浙 江 农 林 大 学 学 报, 2023, **40**(4): 867-874 Journal of Zhejiang A&F University doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20220518

生活垃圾焚烧炉渣泥陶粒的制备及性能研究

马 鹏,张 成,宋成芳,曹玉成

(浙江农林大学环境与资源学院,浙江杭州 311300)

摘要:【目的】城市生活垃圾焚烧后产生较多的炉渣泥废弃物,尝试通过将炉渣泥烧制成陶粒,起到合理处置炉渣泥的作用。【方法】根据粒径大小从炉渣中分离出的炉渣泥,与粉煤灰、石英粉和高岭土按照质量比 3:3:3:1 的配比制作成 球形颗粒,放入马弗炉中烧结。按照 GB/T 17342.1 测试陶粒性能,并对陶粒微观形态、晶体结构和重金属浸出等进行测 定。【结果】炉渣泥中有 2 种重金属超标,分别为镉和锌。生活垃圾焚烧炉渣泥陶粒在烧制温度为 1 175 ℃ 时,所得陶 粒堆积密度和抗压强度有较大增长,1h吸水率下降。烧结时间在 10~15 min 时,陶粒 1 h吸水率变化幅度最大。预热温 度过高,预热时间过长,不利于陶粒产生良好膨胀效果。在最佳烧制工艺条件下,所制得的陶粒堆积密度为 783 kg·m⁻³,抗压强度为 7.9 MPa,1h吸水率为 9.8%,符合轻集料 GB/T 17431.1 的国家标准。最佳工艺烧制的陶粒重金属 镉和锌的浸出质量浓度分别为 0.006 5 和 0.511 7 mg·L⁻¹,远低于炉渣泥本身镉和锌的浸出质量浓度。通过生活垃圾焚烧 炉渣泥制作陶粒,实验室中制作陶粒的成本为 28.0 元·m⁻³,根据市场陶粒价格,每立方米的陶粒可获取 102.0 元利润。 【结论】最佳烧制工艺的烧结温度为 1 175 ℃,烧结时间为 15 min,预热温度为 400 ℃,预热时间为 20 min。陶粒的性质和重金属浸出含量符合国家标准。图 6 表 5 参 28

关键词: 生活垃圾焚烧炉渣; 陶粒; 炉渣泥; 重金属; 浸出毒性

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)04-0867-08

Preparation and properties of ceramsite from domestic waste incineration slag sludge

MA Peng, ZHANG Cheng, SONG Chengfang, CAO Yucheng

(College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study attempts to prepare ceramsite from slag and sludge, which is produced in the incineration of municipal solid waste, so as to achieve a reasonable disposal of the slag and sludge. [Method] The slag sludge separated from the slag according to the particle size was made into spherical particles with fly ash, quartz powder and kaolin in a mass ratio of 3:3:3:1, and then sintered in a muffle furnace. The properties of ceramsite were tested according to GB/T 17342.1, and the microscopic morphology, crystal structure and heavy metal leaching of ceramsite were measured. [Result] Two heavy metals in slag sludge exceeded the standard, namely cadmium and zinc. At 1 175 °C, the bulk density and compressive strength of the obtained ceramsite particles increased significantly, and the water absorption rate decreased in 1 h. When the sintering time was 10-15 min, the water absorption of ceramsite varied greatly in 1 h. Excessive preheating temperature and preheating time were not conducive to good expansion effect of ceramsite. Under the optimum firing conditions, the bulk density of the ceramsite obtained was 783 kg·m⁻³, the compressive strength was 7.9 MPa,

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2023-03-01

基金项目:浙江农林大学科研发展基金(W20200023, L20220224)

作者简介:马鹏 (ORCID: 0009-0008-7766-1129),从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: 2020603021026@ stu.zafu.edu.cn。通信作者:张成 (ORCID: 0000-0003-0272-9041),讲师,博士,从事有机固废污染控制 与资源化利用、水环境修复等研究。E-mail: Success.zhang@zafu.edu.cn

and the water absorption rate in 1 h was 9.8%, conforming to the national standard of GB/T 17431.1 for lightweight aggregates. The leaching contents of cadmium and zinc in the ceramsite particles fired by the optimal process were 0.006 5 and 0.511 7 mg \cdot L⁻¹ respectively, which were far lower than the leaching contents of cadmium and zinc in the slag sludge itself. The cost of producing ceramsite from domestic waste incineration slag sludge in the laboratory was 28.0 yuan m⁻³, and according to the market price of ceramsite, a profit of 102.0 yuan·m⁻³ of ceramsite could be generated. [Conclusion] The optimal sintering process includes a sintering temperature of 1 175 °C, a sintering time of 15 min, a preheating temperature of 400 °C, and a preheating time of 20 min. The properties and heavy metal leaching content of ceramsite meet national standards. [Ch, 6 fig. 5 tab. 28 ref.]

Key words: domestic waste incineration slag; ceramsite; slag sludge; heavy metal; leaching toxicity

随着人们生活水平的提高,城市生活垃圾总量逐年增加,如何有效处理生活垃圾已成为人们关注的 重点。目前生活垃圾的处理主要有卫生填埋、焚烧和堆肥等方式[1],其中垃圾焚烧可以极大地减少垃圾 的原有体积,减少了对土地的占用。通过焚烧可以使垃圾的质量和体积分别减少70%和90%^[2],同时也 会产生原有垃圾质量 20%~30% 的炉渣^[3]。目前炉渣可以与水泥混合制备混凝土^[4],以及用来铺设路基^[5] 等。炉渣中成分复杂,属于强碱性物质,存在重金属含量超标等问题⁶⁶,虽然在碱性条件下比较稳定, 重金属浸出含量较少[7],但具有潜在的浸出风险[8],直接处理有可能会对土壤环境造成潜在危害。同时 炉渣在预处理过程中,如筛分、磁分选、水洗等,会产生一定量的炉渣泥¹⁹。炉渣泥中含有二氧化硅 (SiO₂)、氧化铝 (Al₂O₃)、氧化铁 (Fe₂O₃)、氧化钙 (CaO)、氧化镁 (MgO)、氧化钠 (Na₂O) 等氧化物,这些 物质恰好符合烧制陶粒的成分要求[10]。陶粒开始于 1931 年,后被成功烧制出页岩陶粒,并于 1916 年获 得发明专利^[11]。RILEY^[12]认为:烧制陶粒的原料中,SiO2为48.0%~70.0%,Al2O3为8.0%~25.0%,助溶 剂为 4.5%~31.0% 时,就可以制作出烧胀陶粒。随着固体废弃物产量的不断快速增长,人们开始使用固 体废弃物替代部分黏土烧制陶粒。MI等[13]采用赤泥、粉煤灰和膨润土,经两级烧结工艺制备的高强度 陶粒,具有抗压强度高,吸水率低,有害元素浸出含量少等性能。LI等^[14]采用铁矿石尾矿、膨润土和 铝土矿混合烧制出的陶粒,可用于制备轻质隔板。FAN等^[15]使用铬(Cr)污染土壤烧制陶粒,铬元素在 烧制过程中被固化,使其浸出含量远低于国家标准。因此,可以将炉渣泥与其他物质混合烧制陶粒,能 够起到很好固定重金属的作用[16-17]。烧制陶粒除了原料成分配比外,烧制过程也是控制陶粒质量的关键 因素[18],烧结温度过低过高都会对陶粒的孔隙率和强度造成影响,导致烧出的陶粒质量不理想[19-20]。只 有合适的原料配比和烧制工艺同时作用,才可以烧出理想的陶粒。炉渣泥烧制成陶粒可以将固废资源 化,能够在减少环境危害的同时创造一部分收益。本研究从垃圾焚烧炉渣中分出来颗粒较小的炉渣泥, 通过与粉煤灰、石英粉和高岭土混合,在1125~1200 ℃下烧制 5~20 min 后得到陶粒,分析陶粒的基本 性能以及陶粒的重金属浸出对环境的影响,以期为探索合理处置生活垃圾焚烧炉渣泥提供科学依据。

材料与方法 1

1.1 材料

炉渣泥来自杭州市九峰垃圾焚烧厂,根据粒径大小从炉渣中分出颗粒更小的部分(100目以上)称为 炉渣泥。炉渣泥与粉煤灰成分组成如表1所示。石

英粉 (分子式: SiO₂, 分析纯)、高岭土 (分子式: Al₂Si₂O₉H₄ 2H₂O, 化学纯)、粉煤灰 (325 目) 购自龙 泽环保科技有限公司,其他化学试剂药品均购自国 药化学试剂有限公司。

1.2 炉渣泥性质测定

新鲜的炉渣泥 pH为 11.7, 含水率为 30.35%, 有机质质量分数为14.00 g·kg⁻¹,热灼减率为10.66%。对其进行自然风干,从中去除大颗粒的石子、碎

表1 炉渣泥与粉煤灰主要成分的质量百分比

Table 1	Mass percentage of mai	n components of s	lag sludge and fly ash

科和	质量百分比/%							
忉科	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O		
炉渣泥	13.70	6.46	53.61	7.39	2.73	1.57		
粉煤灰	53.97	31.15	4.01	4.16	1.01	0.89		

玻璃、陶瓷碎片和未燃尽物质后,手工研磨,过100目方筛后,取适量放入烘箱中至质量不再变化。使用电感耦合等离子体发射光谱法和原子荧光法测定炉渣泥中多种重金属质量分数,具体操作按照HJ 781—2016、GB/T 22105.1—2008 和 GB/T 22105.2—2008 标准执行。

1.3 陶粒制备

陶粒的烧制主要分为原料混合、造粒、烘干、烧结、冷却等 5 个步骤^[21]。首先将炉渣泥、石英粉、 粉煤灰和高岭土,按质量比 3:3:3:1 混合,手工搅拌至均匀。加入适量纯净水,将混合原料制作成直径 为 5~20 mm 的球形颗粒^[15]。在 105 ℃ 下干燥 6 h,将干燥后的球形颗粒放入马弗炉里烧结成陶粒。采用 的烧制温度为 1 125、1 150、1 175 和 1 200 ℃,烧制时间为 5、10、15 和 20 min。为了防止陶粒受热不 均匀而炸裂,在陶粒烧制前先进行预热处理,预热温度分别为 300、400、500、600 ℃,预热时间分别 为 0、10、20、30 min。最后将烧制好的陶粒冷却至室温。试验设计如表 2 所示,在 4 个影响因素下共 制备了 16 组陶粒样品。

Table 2 Ceramsite experimental design									
样品编号	烧结温度/℃	烧结时间/min	预热温度/℃	预热时间/min	样品编号	烧结温度/℃	烧结时间/min	预热温度/℃	预热时间/min
1	1 125	15	400	20	9	1 200	15	300	20
2	1 150	15	400	20	10	1 200	15	400	20
3	1 175	15	400	20	11	1 200	15	500	20
4	1 200	15	400	20	12	1 200	15	600	20
5	1 200	5	400	20	13	1 200	15	400	0
6	1 200	10	400	20	14	1 200	15	400	10
7	1 200	15	400	20	15	1 200	15	400	20
8	1 200	20	400	20	16	1 200	15	400	30

表 2 陶粒试验设计

1.4 陶粒分析测试

1.4.1 陶粒性质测定 根据 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法 第2部分:轻集料试验方法》对 陶粒的堆积密度、表观密度和1h吸水率进行测试。陶粒抗压强度测试采用万能力学试验机,以 2 mm·min⁻¹的位移速度均匀加荷,直到陶粒彻底压坏为止。

1.4.2 陶粒烧制前后微观形态 将烧制前的生陶粒和烧制后陶粒分别磨碎,置于扫描电子显微镜下观察 拍照。

1.4.3 陶粒烧制前后晶体组成 将烧制前后的陶粒分别磨碎,粉末放入 X-射线衍射仪内测定炉渣泥的晶体成分。

1.4.4 陶粒重金属浸出特性测定 由于炉渣泥中部分重金属超标,从环境保护方面考虑,对烧制好的陶 粒进行重金属浸出测定,按照 HJ/T 299—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法》标准进 行,首先制备浸提剂 (17.5 mL 冰乙酸加纯水稀释到 1 L, pH 2.64±0.05),液固质量比按照 20:1 混合浸 提。将烧杯放入温度为 23 ℃ 的往返式振荡器中振荡 18 h,振荡器转速为 110 r·min⁻¹。然后以 4 000 r·min⁻¹ 的转速离心 5 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜,放入 4 ℃ 冰箱冷藏保存,最后使用电感耦合等离 子体质谱仪 (ICP-MS) 进行测试。

2 结果与分析

2.1 炉渣泥重金属质量分数

以 GB 4284—2018《农用污泥污染物控制标准》为判定依据,发现炉渣泥中共有 2 种重金属质量分数 超标,分别为镉 (Cd) 和锌 (Zn)。其中 Cd 质量分数超标严重,实际值为限定值的 2.9 倍,Zn 质量分数略 微超标,实际值为限定值的 1.1 倍 (表 3)。主要原因是生活垃圾中物种品类成分复杂,经过高温焚烧之 后,垃圾体积减少,重金属大量富集到炉渣泥中,导致其质量分数增加。因此需要从源头控制重金属, 可以通过适当增加生活垃圾在焚烧之前的分拣次数,优化分拣工艺流程,提高资源的回收利用,减少重

	Ta	able 3 Chang	of heavy metal	content of sl	ag sludge				
判宁広捉		质量分数/(mg·kg ⁻¹)							
判足""的"招	Cr	Cu	Cd	Pb	As	Hg	Zn	Ni	
本研究	24.4	864	43.7	406	32.1	0.088	3 3 6 0	72.5	
GB 4284—2018	1 000.0	1 500	15.0	1 000	75.0	15.000	3 0 0 0	200.0	
判定	达标	达标	超标	达标	达标	达标	超标	达标	

表 3 炉渣泥重金属质量分数的变化

金属在炉渣泥中的残留。

2.2 陶粒制备工艺对陶粒性质的影响

2.2.1 烧结温度 在预热温度为400 °C,预热时间为20min时,分别在1125、1150、1175和1200 °C 温度下烧结15min制备了4种不同烧结温度的陶粒,测定陶粒的基本性质。从图1可见:随着烧结温度的升高,陶粒的抗压强度逐渐上升,在1150 °C 之前抗压强度较小,且增长缓慢。当烧结温度从1150 °C 上升到1175 °C 时,陶粒抗压强度有较大的提高,而当烧结温度进一步由1175 °C 提高1200 °C 时,陶粒抗压强度变化较小,趋于稳定。说明陶粒在未达到最佳烧结温度之前,适当提高温度可以促进烧结^[22]。陶粒的堆积密度、表观密度和1h吸水率的重要转折点均在1175 °C。说明这个温度前后陶粒内部发生大量物理化学反应,较多釉质层在这时产生,填充了陶粒内部空隙,陶粒孔隙率有所下降,同时在液相的作用下,陶粒体积逐渐收缩,导致陶粒的堆积密度和抗压强度增加,吸水率下降^[23]。所以最佳烧结温度为1175 °C。





2.2.2 烧结时间 在预热温度为 400 ℃,预热时间为 20 min,烧结温度为 1 200 ℃ 时,分别烧制 5、10、15 和 20 min,制备 4 种不同烧结时间的陶粒。从图 2 可见:烧制 5、10、15 和 20 min 的陶粒抗压 强度依次为 6.35、7.50、8.35 和 8.00 MPa;堆积密度依次为 778.5、985.0、1 031.7 和 894.4 kg·m⁻³;表观 密度依次为 1 141.4、1 666.7、2 007.2 和 1 685.0 kg·m⁻³。陶粒 1 h 的吸水率先降低后升高,其中在 10~15 min 的变化幅度最大,从 12.3%降低至 4.7%,烧结时间在 15 min 时,陶粒 1 h 吸水率达到了最低点符合 国家标准中对建筑轻集料陶粒要求,所以最佳烧结时间为 15 min。



2.2.3 预热温度 预热的主要作用是去除陶粒中的水分,防止陶粒在温度剧烈变化时开裂,同时控制陶 粒中有机质的分解和气体释放^[24]。在预热时间为 20 min,烧结温度为 1 200 ℃,烧结时间为 15 min 时, 设置预热温度分别为 300、400、500 和 600 ℃,制备 4 种不同预热温度的陶粒。从图 3 可见:陶粒的抗 压强度随着预热温度的升高而逐渐降低,主要原因是随着预热温度的升高,陶粒中有机质分解不断加

剧,温度在没有到达陶粒产生液相之前分解了过度的有机质。而前期过多的有机质分解,会造成后期陶 粒内部无法产生足够的气体去支撑起表面液相物质,烧成的陶粒效果不理想。预热温度在 400 ℃ 时,陶 粒抗压强度较大,1h吸水率也比较小,尽管陶粒在预热温度为 300 和 500 ℃ 时的堆积密度和表观密度 都比较小,但他们的吸水率偏高,不适合陶粒在轻集料建材中使用。综合考虑,400 ℃ 预热温度为制备 陶粒的适宜温度。



2.2.4 预热时间 在预热温度为400℃,烧结温度为1200℃,烧结时间为15 min条件下,设置预热时间分别为0、10、20和30 min,制备4种不同预热时间的陶粒。从图4可见:当预热时间小于10 min时,陶粒的各个性能指标几乎没有变化。说明预热时间太短,不足以引起陶粒内部产生反应或者反应不足,起不到预热的基本需求。预热在10~20 min时,抗压强度急速增加,同时吸水率也明显降低,而预热时间在20~30 min时,抗压强度和1h吸水率趋于稳定。同时预热时间不宜过长,预热时间过长 会导致陶粒内部产气物质过度分解,容易造成后期陶粒膨胀效果减弱^[25]。从节约能源的角度来看,预热时间在20 min 时最合适。



Figure 4 Influence of different preheating time on properties of ceramsite

2.3 陶粒的最佳烧制条件与陶粒质量

通过以上筛选,确定了最终的陶粒烧制条件,即烧制温度为1175 ℃,烧结时间为15 min,预热温度为400 ℃,预热时间为20 min。测试的各项指标均符合国家标准(表4),其中炉渣泥陶粒堆积密度略小于市场陶粒,抗压强度和1h吸水率均高于市场陶粒。

2.4 陶粒烧制前后的微观形态

将最佳烧制条件下烧制前后的陶粒研磨,分别 在扫描电镜下观察。如图 5 所示:烧制前的陶粒结 构分散,颗粒大小不一且形态各异,结合性能差。 烧制后的陶粒有大量晶体覆盖,光滑且多孔,有效 降低了陶粒的吸水率。说明在此温度下陶粒表面和 内部产生液相,高温产生的气体被封在陶粒内部,

表 4	陶粒最	佳烧制条件	下的各项指标
· / ·			

Table 4 Various indexes of ceramsite under the best firing conditions						
研究方法		堆积密度/	抗压强	1 h吸	表观密度/	
		$(kg \cdot m^{-3})$	度/MPa	水率/%	$(kg \cdot m^{-3})$	
本研究障	甸粒	783	7.9	9.8	1 524.8	
市场陶料	立	417	5.3	4.2	-	
GB/T 17	431.1—2010	700~800	≥4.0	≤10.0	-	
说明·-表示没有相关数据或标准。						

无法溢出,导致陶粒内部产生大量孔隙^[26]。陶粒体积发生显著膨胀,有效降低了陶粒密度。

2.5 陶粒烧制前后的矿物组成

由图 6 可知:在最佳烧制条件下,生陶粒主要含有石英、方解石和斜方沸石,烧制后陶粒主要为石 英和钙长石。陶粒主要结晶相为 SiO₂,这与前期研究结果一致^[27]。烧制后的 SiO₂ 衍射峰显著降低,说 明烧结过程中陶粒表面有大量熔融物质产生,形成一定体量的釉质层,有效提高了陶粒抗压强度。斜方



图 5 陶粒烧制前后微观形态对比 Figure 5 Micromorphological comparison of ceramsite before and after firing

沸石衍射峰减弱,钙长石衍射峰增强,说明陶粒烧 制过程中一部分的斜方沸石转化成为了钙长石。

2.6 陶粒重金属浸出特性

如表 5 所示: 在最佳工艺条件下烧制的陶粒, 重金属浸出比炉渣泥本身明显下降,其中 Cd 和 Zn 的浸出质量浓度都大大降低,且使用炉渣泥烧制 的陶粒重金属 Zn 浸出质量浓度低于市场陶粒。可 见,将炉渣泥烧制成陶粒,其烧结过程中内部产生 的液相,将重金属包裹起来,对重金属起到了很好 的固化作用^[28]。

2.7 陶粒经济性分析

3 种添加剂粉煤灰、石英粉、高岭土的单价分 别为 80.0、130.0、110.0元·t⁻¹, 且每 消耗 1 t 炉渣泥可以节约 159.0元·t⁻¹ 的填埋处理费。根据陶 粒原料配比和堆积密度可知:每生产 1 m³ 的陶粒需 要消耗炉渣泥 0.235 t,粉煤灰 0.235 t,石英粉 0.235 t, 高岭土 0.078 t。综上所述,生产陶粒的原料成本为 20.5元·m⁻³。实验室采用的马弗炉容量为 400 mm× 250 mm×160 mm,一次可以烧结 0.016 m³ 的陶粒。 最佳烧结工艺 (1 175 ℃和 15 min)一次耗电为 0.2



图6 陶粒烧制前后矿物组成

Figure 6 Mineral composition of ceramsite before and after firing

表 5 陶粒重金属浸出质量浓度

Table 5 Leaching content of heavy metals in ceramsite

Tuble 5 Educining content of neury metals in certainsite						
夕称	质量浓度/(mg·L ⁻¹)					
有你	Cd	Zn				
炉渣泥	0.730 0	32.300 0				
陶粒	0.006 5	0.511 7				
市场陶粒	0.002 3	1.321 5				
GB/T 5083.3—2007	1.000 0	100.000 0				

kW·h,因此,烧制1m³ 陶粒需要消耗电量12.5 kW·h。每千瓦时电费价格按0.6 元计算,制作陶粒的电力成本则为7.5 元·m⁻³,因此,在实验室中制备陶粒的总成本为28.0 元·m⁻³。目前国内陶粒市场价格约130.0 元·m⁻³,故通过炉渣泥生产陶粒的利润可以达102.0 元·m⁻³。

3 讨论与结论

城市生活垃圾成分复杂,焚烧后所得炉渣泥存在重金属超标等问题^[6],本研究采用九峰垃圾焚烧厂的炉渣泥,其中 Cd 和 Zn 超标。SHAO 等^[23]研究表明:城市固体垃圾焚烧后的飞灰和底灰可以作为生产陶粒的原料,而且陶粒的制作需要同时满足多种物质成分,比如 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃和多种助溶剂。 本研究采用炉渣泥和粉煤灰、石英粉、高岭土混合,按照质量比为 3:3:3:1 来制备陶粒。通过添加石英 粉和高岭土以提高陶粒的强度和可塑性^[24]。在烧结温度为1175℃,烧结时间为15min,预热温度为400℃,预热时间为20min时,烧制出的陶粒具有抗压强度高和吸水率低的特点,这与MI等^[13]研究结果一致。最佳烧制工艺烧出来的陶粒质量符合GB/T17431.1标准,其中堆积密度为783kg·m⁻³,抗压强度为7.9MPa,1h吸水率为9.8%。FAN等^[15]使用铬污染土壤烧制陶粒,铬元素在烧制过程中被固化,浸出含量降低,本研究炉渣泥烧制的陶粒,Cd和Zn浸出毒性远远低于GB/T5083.3—2007标准,有效减少了对环境的潜在危害性。从经济性方面看,炉渣泥烧制陶粒,每生产1m³陶粒可以创造102.0元经济效益。对于烧制膨胀效果更好的陶粒还需深入研究,因为引入不同的添加剂或着改进烧制工艺都会对陶粒的膨胀效果产生影响。综上所述,通过将生活垃圾焚烧炉渣泥烧制成陶粒,可以有效减少炉渣泥对环境的潜在危害,实现炉渣泥的资源化利用,创造可观的经济价值。

- 4 参考文献
- [1] 唐伟,郑思伟,何平,等.杭州市城市生活垃圾处理主要温室气体及VOCs排放特征[J].环境科学研究,2018,31(11): 1883-1890.

TANG Wei, ZHENG Siwei, HE Ping, *et al.* Characteristics of main greenhouse gas and VOCs emissions from municipal solid waste disposal in Hangzhou City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(11): 1883 – 1890.

- [2] LI Junxia, DONG Zhili, YANG Enhua. Strain hardening cementitious composites incorporating high volumes of municipal solid waste incineration fly ash [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, **146**: 183 191.
- [3] SABBAS T, POLETTINI A, POMI R, et al. Management of municipal solid waste incineration residue [J]. Waste Management, 2003, 23(1): 61 – 88.
- [4] 张涛, 赵增增. 城市生活垃圾焚烧炉渣在混凝土中的应用研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 65 69.
 ZHANG Tao, ZHAO Zengzeng. Reutilization of municipal solid waste incinerator bottom ash as concrete aggregates [J].
 Environmental Pollution & Control, 2014, 36(4): 65 69.
- [5] 薛国强, 陆聪, 顾欢达, 等. 垃圾焚烧炉渣在道路基层中的应用实验及数值分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(11): 148-155.

XUE Guoqiang, LU Cong, GU Huanda, *et al.* Experimental and numerical analysis of municipal solid waste incineration bottom ash used in road base [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(11): 148 – 155.

- [6] 芦会杰, 张旭, 刘欣艳. 北京市生活垃圾焚烧炉渣重金属特性及其来源分析[J]. 环境化学, 2018, 37(9): 1971 1977.
 LU Huijie, ZHANG Xu, LIU Xinyan. Composition and source apportionment of heavy metals in bottom ash from a municipal solid waste incinerator in Beijing [J]. *Environment Chemistry*, 2018, 37(9): 1971 1977.
- [7] 王妍, 张成梁, 苏昭辉, 等. 城市生活垃圾焚烧炉渣的特性分析[J]. 环境工程, 2019, 37(7): 172 177.
 WANG Yan, ZHANG Chengliang, SU Zhaohui, *et al.* Analysis characteristics of municipal solid waste incineration bottom ashes [J]. *Environment Engineering*, 2019, 37(7): 172 177.
- [8] FRANCISCA F M, GLATSTEIN D A. Environmental application of basic oxygen furnace slag for the removal of heavy metals from leachates [J/OL]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**: 121294[2022-08-01]. doi: 10.1016/j.jhazmat. 2019.121294.
- [9] HAN Yan, CAO Yun, WANG Hong, et al. Lightweight aggregate obtained from municipal solid waste incineration bottom ash sludge (MSWI-BAS) and its characteristics affected by single factor of sintering mechanism [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 70(2): 180 – 192.
- [10] WANG Zhulai, XUE Qi, LIN Zizeng, et al. Research progress of patent application for preparation of ceramsite from solid waste [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(11): 2455 – 2458.
- [11] 岳敏. 污泥的粉煤灰调理和污泥陶粒的制备及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
 YUE Min. Sludge Conditioning with Fly-ash and Preparation and Application of Ceramsite [D]. Ji' nan: Shandong University, 2011.
- [12] RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1951, 34(4): 121 128.
- [13] MI Hongcheng, YI Longsheng, WU Qian, et al. Preparation of high-strength ceramsite from red mud, fly ash, and bentonite

[J]. Ceramics International, 2021, 47(13): 18218 – 18229.

- [14] LI Xiaoguang, WANG Panqi, QIN Jinyi, *et al.* Mechanical properties of sintered ceramsite from iron ore tailings affected by two-region structure [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117919[2022-08-01]. doi: 10.1016/ j.conbuildmat.2019.117919.
- [15] FAN Chuanhe, QIAN Jueshi, YANG Yun, *et al.* Green ceramsite production via calcination of chromium contaminated soil and the toxic Cr(VI) immobilization mechanisms [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **315**: 128204[2022-08-01]. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128204.
- [16] HU Lanyu, MA Jianlong, YUE Yang, et al. Fixation stability of glass matrix co-existent with crystal phases for heavy metals formed by high-temperature vitrification [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(11): 13660 – 13670.
- [17] PENG Weihua, GUI Herong, HE Wenli, et al. Experimental study on leaching characteristics of heavy metals in fly ash and fiber ceramsite [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(3): 54 – 57.
- [18] 罗立群, 涂序, 周鹏飞. 污泥陶粒的制备与应用动态[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 151 157.
 LUO Liqun, TU Xu, ZHOU Pengfei. Preparation and application of sludge ceramsite prepared from sludge [J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(11): 151 157.
- [19] 力国民,常鑫,朱保顺,等. 烧结温度对添加复合助剂制备莫来石-刚玉基陶粒支撑剂性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(9): 1850 - 1854.
 LI Guomin, CHANG Xin, ZHU Baoshun, *et al.* Influence of sintering temperature on performance of mullite-corundum proppant prepared by adding compound additive [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(9): 1850 - 1854.
- [20] 林子增, 黄瑛, 谢文理. 污泥陶粒制备工艺烧结温度影响研究[J]. 功能材料, 2013, 44(增刊 1): 89-93.
 LIN Zizeng, HUANG Ying, XIE Wenli. Study on the effects of sintering temperature on the quality of sludge ceramsite [J].
 Journal of Functional Materials, 2013, 44(suppl 1): 89-93.
- [21] ZHAO Lina, HU Min, MUSLIM H, et al. Co-utilization of lake sediment and blue-green algae for porous lightweight aggregate (ceramsite) production [J/OL]. Chemosphere, 2022, 287(2): 132145[2022-08-01]. doi: 10.1016/j.chemosphere. 2021.132145.
- [22] CHEN Jia, CHEN Tiejun, ZHANG Yimin. Effect of temperature system on properties and microstructure of roasting ceramsites prepared with vanadium tailings [J]. *Metal Mine*, 2014, 457(7): 172 – 176.
- [23] SHAO Yingying, SHAO Yanqiu, ZHANG Weiyi, et al. Preparation of municipal solid waste incineration fly ash-based ceramsite and its mechanisms of heavy metal immobilization [J]. Waste Management, 2022, 143: 54 – 60.
- [24] YANG Huifen, LU Linfei, JIANG Beiping, et al. Effcet of anthracite on preparation of ceramsite using red mud [J]. Applied Mechanics and Materials, 467: 3 – 7.
- [25] HUANG Chenghao, YUAN Nannan, HE Xiaosong, *et al.* Ceramsite made from drinking water treatment residue for water treatment: a critical review in association with typical ceramsite making [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **328**: 117000[2022-08-01]. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117000.
- [26] BAO Teng, CHEN Tianhu, QING Chengsong, et al. Development and application of Palygorskite porous ceramsite in a biological aerated filter (BAF) [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 57(4): 1 – 14.
- [27] LI Pengwei, LUO Shaohua, ZHANG Lin, *et al.* Study on preparation and performance of iron tailings-based porous ceramsite filter materials for water treatment [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 276: 119380[2022-08-01]. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119380.
- [28] ZHAO Hailong, LIU Fang, LIU Hanqiao, et al. Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China [J]. Waste Management, 2020, 113: 447 – 455.