

再生细骨料UHTCC力学性能及作用机理

陈猛¹, 刘富成¹, 张通¹, 吴迪²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国建筑东北设计研究院有限公司 双碳研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 为探究再生细骨料(RFA)对超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)工作性能和力学性能的影响规律,对RFA替代石英砂比率分别为0,25%,50%,75%和100%的UHTCC进行了流动性、抗压和单轴抗拉试验。结果表明:RFA替代率对UHTCC流动度影响不显著;UHTCC抗压强度和单轴抗拉强度均随RFA替代率的增加而降低,当RFA替代率达到50%后下降幅度增大,分别比全石英砂骨料时下降了13.9%~19.9%和11.3%~16.7%;直拉作用下UHTCC极限应变和裂缝数量随RFA替代率的增加而增加,当RFA替代率达到50%后,极限应变比全石英砂骨料时提升了27.2%~40.9%,试件逐渐呈现“饱和”细密多裂缝的破坏状态。微观结构分析表明,RFA替代率的增加有利于PVA纤维从UHTCC基体中拔出,纤维桥连裂缝作用增强。

关键词: 超高韧性水泥基复合材料;再生细骨料;工作性能;力学性能;替代率

中图分类号: TU 528.572 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)09-0119-07

Mechanical Properties and Working Mechanism of UHTCC with Recycled Fine Aggregate

CHEN Meng¹, LIU Fu-cheng¹, ZHANG Tong¹, WU Di²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Carbon Peaking and Carbon Neutrality, China Northeast Architectural and Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110006, China. Corresponding author: ZHANG Tong, E-mail: zhangtong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the effect of recycled fine aggregate (RFA) on the workability and mechanical properties of ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC), flowability, compressive strength, and uniaxial tensile tests were conducted on UHTCC with RFA replacement ratios of 0, 25%, 50%, 75%, and 100% for silica sand. The results indicate that the RFA replacement ratio has little effect on the flowability of UHTCC. Both the compressive and uniaxial tensile strengths of UHTCC decrease with increasing RFA replacement ratios, with a more pronounced reduction observed after the RFA replacement ratio exceeds 50%, decreasing by 13.9%~19.9% and 11.3%~16.7%, respectively, compared to specimens with pure silica sand aggregate. Under direct tension, the ultimate strain and crack numbers in UHTCC increase with higher RFA replacement ratios. When the RFA replacement ratio reaches 50%, the ultimate strain increases by 27.2%~40.9% compared to specimens with pure silica sand aggregate, and the specimens gradually exhibit a “saturated” fine and dense multi-crack failure mode. Microstructural analysis indicates that increasing the RFA replacement ratio facilitates the pull-out of PVA fibers from the UHTCC matrix, enhancing the fiber bridging effect across cracks.

Key words: ultra-high toughness cementitious composite; recycled fine aggregate; workability; mechanical property; replacement ratio

超高韧性水泥基复合材料(ultra high toughness cementitious composites, UHTCC)是一种具有良好应变硬化行为和多重开裂特征的纤维增强复合材料,其极限拉应变可达3%以上,极

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178382); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201023).

作者简介: 陈猛(1981—),男,辽宁开原人,东北大学副教授,博士.

限裂缝宽度能控制在 100 μm 以内^[1-2]. 普通 UHTCC 中的石英砂骨料质量占比约为 26.7%, 石英砂为不可再生资源且价格昂贵, 因此采用再生细骨料(recycled fine aggregate, RFA)替代石英砂是制备绿色低成本 UHTCC 的有效途径.

废弃混凝土的科学处置和再利用是推进建筑业可持续发展的重要支撑^[3], RFA 约占废弃混凝土质量的 40%~60%^[4]. 目前, 相关学者研究了 RFA 对混凝土工作性能和力学性能的影响. Cuencia-Moyano 等^[5]研究表明, 当 RFA 替代天然细骨料比率由 25% 增至 100% 时, 混凝土的工作性能降低约 6.5%~34.6%. Ju 等^[6]研究表明, 使用饱和面干状态 RFA 制备的混凝土其 28 d 抗压强度比天然骨料混凝土降低约 25.6%. Bai 等^[7]研究了 RFA 对聚乙烯(polyethylene, PE)纤维 UHTCC 力学性能的影响, 结果表明当 RFA 替代率为 100% 时, UHTCC 抗压强度和抗拉强度分别比全石英砂骨料时下降了 7.2% 和 29.0%. 然而, 聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维制备的 UHTCC 具有成本低、裂缝控制能力强等优点^[8], 为了研发低碳低成本 PVA-UHTCC, 需要探究 RFA 在 UHTCC 基体中的作用机理.

本文采用 RFA 替代石英砂(替代率分别为 0, 25%, 50%, 75% 和 100%)制备 UHTCC, 通过流动性、抗压和单轴抗拉试验, 分析 RFA 替代率对 UHTCC 工作性能和力学性能的影响规律. 结合数字图像相关(DIC)技术分析不同 RFA 替代率下 UHTCC 在单轴拉伸作用下的裂缝分布特征, 使用手持显微镜和扫描电镜(SEM)观测试件断裂处 PVA 纤维的形貌特征, 并分析 RFA 在 UHTCC 中的作用机理.

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 密度为 3.09×10³ kg/m³; 辅助胶凝材料为 I 级粉煤灰; 细骨料为石

英砂和 C35 混凝土破碎产生的 RFA. 其中, RFA 的表观密度为 2 460 kg/m³、饱和面干吸水率为 6.50%、压碎值为 18.5%; 水泥、粉煤灰、石英砂和 RFA 的粒径分布见图 1; 石英砂和 RFA 的平均粒径分别为 257.72 和 245.12 μm, 微观形貌见图 2. 减水剂采用聚羧酸高效减水剂; 纤维为国产 PVA 纤维, 其物理及力学性能见表 1. UHTCC 配合比见表 2, 其中, 水胶比为 0.28, 纤维体积分数为 2%. 编号 S25R75 表示石英砂和 RFA 分别占细骨料总质量的 25% 和 75%.

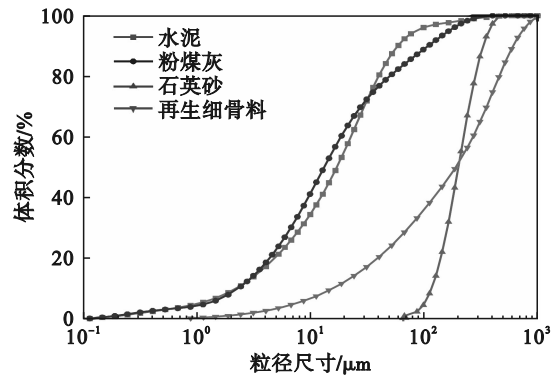


图 1 原材料粒径分布图

Fig. 1 Particle size distribution of raw materials

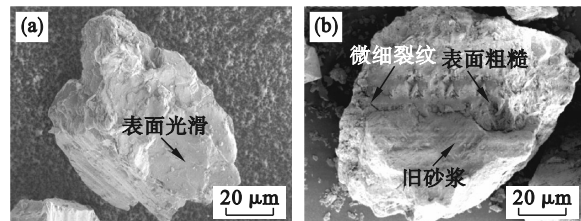


图 2 石英砂和 RFA 的微观形貌

Fig. 2 Microstructural images of silica sand and RFA

(a)—石英砂; (b)—RFA.

表 1 PVA 纤维物理性能

Table 1 Physical properties of PVA fibers

长度	直径	抗拉强度	弹性模量	密度
mm	μm	MPa	GPa	kg·m ⁻³
12	39	1 600	40	1 300

表 2 UHTCC 配合比

Table 2 Mix proportions of UHTCC

编号	水泥	粉煤灰	石英砂	RFA	水	减水剂	PVA 纤维
							kg/m ³
S100R0	544	653	435	0	335	14	26
S75R25	544	653	326	109	335	14	26
S50R50	544	653	218	218	335	14	26
S25R75	544	653	109	326	335	14	26
S0R100	544	653	0	435	335	14	26

1.2 试件制备

首先将水泥、粉煤灰和细骨料干拌 2 min, 然后

加入称量好的水和减水剂搅拌 2 min, 最后缓慢加入 PVA 纤维, 继续搅拌 2 min 直至纤维均匀分散. 将

拌好的 UHTCC 浆体分两次装入模具中,每次装入一半,装填后振动 30 s 以排除气泡,振捣密实后用保鲜膜密封,静置 24 h 后拆模,在相对湿度 $\geq 95\%$ 、温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的标准养护室中养护至 28 d.

1.3 试验设备及方法

根据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)测试 UHTCC 的流动度.依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021),使用 100 kN 微机控制万能试验机对尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的立方体试件进行抗压试验,加载速率为 2.4 kN/s .单轴拉伸试验采用日本土木工程学会建议的狗骨形试件^[9],加载速率为 0.5 mm/min ,在试件拉伸段设置一对位移计,单轴拉伸试验装置及试件尺寸见图 3.使用手持显微镜观测试件拉伸过程中裂缝处的纤维桥连状态,利用 DIC 技术观测试件的破坏形态和裂缝特征,使用 SEM 观测 RFA 及 PVA 纤维的微观形貌.

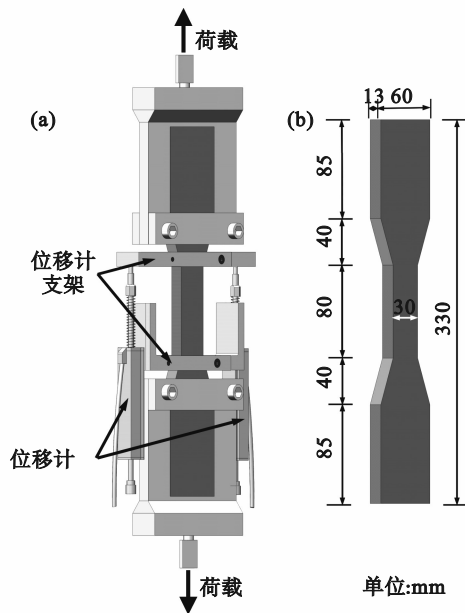


图 3 单轴拉伸试验装置及试件尺寸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of uniaxial tensile test device and specimen dimensions
(a)—试验装置;(b)—试件尺寸.

2 试验结果及分析

2.1 流动度

图 4 为不同 RFA 替代石英砂比率下 UHTCC 的流动度,UHTCC 流动度随 RFA 替代率的提高而降低.其中,S100R0 的流动度为 189 mm,S75R25,S50R50,S25R75 和 S0R100 分别比 S100R0 降低了

1.4%,4.7%,6.0% 和 8.0%.RFA 的加入对 UHTCC 流动度有不利影响,此规律与 Lotfy 等^[10]的研究结果一致.这是因为 RFA 表面存在的旧砂浆与微细裂缝(见图 2b)增加了骨料的孔隙率和吸水率^[11],在拌和过程中会吸收更多的自由水.同时,旧砂浆的粗糙表面具有比表面积较大的特性,需要更多的水泥浆体用于包裹 RFA,增加了拌合物内部的摩擦阻力^[12].

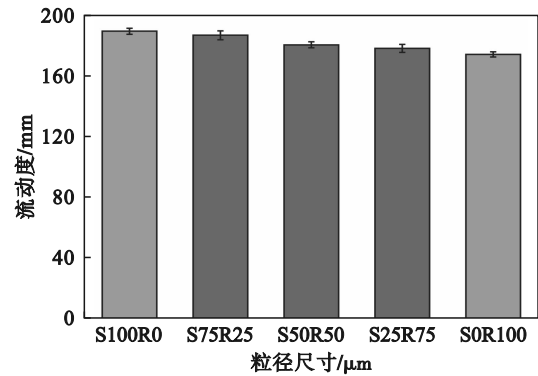


图 4 UHTCC 流动度随 RFA 替代率的变化

Fig. 4 Variation of RFA replacement ratio on flowability of UHTCC

2.2 抗压强度

图 5 展示了不同类型 UHTCC 的抗压强度随 RFA 替代率的变化,UHTCC 的抗压强度随 RFA 替代率的升高而下降.S75R25,S50R50,S25R75 和 S0R100 的抗压强度分别比 S100R0 降低了 2.7%,6.3%,13.9% 和 19.9%.原因是在荷载作用下,RFA 表面原有的微细裂缝处易发生应力集中^[13].同时,原骨料、旧砂浆和新砂浆两两之间均存在界面过渡区^[14],从而增多了 UHTCC 内薄弱界面的数量.此外,当 RFA 替代率达到 50% 时,UHTCC 抗压强度降低幅度较大,这是因为此时 RFA 的含量超过了石英砂,削弱了石英砂的骨架作用^[15].

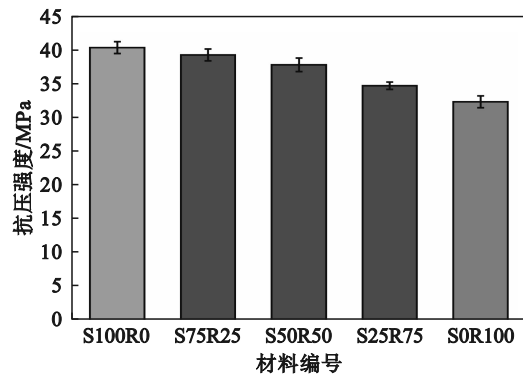


图 5 UHTCC 抗压强度随 RFA 替代率的变化

Fig. 5 Variation of RFA replacement ratio on compressive strength of UHTCC

2.3 单轴抗拉性能

2.3.1 应力-应变曲线及破坏形态

不同 RFA 替代率下 UHTCC 单轴拉伸应力-应变曲线如图 6 所示. 所有曲线大致可分为弹性和应变硬化两个阶段: 弹性阶段曲线的斜率为 UHTCC 弹性模量, 弹性阶段曲线最高点对应的应力为初裂强度; 应变硬化阶段曲线最高点对应的应力为抗拉强度, 对应应变为极限应变^[16]. 当 RFA 替代石英砂比率为 25%~100% 时, UHTCC 弹性模量比全石英砂骨料降低 18.7%~28.6%, 初裂强度降低 1.3%~12.1%; 弹性阶段的拉伸应变逐渐升高, 由 0.01% 增至 0.05%. 所有类型试件开裂后均发生应变硬化行为, 且曲线的应变硬化区域加长, 曲线“抖动”间隔更小且次数增多.

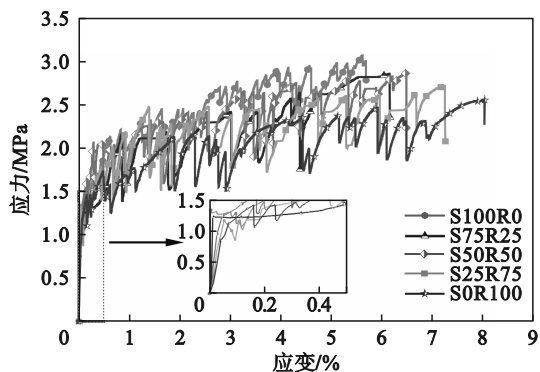


图6 UHTCC 应力-应变曲线随 RFA 替代率的变化
Fig. 6 Variation of RFA replacement ratios on stress-strain curves of UHTCC

图 7 为 UHTCC 试件拉伸过程中裂缝处 PVA 纤维的桥接状态. 试件刚出现裂缝时, 裂缝宽度较小、数量较少, PVA 纤维多数处于桥连状态(见图 7a), 此时多缝开裂特征并不明显; 随着裂缝数量增多、宽度不断扩展, PVA 纤维的连接状态由桥连变为拔出或拔断(见图 7b), 纤维拔出数量大于拔断数量. 当裂缝数量增加至桥连纤维无法继续提供拉应力时, UHTCC 试件出现分布均匀且宽度相近的裂缝, 并不再产生新的裂缝, 此时为 UHTCC 的饱和开裂状态, 呈现细密多裂缝的损伤模式. 图 8 为使用 DIC 技术观测到的 UHTCC 裂缝开展模式, 所有 UHTCC 试样均表现出多重开裂行为. 随着 RFA 替代率的升高, UHTCC 裂缝密集程度增加, 这与前面分析的曲线“抖动”次数较多直接相关, S0R100 的裂缝分布更均匀.

2.3.2 单轴抗拉强度

RFA 替代率对 UHTCC 抗拉强度的影响如图 9 所示, UHTCC 抗拉强度随 RFA 替代率的增大而减小. 当 RFA 替代率为 25%, 50%, 75% 和 100%

时, UHTCC 的抗拉强度分别比全石英砂骨料时下降了 3.4%, 6.5%, 11.3% 和 16.7%. 本试验的结果与以往研究一致, 即掺入 RFA 对 UHTCC 的抗拉强度存在不利影响, 这是因为 RFA 掺入后增多了基体缺陷数量, 在拉应力作用下基体容易沿缺陷处开裂^[17,17], 当 RFA 替代率达到 50% 后, UHTCC 抗拉强度下降幅度增大, 原因是 RFA 起主要骨架作用后基体缺陷分布范围更广, 缺陷的相互影响更大.

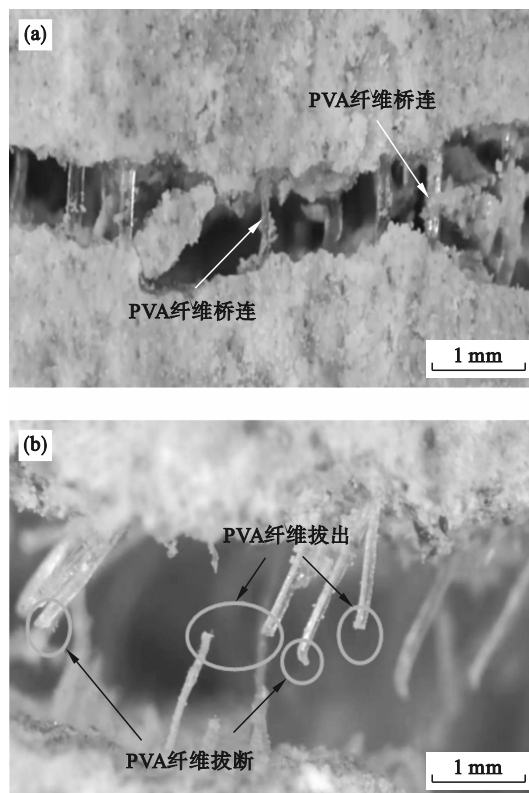


图7 UHTCC 裂缝处 PVA 纤维的微观形貌
Fig. 7 Microscopic morphology of PVA fibers at UHTCC crack

(a) —纤维桥连; (b) —纤维拔出或拔断.

2.3.3 极限应变

不同 RFA 替代率下 UHTCC 的极限应变如图 10 所示, UHTCC 的极限应变随着 RFA 替代率的增加而增大. 当 RFA 替代率为 25%, 50%, 75% 和 100% 时, UHTCC 的极限应变分别比全石英砂骨料时上升了 8.0%, 13.9%, 27.2% 和 40.9%. 当 RFA 替代率达到 50% 后, UHTCC 极限应变上升幅度显著增大, 表明 RFA 在 UHTCC 基体中起主要骨架作用后, 有利于提高 UHTCC 的延性, 原因是 RFA 的掺入可以降低纤维与基体间的黏结强度, 减小 PVA 纤维拔出时对基体造成的损伤程度, 增强纤维的桥连作用^[18].

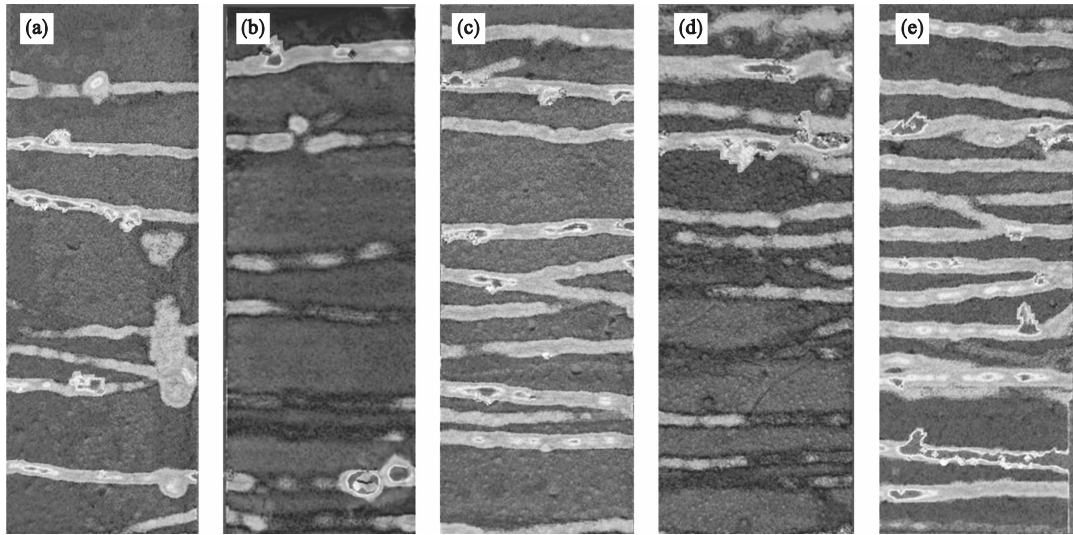


图 8 UHTCC 裂缝分布随RFA替代率的变化

Fig. 8 Variation of RFA replacement ratio on crack distribution of UHTCC
(a)—S100R0; (b)—S75R25; (c)—S50R50; (d)—S25R75; (e)—S0R100.

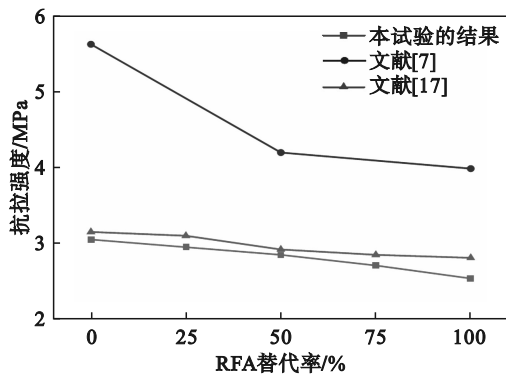


图 9 UHTCC 抗拉强度随 RFA 替代率的变化

Fig. 9 Variation of RFA replacement ratio on tensile strength of UHTCC

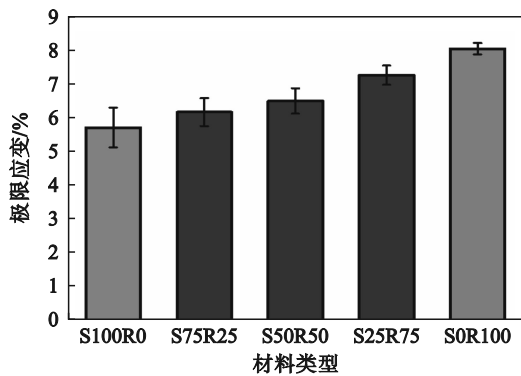


图 10 UHTCC 极限应变随 RFA 替代率的变化

Fig. 10 Variation of RFA replacement ratio on ultimate strain of UHTCC

2.4 RFA 在 UHTCC 中的作用机理分析

图 11 展示了 RFA 在 UHTCC 中的作用机理. 当 RFA 替代率为 0 时, UHTCC 基体结构如图 11a

所示. 石英砂具有光滑表面(见图 2a), 能与水泥浆体和孔隙等形成较为均质的基体^[2]. 全石英砂浆可以紧密包裹 PVA 纤维, 附着在 PVA 纤维表面的砂浆在受拉过程中对纤维产生划痕损伤, 受损后的纤维容易发生拔断破坏(见图 12a~图 12b), 因此纤维的桥连作用没有充分发挥, 试件出现裂缝分布不均匀、数量较少且延性较差的破坏形态(见图 8a).

当 RFA 替代率为 50% 时, UHTCC 基体结构如图 11b 所示. RFA 掺入水泥浆体后形成多重界面过渡区, 且 RFA 表面的旧砂浆存在微细裂缝和孔隙(见图 2b), 增多了 UHTCC 基体缺陷, 导致基体密实度降低^[19]. 同时, RFA 吸水率大于石英砂^[11], 在拌和时会吸收更多自由水, 减少了水化产物的生成, 导致纤维与基体间的黏结强度下降, 因此纤维在拔出时的受损程度降低, 拔断的纤维数量减少. 此时试件的抗拉强度降低, 裂缝的数量增多、分布较均匀(见图 8c), 极限应变比全石英砂时提升了 13.9%(见图 10).

当 RFA 替代率为 100% 时, UHTCC 基体结构如图 11c 所示. 由于 RFA 起骨架作用的基体与 PVA 纤维间的黏结强度进一步减弱, 基体开裂后纤维逐渐被拔出(见图 12c~图 12d)而发挥桥连作用. 相对于 RFA 替代率为 50% 时, UHTCC 的抗拉强度降低了 10.8%, 而极限拉应变提高了 18.5%(见图 10), 试件呈现“饱和”细密多裂缝的破坏形态(见图 8e).

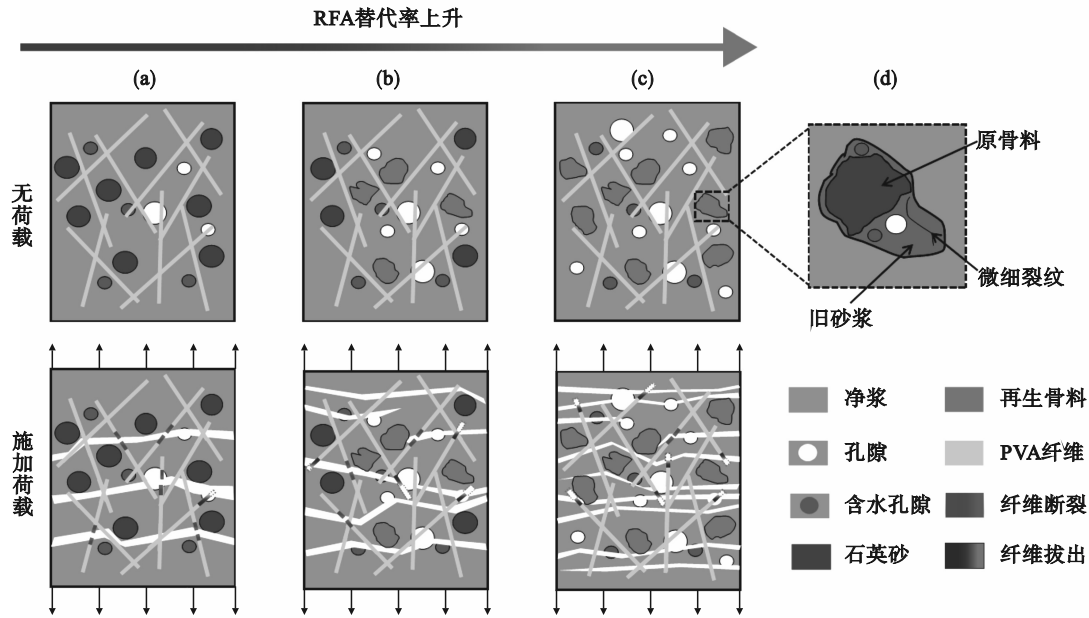


图 11 RFA 在 UHTCC 中的作用机理示意图

Fig. 11 Schematic illustration of action mechanism of RFA in UHTCC

(a)—0; (b)—50%; (c)—100%; (d)—RFA 内部结构.

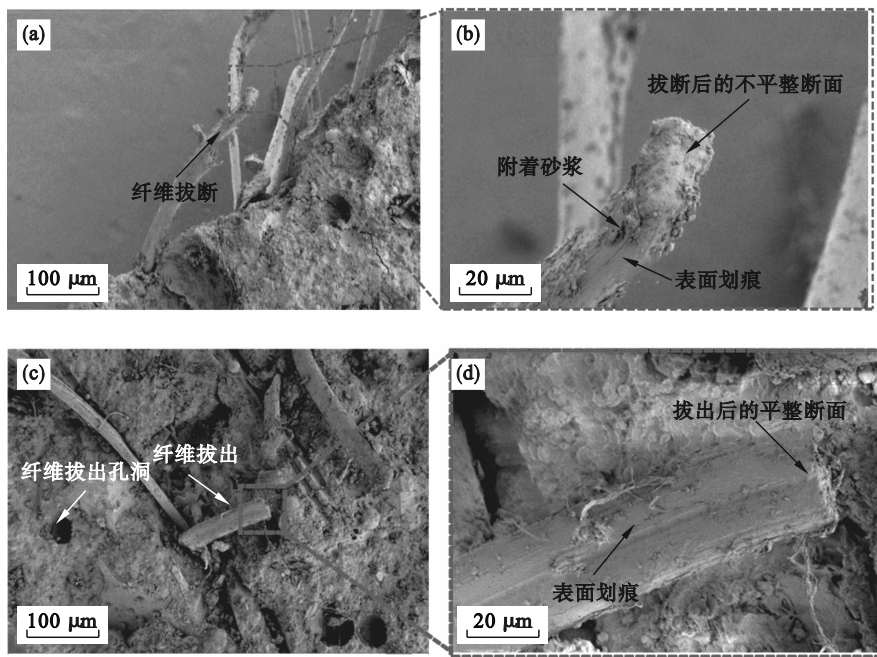


图 12 断裂试件中 PVA 纤维的 SEM 图

Fig. 12 SEM images of PVA fibers in fractured specimen

(a)—S100R0, 纤维拔断; (b)—S100R0, 拔断断面; (c)—S0R100, 纤维拔出; (d)—S0R100, 拔出断面.

3 结 论

1) UHTCC 的流动度随 RFA 替代率的升高而降低, 当 RFA 替代石英砂比率为 100% 时, UHTCC 流动度比全石英砂骨料时降低了 8.0%, 表明 RFA 表面旧砂浆的吸水性和粗糙性对 UHTCC 流动度

影响较小.

2) UHTCC 的抗压强度随 RFA 替代石英砂比率的增加而降低, 当 RFA 替代率达到 50% 后, 下降幅度为 13.9%~19.9%. 相对于石英砂骨料, RFA 具有原始缺陷多, 在砂浆中形成多重界面过渡区的特性, 对 UHTCC 抗压强度影响较大.

3) RFA 掺入 UHTCC 基体导致其抗拉强度

降低而极限拉应变升高.当RFA替代率达到50%后,抗拉强度比全石英砂骨料时降低了11.3%~16.7%,极限拉应变提高了27.2%~40.9%.RFA具有孔隙多、吸水性强等特点,影响砂浆基体与PVA纤维的相互作用,有利于UHTCC基体向“饱和”细密多裂缝状态发展.

4)通过上述试验研究证明可以使用RFA制备UHTCC,根据各项试验结果综合分析得到RFA在UHTCC中的最优替代率为50%.

参考文献:

- [1] 徐世煌,李贺东.超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J].土木工程学报,2009,42(9):32-41.
(Xu Shi-lang, Li He-dong. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 32-41.)
- [2] Li V C. Engineered cementitious composites (UHTCC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure [M]. Germany: Springer, 2019: 1-15.
- [3] 肖建庄,叶涛华,隋同波,等.废弃混凝土再生微粉的基本问题及应用[J].材料导报,2023,37(10):5-14.
(Xiao Jian-zhuang, Ye Tao-hua, Sui Tong-bo, et al. Fundamental problems and applications of recycled fine powder derived from waste concrete[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(10): 5-14.)
- [4] Duan Z H, Hou S D, Xiao J Z, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119865.
- [5] Cuenca-Moyano G M, Martín-Pascual J, Martín-Morales M, et al. Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 116929.
- [6] Ju M, Park K, Park W J. Mechanical behavior of recycled fine aggregate concrete with high slump property in normal- and high-strength [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019, 14(1): 109-121.
- [7] Bai M Y, Wu Y C, Xiao J Z, et al. Workability and hardened properties of 3D printed engineered cementitious composites incorporating recycled sand and PE fibers [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 71: 106477.
- [8] 曹明莉,许玲,张聪.高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J].硅酸盐学报,2015,43(5):632-642.
(Cao Ming-li, Xu Ling, Zhang Cong. Review on micromechanical design, performance and development tendency of engineered cementitious composite [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(5): 632-642.)
- [9] Yokota H, Rokugo K, Sakata N. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks (HPFRCC) [J]. *Japan Society of Civil Engineers*, 2008, 82: 6-10.
- [10] Lotfy A, Al-Fayez M. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 61: 36-43.
- [11] Leite M B, Figueire do Filho J G L, Lima P R L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate [J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(10): 1765-1778.
- [12] 杜婷.高性能再生混凝土微观结构及性能试验研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
(Du Ting. Experimental study on the microstructure and basic behaviors of recycled high performance concrete [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.)
- [13] Wang X J, Wu Y J, Zhu P H, et al. Improvement of mechanical properties and carbonation durability of recycled fine aggregate engineered cementitious composites for structural strengthening [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107277.
- [14] Liu J, Ma K L, Shen J B, et al. Influence of recycled concrete aggregate enhancement methods on the change of microstructure of ITZs in recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 371: 130772.
- [15] 闫增辉.低温养护再生混凝土粉超高韧性水泥基复合材料力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2021.
(Yan Zeng-hui. Study on mechanical properties of ultra-high toughness cement-based composites with recycled concrete powder cured at low temperature [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.)
- [16] Tosun-Felekoğlu K, Felekoğlu B, Ranade R, et al. The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 536-545.
- [17] Adesina A, Das S. Development of sustainable engineered cementitious composites using recycled concrete aggregates—feasibility study based on mechanical properties [J]. *ACI Materials Journal*, 2021, 118(4): 97-107.
- [18] Curosu I, Liebscher M, Alsous G, et al. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly(vinyl alcohol) (PVA) fibers [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103722.
- [19] Bai M Y, Xiao J Z, Gao Y, et al. Pore structure characteristics and mechanical property of engineered cementitious composites (ECC) incorporating recycled sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408: 133721.