

综合利用与环保

垃圾焚烧飞灰无害化处置产业现状及技术进展

陈宋璇, 王 云, 王 昊

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 随着我国经济的快速发展和城镇化水平的提高,垃圾焚烧逐渐成为城市生活垃圾无害化处理的主要方式,但产出的飞灰因具有较高的浸出毒性和重金属浓度而归为危险废物,因此,焚烧飞灰无害化、资源化成为社会焦点问题。本文论述了生活垃圾焚烧飞灰的来源、危害及产排现状,重点阐述了生活垃圾焚烧飞灰的无害化处置技术及资源化利用途径,涉及固化/稳定化技术、分离萃取技术、热处理技术和协同处置技术等,综合分析了各无害化处置方法的优缺点,并基于现有垃圾焚烧飞灰处置的问题提出多技术联用新工艺思路,形成一步解决主要问题,多种方法辅助和按次序分多步骤、逐步解决问题的两种组合工艺,并对飞灰无害化处理及资源化利用提出了建议和展望。

[关键词] 垃圾焚烧;生活垃圾;飞灰;危险废物;无害化处置;资源化利用;技术进展;多技术联用

[中图分类号] X758

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2022)06-0071-10

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.06.011

焚烧,作为城市生活垃圾无害化、减量化、资源化处置的高效手段,已成为现阶段生活垃圾处理的关键技术及主流方式。国家发改环资[2021]642号《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》指出,“十三五”期间,全国共建成生活垃圾焚烧厂254座,累计在运行的生活垃圾焚烧厂超过500座,焚烧设施处理能力达到58万t/d,全国城镇生活垃圾焚烧处理率约45%,初步形成了新增处理能力以焚烧为主的垃圾处理发展格局;并提出,到2025年底,全国城市生活垃圾资源化利用率达到60%左右,全国城镇生活垃圾焚烧处理能力达到80万t/d左右,城市生活垃圾焚烧处理能力占比65%左右^[1]。

垃圾焚烧过程产生的固体残留物飞灰含有较高浸出浓度的重金属和高毒性当量的二噁英等毒害物质,被列入《国家危险废物名录》^[2],备受社会关注。

我国大中型城市生活垃圾焚烧产生的飞灰量大,以填埋为主的处置方式会造成土地资源极度浪费。据调查,全国垃圾填埋场已接近饱和状态,鉴于土地资源紧缺的现状,目前全国多个省份原则上已不再审批填埋场建设。因此,亟需找出一条既能有效处理飞灰又能节约土地资源的有效途径。

1 垃圾焚烧飞灰的来源及危害

垃圾焚烧飞灰是指烟气净化系统捕集物和烟道及烟囱底部沉降的底灰,一般包括吸收塔飞灰和除尘器飞灰^[3]。飞灰是由粒径4~100 μm的粉状颗粒物组成,比表面积在170~1 000 m²/kg之间,有害物质主要为二噁英类有机物、重金属、氯盐等;根据飞灰中碳含量的不同,飞灰颜色从棕褐色到灰色、黑色不等^[4],其具体组成主要与焚烧及烟气净化工艺有关。飞灰中含有Hg、Pb、Cr、Cd、As等大量重金属^[5],重金属进入土壤、地表水和地下水后,不仅对植物产生毒害,还可以通过食物链在生物体内累积^[6]。二噁英是多氯代二苯并二噁英和氯代二苯并呋喃的统称,被称为“世界上最毒的物质”^[7-8],飞灰中二噁英类有机物的含量可高达5 ng/g。自1977年Olie等^[9]首次发现垃圾焚烧过程中烟气和

[收稿日期] 2022-08-16 [修订日期] 2022-09-25

[录用日期] 2022-09-28 [出版日期] 2022-12-28

[作者简介] 陈宋璇(1987—),男,江西抚州人,硕士,高级工程师,从事固废处理及大气污染防治方面的研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划资助(2019YFC1904600)。

[引用格式] 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.

飞灰中含痕量的二噁英以来,二噁英的环境污染问题持续引起重视。

2 我国垃圾焚烧飞灰的产排现状

2.1 垃圾焚烧现状及飞灰产量

随着我国城镇化的快速发展,城市生活垃圾的产量逐年递增。2019 年全国 337 个一至五线城市的生活垃圾生产量达约 3.43 亿 t,垃圾清运量 2.42 亿 t,2020 年中国城市垃圾产生量达 3.6 亿 t,垃圾清运量 2.35 亿 t^[10]。



图1 2015—2020 年我国生活垃圾产量

Fig.1 Domestic waste output in China from 2015 to 2020

图2 表明,近 10 年来,我国生活垃圾无害化处理处置规模保持增长趋势,垃圾无害化处理率逐年提升,从 2012 年到 2021 年,我国城市生活垃圾无害化处理率从 84.83% 增长到 99.88%。垃圾焚烧作为生活垃圾无害化处理的关键技术之一,其处理规模也呈现出逐年递增趋势,到 2021 年,生活垃圾无害化处理中焚烧占比达到 68.1%,垃圾焚烧将逐步成为生活垃圾无害化处理的主要方式^[11]。

目前,生活垃圾焚烧主要有炉排炉(LP)和流化床(CFB)两种形式,炉排炉和流化床焚烧炉产生的飞灰量为入炉垃圾质量的 3% ~ 5% 和 15% ~ 20%^[12-13],相比较流化床焚烧炉,炉排炉的突出优势表现在单台处理量大、动力消耗小、烟气粉尘含量低、磨损小、燃烧技术成熟等方面,经过多年发展,炉排炉以其独特优势逐渐成为垃圾焚烧发电领域的主流工艺方法^[14]。2018 年,炉排炉市场份额已超过 80%,到 2020 年炉排炉市场份额接近 90%。2020 年我国生活垃圾焚烧产生的飞灰量已超过 750 万 t,同比增长超过 10%。

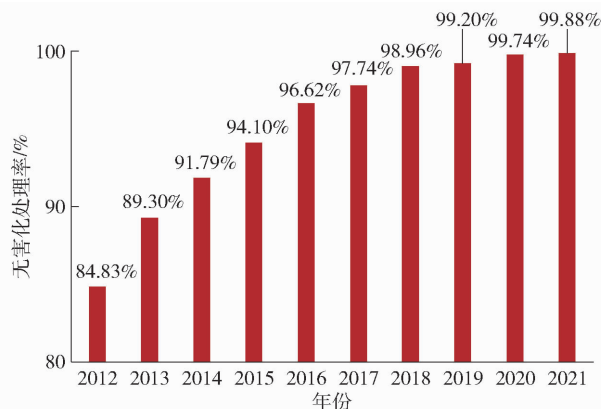


图2 2012—2021 年我国城市生活垃圾无害化处理率

Fig.2 Harmless treatment methods of domestic garbage in China city from 2012 to 2021

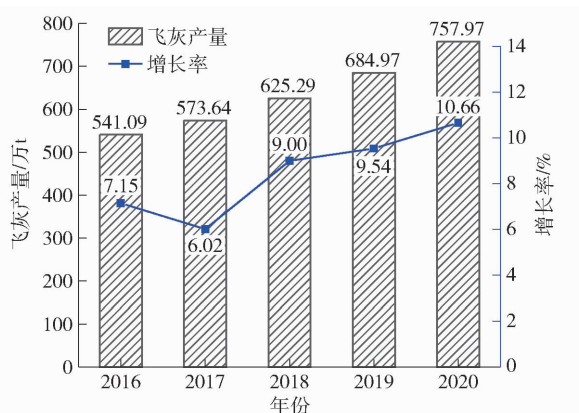


图3 2016—2020 年生活垃圾焚烧飞灰产量

Fig.3 2016—2020 domestic waste incineration fly ash output

2.2 垃圾焚烧飞灰资源化处置的发展趋势

生活垃圾焚烧飞灰处置主要有飞灰填埋、产业协同等方式,各产业分布占比如图 4 所示,填埋作为最成熟的处理方式占比高达 90%。飞灰填埋一般采用固化处理技术,存在较大的毒性浸出风险;飞灰产业协同是飞灰资源化利用的有效途径,为垃圾焚烧飞灰处置、生态环境保护提供了解决方案;其他处置生活垃圾焚烧飞灰的方式包括熔融玻璃化等。围绕飞灰的资源化利用进行布局,将成为未来飞灰无害化、减量化、资源化利用的主要发展方向。

2.3 飞灰资源化处置政策和价格

2020 年 8 月,《生活垃圾焚烧飞灰污染控制技术规范》(试行)为低温热分解、高温烧结、高温熔融等新技术工程化应用提供依据,且明确了飞灰经过

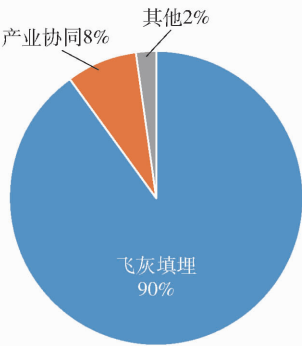


图 4 垃圾焚烧飞灰处置的产业分布

Fig. 4 Industrial distribution of incineration fly ash disposal

处理后二噁英、重金属、氯盐三种物质的残留量,飞灰处理产物按照 GB34330 进行鉴别。2021 年 5 月,国家发改委、住房城乡建设部发布《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》[发改环资[2021]642 号中]指出,要补齐焚烧飞灰处置设置短板,开展飞灰处置技术试点示范,鼓励有条件的地区开展飞灰熔融处理、飞灰深井贮存、工业窑炉协同处置、飞灰烧结制陶粒、作为掺合料制作混凝土等技术的应用,鼓励飞灰中重金属分离回收技术开发应用。

北京市、上海市、广东省、浙江省、江苏省、山东省等经济发达省(直辖市)飞灰处理政策和费用存在较大差异(表 1),但均呈现鼓励少进填埋场,进行协同处置或无害化、资源化处理的趋势。按处理飞灰平均费用 1 500 元/t 估算,到 2025 年,垃圾焚烧飞灰处理产业具有近 265 亿元/年的市场容量(图 5)。

表 1 国内经济发达省市飞灰处置量和费用

Table 1 Disposal amount and cost of fly ash in economically developed provinces and cities in China

地区	“十三五”期间垃圾焚烧日处理量/(万 t/d)	垃圾焚烧飞灰日处理量/(万 t/d)	吨飞灰处置费用/(元/t)
北京	1.675	0.054 4	1 580 ~ 2 400
上海	2.89	0.058 ~ 0.15	1 860
广东	9.14	0.18 ~ 0.46	1 700
江苏	7	0.14 ~ 0.35	2 000 ~ 20 000
浙江	8	0.16 ~ 0.40	3 000 ~ 4 000
山东	5	0.21	1 300 ~ 1 500

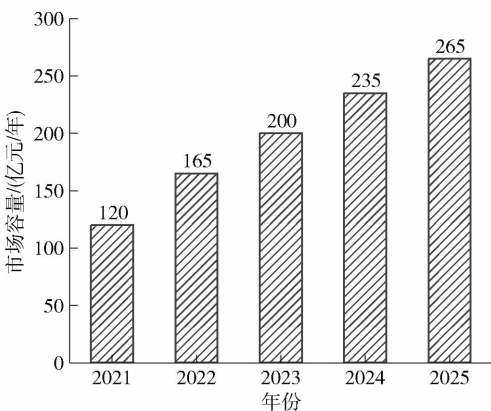


图 5 垃圾焚烧飞灰处置市场容量估算

Fig. 5 Market capacity estimation of incineration fly ash disposal

3 飞灰处置技术

城市生活垃圾焚烧飞灰为浅灰色粉末状颗粒,结构复杂,有球状、针状、棉絮状与多角质状等形态结构,堆积密度约为 0.6 ~ 0.8 g/cm³[15]。典型飞灰采用 X 射线荧光光谱分析测量的化学成分如表 2 所示[18]。飞灰处置的关键问题涉及重金属、二噁英和氯盐脱除等。一般垃圾焚烧飞灰中的重金属总量占飞灰整体质量的 0.5% ~ 3.0%,二噁英的毒性当量值集中在 0.10 ~ 20.00 ng/g,盐类以可溶性氯盐 NaCl、KCl 等为主,其含量高达 20% ~ 30% [16]。推进飞灰中重金属、二噁英及氯盐的处置是实现飞灰资源化利用的关键,目前飞灰资源化和无害化处置方法大致可分为固化/稳定化、热处理法、分离/萃取法和协同处置技术[17]。

3.1 固化/稳定化技术

固化与稳定化技术主要是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,常见的方法包括:水泥固化、化学药剂螯合固化、水热法及机械化学法等[19-20]。

水泥固化是利用水泥的水化反应过程使飞灰中的重金属固化于硅酸盐中,固化后一般呈氢氧化物或络合物等形态[21]。化学药剂螯合固化是利用化学药剂生成难溶、稳定的化合物,以阻断飞灰中重金属的析出,使其溶解性、迁移性及毒性物质降低到安全程度[22]。水热处理技术是指在碱性环境下,向飞灰中添加一定量的硅源、铝源,在特定温度、压力下发生晶化形成沸石等矿物相,利用生成的矿物相进

表 2 中国不同地区不同炉型垃圾焚烧飞灰的化学组成

Table 2 Chemical composition of fly ash from different types of MSW incineration in different areas of China

地区	焚烧飞灰化学成分									炉型
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cl	SO ₃	
北京	35.80	8.82	1.66	3.25	4.09	4.56	1.42	20.70	7.43	LP
天津	38.40	4.90	1.40	2.60	8.10	7.90	2.50	20.20	7.30	LP
上海	25.34	18.20	6.74	2.39	4.34	5.51	3.65	12.29	13.01	LP
杭州	34.39	3.42	2.58	—	—	11.38	1.85	24.31	5.33	LP
株洲	38.12	5.80	2.79	—	—	1.32	1.03	17.99	—	LP
太原	26.20	18.10	11.90	4.07	3.46	5.22	4.11	4.88	5.14	CFB
忻州	35.30	17.70	17.40	2.78	0.42	0.25	2.44	1.07	3.77	CFB
东莞	16.60	27.52	11.00	3.14	4.24	4.00	5.04	10.32	8.34	CFB

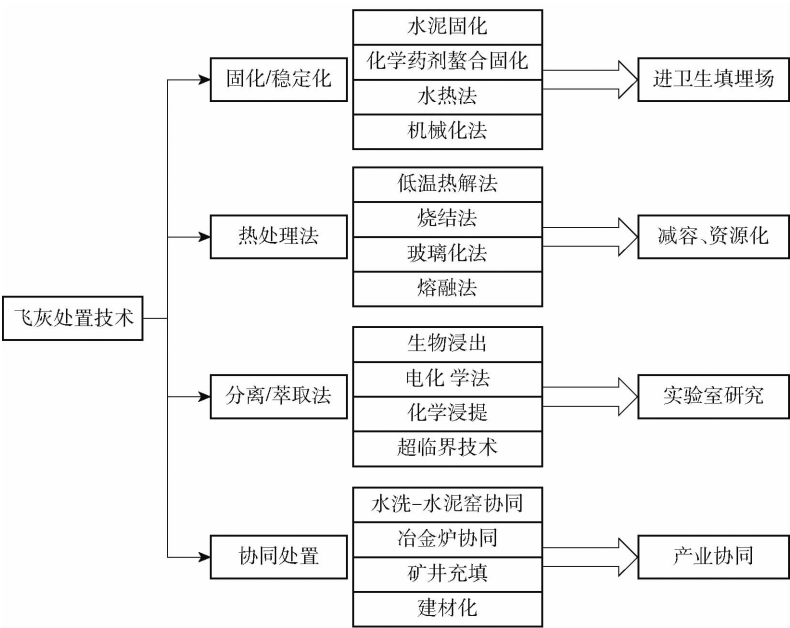


图 6 飞灰处置技术示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fly ash disposal technology

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^[23]。机械化学法的机理是通过机械力的多种作用方式,如碰撞、压缩、剪切、摩擦等,对固体反应物进行改性,诱导其物理化学性质发生变化,增加其反应活性,从而激活或加速固体间的化学反应,同时实现飞灰中重金属的固化和二噁英的降解^[24]。

3.2 分离与萃取技术

分离萃取法是指将重金属从飞灰中提取出来,使飞灰转化为无害物质,实现其资源化利用,分离萃取法包括生物/化学浸提、超临界萃取、电化学技术等^[25]。

生物浸提是利用微生物在生命活动中自身的氧化和还原特性,使飞灰中的有用成分被氧化或还原,

在水溶液中以离子态或沉淀的形式与原物质分离^[26]。化学浸提是在飞灰中加入化学药剂,通过化学反应使得飞灰中的重金属浸出。超临界流体萃取技术是指利用流体在超临界状态下,温度和压力发生微小变化时,溶质的溶解度会发生较大的改变,从而进行分离提纯^[27]。电化学处理技术是利用电子转移的作用使飞灰在处理过程中发生氧化还原、电解等反应^[28],飞灰中的重金属离子因氧化还原作用而在电极两侧沉淀析出。

3.3 热处理技术

热处理技术是利用高温将飞灰中的有机污染物(二噁英和呋喃等)进行降解,并将重金属稳定于致密的结构体中^[29]。经过热处理后的产物化学性质稳定,能有效阻止污染物迁移,处理后的飞灰

产物减容显著,固化后的产物可作为建筑材料,用于路基、地基等建筑行业。根据降解温度的不同,常见的热处理方法包括:低温热解法、烧结法、熔融玻璃化法等^[30]。

低温热处理技术是在较低温度条件下实现二噁英的分解^[31],1987 年,德国教授 Hagenmaier^[32] 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,陈宋璇等^[33] 搭建了二噁英分解装置,研究发现控制温度 300 ~ 400 °C、O₂ 浓度 ≤ 0.1%、冷却系统降温至 100 °C 以下时,二噁英的分解率在 99% 以上。

烧结法处理飞灰是在低于熔融温度的条件下为粉末颗粒提供扩散能量,将大部分甚至全部气孔从飞灰中排除,将飞灰变成致密坚硬的烧结体,实现有害物质的包裹和固化,使其符合相关材料性能要求^[34]。王建伟等^[35] 将垃圾焚烧飞灰在高温下烧结,烟囱中 PCDD/Fs 排放量为 0.017 ~ 0.020 ng/m³,低于欧盟标准 0.1 ng/m³,烧结后的建材基材中 PCDD/Fs 的含量降至 0.008 9 ~ 0.009 5 μg/kg,去除率达 90.09% ~ 91.97%。

熔融技术是目前国内外一项比较先进的垃圾焚烧飞灰无害化、资源化处理技术,在高温热源的作用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^[36-37]。玻璃化与熔融法类似,是将飞灰与玻璃料的混合物加热到熔融温度,急冷后形成玻璃态,其主体结构是由 [SiO₄] 四面体构成的网状结构。飞灰熔融处理后所得样品无害化程度高、稳定性好,减量效果显著。张楚等^[38] 研究指出,飞灰熔融玻璃体中以 Ca 和 Si 的化合物为主要成分,超过 45% 的 Cu、30% 的 Zn、Cd、Pb 和 45% 的 Ni、Cr 等重金属封存在熔融玻璃体中。高静等^[39] 通过添加 15% B₂O₃ 使流动温度从 1 211 °C 降至 986 °C,提升了重金属固化效果。曹熠等^[40] 开展了电弧炉高温熔融处理焚烧飞灰的技术应用研究,熔渣冷却后形成的玻璃体中重金属浸出浓度符合浸出毒性标准要求。

3.4 协同处置技术

协同处置技术是将焚烧飞灰作为原料或添加物,掺入矿山、冶金、建材等行业的物料中,在不影响原有工艺及产品性能的条件下实现焚烧飞灰的消纳处置^[41]。2019 年科技部组织制定的国家重点研发

计划“固废资源化”重点专项实施方案,提出应利用好京津冀地区工业设施完善,钢铁冶金、水泥熟料产能规模大的优势,继续提升冶金、建材等工业设施协同消纳飞灰、油泥等危险废物的比例^[42]。按照当前协同处置技术消纳率,京津冀区域飞灰消纳潜力巨大^[43]。常见的协同处置技术包括:水洗-水泥窑协同、冶金炉协同、矿井充填、建材化等^[44]。

水泥窑协同处置是将垃圾焚烧飞灰在窑炉中煅烧,从而将有害的重金属固化在水泥熟料中^[45]。1997 年日本率先以城市垃圾焚烧飞灰为主要原料生产出了高强度水泥,拉开了水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰的工业化之路。我国相关技术起步较晚,2012 年金隅琉璃河水泥公司建成了国内首条城市垃圾焚烧飞灰无害化处置的示范线,目前飞灰年处理能力达 12 万 t,但飞灰进窑协同处置前一般需要进行水洗脱氯处理^[46]。

钢铁工业生产流程温度高、规模大、污染治理体系完善,钢铁工业协同处置飞灰可以利用现成的主体设备和污染治理设备,极大节约固废处置的投资成本^[47],飞灰中主要组分 CaO 是冶金过程需要添加的熔剂,但是挥发性金属及 Cl 等元素则属于有害元素,应严格控制其入炉总量。刘征建等^[48] 提出采用冶金炉处置飞灰的工艺,通过模拟计算指出控制温度 1 400 ~ 1 550 °C、碱度 1.0 ~ 1.2 时,飞灰中的硅钙镁等物质熔化,并使炉渣具有较好的流动性,保证炉渣顺利排出;试验中将飞灰与水泥按照 7:1 添加进行压块,并在冶金炉中进行熔融处理,实现了垃圾焚烧飞灰的无害化处理。肖恒等^[49] 将飞灰配入转炉窑进行协同处置,当飞灰配入量为 28% 时,焙烧温度可以降至 1 100 °C,且 K、Na、Pb、Zn、Cl 的脱除比例分别从 61.32%、46.65%、36.09%、10.99%、77.06% 提高到 97.93%、68.96%、87.91%、59.76%、93.79%,焙烧后物料可返回冶金炉窑回用。

工业固废与飞灰作为胶凝材料,与尾矿砂等一起制成充填材料,可用于矿山充填^[50]。王珂等^[51] 以铁尾矿砂为骨料,高炉矿渣粉、飞灰和少量脱硫石膏为胶凝材料,当飞灰、矿渣、脱水石膏质量比为 60%:36%:4% 时,所制成的充填材料 28 d 抗压强度为 13.18 MPa,高于我国矿山实际胶结充填强度一般值 1 ~ 6.5 MPa^[52]。

利用飞灰与水泥制备免烧砖,其抗压强度可达到国标建筑用砖 MU20 级及以上。许鹏等^[53] 使用

焚烧飞灰、燃煤飞灰及矿渣粉为原料制备碱激发砖材,飞灰最大掺量 40%,制得试件 28 d 抗压强度达 28.69 MPa,且重金属固化稳定性好。李强等^[54]利用飞灰制备混凝土空心砖,飞灰最大掺量达到 50%,其抗压强度为 33.9 MPa,符合 MU30 的标准。

不同飞灰处理方法的优缺点如表 3 所示,其中固化/稳定化-填埋技术是目前国内飞灰处置的主

要技术之一,但存在占地广、二噁英渗透和重金属浸出的潜在环境风险。熔融/玻璃化技术减容效果好,对大部分重金属的固化及二噁英去除效果较好,但其能耗较大。水泥窑协同处置技术可有效去除二噁英,同时将飞灰中 99% 以上的重金属固化,但入窑前需增加水洗飞灰工艺及浓盐废水处理设施,投资成本较高。

表 3 各类飞灰处理方法优缺点

Table 3 Advantages and disadvantages of various fly ash treatment methods		
技术分类	飞灰处理方法	优缺点
固化/稳定化	化学药剂固化	优点:操作简单,处理成本适中;缺点:飞灰成分复杂,长期稳定性待监测,二噁英未除去。
	水热稳定化	优点:化学稳定性好,能够资源化,降解二噁英效果好;缺点: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。
	水泥固化	优点:水泥来源丰富,易施工,处理费用适中;缺点: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。
热处理	熔融固化	优点:熔渣稳定性好,减容效果好,重金属浸出极低;缺点:能源消耗较高,低熔点重金属受热挥发易造成二次污染,需特殊设备,生产成本较高。
分离/萃取法	生物淋滤	优点:可回收重金属;缺点:微生物培养难,生产周期长,二噁无法分解,产生废水。
	化学、电化学浸提	优点:可回收重金属,缺点:电耗高,产生废液,实用性差,生产成本高昂。
协同处置	生产水泥	优点:可实现资源化;缺点:水洗脱氯成本高,掺杂比例有限。
	冶金协同消纳	优点:可实现资源化;缺点:受热挥发易造成二次污染,需特殊处理设备,需评估对生产原系统的影响。
	矿井充填	优点:可实现无害化,成本低;缺点:氯盐对充填有影响,重金属长期稳定性待研究。
	生产砖	优点:能耗低,处理方便,可实现资源化;缺点:长期使用会有重金属浸出,稳定性差。

4 新技术研究思路

垃圾焚烧飞灰处理技术多样,其中固化/稳定化处理技术较为成熟,水泥窑协同处置技术逐渐普及迈向工业化,高温熔融技术、水热处理技术等还在不断推进,但是每种技术各有利弊,想要实现垃圾焚烧飞灰的无害化、资源化处置,实现环境和经济的可持续发展,还需进一步研发新技术。图 7 为垃圾焚烧飞灰无害化处置新技术研究思路。

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,图 7 针对可溶性氯盐二噁英、重金属含量高等问题提出解决思路:通过水溶液洗涤分离、热态下渣盐分层分离等方式实现飞灰中氯盐的分离;基于脱氯反应脱除二噁英,使其分解为无毒小分子;采用药剂螯合稳定重金属,减少浸出毒性,并通过高温熔融固化,实现重金属无害化处置。提出 2 种技术模式:“1 + N”表示一步解决主要问题,其他多种方法辅助;“X + Y + Z”表示按次序多步骤、逐步解决问题,形成多技术联用组合工艺。技术创新可借助固化/稳定化、热处理、分离/萃取、协同处置等已有主要处置方法,加强技术的可行性,推动

工程市场化的可用性。

单一技术 + 配套技术(“1 + N”)主要采用高温熔融技术,依靠高温实现二噁英快速分解,熔融态炉渣和盐分层分离,炉渣水碎还可实现重金属固化,可进一步解决二噁英、重金属和氯盐等主要问题,为保证飞灰熔融技术效果,还需要配套技术还包括高温烟气处理、废盐再利用、水碎污水循环利用等。

多技术联用组合工艺(“X + Y + Z”)是实现焚烧飞灰的无害化、资源化处置的趋势,针对飞灰处置过程中存在的基础难题,笔者提出“飞灰脱盐-二噁英低温解毒-重金属亚熔融固化-资源化利用”的多技术联用新工艺,采用飞灰水洗脱盐-分质分离技术实现氯盐脱除,采用低温热解技术降解二噁英,通过亚熔融固化有害重金属,该联合工艺形成流程连贯、低运行成本的飞灰处置技术体系,有利于焚烧飞灰无害化、资源化处置的工业推广应用。

5 对策与建议

1)土地资源紧张,力争实现零填埋。现有固化填埋技术增容较大,占用大量土地资源,且存在二噁英渗透和重金属浸出的潜在环境风险,应积极推进

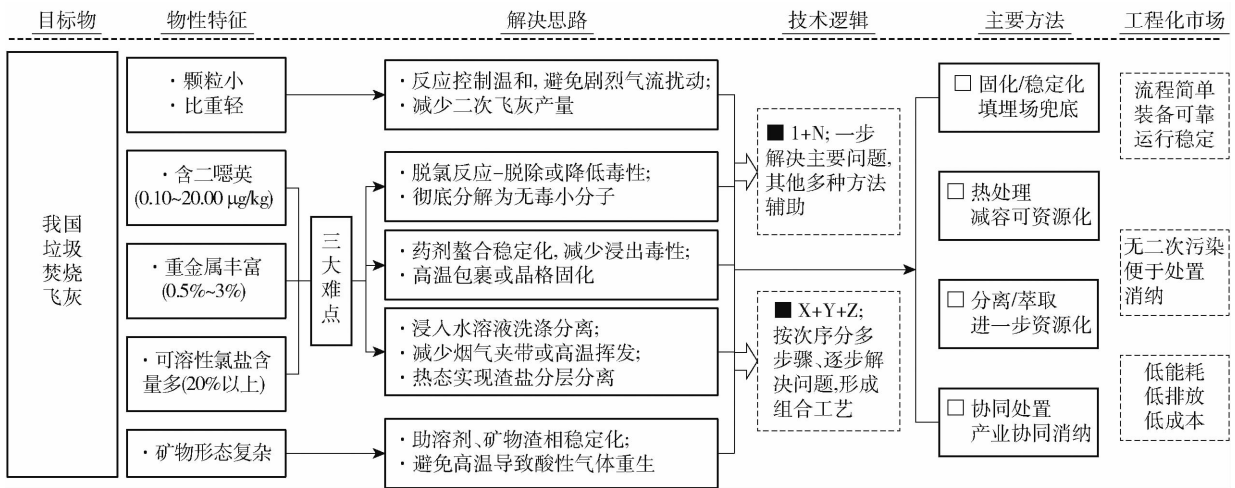


图 7 垃圾焚烧飞灰无害化处置新技术研究思路

Fig. 7 Research ideas on new technology of harmless disposal of waste incineration fly ash

飞灰无害化、资源化处置技术的工程化应用, 优先在发达地区实现飞灰处置零填埋。

2) 拓展单一技术 + 配套技术、多技术联用等组合工艺发展新思路。注重技术多样性发展, 多种技术结合再创新, 取长补短, 将各技术优势组合联用, 通过系统工程师设计, 解决飞灰处置过程中成本高、能耗高、二次污染严重等问题。

3) 完善飞灰处置技术标准规范。产业协同处置将是未来飞灰无害化、资源化处置的重要路径, 应从行业角度出发, 由行业协会组织围绕飞灰处置全过程制定飞灰资源化利用及协同产品的标准规范。

4) 深入推进飞灰无害化、资源化利用新技术。加强技术研发投入, 推进技术发展, 突破热处理技术的工程化、产业化的难点问题。国家及地方提供示范项目支持, 产业引导, 积极推进飞灰无害化、资源化利用技术的产学研一体化发展模式, 为新型技术的工程示范应用成本提供补贴抵税等优惠政策。

[参考文献]

[1] 国家发展改革委 住房城乡建设部关于印发《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》的通知(发改环资[2021] 642 号)[Z]. 2021.
Notice of the National Development and Reform Commission and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on printing and distributing *The Development Plan of Urban Domestic Waste Classification and Treatment Facilities in the Tenth Five-Year Plan* (F. G. F. [2021] No. 642) [Z]. 2021.

[2] 惠家状, 李惠, 郑金召, 等. 新版《国家危险废物名录》对水泥窑协同处置危险废物行业的影响[J]. 水泥, 2021 (7): 20-21.
HUI jiazhuang, LI Hui, ZHENG Jinzhao, et al. The impact of the

new edition of *National Hazardous Waste List* on the co-disposal of hazardous wastes in cement kilns [J]. *Cement*, 2021 (7): 20-21.

[3] 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.
WANG Zhaojia, QIN Yu, GU Jun, et al. Research progress of dioxin control technology in domestic waste incineration fly ash [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10): 116-123.

[4] 刘项, 李传强, 许林季. 垃圾焚烧飞灰处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(9): 2501-2508.
LIU Xiang, LI Chuanqiang, XU Linji. Research progress of waste incineration fly ash treatment technology [J]. *Applied Chemical Engineering*, 2021, 50(9): 2501-2508.

[5] 张覃, 田衍, 岳亚萍, 等. 垃圾焚烧飞灰重金属元素分析标准样品研制[J]. 环境化学, 2019, 38(12): 2682-2689.
ZHANG Qin, TIAN Li, YUE Yaping, et al. Development of a standard sample for analysis of heavy metals in waste incineration fly ash [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(12): 2682-2689.

[6] 张楠. 土壤重金属污染的特点及防治措施探讨[J]. 现代农业, 2010 (11): 22-23.
ZHANG Nan. Discussion on the characteristics and prevention measures of heavy metal pollution in soil [J]. *Modern Agriculture*, 2010 (11): 22-23.

[7] 饶钦全, 王晖, 徐方曦. 生活垃圾焚烧废气中二噁英监测采样研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(7): 116-120.
RAO Qinqian, WANG Hui, XU Fangxi. Study on dioxin monitoring and sampling in waste gas from incineration of domestic garbage [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(7): 116-120.

[8] 王佩华. 持久性有机污染物二恶英的毒性及其对人类的危害[J]. 生态经济, 2009 (7): 187-189.
WANG Peihua. Toxicity of persistent organic pollutant dioxin and its harm to human beings [J]. *Ecological Economy*, 2009 (7): 187-189.

- [9] OLIE K, VERMEULEN P L, HUTZINGER O. Chlorodibenzo-pd-ioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the netherlands [J]. Chemosphere, 1977, 6(8):103-108.
- [10] 灵动核心. 2020 年我国城市生活垃圾产生量及重点城市占比分析 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1672368808729284806&wfr=spider&for=pc>. Smart Core. Analysis of China's urban domestic waste output and the proportion of key cities in 2020 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1672368808729284806&wfr=spider&for=pc>.
- [11] 住房和城乡建设部. 2021 年中国城市建设状况公报 [EB/OL]. 2021. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html> Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Bulletin of china urban construction in 2021 [EB/OL]. 2021. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [12] 章骅, 于思源, 邵立明, 等. 烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响简 [J]. 环境科学, 2018, 39(1): 467-476. ZHANG Hua, YU Siyuan, SHAO Liming, et al. Effects of flue gas purification process and incinerator types on the properties of domestic waste incineration fly ash [J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 467-476.
- [13] 王雷, 金宜英, 李润东, 等. 生活垃圾焚烧飞灰的污染特性 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 21-26. WANG Lei, JIN Yiyang, LI Rundong, et al. Pollution characteristics of domestic waste incineration fly ash [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(7): 21-26.
- [14] 张燕. 我国垃圾焚烧现状及焚烧炉型的技术比较 [J]. 中国资源综合利用, 2015 (1): 33-35. ZHANG Yan. Current situation of waste incineration in China and technical comparison of incinerator types [J]. Comprehensive utilization of resources in China, 2015 (1): 33-35.
- [15] 倪海凤, 旦增, 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. NI Haifeng, DAN Zeng, ZHOU Peng, et al. Research status and progress of municipal solid waste incineration fly ash in China [J]. Renewable Resources and Circular Economy, 2021, 14(3): 24-30.
- [16] 王月香, 邵兰燕, 徐天男, 等. 垃圾焚烧飞灰中氯元素存在形态及深度脱氯的研究 [J]. 无机盐工业, 2021, 53 (5): 78-83. WANG Yuexiang, SHAO Lanyan, XU Tiannan, et al. Study on the existing forms and deep dechlorination of chlorine in waste incineration fly ash [J]. Inorganic Salt Industry, 2021, 53 (5): 78-83.
- [17] 赵洁, 叶红, 张晓佳, 等. 简述垃圾焚烧飞灰处理技术 [J]. 云南化工, 2020, 47(12): 6-8. ZHAO Jie, YE Hong, ZHANG Xiaojia, et al. Brief introduction of waste incineration fly ash treatment technology [J]. Yunnan Chemical Industry, 2020, 47(12): 6-8.
- [18] 李鹏飞. 生活垃圾焚烧飞灰熔融固化重金属研究 [D]. 太原: 山西大学, 2021. LI Pengfei. Study on melting solidification of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [19] 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. CHEN Xin, HU Youbiao, CHA Fugeng, et al. Research progress of harmless disposal technology of municipal waste incineration fly ash [J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2021, 27(19): 146-149.
- [20] 杨彦, 孔昭健. 螯合剂处理生活垃圾焚烧飞灰的稳定化技术研究与实践 [J]. 有色冶金节能, 2019, 35(4): 55-59. YANG Yan, KONG Zhaojian. Study and practice on stabilization technology of the treatment of fly ash from MSW incineration by chelating agent [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2019, 35(4): 55-59.
- [21] 靳美娟. 城市生活垃圾焚烧飞灰水泥固化技术研究 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3235-3241. JIN Meijuan. Research on cement solidification technology of municipal solid waste incineration fly ash [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(6): 3235-3241.
- [22] 王金波, 秦瑞香, 袁茂林, 等. 复合化学螯合剂稳定垃圾焚烧飞灰中的重金属 [J]. 化学研究与应用, 2013, 25(10): 1397-1402. WANG Jinbo, QIN Ruixiang, YUAN Maolin, et al. Compound chemical chelating agents stabilize heavy metals in waste incineration fly ash [J]. Chemical Research and Application, 2013, 25(10): 1397-1402.
- [23] 王磊. 水热法外加硅铝源稳定医疗废物焚烧飞灰中重金属的研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2013. WANG Lei. Study on stabilization of heavy metals in fly ash of medical waste incineration by hydrothermal method plus silicon and aluminum source [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
- [24] 徐林智. 垃圾焚烧飞灰机械力化学法改性及应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017. XU Linzhi. Research on mechanochemical modification and application of waste incineration fly ash [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [25] 车宁, 孙英杰. 垃圾焚烧飞灰的处理与处置技术 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(5): 76-80. CHE Ning, SUN Yingjie. Treatment and disposal technology of waste incineration fly ash [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2019, 29(5): 76-80.
- [26] 马倩, 陈玉放, 靳焘, 等. 城市生活垃圾焚烧发电飞灰中重金属的固定化研究 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1716-1723. MA Qian, CHEN Yufang, JIN Dao, et al. Immobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration for power generation [J]. Journal of Ecological Environment, 2018, 27(9): 1716-1723.

- [27] 龚静, 余丽丽. 垃圾焚烧飞灰处置技术的发展研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2020, 39(3): 31–38.
GONG Jing, YU Lili. Research on the development of waste incineration fly ash disposal technology [J]. Journal of Wuhan University of Light Industry, 2020, 39(3): 31–38.
- [28] 田洋. 电场强化垃圾焚烧飞灰中重金属脱除研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
TIAN Yang. Study on removal of heavy metals from waste incineration fly ash by electric field [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [29] 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.
QI Yi, LI Tianru, WANG baomin, et al. Safe disposal of domestic waste incineration fly ash and progress of resource utilization of building materials [J]. Building Materials Technology and Application, 2021(1): 16–22.
- [30] 陈怀俊, 牛芳, 王乃继, 等. 垃圾焚烧飞灰高温热处理技术研究进展[J]. 煤质技术, 2021, 36(5): 1–14.
CHEN Huaijun, NIU Fang, WANG Naiji, et al. Research progress of high-temperature heat treatment technology of waste incineration fly ash [J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(5): 1–14.
- [31] 黄凤兰. 飞灰二噁英低温热处理降解影响因素研究[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
HUANG Fenglan. Study on influencing factors of dioxin degradation in fly ash by low-temperature heat treatment [D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [32] HAGENMAIER H, BRUNNER H, et al. Catalytic effects of fly ash from waste incineration facilities on the formation and decomposition of polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofurans [J]. Environmental Science & Technology, 1987, 21: 1080–1084.
- [33] 陈宋璇, 刘海威, 黎小保, 等. 垃圾焚烧飞灰中二恶英低温降解中试实验研究[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(3): 9–11.
CHEN Songxuan, LIU Haiwei, LI Xiaobao, et al. Pilot-scale experimental study on low-temperature degradation of dioxins in waste incineration fly ash [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2014, 22(3): 9–11.
- [34] 李浩, 王恒, 韩涛, 等. 采用烧结法降低垃圾焚烧飞灰浸出毒性的研究[J]. 环境化学, 2007, 26(6): 828–831.
LI Hao, WANG Heng, HAN Tao, et al. Study on reducing the leaching toxicity of MSW incineration fly ash by sintering [J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(6): 828–831.
- [35] 王建伟, 许亮, 陈春霞, 等. 垃圾焚烧飞灰烧结过程中 PCDD/Fs 和重金属分布的研究[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(4): 45–51.
WANG Jianwei, XU Liang, CHEN Chunxia, et al. Study on the distribution of PCDD/Fs and heavy metals in the sintering process of MSW incineration fly ash [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(4): 45–51.
- [36] 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.
FANG Zheng, WANG Junjie, ZHAO Zhengan, et al. Analysis of the present situation and research progress of glass-ceramics prepared by melting municipal solid waste incineration fly ash [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2021, 43(4): 506–509.
- [37] 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.
MA Mingsheng. Application study status of incineration residues melting and vitrification process [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021, 37(6): 26–33, 54.
- [38] 张楚, 王爽. 城市垃圾焚烧飞灰高温熔融处理实验研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(6): 31–35.
ZHANG Chu, WANG Shuang. Experimental study on high-temperature melting treatment of municipal solid waste incineration fly ash [J]. Journal of Liaoning University of Petrochemical Technology, 2019, 39(6): 31–35.
- [39] 高静. 城市垃圾焚烧飞灰低能耗熔融固化方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
GAO Jing. Study on low-energy melting solidification method of municipal waste incineration fly ash [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.
- [40] 曹熠, 乔海飞, 裴友峰, 等. 电炉炉高温熔融处理焚烧飞灰技术应用研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(2): 8–14.
CAO Yi, QIAO Haifei, PEI Youfeng, et al. Research on the application of high-temperature melting treatment of incineration fly ash in electric arc furnace [J]. Energy and Environmental Protection, 2022, 36(2): 8–14.
- [41] 叶红, 张晓佳, 张保存, 等. 生活垃圾焚烧飞灰处理技术进展[J]. 山东化工, 2020, 49(15): 66–67.
YE Hong, ZHANG Xiaojia, ZHANG Baocun, et al. Progress of fly ash treatment technology of domestic waste incineration [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(15): 66–67.
- [42] 科技部关于发布国家重点研发计划“固废资源化”等重点专项 2019 年度定向项目申报指南的通知(国科发资[2019]239 号)[Z]. 2019.
Notice of the Ministry of Science and Technology on Issuing the 2019 Directional Project Declaration Guide for National Key R&D Program “Solid Waste Recycling” and other key special projects (Guo Ke Fa Zi [2019] No. 239) [Z]. 2019.
- [43] 陈宋璇, 王云, 吕东, 等. 京津冀工农业固废跨产业跨区域协同利用解决方案研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 85–90.
CHEN Songxuan, WANG Yun, LV Dong, et al. Research on the solution of cross-industry and cross-regional coordinated utilization of solid waste in Beijing-Tianjin-Hebei industrial and rural city [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(5): 85–90.
- [44] 高艳华, 季毛伟, 刘子朋, 等. 生活垃圾焚烧飞灰处理技术研究进展[J]. 环境与发展, 2021, 33(2): 129–134.
GAO Yanhua, JI Mao Wei, LIU Zipeng, et al. Research pro-

- gress of domestic waste incineration fly ash treatment technology [J]. Environment and Development, 2021, 33(2): 129–134.
- [45] 朱增银, 徐洁, 陈高, 等. 水泥窑协同处置固体废弃物的研究进展[J]. 环境科技, 2020, 33(2): 76–80.
ZHU Zengyin, XU Jie, CHEN Gao, et al. Research progress of co-treatment of solid wastes in cement kilns [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(2): 76–80.
- [46] 鱼红霞. 北京市生活垃圾焚烧飞灰安全处置技术路线分析[J]. 环境影响评价, 2021, 43(02): 74–79.
YU Hongxia. Technical route analysis of safe disposal of municipal solid waste incineration fly ash in Beijing [J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(02): 74–79.
- [47] 刘水石, 周志安, 景涛, 等. 烧结过程协同处理垃圾焚烧飞灰的可行性探讨[J]. 中国冶金, 2018, 28(6): 1–4.
LIU Shuishi, ZHOU Zhian, JING Tao, et al. Feasibility of co-treatment of waste incineration fly ash in sintering process [J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 1–4.
- [48] 刘征建, 陈龙智, 张建良, 等. 冶金竖炉反应器处理垃圾焚烧飞灰工艺[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 601–609.
LIU Zhengjian, CHEN Longzhi, ZHANG Jianliang, et al. Process of waste incineration fly ash treatment in metallurgical shaft furnace reactor [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7): 601–609.
- [49] 肖恒, 甘敏, 陈许玲, 等. 钢铁粉尘与高氯飞灰协同脱除有害元素的试验[J]. 钢铁, 2021, 56(1): 104–112.
XIAO Heng, GAN Min, CHEN Xuling, et al. Experiment of synergistic removal of harmful elements by steel dust and high chlorine fly ash [J]. Steel, 2021, 56(1): 104–112.
- [50] 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, (12): 182–187.
LI Jia, ZHANG Siqi, NI Wen, et al. Research progress of solidification and comprehensive utilization of waste incineration fly ash [J]. Metal Mine, 2019, (12): 182–187.
- [51] 王珂, 倪文, 张思奇, 等. 垃圾焚烧飞灰-矿渣基胶凝体系及固镉研究[J]. 有色金属工程, 2018 (10): 119–123.
WANG Ke, NI Wen, ZHANG Siqi, et al. Study on fly ash-slag-based cementing system of municipal solid waste incineration and cadmium fixation [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2018 (10): 119–123.
- [52] 卢平. 确定胶结充填体强度的理论与实践[J]. 黄金, 1992 (3): 14–19.
LU Ping. Theory and practice of determining the strength of cemented backfill [J]. Jin, 1992 (3): 14–19.
- [53] 许鹏, 赵庆良, 邱微. 垃圾焚烧飞灰制作碱激发砖的环境安全性评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 40–45.
XU Peng, ZHAO Qingliang, QIU Wei. Environmental safety assessment of alkali-activated brick made from waste incineration fly ash [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 40–45.
- [54] 李强, 黄海林. 垃圾焚烧飞灰用于混凝土实心砖的研究[J]. 混凝土世界, 2020 (6): 76–79.
LI Qiang, HUANG Hailin. Study on solid concrete brick with waste incineration fly ash [J]. Concrete World, 2020 (6): 76–79.

Review on the industrial status quo and technology of harmless disposal of fly ash from municipal solid waste incineration

CHEN Song-xuan, WANG Yun, WANG Hao

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: With the rapid development of China's economy and the improvement of urbanization level, waste incineration has gradually become a main way for harmless treatment of urban domestic waste, but the produced fly ash, due to its high leaching toxicity and high heavy metal concentration, is classified as a hazardous waste. The harmless disposal and recycling of incineration fly ash have become a social focus. In this paper, the source, harm and current situation of production and discharge of fly ash were discussed; the focus was given on the harmless disposal technologies and recycling methods of fly ash, involving solidification/stabilization technology, separation and extraction technology, heat treatment technology and collaborative disposal technology, etc. The advantages and disadvantages of these technologies were comprehensively analyzed. Moreover, based on the existing pain points of fly ash disposal, a new idea of multi-technology combination was put forward, including two processes: one-step solution of main problems, supported by multiple methods, and sequential multi-step solution of problems. At last, suggestions and prospects for harmless disposal and recycling of fly ash were provided.

Key words: waste incineration; domestic waste; fly ash; hazardous waste; harmless disposal; recycling; technical progress; multi-technology combination