过程中将飞灰作为辅助原料。其过程涵盖了预处理飞灰、配料、入窑水泥料、检验最终成品。在预处理阶段,飞灰经水洗除氯盐,减少水泥窑设备腐蚀^[16]。飞灰送入水泥窑后,其中的重金属在高温下被由有机污染物分解的水泥熟料中的矿物质相固定。该技术在提高水泥产品生态效益的同时,有效降低了飞灰的填埋量^[17]。为了避免影响水泥质量和窑炉运行的稳定性,该技术在实际应用中需要对入窑飞灰的比例进行精确控制。采用水泥窑协同处置飞灰的估算成本为800~1 000元/t。该技术处置飞灰量大,全过程

密闭,无二次污染。

安徽省芜湖某飞灰资源化项目建立2条150 t/d飞灰水洗预处理工艺线,依托某水泥公司现有的干法水泥窑生产线系统处置飞灰,基本实现了芜湖市飞灰的资源化应用,节约了大量土地,该项目已于2021年7月投入运行。

3.2 低温热解与水泥窑协同处置技术的市场潜力与挑战

随着环保要求的日益严格和资源循环使用观念的增强,低温热解技术和水泥窑协同处理技术在飞灰处理方面的应用潜力巨大。低温热解工艺的能量消耗及操作费用通常偏低,而水泥窑协同处理方法采用现行的设备获得水泥制造过程中的共生效益。但是在技术进步水平、财务实用性、生态危害管理以及消费者认可度等方面,这两种技术在普及实施的道路上同样遭遇着考验^[18]。未来的研究与开发将集中在提高技术的适用性、可靠性和成本效益等方面,同时也将探索技术的新用范围和市场潜力。为了促进这两种技术的持久增长和市场实施,应增强对生态法律和市场趋势的观察。

4 安全填埋

安全填埋作为飞灰最终处置的一种传统方法,依托于刚性填埋场的建设和工程技术手段,确保飞灰处理的安全性与环境兼容性^[19]。2020年8月,生态环境部发布的《生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范(试行)》(HJ1134—2020)要求未经处理的飞灰采用密封包装后,进入满足《危险废物填埋污染控制标准》(GB 18598—2019)要求的刚性危险废物填埋场填埋^[20]。

安全填埋技术正朝着更加严格的环境保护标准和更低的环境风险方向发展。目前体现在填埋场的设计、施工,后期管理的规范化和标准化,以及填埋场渗滤液和气体的有效收集与处理方面。未来则将聚焦于提高填埋场的安全系数,采用先进的防渗材料和监测技术,以及开发更为环保的填埋添加剂,降低飞灰长期填埋可能带来的污染风险。随着资源循环利用理念的深入,安全填埋技术也在探索与能源回收、土地复垦等技术结合,提高土地利用效率和环境可持续性。采用刚性填埋技术处置飞灰,估算成本为800~1300元/t。我国中西部欠发达地区宜采用以安全填埋为主的处置方式,避免项目建成后运行成本过高,项目无法长期持续的情况发生。

各类飞灰处理方法对比见表1。

5 飞灰综合利用策略

5.1 飞灰综合利用策略

飞灰综合利用策略重点在于将飞灰转换为减少对环境影响的可利用资源。飞灰中所含的某些成分,可以用作建筑材料,也可以用作土壤改良剂,还可以用作其他工业原料。飞灰综合利用策略包括提高其资源化潜力和降低环境风险。飞灰中的重金属可以通过物理或化学的方法回收再利用,其中的硅、铝等元素,则可以用于制造水泥、陶瓷或玻璃等制品。飞灰综合利用实践应在减少飞灰最终处置量的同时,开辟飞灰资源化新途径,如道路施工、混凝土制造和农业等领域的应用。在探索飞灰综合利用时,无需盲目追求高效率、高水平,建议依据当地现有利用技术方法稳步推动,同时结合科研院所产学研用。

5.2 政策支持与技术创新

推动飞灰处理技术进步的主要驱动力是政府扶持和技术创新。在策略方面,世界各地为了促进飞灰处理技术的革新与运用,实行了严苛的生态保护立法,并提供了税务减免、财政资助或环保贷款等经济激励政策^[21];在技术革新方面,研究与开发的焦点转向了提升飞灰处理效能、削减开支以及增加飞灰处理对生态环境的友善性等关键方面。

在政策方面,应进一步完善飞灰处置技术标准规范,从行业角度出发,在研究国内外飞灰处理现状及发展的基础上,对现行标准进行评价和补充,编制形式更灵活的标准规范,进一步引导飞灰处置行业良性发展,遏制飞灰的违法处理。先进的飞灰处理技术包括低温热解、水泥窑协同处置、高温熔融技术与安全掩埋工艺等,同时飞灰处置方法的开发也应开辟新的视野和应对策略,例如融合材料工程、生态技术与数据处理等进行多学科的探索。高温熔融所产生的水碎玻璃体可用作砂石料、水泥熟料掺和物等建筑材料,经深加工后可成为阻燃保温隔热材料等产品,代替下游企业原辅料,从而减少原辅料生产消耗的能源及二氧化碳排放,从全生命周期实现减污降碳。低温热解配合水洗技术处置后的飞灰变为一般固废,可用作制备免烧砖、路基材料、水稳材料、水泥添加剂等建材的原料。政府支持与技术创新的紧密融合在提高飞灰处理效率的过程中起着至关重要的作用,同时也要加强飞灰处置的监管,评估危险

表1 各类飞灰处理方法对比

技术分类	处理方法	原理	运行成本/ (元/t)	优点	缺点
固化/稳定化处理(产物进卫生填埋场)	水泥固化	通过固化剂或化学药剂,使飞灰中污染物形成稳定化合物或被物理包裹,从而减少有害物质的溶出	350~500	水泥来源丰富,处理费用适中	增容大,长期稳定性差,易被酸性物质腐蚀,高含盐致水泥易破裂,二噁英未被处理
	药剂稳定化	同上	500~650	操作简单,处理成本适中,目前垃圾应用最多的技术	飞灰成分复杂,固化体长期稳定性待监测,二噁英未除去;处理后的飞灰还需进入卫生填埋场,占用大量土地资源;国内目前大多数的飞灰处置都采取此方式,很多地区都面临填埋场地枯竭,不规范填埋,药剂失效等问题
	水热稳定化	在碱性环境下,向飞灰中添加一定量的硅源、铝源,利用生成的矿物相进行重金属离子的交换、吸附、沉淀等作用,实现飞灰的无害化处理	未大规模产业化应用	化学稳定性好,能够资源化,降解二噁英效果好	能耗高,需特殊处理设备,生产成本低,且产生高含盐及重金属废水
热处理	高温熔融	在1200~1600℃的条件下将固态飞灰融化形成具有致密结晶结构体的玻璃状或玻璃-陶瓷状物质,熔融过程中重金属被牢固地束缚在玻璃体中,有机污染物因高温而分解或转换成气体逸出	未大规模产业化应用,据估算为2000~2500	熔渣稳定性好,减容效果好,重金属浸出极低,是最彻底的飞灰无害化处理技术	高温需消耗能源,投资高,且需要防治烧结过程中烟气的二次污染;能源消耗大,处置成本高,投资高,技术难度大,需防治烟气二次污染,存在二次飞灰等问题
	低温热解+水洗+建材化应用	在较低温度及一定的气氛条件下实现二噁英的分解,而后采用水洗技术将飞灰的重金属和氯盐分离,水洗后进行飞灰建材化利用	1000~1300	能够有效地处理二噁英、重金属等污染物,处理后的飞灰可作为一般固体废物进行资源化利用,其处理能耗及成本远低于高温热处理技术	低温热解对热处理设备要求较高,且处理后的飞灰作为建材化应用的产品尚未形成标准,市场方向有待探索
协同处置	水洗水泥窑协同	水泥窑协同处置是将垃圾焚烧飞灰在水泥窑炉中煅烧,从而将有害的重金属固定在水泥熟料中	800~1000	将危险废物送入水泥窑系统处理,实现飞灰资源化	氯及重金属含量高,腐蚀水泥窑设备,降低水泥品质,易二次生成二噁英;且需控制飞灰入窑比例,水洗除氯产生难处置的结晶盐
安全填埋	刚性填埋场填埋	将垃圾焚烧飞灰简单处理达到填埋场要求后送入安全填埋场进行填埋	800~1300	刚性填埋场技术简单,安全系数较高,不易造成环境风险	造价高,占用大量土地资源

废物处置设施运行情况,明确飞灰处理工艺,提高准入门槛,持续推动飞灰处理产业改造升级。

6 结束语

对垃圾焚烧飞灰无害化处理关键技术及其应用前景进行了综述。低温热解+水洗+建材化应用在处理飞灰方面显示出节能优势;利用现有工业设施,实现资源化飞灰利用的水泥窑协同处置技术同样具有广阔的前景;在飞灰全面利用策略开辟资源回收新途径的同时,安全填埋技术正在向更环保、更安全的方向发展。促进飞灰处理技术发展的重要动力是

政策支持和技术创新。要实现处理效率更高、环境风险更低、市场应用更广泛,飞灰无害化处理技术还需进一步优化,同时还需加强飞灰处理处置标准体系建设。

[参考文献]

- [1] 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发展[J]. 中国有色冶金,2022,51(6):71-80.
- [2] 李兴杰. 国内部分地区危废焚烧灰渣特征调研分析[J]. 有色冶金节能,2022,38(4):59-66.
- [3] 陈昕,胡友彪,查甫更,等. 城市垃圾焚烧飞灰无害化

- 处置技术研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(19): 146-149.
- [4] 姜微. 生活垃圾焚烧飞灰特性及重金属螯合稳定/水泥固化处理研究[J]. 节能与环保, 2021(9): 71-72.
- [5] 朱子晗, 郭燕燕, 赵由才, 等. 垃圾焚烧飞灰中 Pb 及特征药剂稳定化处理[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2737-2743.
- [6] 蒋旭光, 陈钱, 赵晓利, 等. 水热法稳定垃圾焚烧飞灰中重金属研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4473-4485.
- [7] 阮煜. 水热法协同处置不同炉型的垃圾焚烧飞灰及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [8] 高术杰, 陈德喜, 马明生. 国内外城市垃圾焚烧飞灰熔融技术综述[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(1): 14-18.
- [9] 王波, 张群. 生命周期评价法(LCA)与环境效率分析[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(5): 400-403.
- [10] 李唯实, 文卓钰, 李丽, 等. 热处理法降解生活垃圾焚烧飞灰中二(噁)英的技术现状[J]. 环境卫生工程, 2024, 32(1): 128.
- [11] 马明生. 焚烧残余物熔融玻璃化工艺应用研究现状[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6): 26-33, 54.
- [12] 王沛玥. 活性炭吸附气相二噁英的性能评价及实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [13] 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.
- [14] 龙吉生, 姚挺. 生活垃圾焚烧飞灰水洗过程中理化特性及二噁英分布规律研究[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(3): 41-45.
- [15] 何玉清, 张佳, 岳阳, 等. 飞灰水洗液处理工艺及其资源化利用研究进展[J/OL]. 环境保护科学, 1-9 [2023-11-24]. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202310016>.
- [16] 白晶晶, 张增强, 闫大海, 等. 水洗对焚烧飞灰中氯及重金属元素的脱除研究[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 104-108.
- [17] 肖俊炜. 水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰的技术途径探究[J]. 节能与环保, 2022(8): 82-83.
- [18] 雷鸣. 水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰的研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2022.
- [19] 褚衍旭, 高勇, 李东, 等. 危险废物安全填埋场建设质量控制研究[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 144-147.
- [20] 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[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [21] 牛云, 余玲玲, 刘海兵, 等. 危险废物焚烧管理与处置现状[J]. 环境保护科学, 2024, 50(3): 42-47.

Research Progress on Application of Harmless Treatment Technology of Waste Incineration Fly Ash

PAN Dongdong

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to reduce the potential threat of fly ash to the environment and human health, it is necessary to carry out harmless treatment of waste incineration fly ash. In this paper, the principles, advantages and disadvantages of solidification/stabilization treatment, heat treatment technology, cement kiln co-processing and safe landfill technology were reviewed. The technical economy, technical points and development trend of each technology were introduced. The comprehensive utilization strategy of waste fly ash was put forward, and the measures for the improvement of fly ash harmless treatment technology are proposed from the aspects of policy support and technological innovation. Low-temperature pyrolysis + washing + building materials application, cement kiln co-processing and other treatment technologies have low energy consumption and low cost, but they still need to be further explored in terms of technical maturity and market application.

Key words: waste incineration fly ash; harmless treatment; solidification/stabilization; heat treatment; cement kiln co-processing; landfill; technical economy