

Status and Development Trend of Harmless and Resourceful Disposal of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash

Linzhi Xu¹, Qing Sun^{1,2}, Jian Zhang^{1,2}, Jun Yan², Kun Wu¹, Fangzhen Pan³, Jiawei Sheng^{1,2*}

¹College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

²Wenzhou Institute of Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Wenzhou Zhejiang

³Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resource, Hangzhou Zhejiang

Email: *jw-sheng@zjut.edu.cn

Received: Sep. 28th, 2017; accepted: Oct. 12th, 2017; published: Oct. 18th, 2017

Abstract

Municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash is the main by-product of waste incineration. Because of its high content of heavy metals, dioxins and other harmful substances, it has become a difficult problem for the development of waste incineration industry. This paper reviewed the traditional waste incineration fly ash harmless treatment technology and mechanism, analyzed the trend, and introduced the development of new methods, in order to improve the degree of resource utilization of waste incineration process.

Keywords

Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash, Harmless, Resourceful, Development Trend

垃圾焚烧飞灰无害化与资源化现状及发展趋势

徐林智¹, 孙青^{1,2}, 张俭^{1,2}, 严俊², 吴坤¹, 潘方珍³, 盛嘉伟^{1,2*}

¹浙江工业大学材料科学与工程学院, 浙江 杭州

²浙江工业大学温州科学技术研究院, 浙江 温州

³浙江省地质矿产研究所, 浙江 杭州

Email: *jw-sheng@zjut.edu.cn

收稿日期: 2017年9月28日; 录用日期: 2017年10月12日; 发布日期: 2017年10月18日

*通讯作者。

摘要

城市生活垃圾焚烧飞灰是垃圾焚烧处理中的主要副产物，因其含有高含量重金属、二噁英等危害物，已成为垃圾焚烧行业发展亟需解决的难题。本文综述了当前垃圾焚烧飞灰传统无害化处理工艺及机理，分析了其资源化趋势，并介绍了几种新型处理方法，为提高垃圾焚烧处理过程中资源化利用的程度提供了参考。

关键词

垃圾焚烧飞灰，无害化，资源化，发展趋势

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，我国经济高速发展、城市化进程加速。人们生活水平提高的同时，也产生了大量的城市固体废弃物。2015年全国246个大中城市生活垃圾产生量高达18,564.0万t [1]，而且仍有不断增加的趋势。面对日益严峻的垃圾处理问题，传统的垃圾填埋处理方式，因其负面作用大已远远不能适应目前发展需要 [2]。与此同时，垃圾焚烧发电技术处理速度快、占地面积小、减量化和无害化效率高、可回收能源等优点便突显出来 [3]。然而，飞灰作为垃圾焚烧发电过程中的副产物，含有高含量重金属及二噁英等各种有害物，若不能得到有效处理，会对自然环境及人体健康造成巨大影响。国内外专家学者积极研究开发了多种垃圾焚烧飞灰的无害化及资源化处理方法，其中北京金隅琉璃河水泥公司已建成国内首条飞灰处置示范线，对飞灰进行资源化再利用。欧美等国在飞灰熔融固化方面进展迅速，已经基本发展成工业应用规模，不仅有多种不同种类的熔融炉，更对熔渣的后续处理有充足的应用进展，形成一条完整的产业链。本文介绍了传统的飞灰无害化及资源化处理工艺，简述了几种新型处理工艺方法，并对其发展趋势进行了展望。

2. 焚烧飞灰的主要特性及危害

垃圾焚烧飞灰产量与垃圾种类、焚烧条件、焚烧炉型和烟气处理工艺有关。一般占被焚烧垃圾量的3%~5%左右 [4]。呈深灰或灰白色，颗粒大小不均一，粒径一般小于300 μm，其中以K、Na、Ca的氯化物为主体的可溶性盐含量为15%~25%，并含有各种重金属与二噁英等危害物。以浙江省温州市龙湾区某垃圾焚烧发电厂飞灰为例，其主要物质及重金属含量分别见表1与表2。

焚烧飞灰中的重金属主要包括Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn等元素，重金属无法被自然降解，易在生物体内迁移累积，并通过食物链传递最终在人体内聚集，对人体健康产生极大的危害。二噁英(PCDD/Fs)是多氯代二苯并二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)的总称，极易吸附在粉尘颗粒上，故飞灰是垃圾焚烧系统中二噁英的主要排放源，通常占总排放量50%以上，最高可达90% [5] [6]。若其经皮肤、呼吸道、消化道等途径进入体内，可造成免疫力下降、内分泌紊乱等问题，是一种严重致癌物。因此，必须对焚烧飞灰中有害物质进行无害化处理。

Table 1. Main components of MSWI fly ash/%**表 1.** 垃圾焚烧飞灰主要成分/%

Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Cl ⁻	S ²⁻
1.14	1.23	2.88	8.66	29.11	2.97	2.80	18.21	0.97

Table 2. The content of heavy metals in MSWI fly ash/ppm**表 2.** 垃圾焚烧飞灰中重金属含量/ppm

Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Cr
3039.8	22670.5	1480.1	181.7	76	609.6

3. 焚烧飞灰无害化处理技术现状

垃圾焚烧飞灰无害化处理目的是固定所含的重金属，破坏或去除二噁英。一般包括水泥及其它介质固化技术、高温处理技术和化学药剂稳定化技术等。

3.1. 介质固化技术

3.1.1. 水泥固化

水泥固化处理技术是一种常用于危险固体废弃物的处理技术，也是目前最廉价、应用最广的焚烧飞灰处理技术之一。其主要通过将飞灰与水泥混合成型，使飞灰中重金属以氢氧化物或络合物的形式被包裹在经水化反应生成的硬化水泥块中，降低焚烧飞灰中有害物质的可渗透性，以达到无害化的目的。

Bie 等[7]研究了水泥固化飞灰后的浸出行为，探讨了水泥用量、浸出液 pH 值、振动浸出时间对重金属浸出量的影响。研究发现，飞灰被水泥固化后其以 Pb 和 Cd 为代表的重金属浸出率迅速下降，且在碱性条件下能进一步抑制浸出，图 1 为浸出时间 64 小时后原始飞灰与 50% 飞灰添加量的水泥样品的重金属浸出浓度的比较。但飞灰的掺杂会使复合水泥块的抗折强度和抗压强度明显下降，而且还延滞了水泥的水化时间。为提高水泥固化效果，常威等[8]在水泥固化垃圾焚烧飞灰时添加一定量的重金属螯合剂，在保证重金属固化效果的同时能够兼顾经济性与增容性。

研究表明，经过适当工艺，垃圾焚烧飞灰水泥固化技术能够满足重金属固化要求，填埋后不会对环境造成影响。但飞灰中的高含量氯化物会影响水泥品质，甚至损坏设备导致停产[9]，且水泥固化技术主要针对飞灰中的重金属，对二噁英等有机危害物并没有较好的固化效果。

3.1.2. 塑料固化

鉴于粉煤灰可作为塑料补强填料，有学者研究将垃圾焚烧飞灰作为塑料填料的可行性与工艺方法。Goh 等[10]将硅烷偶联剂或介孔二氧化硅胶体(CMS)改性过的垃圾焚烧飞灰作为填料与环氧树脂进行混合，研究发现水洗后的改性焚烧飞灰与聚合物基体相容性较好，其拉伸强度与弯曲强度与未添加焚烧飞灰的树脂相比也只是略有下降，且对重金属 Zn、Cu、Cr 和 Cd 固化效果好，64 天后未检测到其浸出。当前对于垃圾焚烧飞灰塑料固化的研究较少，但其固化效果优良、增容小，后续可利用方向较广泛，是一种前景较好的新型处理技术。

3.2. 高温稳定技术

3.2.1. 熔融法

熔融法是指在燃料炉内利用燃料或电将垃圾焚烧飞灰加热到 1200℃~1400℃左右，使其中残留的二噁英彻底分解，之后经过一定的程序冷却使飞灰变成熔渣。此时熔渣内的重金属已被固定，后续可作为

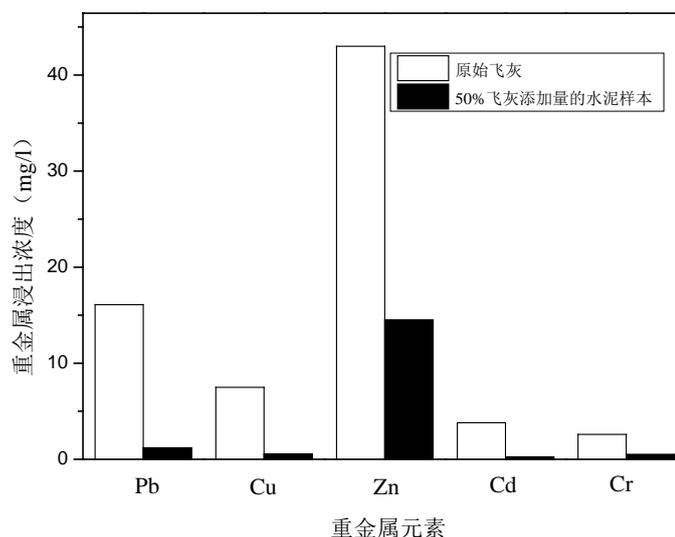


Figure 1. Comparison of leaching concentration of heavy metals
图 1. 重金属浸出浓度比较

高品质的建筑材料原料，实现飞灰减容化、无害化、资源化的目的。张晓萱等[11]对飞灰进行 1200℃熔融处理，其温度变化时熔渣中重金属的固定率见图 2，并对其得到的炉渣进行浸出。实验表明，重金属浸出率已低于我国和美国的危险废物浸出毒性鉴别标准(TCLP)规定的危险废物的重金属和有机污染物的含量，不属于危险废物。

在飞灰熔融过程中，不同的重金属元素其固化率并不一致，诸如 Cu、Zn 等元素在高温下易与飞灰中的 SiO₂、Al₂O₃ 反应生成高沸点的硅铝酸盐，抑制了重金属的挥发，提高其固化率，但 Pb、Cd 等易挥发的重金属元素，提高温度及添加剂对其固定率影响不大[12]。而且熔融固化技术所需成本很高，因此多在经济发达的欧美、日本等国家应用。

3.2.2. 烧结法

烧结法是将垃圾焚烧飞灰与玻璃质等各种添加物的混合物造粒后加热至 1000℃~1100℃，使其中的二噁英彻底分解，并形成致密的玻璃固体，借助玻璃体的致密结晶结构，使飞灰中的重金属被固化稳定。烧结法得到的产品体积小、硬度高，重金属浸出率低，工艺简单，后续可作为混凝土骨料及其它建筑材料，是一种值得推广使用的垃圾焚烧飞灰处理工艺。

国内外有不少学者对烧结处理工艺及性能作了试验研究，李润东等[13]研究烧结温度、时间及成型压力等条件对烧结体理化性质的影响，发现烧结温度的控制对烧结过程起到关键的作用。在 1080℃至 1100℃范围内，烧结试体的抗压强度、烧失率、体积变化率和密度变化率都随着温度与时间的增加而增大，与此同时，成型压力越大，烧结试体的抗压强度和密度变化率越大，烧失率和体积变化率越小。Mangialardi [14]发现，将飞灰预先经过水洗减少其中氯盐含量，烧结后可制得满足意大利对混凝土中粗集料强度要求的结晶体。

3.2.3. 热等离子体技术

热等离子体技术是一种近年来在工业中广泛应用的新技术[15][16]，也可以应用于垃圾焚烧飞灰的处理。等离子体废物处理系统主要由进料系统、等离子体主反应腔、金属/玻璃体收集系统、热能回收利用系统、尾气净化处理系统、二次燃烧室、自动控制系统等构成。其主要工作流程如下：进料系统将废物输进等离子体主反应腔，然后在主反应腔中经历等离子体气化/玻璃化过程，其中金属和玻璃体经金属玻

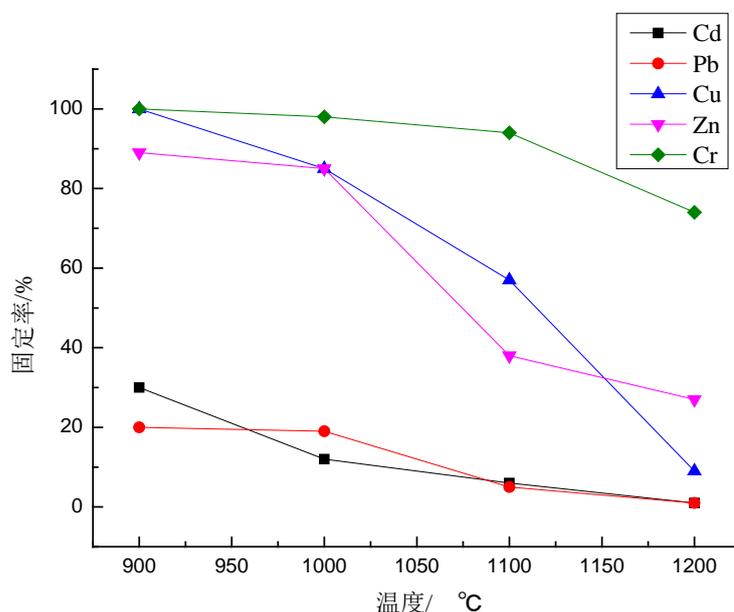


Figure 2. Comparison of fixation rates of different heavy metals
图 2. 不同重金属的固定率比较

璃体收集系统得到收集，如果存在二次燃烧室气体进入二次燃烧室，然后气体进入尾气处理系统，最后排放的气体达到标准。如果有能量回收利用系统，气体可通过能量回收利用[17]。

与传统的热处理技术相比，热等离子体技术具有更高的温度和能量密度，可以实现飞灰的玻璃化，抑制重金属迁徙。同时能够完全的破除有毒有害废物，不会造成二次污染。

目前，日本美国已有部分公司在等离子体处理垃圾焚烧飞灰技术上已经实现商业化运转水平，并能将焚烧飞灰生产的玻璃体进一步转化为建筑材料。

3.3. 化学稳定化处理技术

化学稳定化处理技术通过添加化学药剂使有毒有害物质发生化学反应转变为低溶解性、低迁移性或低毒性物质。一般采用的稳定化药剂有：石膏、磷酸盐、漂白粉、硫化物(硫代硫酸钠、硫化钠)、高分子有机稳定剂、铁酸盐、粘土矿物等[18]。

目前飞灰化学稳定化技术包括 pH 值控制技术，氧化/还原电势控制技术，沉淀技术，吸附技术，离子交换技术[19]等。另外有螯合型重金属稳定化药剂，以其螯合效果显著，稳定性好而受到学者关注。蒋建国等[20]利用多胺与二硫化碳生成二硫代氨基甲酸或其盐处理垃圾焚烧飞灰，并与 Na_2S 和石灰处理飞灰的效果进行了比较，结果表明，在 0.6% 投加量时，重金属螯合剂对飞灰中的主要重金属 Pb、Cd、Zn 和 Cr 的捕集效果都在 95% 以上，远高于无机药剂 Na_2S 和石灰，同时能够有效拓宽飞灰中主要重金属 Pb 和 Cd 达到填埋标准的 pH 值的范围，使得稳定化产物在环境 pH 值改变的情况下能长期稳定存在，二次污染的潜在威胁大为降低。徐颖等[21]研究发现二丙基二硫代磷酸铵(ADD)螯合剂能将江苏某垃圾焚烧发电厂飞灰中的 Pb、Zn 和 Cd 的稳定化率分别达到 95.6%、85.5% 和 93.4%，且受 pH 影响较小，图 3 为 1.5% 添加量条件下各螯合剂对重金属固化率的比较。

化学稳定化处理技术相比于其它处理方法，具有节能、效果好而费用适中的优点。但是，由于该方法通常是在常温下进行，对二噁英没有分解和破坏效果，处理后的飞灰只能用于填埋，后续无法进行合适的资源化开发，是对垃圾焚烧飞灰资源的一种浪费。

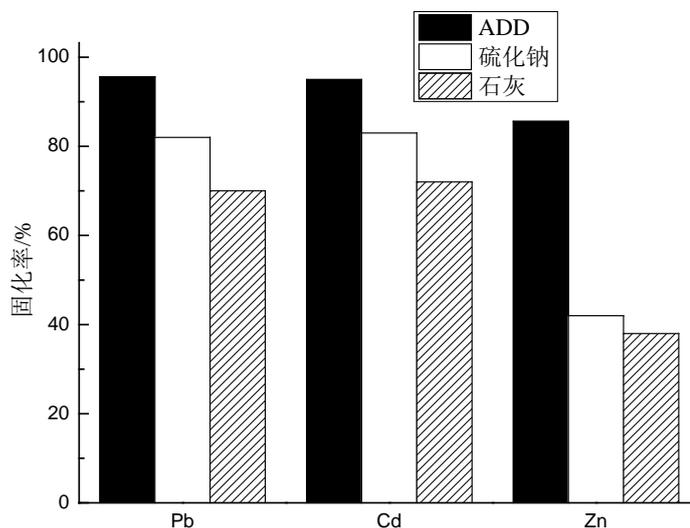


Figure 3. Comparison of fixation rates of heavy metals with different chelating agents

图 3. 不同整合剂对重金属固定率的比较

3.4. 水热处理技术

水热条件下水分子一般具有运动加速、离子积常数增加及扩散系数增大等特点，水热处理技术即于水热条件下利用飞灰中的 Al、Si 源或外加 Al、Si 源在碱性条件下合成硅铝酸盐矿物，将重金属稳定于矿物中。对于重金属的稳定化可选择较低的水热条件[22]。金剑[23]利用水热法处理垃圾焚烧飞灰，发现 Al、Si 元素含量、反应温度和反应时间的提高对重金属稳定化效果起促进作用，最终趋于平稳；水热过程中液固比、碱性物质添加量、初始重金属浓度对于稳定化效果的影响具有波动性。Xie 等[24]研究发现在 533 k 的温度条件下的水热反应中添加 0.1% 碳酰肼，可有效控制垃圾焚烧飞灰中二噁英的毒性，同时添加硫酸亚铁有利于提高重金属的稳定性。

3.5. 生物/化学提取技术

提取技术是指将重金属从飞灰中分离出来，实现重金属的回收，同时使飞灰成为普通废物或建筑材料进行资源化利用。提取方法主要包括生物淋滤和化学浸提。生物淋滤法是指通过特定微生物(细菌或真菌)的直接作用或是其新陈代谢过程产生的氧化、还原、络合等间接作用[25] [26]，将重金属溶出的一种湿法冶金方法。生物淋滤的菌种很多，包括有硫杆菌属、铁氧化钩端螺旋菌、硫化杆菌属、酸菌属、嗜酸菌属等，其中广为使用的菌属包括氧化亚铁硫杆菌、氧化硫硫杆菌和铁氧化钩端螺旋菌[27]。Ishigaki 等[28]研究发现多菌种共同作用更有利于重金属的溶浸，一定条件下 Cd 和 Cr 的溶出率高达 100%。因为共培养方式有利于加快细菌的生长速度及增加体系的酸度，而且多菌种并存时各菌种可以相互弥补各自的缺点。

化学浸提法一般是通过加入特定的化学药剂将易溶性重金属提取出来，达到回收利用的目的。常用的试剂包括 HCl、HNO₃、H₂SO₄、NaOH、NH₃ 和螯合剂等。其中 HCl、HNO₃ 可提取几乎所有的金属，H₂SO₄ 能溶解除 Ca、Pb 以外的大部分金属。碱可选择性地提取两性金属如 Zn、Pb。螯合剂能与飞灰中重金属反应生成可溶性配合物以达到提取重金属的目的[29]。但限于目前技术成本，生物/化学提取技术无法大规模开展实际应用。

以上是几种常见的垃圾焚烧飞灰无害化处理技术，其优缺点见表 3。

Table 3. Comparison of harmless treatment methods for MSWI fly ash
表 3. 各种垃圾焚烧飞灰无害化处理方法比较

飞灰处理方法	优点	缺点
介质固化技术	技术成熟, 成本低廉, 操作简单	增容增量较大, 二噁英等有机危害物未得到有效处理, 重金属稳定效果仍需长时间验证
高温稳定技术	减容减量效果好, 重金属稳定性高, 有机危害物得到充分分解	技术设备成本高, 能耗大, 推广难度大
化学稳定化处理技术	增容增量小, 重金属稳定性高,	难以实现多种重金属的同时固定, 对二噁英等有机污染物无较好的固定效果
水热处理技术	飞灰无害化程度高, 处理后产物可利用	处理设备成本及要求较高
生物/化学提取技术	重金属可回收利用, 反应条件要求较低	成本高, 重金属含量低, 回收困难

4. 飞灰的资源化技术

4.1. 用作建筑材料

4.1.1. 用作水泥制备

由于垃圾焚烧飞灰中含有大量的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等物质, 与火山灰材料十分类似, 且与水混合后自身存在一定的凝硬特性, 在水泥窑生产水泥熟料的过程中添加一定量的焚烧飞灰, 可在不降低成品各项品质的前提下, 制备出符合生产要求的水泥。此外水泥窑内烧成温度高达 1450°C , 物料停留时间长, 重金属以化学方式固化到熟料中, 二噁英也可被彻底破坏。另外, 若利用飞灰部分取代水泥生产制作中的 CaCO_3 , 不仅可以减少 CaCO_3 煅烧时所消耗的能量, 也可减少 CaCO_3 分解时所产生的 CO_2 , 达到保护环境的目的。早在 1997 年, 日本秩父小野田公司就以城市垃圾焚烧飞灰和下水道污泥等为主要原料生产出了高强度水泥, 并建成了世界上第一座生态水泥厂, 2001 年日本太平洋水泥株式会社建成了世界上第一条利用垃圾焚烧飞灰生产普通硅酸盐水泥生产线[30], 现如今更有不少国家和地区将水泥厂和垃圾处理厂联合起来、互相协作[31]。

4.1.2. 用作陶粒制备

陶粒是一种人造轻质骨料, 以其轻质、高强的优点在建筑领域代替天然的碎石、河沙等材料, 获得了广泛的应用。利用垃圾焚烧飞灰与其他生料混合配比, 可制得合格的陶粒。其生产流程如图 4 所示[32]:

陶粒生产过程中, 垃圾焚烧飞灰被加热至 1050°C 左右, 与其他生料在回转窑中混合煅烧, 形成生料球, 之后迅速冷却形成陶粒。飞灰中的二噁英在 1000°C 以上高温下被迅速分解, 同时其中存在的重金属如 Pb 、 Cr 、 Cd 等在煅烧时会在料球中熔融固化, 冷却后被陶粒的釉质外壳包裹, 不易浸出。

4.1.3. 用作沥青玛蹄脂制备

Xue 等[33]研究利用飞灰部分替代沥青玛蹄脂中的轻集料或细砂的可行性, 测试包括马歇尔稳定度、水敏性、弹性模量、疲劳及车辙。结果表明, 添加飞灰后其所有测试指标均优于沥青混合物。TCLP 测试其对环境的影响, 结果表面沥青是一种能有效稳定垃圾焚烧飞灰中重金属的固化剂。

4.2. 用作吸附材料

垃圾焚烧飞灰普遍具有粒径小, 比表面积大的特点, 这为利用飞灰制备吸附材料提供了必要的物理条件。

Yang [34]研究发现, 对城市焚烧飞灰进行水热法处理可以制备具有一定沸石结构的类沸石材料, 并且改变水热釜中 NaOH 溶液的浓度可以制备得如钙沸石、菱沸石等不同结构的类沸石材料。虽然水溶液

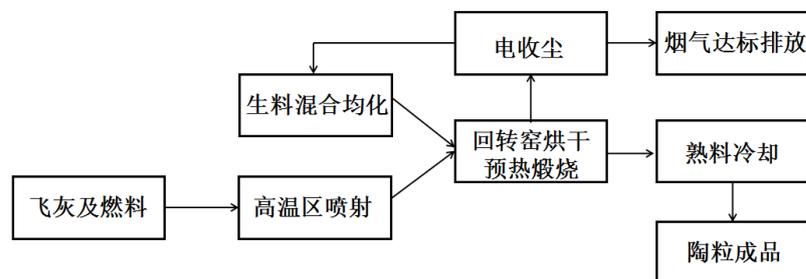


Figure 4. Production process of ceramsites adding MSWI fly ash
图 4. 陶粒添加焚烧飞灰生产流程

含有高浓度的重金属元素需要进一步处理，但最终合成产物中 Cd、Pb 等重金属浸出浓度远低于环保局标准。

李夫振等[35]研究了垃圾焚烧飞灰对亚甲基蓝的吸附能力，研究了飞灰粒径、用量、温度、pH 和初始浓度等因素对吸附效果的影响，对亚甲基蓝最高吸附率可达 99.46%。吸附上清液中除了 Pb 外，其余重金属含量均低于浸出毒性的限定值。

4.3. 用作土壤改良剂

飞灰中含有大量的磷和钾元素，这是植物生长所需的肥料，此外飞灰中含有的 CaO 可以调节土壤酸碱性，具有改善土壤的能力，因此飞灰作为土壤改良剂方面具有一定的潜力。但飞灰中的重金属渗透到环境中，容易通过物质循环聚集到动植物体内，危害环境及人体健康，另一方面飞灰中的高浓度可溶解氯盐易导致植物脱水死亡。

5. 总结与展望

我国对于垃圾焚烧飞灰无害化及资源化再利用研究的起步较晚，许多新型技术仍处在研究阶段。传统的飞灰无害化技术相对研究较多，但其中仍有不少缺陷难以克服：水泥固化填埋处理增容量大，高温处理技术成本高，化学药剂稳定化并没有彻底分解破坏二噁英，仍有潜在危害等。此外，利用飞灰生产的水泥陶粒等建材的资源化技术也因为地域制约和污染物去除效果的质疑而只能小范围应用，无法在国内大范围推广。因此，开发一种或几种新型有效，符合我国相关国情的垃圾焚烧飞灰处理技术的期望变得越发迫切。

同时，新型的焚烧飞灰资源化技术越来越受到各国学者的关注和研究，诸如水热处理技术，热等离子体技术等，以其节能，高效，固化效果好，后续处理用途广等因素而受到欢迎。虽然尚未能投入实际应用，但随着相关研究的深入与开发，相信会研发越来越多的焚烧飞灰处理工艺，在国内及国际得到更广泛的发展与应用。

参考文献 (References)

- [1] 环境保护部. 2016 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[J]. 中国资源综合利用, 2016(11): 14-20.
- [2] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396.
- [3] 罗宇, 石英. 垃圾焚烧发电厂飞灰稳定化处理技术研究进展与展望[J]. 热力发电, 2004, 33(2): 69-72.
- [4] 张庆红. 我国目前垃圾焚烧处理现状[J]. 锅炉制造, 2006(3): 41-42.
- [5] Oh, J.E., Lee, K.T., Lee, J.W., et al. (1999) The Evaluation of PCDD/Fs from Various Korean Incinerators. *Chemosphere*, **38**, 2097-2108. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00419-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00419-6)
- [6] Stanmore, B.R. (2004) The Formation of Dioxins in Combustion Systems. *Combustion & Flame*, **136**, 398-427.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.11.004>

- [7] Bie, R., Chen, P., Song, X., *et al.* (2016) Characteristics of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash with Cement Solidification Treatment. *Journal of the Energy Institute*, **89**, 704-712. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.04.006>
- [8] 常威, 蒋旭光, 邱琪丽, 等. 螯合剂与水泥协同稳定垃圾焚烧飞灰中的重金属[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 6019-6026.
- [9] 黄本生, 刘清才, 王里奥. 垃圾焚烧飞灰综合利用研究进展[J]. 环境工程学报, 2003, 4(9): 12-15.
- [10] Goh, C.K., Valavan, S.E., Low, T.K., *et al.* (2016) Effects of Different Surface Modification and Contents on Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash/Epoxy Composites. *Waste Management*, **58**, 309. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.027>
- [11] 张晓萱, 席北斗, 王琪, 等. 垃圾焚烧飞灰熔融过程中重金属的固化机理以及熔渣浸出特性的研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(5): 330-332.
- [12] 田书磊, 王琪, 汪群慧, 等. 垃圾焚烧飞灰熔融过程中重金属固化特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10): 1576-1580.
- [13] 李润东, 于清航, 李彦龙, 等. 烧结条件对焚烧飞灰烧结特性的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 60-63.
- [14] Mangialardi, T. (2001) Sintering of MSW Fly Ash for Reuse as a Concrete Aggregate. *Journal of Hazardous Materials B*, **87**, 225-239.
- [15] Venkatramani, N. (2002) Industrial Plasma Torches and Applications. *Current Science*, **83**, 254-262.
- [16] Bonizzoni, G. and Vassallo, E. (2002) Plasma Physics and Technology: Industrial Applications. *Vacuum*, **64**, 327-336.
- [17] 遇鑫遥, 施加标, 孟月东, 等. 热等离子体技术处理危险废物研究进展[J]. 环境污染与防治(网络版), 2008(2): 1-8.
- [18] 张瑞娜, 赵由才, 许实. 生活垃圾焚烧飞灰的处理处置方法[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, 16(1): 22-29.
- [19] 李巍. 城市垃圾焚烧飞灰资源化利用现状[C]//中国科学技术协会、重庆市人民政府. 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(2). 中国科学技术协会、重庆市人民政府, 2009: 5.
- [20] 蒋建国, 王伟. 重金属螯合剂处理焚烧飞灰的稳定化技术研究[J]. 环境科学, 1999(3): 13-17.
- [21] 徐颖, 陈玉, 冯岳阳. 重金属螯合剂处理垃圾焚烧飞灰的稳定化技术[J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1833-1839.
- [22] 熊祖鸿, 范根育, 鲁敏, 等. 垃圾焚烧飞灰处置技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(7): 1678-1684.
- [23] 金剑. 水热法垃圾焚烧飞灰重金属稳定化处理及同步去除废水中重金属[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [24] Xie, J.L., Hu, Y.Y., Chen, D.Z., *et al.* (2010) Hydrothermal Treatment of MSWI Fly Ash for Simultaneous Dioxins Decomposition and Heavy Metal Stabilization. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, **4**, 108-115. <https://doi.org/10.1007/s11783-010-0013-8>
- [25] Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., *et al.* (2003) Bioremediation Review Part A: Progress in Bioremediation: Fundamentals and Mechanisms of Bacterial Metal Sulfide Oxidation. *Applied Microbiology & Biotechnology*, **63**, 239. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1448-7>
- [26] Fowler, T.A., Holmes, P.R. and Crundwell, F.K. (2001) On the Kinetics and Mechanism of the Dissolution of Pyrite in the Presence of Thiobacillus Ferrooxidans. *Hydrometallurgy*, **59**, 257-270.
- [27] 薛璐, 徐颖, 谢志钢, 等. 生物淋滤技术处理垃圾焚烧飞灰中的重金属[J]. 环境保护科学, 2011, 37(3): 1-4.
- [28] Ishigaki, T., Nakanishi, A., Tateda, M., *et al.* (2005) Bioremediation of Metal from Municipal Waste Incineration Fly Ash using a Mixed Culture of Sulfur-Oxidizing and Iron-Oxidizing Bacteria. *Chemosphere*, **60**, 1087-1094.
- [29] 陶景忠, 田涛. 城市生活垃圾焚烧飞灰资源化利用研究[J]. 污染防治技术, 2015(6): 25-28.
- [30] 韩仲琦. 日本水泥生态化技术的研究与开发[J]. 中国水泥, 2003(7): 27-30.
- [31] 施惠生, 袁玲. 生态水泥的研究与进展[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(2): 166-172.
- [32] 陈炜. 处置垃圾焚烧飞灰的陶粒生产工艺[J]. 广东建材, 2013(6): 34-37.
- [33] Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., *et al.* (2009) Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Stone Mastic Asphalt Mixture: Pavement Performance and Environmental Impact. *Construction & Building Materials*, **23**, 989-996.
- [34] Yang, G.C.C. and Yang, T.Y. (1998) Synthesis of Zeolites from Municipal Incinerator Fly Ash. *Journal of Hazardous Materials*, **62**, 75-89.
- [35] 李夫振, 周少奇, 黎强, 等. 垃圾焚烧飞灰对染料(亚甲基蓝)的吸附性能[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 4072-4078.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org