研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

引用格式:邢贺, 李艳, 赵菲, 等. 熟石灰与硅灰对再生混凝土力学性能的协同作用 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 51−61.

Citation: XING He, LI Yan, ZHAO Fei, et al. Synergistic effect of silica fume and hydrated lime on mechanical properties of re-cycled aggregate concrete[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 51−61.

Open Access

熟石灰与硅灰对再生混凝土力学性能的协同作用

邢　贺[1], 李　艳[1] ✉, 赵　菲[1], 林　常[2]

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 海南大学 化学工程与技术学院, 海南 海口 570228)

摘　要: 为提升废弃混凝土资源化利用效率, 系统探究了硅灰与熟石灰单掺及复合改性对再生混凝土力学性能的影响。采用三重搅拌技术(triple mixing, TM), 通过抗压试验和劈裂抗拉试验, 研究再生混凝土的基本力学性能, 并借助扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)解析其微观结构特征。结果表明: 单掺硅灰或熟石灰对再生混凝土的抗压强度与劈裂抗拉强度提升有限, 复合硅灰与熟石灰对其提升效果显著。微观分析显示, 复合体系中的微观结构致密程度显著提高, 骨料与浆体的粘接强度增强。研究成果可为再生粗骨料的应用提供参考。

关键词: 再生混凝土; 硅灰与熟石灰复合; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 微观分析

中图分类号: TU528　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0051-11

DOI: 10.65658/j.hndk.2025030701　　CSTR: 32403.14.hndk.2025030701

Synergistic effect of silica fume and hydrated lime on mechanical properties of re-cycled aggregate concrete

XING He[1], LI Yan[1] ✉, ZHAO Fei[1], LIN Chang[2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. School of Chemical Engineering and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: To improve the recycling efficiency of waste concrete, this study systematically investigated the effects of silica fume and hydrated lime modifications (both individual and in combination) on the mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). The triple mixing technique was employed during concrete preparation. Compressive and splitting tensile tests were conducted to evaluate the fundamental mechanical properties of RAC, while scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze its microstructural characteristics. The results demonstrated that the individual incorporation of either silica fume or hydrated lime yielded only marginal improvements in compressive strength and splitting tensile strength. In contrast, the composite modification combining both silica fume and hydrated lime significantly enhanced the mechanical performance of RAC. Microscopic analysis further revealed that the composite system substantially improved microstructural compactness and the interfical bonding between aggregates and cement paste. These findings provide valuable insights for the practical application of recycled coarse aggregates, demonstrating that

Received: 2025−03−07; **Revised:** 2025−03−25; **Accepted:** 2025−03−27; **Available online:** 2025−07−11
✉ **Corresponding author(s):** LI Yan, E-mail: liyan_126@126.com

optimized composite modification could effectively enhance the mechanical performance of recycled concrete while advancing sustainable resource utilization in construction.

Keywords: recycled concrete; silica fume-hydrated lime composite; compressive strength; split tensile strength; microscopic analysis

0 引 言

目前,针对提高再生混凝土力学性能,主要有2种方法:一是通过改善再生粗骨料缺陷,从而提升再生混凝土的性能;二是通过优化混凝土搅拌工艺,进而提升再生混凝土的工作性能、力学性能等。Singh等[1]和李恒等[2]探讨了矿物掺和料如何影响再生混凝土的力学性能,实验结果表明,诸如粉煤灰、矿渣等矿物掺合料能有效补偿因再生粗骨料缺陷导致的强度降低,从而增强再生混凝土的力学性能。Zhang等[3]和Khodabakhshian等[4]深入分析了硅灰及二氧化硅等单一掺合料对再生混凝土力学特性的作用机制。研究表明,这些掺合料中的活性物质能够与水泥水化过程中生成的氢氧化钙发生“二次水化”作用,生成水化硅酸钙(C—S—H)凝胶,从而显著提升了混凝土的密实度和整体强度。Elyamany等[5]将粉煤灰或硅灰单独加入矿渣地质聚合物混凝土中提高强度性能进行了试验研究。研究结果表明,单独掺入粉煤灰或硅灰显著增强了混凝土28 d抗压强度和劈裂抗拉强度等力学性能。此外,熟石灰和硅灰的加入也改善了混凝土的吸水性。Kong等[6]创新性地提出了一种三重搅拌技术(triple mixing, TM),此方法首先利用火山灰质材料(诸如粉煤灰、硅灰等)对再生粗骨料进行包覆处理,随后将其与水泥等原料共同拌合以生产再生混凝土。研究表明,采用TM工艺生产的再生混凝土在28 d龄期时的抗压强度与传统方法制备的常规混凝土强度相当。薛建阳等[7]通过构建包含42组标准混凝土和378组再生混凝土的正交测试方案,发现经过科学配比优化后,混凝土力学强度可满足工程要求。结果表明,预先对再生粗骨料进行吸水处理能有效增强材料强度。研究还发现,当再生粗骨料取代比例控制在50%时,混凝土的抗压性能达到最优状态。

现有研究多聚焦于单一掺合料对再生混凝土性能的改良作用,针对多种掺合料复合使用对再生混凝土性能影响的研究仍显不足。本研究运用TM搅拌技术,以再生粗骨料50%取代率为基准,设计硅灰与熟石灰的单掺及复合系列试验,开展再生混凝土抗压、劈裂抗拉的强度测试及微观形貌的电镜扫描分析,旨在为再生混凝土在工程实践中的推广与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 本试验采用海南华盛天涯普通P 32.5级水泥;天然骨料均购自海口市砂石市场,粗骨料粒径范围为5.00~20.00 mm,符合连续级配;天然细骨料为细度模数2.87、含泥量2.1%及含水率4.1%的机制砂;再生粗骨料由海南鹏轩再生资源回收有限公司生产,骨料粒径分别为5.00~20.00 mm和16.00~31.50 mm(图1),按6∶4质量比混合。骨料表面覆盖旧砂浆层,多为棱柱形状,棱角分明,根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准:JGJ52—2006》[8]的规定,测试粗骨料的基本性能,结果见表1;硅灰由河南义翔新材料有限公司提供,密度为1.5 g·cm^{-3},SiO_2质量分数为95%,硅灰颗粒粒径为0.1~0.2 μm;熟石灰购于天津恒聚达化工有限公司,为白色结晶性粉末,含量达95%以上;加入常规型聚羧酸减水剂,减水率为28%。

1.2 试验方案 混凝土配合比设计:依据《普通混凝土配合比设计规程:JGJ55—2011》[9],配置C30混凝土。设置再生粗骨料的取代率为0、25%、50%、75%和100%,以探讨再生粗骨料掺入比例对再生混凝土工作性能及力学强度的影响,根据前期研究和文献[7,10],再生粗骨料取代率为50%时,再生混凝土的力学性能和资源回收效率达到更好效果。因此,本研究以50%再生粗骨料取代率为基准,进一步研究硅灰和熟石灰的掺入效果。 以C表示硅灰,D表示熟石灰,数字表示质量掺量。单掺试验中,硅灰掺量为5.0%(C5.0)、10.0%(C10.0)和15.0%(C15.0),熟石灰掺量为0.5%(D0.5)、1.0%(D1.0)和1.5%(D1.5);复合

试验中，硅灰–熟石灰的掺量组合为 C5.0D0.5、C5.0D1.0、C5.0D1.5、C10.0D0.5、C10.0D1.0、C10.0D1.5、C15.0D0.5、C15.0D1.0 和 C15.0D1.5。共制作 20 组 360 个混凝土立方体试块，具体配合比见表 2。



a 骨料粒径5.00~20.00 mm　　b 骨料粒径16.00~31.50 mm

图 1 再生粗骨料

表 1 粗骨料的基本性能

类型	粒径/mm	紧密密度/(kg・m^{-3})	表观密度/(kg・m^{-3})	吸水率/%	压碎指标/%	含水率/%	含泥量/%
天然粗骨料	5.00~20.00	1 647.00	2 348.00	0.84	7.24	0.92	0.34
再生粗骨料	5.00~31.50	1 512.00	2 261.00	5.37	13.64	1.12	0.63

表 2 混凝土配合比

编号	水灰比	材料用量/(kg・m^{-3})							
		粗骨料		硅灰	熟石灰	水泥	砂	水	减水剂
		天然	再生						
A	0.47	1 158.24	0	0	0	370.9	772.16	162.23	1.48
B25	0.47	868.68	289.56	0	0	370.90	772.16	162.23	1.48
B50	0.47	579.12	579.12	0	0	370.90	772.16	162.23	1.48
B75	0.47	289.56	868.68	0	0	370.90	772.16	162.23	1.48
B100	0.47	0	1 158.24	0	0	370.90	772.16	162.23	1.48
B50C5.0	0.47	579.12	579.12	18.55	0	352.36	772.16	162.23	1.48
B50C10.0	0.47	579.12	579.12	37.09	0	333.81	772.16	162.23	1.48
B50C15.0	0.47	579.12	579.12	44.51	0	315.27	772.16	162.23	1.48
B50D0.5	0.47	579.12	579.12	0	1.85	370.90	772.16	162.23	1.48
B50D1.0	0.47	579.12	579.12	0	3.71	370.90	772.16	162.23	1.48
B50D1.5	0.47	579.12	579.12	0	5.56	370.90	772.16	162.23	1.48
B50C5.0D0.5	0.47	579.12	579.12	18.55	1.85	352.36	772.16	162.23	1.48
B50C5.0D1.0	0.47	579.12	579.12	18.55	3.71	352.36	772.16	162.23	1.48
B50C5.0D1.5	0.47	579.12	579.12	18.55	5.56	352.36	772.16	162.23	1.48
B50C10.0D0.5	0.47	579.12	579.12	37.09	1.85	333.81	772.16	162.23	1.48
B50C10.0D1.0	0.47	579.12	579.12	37.09	3.71	333.81	772.16	162.23	1.48
B50C10.0D1.5	0.47	579.12	579.12	37.09	5.56	333.81	772.16	162.23	1.48
B50C15.0D0.5	0.47	579.12	579.12	44.51	1.85	315.27	772.16	162.23	1.48
B50C15.0D1.0	0.47	579.12	579.12	44.51	3.71	315.27	772.16	162.23	1.48
B50C15.0D1.5	0.47	579.12	579.12	44.51	5.56	315.27	772.16	162.23	1.48

注：“A”为普通混凝土；“B”为再生混凝土；“C”为硅灰；“D”为熟石灰；数字表示取代率及掺量。如“B50C10.0D1.0”表示再生粗骨料取代率50%，硅灰掺量10.0%，熟石灰掺量1.0%。A试样为基础组，B50试样为对照组，其余试样为试验组。

1.3 试样制备 制备混凝土试样采用 TM 搅拌工艺，并依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准：

GB/T 50080—2002》[11]进行,各类型具体试验过程见图2。



a HJW-60型强制式搅拌机 b 坍落度测试 c 扩展度测试 d 劈裂抗拉强度测试

图2 试验过程

TM搅拌工艺具体步骤如下:第一阶段:加入粗骨料、砂子和预湿水,搅拌15 s以充分预湿骨料;第二阶段:加入掺合料,经过15 s搅拌,骨料表面形成一层低水灰的火山灰质微粉层;第三阶段:加入水泥、剩余水和减水剂,搅拌60 s以确保均匀混合。

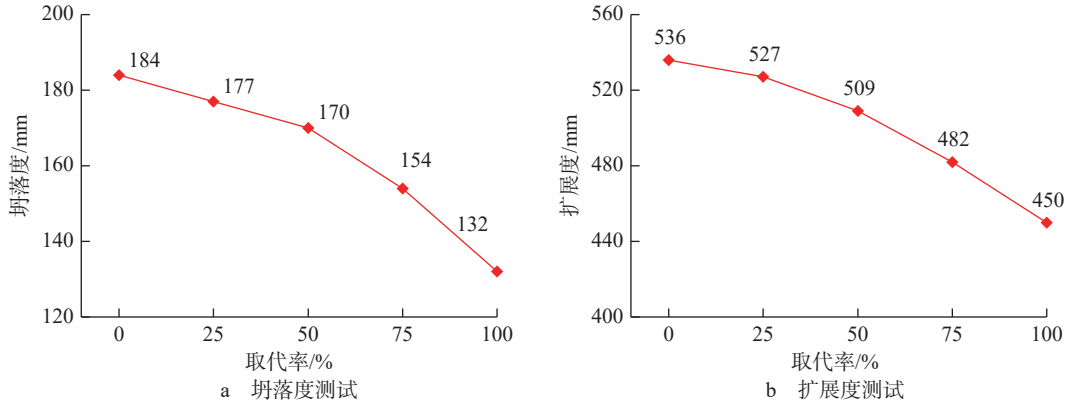
成型与养护:首先,将混合均匀的混凝土浆料迅速注入模具内,利用振动台进行10~20 s的振实操作,随后使用刮板将表面整平;接着,将完成浇筑的混凝土样本置于室内环境中,表面覆盖塑料薄膜以保持湿度,经过24 h的标准养护后,进行脱模并予以编号;然后,放入标养室,温度(20±2) ℃、湿度95%以上养护7、28和60 d,以备试验用。

1.4 测试方法 评价再生混凝土的基本力学性能时,测试其抗压强度和劈裂抗拉强度。依据《普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002》[12],使用100.00 mm边长的立方体试样进行测试。每个测试样包含3个试样,按相应试验标准取值。试验涵盖了3个不同的龄期,即7、28和60 d,以全面了解再生混凝土的强度发展情况。微观形貌分析采用AxiaChemiSEM扫描电镜进行,将符合条件的再生混凝土试样压碎取样以备试验。

本次试验使用的AxiaChemiSEM扫描电镜,其加速电压范围200 V~30 kV,放大倍数:5~1 000 000。为分析不同掺合料掺量的再生混凝土微观形貌,以及加入硅灰和熟石灰对再生混凝土表面形貌及孔隙结构的影响,分别对A、B100、B50C10、B50D1.0和B50C10D1.0试样进行电镜扫描(SEM)试验。

2 结果与分析

测试再生混凝土试样的抗压强度和劈裂抗拉强度试验,并据此计算了各自的强度指标。随后,取压裂的样本进行扫描电镜(SEM)试验以观察其微观形貌变化,见图3~图11。

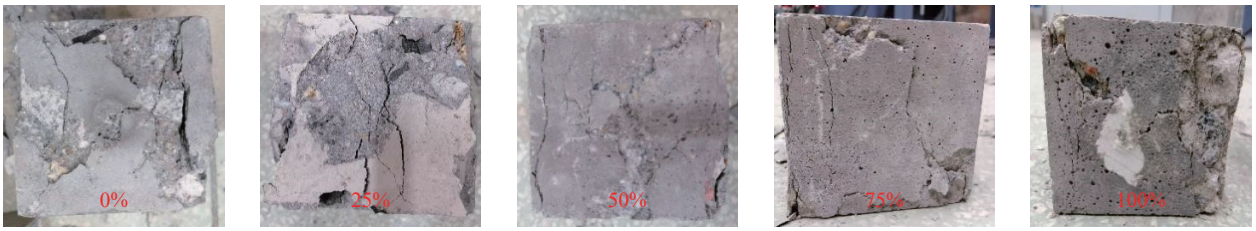


a 坍落度测试 b 扩展度测试

图3 再生混凝土工作性能

2.1 取代率对再生混凝土工作性能的影响 图3为再生混凝土的工作性能测试结果。研究表明,再生粗骨料的添加对混凝土拌合物的流动性产生显著影响。具体表现为:当掺入再生粗骨料比例达到25%、50%、75%和100%时,坍落度分别降低了7.00、14.00、30.00和52.00 mm,扩展度分别降低了9.00、27.00、54.00和86.00 mm。随着取代率的增加,流动性呈非线性递减趋势,且下降速率逐渐加快,尤其是在取代率超过50%后,流动性显著降低。这一现象主要归因于再生粗骨料的高吸水性和表面附着的旧砂浆层,导致拌合物需水量增加,从而对流动性产生负面影响[13]。

2.2 取代率对再生混凝土力学性能的影响 图 4 为再生混凝土试样破坏形态，包括抗压破坏和劈裂抗拉破坏。图 4 a 抗压破坏试验表明，试样在抗压试验中经历 3 个阶段的破坏过程：初始阶段，试样侧面出现微裂纹；加载阶段，按 0.5 MPa·s^{-1} 速率逐步加载，裂缝在试样中不断向中心扩展；破坏阶段，荷载到达峰值时，试样发生最终破坏。图 4 b 为劈裂抗拉破坏，表现为典型的脆性破坏特征：初始微裂缝沿加载方向扩展并相互贯通，形成主裂缝；当裂缝发展至临界尺寸后试样破坏，破坏面平整，并伴有骨料断裂及界面剥离现象。尽管再生混凝土在拉压破坏试验中表现出与普通混凝土相似的破坏过程，但两者在抗压强度和劈裂抗拉强度上存在显著差异。



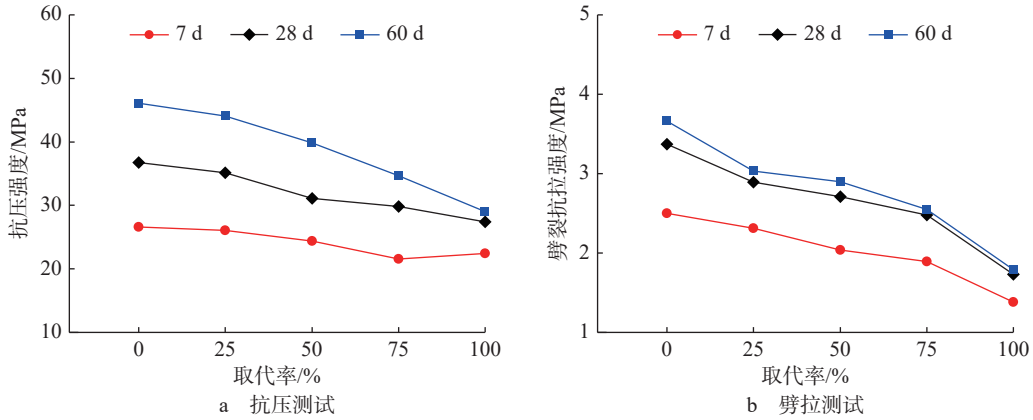
a 抗压破坏形态



b 劈裂抗拉破坏

图 4 试样破坏形态

由图 5 可看出，随着加入的再生粗骨料比例越多，再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度就会下降越明显。其中，再生粗骨料取代率为 25%、50%、75% 和 100% 时，7 d 龄期的再生混凝土抗压强度下降了 2.0%~15.7%，劈裂抗拉强度下降了 7.6%~44.8%；28 d 龄期的抗压强度分别降低了 5.8%、13.5%、20.1% 和 25.3%，劈裂抗拉强度分别降低了 0.42、0.87、1.28 和 1.64 MPa。经计算可得 60 d 龄期的抗压强度和抗拉强度下降幅度最高达到了 37.0% 和 51.1%。可以看出，再生粗骨料的加入对混凝土力学表现均产生不同程度的不利影响，且随着加入量的增加，参与受力的再生粗骨料数量增多，这种不利影响更加显著。这一现象主要归因于再生粗骨料表面附着的旧砂浆层以及内部存在的微裂缝和孔隙（见图 6），导致混凝土整体抗压强度和劈裂抗拉强度劣化[14]。



a 抗压测试 b 劈拉测试

图 5 再生骨料取代率与再生混凝土抗压和劈裂抗拉强度的关系

值得注意的是，当取代率超过 50% 时，抗压强度和劈裂抗拉强度下降速率显著加快，结合图 3 混凝土拌合物工作性的表现可知，再生粗骨料取代率超过 50%，拌合物的工作性表现明显变差[15]，表明再生粗骨料 50% 取代率可能是影响再生混凝土基本力学性能的关键转折点。

2.3 硅灰再生混凝土的力学性能 为探究硅灰对再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响,本试验将不同掺量的硅灰直接掺入已搅拌均匀的粗细骨料中,制备再生混凝土试样。通过对不同龄期试样进行力学强度测试,结果见图7。

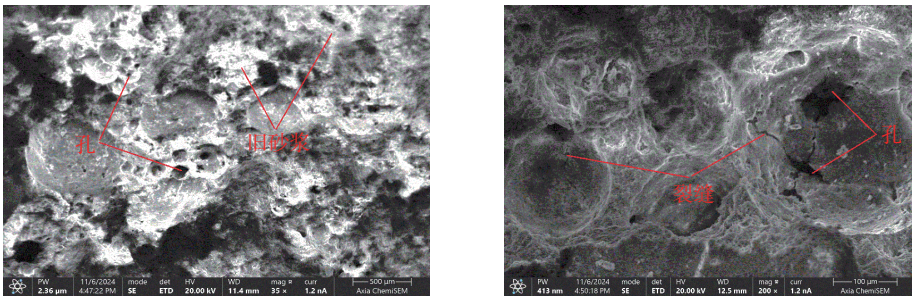


图6 再生粗骨料表面微观形貌

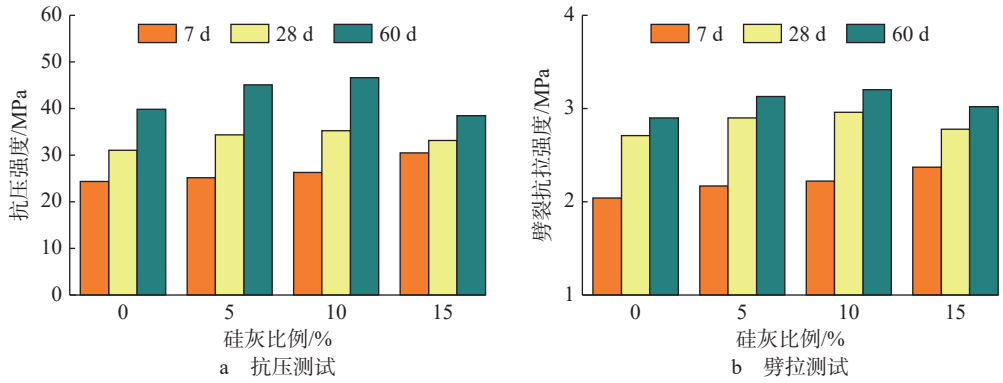


图7 硅灰对再生混凝土抗压和劈裂抗拉强度的影响

结果表明,硅灰可以提升再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度,但掺量过高则会产生负面影响。7 d龄期时,再生混凝土力学强度均有小幅度的提高,说明硅灰颗粒的填充效应能够增强混凝土力学强度;硅灰分别取5%、10%和15%掺量时,再生混凝土28 d龄期的抗压强度依次为34.36、35.23和34.07 MPa,劈裂抗拉强度分别为2.9、2.96和2.81 MPa。其中,10%硅灰掺量的提升效果最优。当硅灰掺量为10%时,再生混凝土28 d龄期的抗压、抗拉强度较对照组(未添加硅灰)分别提升了13.4%和9.2%。60 d的再生混凝土力学强度也有一定程度提升,效果更好的是硅灰掺量10%试验组,抗压强度相较于对照组提高了16.9%,这表明掺入硅灰对混凝土长期性能是有利的。然而,当硅灰掺量增至15%时,不同龄期的混凝土力学强度均出现下降,其中,28 d的混凝土抗压和抗拉强度较10%掺量分别下降了5.8%和6.1%,可能是由于硅灰颗粒的过度集聚和未完全水化,导致混凝土内部出现微裂缝和孔隙[16]。

2.4 熟石灰再生混凝土力学性能 本试验将不同含量熟石灰直接加入已搅拌均匀的粗细骨料中,制备再生混凝土试样。通过对不同龄期试样进行力学强度测试,结果见图8。

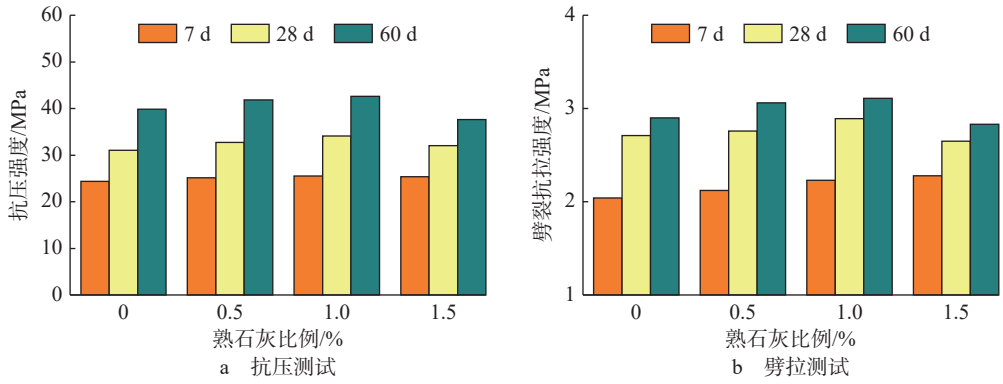
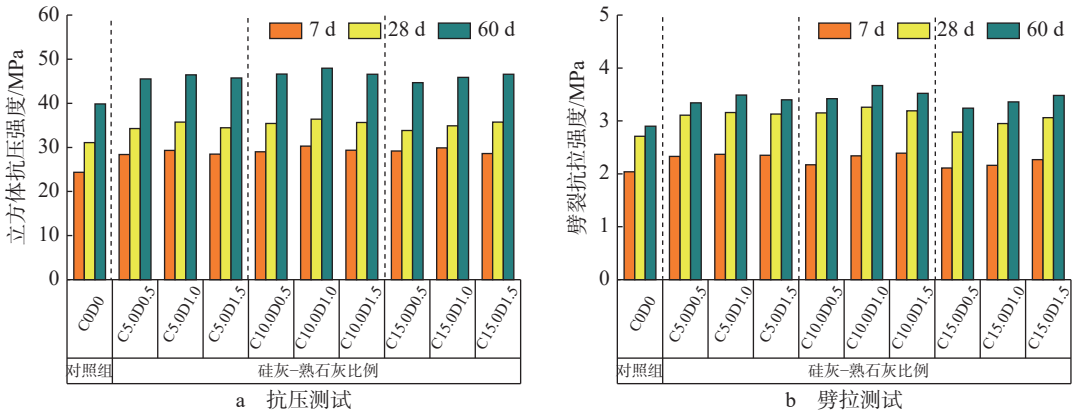


图8 熟石灰对再生混凝土抗压和劈裂抗拉强度的影响

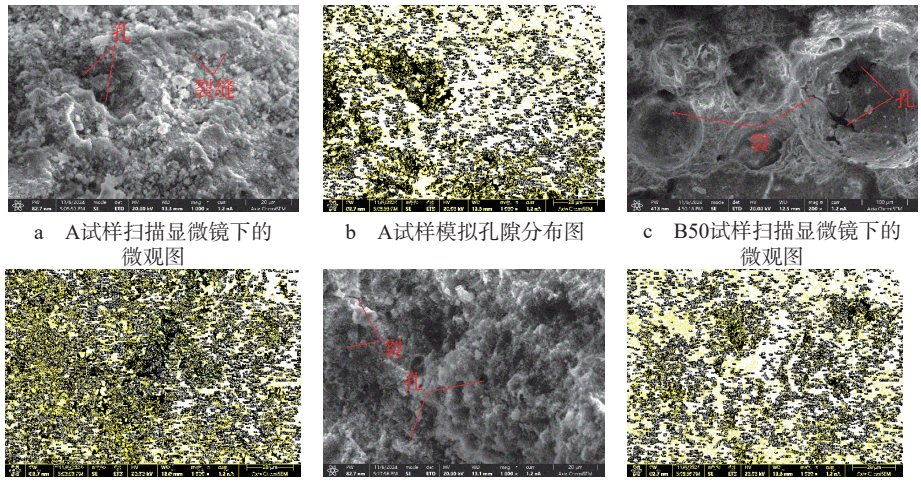
由图 8 可知，再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度随熟石灰掺量的增加呈现先升后降的变化趋势。28 d 龄期时，熟石灰掺量 1% 是再生混凝土基本力学性能（抗压强度和劈裂抗拉强度）的更合适掺量，抗压强度、抗拉强度值分别为 34.08 和 2.89 MPa，相较于对照组（未添加熟石灰）分别提升 9.7% 和 6.6%，表现出更好的提升效果。60 d 龄期时，1.5% 熟石灰再生混凝土的抗压强度为 37.61 MPa，相比于 1.0% 熟石灰再生混凝土的抗压强度 42.58 MPa，下降 13%，且低于对照组强度 39.86 MPa，表现出负面效应。这表明熟石灰的掺量需要严格控制，掺入比例合适能够对再生混凝土的长期性能产生有利作用[17]。

2.5 复合硅灰与熟石灰再生混凝土的力学性能 为探究复合硅灰与熟石灰对再生混凝土力学性能的协同作用，本试验将不同掺量组合的硅灰和熟石灰预先混合，随后按照试样制备流程直接加入已搅拌均匀的粗细骨料中，搅拌制成再生混凝土试样。通过对不同龄期试样进行相应力学测试并利用 ImageJ 软件观察试样微观形貌的孔隙变化。复合硅灰−熟石灰再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度在不同龄期的测试结果如图 9 所示；对照组和试验组试样在 28 d 龄期的微观形貌孔隙密实性变化如图 10 所示。



a 抗压测试　　b 劈拉测试

图 9 复合硅灰与熟石灰对再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响



a A试样扫描显微镜下的微观图　b A试样模拟孔隙分布图　c B50试样扫描显微镜下的微观图

d B50试样模拟的孔隙分布图　e B50C10.0D1.0试样扫描显微镜下的微观图　f B50C10.0D1.0试样模拟的孔隙分布图

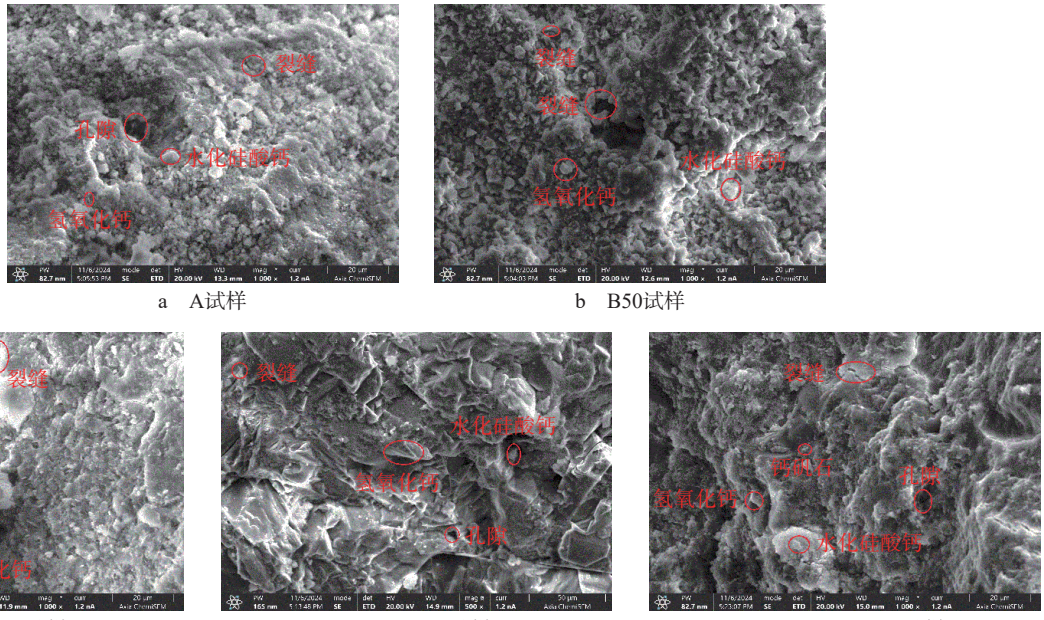
图 10 龄期 28 d 孔隙结构密实性变化

由图 9 可发现，添加复合掺合料的各试样再生混凝土力学表现相较于对照组均有不同程度提高。其中，试验组再生混凝土 7 d 龄期的抗压强度和劈裂抗拉强度最高分别达到了 30.30 和 2.39 MPa，较对照组分别提升了 25.9% 和 17.1%，提升效果明显优于单独掺入硅灰或熟石灰的再生混凝土在 7 d 龄期的抗压强度和劈裂抗拉强度，这说明复合适当比例的硅灰和熟石灰能够显著增强再生混凝土的早期强度；28 d 龄期时，10% 硅灰−1% 熟石灰再生混凝土强度达到较好的提升效果，抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 36.42 和 3.26 MPa，较对照组分别提高 17.2% 和 20.3%，接近基础组（普通混凝土）整体强度水平。此外，当龄期延长至 60 d 时，各试样再生混凝土力学强度相比于对照组均有所增强，这也说明复合硅灰和熟

石灰对再生混凝土的长期性能有利[18]。

通过ImageJ软件对再生混凝土试样的SEM图像进行定量计算与形貌分析(详见图10),发现复合10%硅灰与1%熟石灰的再生混凝土在28 d龄期时孔隙占比显著降低,其内部孔隙占比仅为17%,相较于对照组的再生混凝土(孔隙占比高达44%)优化效果显著,甚至优于普通混凝土(孔隙占比为26%)。这表明,复合掺合料体系能够通过多维度协同作用改善再生混凝土的内部微观孔隙结构,减少孔隙尺寸及连通性,进而提升材料整体密实性。通过火山灰效应与微集料填充效应的协同作用分析发现:硅灰活性SiO_2与水泥水化生成的$Ca(OH)_2$发生二次火山灰反应,形成C—S—H凝胶,填充再生骨料界面过渡区的孔隙缺陷;其超细颗粒同时发挥微集料效应,实现水泥基体与骨料空隙的致密化填充。而熟石灰($Ca(OH)_2$)的加入通过持续提供钙离子并调节孔隙溶液碱度,进一步激发硅灰及其他活性成分的反应效率,形成"填充−反应"协同体系。两者的复合形成了级配优化的填充−反应体系,能够优化孔隙形态特征,减少有害孔(>100 nm)的比例,转化为更均匀、连续的基体结构。这种多尺度结构优化直接反映在宏观力学强度的同步提升:复合再生混凝土在28 d龄期的抗压强度提高17.2%、劈裂抗拉强度增长20.3%,验证了微观结构重构与宏观强度发展的强关联性。此外,通过对比普通混凝土的孔隙结构与抗压强度和劈裂抗拉强度参数(详见图5),复合掺合料再生混凝土已接近传统混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度阈值[19]。

2.6 微观形貌分析 为深入分析不同再生混凝土试样内部微观形貌的差异,将破碎后的样品分别置于扫描电镜(SEM)下,放大1 000倍数进行观察,如图11所示。



a A试样 b B50试样

c B50C10.0试样 d B50D1.0试样 e B50C10.0D1.0试样

图11 电镜扫描(SEM)照片

通过对不同组别混凝土试样的电镜扫描(SEM)形貌进行对比分析(图11),可发现各组试样微观结构与水化产物分布的差异及其对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响机制。图11 a显示普通混凝土的典型微观结构:水泥水化反应充分,形成大量交织分布的纤维状水化硅酸钙(C—S—H)凝胶,基体结构致密且孔隙较少,无明显的相分离或裂隙扩展现象。这种高度连续的空间网络结构得益于普通混凝土原材料的高活性与新拌浆体的均匀性,为材料整体强度与耐久性提供了微观保障。

图11 b显示,再生混凝土对照组因再生骨料表面旧砂浆吸水性强,导致新浆体实际水灰比降低,抑制水泥水化,微观可见大量未反应的氢氧化钙(CH)晶体堆积,存在大量孔隙且含有连通孔隙及骨料界面微裂缝。结构缺陷源于双界面过渡区弱化:旧砂浆的微裂隙阻碍新水化产物与骨料的机械咬合,而其吸水特性使界面区水化不充分,形成富CH薄弱层。二者叠加导致再生混凝土28 d抗压强度较普通混凝土下降13.5%。

图 11 c 显示了单掺 10% 硅灰对再生混凝土的优化效果：加入的硅灰颗粒通过物理填充与化学激活双重机制优化基体结构。首先，硅灰的高比表面积明显加速水泥早期水化进程，促使 C—S—H 凝胶在再生骨料界面处优先生成；其次，硅灰中的活性 SiO_2 与水泥水化产物 CH 发生二次火山灰反应，有效消耗界面区的 CH 富集层，转化为具有高胶结力的 C—S—H 凝胶，显著提升了骨料与浆体间的黏结强度。实验数据显示，单掺硅灰 28 d 抗压强度较再生混凝土对照组提升 13.4%，但其早期（7 d）抗压强度增幅仅为 8.05%，表明硅灰的火山灰效应需在较长时间内逐步释放。

图 11 d 则显示了单掺 1.0% 熟石灰再生混凝土的微观特性：熟石灰的加入使体系内游离 CH 晶体数量显著增加，其片状晶体无序堆积导致基体致密性较低。这是因熟石灰仅提供外源性钙离子却缺乏足够的活性硅源，未能形成有效的 C—S—H 生成路径。图像中可见微裂缝沿 CH 晶体间薄弱界面延伸，验证了单纯提高碱度对强度贡献的局限性。

图 11 e 呈现 10% 硅灰−1.0% 熟石灰复合体系的协同强化机理：复合体系中，熟石灰通过提供持续稳定的钙离子源，为硅灰火山灰反应创造了有利条件；硅灰则通过释放活性 SiO_2 参与并加速 CH 的消耗过程。这种动态平衡促使早期 C—S—H 凝胶生成量较单掺硅灰明显增加，且形成针棒状钙矾石（AFt）晶体，通过其膨胀效应进一步密实早期孔隙结构。微观形貌显示，AFt 与 C—S—H 凝胶在界面过渡区形成互锁结构，使骨料与浆体的黏结强度明显提高。对比抗压和劈裂抗拉强度测试数据，该组试样 7 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 83.2%，28 d 抗压与劈裂抗拉强度分别达到 36.42、3.26 MPa，较对照组分别提高 17.2% 和 20.3%，充分验证了“填充−反应−结构重组”协同机制的有效性。

综合上述分析可知，硅灰与熟石灰的复合掺入通过多阶段协同作用优化再生混凝土结构：早期微集料填充与碱度调控促进致密基体形成；中后期火山灰反应与 AFt 强化界面过渡区，抗压与劈裂抗拉强度接近同强度等级的普通混凝土[20]。

3 结 论

结合 TM 搅拌工艺，研究单掺、复合硅灰和熟石灰对再生粗骨料混凝土的协同作用，得出以下主要结论：

（1）随着再生骨料取代率增加混凝土流动性呈非线性递减趋势，在取代率超过 50% 后，流动性降低速率显著；不同取代率下，再生混凝土 28 d 抗压强度降幅为 5.8%~25.3%，劈裂抗拉强度降幅为 14.2%~48.7%；综合流动性、抗压强度、劈裂抗拉强度试验结果考虑取代率限值 50%。

（2）单掺硅灰掺量为 10% 或熟石灰掺量为 1% 时，可使再生混凝土 28 d 抗压强度分别提高 13.4% 和 9.7%，劈裂抗拉强度分别提升 9.2% 和 6.6%。

（3）复合掺入 10% 硅灰与 1% 熟石灰对再生混凝土的协同效应显著，7 d 和 28 d 抗压强度分别增长 25.9% 和 17.2%，劈裂抗拉强度提高 17.1% 和 20.3%，整体力学性能接近普通基准混凝土。

（4）SEM 分析表明，再生粗骨料界面孔隙与微裂缝是再生混凝土抗压和劈裂抗拉强度劣化的主要原因，硅灰和熟石灰复合掺入通过优化界面密实性及水化产物分布，显著提升再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度。

参考文献：

[1] SINGH S, RANSINCHUNG G D, KUMAR P. Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 19−27.

[2] 李恒, 王家滨, 郭庆军, 等. 矿物掺合料再生混凝土力学性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2608−2614.
LI H, WANG J B, GUO Q J, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete with mineral admixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2608−2614.

[3] ZHANG S R, CAO K L, WANG C, et al. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 117980.

[4] KHODABAKHSHIAN A, GHALEHNOVI M, DE BRITO J, et al. Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 42−60.

[5] ELYAMANY H E, ABD ELMOATY A E M, DIAB A R A. Properties of slag geopolymer concrete modified with fly ash and silica fume[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2022, 49(2): 183−191.

[6] KONG D Y, LEI T, ZHENG J J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 701−708.

[7] 薛建阳, 罗峥, 元成方, 等. 再生混凝土力学性能及耐久性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 91−96.
XUE J Y, LUO Z, YUAN C F, et al. Experimental investigation for mechanical performance and durability of recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2013, 43(10): 91−96.

[8] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52—2006[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.

[10] THOMAS J, THAICKAVIL N N, WILSON P M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 19: 349−365.

[11] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2002[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

[12] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

[13] DATTA S D, SOBUZ M H R, AKID A S M, et al. Influence of coarse aggregate size and content on the properties of recycled aggregate concrete using non-destructive testing methods[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 61: 105249.

[14] 王伦, 周荣清, 刘林, 等. 再生骨料取代率及粒径对机制砂混凝土性能影响试验研究 [J]. 混凝土, 2025(3): 168−171.
WANG L, ZHOU R Q, LIU L, et al. Experimental study on the effect of recycled aggregate substitution rate and particle size on the performance of mechanized sand concrete[J]. Concrete, 2025(3): 168−171.

[15] 柯志滨, 郑彧, 张标, 等. 预拌再生骨料泵送混凝土的性能研究 [J]. 福建建材, 2022(7): 12−16.

[16] 吴帅. 低二氧化硅含量硅灰对混凝土力学及耐久性能的影响 [J]. 居业, 2024(8): 182−184.

[17] DA SILVA S R, DE BRITO J, DE OLIVEIRA ANDRADE J J. Synergic effect of recycled aggregate, fly ash, and hydrated lime in concrete production[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106370.

[18] GUNASEKARA C, SANDANAYAKE M, ZHOU Z Y, et al. Effect of nano-silica addition into high volume fly ash-hydrated lime blended concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119205.

[19] NADIM F, HASAN R, SOBUZ M H R, et al. Effect of silica fume on the microstructural and mechanical properties of concrete made with 100% recycled aggregates[J]. Revista De La Construcción, 2024, 23(2): 413−435.

[20] JALILIFAR H, SAJEDI F. Micro-structural analysis of recycled concretes made with recycled coarse concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121041.

作者贡献说明

邢贺负责论文初稿撰写、稿件修改。李艳参与稿件的修改、经费支持。赵菲参与稿件修改。林常参与稿件修改。全体作者均参与结果讨论。

利益冲突声明

作者声明,不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025030701。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢 (Acknowledgements)

本文得到海南省自然科学基金高层次人才项目(520RC549)支持。

This work was supported by High-Level Talent Project of Natural Science Foundation of Hainan Province (520RC549).

作者简介

邢　贺(1998—),男,海南乐东人,海南大学材料与化工专业 2022 级硕士研究生,E-mail: nanshan_116@126.com

李　艳(1977—),女,湖南衡阳人,教授,博士,研究方向:工程造价管理,E-mail: liyan_126@126.com

(责任编辑:张秀梅,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.