

海绵城市建设固废基陶粒的制备和性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.6005

胡伟达^{1,4} 王斯钦¹
肖新² 孙亚恩²
曹宇航¹ 邱锐¹
易泰伟³ 傅雪²
马满英¹

1. 湖南工业大学
醴陵陶瓷学院
湖南 株洲 412007
2. 株洲市住房和城乡建设局
湖南 株洲 412007
3. 湖南智谋规划工程设计
咨询有限责任公司
湖南 株洲 412007
4. 湖南阳东电瓷电气股份
有限公司
湖南 醴陵 412200

摘要: 选取城市污水厂脱水污泥、陶瓷厂废泥、粉煤灰、生物质气化炉渣、稻谷壳等固废物质为原料制备海绵城市用吸水陶粒。研究表明,当烧结温度分别为 950, 1000, 1050 °C, 且保温时间分别为 0, 1 h 时, 陶粒中的晶体主要包括 SiO_2 、 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 、 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 、 CaSiO_3 、 Al_2SiO_5 和 NaFeO_2 等; 随着烧结温度的升高及保温时间的延长, 陶粒孔隙率从 54.88% 显著降低至 17.18%, 堆积密度则从 380 kg/m^3 提升至 660 kg/m^3 , 吸水率从 59.97% 下降至 11.69%; 但单颗陶粒的抗压强度和蓄水率并未表现出类似的规律性变化趋势, 其中单颗陶粒的抗压强度在 0.62~11.24 MPa 范围之内, 蓄水率介于 37.22%~47.90% 之间。此外, 陶粒经重金属浸出检测和浸出水质 pH 检测, 符合海绵城市建设对水质的要求。因此, 所制陶粒的综合性能可满足海绵城市建设需求, 为固废材质制备吸水陶粒并应用于海绵城市建设提供了可行性参考。

关键词: 陶瓷固废; 陶粒; 吸水性; 海绵城市

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)06-0038-09

引文格式: 胡伟达, 王斯钦, 肖新, 等. 海绵城市建设固废基陶粒的制备和性能研究 [J]. 包装学报, 2025, 17(6): 38-46.

1 研究背景

随着城市化进程加快和极端天气频发, 传统雨水排放系统难以应对由暴雨引发的内涝问题, 同时雨水资源也未能被有效利用^[1-4]; 海绵城市建设则主要通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施, 提升城市对雨水吸纳和利用的能力。目前应用于海绵城市建设的材料主要有透水型沥青、混凝土、透水砖以及吸水陶粒等。透水型沥青、混凝土、以及砖质材料主要应用于表面铺装, 但其保水性能差, 蓄水和净化效果有限,

易堵塞和维护成本高^[5-13]。吸水陶粒具有吸水 and 蓄水且强度可控等特性, 在海绵城市建设的雨水花园、湿地浅滩、苗圃护坡等表层和地下层中得到广泛应用, 且陶粒原料主要为硅酸盐类物质, 具备环境友好、来源广泛、价格低廉等优势, 其在海绵城市建设中引起广泛关注^[14-15]。

因当前绝大部分固废材质原料为硅酸盐类物质, 采用固废材质制备陶粒的报道较多, 如城市生活垃圾焚烧灰分、河道淤泥、粉煤灰、煤矸石、废弃日用陶瓷以及建筑废弃物等^[16-19]。但因不同固废化学组成

收稿日期: 2025-07-20

基金项目: 株洲市住房和城乡建设局资助项目(株财采计[2024]000010号); 湖南省大学生创新训练计划创业实践项目(S202411535013S); 教育部产学研合作协同育人项目(220904082254614, 220604832020338); 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(HNJG-20230741)

作者简介: 胡伟达, 男, 讲师, 博士, 主要从事陶瓷材料研究, E-mail: 203huweida@163.com

和矿物特征存在显著差异, 导致其塑性和烧结活性也存在差异, 这些因素不仅会影响陶粒的微观结构 (如气孔、玻璃相、晶体种类等), 也会进一步影响陶粒的吸水率、蓄水率、堆积密度和抗压强度等物理性能^[20-23]。

鉴于上述固废材质可用于制备吸水性陶粒, 经前期调研并结合所在工业城市 (株洲) 的相关固废材质, 拟采用城市污水厂污泥、陶瓷厂废泥、生物质气化炉渣、粉煤灰、稻谷壳等固废材质制备吸水陶粒, 探究原料配比和烧结温度、保温时间对陶粒形貌和性能的影响, 为海绵城市建设用吸水陶粒的制备提供可行性参考。

2 实验部分

2.1 材料

脱水污泥取自城市污水处理厂 (以下简称“脱水污泥”); 陶瓷厂废泥取自湖南阳东电瓷电气股份有限公司电瓷生产沉降池; 粉煤灰取自株洲电厂; 生物质气化炉渣 (以下简称“气化炉渣”) 取自湖南阳东生物洁能科技有限公司生物质气化炉; 稻谷壳取自湖南醴陵地区大米加工厂。

2.2 设备

扫描电子显微镜 (SEM), JEOL-6510 型, 日本电子株式会社; X 射线衍射仪 (XRD), Ultimal IV 型, 日本理学株式会社; 同步热分析仪 (TG-DSC), STA 449 F5 型, 德国耐驰仪器制造有限公司; 电子天平, JE102 型, 上海浦春计量仪器有限公司; 电热鼓风干燥箱, 101-00 型, 中国绍兴苏帕仪器有限公司; 球磨机, XQM-4L 型, 中国天创科技发展有限公司; 滚筒机, 65 型, 浙江永盛科技股份有限公司; 数显式电动抗折仪, DPK-1000N 型, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; 马弗炉, KSL-1400X-A4 型, 深圳市科晶智达科技有限公司; 多参数水质检测仪, GNST-900S 型, 河南绥净环保科技有限公司。

2.3 实验方法

2.3.1 陶粒制备

经前期 3 因素 (配方比例、烧结温度和保温时间) 5 水平 (5 个不同配方比例、烧结温度和保温时间) 正交试验 L25 (5³), 筛选出如表 1 所示的陶粒配方开展本项目研究工作。将脱水污泥、陶瓷厂废泥、生物质气化炉渣、粉煤灰以及稻谷壳放置于 120 ℃ 烘箱内干燥 12 h 后, 按表 1 中的物料比投入球磨机

中球磨 4 h。将球磨后的混合料倒入 60 目筛网过筛, 将混合料和水以一定比例 (9:1) 在碾钵中混合, 再将含有水分的混合料倒入滚桶机中加工成 3~5 cm 大小的球状陶粒。最后, 将所得球状陶粒置于马弗炉中并在不同温度区间进行烧制。

表 1 陶粒原料配比

Table 1 The raw material ratio of ceramsite

原料	脱水污泥	陶瓷厂废泥	粉煤灰	气化炉渣	稻谷壳
质量分数/%	55	20	15	9	1

2.3.2 陶粒检测

1) 表征测试

采用 SEM 对陶粒微观形貌进行观察; 采用 XRD 对烧结后的陶粒晶体结构进行测试; 采用 TG-DSC 对陶粒热处理工艺进行表征。

2) 吸水率和蓄水率测试

取单个烧制陶粒, 放入盛有自来水的容器中浸没 24 h 后, 取出用滤纸吸干表面水分并对浸水后的陶粒称重, 陶粒吸水率 (W_1) 按式 (1) 计算。将浸泡样品放置于电热恒温干燥箱中, 在 (30 ± 2) ℃ 下恒温干燥, 48 h 后取出样品, 称重后得到烘干质量 G 。陶粒蓄水率 W_2 按式 (2) 计算, 以 3 次测定值的算术平均值作为试验结果, 计算结果精确至 0.01%。

$$W_1 = \frac{W_w - D_w}{D_w} \times 100\%, \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{G - D_w}{W_w - D_w} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: D_w 为单个烧制陶粒的质量, g; W_w 为浸水后陶粒的质量, g。

3) 孔隙率、抗压强度和堆积密度测试

采用阿基米德排水法测定材料孔隙率。测量每个陶粒直径, 将陶粒置于抗压强度仪支座上, 以 0.5 kN/min 的加载速率施加垂直压力, 记录破坏载荷。抗压强度按式 (3) 计算, 以 10 次测定值的算术平均值作为试验结果, 计算结果精确到 0.01 MPa。使用量筒法测试陶粒的堆积密度, 按照式 (4) 进行计算。

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\rho = \frac{M_t - M_v}{V} \times 1000, \quad (4)$$

式中: P 为抗压强度, MPa; D 为每个陶粒的直径, mm; F 为破坏载荷, N; ρ 为陶粒堆积密度, kg/m³;

M_i 为陶粒和量筒质量, kg; M_v 为量筒质量, kg; V 为量筒体积, L。

4) 采用多参数水质检测仪对陶粒浸出水质进行 pH 检测, 陶粒原料的化学物质和重金属浸出检测依托专业机构按照国家标准 GB/T 4734—2022《日用陶瓷材料及制品化学分析方法》和 HJ/T 299—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》进行。

3 结果与分析

3.1 元素分析

采用 GB/T 4734—2022 中的分析方法对脱水污泥、陶瓷厂废泥、粉煤灰以及气化炉渣进行化学成分分析, 检测数据如表 2 所示。由表可见, 本文所选四大类固体废物化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、碱金属和碱土金属氧化物, 与黏土类陶瓷原料化学成分相同, 因此所选物质从物料组成上可用于制备陶粒。

表 2 陶粒原料化学成分

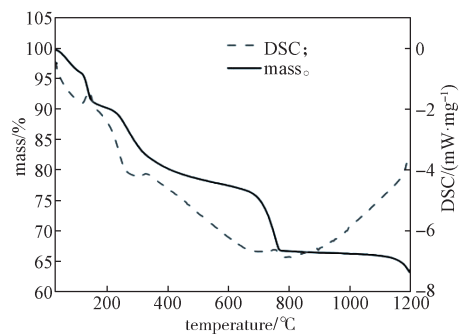
Table 2 The chemical composition of ceramsite

	raw materials									%
原 料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	LOI	
脱水污泥	15.06	4.65	13.80	20.14	1.80	0.48	0.20	0.50	43.37	
陶瓷厂废泥	59.06	23.17	2.93	0.23	0.71	1.46	0.22	1.02	11.20	
粉煤灰	53.44	20.46	5.17	2.89	1.10	1.92	0.29	0.86	13.87	
气化炉渣	92.57	0.48	0.34	1.23	0.61	1.71	0.33		2.73	

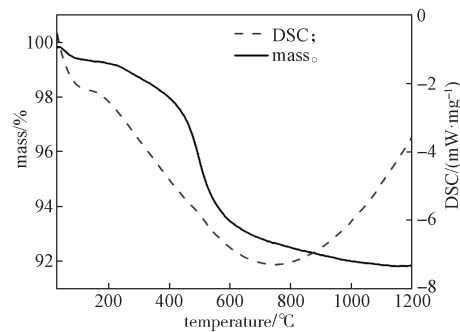
3.2 TG-DSC 分析

图 1 为陶粒及其原料的 TG-DSC 曲线。由图 1a 可知, 脱水污泥在室温至 200 °C 区间有部分失重, 主要为吸附水的蒸发; 在 200~400 °C 区间的失重为脱水污泥中有机物的热分解; 在 400~800 °C 区间的失重则主要对应于脱水污泥中 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 OH^- 等基团的热分解; 温度高于 800 °C 以后脱水污泥的热分解达到稳定。由图 1b 可知, 陶瓷厂废泥在室温至 800 °C 的失重主要对应于吸附水蒸发以及黏土类矿物中 CO_3^{2-} 和 OH^- 等基团的热分解, 但失重比例较少。由图 1c 可知, 粉煤灰在室温至 800 °C 的失重属于吸附水的蒸发以及粉煤灰中盐类物质的热分解, 失重比例同样较少。由图 1d 可知, 生物质气化炉渣在室温至 200 °C 的失重对应于吸附水蒸发, 200~500 °C 区间的失重对应于有机杂质分解, 500~900 °C 区间的失重则主要为残炭和灰分(硅酸盐类)等物质的分解。结合上述陶粒制备的 4 种主体原料成分, 可知陶粒原料热处理过程中在室温至 200 °C 的失重对应于吸附水的蒸发(见

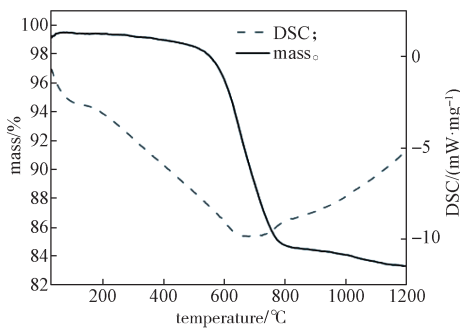
图 1e); 200~800 °C 区间的失重主要对应原料有机质、残炭、矿物及盐类以及 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 OH^- 等基团的热分解^[24-27]。当烧制温度高于 900 °C 之后陶粒的热分解趋于稳定, 故本实验拟设定陶粒烧制温度为 950、1000、1050、1100、1150 °C, 保温时间为 0 h 进行前期初筛。



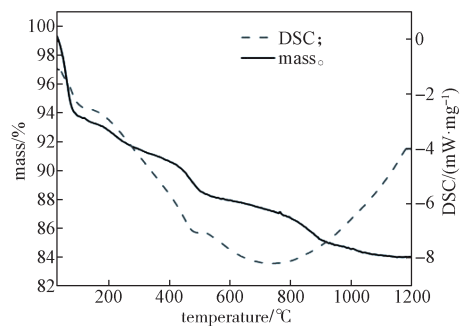
a) 脱水污泥



b) 陶瓷厂废泥



c) 粉煤灰



d) 气化炉渣

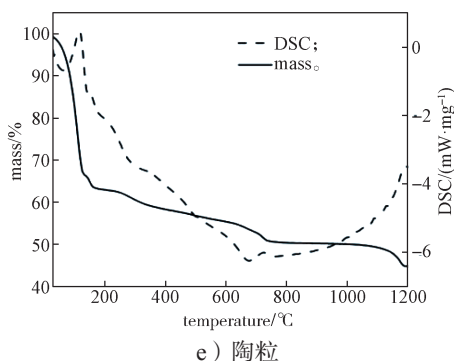


图1 陶粒及其原料的 TG-DSC 曲线

Fig. 1 TG-DSC diagrams of ceramsite and its raw materials

3.3 XRD 分析

图2为不同温度条件下烧制陶粒的XRD测试结果。当烧制温度为950℃时,陶粒主要以 SiO_2 和 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 晶体为主。当温度升高至1000℃时,陶粒中 SiO_2 和 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 的晶体形貌特征变明显,说明此温度下 SiO_2 和 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 晶体生长,且进一步析出 Al_2SiO_5 晶体。当温度升高至1050℃时,陶粒中仍存在 SiO_2 和 Al_2SiO_5 晶体,并能观察到 CaSiO_3 晶体的特征峰,但 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 晶体的特征峰消失。当温度升高至1100℃时,陶粒中不仅存在 SiO_2 、 Al_2SiO_5 和 CaSiO_3 晶体,还生成 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 晶体。当温度为1150℃时,陶粒中存在 SiO_2 、 CaSiO_3 和 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 晶体,且进一步生成 NaFeO_2 晶体。分析上述晶体变化可知,陶粒所制原料主要以硅酸盐类物质为主,因此在陶粒烧制过程中 SiO_2 晶体始终存在。对于其它晶体结构发生的变化,主要原因为:在950℃时, Na_2O 在陶粒原料中起促熔作用,能结合陶粒中的 SiO_2 和 Al_2O_3 以此进一步生成 $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 晶体;当温度继续升高时, $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$ 晶体消失, CaSiO_3 和 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 晶体逐渐析出,这是由于脱水污泥中 Ca^{2+} 的促熔能力较 Na^+ 的弱(温度较高时 Ca^{2+} 对 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 的网络结构起到断网作用),从而在陶粒中析出 CaSiO_3 和 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 晶体,其中 CaSiO_3 是水泥材质的主晶相,可进一步提高陶粒结构的强度^[28-30];将1100℃与1150℃下制备陶粒的XRD曲线进行对比,发现在1150℃下制备的陶粒中 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 的特征峰强度增强,而 CaSiO_3 特征峰的强度降低,可推导出 CaSiO_3 和 Al_2O_3 会随温度的升高向 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ 晶体转变,并进一步生成 NaFeO_2 晶体。

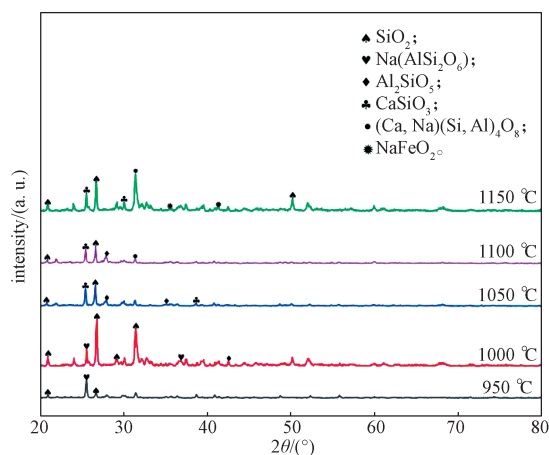
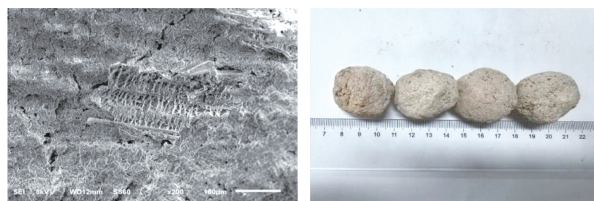


图2 不同温度下陶粒的 XRD 分析

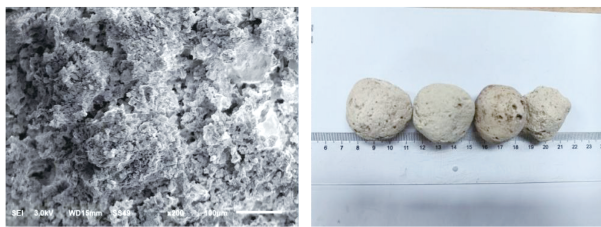
Fig. 2 XRD analysis of ceramsite at different temperatures

3.4 SEM 分析

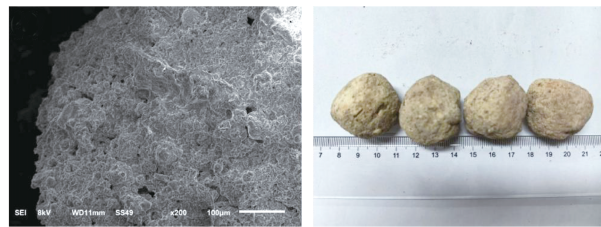
图3为不同温度条件下烧制陶粒的表面微观结构和外观形貌。由图3a可见,当温度为950℃时,陶粒表面有较小的气孔和微裂纹,且还存在未烧尽的稻谷壳骨架;从外观图可见陶粒表层结构较致密,尺寸大小主要为3~4 cm。结合前述陶粒物料组成和烧结温度分析,在950℃下陶粒原料组分间开始出现化学反应且发生烧结收缩效应。当温度为1000℃时(见图3b),陶粒表面的气孔增大,开始出现孔洞贯穿效应,小型颗粒明显,原料组分间开始出现堆积现象。当温度升至1050℃时(见图3c),陶粒表面出现玻璃化,表面气孔变小,原料组分间出现连片聚集现象。结合XRD分析结果可知,此时陶粒内部存在不同的晶体,且呈现出高温液相特征,其尺寸进一步收缩至3 cm以内。此外,陶粒表层有明显气孔和缺陷,说明陶粒原料中的热分解物质燃烧殆尽,并发生明显的化学变化。当温度为1100℃时(见图3d),可观察到陶粒表面有较大的玻璃化转变区域,存在较大面积连片现象并出现瓷化特征,从外观图可见陶粒表面黑化,陶粒尺寸进一步收缩。当温度继续升至1150℃时(见图3e),陶粒已完全发生玻璃化转变,说明此温度条件不适合用来制备陶粒。



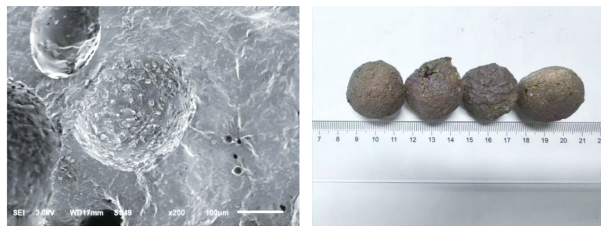
a) 950℃烧制陶粒



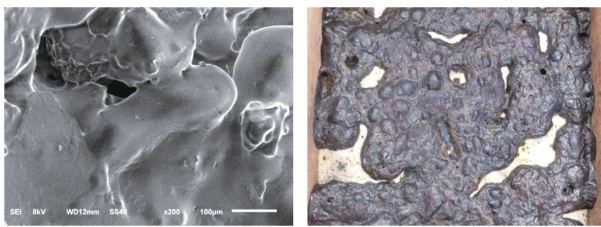
b) 1000 °C 烧制陶粒



c) 1050 °C 烧制陶粒



d) 1100 °C 烧制陶粒



e) 1150 °C 烧制陶粒

图 3 不同温度条件下烧制陶粒的 SEM 和外观图

Fig. 3 SEM images and appearance pictures of ceramsite fired at different temperatures

3.5 孔隙率、堆积密度和抗压强度分析

结合上述分析结果并依据陶粒实际生产和应用, 拟设定陶粒烧结温度为 950, 1000, 1050 °C 并分别在相应温度下保温 0 h 和 1 h, 以此进行后续实验探究。图 4 为不同陶粒样品的孔隙率, 在 950 °C 下保温 0 h 和 1 h 制备的陶粒分别命名为样品 a 和 b, 在 1000 °C 下保温 0 h 和 1 h 制备的陶粒分别命名为样品 c 和 d, 在 1050 °C 下保温 0 h 和 1 h 制备的陶粒分别命名为样品 e 和 f。由图 4 可知, 随着温度的升高和保温时间的延长, 陶粒孔隙率从 54.88% 降低至 17.18%, 呈逐步减小趋势。由图 5 中陶粒的断面微观结构可知, 随着温度升高, 陶粒依次发生水分蒸发、有机物和碳素物质的烧失, 碳酸盐、硫酸盐类的热分解, 陶粒内部

逐步产生孔隙 (见图 5a 和 5c)。当温度继续升高时, 陶粒内部颗粒出现团聚现象, 进一步挤压陶粒内部的气孔 (见图 5e)。同时, 保持相同温度条件并将保温时间延长至 1 h, 由于热传导加剧, 陶粒中的固相物质开始熔解并在表面生成玻璃液相 (见图 5b 和 5d), 其会流入陶粒的内部孔隙中 (见图 5f), 从而造成陶粒孔隙率逐步降低的现象。

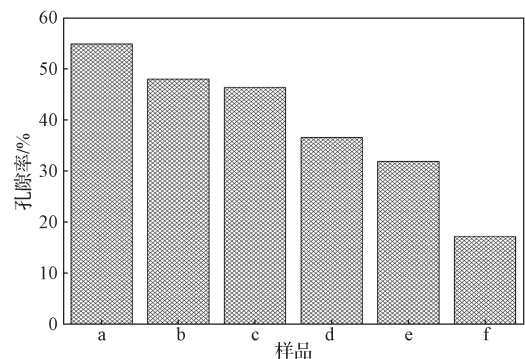
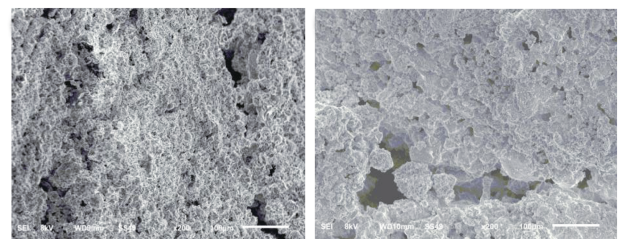


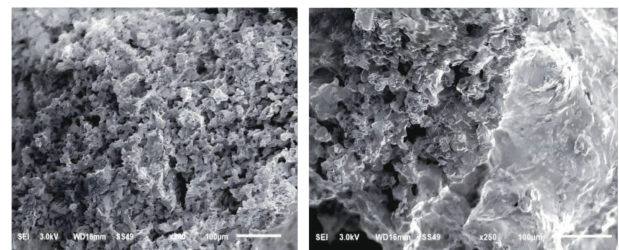
图 4 不同制备条件下陶粒样品的孔隙率

Fig. 4 Porosity of ceramsite samples under different preparation conditions



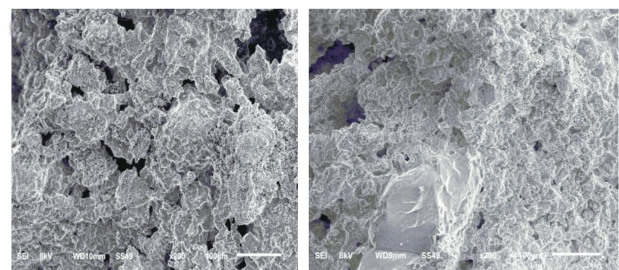
a) 950 °C, 0 h

b) 950 °C, 1 h



c) 1000 °C, 0 h

d) 1000 °C, 1 h



e) 1050 °C, 0 h

f) 1050 °C, 1 h

图 5 不同热处理条件下陶粒断面微观结构

Fig. 5 Microstructure of ceramsite cross-section under different heat treatment conditions

图6为不同制备条件下陶粒样品的堆积密度结果。在950℃保温0 h下陶粒的堆积密度最小(380 kg/m³), 且陶粒的堆积密度会随烧结温度和保温时长的增加而增大, 其最大值为660 kg/m³(1050℃下保温1 h), 与图4中陶粒孔隙率的分析结论一致。烧结温度升高和保温时间延长会促使陶粒内部固相物质开始出现玻璃化转变, 熔融物质会填入陶粒孔隙, 促使陶粒发生收缩, 堆积密度因此增大。

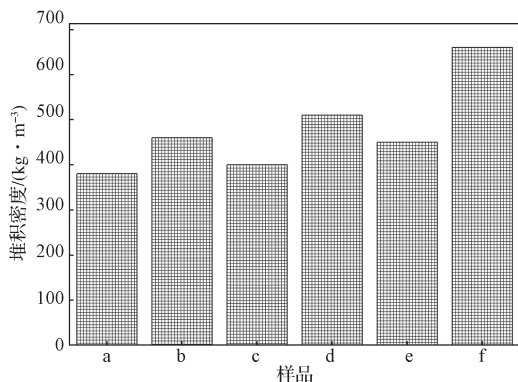


图6 不同制备条件下陶粒样品的堆积密度

Fig. 6 The bulk density of ceramsite samples under different preparation conditions

图7为不同制备条件下陶粒样品的抗压强度图。在相同保温时间条件下, 烧结温度较高的陶粒具有更大的抗压强度^[31]。在950℃下保温0 h时, 陶粒的抗压强度仅为0.62 MPa; 当温度为1050℃, 保温时间为1 h时, 单颗陶粒的抗压强度可以达到11.24 MPa。因此, 在上述3个烧结温度(950℃、1000℃和1050℃)下制备的陶粒, 其抗压强度均能满足海绵城市建设中对于“屋面绿化、生态净化、人工湿地”等3个方面的不同场景使用要求。

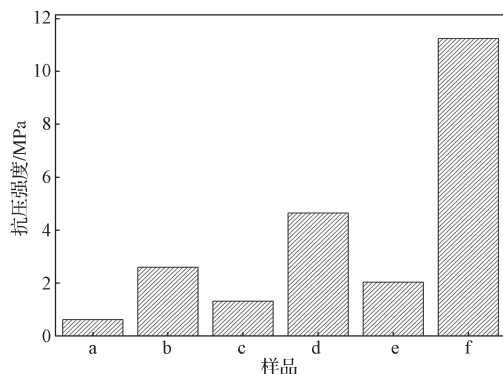


图7 不同陶粒样品抗压强度

Fig. 7 The compressive strength of different ceramsite samples

3.6 吸水率和蓄水率分析

吸水率是反映陶粒用于海绵城市建设的重要指标。如图8所示, 随着温度的提升和保温时间的延长, 陶粒的吸水率呈现下降趋势。当烧结温度为950℃且保温0 h时, 陶粒的吸水率最大(59.97%); 当温度提升至1050℃且保温1 h时, 此时陶粒仅有11.69%的吸水率。陶粒的原料主要为黏土类物质, 由于黏土是片层结构, 具有较好的亲水性和吸水性, 当温度较低(950℃)时陶粒原料的片层结构还未完全破坏, 且此时稻谷类碳管骨架仍然存在, 陶粒表面会形成微气孔, 对陶粒吸水性有促进作用; 当温度提升至1050℃且保温1 h时, 陶粒原料中的热分解物质消耗殆尽, 片层结构遭到破坏, 陶粒内部气孔相连, 形成较大的孔洞, 表面颗粒和玻璃化特征明显, 陶粒的吸水率相应降低^[32]。

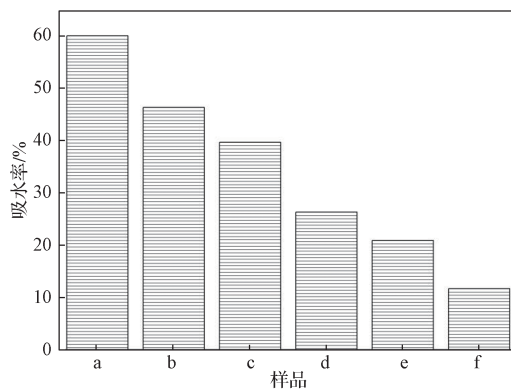


图8 不同制备条件下陶粒样品的吸水率

Fig. 8 The water absorption rate of ceramsite samples under different preparation conditions

蓄水率则可以反应陶粒对所吸收水分的保存性能。与混凝土、高分子透水材质相比, 陶粒的蓄水性能具有一定优势。如图9所示, 不同制备条件下陶粒样品的蓄水率与吸水率呈现出不同的变化规律。当烧结温度为950℃且保温0 h时, 陶粒具有最大的蓄水率(47.90%), 这是因为此时陶粒表面还未形成较大的气孔, 陶粒内部的片层结构能有效减缓水分蒸发。当烧结温度为950℃且保温1 h时, 陶粒的蓄水率降低至37.22%, 这是因为在相同温度条件下, 陶粒的气孔率随保温时间的延长而增加, 有效增加了陶粒中水分的蒸发路径。当陶粒烧结温度为1000℃时, 保温时间对陶粒蓄水率的影响不明显。当烧结温度为1050℃时陶粒的蓄水率为38.86%, 将保温时间延长至1 h后陶粒蓄水率则提升至46.00%, 此

条件下陶粒内部收缩较大, 气孔率较少, 且陶粒表面玻璃化程度较高, 能有效减缓陶粒中水分的蒸发。在上述 3 个温度下烧结陶粒的蓄水率均在 30% 以上, 表明其具有较好的蓄水性能。

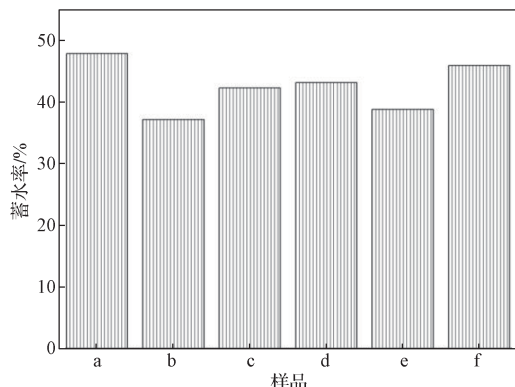


图 9 不同制备条件下陶粒样品的蓄水率

Fig. 9 The water storage rate of ceramsite samples under different preparation conditions

3.7 重金属元素和 pH 值分析

由于陶粒原料取自固废材质, 需对所制陶粒进行重金属浸出实验。采用检测标准 (HJ/T 299—2007) 对上述陶粒进行重金属元素检测, 检测结果如表 3 所示。陶粒浸出水质数据仅检验出砷 (0.0929 mg/L) 和总铬 (0.0704 mg/L), 符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中 IV~V 类水质要求。砷和总铬可能来自于城市污泥体系, 后续研究可通过陶粒烧结过程中的玻璃化转变达到固结砷和总铬的作用。此外, 采用标准 GB 3838—2002 对上述陶粒浸出水质 pH 进行检测 (标准限值 pH: 6.00~9.00), 结果如表 4 所示。陶粒浸出水质的 pH 值均在 7.82~8.16 范围之内, 也符合 GB 3838—2002 中 III~V 类水质要求。因此, 所制陶粒适用于一般工业用水区、人体非直接接触的娱乐用水区、农业用水区以及一般景观要求水域^[33], 并能满足海绵城市的建设需求。

表 3 陶粒重金属元素浸出检测

Table 3 Leaching detection of heavy metal elements in ceramsite

检测项目	铅	锌	铜	镉	镍	砷	汞	总铬
检测结果/(mg·L ⁻¹)	ND	ND	ND	ND	ND	0.0929	ND	0.0704

表 4 陶粒浸出水质 pH 检测

Table 4 pH detection of leachate from ceramsite

样品	a	b	c	d	e	f
pH 检测结果	7.98	7.82	8.04	8.16	8.15	8.06

4 结论

以城市污水厂脱水污泥、陶瓷厂废泥、粉煤灰、生物质气化炉渣及稻谷壳等 5 种固体废弃物为原料, 开发了能适用于海绵城市建设的高性能陶粒。通过综合运用化学成分分析、TG-DSC、XRD 及 SEM 等表征手段, 重点探究烧结温度 (950 ℃、1000 ℃、1050 ℃) 与保温时间 (0 h、1 h) 对陶粒孔隙结构、抗压强度、吸水和蓄水等性能的影响规律。实验数据表明, 陶粒孔隙率调控范围达 17.18%~54.88%, 堆积密度值位于 380~660 kg/m³ 区间, 吸水率与蓄水率最高可以达到 59.97% 和 47.90%, 单颗陶粒抗压强度最大为 11.24 MPa, 重金属浸出浓度和浸出水质 pH 值均符合海绵城市建设水质要求。上述结论有效验证了固废基陶粒应用于海绵城市透水铺装系统的可行性, 为采用同类固废材料制备吸水陶粒并应用于海绵城市建设提供了可行性参考。

参考文献:

- [1] 张 恒, 常 江. 国家海绵城市建设对城市水生态环境质量的影响 [J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2721~2734.
- [2] 杨 柳, 李小英, 王 莹, 等. 海绵城市雨水调蓄设施优化设计与运行调度研究进展 [J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 140~149.
- [3] ZHU L. Rainwater Runoff Regulation Effect in Sponge Reconstruction Area Based on Rainstorm Flood Management Model[J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 319: 100507.
- [4] GUAN X, WANG J Y, XIAO F P. Sponge City Strategy and Application of Pavement Materials in Sponge City[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303: 127022.
- [5] 杜晓丽, 郭 闯, 杨明哲, 等. 不同降雨特征下透水沥青的径流系数变化 [J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 30~37.
- [6] ABOUFOUL M, SHOKRI N, SALEH E, et al. Dynamics of Water Evaporation from Porous Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 406~414.
- [7] SHAN J S, FENG S S, LI F, et al. Lateral Permeability of Pervious Asphalt Mixtures and the Influence of Clogging[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121988.
- [8] 谭 燕, 易晨光, 胡安迪, 等. 透水混凝土路面堵塞及透水性能恢复试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科

- 学版), 2021, 52(7): 2480-2490.
- [9] CAI P C, MAO X S, LAI X Y, et al. Influence Mechanism of Brick-Concrete Ratio on the Mechanical Properties and Water Permeability of Recycled Aggregate Pervious Concrete: Macroscopic and Mesoscopic Insights[J]. Construction and Building Materials, 2025, 467: 140379.
- [10] 李 山, 仵 苗, 李静思, 等. 透水砖与垫层入渗特性对城市降雨产流的影响研究 [J]. 自然灾害学报, 2020, 29(6): 147-157.
- [11] LI P, SUN F Y, DONG Y, et al. Utilization of Drinking Water Treatment Sludge with Coal Fly Ash to Make Permeable Bricks for Low Impact Development[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 212: 107932.
- [12] LÜ R B, LIANG S, LI X L, et al. Production of Water-Permeable Ceramic Bricks Derived from Fly Ash via a Simple Pellet Method: Mechanism of Mechanical Strength and Permeability[J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128989.
- [13] WANG C, ZHAO J J, ZHAO X, et al. Improving the Applicability of Green Recycled Aggregate Permeable Brick Through Target Porosity and Waste Glass[J]. Construction and Building Materials, 2025, 475: 141112.
- [14] 何汉武. 一种新型海绵蓄水陶土及其制备方法: CN111848210A[P]. 2020-10-30.
- [15] 李如燕, 张 松, 张 兰, 等. 一种高吸水性陶粒的制备方法: CN107963902A[P]. 2018-04-27.
- [16] 马 鹏, 张 成, 宋成芳, 等. 生活垃圾焚烧炉渣泥陶粒的制备及性能研究 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 867-874.
- [17] 朱熠鑫, 叶 珍, 任凌伟, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰协同建筑弃土烧制陶粒试验 [J]. 环境工程, 2023, 41(12): 206-212, 130.
- [18] 张东帅, 王 进, 岳正波, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰协同底渣制备轻质低硅铝型陶粒实验研究 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46(1): 32-37.
- [19] 陈沁媛, 闫一凡, 赵振华, 等. 固废基陶粒重金属固化效果及产品性能的影响因素研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 515-530.
- [20] 伍天然, 谈云志, 吴 军, 等. 多源固废湿法制备陶粒及其性能研究 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2025, 47(2): 69-75.
- [21] WAN Y J, WU X Y, ZHANG H H, et al. Exploring Mechanical Properties and Long-Term Environmental Impact of Ceramsites Derived from Diverse Solid Wastes[J]. Waste Management, 2024, 190: 538-547.
- [22] XIAO T T, FAN X Y, WANG H R, et al. Removal of Phosphorus from Water Bodies Using High-Performance Ceramsite Prepared from Solid Wastes[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 342: 126962.
- [23] WANG L S, WANG Y X, SUN W, et al. Preparation of Lightweight and High-Strength Ceramsite from Highly Doped Coal Fly Ash[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(12): 3885-3898.
- [24] 孙飞凡, 袁世震, 卢如飞, 等. 固体回收燃料掺烧对污泥燃烧特性的影响 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 78-86.
- [25] 赵 磊, 姜未汀, 潘卫国, 等. 煤粉掺烧污泥的热重及动力学研究 [J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(5): 433-438.
- [26] ZHAN X Y, ZHANG D S, WANG J, et al. Preparation of Lightweight Ceramsite from Municipal Solid Waste Incineration Ash and Tuff: Constrained Uniform Mixture Design, Thermodynamic Simulation and Formation Mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2024, 456: 139315.
- [27] EMBAYE T M, AHMED M B, DAI G F, et al. Investigation of Thermal Behaviour and Synergistic Effect in Co-Pyrolysis of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge Through Thermogravimetric Analysis[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 111: 101443.
- [28] 刘 荣, 闫肖雅, 高 鹏, 等. Al_2O_3 、 SiO_2 和 Fe_2O_3 对淤泥基免烧陶粒的性能影响研究 [J]. 混凝土, 2024(9): 135-140, 156.
- [29] 张 杰, 田蒙奎, 张云飞. 烧结制度及造孔剂用量对粉煤灰基多孔陶瓷膜支撑体性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 785-790.
- [30] PEI J N, PAN X L, LÜ Z Y, et al. Synergistic Mechanism to Prepare Ultra-Lightweight Ceramsite Using Multiple Industrial Solid Wastes[J]. Construction and Building Materials, 2024, 425: 136139.
- [31] HAN A L, WANG R X, ZHANG C L, et al. Preparation of Ceramsite from Heavy Metal Contained Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash Synergistically with Silicon/Aluminum-Containing Waste[J]. Journal of Hazardous Materials Advances, 2025, 18: 100725.
- [32] 朱 毅, 郑伍魁, 王 飞, 等. 多孔陶粒孔结构设计及其蓄水性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(2): 207-215.
- [33] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 4-5.

(责任编辑: 李 涛)

Research on the Preparation and Performance of Solid Waste-Based Ceramsite for Sponge City Construction

HU Weida^{1,4}, WANG Siqin¹, XIAO Xin², SUN Yaen², CAO Yuhang¹,
QIU Rui¹, YI Taiwei³, FU Xue², MA Manying¹

(1. Liling Ceramic College, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Municipal Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Zhuzhou Hunan 412007, China;

3. Hunan Zhimou Planning Engineering Design Consulting Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China;

4. Hunan Yangdong Porcelain Insulators and Electrical Co., Ltd., Liling Hunan 412200, China)

Abstract: Solid waste materials such as dewatered sludge from urban sewage treatment plants, waste mud from ceramic factories, fly ash, slag from biomass gasification furnaces, and rice husks were selected as raw materials to prepare water-absorbing ceramsite for sponge cities. Research indicates that when the sintering temperatures are 950 °C, 1000 °C and 1050 °C respectively, with holding times of 0 h and 1 h, the primary crystal phases of the ceramsite include SiO_2 , $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$, $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$, CaSiO_3 , Al_2SiO_5 and NaFeO_2 . As the sintering temperature and holding time increase, the porosity of the ceramsite decreases significantly from 54.88% to 17.18%, the bulk density increases from 380 kg/m^3 to 660 kg/m^3 , and the water absorption rate drops from 59.97% to 11.69%. However, the single particle compressive strength and water storage capacity of the ceramsite do not exhibit a consistent trend. The single particle compressive strength ranges from 0.62 MPa to 11.24 MPa, while the water storage capacity varies between 37.22% and 47.90%. Furthermore, leaching tests for heavy metals and pH in the ceramsite confirm compliance with water quality standards required for sponge city construction. The overall performance of the produced ceramsite satisfies the demands of sponge city construction and provides a viable reference for utilizing solid waste in the production of water-absorbing ceramsite for such applications.

Keywords: ceramic solid waste; ceramsite; water absorption; sponge city