

再生陶瓷骨料粒径及替代率对 UHPC 力学性能的影响

肖兆辉

聊城大学建筑工程学院, 山东 聊城 252000

DOI: 10.61369/SSSD.2026060011

摘 要 : 将废弃瓷砖经破碎、筛分后作为细骨料替代石英砂制备 UHPC, 可实现陶瓷固废的资源化利用。为探究再生陶瓷骨料 (RCA) 对 UHPC 力学性能与耐久性能的影响规律与作用机制, 本文以最大粒径 ($D_{\max}$) 和替代率 (R_c) 为变量, 设计了 15 组不同配合比的再生陶瓷细骨料 UHPC 试件, 通过抗压强度试验、抗弯强度试验分析, 系统研究了各组试件的宏观性能演变。结果表明: 抗压强度随 $D_{\max}$ 与 R_c 的提高总体呈上升趋势, 但存在边界效应— $R_c < 50\%$ 时, 部分低替代率组 (如 $D_{\max}=1.25\text{mm}$ 、 $R_c=30\%$) 因骨料-基体界面适配性不足出现强度波动 (较基准组下降 5.57%); 当 $R_c \geq 50\%$ 时, 各组抗压强度显著且持续提升, $D_{\max}=5\text{mm}$ 、 $R_c=100\%$ 时达峰值 171MPa。抗弯强度则受粒径与替代率的反向调控, $D_{\max}=1.25\text{mm}$ 、 $R_c=100\%$ 时最优 (26.6MPa)。

关 键 词 : 再生陶瓷骨料; 粒径; 替代率; 力学性能

Effects of Particle Size and Replacement Ratio of Recycled Ceramic Aggregate on the Mechanical Properties of UHPC

Xiao Zhaohui

School of Civil Engineering and Architecture, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000

Abstract : Waste ceramic tiles were crushed and sieved to serve as fine aggregate to replace quartz sand for preparing UHPC, which can realize the resource utilization of ceramic solid waste. To explore the influence laws and action mechanisms of recycled ceramic aggregate (RCA) on the mechanical and durability properties of UHPC, this paper took the maximum particle size ($D_{\max}$) and replacement ratio (R_c) as variables to design 15 groups of recycled ceramic fine aggregate UHPC specimens with different mix proportions. Through the analysis of compressive strength tests and flexural strength tests, the macroscopic performance evolution of each group of specimens was systematically studied. The results show that the compressive strength generally presents an upward trend with the increase of $D_{\max}$ and R_c , but there exists a boundary effect — when $R_c < 50\%$, the strength of some low replacement ratio groups (e.g., $D_{\max}=1.25\text{mm}$, $R_c=30\%$) fluctuates due to insufficient aggregate-matrix interface compatibility (decreasing by 5.57% compared with the reference group); when $R_c \geq 50\%$, the compressive strength of all groups increases significantly and continuously, reaching a peak value of 171 MPa at $D_{\max}=5\text{mm}$ and $R_c=100\%$. In contrast, the flexural strength is subject to the reverse regulation of particle size and replacement ratio, achieving the optimal value of 26.6 MPa at $D_{\max}=1.25\text{mm}$ and $R_c=100\%$.

Keywords : recycled ceramic aggregate (RCA); particle size; replacement ratio; mechanical properties; UHPC

引言

UHPC 具有高强度、高韧性和高耐久性, 应用前景广阔。但存在缺陷: 脆性导致抗拉抗折强度低、易开裂; 石英砂生产能耗高, 对生态不利^[1]。中国城市化使建筑废弃物快速增长, 陶瓷废弃物年产量超 2000 万吨, 利用率仅 5%。传统处置方式消耗土地并污染环境。因此, 高值化利用建筑陶瓷废弃物是实现“双碳”目标的迫切需求。将废弃瓷砖转化为再生骨料用于 UHPC, 具有资源协同效益, 为高性能水泥基材料提供新思路。

学者们研究了废弃陶瓷作混凝土骨料, 成果显著。在替代率方面: 万超^[2]发现陶瓷骨料粘结强度较低; 陆盛武等^[3]称随碳化龄期延长, 抗压和劈拉强度升, 抗折强度降; 邵莲芬等^[4]发现随掺量增加, 抗压强度升, 流动性和抗折降; Sivakumar 等^[5]指出陶瓷细骨料对抗压和抗折强度有积极影响填充效应; Zhang 等^[6]在 100% 替代率下, 抗压和抗折强度分别提高 15.5% 和 26.5%; Zareei 等^[7]发现 40%

替代率力学性能最佳。在粒径方面：陈浩等^[8]揭示粒径越大，坍落度越小、孔隙率越高；王芳等^[9]称小粒径减小过渡区厚度与裂缝率，提升稳定性；陈晓等^[10]明确0.3 - 0.6mm 对 C60 混凝土强化最显著；Sagoe-crentsil 等^[11]证实小粒径在强度提升和裂缝抑制方面优势；El-Sayed 等^[12]表明粒径越小，坍落度越低但抗压强度升，与比表面积和活性效应相关。

现有研究多关注骨料粒径或替代率的单一影响，缺乏对再生陶瓷骨料粒径与替代率协同效应的系统研究。本研究通过调整粒径与替代率梯度，构建多元体系，重点揭示其粒径分布演变对 UHPC 抗压、抗弯等力学性能的耦合作用机制。

一、原材料与试验设计

（一）试验原材料

试验材料包括水泥、硅灰、再生陶瓷骨料、石英砂、钢纤维、减水剂和水。水泥为高强硅酸盐水泥，强度等级 52.5，比表面积 381m²/kg。硅灰的 SiO₂ 含量 >96%，比表面积 23700m²/kg，需水量比 124%。石英砂的 SiO₂ 含量 >98.6%，密度 2.66g/cm³，莫氏硬度 7.5；粒径分布按再生陶瓷骨料级配复配。钢纤维为平直镀铜型，长度 10-20mm，直径 0.10-0.25mm，抗拉强度 ≥ 2850MPa。减水剂为聚羧酸系，减水率 ≥ 25%，固含量 39%。水为实验室自来水。再生陶瓷细骨料源自废弃瓷砖，经处理分三个粒级：0-1.25mm、0-2.5mm、0-5mm，用于替代石英砂进行配比试验。

（二）试样制备与试验方法

1. 混凝土配合比设计

超高性能混凝土的水胶比通常为 0.14 - 0.20，本试验确定为 0.18。胶凝材料由水泥和硅灰组成，硅灰掺量为水泥质量的 10%。细骨料由石英砂和再生陶瓷骨料组成，胶砂比为 1:1。减水剂掺量为胶凝材料质量的 1.5%。钢纤维掺量为混凝土体积的 2%，具体配合比如表 1 所示。

表 1. 再生陶瓷骨料粒径不同下超高性能混凝土的配合比

粒径 (mm)	掺量 (%)	水泥	硅灰	石英砂	再生陶瓷 骨料	钢 纤维 (kg/ m ³)	减 水 剂 (kg/ m ³)	水 (kg/ m ³)
0-1.25	0	1026	114	1140	0	156	17.1	205.2
0-1.25	30	1026	114	798	342	156	17.1	205.2
0-1.25	50	1026	114	570	570	156	17.1	205.2
0-1.25	70	1026	114	342	798	156	17.1	205.2
0-1.25	100	1026	114	0	1140	156	17.1	205.2
0-2.5	0	1026	114	1140	0	156	17.1	205.2
0-2.5	30	1026	114	798	342	156	17.1	205.2
0-2.5	50	1026	114	570	570	156	17.1	205.2
0-2.5	70	1026	114	342	798	156	17.1	205.2
0-2.5	100	1026	114	0	1140	156	17.1	205.2
0-5	0	1026	114	1140	0	156	17.1	205.2
0-5	30	1026	114	798	342	156	17.1	205.2
0-5	50	1026	114	570	570	156	17.1	205.2
0-5	70	1026	114	342	798	156	17.1	205.2
0-5	100	1026	114	0	1140	156	17.1	205.2

2. 试样制备

依据《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS864 - 2021) 制备混凝土试件。按顺序将再生陶瓷骨料、石英砂、水泥和硅灰倒入卧式搅拌机中干拌 60s；在搅拌过程中缓慢加入减水剂与水的混合液，搅拌 10min；随后均匀加入钢纤维，继续搅拌 5min。将拌合物注入涂有脱模剂的模具中振捣密实。试件在自然条件下静置 24h 后脱模，置于温度 20 ± 2℃、相对湿度 95% 的标准养护室中养护至 28d 龄期。

（三）试验方法

1. 抗压强度试验

依据 T/CECS864 - 2021，采用液压伺服压力试验机测试 28d 抗压强度。试件尺寸为 100mm × 100mm × 100mm，加载速率控制为 1.2MPa/s，取 6 个试件平均值作为最终结果。

2.3.2 抗弯强度试验

按 T/CECS864 - 2021 进行三点弯曲试验。试件尺寸为 100mm × 100mm × 400mm，跨距 300mm，以 0.1mm/min 的位移速率加载至破坏，根据峰值荷载计算弯拉强度。

二、结果与讨论

（一）抗压强度分析

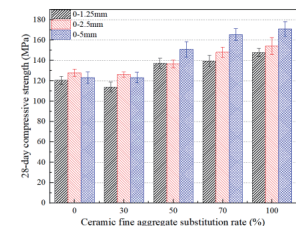


图 3 UHPC 28 天抗压强度

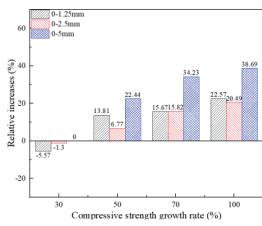


图 4 UHPC 抗压强度增长率

不同 D_{max} 及 R_c 下 UHPC 的 28d 抗压强度及增长率如图 3、图 4 所示。

1. 强度变化规律与边界效应

试验结果表明，抗压强度随 D_{max} 与 R_c 的变化存在明显边界效应：

R_c < 50%（低替代率）：强度波动较大。R_c = 30% 时，D_{max} = 1.25mm、2.5mm、5mm 组抗压强度分别为 122.3MPa、127.9MPa、121.6MPa，较基准组（R_c = 0%，129.5MPa）分别下降 5.57%、1.3%、0%。原因是低替代率下，RCA 与石英砂的粒径差异较小，未形成有效骨架支撑，且部分 RcA 表面残留的釉层阻

碍水化产物粘结，导致界面缺陷增加；

$R_c \geq 50\%$ （高替代率）：强度持续提升。 $R_c=100\%$ 时，三组抗压强度达峰值，增长率分别为22.57%（ $D_{\max}=1.25\text{mm}$ ）、20.49%（ $D_{\max}=2.5\text{mm}$ ）、38.69%（ $D_{\max}=5\text{mm}$ ），其中 $D_{\max}=5\text{mm}$ 、 $R_c=100\%$ 组最高（171MPa）。这是因为高替代率下，RCA的骨架作用凸显：大粒径RCA（ $D_{\max}=5\text{mm}$ ）收缩率远低于水泥石，可有效约束水泥石收缩，减少内部拉应力与微裂缝；

（二）抗弯强度分析

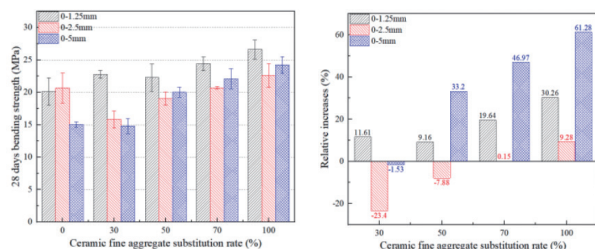


图5 28天抗弯强度

图6 抗弯强度增长率

再生陶瓷骨料UHPc的28d抗弯强度及增长率如图5、图6所示。抗弯强度与抗压强度呈现显著反向趋势：随 $D_{\max}$ 增大、 R_c 提高（ $R_c \geq 50\%$ ），抗弯强度逐渐下降；除基准组外，所有替代率下均为 $D_{\max}=1.25\text{mm}$ 组抗弯强度最高。

1. 反向趋势的机制解释

抗弯强度与抗压强度的差异源于受力模式对材料缺陷的敏感性不同：

抗压载荷下的“缺陷不敏感”：压缩应力作用下，混凝土内部的微裂缝（主要分布于ITZ）会被挤压闭合，大粒径RCA的骨

架作用占主导，强度主要取决于骨料-基体的整体承载能力；

弯曲载荷下的“缺陷敏感”：弯曲应力作用下，拉应力区的微裂缝易扩展，强度取决于基体匀质性、纤维分散性及骨料形态。具体表现为：

基体匀质性：小粒径RCA（ $D_{\max}=1.25\text{mm}$ ）可提升基体匀质性，其钢纤维分布均匀度较 $D_{\max}=5\text{mm}$ 组降低，均匀分布的纤维能有效阻裂。

骨料形态影响：大粒径RCA中片状颗粒占比高于小粒径组，片状颗粒易导致纤维团聚，形成局部无纤维区，降低抗弯承载力。

三、结论

本试验研究了陶瓷细骨料最大粒径及替代率对超高性能混凝土力学性能的影响。主要得到以下结论：

抗压强度的边界效应：抗压强度随 $D_{\max}$ 与 R_c 的提高总体呈上升趋势，但 $R_c < 50\%$ 时因界面适配性不足出现强度波动； $R_c \geq 50\%$ 时增强效应显著， $D_{\max}=5\text{mm}$ 、 $R_c=100\%$ 时达峰值171MPa（较基准组提升32%），大粒径骨料的骨架作用与高替代率的活性协同是主要原因。

抗弯强度的反向调控机制：抗弯强度随 $D_{\max}$ 增大、 R_c 提高而下降， $D_{\max}=1.25\text{mm}$ 、 $R_c=100\%$ 时最优（26.6MPa）。弯曲载荷下，小粒径骨料提升基体匀质性与纤维分散性，减少ITZ薄弱点，而大粒径骨料易导致纤维团聚与裂缝扩展。

综上，可根据工程实际需求，选择适宜的陶瓷骨料最大粒径和替代率，以实现UHPC力学性能与资源化利用的双重优化。

参考文献

- [1] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增强超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1949-1956.
- [2] 万超. 再生陶瓷粗骨料混凝土基本力学性能与碳化试验研究[D]. 华侨大学, 2009.
- [3] 陆盛武, 曾志兴, 万超. 陶瓷粗骨料再生混凝土碳化后力学性能研究[J]. 混凝土, 2014, (08): 49-51+6.
- [4] 邵莲芬, 张文忠. 陶瓷再生粗骨料混凝土力学性能与耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(09): 33-35.
- [5] Sivakumar, A., Srividhya, S., Sathiyamoorthy, V., Seenivasan, M., & Subbarayan, M. R. Impact of waste ceramic tiles as partial replacement of fine and coarse aggregate in concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 61, 224-231.
- [6] Zhang, L., Shen, H., Xu, K., Huang, W., Wang, Y., Chen, M., & Han, B. Effect of ceramic waste tile as a fine aggregate on the mechanical properties of low-carbon ultrahigh performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370, 130595.
- [7] Zareei, S. A., Ameri, F., Bahrami, N., Shoaee, P., Musaei, H. R., & Nurian, F. Green high strength concrete containing recycled waste ceramic aggregates and waste carpet fibers: Mechanical, durability, and microstructural properties[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26, 100914.
- [8] 陈浩, 刘敏, 吴丹. 不同粒径再生陶瓷骨料对混凝土工作性及微观结构的影响[J]. 混凝土, 2022, (9): 34-38+43.
- [9] 王芳, 李刚, 张宇. 陶瓷骨料粒径分布对再生混凝土界面过渡区的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16089-16093.
- [10] 陈晓, 马丽, 董强. 再生陶瓷细骨料粒径对高强混凝土性能的调控作用[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(1): 123-130.
- [11] Sagoe-Crentsil, K., Brown, A. A., & Taylor, P. C. Effect of ceramic aggregate particle size on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118432.
- [12] El-Sayed, M., El-Dieb, A. S., & Mahmoud, M. A. Influence of fine ceramic aggregate particle size on workability and strength of normal concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(8): 04022186.