



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309514

引用格式:肖湘,龙泓屹,唐润东. SiO₂-PVA 纤维复合改性再生混凝土力学性能[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(2): 753-762.

Xiao Xiang, Long Hongyi, Tang Rundong. Mechanical properties of SiO₂-PVA fiber composite reinforced recycled concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 753-762.

SiO₂-PVA 纤维复合改性再生混凝土力学性能

肖湘^{1,2}, 龙泓屹¹, 唐润东²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530000; 2. 南宁学院土木与建筑工程学院, 南宁 530000)

摘要 随着复合材料理念的发展,为进一步探究纳米 SiO₂ (Nano-SiO₂, NS) 改性再生粗骨料与聚乙烯醇纤维 (polyvinyl alcohol, PVA) 耦合作用下复合改性再生混凝土力学性能,开展了坍落度、立方体抗压、轴心抗压、劈裂抗拉和抗折试验,研究了不同取代率下改性再生粗骨料混凝土随聚 PVA 纤维掺量增加的工作性能和力学性能变化规律。结果表明:随着纤维体积掺量增加,混凝土坍落度增大;混凝土破坏呈脆性,掺纤维的再生混凝土的破坏形态整体性更好;纤维体积掺量为 0.05 vol% 和 0.10 vol% 时,不同再生取代率下的立方体抗压强度、极限承载力、劈裂抗拉强度、抗折强度和静弹性模量都会有所减小,但在纤维体积掺量为 0.15 vol% 时,所有强度会反而超过且提高;PVA 纤维会减小抗压极限承载力,对峰值应变出现不同正负效果,建议添加 PVA 纤维体积掺量为 0.1 vol%, 如需添加 PVA 纤维,建议在再生取代率低于 30 wt% 使用。另外发现,改性再生粗骨料性能良好,可有效替代天然骨料或与天然骨料混合在实际工程中使用。

关键词 再生混凝土; 纳米 SiO₂; PVA 纤维; 工作性能; 力学性能; 复合改性

中图分类号 TU528.041; **文献标志码** A

Mechanical Properties of SiO₂-PVA Fiber Composite Reinforced Recycled Concrete

XIAO Xiang^{1,2}, LONG Hong-yi¹, TANG Run-dong²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Nanning University, Nanning 530000, China)

[Abstract] With the development of the concept of composite materials, in order to further explore the mechanical properties of composite modified recycled concrete under the coupling effect of NS (nano-SiO₂) modified recycled coarse aggregate and PVA (polyvinyl alcohol) fibers, slump, cubic compression, axial compression, splitting tensile and flexural tests were carried out to study the working performance and mechanical performance changes of modified recycled coarse aggregate concrete with increasing PVA fiber content under different substitution rates. The results show that the slump of concrete increases with the increase of fiber volume. The damage of concrete is brittle, and the damage pattern of recycled concrete mixed with fiber is better. When the fiber volume content is 0.05 vol% and 0.10 vol%, the cubic compressive strength, ultimate bearing capacity, splitting tensile strength, folding strength and static elastic modulus will decrease under different regeneration and replacement rates, but all the strengths will exceed and increase when the fiber volume content is 0.15 vol%. PVA fiber will reduce the ultimate compressive bearing capacity and have different positive and negative effects on the peak strain. It is recommended to add PVA fiber with a volume content of 0.1 vol%. If PVA fiber is needed, it is recommended to use it when the regeneration and replacement rate is less than 30 wt%. In addition, it is found that the modified reclaimed coarse aggregate has good performance and can effectively replace natural aggregate or be mixed with natural aggregate in practical engineering.

[Keywords] recycled concrete; nano-SiO₂; PVA fiber; working performance; mechanical properties; composite modified

将废弃混凝土进行回收、处理后,将其运用于替代天然骨料生产再生混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC), 对保护环境和推动社会经济可持续发展有着积极的效益^[1-2]。但再生粗骨料 (recycled

coarse aggregate, RCA) 由于破碎造成内部结构损伤,存在较多的裂缝和旧砂浆,导致再生粗骨料的物理性能普遍低于天然粗骨料,再生骨料混凝土的力学性能和耐久性也普遍低于天然骨料混凝土,限制了

收稿日期: 2023-12-03; 修订日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (52078370); 广西自然科学基金青年科学基金 (2023GXNSFBA026135)

第一作者: 肖湘 (1964—), 男, 瑶族, 广西柳州人, 硕士, 教授, 教授级高级工程师。研究方向: 混凝土结构。E-mail: 1297257100@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

再生骨料混凝土的现实推广和应用^[3-4]。

纳米 SiO₂ (nano-SiO₂, NS) 具有火山灰活性, 能反应生成水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶, 同时有成核效应能够促进水泥的水化, 利用 NS 对再生粗骨料浸泡达到涂覆效果, 可以有效改善 RCA 的缺陷^[5-8]。Singh 等^[9] 研究发现 RCA 浸泡在 NS 的胶体溶液中, RCA 吸水率下降 21%。Zeng 等^[10] 研究表明 RCA 在 NS 胶体溶液浸泡后, RCA 表面显微硬度从 42.82 HV 增加到 54.12 HV。Shaikh 等^[11] 研究表明 RCA 通过 NS 浸泡比 NS 直接混合搅拌有更明显的孔细化效果, RCA 的孔隙率降低 45.3%。Meng 等^[12] 研究发现预浸泡期间 NS 的渗透使附着在 RCA 表面的旧砂浆致密化, 从而增强了 RCA 性能。Li 等^[13] 研究表明, 通过用 NS 浸泡来预处理 RCA 也有效地增强 RAC 的抗压强度。同时, PVA 纤维具有高强度、高模量、遇水分散性好等优点, 已有研究表明, 在水泥基材料掺入 PVA 纤维能够提高力学性能和耐久度^[14-16], 能提高 RAC 的劈裂抗拉性能、抗折性能和冲击性能, 但其抗压性能有所降低^[17-19]。

通过分别单掺 NS 改性再生骨料 (NS-RCA) 或 PVA 纤维可以有效改善 RAC 的力学性能, 其相关研究也较成熟, 而随着复合材料理念的发展, 目前对这两种材料复掺改性对 RAC 力学性能影响方面的研究较少。为进一步探究 NS-RCA 与 PVA 纤维耦合作用下复合改性再生混凝土的力学性能, 现设计 16 组复合改性再生混凝土试件, 通过试验记录破坏过程, 研究不同 NS-RCA 再生取代率和 PVA 纤维体积掺量对其静力学性能的影响规律, 以期该类复合改性再生混凝土的深入研究和应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料及其性能

纳米 SiO₂ 胶体溶液来自上海某化工科技有限公司, 胶体的外观形态如图 1 所示, 物理性能指标如表 1 所示。PVA 纤维来自上海某化工科技有限公司, 外观形态如图 2 所示, 纤维的物理性能指标如表 2 所示。细骨料采用机制砂, 依照《建设用砂》(GB/T 14684—2022)^[20] 实测细度模数为 2.9, 属于中砂; 天然粗骨料采用本地花岗岩碎石, 再生粗骨料购买于南宁市某建筑垃圾破碎循环利用基地, 外观形态如图 3 所示, 依照《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)^[21] 实测物理指标如表 3 所示, 各组物理指标已按均值处理。试验采用海螺牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 拌养用水采用自来水。



图 1 纳米 SiO₂ 胶体溶液

Fig. 1 Nano-SiO₂ colloidal solution

表 1 纳米 SiO₂ 胶体溶液物理性能

Table 1 Physical properties of nano-SiO₂ colloidal solution

外观	粒径/mm	二氧化硅含量/%	pH
透明液体	10	30	9 ~ 11



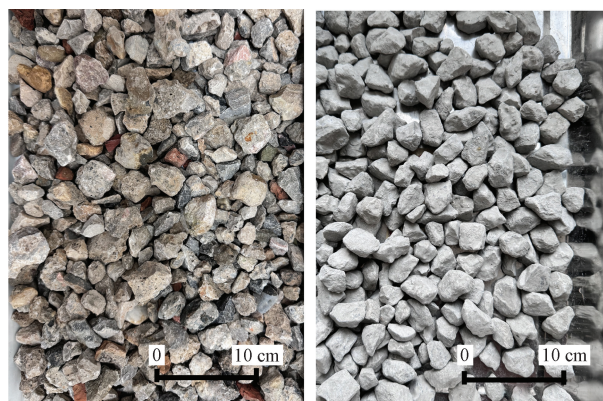
图 2 聚乙烯醇纤维

Fig. 2 Polyvinylalcohol fiber

表 2 PVA 纤维物理性能

Table 2 Physical properties of PVA fibers

长度/ mm	直径/ μm	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
9	16	1.29	1 810	11.5



(a) RCA (b) NS-RCA

图 3 粗骨料

Fig. 3 Coarse aggregate

1.2 试验制备与试验方法

将纳米 SiO₂ 胶体溶液稀释为 0.5 wt% 溶液,浸泡再生粗骨料 24 h 后自然晾干,再与水灰比 0.5 的水泥净浆混合搅拌 3 min 后捞出,自然养护晾干,以此获取 NS-RCA,其物理指标如表 3 所示,各组物理指标已按均值处理。

试验设计 NS-RCA 取代率为 0wt%、30wt%、70wt% 和 100wt%, PVA 纤维掺量为 0vol%、0.05vol%、0.1vol%、0.15vol%。复合改性混凝土配合比如表 4 所示,试件测试品类如表 5 所示。混凝土配置采用 HJW-60 型搅拌机,每组试件同一批次配置,为保证纤维在混凝土中的均匀分散,采用预先干拌法^[2],具体制备流程如图 4 所示,所有试件

都进行同环境条件下 28 d 自然养护。试件制作与试验方法均依照规范《混凝土物理力学性能试验方法》(GB/T 50081—2019)^[22] 的相关规定进行,静力性能加载装置均采用 RMT-301 岩石与混凝土力学试验机,试验加载装置如图 5 所示。

2 坍落度试验结果和分析

混凝土拌合物的坍落度是衡量其流动性的重要指标^[23],依照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)^[24] 分别对 16 组混凝土拌合物进行了测试,试验如图 6 所示,坍落度试验结果变化如图 7 所示,由图 7 可知:在纤维体积掺量相同时,随着取代率的提高,坍落度有所减小,这主要原

表 3 粗细骨料的性能指标

Table 3 Performance indexes of aggregate

种类	级配/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	松散堆积密度/(kg·m ⁻³)	空隙率/%	吸水率/%	压碎值/%
机制砂	0.00 ~ 4.75	2 714	1 584	41.64	—	—
NCA	4.75 ~ 31.5	2 750	1 787	35	0.42	8.5
RCA	4.75 ~ 31.5	2 646	1 611	39.1	4.85	19.8
NS-RCA	4.75 ~ 31.5	2 611	1 646	36.9	2.37	16.31

表 4 复合强化再生混凝土配合比

Table 4 Mix proportion of concrete

试件编号	水泥/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	粗骨料/(kg·m ⁻³)		PVA 纤维/(kg·m ⁻³)
				NCA	NS-RCA	
R0-0	400	590	200	1 050	0	0
R0-005	400	590	200	1 050	0	0.645
R0-01	400	590	200	1 050	0	1.290
R0-015	400	590	200	1 050	0	1.935
R30-0	400	590	200	315	735	0
R30-005	400	590	200	315	735	0.645
R30-01	400	590	200	315	735	1.290
R30-015	400	590	200	315	735	1.935
R70-0	400	590	200	735	315	0
R70-005	400	590	200	735	315	0.645
R70-01	400	590	200	735	315	1.290
R70-015	400	590	200	735	315	1.935
R100-0	400	590	200	0	1 050	0
R100-005	400	590	200	0	1 050	0.645
R100-01	400	590	200	0	1 050	1.290
R100-015	400	590	200	0	1 050	1.935

注:试件编号 R 代表再生混凝土;R 后面的数字分别代表再生骨料取代率为 0、30%、70% 和 100%;- 后面的数字分别代表 PVA 纤维体积掺量百分率为 0、0.05%、0.1% 和 0.15%。

表 5 试件设计方案

Table 5 Specimen design scheme

试验项目	试件尺寸/(mm × mm × mm)	试件数量
立方体抗压强度	150 × 150 × 150	96
劈裂抗拉强度		
抗拉强度	100 × 100 × 400	48
轴心抗压强度	150 × 150 × 300	96
静弹性模量		

因是 NS-RCA 仍具有较高的吸水率,导致拌合物中自由水减少,流动性减小^[25]。由于配合比是基于再生混凝土进行设计,天然骨料吸水率比再生粗骨料小,所以在相同配合比情况下,R0-0 组的拌合物中自由水较多,造成流动性有所增大。

在取代率相同时,随着纤维体积掺量的增大,坍落度呈下降的趋势,这主要原因是 PVA 纤维表面

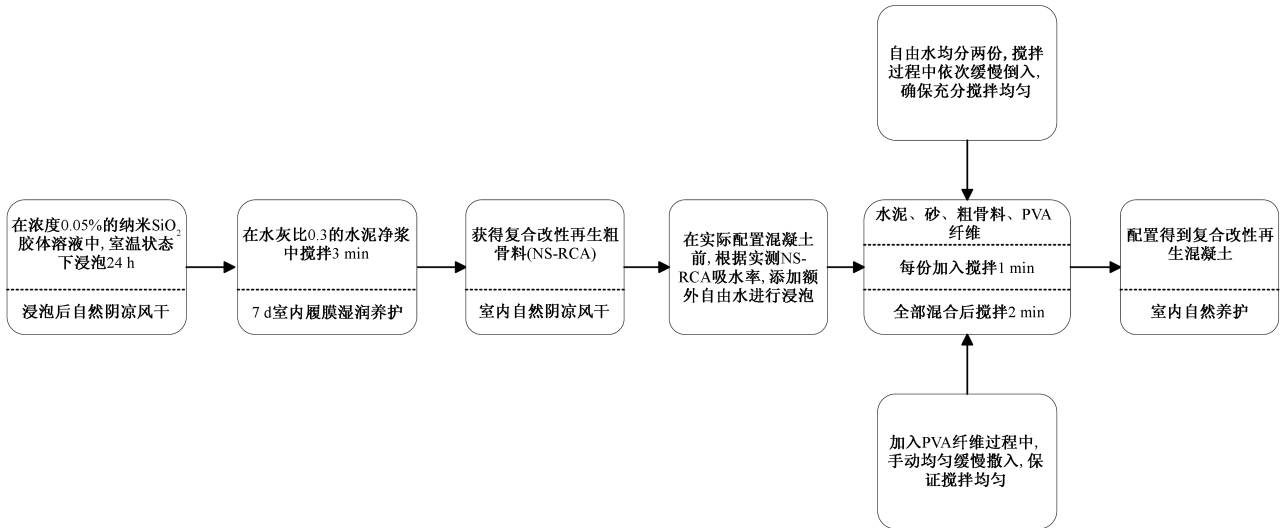


图4 复合改性混凝土制备过程

Fig. 4 Preparation process of composite modified concrete



图5 RMT-301 岩石与混凝土力学试验机

Fig. 5 RMT-301 Rock and concrete mechanics testing machine

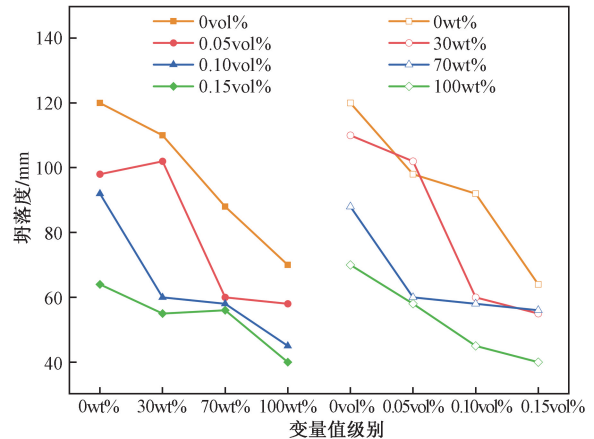


图7 坍落度试验结果对比

Fig. 7 Comparison of slump test results

30 ~ 56 mm。当再生取代率为 30wt% 时, PVA 纤维掺量为 0.15vol% 与 0vol% 相比, 坍落度下降了 50%, 说明在复合改性混凝土掺入 PVA 纤维会增加坍落度降低的不利影响。

3 立方体抗压试验分析

3.1 试验加载现象

图 8 为复合改性再生混凝土立方体抗压试验破坏图, 加载初期, 混凝土表面无明显裂缝产生, 随着荷载的增加, 试件中部开始出现裂缝, 表面伴随起皮剥落, 峰值荷载后试件裂缝斜向延伸, 不掺纤维混凝土试件迅速剥落形成椎体, 试件破碎严重, 而掺纤维混凝土表面裂缝数量较少, 表面剥落较少, 破碎形态相对更完整, 总体而言所有试件破坏表现出明显的脆性破坏。由图 8 可知, PVA 纤维的掺入, 改善了复合改性混凝土的延性, 原因在于 PVA



图6 坍落度测试

Fig. 6 Slump test

积比较大, 当纤维体积掺量增加则与浆体连接占用自由水就越多, 造成在相同配合比下拌合自由水减小^[26-28], 导致混凝土坍落度下降, 同时在搅拌过程发现混凝土的流动性逐渐降低, 建议在施工中少掺入 PVA 纤维。掺纤维会造成坍落度下降, 下降幅度

纤维材料特性,在整体受压过程在混凝土内部承担内应力,在表面发挥桥联联结作用,随着纤维掺量的增大,试件表面裂缝数量减小,至破坏时表面掉落砂浆较少,破坏形态较好。

3.2 结果分析

图9为不同再生取代率和纤维掺量对复合改性混凝土立方体抗压强度的变化,可知,当纤维掺量一定时,随着取代率的增大,抗压强度逐渐减小,幅度在1.68%~23.85%。这是由于NS-RCA改性后虽然表面微裂缝致密化,但仍存在大量老旧砂浆以及老旧砂浆块,本质缺陷仍然无法有效改善,同时由于立方体受压特点,加载过程中会对其发生应力集中,加之新老砂浆黏结强度低,造成复合改性混凝土内部出现多个薄弱区域^[25]。

当再生取代率为0时,掺入纤维总体提高立方体抗压强度,幅度在0.79%~9.14%。在其他再生取代率的情况下,随着纤维掺量的增加,抗压强度先

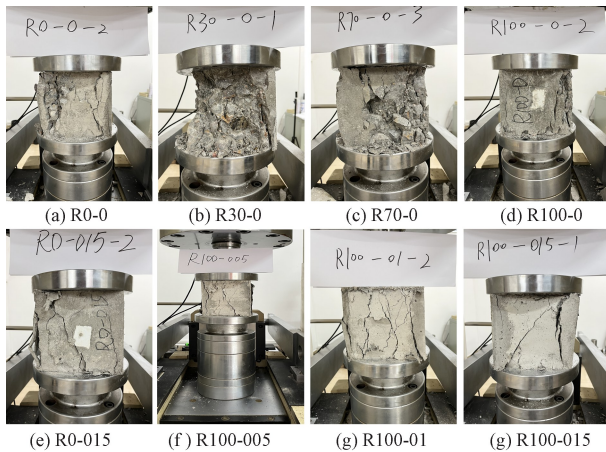


图8 复合改性混凝土立方体抗压试验破坏图

Fig. 8 Failure diagram of composite modified concrete cube compression test

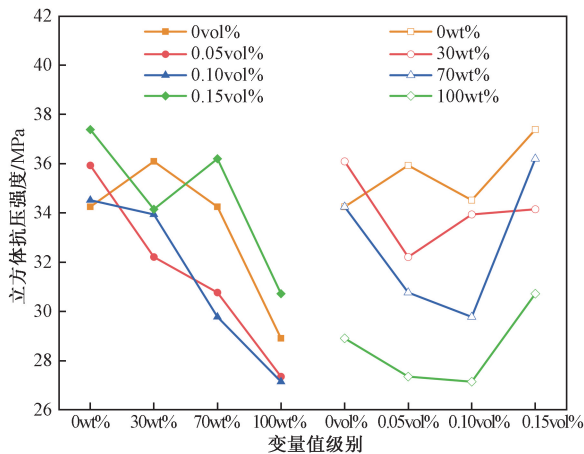


图9 立方体抗压强度

Fig. 9 Cube compressive strength

开始下降后上升反超,当再生取代率为100wt%且纤维体积掺量0.15vol%时,强度反而超过提高6.26%。总体而言PVA纤维对复合改性混凝土的抗压强度影响不超过13.05%。原因在于复合改性混凝土中掺入纤维会增加含气量且难以压实,密实性降低导致抗压强度下降^[29-30]。当复合改性混凝土中PVA纤维掺量达到0.15vol%时,立方体抗压强度提高反超,提高幅度在5.69%~6.26%,这与类似文献^[29]中抗压强度变化趋势相同,这是由于PVA纤维的掺入约束和阻止了裂缝的继续扩展,PVA纤维承担了部分内应力,缓和了裂缝尖端的继续扩展,致使复合改性混凝土抗压强度有所提高^[31]。

说明利用高强度PVA纤维可以有效改善复合改性混凝土抗压强度,建议纤维体积掺量在0.15vol%左右;当纤维体积掺量相同时,建议再生取代率在0wt%左右。

4 轴压强度试验分析

4.1 试验加载现象

图10为复合改性混凝土轴心抗压试验破坏图,可知,加载初期试件无明显裂缝,随着荷载增加至峰值荷载的20%~30%时,表面砂浆层开始出现微小垂直裂缝,伴随小部分起皮剥落,当加载到峰值荷载附近,试件表面出现竖向贯通斜裂缝,这一现象在试件R0-0表现更为突出,内部砂浆层断裂,表面出现大量剥落,破坏形态完整性较差。不掺纤维时,随着再生取代率的增大,试件表面裂缝数量减小,裂缝宽度也逐渐减小,破坏形态完整性提升,说明NS-RCA的加入,提升了整体轴心受压性能。同时,也发现随PVA纤维掺量的增大,复合改性混凝土表面裂缝数量和宽度都减小,当纤维掺量为0.15vol%时,破坏形态完整性最好,由于纤维的阻裂作用,掺纤维试件破坏形态整体表现更好。同时也发现峰值荷载后试件的轴向变形持续增大,说明掺PVA增加复合改性混凝土的延性。

4.2 峰值应力及峰值点应变

通过试验机系统获取棱柱体轴心受压下的应力-应变曲线,具体曲线如图11所示。图12为复合改性混凝土峰值应力随再生取代率和纤维掺量的变化情况。由图11和图12可知,当掺PVA纤维时,随取代率增大,峰值应力减小,幅度在1.02%~22.73%。但在纤维掺入量为0vol%且取代率为30wt%、70wt%和100wt%时的峰值应力,分别比0wt%提高了4.36%、4.20%和0.09%,说明加入NS-RCA能有效提高再生混凝土的峰值应力。原因

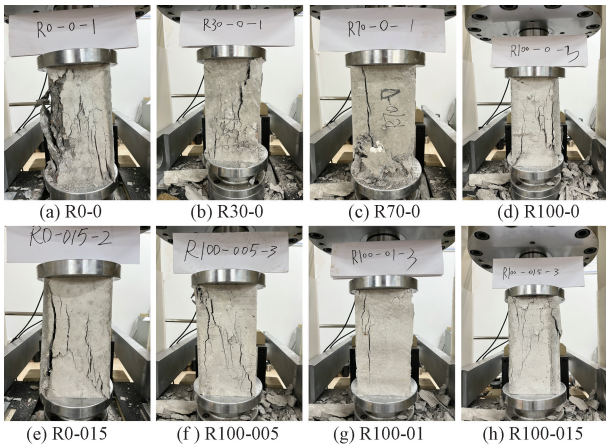


图 10 复合改性混凝土轴心抗压试验破坏图

Fig. 10 Failure diagram of composite modified concrete under axial compression test

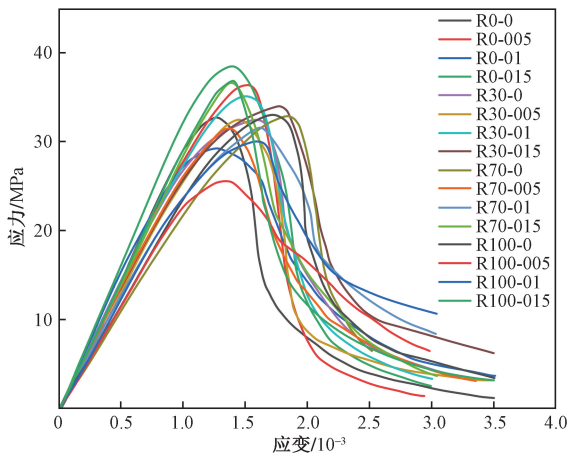


图 11 复合改性混凝土应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of composite modified concrete

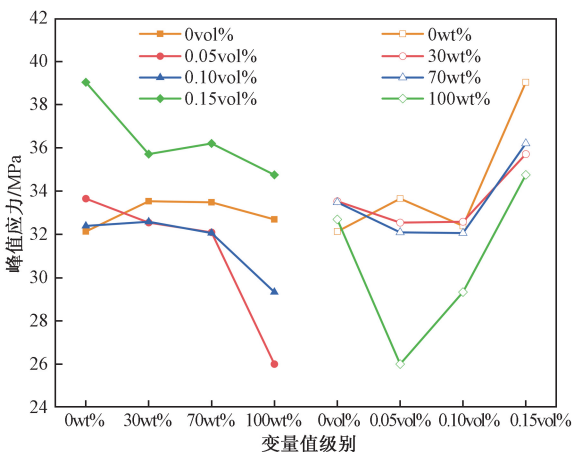


图 12 峰值应力

Fig. 12 Peak stress

在于 RCA 通过 NS 浸泡,反应产生 C-S-H 凝胶对 RCA 微裂缝进行一个致密化填充,同时进行水泥净浆的覆盖,使之 NS 改性效果加强,改善了 RCA 界面

过渡区的性能,使用 NS-RCA 有利于增加再生混凝土密实性,从而增大峰值应力,说明在轴心抗压情况下,NS-RCA 可以有效替代 NCA 或与 NCA 混合使用达到相同的配合比强度。

再生取代率为 0wt% 时,PVA 纤维对复合改性混凝土峰值应力均产生正面效果,当 PVA 纤维掺量 0.15vol% 时,峰值应力提高 21.47%;在其他取代率情况下,掺 PVA 纤维对单轴受压的峰值应力总体是先减小后增大,在纤维体积掺入量为 0.15vol% 时,峰值应力反而超过提高,提高幅度在 3.11% ~ 8.05%。原因在于 PVA 纤维的均匀分布,可以在复合改性混凝土内部形成三维网格结构,约束和阻止了裂缝的继续扩展,纤维承担了部分内应力,与 NS-RCA 共同增强整体的力学效果^[32]。

综上所述,该方法改性骨料有效,NS-RCA 对于提高试件的轴心抗压强度有利,掺入 PVA 纤维会降低峰值应力,但在相同再生取代率时,掺入 0.15vol% PVA 纤维可以增大峰值应力。

图 13 为复合改性混凝土峰值应变随再生取代率和纤维掺量的变化情况,可知,不同再生取代率时,掺 PVA 纤维对单轴受压的峰值应变影响显著;当再生取代率为 0wt% 时,随着 PVA 纤维体积掺量的增大,峰值应力点应变呈先增大后减小再增大的变化趋势,变化幅度在 -9.03% ~ 33.57%;不同再生取代率时,纤维体积掺量为 0.15vol% 与 0vol% 之间的峰值应变变化幅度在 -7.6% ~ 29.24%。

不掺入纤维时,再生取代率增大,峰值应变也增大,当取代率为 70wt% 时,峰值应变增加最大,为 23.47%;掺入纤维出现不同正负面效果,纤维体积掺量为 0.1vol% 时,峰值应变随着取代率的增大而增大,增大幅度为 15.87% ~ 27.87%;纤维体积掺量为 0.05vol% 和 0.15vol% 对复合改性混凝土峰值应变均产生负面效果。原因可能为:一方面 PVA 纤维掺入会引起混凝土含气量增大,降低了混凝土密实度,增大峰值应变;另一方面 PVA 纤维发生形变后,可以承担一部分应力,提高混凝土的强度和韧性,减小峰值应变^[33]。

综上所述,掺 PVA 纤维可以延缓复合改性再生混凝土的压缩变形,减小抗压极限承载力,PVA 纤维对峰值应变出现不同正负效果,建议添加 PVA 纤维体积掺量为 0.1vol%;如需添加 PVA 纤维,建议在取代率低于 30wt% 使用。

4.3 静弹性模量

图 14 展示了再生取代率和纤维掺量对复合改性再生混凝土的弹性模量的影响,可知,纤维掺量为 0vol% 时,随着再生取代率增大,弹性模量减小,

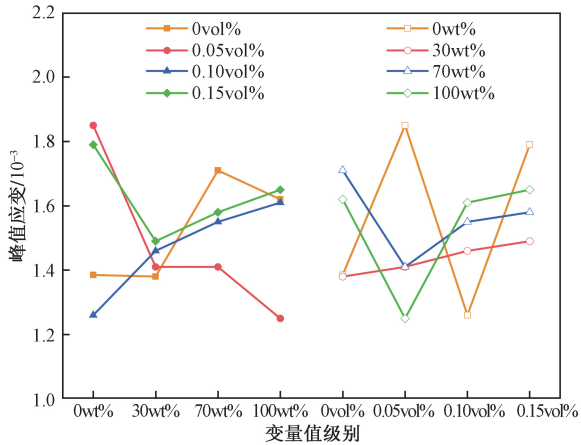


图 13 峰值应变
Fig. 13 Peak strain

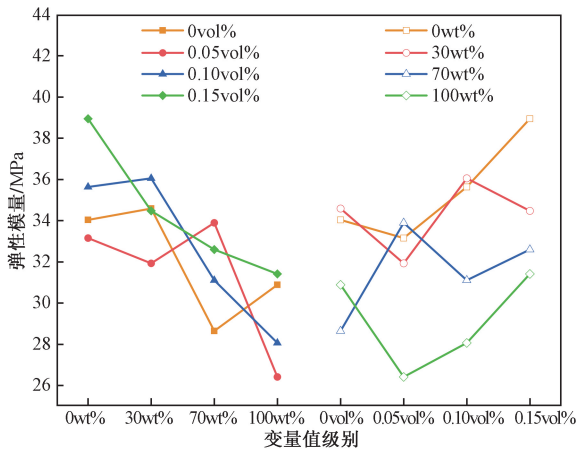


图 14 静弹性模量试验结果
Fig. 14 Static elastic modulus test results

在不同纤维掺入量下出现相同的结果,再生取代率对静压弹性模量影响不超过 21.02%;在相同取代率时,随着纤维掺量的增大,弹性模量先减小后增大,变化幅度在 -14.53% ~ 18.32%。根据试验数据来看,增大再生取代率,会减小静弹性模量,随着增大纤维用量,其正负效应耦合,呈现当纤维掺量为 0.15vol% 时试件的静弹性模量反而超过且提高,提高幅度在 1.65% ~ 14.42%。究其原因复合改性混凝土内部界面过渡区就比较薄弱,当掺入 PVA 纤维,其通过桥接作用增强混凝土整体性,且 PVA 纤维掺量越高,对混凝土整体性提高的效果越好,从而弥补取代率增大对混凝土静弹性模量的负面作用^[34]。

5 劈裂抗拉试验分析

5.1 试验破坏特征

图 15 为复合改性混凝土劈裂抗拉试验破坏图,可知,试件沿着中心线上骨料与水泥砂浆界面过渡

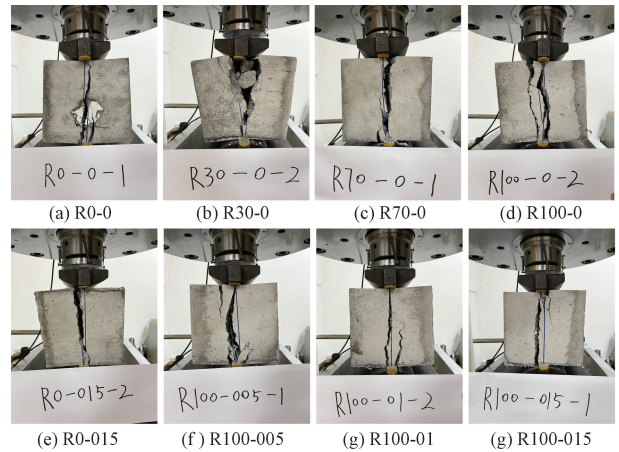


图 15 复合改性混凝土劈裂抗拉试验破坏图
Fig. 15 Failure diagram of composite modified concrete splitting tensile test

区劈裂成两块,不掺 PVA 纤维试件破坏形态更差且裂缝数量更多,总体所有试件呈明显的脆性破坏,试件劈裂后,可在断裂面发现许多 PVA 纤维。在试验加载过程中,可以听到骨料破碎的声音。产生这种现象主要是 NS-RCA 强度低,在试件受力过程中,无法承受压力快速破碎。

5.2 结果分析

图 16 为试件劈裂抗拉强度随取代率和纤维掺入量的变化。由图 16 可知,不掺纤维时,随着取代率增大,劈裂抗拉强度增大,说明该骨料可有效增大混凝土劈裂抗拉强度,但纤维的掺入,反而会降低劈裂抗拉强度,呈整体下降趋势,下降幅度在 0.3% ~ 30.54%,且当 PVA 纤维掺量为 0.1vol% 且取代率为 100wt% 时强度减小最大,为 30.54%。

在相同取代率时且纤维掺量为 0.15vol% 时,劈裂抗拉强度增大,增大幅度在 4.98% ~ 27.63%。PVA 纤维的极限延伸率远大于水泥基材料,能够吸收基材开裂释放的能量,从而提高劈裂抗拉强度^[35]。PVA 纤维掺入会降低混凝土密实性,进而降低劈拉强度,但掺量增大时,纤维承担了部分内应力,缓和了裂缝尖端应力集中,进而提升劈拉强度,劈裂抗拉强度最优 PVA 纤维掺量为 0.15vol%。

6 抗折强度试验分析

6.1 试验破坏特征

图 17 为复合改性再生混凝土抗折试验破坏形态图,在受压弹性阶段,跨中出现竖向微小裂纹,当荷载超过峰值后,微裂缝迅速发展,形成贯彻上下竖向裂缝,最终裂缝只有一条,在裂缝处仔细观察到许多 PVA 纤维被拔出,所有试件破坏呈脆性破坏,是典型的剪切破坏。

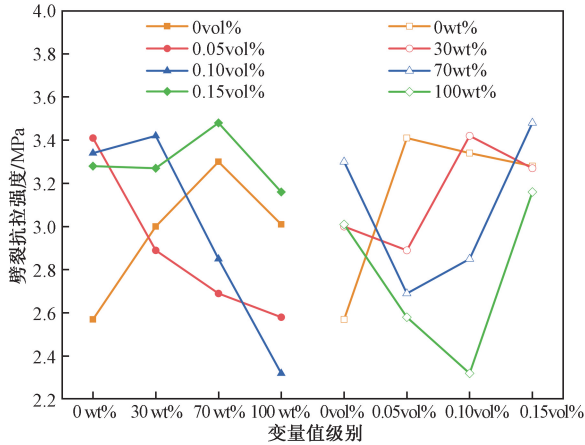


图 16 劈裂抗拉强度

Fig. 16 Splitting tensile strength

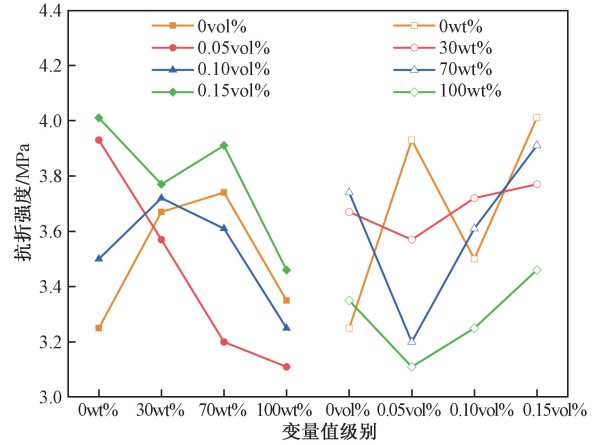


图 18 抗折强度

Fig. 18 Flexural strength

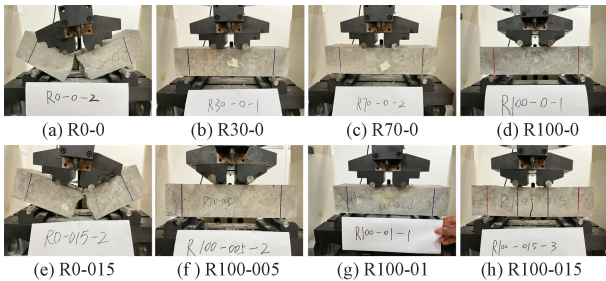


图 17 复合改性混凝土抗折试验破坏图

Fig. 17 Failure diagram of composite modified concrete flexural strength test

6.2 结果分析

图 18 所示为试件抗折强度随取代率和纤维掺量的变化。由图 18 可知,该改性再生骨料可以有效增大混凝土的抗折强度,但掺入 PVA 纤维也同样会减小强度整体呈减小趋势,取代率 100wt% 时,抗折强度降低幅度在 7.14% ~ 20.87%。当再生取代率为 0 时,掺 PVA 纤维相比不掺 PVA 纤维抗折强度显著提升,为 23.38%;在其他取代率下掺入 PVA 纤维,抗折强度先减小后增大,掺 0.15vol% PVA 纤维与不掺 PVA 纤维的复合改性混凝土相比,抗折强度提高幅度在 2.72% ~ 4.55%,这是因为 PVA 纤维在受拉区的增强作用,抑制了裂缝的发展速度,从而整体上提高了改性混凝土的抗折性能^[29]。

7 结论

(1)使用 NS-RCA 能够提高再生混凝土力学性能,全取代 NS-RCA 混凝土与普通混凝土相比,峰值应力提升 0.09%,峰值应变提升 16.97%,劈裂抗拉强度提升 17.12%,抗折强度提升 3.08%。NS-RCA 性能表现良好,可有效替代天然骨料或与天然骨料混合在实际工程中使用,但掺入 PVA 纤维后会产生

一定负面效应。

(2)使用 PVA 纤维会降低复合改性混凝土流动性,掺纤维过多不利于施工。随着纤维掺量的增大,坍落度减小的趋势越明显,当再生取代率 30wt% 时,纤维掺量 0.15vol% 与 0vol% 相比,坍落度下降最大,为 55 mm。主要原因在于 NS-RCA 吸水率较大,减少在相同配合比下复合改性混凝土的拌合自由水分,同时由于 PVA 纤维材料特性,包裹纤维水泥浆体增大,也减少了拌合自由水分,使得复合改性混凝土流动性降低。

(3)PVA 纤维在复合改性混凝土中形成三维网格结构,约束和阻止了裂缝的继续扩展,纤维承担了部分内应力,缓和了裂缝尖端的继续扩展,试件破坏形态整体性更好,复合改性混凝土破坏表现出明显的脆性破坏。

(4)PVA 纤维体积掺量为 0.05vol% 和 0.10vol% 时,不同再生取代率下的立方体抗压强度、极限承载力、劈裂抗拉强度、抗折强度和静弹性模量都会有所降低;在纤维体积掺量为 0.15vol% 时,所有强度会反而超过且提高,但提高幅度不大。

(5)总体而言,PVA 纤维有助于改善复合改性混凝土的各项力学性能,复合改性混凝土建议 PVA 纤维体积掺量在 0.15vol% 左右;如需添加 PVA 纤维,建议在再生取代率低于 30wt% 使用。

参 考 文 献

- [1] Achemichuk S, Hubbard J, Sluce R, et al. The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low-strength materials without using Portland cement[J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(8): 564-569.
- [2] 周聪, 郑泽宇, 孔祥清, 等. 高性能聚丙烯纤维对再生混凝土力学性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 303-309.

- Zhou Cong, Zheng Zeyu, Kong Xiangqing, et al. The influence of high-performance polypropylene fibers on the mechanical properties of recycled concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(1): 303-309.
- [3] 寇世聪, 潘智生. 不同强度混凝土制造的再生骨料对高性能混凝土力学性能的影响(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(1): 7-11.
Kou Shicong, Pan Zhisheng. Effect of recycled aggregate made from concrete of different strength on mechanical properties of high performance concrete [J]. *Journal of the Chinese Academy of Ceramics*, 2012, 40(1): 7-11.
- [4] Xiao J, Li W, Fan Y, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011) [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 31: 364-383.
- [5] Li W, Long C, Tam V W Y, et al. Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 42-50.
- [6] Yonggui W, Shuai-peng L, Hughes P, et al. Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 1-13.
- [7] Singh N B, Kalra M, Saxena S K. Nanoscience of cement and concrete [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(4): 5478-5487.
- [8] 肖建庄, 李标, 张凯建, 等. 纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压动态力学性能 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 30-39.
Xiao Jianzhuang, Li Biao, Zhang Kaijian, et al. Dynamic mechanical properties of recycled concrete modified by nano-silica under uniaxial compression [J]. *Journal of Tongchi University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(1): 30-39.
- [9] Singh L P, Bisht V, Aswathy M S, et al. Studies on performance enhancement of recycled aggregate by incorporating bio and nano materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181: 217-226.
- [10] Zeng W, Zhao Y, Zheng H, et al. Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 106: 1-10.
- [11] Shaikh F, Chavda V, Minhaj N, et al. Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete [J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(2): 387-399.
- [12] Meng R T, Meng T, Huang M Z, et al. Research on composite strengthening nano-technique of recycled aggregate [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 357: 1189-1193.
- [13] Li L, Xuan D, Sojobi A O, et al. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 118: 1-11.
- [14] 张鹏, 赵士坤, 庾宏亮, 等. 纳米 SiO₂ 和 PVA 纤维增强水泥基复合材料抗压强度研究 [J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(12): 94-97.
Zhang Peng, Zhao Shikun, Yu Hongliang, et al. Study on compressive strength of Nano-SiO₂ and PVA fiber reinforced cement-based composites [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(12): 94-97.
- [15] 张鹏, 赵士坤, 陈继周, 等. 纳米粒子和 PVA 纤维增强水泥基复合材料抗渗性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(S1): 153-157.
Zhang Peng, Zhao Shikun, Chen Jizhou, et al. Study on impermeability of cement-based composites reinforced by nanoparticles and PVA fiber [J]. *Bulletin of Silicate*, 2017, 36(S1): 153-157.
- [16] 张鹏, 代小兵, 付世东, 等. 纳米粒子和 PVA 纤维增强水泥基复合材料抗裂性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(9): 2923-2928, 2934.
Zhang Peng, Dai Xiaobing, Fu Shidong, et al. Study on crack resistance of cement-based composites reinforced by nanoparticles and PVA fiber [J]. *Bulletin of Silicate*, 2017, 36(9): 2923-2928, 2934.
- [17] 陈晨. 纳米 SiO₂-PVA 纤维复合水泥砂浆的抗冲击性能研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2022.
Chen Chen. Study on impact resistance of nano-silicon dioxide-PVA fiber reinforced mortar [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [18] 陈自豪. 聚乙烯醇纤维纳米再生混凝土基本力学性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
Chen Zihao. Research on basic mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber nano-recycled concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [19] Wang X, Jiang M, Zhang X, et al. Effects of different strain rates on the impact properties of recycled aggregate concrete modified with nanosilica solution and polyvinyl alcohol fiber [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 662374.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Standardization Administration of China. Sand for construction: GB/T 14684—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Standardization Administration of China. Pebbles and gravel for construction: GB/T 14685—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. GB/T 50081—2019 standard of test method for physical and mechanical properties of concrete [S]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2019.
- [23] 苏炜炜, 陈宗平, 廖浩宇, 等. 钢纤维全再生粗骨料混凝土力学性能试验及强度指标换算 [J]. *应用力学学报*, 2022, 39(5): 947-957.
Su Weiwei, Chen Zongping, Liao Haoyu, et al. Mechanical performance testing and strength index conversion of steel fiber fully recycled coarse aggregate concrete [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(5): 947-957.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. Ordinary concrete mix performance test method

- standard; GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2016.
- [25] 屠艳平, 程子扬, 陈旭勇, 等. 纳米二氧化硅对橡胶粉再生混凝土坍落度和抗压性能的影响[J]. 工业建筑, 2022, 52(2): 126-132.
Tu Yanping, Cheng Ziyang, Chen Xuyong, et al. The effect of nano silica on the slump and compressive performance of rubber powder recycled concrete[J]. Industrial Architecture, 2022, 52(2): 126-132.
- [26] 张鹏, 代思源, 王磊, 等. 纳米 SiO₂ 和聚乙烯醇纤维对混凝土抗弯拉性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4191-4195.
Zhang Peng, Dai Siyuan, Wang Lei, et al. The effect of nano SiO₂ and polyvinyl alcohol fibers on the flexural and tensile properties of concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4191-4195.
- [27] 殷康蜓, 孙海燕, 龚爱民, 等. PVA 纤维对水泥基复合材料流动性能及力学性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(4): 19-22.
Yin Kangfei, Sun Haiyan, Gong Aimin, et al. The effect of PVA fiber on the flow and mechanical properties of cement based composite materials[J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2018(4): 19-22.
- [28] 张鹏, 王磊, 王娟, 等. 纳米 CaCO₃ 和 PVA 纤维增强混凝土工作性及力学性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(3): 42-45.
Zhang Peng, Wang Lei, Wang Juan, et al. Research on workability and mechanical properties of nano CaCO₃ and PVA fiber reinforced concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2020(3): 42-45.
- [29] 牛海成, 张耀宗, 吉珈琨, 等. 玻璃-聚乙烯醇纤维再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2022(7): 91-94, 98.
Niu Haicheng, Zhang Yaorong, Ji Jiakun, et al. Experimental study on the basic mechanical properties of glass polyvinyl alcohol fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2022(7): 91-94, 98.
- [30] Jalal A, Shafiq N, Nikbakht E, et al. Mechanical properties of hybrid basalt-polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced concrete [J]. Key Engineering Materials, 2017, 744: 3-7.
- [31] 张耀宗. PVA 纤维再生混凝土受压性能试验研究[J]. 中原工学院学报, 2021, 32(1): 60-65.
Zhang Yaorong. Experimental study on compressive performance of PVA fiber reinforced recycled concrete[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2021, 32(1): 60-65.
- [32] 胡强, 苏骏. PVA 纤维增强混凝土的发展现状及工程应用 [C]//第 27 届全国结构工程学术会议论文集. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 573-580.
Hu Qiang, Su Jun. The development status and engineering applications of PVA fiber reinforced concrete [C]//Proceedings of the 27th National Academic Conference on Structural Engineering. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 573-580.
- [33] 陈晨, 张晓东, 李瞳, 等. 基于正交设计 PVA-玄武岩混杂纤维高性能混凝土力学性能研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 60-64.
Chen Chen, Zhang Xiaodong, Li Xu, et al. Research on the mechanical properties of PVA basalt hybrid fiber high-performance concrete based on orthogonal design[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 42(1): 60-64.
- [34] 郭丽, 李香兰, 王小玲, 等. PVA 和再生骨料对混凝土基本特性的影响[J]. 中国测试, 2022, 48(11): 161-167.
Guo Li, Li Xianglan, Wang Xiaoling, et al. The influence of PVA and recycled aggregates on the basic properties of concrete [J]. China Testing, 2022, 48(11): 161-167.
- [35] 李相国, 任钊锋, 徐朋辉, 等. 氧化石墨烯复合 PVA 纤维增强水泥基材料的力学性能及耐久性研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1): 245-250.
Li Xiangguo, Ren Zhaofeng, Xu Penghui, et al. Study on the mechanical properties and durability of graphene oxide composite PVA fiber reinforced cementitious materials[J]. Silicate Bulletin, 2018, 37(1): 245-250.