

# 煤矸石 - 粉煤灰陶粒制备及其混凝土试件性能特征研究

袁 扬<sup>1</sup>, 姚 军<sup>1</sup>, 张 坤<sup>2</sup>, 闫 欣<sup>2</sup>, 邓 辉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>淮南东辰固废利用有限公司, 安徽 淮南

<sup>2</sup>安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南

<sup>3</sup>建筑材料工业技术监督研究中心, 北京

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月6日; 发布日期: 2025年12月18日

## 摘 要

以煤矸石和粉煤灰为原料, 按照不同配比制备多孔陶粒, 研究煤矸石和粉煤灰配比对陶粒堆积密度、筒压强度、表观密度和孔隙率的影响。再以煤矸石 - 粉煤灰陶粒为主要原料, 添加水泥、矿粉和减水剂等, 制备陶粒混凝土试件, 分析不同龄期试件的抗压强度和容重。结果表明: 随着粉煤灰掺量增加, 陶粒堆积密度和表观密度先增大后减小, 孔隙率先减小后增大, 筒压强度整体呈减小趋势; 陶粒混凝土试件, 抗压强度随龄期增长而增大, 容重随龄期增长呈波动性变化, 前后相差不大。研究结果为煤矸石 - 粉煤灰陶粒在建材领域的应用提供了参考。

## 关键词

煤矸石, 粉煤灰, 陶粒, 混凝土

# Research on the Preparation of Coal Gangue-Fly Ash Ceramsite and the Performance Characteristics of Its Concrete Specimens

Yang Yuan<sup>1</sup>, Jun Yao<sup>1</sup>, Kun Zhang<sup>2</sup>, Xin Yan<sup>2</sup>, Hui Deng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Huainan Dongchen Solid Waste Utilization Co., Ltd., Huainan Anhui

<sup>2</sup>School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

<sup>3</sup>Research Center for Technical Supervision of Building Materials Industry, Beijing

Received: November 15, 2025; accepted: December 6, 2025; published: December 18, 2025

文章引用: 袁扬, 姚军, 张坤, 闫欣, 邓辉. 煤矸石-粉煤灰陶粒制备及其混凝土试件性能特征研究[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 2981-2988. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412320

## Abstract

Using coal gangue and fly ash as raw materials, porous ceramic particles were prepared according to different ratios, and the effects of coal gangue and fly ash ratios on the bulk density, cylinder compression strength, apparent density, and porosity of ceramic particles were studied. Using coal gangue-fly ash ceramic particles as the main raw material, cement, mineral powder, and water reducing agents are added to prepare ceramic particle concrete specimens, and the compressive strength and bulk density of specimens at different ages are analyzed. The results show that with the increase of fly ash content, the bulk density and apparent density of ceramic particles first increase and then decrease, the porosity first decreases and then increases, and the overall compressive strength of the cylinder shows a decreasing trend. The compressive strength of ceramic aggregate concrete specimens increases with age, and the bulk density fluctuates with age, with little difference between the early and late stages. The research results provide reference for the application of coal gangue fly ash ceramic particles in the field of building materials.

## Keywords

Coal Gangue, Fly Ash, Ceramsite, Concrete

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

煤矸石和粉煤灰是煤炭采选、使用过程中产生的固体废弃物[1]。我国是一个煤炭生产和消费大国，2022 年以来，每年煤矸石和粉煤灰的排放量均在 8 亿吨以上[2]。煤基固废大量堆积，不仅压占土地资源[3]，还会造成不同程度的环境污染[4]。利用煤矸石、粉煤灰制备具有特殊功能的陶粒，用于建材领域[5]，是煤基固废规模化、无害化、资源化利用的重要方向。

目前陶粒混凝土及固废基陶粒研究已有积累：孙高扬等发现陶粒掺量增加会延长混凝土凝结时间，15%陶粒掺量的抗压、劈拉强度优于 30%掺量且高于普通混凝土，弹性模量则随掺量增加而降低[6]；冯玉林等表明污泥尾矿陶粒替代率上升使混凝土体积密度下降，28 d 龄期 60%替代率时抗压强度最高[7]。赵欣悦等通过正交试验，明确粉煤灰、玻璃纤维对页岩陶粒混凝土力学性能的影响，得出不同性能对应的优选配比[8]；赵增丰等指出免烧固废陶粒混凝土导热系数低、保温性好，分析了其力学与耐久性能[9]；卜长明等发现 40%粉煤灰掺量下 22%石膏粉复掺可改善陶粒混凝土微观结构、提升抗压强度[10]。但煤矸石与粉煤灰复合制备陶粒及对应混凝土性能的协同研究仍需加强。为此，本文研究煤矸石和粉煤灰对比对陶粒及其混凝土试件性能特征的影响，以期对相关领域工程实践提供参考。

## 2. 实验材料

制备陶粒的煤矸石来自淮南潘集各矿井，粉煤灰来自淮沪煤电有限公司田集发电厂。煤矸石和粉煤灰的主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，还有少量的  $\text{CaO}$ 、 $\text{TFe}$ 、 $\text{MgO}$  等，具体化学成分如表 1 所示。

**Table 1.** Main chemical compositions of coal gangue and fly ash/%

表 1. 煤矸石和粉煤灰主要化学成分/%

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TFe	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
煤矸石	19.81	2.26	2.97	2.37	0.90	0.02	0.41	56.40	0.75
粉煤灰	36.7	1.63	2.75	0.84	0.66	<0.001	<0.001	55.79	1.38

制备混凝土试件，以煤矸石 - 粉煤灰陶粒为轻骨料，添加 525 海螺水泥、陶砂、S95 级矿粉、粉煤灰和聚羧酸减水剂等。主要添加材料各项性质指标如表 2~4 所示。

Table 2. Property indicators of cement

表 2. 水泥性质指标

类别	表比面积(m <sup>2</sup> /kg) ≥ 300	烧失量 (%) ≤ 3.5	MgO (%) ≤ 5.0	Cl 含量 (%) ≤ 0.06	SO <sub>3</sub> 含量 (%) ≤ 3.5
P.O.42.5.盘景	352	3.77	1.42	0.018	2.42
P.O.52.5.海螺	368	2.53	1.45	0.014	2.44

Table 3. Property indicators of S95 grade ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

表 3. S95 级矿粉性质指标

级别	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面积 (m <sup>2</sup> /kg)	流动度比(%)	活性指数(%)		SO <sub>3</sub> 含量(%)
				7 d	28 d	
S95	2.9	428	101	77	98	0.19

Table 4. Property indicators of polycarboxylate superplasticizer

表 4. 聚羧酸减水剂性质指标

SCG-600	密度	含固量	PH	总碱量 (%)	混凝土减水量 (mm)	净浆流动性 (mm)
制品标准	1.050±0.020	17.00±1.70	7.0±4.0	≤ 4.0	≥ 25	≥ 200
检验结果	1.049	18.43	4.98	0.2	29.0	220

3. 煤矸石 - 粉煤灰陶粒及其混凝土试件制备

3.1. 煤矸石 - 粉煤灰陶粒制备

共设计 5 种煤矸石、粉煤灰配比(以下简称“矸灰比”), 分别为 90:10、85:15、80:20、75:25、70:30, 如表 5 所示。制备陶粒的具体流程: 首先对煤矸石进行破碎、粉磨, 过 100 目筛, 然后按照设计的配比用电子秤称取煤矸石粉和粉煤灰, 将其搅拌均匀后, 加水再次搅拌均匀, 放置于造粒机中制造生球。将生球放入马弗炉, 以 5℃/分钟的速率升温至 600℃, 预热 30 分钟, 然后以 1150℃烧结 25 分钟, 自然冷却后得到最终陶粒, 如图 1 所示。根据国家标准, 对制得陶粒的主要性能指标进行测定。

Table 5. Raw material ratio of ceramicsite

表 5. 陶粒原料配比

样品编号	1	2	3	4	5
煤矸石	90	85	80	75	70
粉煤灰	10	15	20	25	30



Figure 1. Coal gangue-fly ash ceramsite  
图 1. 煤矸石 - 粉煤灰陶粒

3.2. 陶粒混凝土试件制备

将上文 5 种矸灰比的陶粒过筛，选出粒径 3~8 mm 的制备混凝土试件，每种矸灰比的陶粒制备 4 组 (每组 3 个)试件，分别用于 3 天、7 天、14 天和 28 天龄期的测试。制备陶粒混凝土试件的具体流程：按照设计的配比(如表 6 所示)称量各种材料，将煤矸石 - 粉煤灰陶粒在清洁自来水中浸泡 1 小时，使其充分吸水，然后在空气中暴露 24 小时后沥水，沥水后的陶粒与水泥、陶砂等在搅拌机内混合慢搅 3~5 分钟，加入稀释后的聚羧酸减水剂，继续搅拌 5~8 分钟。将搅拌均匀后的混凝土材料装入涂有脱模剂的三联模中，经振动台震动 15 秒，初凝后抹平表面，在室温环境下静置 24~48 小时后脱模。将脱模后的试件(如图 2 所示)放入水槽中养护，达到相应龄期后取出测定各项性能指标。

Table 6. Material mix ratio of concrete (total amount of 3 groups/kg)  
表 6. 混凝土材料配比(3 组总量/kg)

水泥	粉煤灰	陶砂		陶粒		水	减水剂
		0~1 mm	1~3 mm	3~5 mm	5~8 mm		
4.5	0.4	2.3	2.3	1.5	3.5	2.5	0.04

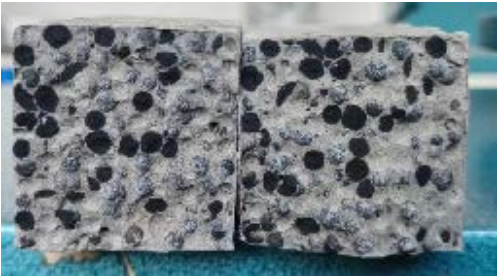


Figure 2. Ceramsite concrete test specimens  
图 2. 陶粒混凝土试件

4. 煤矸石 - 粉煤灰陶粒及其混凝土试件性能指标测定

4.1. 陶粒性能指标测定

按照《轻集料及其试验方法》(GB/T 17431.1-2010)测定陶粒的堆积密度、筒压强度、表观密度和孔隙率。

(1) 堆积密度

选取一个标准容器，记录容器的体积  $V$  和质量  $m$ 。将干燥的陶粒从 5 cm 的高度自然倾倒至标准容器中，避免震动或压实，直至填满并刮平表面，记录此时标准容器和陶粒的总质量  $M$ 。计算堆积密度  $\rho_1$ ，公式如下：

$$\rho_1 = \frac{(M - m_0) \times 1000}{V_0} \quad (1)$$

式中:  $\rho_1$  为堆积密度,  $\text{kg/m}^3$ , 取 3 次实验结果的算数平均值作为堆积密度的测定值;  $m_0$  为标准容器的质量, g;  $M$  为装满陶粒时容器和陶粒的总质量, g;  $V_0$  为标准容器的体积,  $\text{cm}^3$ 。

#### (2) 筒压强度

将陶粒装入承压筒内至高出筒口, 放在振动台上振动 3 s, 再装陶粒至高出筒口, 放在振动台上振动 5 s, 齐筒口刮(或补)平陶粒。装上导向筒和冲压模, 使冲压模的下刻度线与导向筒的上缘对齐, 把承压筒放在压力机的下压板上, 对准压板中心, 以 300~500 N/s 的速度匀速加荷, 至冲压模压入深度为 20 mm 时停止, 记下压力值, 连续测试 3 次取平均值。计算筒压强度, 公式如下:

$$f_t = \frac{F_1}{A_1} \quad (2)$$

式中:  $f_t$  为陶粒的筒压强度, MPa;  $F_1$  为压入深度 20 mm 时的压力值, N;  $A_1$  为承压面积, 即冲压模面积, 亦即承压筒内孔横截面面积,  $\text{mm}^2$ , 标准筒  $A_1 \approx 10000 \text{ mm}^2$ 。

#### (3) 表观密度

称取约 300 g 陶粒试样, 放入浅盘内, 置于烘箱中以  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  干燥, 记录干燥后质量  $M_1$ 。向容量瓶中注入约 2/3 容积的清水, 记录初始水体积  $V_1$ 。将干燥后的陶粒试样缓缓放入容量瓶中, 待水面稳定后, 记录水和陶粒的总体积  $V_2$ 。计算表观密度  $\rho_2$ , 公式如下:

$$\rho_2 = \frac{M_1}{V_2 - V_1} \times 1000 \quad (3)$$

式中:  $\rho_2$  为表观密度,  $\text{kg/m}^3$ , 取 3 次实验结果的算数平均值为堆积密度的测定值;  $M_1$  为干燥后陶粒的质量, g;  $V_1$  为初始水的体积, ml;  $V_2$  为水和陶粒的总体积, ml。

#### (4) 孔隙率

取 300 g 陶粒在恒温(温度为  $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ )的条件下干燥至恒重, 测定其堆积密度  $\rho_1$  和表观密度  $\rho_2$ 。计算孔隙率  $P$ , 公式如下:

$$P = \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \times 100 \quad (4)$$

式中:  $P$  为孔隙率;  $\rho_1$  陶粒的堆积密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_2$  为陶粒的表观密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

## 4.2. 陶粒混凝土试件性能指标测定

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)和《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080-2016)测定混凝土试件的抗压强度和容重。

#### (1) 抗压强度

试件从养护地点取出后, 将试件表面与上下承压板面擦干净。以试件成型时的侧面为承压面, 将试件安放在试验机的下压板或垫板上, 试件的中心应与试验机下压板中心对准。开动试验机, 当上压板与试件或钢垫板接近时, 调整球座, 使接触均衡。以 0.5 MPa/s 的加荷速度连续均匀加荷, 直至试件破坏, 记录破坏荷载。计算抗压强度, 公式如下:

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (5)$$

式中:  $f_{cc}$  为混凝土试件抗压强度, MPa;  $F$  为试件破坏荷载, N;  $A$  为试件承压面积,  $\text{mm}^2$ 。

(2) 容重

混凝土试件的容重，也即表观密度。测试时，将相应龄期的试件取出，清除试件表面浮浆、水分或杂质，并用湿布擦拭。用游标卡尺测量试件的长、宽、高，每个方向测 3 次取平均值，计算体积。将试件置于烘箱中烘至恒重( $105 \pm 5^\circ\text{C}$  下干燥至两次称重差值  $\leq 0.1\%$ )，记录试件质量。计算容重，公式如下：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

式中： $\rho$  为混凝土试件的干容重， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $m$  为试件烘干后的质量， $\text{kg}$ ； $V$  为试件的体积， $\text{m}^3$ 。

5. 煤矸石 - 粉煤灰陶粒及其混凝土试件性能特征

5.1. 陶粒性能特征

煤矸石 - 粉煤灰陶粒的堆积密度和表观密度随着粉煤灰掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势(如图 3~4 所示)，其中矸灰比为 80:20 时陶粒堆积密度和表观密度最大，分别为  $1070 \text{ kg}/\text{m}^3$  和  $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，矸灰比为 70:30 时堆积密度和表观密度最小，分别为  $860 \text{ kg}/\text{m}^3$  和  $1530 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。筒压强度随粉煤灰掺量增加整体呈下降趋势，矸灰比 90:10 时筒压强度最大，为  $16 \text{ MPa}$ ，矸灰比 70:30 时筒压强度最小，为  $10 \text{ MPa}$ 。孔隙率随粉煤灰掺量增加呈先减小后增大的趋势，矸灰比 80:20 时孔隙率最小，为  $10\%$ ，矸灰比 70:30 时孔隙率最大，为  $23.5\%$ 。

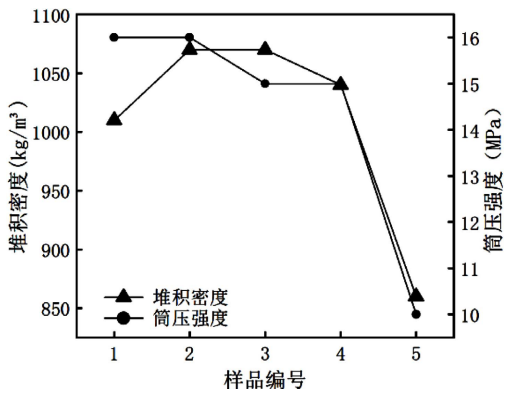


Figure 3. Variation of bulk density and cylinder compressive strength  
图 3. 堆积密度与筒压强度变化

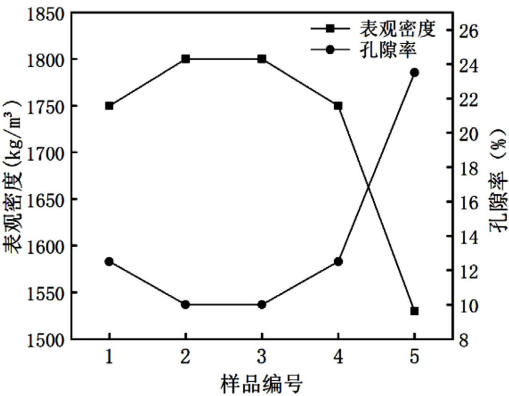


Figure 4. Variation of apparent density and porosity  
图 4. 表观密度与孔隙率变化



## 5.2. 陶粒混凝土试件性能特征

陶粒混凝土试件的抗压强度随龄期增长而增大(如图 5 所示), 整体而言, 初期增长较快, 后期趋缓。但是, 组 2、组 3 表现出一定的特殊性, 前期抗压强度增长缓慢, 14 天之后增长较快。组 2 各龄期抗压强度均为最大, 组 5 各龄期抗压强度相对较小。28 天时, 各组试件抗压强度排序: 组 2 > 组 1 > 组 4 > 组 3 > 组 5, 组 2 达到 59.8 MPa, 组 5 为 37.5 MPa。陶粒混凝土试件的容重随龄期增长呈波动性变化(如图 6 所示), 前后相差不大, 其中, 组 1 各龄期容重相对较大, 组 3、组 5 相对较小。28 天时, 各组试件容重排序: 组 1 > 组 4 > 组 2 > 组 5 > 组 3, 分别为 1668 kg/m<sup>3</sup>、1630 kg/m<sup>3</sup>、1623 kg/m<sup>3</sup>、1615 kg/m<sup>3</sup>、1612 kg/m<sup>3</sup>。

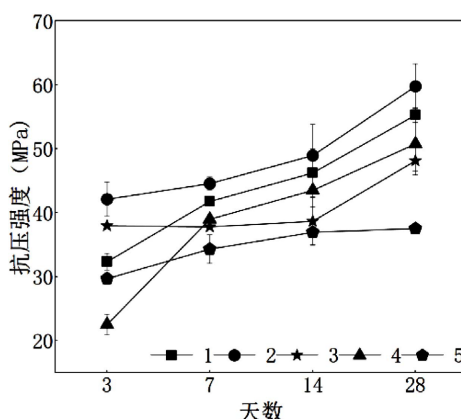


Figure 5. Variation of compressive strength of concrete test specimens  
图 5. 混凝土试件抗压强度变化

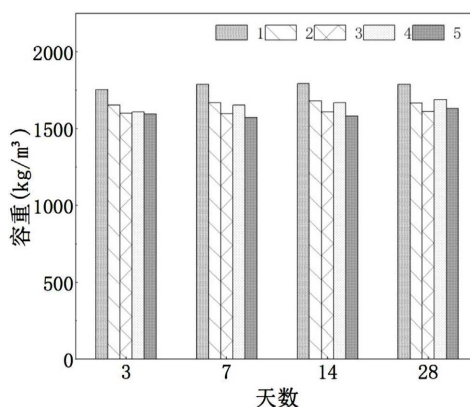


Figure 6. Variation of unit weight of concrete test specimens  
图 6. 混凝土试件容重变化

## 6. 结束语

以煤矸石和粉煤灰为主要原料制备陶粒, 随着粉煤灰掺量增加, 陶粒筒压强度整体呈下降趋势, 堆积密度和表观密度呈先增大后减小趋势。以煤矸石-粉煤灰陶粒为轻骨料制备的混凝土试件, 组 2 (陶粒 矸灰比 85:15) 28 天龄期抗压强度最大, 而容重相对较小。因此, 综合考虑轻质、高强的情况下, 矸灰比 85:15 为较优选择。本研究揭示了煤矸石-粉煤灰陶粒及其混凝土试件的性能特征, 为推动煤基固废在建材领域的应用提供了参考。

## 基金项目

淮南东辰固废利用有限公司科研项目“煤矸石陶粒原料造粒塑性提升技术研发”(HX2024702495);  
建筑材料工业技术监督研究中心科研项目“煤矸石陶粒基生态修复材料研发与修复效能评估”(HX20250452)。

## 参考文献

- [1] 刘浪, 朱梦博, 王双明, 等. 煤基固废规模化绿色低碳利用研究进展与创新路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 82-103.
- [2] 王志英. 煤矸石粉煤灰烧结陶粒制备及物化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2021.
- [3] 刘汉斌. 煤基废弃资源开发利用评价及战略路径研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.
- [4] 魏芳. 煤基固废制备注浆材料及其灭火性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2024.
- [5] 汪晶晶. 煤泥-自燃煤矸石陶粒泡沫混凝土配比优化及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [6] 孙高扬, 高星, 王磊, 曹勇. 掺陶粒混凝土性能试验研究[J]. 水泥工程, 2025, 38(3): 51-55.
- [7] 冯玉林, 曾海亭, 董晶亮, 柴喜林, 邓清香, 赵安琪. 污泥尾矿陶粒混凝土密度与力学性能研究[J]. 混凝土, 2025(4): 123-128.
- [8] 赵欣悦, 马芹永. 页岩陶粒混凝土力学性能试验及微观结构分析[J]. 建井技术, 2024, 45(1): 44-50.
- [9] 赵增丰, 蒲紫盈, 林璨, 肖建庄, 姚磊, 姬宸源, 刘雅婕. 免烧陶粒及陶粒混凝土性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 88-100.
- [10] 卜长明, 杨海燕, 陆鑫宇, 朱冬旭, 孙毅, 钟永力, 李妍. 掺料对陶粒混凝土强度及微观结构影响分析[J]. 应用力学学报, 2025, 42(1): 125-132.