



移动扫码阅读

古佛全, 朱律寒, 石宏杰, 等. 机器学习辅助的垃圾焚烧炉渣氯赋存特性优化调控 [J]. 能源环境保护, 2026, 40(2): 148-157.

GU Foquan, ZHU Lyuhan, SHI Hongjie, et al. Machine Learning-Assisted Optimization and Regulation of Chlorine Speciation in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash [J]. Energy Environmental Protection, 2026, 40(2): 148-157.

机器学习辅助的垃圾焚烧炉渣氯赋存 特性优化调控

古佛全, 朱律寒, 石宏杰, 后 静, 夏文轩, 沈东升, 龙於洋*

(浙江工商大学 环境科学与工程学院 有色金属废弃物资源化浙江省工程研究中心 浙江省固体废物
处理与资源化重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 垃圾焚烧炉渣中的氯是制约其资源化利用的关键因素之一。然而, 目前对炉渣中氯的赋存特性及形成机制的认识尚不清晰。通过模拟生活垃圾单独焚烧及与废印刷线路板(PCB)、污泥的协同焚烧实验, 探究了垃圾组分和焚烧参数对炉渣中总氯、水溶性氯和非水溶性氯的含量及形态分布的影响, 并引入机器学习方法以期实现对炉渣中氯赋存特性的优化调控。实验结果表明, 在生活垃圾单独焚烧过程中, 焚烧温度和物料组分是影响炉渣总氯含量和氯形态分布的主导因素。较低焚烧温度(850 °C)和适中焚烧时间(10 min)有利于维持较高比例的水溶性氯。在协同焚烧实验中, 废 PCB 和污泥的加入均导致炉渣总氯含量增加, 其中废 PCB 的添加促进了水溶性氯的生成, 而污泥的加入则抑制了水溶性氯的形成。基于机器学习的预测结果显示, 当塑料: 纸类: 织物的质量比为 3: 2: 1, 废 PCB 质量分数为 50%, 焚烧温度为 1 001 °C, 焚烧时间为 10 min 时, 炉渣中水溶性氯的预测含量较最低值提高了约 86%。本研究为炉渣中氯的高效脱除及炉渣资源化利用的源头调控提供了理论依据。

关键词: 机器学习; 垃圾焚烧炉渣; 协同焚烧; 氯赋存特性; 水溶性氯

中图分类号: X705; X505 文献标识码: A 文章编号: 2097-4183(2026)02-0148-10

Machine Learning-Assisted Optimization and Regulation of Chlorine Speciation in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash

GU Foquan, ZHU Lyuhan, SHI Hongjie, HOU Jing, XIA Wenxuan,
SHEN Dongsheng, LONG Yuyang*

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, Zhejiang Engineering Research
Center of Non-ferrous Metal Waste Recycling, School of Environmental Science and Engineering,
Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The presence of chlorine in municipal solid waste incineration bottom ash is a critical factor restricting its potential for reuse. However, the current understanding of the speciation characteristics and formation mechanisms of chlorine within the ash remains significantly limited. This study systematically investigated the influence of waste composition and incineration parameters on the content and speciation distribution of total chlorine, water-soluble chlorine, and water-insoluble

收稿日期: 2026-01-28

修回日期: 2026-02-12

接受日期: 2026-03-02

DOI: 10.20078/j.eep.20260303

基金项目: 浙江省教育厅资助项目(Y202558882); 浙江省“领雁”科技计划资助项目(2026C02A1010, 2026C02A1011); 浙江省属高校基本科研
业务费专项资金资助(FR25006Q); 浙江省生态环境科研和成果推广资助项目(2025HT0033, 2025HT0034)

第一作者: 古佛全(1991—), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要研究方向为固废资源化。E-mail: gufoquan@zjgsu.edu.cn

*通讯作者: 龙於洋(1981—), 男, 江西吉安人, 教授, 主要研究方向为固废资源化。E-mail: longgy@zjgsu.edu.cn

chlorine in bottom ash. This was achieved through experimental simulations involving both the standalone incineration of municipal solid waste and its co-incineration with waste printed circuit boards (PCBs) and two types of sludge (Sludge 1 and Sludge 2). A backpropagation artificial neural network (BPANN) model was developed using the data obtained from these incineration experiments. This model was employed for modeling, training, testing, and ultimately predicting the water-soluble chlorine content to optimize the regulation of chlorine speciation characteristics in the bottom ash. Experimental results revealed that, during the standalone incineration of municipal solid waste, an increased proportion of textile and wood/bamboo components, along with elevated incineration temperatures, contributed to a reduction in the total chlorine content in the bottom ash. Furthermore, both increasing the incineration temperature and extending the residence time led to a higher proportion of water-insoluble chlorine in the ash. In the context of co-incineration, compared to standalone municipal solid waste incineration, co-incineration with waste PCBs at 950 °C resulted in an overall increase in total chlorine content in the bottom ash, with 950 °C identified as the optimal temperature for promoting the formation of water-soluble chlorine in the ash. The addition of Sludge 2 caused a general increase in total chlorine, where the increase in water-insoluble chlorine was more pronounced than that of water-soluble chlorine. Notably, the incorporation of Sludge 1 significantly inhibited the formation of water-soluble chlorine compared to co-incineration with PCBs. The BPANN model was successfully developed to predict the water-soluble chlorine content. Model prediction on the training dataset yielded a fitting coefficient (R^2) of 0.74 and an average prediction error of 0.06, indicating a high overall predictive accuracy for the model. Further validation through cross-validation and independent experimental verification confirmed the model's robust performance. Based on the machine learning predictions, it was determined that under optimized conditions—specifically, a plastic : paper : textile ratio of 3 : 2 : 1, inclusion of 50% waste PCBs, an incineration temperature of 1001 °C, and an incineration time of 10 min—the predicted water-soluble chlorine content in the bottom ash increased significantly compared to the lowest predicted value. This comprehensive study provides a crucial theoretical foundation for developing source control strategies aimed at the efficient removal of chlorine from incineration bottom ash.

Keywords: Machine learning; Municipal solid waste incineration bottom ash; Co-incineration; Chlorine speciation characteristics; Water-soluble chlorine

0 引 言

随着城市化进程的加速和生活水平的提高,城市生活垃圾的产生量持续攀升。相较于填埋和堆肥等传统处理方式,垃圾焚烧因其显著的减量化、能源回收效益和占地面积小等优势而成为主流选择。近年来,我国焚烧行业发展迅速,处理能力从2020年的56万t/d增长至2024年的92万t/d,垃圾焚烧无害化处理占比超84%^[1]。然而,随着生活垃圾焚烧产能的快速扩张,许多焚烧厂正面临产能过剩或负荷不足的困境。《固体废物综合治理行动计划》中鼓励在确保安全稳定运行前提下,利用生活垃圾焚烧处理设施协同处置城镇污水处理厂污泥和工业固体废物^[2]。垃圾焚烧过程伴随

着大量炉渣的产生,其产量预计占原始垃圾总量的15%~25%^[3],据此估算我国2024年生活垃圾焚烧炉渣(以下简称炉渣)产生量近6000万t。目前,我国进行有效资源化的炉渣不足10%^[4],大部分直接填埋处理,炉渣中氯、重金属等含量远超土壤背景值,直接填埋处理存在极大的环境污染隐患^[5-8]。如何安全高效地处理产量巨大的炉渣,已成为生活垃圾焚烧产业持续健康发展过程中亟待解决的问题。

当前,生活垃圾焚烧炉渣的资源化利用途径日趋多元,主要包括生产水泥^[9-12]、制备免烧砖^[13-16]、作为路基材料或沥青混合料骨料等^[17-23]。然而,炉渣中普遍存在的高氯含量(0.2%~9.5%)严重阻碍了其在建筑材料中的广泛应用^[24]。研究发现,

炉渣中的氯离子含量超出《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)限值的 8 倍^[25]。因此,在进行建材化利用前,必须采用预处理技术去除氯离子^[26-28]。水洗法虽然被认为是一种简单高效的脱氯手段,但由于非水溶性氯的存在,即使多次水洗,炉渣的残留氯含量仍难以低于 0.5%^[29],这极大地限制了炉渣的掺烧比例。例如,在水泥生产中,《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》(HJ 662—2013)要求入窑物料的氯元素含量不得超过 0.04%,导致炉渣在水泥窑中的添加量仅限制在 20% 左右^[30]。此外,炉渣带入的氯会在水泥窑内循环富集,给设备运行和使用寿命带来不可控风险,且进入水泥的非水溶性氯对建筑的长期稳定性影响尚难以准确预估。总体而言,炉渣在建材化利用方面展现出显著的资源化潜力,

但氯含量及其赋存形态仍是制约其应用的关键因素。当前研究多侧重于炉渣中氯的脱除效率,而对氯形态的形成机制关注不足。

本研究聚焦垃圾焚烧过程,探明焚烧炉渣中氯赋存特性及影响因素,并引入机器学习,实现对炉渣氯赋存特性的优化调控,可为炉渣中氯的高效脱除、源头调控策略提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用垃圾原料包括塑料、纸类、织物、木竹、污泥 1(医药企业污水处理污泥)、污泥 2(纺织企业污水处理污泥)和废印刷线路板(PCB)。原料含氯量及热值见表 1。

表 1 原料总氯含量及热值

Table 1 Total chlorine content and calorific value of raw materials

原料	塑料	纸类	织物	木竹	污泥1	污泥2	废PCB
总氯/%	1.91	0.98	1.16	1.90	0.26	0.10	0.08
热值/(MJ·kg ⁻¹)	22.07	14.15	10.54	17.10	14.30	20.32	16.86

实验所用试剂包括硝酸、正乙醇、硫酸铁铵饱和溶液、硝酸银溶液、硫氰酸钾溶液、氯化钠溶液和酚酞指示剂。

1.2 焚烧实验

基于前期对典型村镇生活垃圾的采样分析,并结合文献报道^[31],设计了以塑料、纸类、织物和木竹等主要可燃物为基准的垃圾组分模拟质量配比(表 2)。在此基础上,进一步探讨了外加污泥、废 PCB 等一般工业固废与生活垃圾进行协同焚

烧时,对炉渣中氯赋存特性的影响。

根据预设的焚烧组别,准确称量待处理的焚烧样品。每个焚烧组别样品总重量设定为 200 g,并将称量后的样品置于尺寸为 102 mm×102 mm×37 mm 的刚玉莫来石坩埚中。随后,将坩埚移入已升温至设定温度的高温炉内,在该温度下进行恒温处理一定时间后取出。待样品冷却至室温,方可收集坩埚内残留的炉渣样品,并进行后续的分析检测。

表 2 主要垃圾组分分配比

Table 2 Major waste component ratios

组别	1#	2#	3#	4#	5#
塑料:纸类:织物	1:2:1	2:2:1	3:2:1	2:2:2	2:2:3
组别	6#	7#	8#	9#	10#
塑料:纸类:织物:木竹	7:6:3:1	6:6:3:1	7:6:4:1	7:6:3:2	8:6:3:1

1.3 机器学习优化

鉴于反向传播神经网络模型(BPANN)在环境领域的有效性,本研究采用该模型深入优化垃圾焚烧炉渣中氯赋存特性。研究选取垃圾种类、投加比例、氯含量、焚烧温度及焚烧时间 5 个因素作为输入特征,以水溶性氯作为输出特征,共 250 组数据。为评估模型准确性,随机抽取 80%

数据用于训练,20% 数据用于测试,并通过随机试验和交叉检验进一步验证。

1.4 分析方法

样品中总氯含量采用日本工业标准(JISA1154—2012)中测定方法测定,水溶性氯含量按照《建设用砂》(GB/T 14684—2022)的要求采用离子色谱法进行测定。非水溶性氯含量为总氯

扣除水溶性氯。原料的热值采用氧弹热量计(XRY-1A)测定。

2 结果与讨论

2.1 生活垃圾焚烧炉渣中氯赋存特性

根据表2的焚烧组别,固定焚烧时间为10 min,研究了焚烧温度对炉渣中氯组分(总氯、水溶性氯和非水溶性氯)含量及占比的影响。由图1(a)~(c)可知,850 ℃焚烧温度下,炉渣总氯含量约为0.20%(若无特殊说明,均为质量分数),其中4#组别的总氯含量最高(0.22%)。在塑料、纸类和织物

的垃圾体系中,炉渣氯含量与塑料投加量的增加呈负相关,与织物投加量增加则呈正相关。由水溶性氯的变化可知,1#和2#组别的水溶性氯含量接近0.15%。当焚烧温度为850 ℃时,塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系炉渣中水溶性氯含量稳定在0.10%左右,组配变化对其影响不显著。此外,织物和木竹投加量的增加有效降低了炉渣总氯含量。随着焚烧温度提高,炉渣氯含量普遍下降至0.20%以下,间接证明高温有利于氯的脱除。当焚烧温度达到950 ℃时,炉渣总氯含量维持在0.20%左右,但非水溶性氯含量增加,水溶性

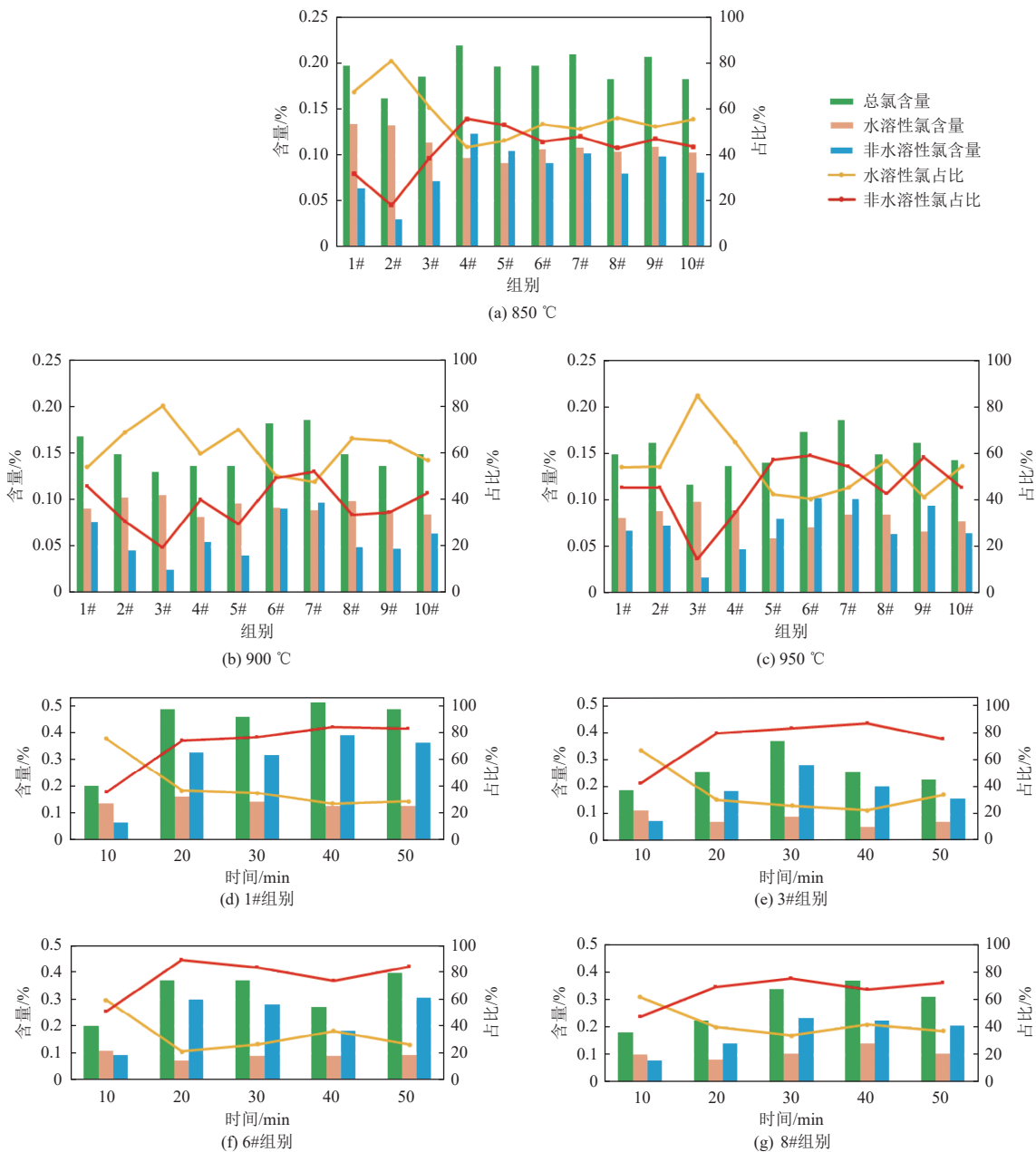


图1 焚烧温度(a~c)和时间(d~g)对炉渣氯赋存特性的影响

Fig. 1 Effects of incineration temperature (a-c) and time (d-g) on chlorine speciation in bottom ash

氯减少(3#组别除外)。这种非水溶性氯的增加(主要为弗雷德盐等无机氯化物)表明高温有利于不溶盐的形成。

从炉渣样品的氯形态占比来看,在 850 °C 的焚烧温度下,各炉渣样品的水溶性氯占比集中在 50% 左右,其中 2#组别占比最高(81.70%),4#组别最低(43.85%)。这表明较高的塑料和织物投加量可能导致水溶性氯占比下降。在塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系中,垃圾投加量与水溶性氯的占比无显著相关。当焚烧温度为 950 °C 时,各组的水溶性氯占比下降,仅 3#组别出现提高,这表明塑料在高温环境中更倾向于形成水溶性氯。综合来看,2#组别的水溶性氯占比保持高位,增加垃圾种类整体不利于水溶性氯的形成。此外 900 °C 的焚烧温度下炉渣样品整体非水溶性氯占比低。固定焚烧温度为 850 °C,进一步研究了焚烧时间对炉渣中氯组分(总氯、水溶性氯和非水溶性氯)含量及占比的影响。由图 1(d)~(g)可知,随着焚烧时间的延长,炉渣氯含量升高,且在 30~40 min 的停留时间下,炉渣氯含量出现峰值。值得注意的是,焚烧时间的延长导致水溶性氯含量整体下降,而非水溶性氯含量逐渐增加,这可能是因为燃烧过程中烟气与炉渣的二次接触引入了重金属、硫化物或二噁英等物质,干扰了水溶性氯的形成过程。焚烧时间大于 10 min 时,炉渣中非水溶性氯的占比稳定在 20% 左右。

2.2 生活垃圾/废 PCB 协同焚烧炉渣中氯赋存特性

在模拟生活垃圾焚烧的基础上,进一步模拟生活垃圾/废 PCB 协同焚烧,固定焚烧时间为 10 min,研究了废 PCB 投加量和焚烧温度对炉渣中氯组分(总氯、水溶性氯和非水溶性氯)含量及占比的影响。由图 2(a)可知,在未添加木竹的垃圾组分中,随着废 PCB 投加量的增加,炉渣中水溶性氯和非水溶性氯含量均呈递增趋势,50%的投加量时分别达到峰值 0.32% 和 0.23%。对比图 2(a)和图 2(b),1#组别非水溶性氯含量整体较高,这在一定程度上增加了后续水洗脱氯难度。对比图 2(a)~(d),在塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系中,随着废 PCB 投加量的增加,焚烧炉渣中水溶性氯和非水溶性氯含量变化趋势与未添加木竹时类似,但在相同废 PCB 投加量条件下,添加木竹的焚烧炉渣中氯含量明显低于未添加的组别。此外,当废 PCB 投加量超过 30% 时,增加织物的比例有助

于缩小水溶性氯和非水溶性氯之间的含量差异。综合分析,生活垃圾与废 PCB 协同焚烧显著提高了炉渣的总氯含量。氯含量增加的可能原因:小体系中稳定的焚烧环境和充足的停留时间加速了生活垃圾的分解,使氯向炉渣迁移增多;同时,废 PCB 在高温下分解出的玻璃纤维布具有丰富的比表面积,可能有效捕获挥发性的氯物种,使其残留于炉渣中。

对比不同焚烧温度下炉渣中总氯含量变化发现,950 °C 的焚烧温度下总氯含量最高为 1.18%,焚烧温度达到 1 050 °C 时,氯含量最高为 1.09%,这主要是因为较高的焚烧温度促进了焚烧过程中氯的挥发。在塑料、纸类和织物的垃圾体系中,在 950 °C 时,废 PCB 投加量对炉渣总氯含量影响较明显,呈同步递增趋势;然而在 1 050 °C 时,这种影响减弱,仅在 40% 投加量时总氯含量有明显增加。在塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系中,废 PCB 投加量对炉渣总氯含量的影响减弱,但仍高于原始垃圾焚烧炉渣的总氯含量。炉渣中水溶性氯含量在 950 °C 时较高,进一步提高焚烧温度至 1 050 °C 后,总氯含量和水溶性氯含量均出现降低。焚烧温度对氯形态分布有显著影响,950 °C 时,炉渣中水溶性氯占比比较高,并较 850 °C 时略有上升;然而,在 20%~40% 的废 PCB 投加量下,炉渣中水溶性氯占比反而出现下降。此外,塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系中的非水溶性氯占比比较高。进一步提高焚烧温度至 1 050 °C 后,炉渣中非水溶性氯占比进一步升高,水溶性氯占比降低,且水溶性氯占比与废 PCB 的投加量呈负相关。综合分析,生活垃圾/废 PCB 协同焚烧体系中,950 °C 为利于水溶性氯形成的适宜温度,继续升高焚烧温度反而导致水溶性氯向非水溶性氯转变。

2.3 生活垃圾/污泥协同焚烧炉渣中氯赋存特性

模拟生活垃圾/污泥协同焚烧,固定焚烧时间为 10 min,研究了污泥投加量和焚烧温度对炉渣中氯组分(总氯、水溶性氯和非水溶性氯)含量及占比的影响。由图 3 可知,投加污泥 1 后炉渣总氯含量增加,并在 15%~20% 的投加量下达到最高值,进一步增加投加量,炉渣总氯含量下降。在塑料、纸类和织物的垃圾体系中,随着污泥 1 投加量的增加,炉渣非水溶性氯含量呈递增趋势,在 10% 的投加量下非水溶性氯达到最大值 0.41%;在塑料、纸类、织物和木竹的垃圾体系中,同样出

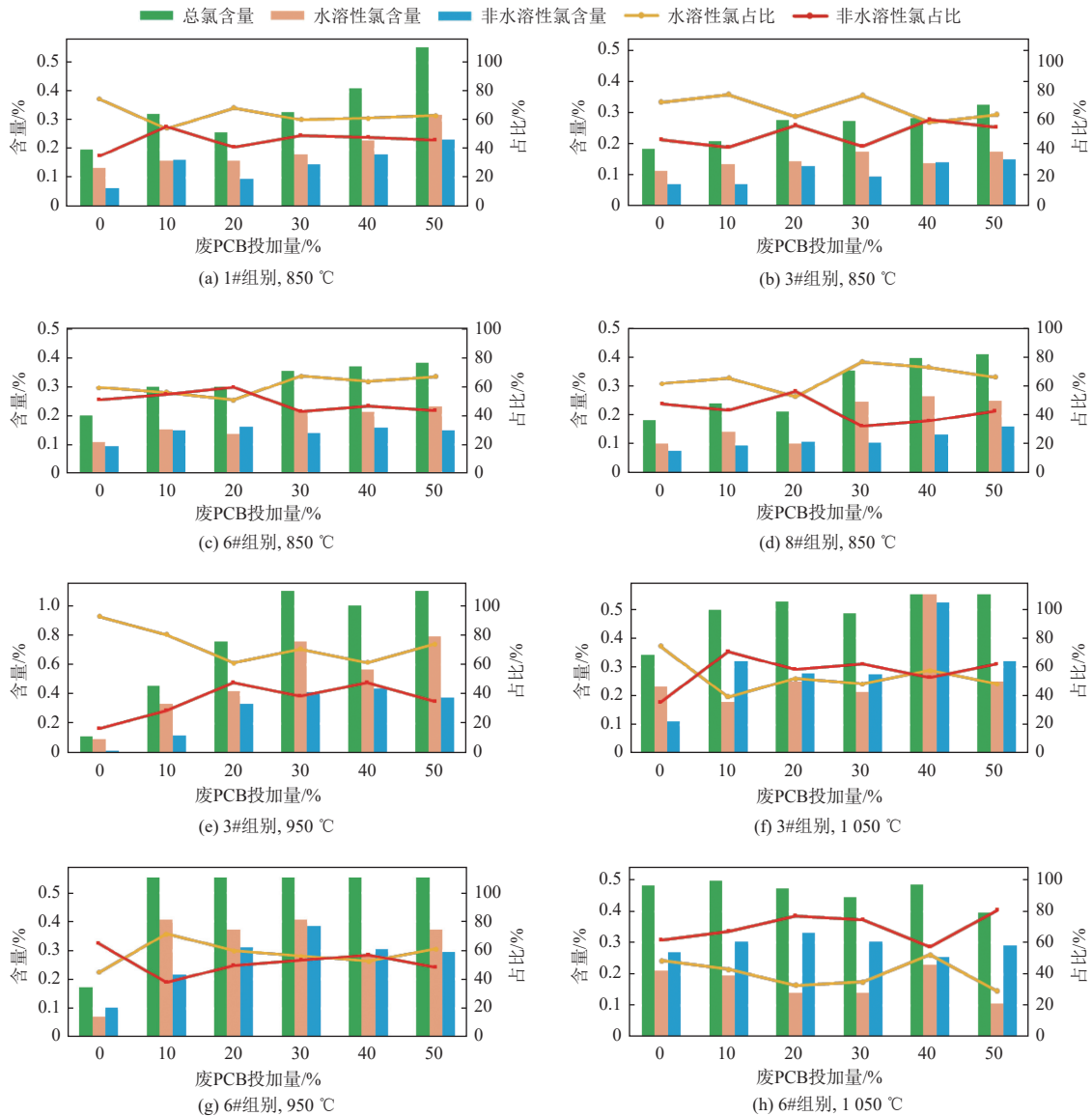


图2 废PCB投加量(a~d)和焚烧温度(e~h)对炉渣氯赋存特性的影响

Fig. 2 Effects of waste PCB dosage (a-d) and incineration temperature (e-h) on chlorine speciation in bottom ash

现非水溶性氯含量提高。与污泥1不同,污泥2的加入导致炉渣总氯含量整体呈上升趋势,且非水溶性氯含量的提升幅度明显大于水溶性氯。与废PCB协同焚烧相比,污泥1的加入显著降低了水溶性氯的占比。当污泥1投加量为10%时,炉渣中水溶性氯占比达到最低值20.83%。此时水溶性氯含量仅为0.11%,非水溶性氯占主导地位。污泥2投加后,水溶性氯占比同样出现降低,不同的垃圾组分在不同的污泥2投加量下的氯形态分布较为无序,但在10%~20%的投加量区间内,氯形态分布相对稳定。

对比不同焚烧温度下炉渣中的总氯含量,发现提高焚烧温度可降低炉渣总氯含量。在950 °C下,污泥1协同焚烧炉渣的氯含量普遍高于污泥

2体系,且在污泥1投加量10%~15%时氯含量达到峰值,同时非水溶性氯的增长幅度明显高于水溶性氯。在塑料、纸类、织物和木竹体系中,炉渣氯含量较低,但其氯含量高于生活垃圾体系。提高焚烧温度后,炉渣氯含量增长与污泥投加量之间无明显正相关;同时,水溶性氯含量显著高于非水溶性氯含量,表明在高温下,生活垃圾/污泥协同焚烧的可行性较高,且污泥投加量对水溶性氯的形成不再是主要限制因素。不同温度下污泥协同焚烧炉渣的氯形态分布存在差异。在950 °C时,20%污泥1投加量使炉渣中水溶性氯占比升高,而5%投加量下水溶性氯占比下降。然而,当温度升至1050 °C时,水溶性氯占比普遍升高,该结果与废PCB协同焚烧时的趋势相反。对于污

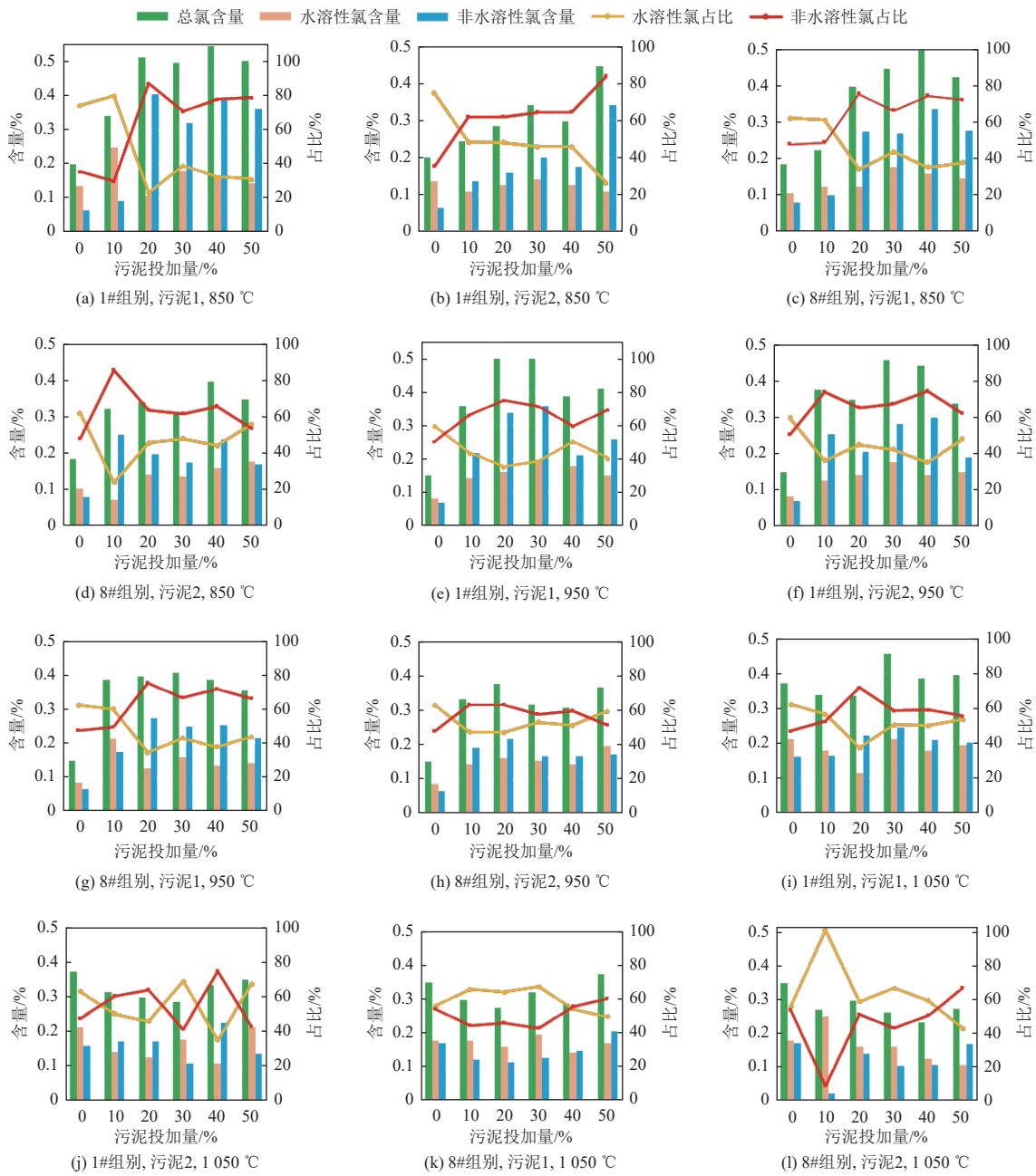


图 3 污泥投加量(a-d)和焚烧温度(e-l)对炉渣氯赋存特性的影响

Fig. 3 Effects of sludge dosage (a-d) and incineration temperature (e-l) on chlorine speciation in bottom ash

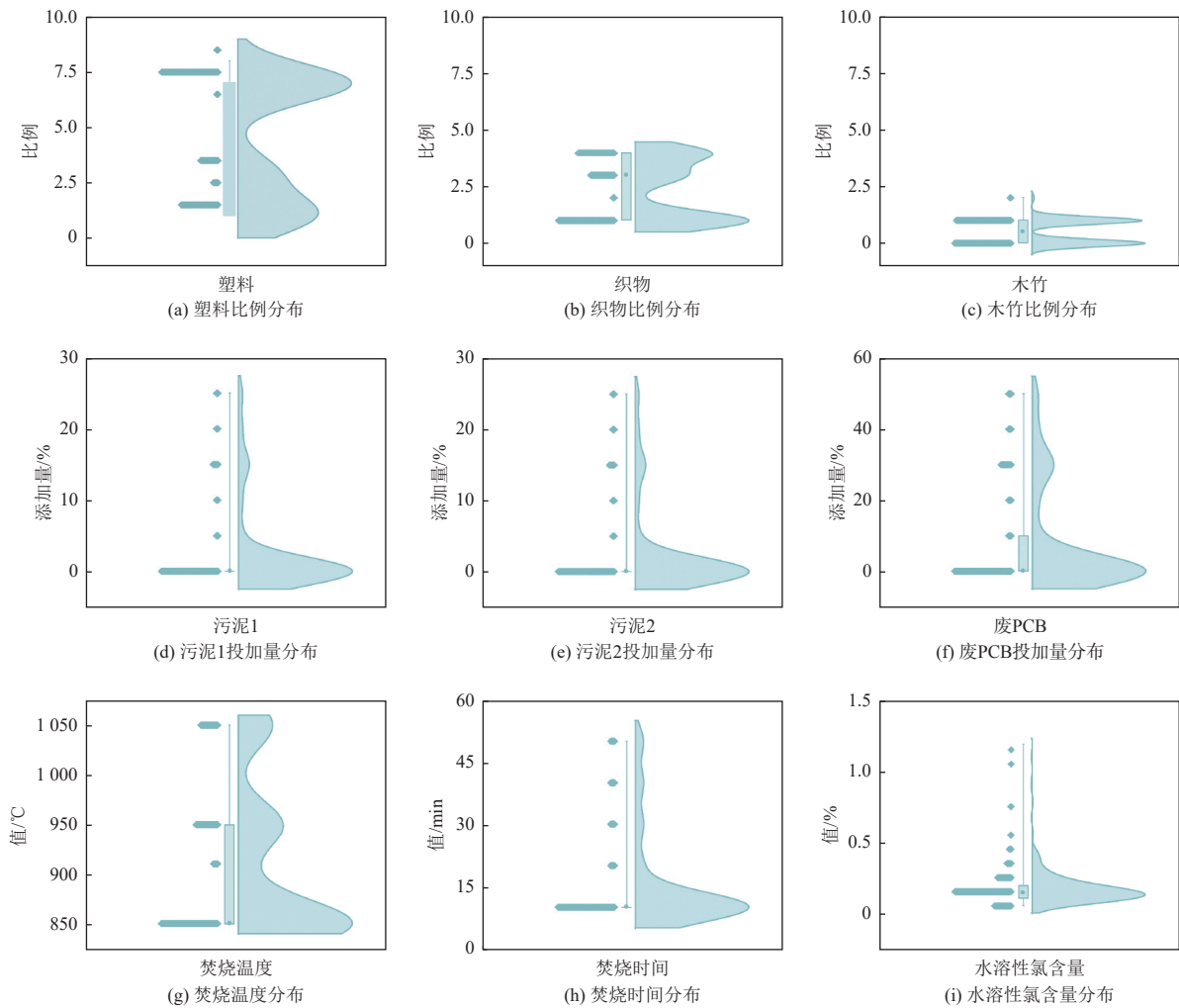
泥 2 体系, 950 °C 时炉渣氯形态分布变化不大, 仅 5% 投加量有差异; 而升温至 1 050 °C 后, 非水溶性氯占比减少, 水溶性氯占比提高。综合来看, 在 1 050 °C 时, 污泥协同焚烧炉渣的水溶性氯占比更高, 而在 850~950 °C 范围内不利于水溶性氯的形成。

2.4 机器学习优化炉渣中氯赋存特性

2.4.1 模型建立、训练和性能评估

基于上述实验结果, 炉渣的可溶性氯含量仍有提升空间。因此, 以上述焚烧实验数据作为数据集, 利用反向传播神经网络(BPANN)深入

优化水溶性氯含量, 其相关描述性统计量如图 4 所示。由图 4 可知, 从原料因素来看, 塑料、纸类和织物为主要组成成分, 分布相对集中, 而木竹、污泥及废 PCB 呈离散分布, 其中废 PCB 投加量变化范围较大, 其对应水溶性氯含量存在差异, 表明其对氯赋存特性具有较强影响。不同原料组合条件下水溶性氯含量的中位数及离散程度差异显著, 反映出原料间存在明显的协同与非线性效应。综上, 水溶性氯含量在不同实验条件下呈现出较强的非均匀性和非线性分布特征, 传统方法难以准确描述其变化规律。因此, 引入 BPANN



注: 每个小图中, 左边为原始样本点个体数据和异常值; 中间为分位数、中位数; 右边为数据在不同取值上的分布密度。

图 4 输入特征连续描述性统计量

Fig. 4 Input features continuous descriptive statistics

对水溶性氯含量进行预测与建模, 有望进一步优化其含量。

模型建立后, 利用其对训练数据集中的水溶性氯含量进行预测。结果表明, 该模型的拟合度为 0.74, 平均预测误差为 0.06, 模型整体预测准确

性较高。

为避免过拟合, 本研究进行了交叉检验, 结果如图 5(a) 所示。交叉检验拟合度为 0.7319, 平均预测误差为 0.05, 与模型建立阶段相比, 变化较小, 这表明该模型整体表现良好。然而, 模型预测

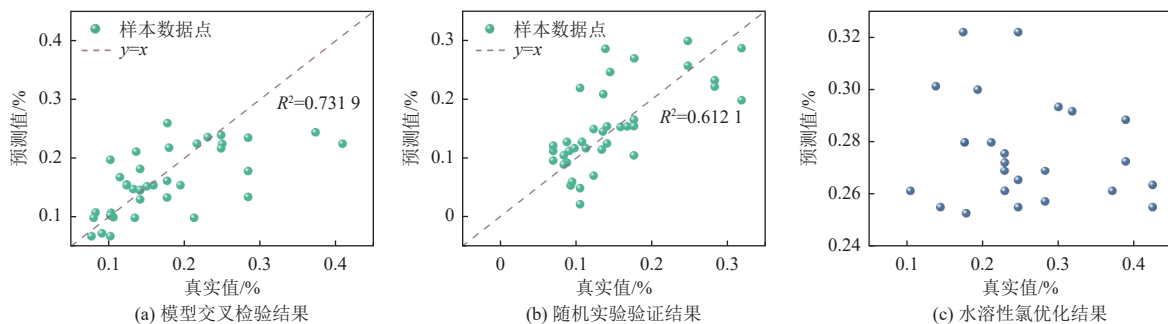


图 5 模型交叉检验结果(a)、随机实验验证结果(b)和水溶性氯优化结果(c)

Fig. 5 Model cross-validation results (a). Randomized experimental verification results (b). Optimization results of water-soluble chlorine (c)

能力仍需实验验证。因此,继续进行随机实验验证,结果如图 5(b)所示。预期可溶性氯含量与实际结果的平均差值为 0.08,较交叉检验结果增加了 60%,拟合度降至 0.612 1。尽管与交叉检验结果相比有所差距,但仍保持较高准确率。因此 BPANN 可为深入优化不同工况下水溶性氯含量提供有力支持。

2.4.2 模型预测

基于已建立并验证的 BPANN 模型,对实验条件进行优化预测,其结果如图 5(c)所示。模型推荐的最优条件为塑料:纸类:织物质量比为 3:2:1,废 PCB 质量分数为 50%,焚烧温度 1 001 ℃,焚烧时间 10 min。在该条件下,炉渣中水溶性氯预测含量为 0.43%,比最低值提高了约 86%。综合实验结果分析,在这特定条件下(1 001 ℃)有利于水溶性氯形成的主要原因为较高的温度极大地促进了焚烧物料中有机氯物质的快速分解,释放出高活性的 HCl 气体。此高温环境同时显著加速了 HCl 与炉渣中碱性组分(如 Na 或 K)的反应速率,从而高效地生成了水溶性氯化物。需要注意的是,本研究的静态坩埚条件与工业级炉排炉的动力学环境存在差异。在炉排炉中,良好的机械搅拌有助于挥发的氯及时进入烟气相,这可能会使得最终炉渣中的总氯含量低于静态实验的预测结果。

上述结果表明,BP 神经网络模型能够有效挖掘原料组成与焚烧条件之间的非线性关系,并在此基础上实现水溶性氯含量的定向优化,为焚烧过程调控及炉渣中氯高效脱除的源头调控提供有力的技术手段。

3 结 论

(1)生活垃圾单独焚烧时,提升织物和木竹的投加量及升高焚烧温度有助于降低炉渣中总氯含量,同时,提高焚烧温度或延长焚烧时间均可导致炉渣中非水溶性氯占比升高。

(2)相比于生活垃圾单独焚烧,生活垃圾/废 PCB 协同焚烧会增加炉渣中总氯含量,950 ℃ 是有利于炉渣中水溶性氯形成的适宜温度。

(3)污泥 2 的加入导致炉渣总氯含量整体上升,且非水溶性氯的增加幅度大于水溶性氯。与废 PCB 协同相比,污泥 1 的加入显著抑制了水溶性氯的形成。

(4)经机器学习预测,在塑料:纸类:织物

质量比为 3:2:1,废 PCB 质量分数为 50%,焚烧温度 1 001 ℃,焚烧时间 10 min 条件下,炉渣中水溶性氯的预测含量比最低值提高了约 86%。

参考文献 (References):

- [1] 王乐乐,张鑫,张彦,等.中国生活垃圾焚烧发电厂的发展与现状[J].低碳世界,2025,15(3):118-120.
WANG Lele, ZHANG Xin, ZHANG Yan, et al. The development and current status of municipal solid waste incineration power plants in China[J]. Low Carbon World, 2025, 15(3): 118-120.
- [2] ZHAO Shuyuan, CHEN Heng, FAN Lanxin, et al. Novel process for producing levulinic acid, electricity, and heat from municipal solid waste and agricultural waste: Performance analysis and optimization[J]. Energy, 2025, 336: 138456.
- [3] 王栋,梁勇,马刚平,等.生活垃圾焚烧炉渣湿法处理工艺技术剖析[J].环境工程,2017,35(2):138-140+152.
WANG Dong, LIANG Yong, MA Gangping, et al. Technological analysis on wet treatment process of msw incineration slag[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(2): 138-140+152.
- [4] 袁满昌,温冬.焚烧炉渣的综合处理与资源化利用研究[J].环境卫生工程,2019,27(2):45-50.
YUAN Manchang, WEN Dong. Research on comprehensive treatment and resource utilization of incinerator slag[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(2): 45-50.
- [5] KOWALSKI P R, KASINA M, MICHALIK M. Metallic elements occurrences in the municipal waste incineration bottom ash[J]. Energy Procedia, 2017, 125: 56-62.
- [6] GODYŃ K, DUTKA B, ROSIK DULEWSKA C, et al. Assessment of the possibility of heavy metals elution from municipal solid waste incineration bottom ash into the soil and water[J]. Desalination and Water Treatment, 2025, 323: 101282.
- [7] TIBERG C, SJÖSTEDT C, KARLFELDT FEDJE K. Speciation of Cu and Zn in bottom ash from solid waste incineration studied by XAS, XRD, and geochemical modelling[J]. Waste Management, 2021, 119: 389-398.
- [8] MEHR J, HAUPT M, SKUTAN S, et al. The environmental performance of enhanced metal recovery from dry municipal solid waste incineration bottom ash[J]. Waste Management, 2021, 119: 330-341.
- [9] MAGNUSON J K, LIU Yalan, PETERS Z A, et al. Optimizing reusability of incinerated municipal waste in cement production by removal of chloride[J]. Construction and Building Materials, 2025, 502: 144472.
- [10] YUAN Yong, FATOYINBO I O, SHENG Ruiyi, et al. Advancing the applicability of recycled municipal solid waste incineration bottom ash as a cement substitute in printable

- concrete: Emphasis on rheological and microstructural properties[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 103: 112133.
- [11] LEE T C, CHANG C J, RAO Mingkang, et al. Modified MSWI ash-mix slag for use in cement concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4): 1513–1520.
- [12] LEE T C, RAO Mingkang. Recycling municipal incinerator fly- and scrubber-ash into fused slag for the substantial replacement of cement in cement-mortars[J]. *Waste Management*, 2009, 29(6): 1952–1959.
- [13] ZHOU Hongyu, WANG Baomin. Valorization of MSW incineration bottom ash into alkali-activated bricks: Feasibility, strengthening mechanisms, and production energy-economic assessment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 204: 108026.
- [14] ADEDIRAN A, KIKKY S M, ADHIKARY S K, et al. Upcycling municipal solid waste incineration bottom ash in clay-bonded bricks[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(7): 8941–8954.
- [15] WANG Ping, LI Jiangshan, HU Yuanan, et al. Solidification and stabilization of Pb-Zn mine tailing with municipal solid waste incineration fly ash and ground granulated blast-furnace slag for unfired brick fabrication[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 321: 121135.
- [16] PITAK I, BALTUŠNIKAS A, KALPOKAITĖ DIČKUVIENĖ R, et al. Experimental study effect of bottom ash and temperature of firing on the properties, microstructure and pore size distribution of clay bricks: A Lithuania point of view[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01230.
- [17] CHEN Boyu, PAUL I M, MIRANDA DE LIMA L, et al. Blast furnace slag-based alkali-activated concrete with treated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as coarse aggregate: Mechanical properties, freeze-thaw resistance, and environmental impact[J]. *Journal of Building Engineering*, 2026, 118: 115015.
- [18] YAN Jun, LI Zhaoxi, WANG Jun. Municipal solid waste incineration bottom ash-based ultra-high performance cement mortar: Multi-scale performance evolution and synergistic mechanism of life cycle environmental benefits[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 493: 143228.
- [19] FAN Xu, WANG Lu, LI Maosen, et al. Mechanism of grinding coarse particles from municipal solid waste incineration bottom slag and their potential reutilization as supplementary cementitious materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 483: 141761.
- [20] CHEN Zhennan, LIAN Songsong, ZHANG Liya, et al. Unveiling the performance evolution and reaction mechanisms of alkali-activated incineration bottom ash-cement composite systems[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 492: 142842.
- [21] LEDERER J, HRON J, FEHER F, et al. Evaluation of standard concretes containing enhanced-treated fluidized-bed waste incineration bottom ash as manufactured aggregate[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03759.
- [22] WANG Cheng, ZHAO Xiao, ZHANG Xiyu, et al. Study of waste incineration bottom ash as fine aggregate applied to green alkali-activated bottom ash-slag concrete: Mechanical properties, microstructure, durability[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 449: 138484.
- [23] LIU Jun, ZHENG Wentao, LI Zhenlin, et al. Research on carbon capture and storage of cold bonded lightweight aggregate from incineration bottom ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 496: 143777.
- [24] YANG Shuo, SAFFARZADEH A, SHIMAOKA T, et al. Existence of Cl in municipal solid waste incineration bottom ash and dechlorination effect of thermal treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 267: 214–220.
- [25] 林莉, 颜未蔚, 杨国栋, 等. 垃圾焚烧炉渣特性分析及制备免烧砖技术研究 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1238–1246.
- LIN Li, YAN Weiwei, YANG Guodong, et al. Characteristics of incineration slag and production technology of baking-free bricks[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(5): 1238–1246.
- [26] ALAM Q, LAZARO A, SCHOLLBACH K, et al. Chemical speciation, distribution and leaching behavior of chlorides from municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 124985.
- [27] MA Mingshui, QI Chuan, LIN Xiongchao, et al. Composition modification and plasma vitrification of bottom ash from industrial hazardous waste incineration[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, 619: 122579.
- [28] LIU Jun, XIONG Feilong, ZHOU Lantian, et al. Study on the mechanical properties and durability of epoxy mortar for municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 493: 143154.
- [29] HU Yanjun, ZHAO Lingqin, ZHU Yonghao, et al. The fate of heavy metals and salts during the wet treatment of municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Waste Management*, 2021, 121: 33–41.
- [30] YAN Kezhen, SUN Hao, GAO Fengqian, et al. Assessment and mechanism analysis of municipal solid waste incineration bottom ash as aggregate in cement stabilized macadam[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118750.
- [31] 李文祥. 村镇可燃生活垃圾的分散式焚烧过程表征 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2021: 9–19.
- LI Wenxiang. Characterization of decentralized incineration process of combustible domestic solid waste in villages and towns[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2021: 9–19.