

生活垃圾焚烧飞灰资源化处理工程研究

徐 卉

龙岩市环境卫生中心 福建龙岩 364000

摘要: 生活垃圾焚烧是处理城市垃圾的主流技术, 该技术虽然可以实现垃圾的无害化和减量化, 但是会产生二次污染物飞灰。根据2022年住建部发布的城乡建设统计年鉴, 生活垃圾焚烧日处理能力71933吨, 由此测算生活垃圾焚烧产生的飞灰年产生量近1000万吨。目前东部发达城市出现了生活垃圾焚烧飞灰资源化利用技术, 本文从垃圾焚烧飞灰的来源、特点、性质以及危害出发, 综述了垃圾焚烧飞灰资源化利用技术的现状、存在的问题及发展趋势。

关键词: 生活垃圾焚烧飞灰; 飞灰资源化; 飞灰水洗; 飞灰熔融

Research on domestic waste incineration fly ash resource treatment engineering

Hui Xu

Longyan Centre for Environmental, Longyan 364000, Fujian Province

Abstract: Waste incineration is the mainstream technology for urban waste disposal, although it can achieve the harmless and reduction treatment of waste, it can also generate secondary pollutants, such as fly ash. According to the 2022 Statistical Yearbook of Urban and Rural Construction issued by the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, the daily treatment capacity of municipal solid waste incineration is 71,933 tons. Based on this, it is estimated that the annual production of fly ash from municipal solid waste incineration is nearly 10 million tons. Currently, developed cities in the eastern part of the country have started to explore resource utilization technologies for municipal solid waste incineration fly ash. This paper provides an overview of the current status, issues, and trends in the resource utilization of municipal solid waste incineration fly ash, starting from the sources, characteristics, properties, and hazards of incineration fly ash.

Keywords: Domestic Waste Incineration Fly Ash; Resource Utilization Of Fly Ash; Fly Ash Washing; Fly Ash Melting

引言:

垃圾焚烧发电作为“减量化、无害化、资源化”处置生活垃圾的最佳方式, 成为当下世界各国广泛采用的城市生活垃圾处理方式^[1]。该技术虽然可以实现垃圾的无害化和减量化, 但是会产生二次污染物飞灰。飞灰指在生活垃圾焚烧发电过程中, 烟气管道、烟气净化装置、旋风和布袋除尘器等处收集到的容重轻、颗粒小的粉体物质^[2]。根据《危险废物管理名录》(2021), 飞灰被认定为危险废物, 需进行合理处置, 不可以作为二次材料直接使用。目前, 国内城市大多采用“稳定化/固

化+填埋”技术无害化处理垃圾焚烧飞灰, 但是此类处置方法处理后的垃圾焚烧飞灰须填埋处理, 有污染地下水以及污染土壤的隐患。如何妥善安全处置生活垃圾焚烧飞灰, 现已成为目前我国环境保护与治理工作的关键与瓶颈。

一、生活垃圾焚烧飞灰国内相关政策

2020年7月, 发改委等三部委发布关于印发《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》通知, 其中要求如下: 合理规划建设生活垃圾填埋场, 原则上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。由于生活垃圾填埋场建设受限, 危废柔性填埋场建设选址要求很高, 飞灰填埋受到限制, 形成了飞灰处置难题。

2021年5月11日, 国务院发布《强化危险废物监管

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1910105)。

作者简介: 徐卉(1985—), 工程师, 硕士, 主要工作方向为固废处理相关管理工作。

和利用处置能力改革实施方案》，提出“重点研究和示范推广废酸、废盐、生活垃圾焚烧飞灰等危险废物利用处置和污染环境防治适用技术”。

2022年2月10日，国务院办公厅同意并转发国家发改委、生态环境部、住建部、国家卫健委四部委《关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见》，指出要“加快提高焚烧飞灰、沼渣、沼液等处理和资源化利用能力”，“围绕厨余垃圾、污泥、焚烧飞灰等固体废物处置存在的技术短板，征集遴选一批掌握关键核心技术、具备较强创新能力的单位进行集中攻关。”

2023年5月，生态环境部发布《危险废物重大工程建设总体实施方案》，提出加快建设国家危险废物环境风险防控技术中心、6个区域性危险废物环境风险防控技术中心和20个区域性特殊危险废物集中处置中心。其中，全国20个区域性特殊危险废物集中处置中心项目布局安排中，大都提出以焚烧飞灰为主要特殊危险废物进行项目布局，拟安排项目数量为16个。

2023年7月14日，中国城市环境卫生协会印发《2022-2023年中国城市环境卫生协会团体标准制修订计划（第七批）》的通知，其中《生活垃圾焚烧飞灰资源化处理技术规程》通过立项评审。

二、生活垃圾焚烧飞灰的组成与性状

飞灰主要成分为金属或非金属的氧化物，其中SiO₂、CaO的含量最高，约各占飞灰干质量的1/4，其次为可溶性盐类，含量高达17.9%~22.1%，主要为Ca、Na和K的氯化物，飞灰中氯含量高达25%。

从飞灰颗粒表面、内部组成元素的质量分数来看，Si、Ca、Al为主要元素，此外，还含有少量的K、Na、Cl、Fe、Mg及微量重金属元素Pb、Cr、Cd、Zn、Hg、Cu、Ni、As等。对于飞灰中赋存的多元化重金属污染物，若随意处置，其存在因不利外环境因素（如碳酸化作用、酸雨、填埋场渗滤液等）影响而浸出并进入环境的

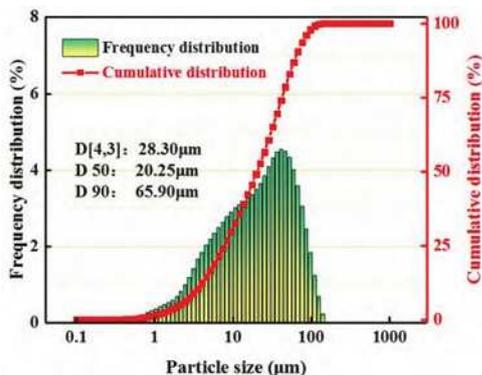


图1 城市生活垃圾焚烧飞灰的粒径分布

可能^[1]。此外，由于飞灰的比表面积大，除重金属外，还富集了二噁英类有毒有害有机物等。

飞灰颗粒粒径较细，飞灰颗粒的平均粒径为28.30 μm，中值粒径D50为20.25 μm。其中，98.22%的颗粒粒径小于100 μm，粒径小于1 μm的不足2%^[4]。

三、飞灰资源化处理技术及关键控制措施

从飞灰的主要组成成分来看，飞灰属于CaO-SiO₂-Al₂O₃体系，与建材产品的原料组成相似，拥有进行资源化利用的基础^[5]。目前国内飞灰资源化利用有水洗、水泥窑协同、低温热分解、高温烧结、高温熔融、酸洗利用等技术。

水洗：由于焚烧垃圾飞灰含氯比较高，直喷入水泥窑处置方式虽然工艺简单可行，但因水泥成品对含氯指标有严格限制，而且入窑物料含氯高严重威胁水泥窑设备运行安全，因此处置量很小，远远无法满足焚烧垃圾飞灰处置需求。所以，只有通过采用飞灰水洗脱氯预处理工艺，才能最大限度发挥水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰能力。飞灰中的氯化物（如氯化钠、氯化钾和氯化钙等）易溶于水，通过水洗操作能够有效的将这些物质从飞灰中去除，从而减少氯对水泥窑以及水泥生产的影响。

水泥窑协同处置飞灰：将满足或经过预处理后满足入窑要求的垃圾焚烧飞灰投入水泥窑，在进行水泥熟料生产的同时实现对废物无害化处置的过程。水泥回转窑具有温度高，窑内湍流强烈、碱性气氛等特点，飞灰的成分与水泥原料相近，水泥窑协同处置是目前应用最多的飞灰资源化技术。

低温热分解：低温热处理技术是在较低温度条件下实现二噁英的分解，将飞灰在缺氧或无氧气氛下，通过低于500℃的低温热分解反应，将其中的二噁英类脱氯解毒的过程。德国科研成果最早发现一定条件下对飞灰进行低温热处理可有效脱除二噁英，研究发现二噁英的分解率在99%以上。

飞灰烧结处置：烧结法处理飞灰是运用低于熔融温度，提供粉末颗粒的扩散能量，将大部分甚至全部气孔从飞灰中排除，变成致密坚硬的烧结体并符合相关材料性能要求。因飞灰含有较多的可溶性盐类，采用飞灰制陶粒技术生产出满足质量标准的陶粒产品是关键；飞灰中含有的大量氧化铁和金属会影响陶瓷的性能，必须严格控制飞灰加入量。

飞灰熔融处置：高温熔融将飞灰或其处理产物与其他硅铝质组分、助熔剂进行混合后，通过高温使其完全熔融，再经过水淬等急冷处理，形成致密玻璃体产物的

过程。高温熔融可分解二噁英及其它有机污染物（主要为CO和H₂），最终形成玻璃体，用于建材或者制成其它更高价值的副产品。高温熔融产生的水淬玻璃体可以初步作为砂石料的替代品。

酸洗利用：传统的水洗工艺对可溶性氯的去除效果明显，但不可溶性氯难以通过水洗的方法去除。针对烟气治理产生的二次飞灰中重金属和氯盐赋存特性，以强酸作为酸洗介质，通过中和、置换等化学反应，对重金属进行靶向溶出，实现重金属高品位、盐类产品级的全资源回收。酸洗利用一般属于预处理手段，成本较高。

四、生活垃圾焚烧飞灰资源化案例——水洗+水泥窑协同

某市深度减量水洗耦合水泥窑协同项目成立于2020年，项目总投资1.2亿元，占地面积25亩，飞灰处置能力4.5万吨/年，具备完善的飞灰处置、贮存、运输功能。厂区内包括卸灰车间，水洗车间，水处理车间，尾气处理系统和湿灰仓库。公司将飞灰综合利用为各类产品（工业盐，金属矿产，建材），无废水排放，固废全部利用，真正实现飞灰“减量化、无害化、资源化”目标。项目于2020年9月份开始建设，2021年5月申领危险废物经营许可证并进入生产调试阶段，2022年4月获得五年期的危险废物经营许可证，是国内率先采用深度减量水洗工艺并稳定运营的飞灰资源化项目。

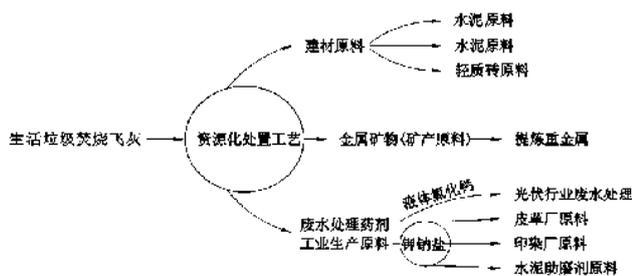


图2 项目工艺流程

本项目根据生产工艺流程，主要划分为原灰接收车间、干灰水洗处置车间、污水处理车间、MVR蒸发结晶

车间、MSSR蒸发浓缩车间以及大型综合仓库一座，具备完善的飞灰处置与资源化、暂存和运输功能，同时建设有中试研发楼一座以满足工艺迭代的需求。



图3 飞灰水洗后相关产品

五、总结

垃圾焚烧飞灰的物性特征复杂，其无害化处置技术面临诸多难点，目前飞灰资源化处置技术体系仍存在自身不足，符合环境安全且具有普遍适用性的飞灰处理技术仍需进一步研究和开发。垃圾焚烧飞灰中富集了焚烧烟气中的重金属、二噁英等污染物，且具有高氯的特点，成为其处理处置的难题。

我国垃圾焚烧飞灰具有高氯盐、重金属组成复杂、含毒性二噁英的特性，采用多技术联用方法实现焚烧飞灰的无害化、资源化处置或将成为未来发展的关键技术。

参考文献：

[1]中华人民共和国统计局，中国环境统计年鉴[M]. 中国统计出版社，2019.

[2]夏天天，李胜，李敬超，刘璐，胡晓伟，李滢. 飞灰资源化中蒸发结晶分盐技术工程应用[J/OL]. 现代化工.

[3]李卫华，吴寅凯，孙英杰，尹俊权，辛明学，赵友杰. 垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出评价方法研究进展[J/OL]. 化工进展.

[4]范程程，王宝民，王晓军. 生活垃圾焚烧飞灰理化特性与污染毒性研究[J/OL]. 中国环境科学.

[5]吴彦瑜，胡小英，彭晓春. 垃圾焚烧飞灰处置与资源化利用研究进展[C]. 2013中国环境科学学会学术年会. 2013.