

硅灰改性钢纤维增强地聚物再生混凝土力学性能试验

夏冬桃 常闻捷 李彪 吴晨 喻诗汀 王煜 高奥星

Experimental study on mechanical properties of silica fume modified steel fibre reinforced geopolymer recycled aggregate concrete

XIA Dongtao, CHANG Wenjie, LI Biao, WU Chen, YU Shiting, WANG Yu, GAO Aoxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240723.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钢纤维地聚物再生混凝土孔隙结构与力学性能试验研究

Pore structure and mechanical properties of steel fiber reinforced geopolymer recycled aggregate concrete

复合材料学报. 2024, 41(10): 5516–5526 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240023.002>

循环荷载作用下钢纤维再生混凝土力学性能试验

Experimental study on mechanical behavior of steel fiber recycled concrete under cyclic compression

复合材料学报. 2022, 39(11): 5574–5585 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220310.002>

钢纤维再生混凝土三轴受压力学性能试验

Experiment on mechanical properties of steel fiber recycled aggregate concrete under triaxial compression

复合材料学报. 2022, 39(8): 4005–4016 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210903.006>

钢-塑钢混杂纤维再生混凝土单轴压缩动态力学性能试验

Experiment on dynamic mechanical properties of steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete under uniaxial compression

复合材料学报. 2022, 39(11): 5386–5402 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211221.002>

低温作用下改性骨料-钢纤维再生混凝土弯曲性能试验

Experimental study on bending properties of modified aggregate-steel fibre recycled concrete under low temperature

复合材料学报. 2024, 41(2): 884–897 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230531.002>

橡胶地聚物混凝土力学性能及阻尼特性试验研究

Experimental study on mechanical properties and damping characteristics of rubber geopolymer concrete

复合材料学报. 2022, 39(11): 5321–5332 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211201.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240723.001

硅灰改性钢纤维增强地聚物再生混凝土力学性能试验



分享本文

夏冬桃, 常闻捷, 李彪*, 吴晨, 喻诗汀, 王煜, 高奥星

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要: 钢纤维增强地聚物再生混凝土 (SFRGRAC) 具有碳排放量低、节约天然矿物资源以及延性韧性好等优点, 具有广泛应用前景。为改善 SFRGRAC 力学性能, 本文以硅灰为增强材料, 通过立方体抗压、劈裂抗拉、抗折和弹性模量试验, 研究硅灰掺量、钢纤维体积掺量和再生骨料取代率等因素对 SFRGRAC 力学性能的影响规律, 并基于 SEM 和低频核磁共振测试结果揭示硅灰的改性机制。结果表明: 掺入硅灰可延长 SFRGRAC 的凝结时间, 当硅灰掺量为 15wt% 时, 初凝和终凝时间分别提高了 29.68% 和 22.98%; 由于硅灰与碱激发溶液快速发生反应, 加快了水化反应的速度, SFRGRAC 3 d 抗压强度和劈裂抗拉强度可达到 28 d 强度的 85% 以上; 随着钢纤维体积掺量从 0vol% 增至 1.5vol%, 其抗压强度可提高 17.44%, 随着再生骨料取代率从 0% 增至 50%, 其强度降低了 9.79%。掺入 10wt% 硅灰, 总孔隙率降低了 23.79%, 能显著提高其抗压、劈裂抗拉和抗折强度, 但当硅灰掺量为 15wt% 时, 因过量硅灰降低了基体的碱度, 导致地聚物水化反应不完全, 使其力学性能表现出下降趋势。研究成果为再生混凝土相关规范的修订和完善提供参考依据。

关键词: 地聚物再生混凝土; 钢纤维; 硅灰; 力学性能; 改性机制

中图分类号: TU528; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)04-2090-12

Experimental study on mechanical properties of silica fume modified steel fibre reinforced geopolymer recycled aggregate concrete

XIA Dongtao, CHANG Wenjie, LI Biao*, WU Chen, YU Shiting, WANG Yu, GAO Aoxing

(School of Civil Engineering, Architecture & The environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Steel fiber reinforced geopolymer recycled concrete (SFRGRAC) presents several benefits, including reduced carbon emissions, conservation of natural minerals, and enhanced ductility and toughness, rendering it a promising material for broad applications. This study aims to augment the mechanical characteristics of SFRGRAC by incorporating silica fume as a reinforcing agent. It examines the influence of silica fume content, steel fiber volume fraction, and recycled aggregate substitution ratio on mechanical performance of SFRGRAC through cube compression, split tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity test. Additionally, the study elucidates the modification mechanism of silica fume via SEM and low field NMR test. The findings indicate that silica fume addition extends the setting time of SFRGRAC, with 15wt% content of silica fume leading to a 29.68% increase in initial setting time and a 22.98% increase in final setting time. The accelerated hydration reaction, prompted by the prompt pozzolanic reaction between silica fume and the alkali activator, results in the SFRGRAC achieving over 85% of its 28 d compressive and tensile strengths within 3 d. The compressive strength improves by 17.44% as steel fiber volume fraction increases from 0vol% to 1.5vol%, whereas a 50% substitution of recycled aggregate causes a 9.79% reduction in strength than 0% substitution rate. A 10wt% silica fume content diminishes total

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-06-18; 录用日期: 2024-07-10; 网络首发时间: 2024-07-24 08:02:25

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240723.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52308248); 湖北省自然科学基金项目 (2023AFB309)

National Natural Science Foundation of China (52308248); Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFB309)

通信作者: 李彪, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为结构工程与材料 E-mail: libiao@hbut.edu.cn

引用格式: 夏冬桃, 常闻捷, 李彪, 等. 硅灰改性钢纤维增强地聚物再生混凝土力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2090-2101.

XIA Dongtao, CHANG Wenjie, LI Biao, et al. Experimental study on mechanical properties of silica fume modified steel fibre reinforced geopolymer recycled aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2090-2101(in Chinese).

porosity by 23.79%, substantially enhancing compressive, tensile, and flexural strengths. When the silica fume content reaches 15wt%, the excessive silica fume reduces the alkalinity of matrix, resulting in an incomplete hydration reaction of the geopolymer. Consequently, this causes a decline in its mechanical properties. These findings offer valuable insights for the revision and enhancement of specifications related to recycled concrete.

Keywords: geopolymer recycled aggregate concrete; steel fiber; silica fume; mechanical properties; modification mechanism

随着城镇化的发展以及大型基础建设的推进,对废弃建筑混凝土的再生利用迫在眉睫。再生混凝土具有碳排放低、节约资源和能源以及保护自然环境等优势^[1]。然而,再生骨料吸水性大、孔隙度高、强度低,当其替代天然骨料(NA)后,易在混凝土中引入较多孔隙且形成大量初始弱界面,降低了再生混凝土的强度^[2]。地聚物再生混凝土(GRAC)为解决这一问题提供了一种有效途径。研究表明:GRAC基体与骨料粘结更紧密,基体和界面过渡区更加密实。然而,由于GRAC内部特殊黏结性能,GRAC脆性较大,且掺入再生骨料后进一步降低其密实度和强度^[3-5]。Zhang等^[6]研究发现当钢纤维掺量低于2vol%时,掺入钢纤维能显著改善地聚物混凝土的各项力学性能指标。Zheng等^[7]研究发现钢纤维与地聚物的结合比水泥基更紧密,掺入0.5vol%~1.5vol%体积掺量的钢纤维,使得地聚物混凝土的抗压和劈裂抗拉强度分别最大提高了18.2%和48.5%。掺入钢纤维可改善GRAC的脆性,有效延缓裂缝的发展,增强GRAC的力学性能^[8]。Xu等^[9]也通过试验证实了钢纤维在提高GRAC力学性能和裂缝发展方面的有效性。然而,相关研究结果表明,再生骨料-基体和钢纤维-基体界面过渡区均为弱界面,存在大量孔洞和微裂纹,降低了钢纤维增强地聚物再生混凝土(SFRGRAC)的力学性能。

Okoye等^[10]研究发现掺入硅粉改性后的地聚物混凝土立方体抗压、抗拉和抗弯强度均高于未掺硅灰组,且随硅粉含量的增加而增大。Liu等^[11]的研究结果表明20wt%掺量的硅灰充分发挥了细颗粒作用,充填在矿渣粉孔隙中,从而改善了地聚物混凝土的流动性。Li等^[12]研究发现掺入硅灰使得GRAC的微观结构更加致密,混凝土总孔隙率降低了40%以上。马维等^[13]研究发现碱激发矿渣/粉煤灰基地聚物混凝土的力学性能随着硅灰掺量增加呈现先增加后降低趋势,硅灰较佳掺量为4wt%。夏冬桃等^[14]研究发现随着硅灰取代率增大,碱矿渣混凝土的力学性能先增加后降低,硅灰掺

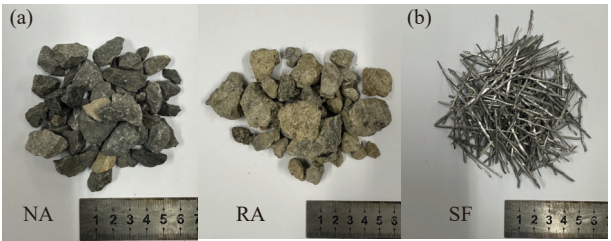
量为10wt%时的增强效果最好。

综上所述,虽然硅灰对地聚物混凝土力学性能的影响已取得了一些进展,但硅灰改性SFRGRAC的研究还鲜见报道,硅灰取代率和钢纤维体积掺量对SFRGRAC力学性能影响规律并未达成一致,硅灰对SFRGRAC的改性机制也尚不明确。为此,本文对硅灰改性SFRGRAC的力学性能进行研究,考察硅灰取代率、钢纤维体积掺量和再生骨料取代率对SFRGRAC强度和弹性模量的影响规律,并基于微细观试验测试结果,揭示硅灰对SFRGRAC的改性机制。

1 试验

1.1 原材料

(1) 骨料:粗骨料包括天然粗骨料和再生粗骨料,见图1。其中天然粗骨料采用当地玄武岩碎石,其表面密度为2 873 kg/m³,粒径为5~20 mm,再生粗骨料由当地建筑废弃混凝土破碎筛分后制备得到,细骨料为天然河砂,其表观密度为2 590 kg/m³,细度模数为2.7。粗、细集料的颗粒级配见图2。



NA—Natural aggregate; RA—Recycled aggregate; SF—Steel fiber
图1 粗骨料(a)和钢纤维(b)

Fig. 1 Coarse aggregate (a) and steel fiber (b)

(2) 胶凝材料:地聚物混凝土所用胶凝材料为S95级高炉粒化矿渣;硅灰为优质微硅粉,粒径约为0.2 μm,其主要化学成分列于表1。

(3) 碱性激发剂:碱激发剂由SP38型液体硅酸钠和片状氢氧化钠组成的混合溶液,其化学式为Na₂O·*m*SiO₂,其中*m*为碱激发剂模数。硅酸钠溶液的模数为3.3,波美度为38.5 Be,二氧化硅和氢氧化钠的质量分数分别为27.3wt%和8.54wt%。

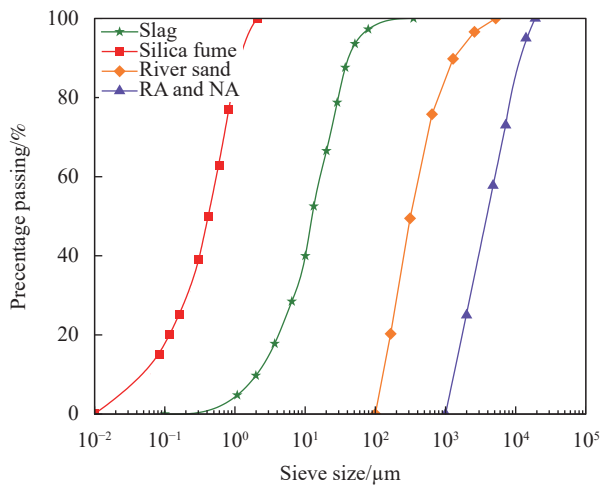


图2 材料粒径累计分布图

Fig. 2 Cumulative size distribution curves of raw materials

采用纯度为 99% 的片状氢氧化钠调节碱激发剂溶液模数 m ，根据课题组^[14]前期研究成果，调节后模数为 2.0。

(4) 钢纤维：采用波纹型钢纤维，其等效直径约为 0.65 mm，长度为 32 mm，长径比为 50，密度为 7.9 kg/m³，弹性模量为 200 GPa，其抗拉强度不低于 1 100 MPa，见图 1。

(5) 减水剂：采用萘系高效减水剂，减水率约为 18%~28%。

1.2 配合比设计

依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[15]、《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443—2018)^[16]和课题组前期研究成果^[17-18]，设计强度等级 C40 混凝土。为研究硅灰对 SFRGRAC 力学性能的影响，确定试验中硅灰掺量(取代胶凝材料质量百分比)分别为 5wt%、10wt% 和 15wt%，钢纤维体积掺量分别为 0.5vol%、1.0vol% 和 1.5vol%，再生骨料取代率分别为 25% 和 50%。基于以上参数，共设计 12 组 SFRGRAC，其配合比见表 2。

表 1 胶凝材料主要化学成分

Table 1 Chemical composition of cementitious materials

Binder	Composition/wt%										Specific surface area/(cm ² ·g ⁻¹)	Density/(kg·m ⁻³)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂		
Slag	36.82	26.75	19.66	0.32	11.1	2.65	0.29	0.84	0.37	0.94	428	2.9
Silica fume	0.12	96.65	0.31	0.07	0.11	1.21	0.22	0.67	0.17	0.83	200 000	2.1

表 2 钢纤维增强地聚物再生混凝土 (SFRGRAC) 设计配合比

Table 2 Designed mix proportions of steel fiber reinforced geopolymer recycled aggregate concrete (SFRGRAC)

No.	Specimen	Proportion/(kg·m ⁻³)									
		Slag	Sand	NA	RA	Silica fume	Steel fiber	Water	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Plastisizer
1	R50F00S00	417	724	724	543	0	0	61.08	161.75	3.59	3.3
2	R50F00S05	396.15	724	724	543	20.85	0	66.77	168.68	12.08	3.3
3	R50F00S10	375.3	724	724	543	41.7	0	72.47	159.80	11.45	3.3
4	R50F00S15	354.45	724	724	543	62.55	0	78.17	150.93	10.81	3.3
5	R50F10S00	417	724	724	543	0	78.5	61.08	161.75	3.59	3.3
6	R50F05S10	375.3	724	724	543	41.7	39.25	72.47	159.8	11.45	3.3
7	R50F10S05	396.15	724	724	543	20.85	78.5	66.77	168.68	12.08	3.3
8	R50F10S10	375	724	724	543	41.7	78.5	72.47	159.8	11.45	3.3
9	R50F10S15	354.45	724	724	271.5	62.55	78.5	78.17	150.93	10.81	3.3
10	R25F10S10	375.3	724	724	271.5	41.7	78.5	72.47	159.8	11.45	3.3
11	R00F10S10	375.3	724	818	0	41.7	78.5	72.47	159.8	11.45	3.3
12	R50F15S10	375.3	724	626	543	41.7	117.75	72.47	159.8	11.45	3.3

Notes: R—Addition of recycled aggregate; F—Volume fraction of steel fiber; S—Addition of silica fume. R50F10S10 represents the 50% recycled aggregate content, 1.0vol% steel fiber volume fraction and 10wt% silica fume content.

1.3 试件制作及养护

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[19]，制备 18 个边长为 100 mm 的立方体试块进行立方体抗压和劈裂抗拉强度

测试；制作 3 个尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体进行抗折强度测试；制作 3 个 100 mm×100 mm×300 mm 试件测试混凝土弹性模量。

采用 60 L 强制搅拌机制备混凝土试件。首先

将矿渣和硅灰等原材料称量，用搅拌机干拌 3 min，后加入河砂和粗骨料搅拌 2 min，然后缓慢加入水、减水剂和提前配制好的碱激发剂溶液，继续搅拌 2~3 min，最后，加入钢纤维，搅拌 3~5 min。当混合均匀后，将新拌混凝土倒入准备好的模具中，并在振动台上振捣 3 min。随后将试件放入实验室环境 (温度 (20±5)℃、相对湿度 ≥65%) 中，静置 24 h 后脱模和养护。

1.4 试验方法

1.4.1 凝结时间试验

依据《普通混凝土拌和性能标准》(GB/T 50080—2016)^[20]，采用贯入阻尼法测试新拌混凝土的初凝和终凝时间。每组混凝土测试结果取 3 次实测凝结时间的平均值。

1.4.2 力学性能试验

采用济南恒乐兴科仪器有限公司所提供的 HL-300T 电液伺服压力机进行立方体抗压和劈裂抗拉强度测试，采用恒乐兴科仪器有限公司的 100 吨 HL-J10 压力机进行四点弯曲试验测试抗折强度，采用武汉赫迈机械设备有限公司所提供的 250 吨 MTS-411.31 压力机进行弹性模量测试。测试结果

列于表 3。

1.4.3 微观结构测试

在力学性能测试完成后，将试样破碎，并筛选出尺寸约 5 mm、厚度约 1.5 mm、表面光滑且包含骨料与砂浆界面的碎片，以进行扫描电子显微镜 (SEM) 分析。在测试前，样本先在 60℃ 的武汉安德信检测设备有限公司所提供的 ADX-DZF 真空烘箱中干燥 72 h，以消除内部水分。随后，对样本表面进行喷金处理，采用德国蔡司公司所提供的 Sigma-500 扫描电镜观察样品的微观结构。

将待测样品中心位置的砂浆碎片置于无水乙醇中，以阻止其水化过程。接着，将其研磨成粉末并通过 200 目 (75 μm) 筛，然后在 60℃ 的烘箱中干燥至恒重，所得的粉末将被用作 X 射线衍射 (XRD) 测试样品，随后在 Empyrean 锐影 X 射线衍射分析仪上进行物相分析，扫描速度设定为 5°/min，2θ=5°~85°。

选用尺寸约为 10 mm 的混凝土基体，在真空充水槽进行水饱和，然后采用上海纽迈电子科技有限公司所提供的 MicroMR12-025 V 核磁共振仪测定试样的孔隙结构。

表 3 SFRGRAC 强度和弹性模量测试结果
Table 3 Test results of machine strength and elastic modulus of SFRGRAC

Specimen	Compressive strength/MPa			Splitting tensile strength/MPa			Flexural strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	28 d	28 d
R50F00S00	38.07	43.05	47.51	3.39	3.71	4.16	3.79	13.02
R50F00S05	39.15	48.53	51.24	3.72	4.10	4.41	4.18	13.35
R50F00S10	41.36	48.60	53.96	3.91	4.27	4.32	4.26	14.75
R50F00S15	28.95	36.39	47.80	2.66	3.10	3.19	3.64	11.29
R50F10S00	40.30	48.44	54.05	3.98	4.42	4.91	4.30	13.85
R50F05S10	47.78	49.31	55.68	4.57	5.26	5.80	4.48	18.48
R50F10S05	49.15	53.75	57.25	5.54	5.91	6.26	4.83	16.43
R50F10S10	49.85	54.30	58.76	5.61	6.15	6.61	5.18	22.51
R50F10S15	40.75	46.93	55.91	5.00	5.51	6.16	4.06	14.22
R25F10S10	52.15	56.62	60.21	5.64	6.56	6.88	5.32	24.37
R00F10S10	55.91	61.27	65.14	6.16	7.01	7.24	5.68	27.52
R50F15S10	53.49	58.95	65.39	5.75	6.46	6.68	5.34	24.35

2 结果与讨论

2.1 SFRGRAC 凝结时间

图 3 为硅灰掺量对 SFRGRAC 凝结时间的影响。可知，掺入 5wt% 硅灰时，SFRGRAC 初凝和终凝时间较未掺入硅灰的试件分别降低了 10.31% 和 13.86%，这是由于硅灰相比于矿渣比表面积更大，当硅灰掺入矿渣混合物中，与碱激发溶液快速发生发应，加快了水化反应速度。随着硅灰掺量由 0wt% 增至 15wt%，SFRGRAC 初凝和终凝时间分

别增加了 29.68% 和 22.98%，这是由于少量硅灰对混凝土浆体的碱度影响不大，而硅灰具有较强的火山灰活性，随着硅灰掺量增加，硅灰在浆体中迅速发生水化反应，消耗碱性溶液中大量 OH⁻^[21-22]。在胶凝材料水化过程中，释放了大量的 SiO₂，降低了混凝土浆体的碱度，从而降低了矿渣的反应速率，延长了 SFRGRAC 凝结时间。可以看出，初凝与终凝时间的间距较短，这是由于在碱激发剂作用下，随着矿渣中的玻璃体解聚过程发生，大

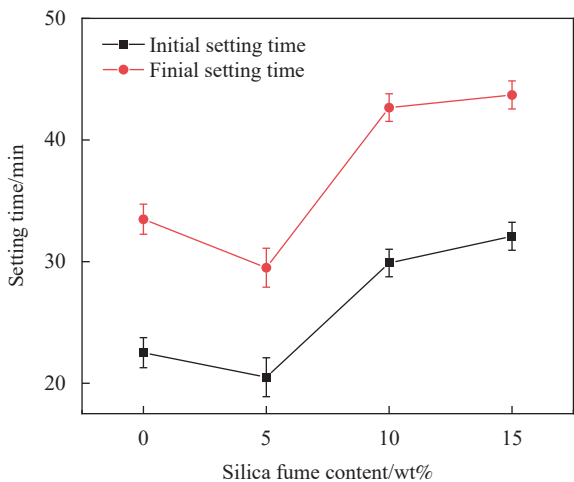


图3 硅灰掺量对 SFRGRAC 凝结时间的影响

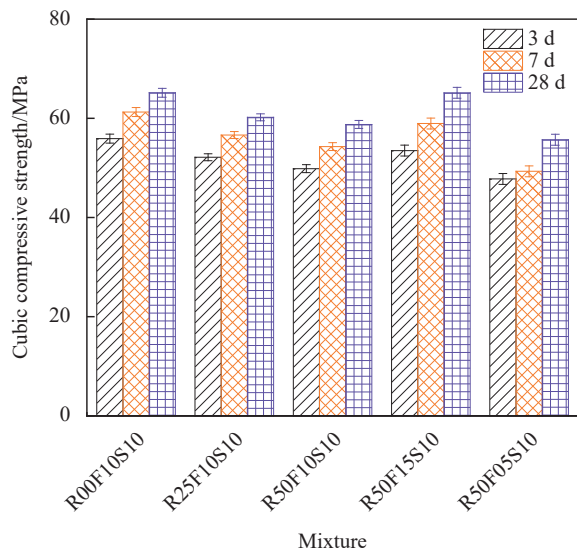
Fig. 3 Effect of silica fume content on the setting time of SFRGRAC

幅降低了地聚物混凝土初凝和终凝时间^[3]。

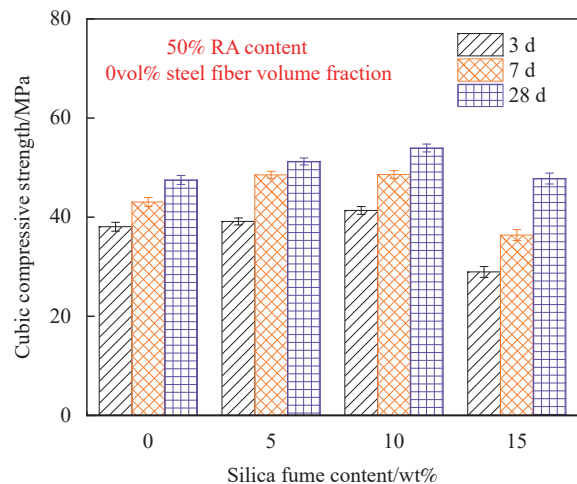
2.2 SFRGRAC 立方体抗压强度

图 4(a) 为钢纤维体积掺量和再生骨料取代率对 SFRGRAC 立方体抗压强度的影响。可以看出，随着再生骨料取代率从 0% 增至 50%，SFRGRAC 立方体抗压强度降低了 9.79%。这主要归因于再生骨料掺入后引入了大量弱界面和初始缺陷，降低了 SFRGRAC 抗压强度。此外，随钢纤维体积掺量从 0.5vol% 增至 1.5vol%，SFRGRAC 抗压强度提高了 5.18% 和 18.52%，这是高弹性模量钢纤维的裂缝桥接作用有效阻碍了试件内部微裂缝扩展及宏观裂缝的形成，提高了 SFRGRAC 力学性能^[23]。

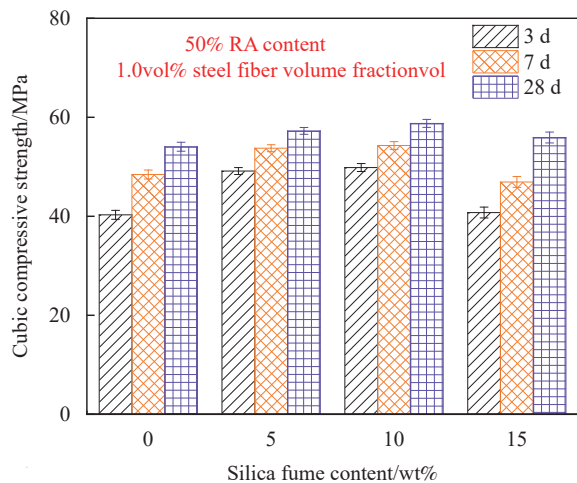
图 4(b) 和图 4(c) 分别为硅灰掺量对 GRAC 和 SFRGRAC 立方体抗压强度的影响。可以看出，GRAC 3 d 和 7 d 的抗压强度平均达到了 28 d 的 70% 和 85% 以上，SFRGRAC 3 d 和 7 d 的早期强度平均达到 28 d 的 80% 和 90% 以上，反映出 SFRGRAC 的早强特性^[24-25]。此外，硅灰掺量从 0wt% 增至 15wt%，GRAC 的 28 d 立方体抗压强度分别提高了 7.85%、13.57%、0.61%，而 SFRGRAC 的 28 d 立方体抗压强度分别提高了 5.92%、8.72% 和 3.44%。显而易见，随着硅灰掺量增加，GRAC 和 SFRGRAC 的抗压强度最大增幅分别达到 15% 和 10% 以上，其原因主要在于，硅灰中含有大量活性 SiO_2 ，其在常温下能与浆体中析出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应并生成具有胶凝性的低碱性水化硅酸钙和水化铝酸钙，提高了 GRAC 密实性。从图 4(b) 和图 4(c) 还可以发现，未掺入硅灰时，添加 1vol% 钢纤维使得试件强度提高了 11.87%，而掺入 10wt% 硅灰后，试件强度提高了 23.71%，这是超细度、高活性的



(a) Effect of steel fiber and RA content



(b) Effect of silica fume content on the cubic compressive strength of GRAC



(c) Effect of silica fume content on the cubic compressive strength of SFRGRAC

图 4 SFRGRAC 立方体抗压强度

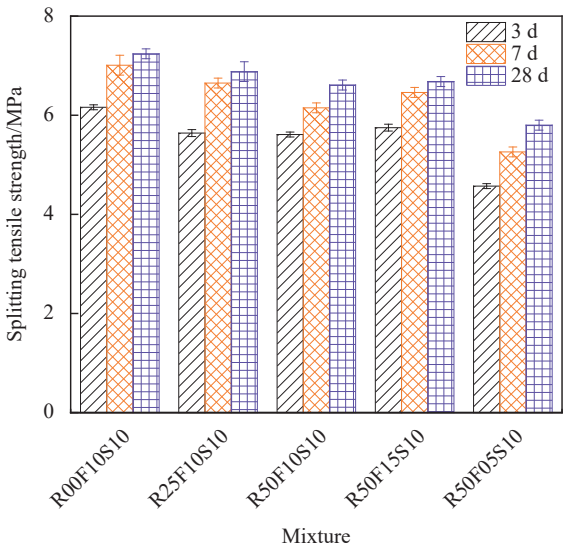
Fig. 4 Cubic compressive strength of SFRGRAC

硅灰，能够有效填充基体以及弱界面过渡区的孔隙和孔洞，改善纤维-基体以及骨料-基体界面性能。但随着硅灰掺量增加至 15wt%，GRAC 和 SFRGRAC 立方体抗压强度比硅灰掺量为 10wt% 时分别下降了 12.89% 和 6.84%，其原因在于：(1) 由于过量硅灰在浆体中发生团聚现象，团聚后的 SFRGRAC 内部产生更多薄弱界面过渡区 (ITZ)，导致孔隙和裂缝增加；(2) 硅灰掺量增大，使得体系中碱度降低，水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶形成迟滞，延缓了地聚反应的进行。根据本文试验分析发现，10wt% 掺量的硅灰对 SFRGRAC 立方体抗压强度增强效果最好。

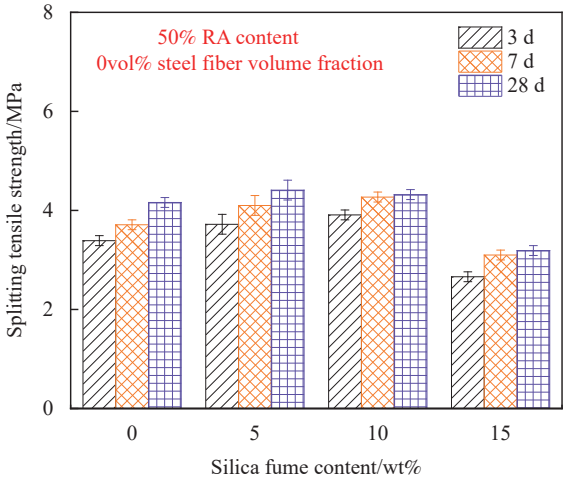
2.3 SFRGRAC 劈裂抗拉强度

图 5(a) 为钢纤维和再生骨料掺量对 SFRGRAC 劈裂抗拉强度的影响。当钢纤维掺量从 0.5vol% 增至 1.5vol% 时，SFRGRAC 的劈裂抗拉强度分别增加了 13.97% 和 10.59%，这归功于破坏前试件内部钢纤维产生的拉应力阻止了试件裂缝进一步扩展，改善其脆性。随着再生骨料取代率从 0% 增至 50%，SFRGRAC 的劈裂抗拉强度分别降低了 4.97% 和 3.92%，这是由于再生骨料具有孔隙率较高等缺陷，其表面带有旧砂浆，使 ITZ 结构更加复杂。

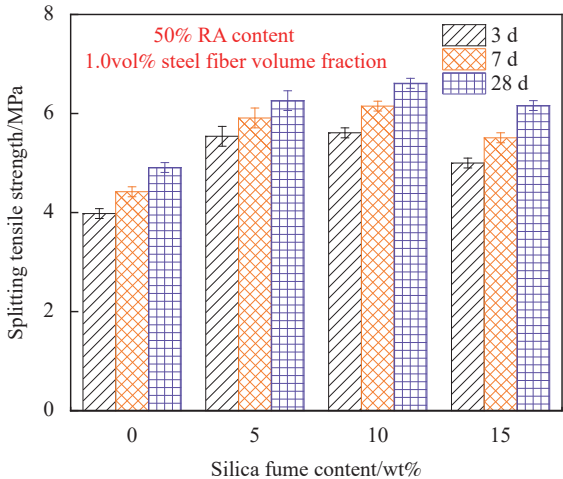
图 5(b) 和 图 5(c) 为硅灰掺量对 GRAC 和 SFRGRAC 劈裂抗拉强度的影响。可以看出，GRAC 和 SFRGRAC 在 3 d 和 7 d 的早期劈裂抗拉强度平均达到了 28 d 的 84.93%、94.48% 和 83.87%、91.71%。表明掺入硅灰大幅提升了试件早期劈裂抗拉强度。由图可知，当硅灰掺量由 0wt% 增至 15wt%，硅灰掺量对 GRAC 和 SFRGRAC 劈裂抗拉强度的提高程度分别为 3.85%~6.11% 和 27.49%~34.62%，表明硅灰与钢纤维耦合效果更好，这是由于硅灰的火山灰效应，生成的 C-S-H 和钙矾石等胶凝在钢纤维和骨料间形成有效的粘结，且水化胶凝在钢纤维-基体间的粘结效果优于在骨料-骨料间，因此掺入硅灰显著改善了钢纤维与基体的界面性能，提高了 SFRGRAC 的抗拉强度。但当硅灰掺量为 15wt% 时，GRAC 和 SFRGRAC 劈裂抗拉强度比硅灰掺量 10wt% 分别降低了 26.16% 和 7.14%，这是由于硅灰和矿渣中含有 Si 和 Al，当硅灰掺量增大，GRAC 浆体中 Si 和 Al 也逐渐增大，从水化反应方程式角度来看^[26]，Si 和 Al 比率影响 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的生成。因此，硅灰掺量大于最佳 Si、Al 含量时，硅灰在浆体中



(a) Effect of steel fiber and RA content



(b) Effect of silica fume content on the splitting tensile strength of GRAC



(c) Effect of silica fume content on the splitting tensile strength of SFRGRAC

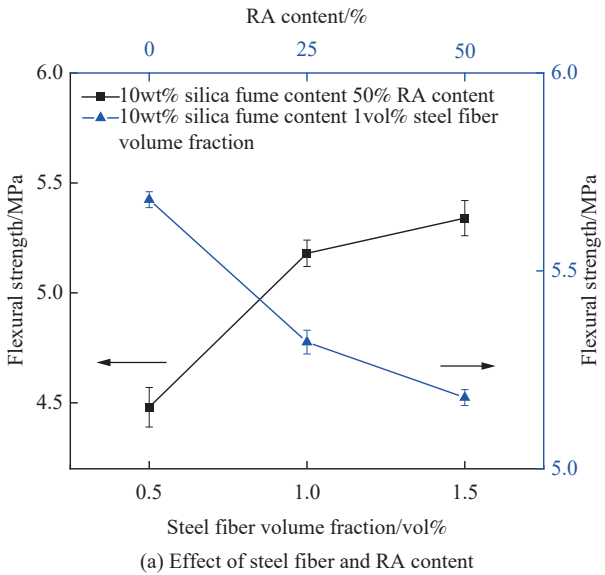
图 5 SFRGRAC 劈裂抗拉强度

Fig. 5 Splitting tensile strength of SFRGRAC

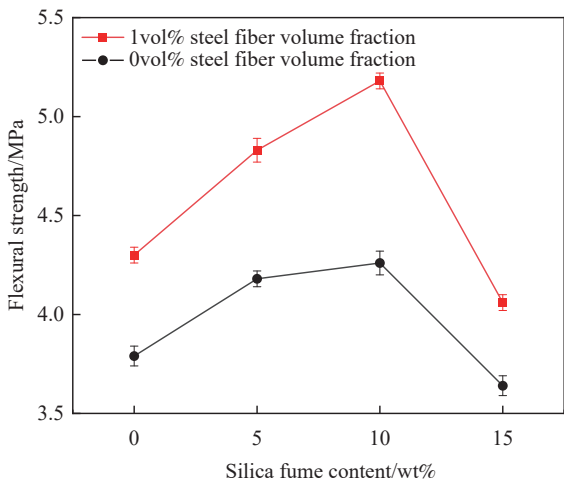
不能充分水化,从而降低了 SFRGRAC 的劈裂抗拉强度。

2.4 SFRGRAC 抗折强度

图 6(a) 为再生骨料取代率、钢纤维体积掺量和硅灰掺量对 SFRGRAC 抗折强度影响。可知,随着再生骨料取代率从 0% 增至 50%, SFRGRAC 抗折强度分别下降 6.34% 和 2.63%,这是由于再生骨料孔隙率高、粘结强度低,导致混凝土脆性增大,降低了 SFRGRAC 抗折强度。随着钢纤维体积掺量从 0vol% 增至 1.5vol%, SFRGRAC 的抗折强度分别提高 5.16%、21.59% 和 25.35%,这是由于钢纤维掺入阻碍了 GRAC 裂缝的形成和发展,钢纤维在 GRAC 中起到了粘结和桥接作用,改善了 GRAC 固有脆性,因此钢纤维掺入增强了 GRAC 的抗折



(a) Effect of steel fiber and RA content



(b) Effect of silica fume content

图 6 SFRGRAC 抗折强度

Fig. 6 Flexural strength of SFRGRAC

强度。

图 6(b) 为硅灰掺量对试件抗折强度的影响。当硅灰掺量从 0wt% 增至 15wt%, GRAC 抗折强度分别增加了 10.29%、12.41% 和 -3.96%, 而掺入 1vol% 钢纤维的 SFRGRAC 抗折强度分别增加了 12.33%、20.47% 和 -5.58%。可以看出, 当硅灰掺量为 10wt% 时, GRAC 和 SFRGRAC 抗折强度均达到最大。其原因主要在于, 随着硅灰掺量增加, 硅灰填充 SFRGRAC 的孔隙和孔洞中, 改善其微观结构, 使 SFRGRAC 基体更加密实, 且硅灰快速水化生成大量胶凝材料填充在骨料与基体间, 产生较强的粘结力, 增强了 SFRGRAC 的力学性能; 当硅灰掺量为 15wt% 时, GRAC 和 SFRGRAC 抗折强度分别比硅灰掺量为 10wt% 时下降了 14.55% 和 21.62%, 这是由于硅灰比表面积大, 混凝土中水分快速消耗, 导致水化反应所需要水分减少, 未反应的胶凝材料颗粒会发生较大的收缩变形, 形成大量微裂缝, 造成 GRAC 内部缺陷, 从而降低了抗折强度。此外, 当硅灰掺量从 0wt% 增至 15wt% 时, 未掺入钢纤维和掺入 1vol% 钢纤维的 GRAC 抗折强度平均提升了 18.74% 和 27.22%, 表明硅灰与钢纤维的耦合效果更好。

2.5 SFRGRAC 弹性模量

图 7(a) 为试件弹性模量随试验参数的变化规律。可知, 当再生骨料取代率从 0% 增至 50% 时, SFRGRAC 弹性模量分别降低了 11.45% 和 7.63%, 这主要由于再生骨料中携带旧砂浆具有更高的孔隙率和更多由回收过程引起的内部微裂缝, 导致再生骨料与新砂浆的粘结性能降低, 降低了试件的弹性模量。从图 7(b) 可以看出, 当硅灰掺量从 0wt% 增至 15wt%, 未掺入钢纤维的 GRAC 弹性模量分别增加了 2.69%、13.46% 和 13.15%, 掺入 1vol% 钢纤维的 GRAC 弹性模量分别增加了 18.63%、62.53% 和 2.67%, 这是由于 GRAC 的弹性模量取决于其界面过渡区和基体的物理力学性能, 硅灰的高活性和高填充性提高了基体和骨料界面过渡区密实性。同时, 硅灰水化生成大量 C-S-H 等凝胶填补孔洞和空隙, 使 GRAC 微观结构更加致密, 从而提高了 GRAC 的弹性模量。当硅灰掺量超过 10wt%, 由于硅灰结团而导致 GRAC 弹性模量降低。

3 微观机制分析

图 8 为典型试件的破坏形貌。可以看出, 未

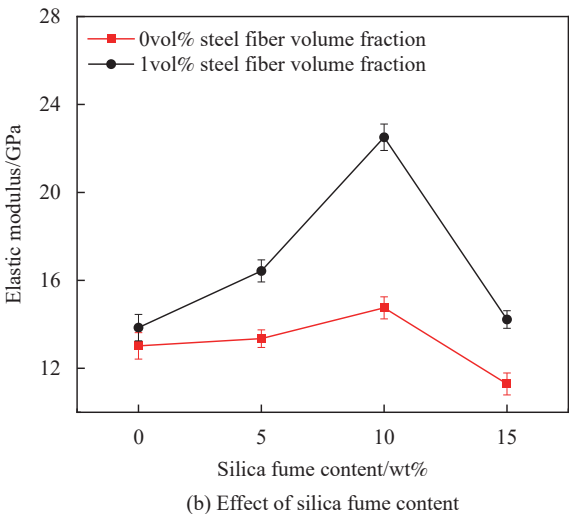
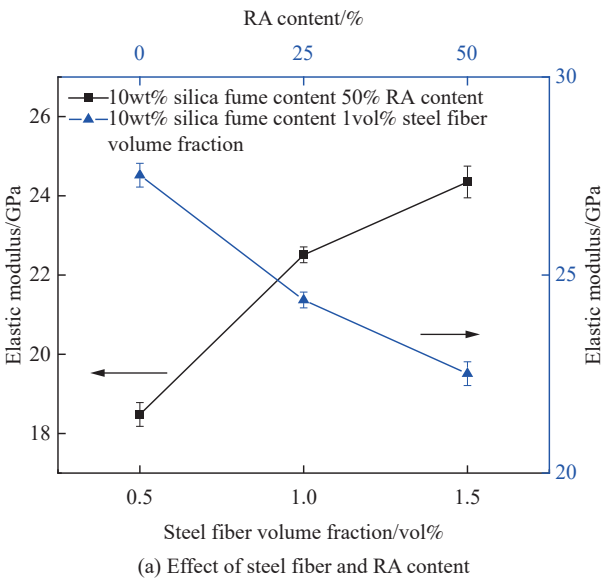


图 7 SFRGRAC 弹性模量
Fig. 7 Modulus of elasticity of SFRGRAC

掺硅灰 (R50F00S00) 试样中存在较多孔洞和薄弱区, 而掺入硅灰后 (R50F00S10), 界面孔洞数量明显减少, 这主要归功于硅灰良好的填充效应, 减少了孔隙数量和尺寸, 硅灰快速水化反应生产的水化硅酸钙凝胶有效填充了孔洞和裂缝, 减少了掺入再生骨料引入的初始缺陷。由图 8(d) 可知, 未掺入硅灰的 SFRGRAC 内部出现许多孔洞, 而掺入硅灰后, 由于硅灰填充在钢纤维与基体孔隙中, 试件界面孔洞数量和尺寸明显减小, 如图 8(e) 所示。

为进一步观察掺入硅灰对 SFRGRAC 微观机制的影响, 通过 SEM 测试试件的破坏形貌, 如图 8(f)、图 8(g) 所示。可以看出, 由胶凝材料水化生成的钙矾石 (AFt) 和 C-S-H 等凝胶吸附在基体周围, 形成致密结构, 由此弥补了再生骨料的缺

点, SFRGRAC 界面变得更加密实^[26], 而硅灰掺量为 15wt% 时, 会在 SFRGRAC 内产生团聚现象, 团聚后的 SFRGRAC 内部产生更多的弱界面, 降低了硅灰的改性效果。

图 9 为硅灰掺量为 0wt%、10wt% 和 15wt% 时 SFRGRAC 养护 28 d 的 XRD 图谱。可以看出, 掺入 10wt% 硅灰比未掺硅灰试件氢氧化钙 (C-H) 的相对强度略有下降, 而 C-S-H 的相对强度有所提升。这是由于硅灰具有较高活性, 更容易通过 C-H 反应生成 C-S-H 凝胶, 从而在宏观上提升力学性能^[18]。然而, 硅灰掺量达到 15wt% 时, 过量硅灰降低了基体的碱度, 导致地聚物水化反应不完全, 基体内 C-S-H 凝胶数量减少, 因此硅灰掺量 15wt% 样品中方解石相的特征峰强度增加。

根据前人研究成果, Si/Al 比决定胶凝材料的水化程度, 且 Si/Al 比在 1~3 之间会促进聚合反应发生^[12]。硅灰的主要作用是提供 Si²⁺以生成 C-S-H 凝胶。因此, 当硅灰掺量低于 10wt% 时, 由于 Si/Al 比合适, C-S-H 凝胶产量增加, 进而填充混凝土基体的微孔隙及弱界面, 从而提高了 SFRGRAC 力学性能; 当硅灰掺量达到 15wt%, 产生的 SiO₃²⁺和 H⁺会降低激发剂碱度, 导致 SFRGRAC 中聚合反应迟滞, 进而影响水化凝胶的形成, 其水化方程式如下:

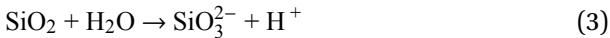
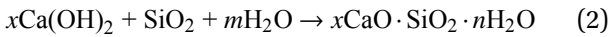
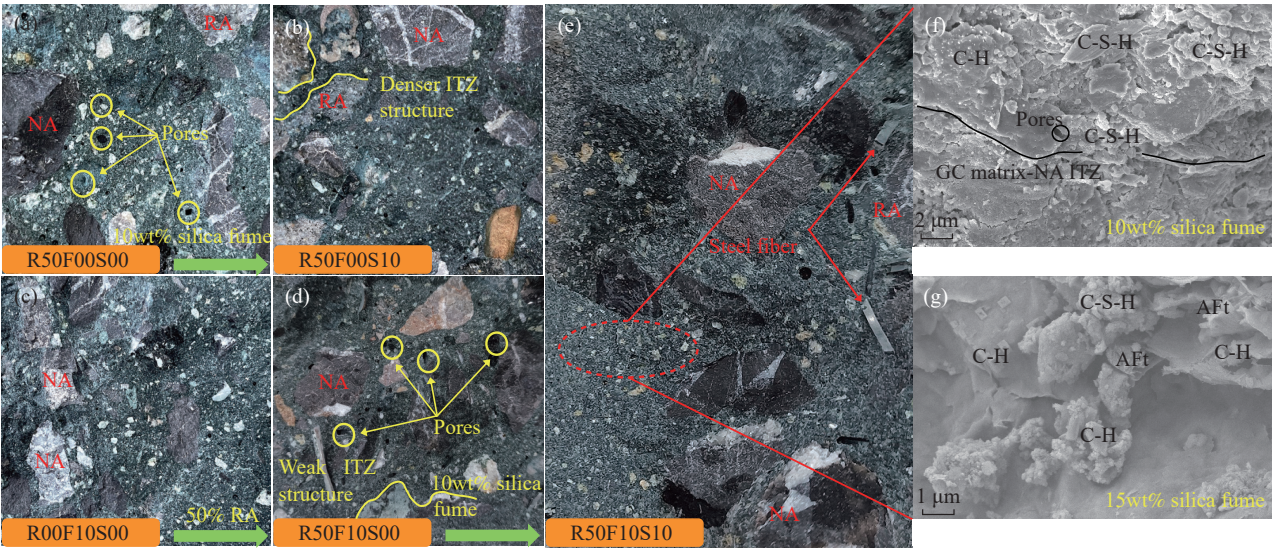


图 10 为不同硅灰掺量下 SFRGRAC 试样的孔隙结构, 不同孔隙尺寸下的孔隙度统计于表 4。吴中伟院士研究结果表明^[25]: 混凝土中的孔可分为小于 20 nm 的无害孔级、20~50 nm 的少害孔级、50~200 nm 的有害孔级和 >200 nm 的多害孔 4 类。其中, 直径小于 0.04 μm 的孔洞较多, 占到了整体孔洞数量的 77.64%, 这是由于小孔洞是由未完全水化产物以及气孔组成的, 对混凝土强度和粘结性能影响很小; 而中孔洞和大孔洞是试件在制作过程中夹杂的一些杂质组成, 其不能被水化产物填充, 并且大孔洞会随着混凝土的收缩进一步扩大。掺入 10wt% 硅灰后, SFRGRAC 在 28 d 的小孔洞较于未掺硅灰组降低了 10.39%, 这是由于矿渣和硅灰在碱激发剂溶液中快速水化, 产生大量 OH⁻, 消耗 SiO₂ 和 Ca²⁺生成大量凝胶, 填充了微



ITZ—Interfacial transition zone; GC—Geopolymer concrete; C-S-H—Calcium-silicate-hydrate; C-H—Calcium hydroxide; AFt—Aluminum trisulfate

图 8 SFRGRAC 的破坏形态

Fig. 8 Typical failure surfaces of SFRGRAC

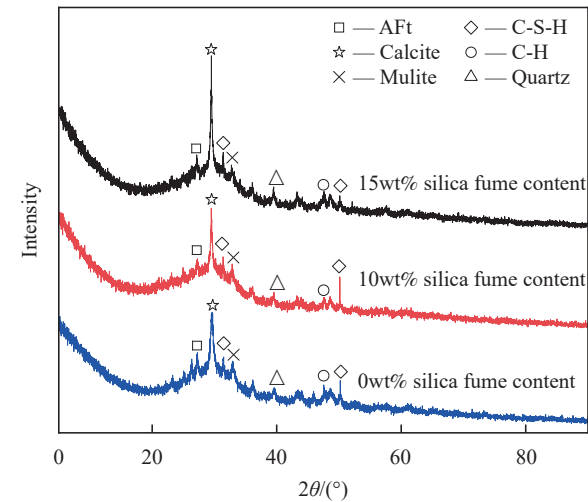


图 9 不同硅灰含量 SFRGRAC 的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of SFRGRAC with different contents of silica fume

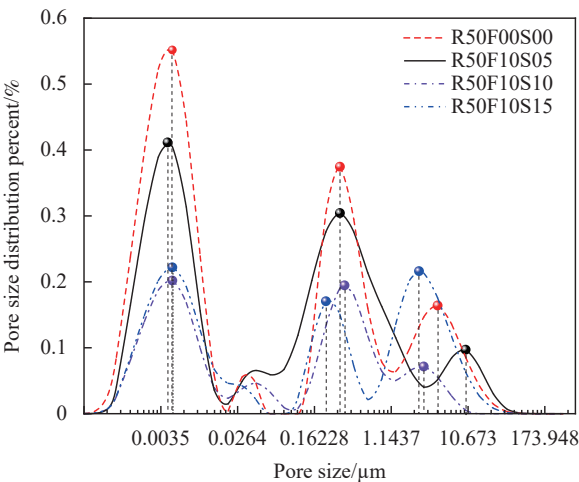


图 10 SFRGRAC 孔隙分布

Fig. 10 Pore size distributions of SFRGRAC

表 4 混凝土基质中孔隙率的总体积分数

Table 4 Total volume fraction of porosity in the concrete matrix

Specimen	Curing age/d	Small pores (<4 μm)	Medium pores (4-6 μm)	Large pores (≥10 μm)	Total
R50F10S00	3	3.15	0.29	0.61	4.05
	28	2.31	0.08	0.94	3.32
R50F10S05	3	3.06	0.12	0.72	3.91
	28	2.11	0.06	0.61	2.78
R50F10S10	3	3.13	0.061	0.86	4.06
	28	2.07	0.08	0.37	2.53
R50F10S15	3	4.01	0.38	0.80	5.19
	28	2.71	0.12	0.88	3.71

孔洞和空隙，从而减少了孔隙的尺寸和数量，但硅灰掺量为 15wt% 时，SFRGRAC 孔隙率较 10wt% 硅灰组增加了 26.79%。由图可以看出，随着硅灰

掺量从 0wt% 增至 10wt%，SFRGRAC 总孔隙率降低了 23.79%，尤其是大孔洞降了 60.64%，这主要归功于掺入硅灰改善了试件的力学性能。随着硅

灰掺量达到 15wt%，中、大孔洞数量增多，这是由于过量硅灰延缓水化产物生成，一些未被凝胶填充的孔洞容易夹杂其他杂质而生成无法被填充的大孔洞^[27]。

图 11 为试件总孔隙率与抗压、抗拉、抗折强度和弹性模量的关系，可以看出，试件总孔隙率与力学强度和弹性模量线性相关，即 SFRGRAC 力学强度和弹性模量随着孔隙率的增大而降低。因此，掺入硅灰可有效改善 SFRGRAC 的力学性能。

图 12 为 SFRGRAC 基体界面过渡区 SEM 图像和骨料界面示意图。从图 12(a) 可以看出，未掺入硅灰的 GRAC 界面过渡区较为疏松，其表面有

许多孔洞，骨料与基体间的空隙较大。掺入硅灰后，硅灰填充在骨料与基体间孔隙中，改善了骨料与基体界面，使混凝土界面变得更平整光滑，孔洞数量也大幅减少，硅灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水化反应生成的凝胶填补了混凝土孔隙，使粗骨料-基体界面过渡区变得密实和紧凑。从图 12(c) 看出，钢纤维周围由硅灰水化反应生成的 C-S-H、C-H 和 AFt 包裹，混凝土表面孔洞和 ITZ 尺寸明显减少，使混凝土结构变得更加致密，同时由于矿渣和硅灰在激发剂作用下迅速水化，在混凝土内部发生反应生成水化铝酸钙、水化硅酸钙等产物，这些水化产物附着在钢纤维表面，并与钢纤维紧密结合，

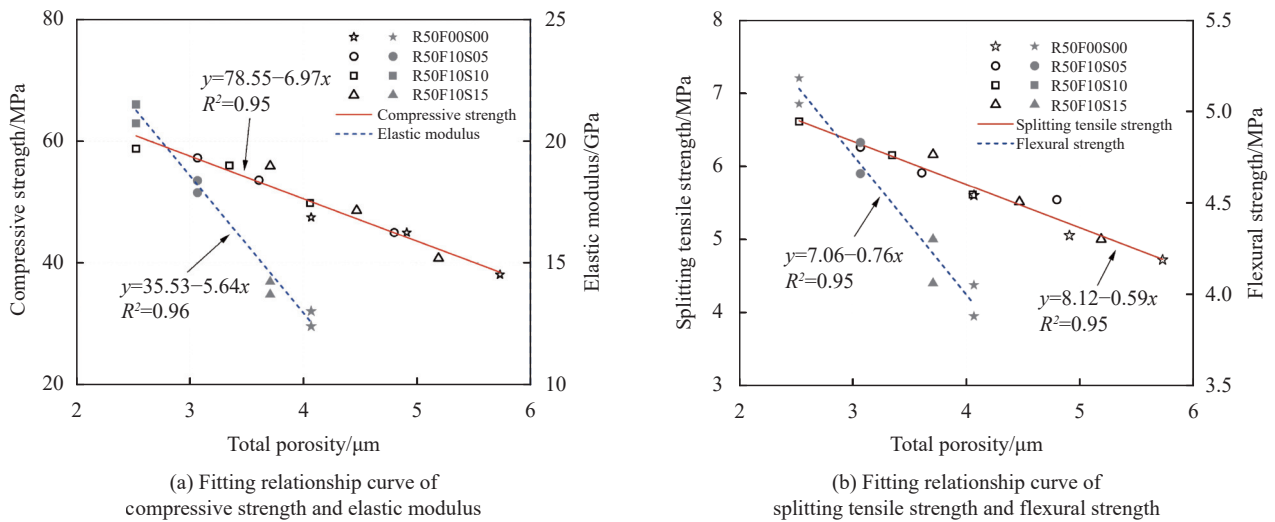


图 11 SFRGRAC 孔隙率与力学性能关系

Fig. 11 Fitting relationship curves of porosity and mechanical characteristics of SFRGRAC

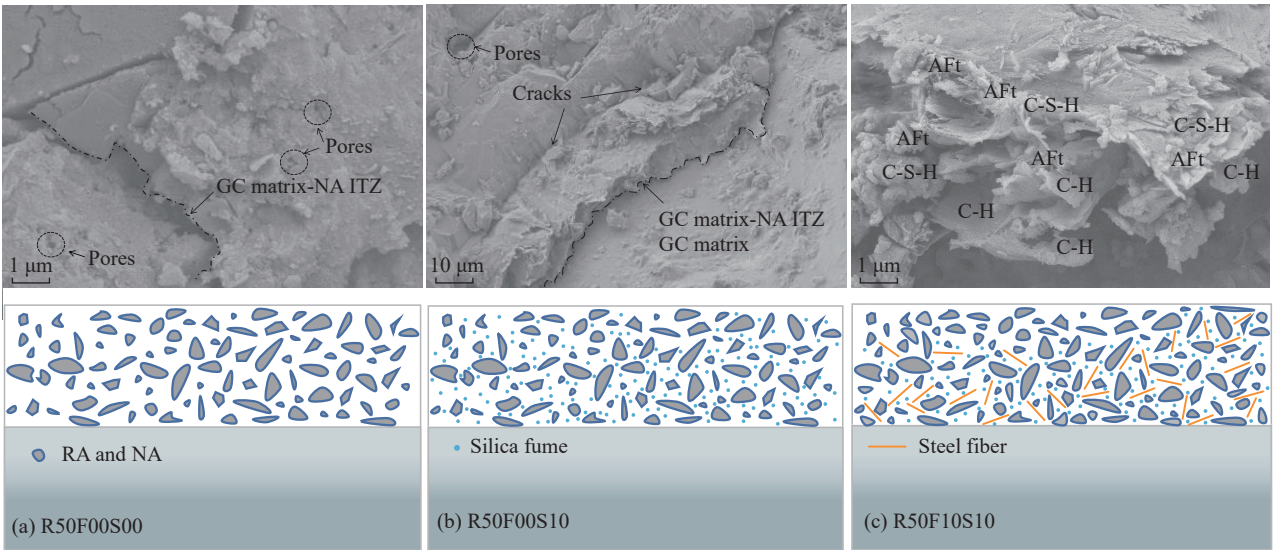


图 12 硅灰改性 SFRGRAC 微观机制

Fig. 12 Microscopic mechanism of silica fume modified SFRGRAC

这些胶凝材料与钢纤维结合一方面可以起到分散剂的作用,避免钢纤维团聚,可以充分发挥纤维的性能,另一方面它们之间的结合抵抗了试件破坏时钢纤维被拔出的能量,极限荷载增加,并且提高了试件的延展性。

4 结论

(1) 硅灰对钢纤维增强地聚物再生混凝土(SFRGRAC)的改性效果明显优于地聚物再生混凝土(GRAC)。添加 5wt%~15wt% 硅灰后, GRAC 的强度提升幅度为 7% 左右,而 SFRGRAC 强度提高幅度可到 20% 以上;掺入 10wt% 硅灰后,随着钢纤维体积掺量由 0.5vol% 增至 1.5vol%, SFRGRAC 的立方体抗压、劈裂抗拉和抗折强度分别增加了 18.52%、10.59% 和 25.35%。

(2) 硅灰加入可有效弥补掺入钢纤维后的粘结界面弱化效应对 GRAC 强度的负面影响。硅灰掺量为 10wt% 时, SFRGRAC 立方体抗压、劈裂抗拉、抗折强度和弹性模量分别比未掺硅灰试件增加了 8.72%、34.62%、20.47% 和 62.53%。

(3) 硅灰的填充和火山灰效应有效改善了 SFRGRAC 的微观结构。掺入 10wt% 硅灰时降低了浆体中氢氧化钙(C-H)含量并提高了水化硅酸钙(C-S-H)含量,密实了混凝土基体和骨料基体界面过渡区(ITZ)的微观结构。然而,当硅灰掺量增至 15wt% 时,由于胶凝材料水化不足,导致方解石体积增大及 C-S-H 凝胶体积减少,从而减弱了 SFRGRAC 基体的密实程度。硅灰掺量由 0wt% 增至 15wt%,初凝和终凝时间分别提高了 29.68% 和 22.98%。

(4) 硅灰的加入能有效降低 SFRGRAC 的孔隙率。添加 10wt% 硅灰后, SFRGRAC 总孔隙率降低 23.79%,而硅灰掺量为 15wt% 时,试件总孔隙率降低幅度明显减小。试件抗压、劈拉和抗折强度和弹性模量均随着孔隙率增大而线性降低。

参考文献:

- [1] SABAU M, BOMPA D, SILVA L, et al. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(6): 101235.
- [2] 李桂彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2004(4): 390-395.
- LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, SUN Zhenping. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled

- concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2004(4): 390-395(in Chinese).
- [3] XIE J H, CHEN W, WANG J J, et al. Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physico-chemical properties of geopolymer concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 345-359.
- [4] 丁兆洋,周静海,苏群,等.地聚物再生骨料混凝土的力学性能研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(1): 138-146.
- DING Zhaoyang, ZHOU Jinghai, SU Qun, et al. Mechanical properties of geopolymer recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2021, 37(1): 138-146(in Chinese).
- [5] 龙涛,石膏爽,王清远,等.粉煤灰基地聚物再生混凝土的力学性能和微观结构[J]. *工程科学与技术*, 2013, 45(S1): 43-47.
- LONG Tao, SHI Xiaoshuang, WANG Qingyuan, et al. Mechanical properties and microstructure of fly ash based geopolymeric polymer recycled concrete[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2013, 45(S1): 43-47(in Chinese).
- [6] ZHANG P, WANG J, LI Q F, et al. Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28(1): 299-313.
- [7] ZHENG J H, QI L, ZHENG Y Q, et al. Mechanical properties and compressive constitutive model of steel fiber-reinforced geopolymer concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 80: 108161.
- [8] ZHAO Q H, WANG Y Q, XIE M, et al. Experimental study on mechanical behavior of steel fiber reinforced geopolymeric recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129267.
- [9] XU Z, HUANG Z P, LIU C J, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructures of steel fiber-reinforced fly ash-metakaolin geopolymer-recycled concrete[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2021, 60(1): 578-590.
- [10] OKOYE F, DURGAPRASAD J, SINGH N. Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(2): 3000-3006.
- [11] LIU Y W, SHI C J, ZHANG Z H, et al. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 112: 103665.
- [12] LI B, GAO A X, LI Y, et al. Effect of silica fume content on the mechanical strengths, compressive stress-strain behavior and microstructures of geopolymeric recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 384: 131417.

[13] 马维, 何兆益. 碱激发矿渣粉煤灰地质聚合物力学性能改性及其混凝土性能 [J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 182-189.
MA Wei, HE Zhaoyi. Mechanical properties modification of alkali-activated slag fly ash based geopolymer and its concrete properties [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 182-189(in Chinese).

[14] 夏冬桃, 吴晨, 崔凯, 等. 粉煤灰和硅灰取代率对碱矿渣混凝土力学性能影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 1113-1122.
XIA Dongtao, WU Chen, CUI Kai, et al. Effect of fly ash and silica fume contents on the mechanical properties of alkali-activated slag-based concrete [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 1113-1122(in Chinese).

[15] 中国国家标准化管理委员会. 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.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese).

[16] 中国国家标准化管理委员会. 再生混凝土结构技术标准: JGJ/T 443—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical standard for recycled concrete structures: JGJ/T 443—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018(in Chinese).

[17] LI B, WU C, WANG S N, et al. Monotonic and cyclic compressive behavior of ultra-high performance concrete with coarse aggregate: Experimental investigation and constitutive model [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106002.

[18] LI B, WANG C L, YU S T, et al. Effect of recycled aggregate and steel fiber contents on the mechanical properties and sustainability aspects of alkali-activated slag-based concrete [J]. Structures, 2023, 66: 105939.

[19] 中国国家标准化管理委员会. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).

[20] 中国国家标准化管理委员会. 普通混凝土拌和性能标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016(in Chinese).

[21] WAN Q, ZHANG Y M, ZHANG R B. The effect of pore behavior and gel structure on the mechanical property at different initial water content [J]. Construction and Building Materials, 2021, 309: 125146.

[22] BAI W F, LU X F, GUAN J F, et al. Experimental study on uniaxial compression mechanical properties of recycled concrete with silica fume considering the effect of curing age [J]. Construction and Building Materials, 2022, 350: 128758.

[23] SASANIPOUR H, ASLANI F, TAHERINEZHAD J. Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116598.

[24] 张雄, 张恒, 张晓乐, 等. 硅灰调控混凝土力学性能的关键界面参数研究. 建筑材料学报 [J]. 2019, 22(4): 626-631.
ZHANG Xiong, ZHANG Heng, ZHANG Xiaole, et al. Key interface parameters for the control of silica fume on mechanical properties of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 626-631(in Chinese).

[25] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74-84.
HUANG Hua, GUO Mengxue, ZHANG Wei, et al. Mechanical property and microstructure of geopolymer concrete based on fly ash and slag [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(3): 74-84(in Chinese).

[26] ZHU L, NING Q, HAN W, et al. Compressive strength and microstructural analysis of recycled coarse aggregate concrete treated with silica fume [J]. Construction and Building Materials, 2022, 334: 127453.

[27] 吴中伟. 混凝土科学技术近期发展方向的探讨 [J]. 硅酸盐学报, 1979(3): 262-270.
WU Zhongwei. An approach to the recent trends of concrete science and technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1979(3): 262-270(in Chinese).