

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.003

聚乙烯醇纤维再生混凝土动态压缩 力学性能试验研究*

彭胜^{1a}, 吴佳隆^{1a}, 何理^{1b}, 钟东望^{1b}, 谢先启², 蔡路军^{1b}

(1. 武汉科技大学 a. 城市建设学院; b. 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430065;
2. 江汉大学 精细爆破全国重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 为提升再生混凝土(RAC)在动态荷载下的力学性能, 研究通过分离式霍普金森压杆(SHPB)动态压缩试验, 系统探究了聚乙烯醇(PVA)纤维增强和再生粗骨料(RCA)替代对RAC动态力学性能的协同影响规律。设计36组不同PVA纤维体积掺量(0%、0.1%、0.3%)与RCA取代率(30%、40%、50%)的试样, 结合动态应力-应变曲线、破坏形态及动态增长因子(DIF)等指标, 揭示了聚乙烯醇纤维再生混凝土(PVA-RAC)在冲击荷载下的损伤机理与增强机制。结果表明: PVA纤维通过桥连作用显著抑制了裂缝扩展, 使试样破坏模式由脆性粉碎转为延性龟裂, 动态峰值应力与DIF均随纤维掺量和应变率增加显著提升; 高RCA取代率(40%~50%)虽因骨料孔隙削弱了强度, 但其内部多相界面特征通过复杂裂纹路径增强了能量耗散, 部分抵消了强度损失。该成果为PVA-RAC在抗震防护工程中的动态设计与应用提供了理论依据, 同时为建筑固废资源化与高性能再生建材的协同发展开辟了新路径, 具有理论创新性与工程实践价值。

关键词: 聚乙烯醇纤维再生混凝土; 动态压缩; 力学性能; 分离式霍普金森压杆; 动态增长因子
中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)03-0018-08

Experimental Investigation on Dynamic Compressive Mechanical Properties of PVA Fiber-reinforced Recycled Aggregate Concrete

PENG Sheng^{1a}, WU Jia-long^{1a}, HE Li^{1b}, ZHONG Dong-wang^{1b}, XIE Xian-qi², CAI Lu-jun^{1b}

(1. a. College of City Construction; b. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: To enhance the mechanical performance of recycled aggregate concrete(RAC) under dynamic loading, this study systematically investigates the synergistic effects of polyvinyl alcohol(PVA) fiber reinforcement and recycled coarse aggregate(RCA) replacement on the dynamic mechanical performance of RAC through split Hopkinson pressure bar(SHPB) impact compression tests. Thirty-six specimen groups with varying PVA fiber dosages(0%,

收稿日期(Date of reception): 2025-04-08

网络首发日期(Published online): 2025-05-15

作者简介: 彭胜(1989-), 男, 博士、副教授, 主要从事工程爆破理论及技术研究, (E-mail) pengsheng@wust.edu.cn.

通讯作者: 何理(1986-), 男, 博士、教授, 主要从事智能爆破理论及技术研究, (E-mail) emp-heli@hotmail.com.

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB662); 武汉市知识创新专项项目曙光计划项目(2023020201020403); 江汉大学精细爆破全国重点实验室开放基金(PBSKL2022D05)

About the author: PENG Sheng(1989-), male, Ph. D, associate professor, mainly engaged in research on engineering blasting theory and technology, (E-mail) pengsheng@wust.edu.cn.

Corresponding author: HE Li(1986-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in research on intelligent blasting theory and technology, (E-mail) emp-heli@hotmail.com.

Fund Programs: Natural Science Foundation of Hubei Province funding project(2022CFB662), Wuhan Knowledge Innovation Special Project Dawn Plan Project(2023020201020403), Open Fund of State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University (PBSKL2022D05)

0.1%、0.3%) and RCA replacement ratios(30%、40%、50%) were designed to elucidate the damage mechanisms and enhancement mechanisms of PVA fiber-reinforced recycled aggregate concrete(PVA-RAC) under impact loading,utilizing comprehensive analyses of dynamic stress-strain curves, failure patterns, and dynamic increase factors (DIF). The results demonstrate that PVA fibers significantly suppress crack propagation via bridging effects,thereby altering the material's failure mode from brittle fragmentation to ductile cracking. Both dynamic peak stress and DIF exhibit substantial improvements with increasing fiber content and strain rate. While higher RCA replacement ratios (40% ~ 50%) diminish compressive strength due to the inherent porosity of RCA,their heterogeneous interfacial properties promote energy dissipation through complex crack propagation paths,thereby partially mitigating strength losses. This study establishes a theoretical framework for the dynamic design and application of PVA-RAC in seismic-resistant protective structures. Furthermore,it pioneers a synergistic approach to integrating construction waste recycling with the development of high-performance recycled building materials. The findings have both theoretical innovation and practical engineering significance.

Key words: PVA fiber-reinforced recycled aggregate concrete; dynamic compression; mechanical property; split Hopkinson pressure bar; dynamic increase factor

我国城市更新加速推进,基础设施建设规模持续扩大,致使建筑垃圾每年超 30 亿吨的速度激增^[1]。建筑固废资源化,是实现建筑垃圾减量化的有效途径^[2]。然而,再生混凝土(RAC)存在原始界面过渡区和内部微裂缝等缺陷^[3,4],使其在性能方面稍弱于混凝土,难以在抗震结构、防护工程等领域推广^[5-7]。通过掺入聚乙烯醇(PVA)纤维来增强 RAC 的强度和抗裂能力是目前常用的手段,PVA 的桥连作用能有效抑制 RAC 内在裂缝的产生与发展,致使其抗拉强度与韧性方面的提升效果显著。

近年来,国内外学者围绕 PVA 纤维改性 RAC 开展了研究^[8-13]。在抗裂机制方面,陈英杰等通过力学性能试验^[8],证实了 PVA 纤维的桥连作用可显著抑制 RAC 横向开裂,并提升其劈裂抗拉与抗折强度。陈宇良等基于摩擦剪切试验与微观分析^[9],发现 PVA 纤维可以起到维持 RAC 剪切破坏界面粗糙度的作用。在复合构件力学行为研究中,Yu 等通过波纹钢板聚乙烯醇纤维混凝土(PVA-RAC)叠合板抗弯试验发现^[10],纤维掺量增加可有效提升构件承载力并减小挠度变形。针对混杂纤维体系,司政等发现玄武岩-PVA 纤维的协同作用可优化 RAC 孔隙结构^[11],显著增强其抗冻性能,并指出,混掺纤维的增强效果优于单掺体系。Lin 等采用三点弯曲试验^[12],证实了 PVA 纤维能有效改善 RAC 的断裂性能。蒿昭东进一步通过混杂纤维透水混凝土的研究^[13],发现玄武岩-PVA 纤维形成的三维网络结构可同时提升材料抗压强度与渗透性能,实现力学与功能的协同优化。然而,这类静态研究成果难以解释冲击荷载下材料的高速变形与能量耗散等特性,制约了 PVA-RAC 在防护工程中的应用。

值得注意的是,PVA 纤维对混凝土动态力学行

为的改善已在普通混凝土领域获得验证^[14-18]。张炳锋等通过动态压缩试验证实^[14],PVA 纤维体积掺量的增加可明显改善混凝土冲击破坏模式,使材料破坏形态从脆性崩裂向延性损伤转变,同时动态峰值应力呈现显著的正向增长趋势。杨国梁和韩子默等基于动态冲击试验发现^[15,16],PVA 纤维的加入可以显著提高混凝土试件的临界裂缝尖端张开位移,提高试件的阻裂能力。Osman B H 等对 PVA 纤维混凝土动态性能研究发现^[17],随着纤维掺量的增加,纤维混凝土抗弯性能逐步增强,且纤维混凝土能有效降低损伤积累率,显著提升混凝土抵抗多次重复冲击荷载的承载能力。Ma 等创新性地将负泊松比结构与 PVA-碳纤维混杂体系相结合证实^[18],纤维的掺入显著提升了混凝土的抗冲击强度以及断裂能,并对改善混凝土内部裂缝的产生和发展有积极作用。这些现象表明,PVA 纤维可以显著提升混凝土的抗冲击性能,然而,现有研究多聚焦于骨料结构完整的普通混凝土体系,针对再生骨料孔隙-纤维-基体多相界面在动态荷载下的协同响应机制的研究较少。在此背景下,开展 PVA-RAC 抗冲击性能研究,既是揭示 RAC 动态损伤机理的理论延伸,也是推动其应用于防护工程结构的关键技术基础。

通过开展不同冲击气压下的 SHPB 动态压缩试验,系统研究 PVA 纤维体积掺量和再生粗骨料(RCA)取代率等参数对 RAC 动态力学特性的影响规律。设计了 36 个试样,其中 27 个用于 SHPB 试验,9 个用于静态轴压试验。对不同 RCA 取代率和 PVA 纤维体积掺量试样在不同冲击气压下的破坏形态、动态应力-应变曲线、动态峰值应力-应变率和动态增长因子(DIF)进行了详细讨论。

1 试验方案

1.1 试验材料和配合比

制备 PVA-RAC 试样的主要原料有水泥、河砂、天然粗骨料、RCA、水、减水剂及不同体积比的 PVA。水泥强度等级为 P. I 42.5 硅酸盐水泥；河砂为中砂，平均细度模数为 2.9，颗粒级配符合 II 类级配

区；天然粗骨料和 RCA 的粒径均为 5~20 mm，天然粗骨料为武汉某石场生产的砾石，RCA 来自武汉科技大学城市建设学院工程训练中心回收的 C30 废弃混凝土试件；水为普通自来水；减水剂为 HF 聚羧酸盐系高效减水剂^[19]，减水率 25%~30%；PVA 纤维由上海臣启化工科技有限公司生产，其材料参数如表 1 所示。

表 1 聚乙烯醇纤维材料性能

Table 1 Characteristic of polyvinyl alcohol fiber material

长度/mm Length/mm	当量直径/ μm Diameter/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	断裂伸长率/% Elongation at break/%	抗拉强度/MPa Fracture strength/MPa
12	15.3	1.29	7	1830

研究不同 PVA 纤维掺量(0、0.1%、0.3%)和 RCA 取代率(30%、40%、50%)对 PVA-RAC 冲击力学性能的影响，采用了 9 种配合比，如表 2 所示。为方便起见，对试样进行编号。第一个字母“R”表示 RCA，“R”后的数字表示 RCA 的取代率，第二个字母“P”表示 PVA 纤维，“P”后的数字表示 PVA 纤维的体积含量。如试样编号 R30-P0.1 表示 RCA 取代

率为 30%且 PVA 纤维含量为 0.1%的 PVA-RAC，配合比由材料性能和多次试验确定。

为了消除惯性效应的影响，设计试样长径比为 0.5，即直径为 100 mm，高度为 50 mm 的 PVA-RAC 圆柱形试样。另对标准条件下养护 28 d 后的 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试样进行轴心抗压强度测定。

表 2 配合比和试验组设置

Table 2 Design of mixing proportions and groups

试样编号 Specimen	按质量计的配合比/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ Mix proportions by weight/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$						比例/% Ratio/%
	水 Water	水泥 Cement	砂 Sand	天然粗骨料 Natural coarse aggregate	再生粗骨料 Recycled coarse aggregate	减水剂 Water reducer	
R30	173	411	702	768.6	329.4	4.11	—
R40	173	411	702	658.8	439.2	4.11	—
R50	173	411	702	549.0	549.0	4.11	—
R30-P0.1	173	411	702	768.6	329.4	4.11	0.1
R30-P0.3	173	411	702	658.8	439.2	4.11	0.3
R40-P0.1	173	411	702	549.0	549.0	4.11	0.1
R40-P0.3	173	411	702	768.6	329.4	4.11	0.3
R50-P0.1	173	411	702	658.8	439.2	4.11	0.1
R50-P0.3	173	411	702	549.0	549.0	4.11	0.3

1.2 试验设备及试验过程

静态轴压试验在武汉科技大学土木工程试验中心进行，加载设备为全自动压力机，如图 1 所示。不同配比下标准立方体抗压强度试验结果见表 3。

动态压缩试验采用 0.1 MPa、0.15 MPa 和 0.20 MPa 三种冲击气压控制试样应变率。试验动加载装置使用武汉科技大学理学院动力学实验室 100 mm 杆径分离式霍普金森压杆试验装置，其由发射端(包括发射腔和子弹)、入射杆、透射杆、缓冲

端、测速仪和数据采集单元组成，图 2 为 SHPB 装置的原理图。如图 2 所示子弹、缓冲杆、透射杆和入射杆的长度分别为 600 mm、1000 mm、3000 mm、5000 mm，所有杆件均由高强度合金钢(密度为 7850 kg/m³、弹性模量为 210 GPa)组成。通过调整发射腔内高纯氮气的气压来控制子弹的冲击速度，使试样达到不同的应变率。分别在入射杆和透射杆中间位置上粘贴电阻应变片以半桥对臂的连接方式获取应变数据。同时为了消除端面摩擦效应，将再

生混凝土试样与入射杆、透射杆两个接触面均涂抹凡士林, 以避免接触面摩擦效应影响试样内部的应力分布。

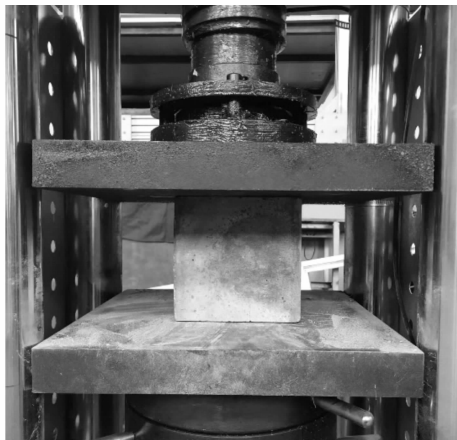


图 1 静态压缩试验机

Fig. 1 Static compression testing machine

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

为了直观对比 SHPB 试验后的破坏形态, 分析 RCA 取代率(30%、40%、50%) 和 PVA 纤维体积分

量(0、0.1%、0.3%) 对 PVA-RAC 动态压缩力学性能的影响, 选取不同冲击气压下不同配比 PVA-RAC 的典型破坏模式, 如图 3 所示。

试样典型破坏形态(Lv 和 Chen 等对素混凝土在 SHPB 实验中的破坏类型分为了四种形态) 如表 3 所示^[20], 从宏观破坏现象可以看出, 随着冲击气压的增加, 试样整体上从边缘破损至中间开裂, 最后完全破碎, 且破坏块体的尺寸亦越来越小。在 0.1 MPa 冲击气压下, 随着 RCA 取代率的增加, 无纤维增强 RAC 试样的破坏形态越来越严重, 呈现出局部破裂到半块破碎的现象。在高冲击气压下, 无纤维增强 RAC 均表现出整块破碎的现象。对比加入纤维后不同 RCA 取代率的试样, 并未发现明显破坏形态上的差异。

添加 PVA 纤维后, 在相同冲击气压下, PVA-RAC 的完整性得到了显著的提高, 且随着 PVA 纤维体积分含量的增加该现象更加明显。观察受到冲击后的 PVA-RAC 试样, 多数试样有较好的完整性, 在 PVA-RAC 散落的碎块中依旧有着纤维连接, 呈现出“藕断丝连”的破坏状态^[21], 即使被撞碎, 在试样中纤维依然在起着桥连作用, 散落的骨料直径明显大于无纤维增强 RAC。

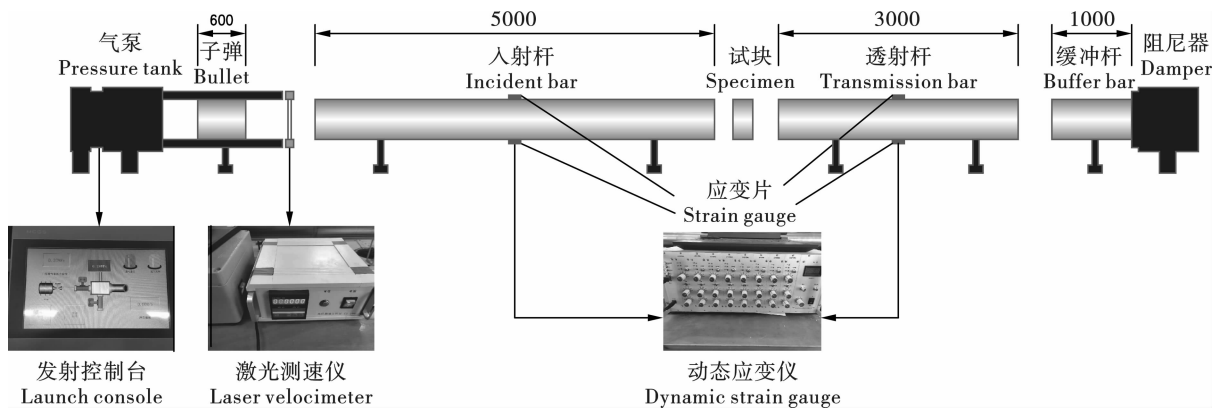


图 2 分离式霍普金森压杆试验装置(单位:mm)

Fig. 2 Test setup of Split Hopkinson Pressure Bar(unit:mm)

2.2 动态应力-应变曲线

试验结果如表 3 所示。 $f_{cc,s}$ 为静态荷载作用下的峰值应力, $f_{cc,d}$ 为动态荷载作用下的峰值应力, ϵ_{cc} 为动态峰值应力对应下的应变, DIF 为动态增长因子。注意, 表 3 中划短横线的部分为未测量到的数据。从表 3 可以看出子弹发射速度、应变率和动态峰值应力均随着冲击气压的增大而增大。图 4 为 SHPB 试验下试样的动态应力-应变曲线。PVA-RAC 动态应力应变曲线可以大致分为 3 个阶段: 弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段。弹性阶段和塑性阶段

共同组成曲线的上升段, 反映了材料的初始刚度及材料特性, 峰后曲线为破坏阶段, 该段曲线陡降可能伴随波动。

从不同 RCA 取代率的曲线中可以看出高应变率高纤维掺入 RAC 的应力-应变曲线包裹了低应变率 RAC 的压应力-应变曲线。这一现象说明纤维增强 RAC 具有应变率效应。整体上, 随着应变率及纤维体积分含量的上升, 纤维增强 RAC 的正弹性模量都有所增加, 而这种增加的程度是适度的。并且纤维的加入大大增强了试样的吸能能力和峰值应变, 说

明 PVA 纤维的效果显著。部分曲线在达到峰值应力前出现异常波动可能是试样与压杆接触面不平整或存在微小滑动,使得加载初期应力分布不均,偏心加载引发局部应力集中,表现为曲线波动。

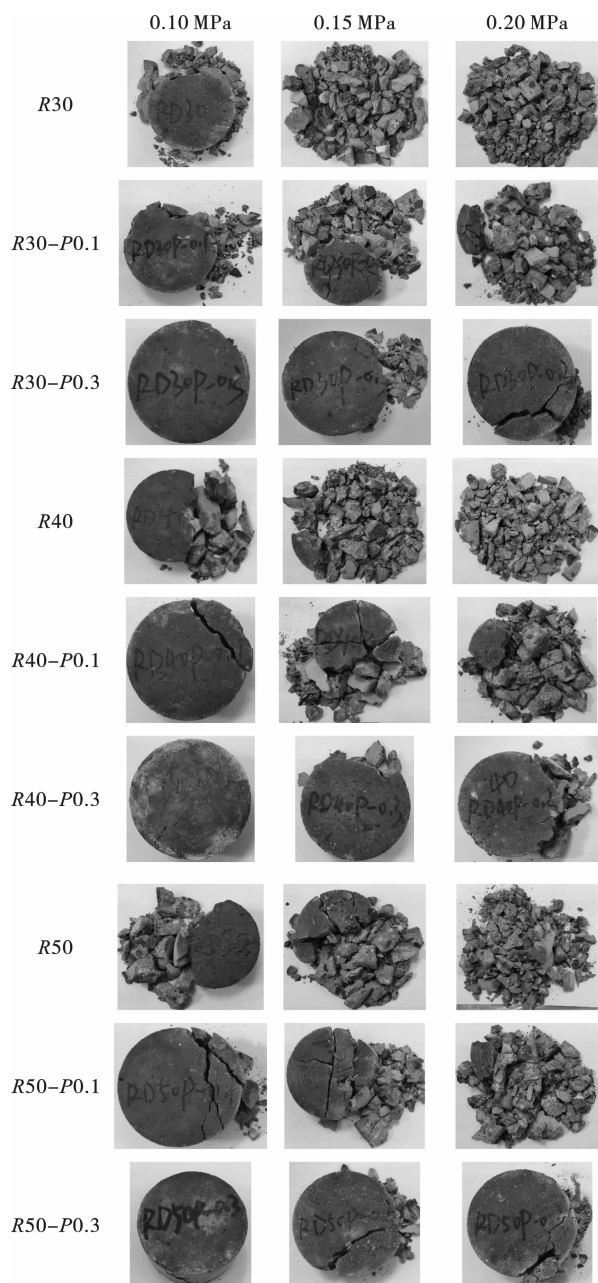


图3 不同冲击气压下试样的破坏形态
Fig. 3 Failure modes of the test specimens under different impact pressures

2.3 动态峰值应力-应变率

图5为相同PVA纤维体积含量和不同RCA取代率下PVA-RAC的动态峰值应力-应变率曲线。当PVA纤维体积含量为0%时,在应变率相近的情况下,PVA-RAC的峰值应力随RCA取代率的增加而减小。在加入PVA纤维后亦表现出与未加PVA纤维

维试样相似的峰值应力变化规律。

图6为相同RCA取代率和不同PVA纤维体积含量下PVA-RAC的动态应力-应变率曲线。在相近应变率下,PVA-RAC的峰值应力随PVA纤维体积含量的增加而增加。与其他情况不同的是,当RCA取代率为40%时,加入PVA纤维试样的峰值应力没有达到预期值。该现象有可能是在制备试样中纤维分散不均,应力集中于纤维团簇周围,加速裂纹贯通,削弱了整体承载能力。

2.4 动态增长因子

动态增长因子(dynamic increase factors,简称DIF)为动态强度与静态强度的比值,反映了材料在高应变率加载下的强度增强效应,一般表示为应变率的函数。对于每种试样,DIF均随应变率升高而显著提升,如R30在0.1 MPa气压下DIF为1.09,在0.2 MPa气压下DIF为1.79,R40~P0.3在0.1 MPa下DIF为1.25,在0.1 MPa气压下DIF为1.94。当PVA纤维体积含量相同时,DIF随着RCA取代率的增加而增加,例如R30在0.2 MPa气压下DIF为1.79,R40在同等条件下DIF为1.88,这表明再生骨料孔隙率较高,在高应变率下裂纹扩展路径复杂化,导致能量耗散增强,从而提升了动态强度。

当RCA取代率相同时,DIF随PVA纤维体积含量的增加而增大,这是因为PVA纤维在动态加载中通过桥接微裂纹,延缓裂纹扩展并分散应力集中,减少突发性破坏,从而提升了动态强度;但有少部分试样的DIF值随着PVA纤维含量的增加反而降低了,例如R50在0.15 MPa气压下DIF为1.47,R50~P0.1在0.15气压下DIF为1.43,这可能是纤维局部团聚,形成弱界面区,导致应力集中,削弱了DIF的增幅。

3 结论

研究通过SHPB动态压缩试验研究了PVA纤维体积掺量(0%、0.1%、0.3%)与RCA取代率(30%、40%、50%)对PVA-RAC动态力学性能的影响,得出以下结论:

(1)PVA纤维通过桥接作用有效抑制了裂缝扩展,改善了试样的破坏形态。相较于无纤维试样,纤维掺量为0.3%时,试样在高应变率下的破坏形态由粉碎转为轻微龟裂的延性破坏,碎块完整性提升,动态抗压强度与能量耗散能力显著增强。

(2)动态峰值应力与DIF均随应变率及纤维掺量的增加呈正相关。高冲击气压(0.2 MPa)下,纤维掺量0.3%的试样动态强度较静态强度提升了94%,这表明PVA纤维在动态荷载下通过应力重分

布延缓了突发性破坏, 增强了材料韧性。

表 3 SHPB 实验结果
Table 3 Results of the SHPB test

试样编号 Specimen	气压/MPa Pressure/MPa	子弹速度/(m·s ⁻¹) Bullet velocity/(m·s ⁻¹)	应变率/s ⁻¹ Strain rate/s ⁻¹	$f_{cc,s}$ /MPa	$f_{cc,D}$ /MPa	ε_{cc}	DIF	破坏形态 Failure pattern
R30	0.10	2.56	37	42.15	45.82	0.0083	1.09	破裂 cracked
	0.15	4.22	—	—	—	—	—	破碎 broken
	0.20	5.15	90	—	75.36	0.0092	1.79	粉碎 crushed
R40	0.10	2.42	33	39.74	41.83	0.0078	1.05	破裂 cracked
	0.15	3.69	51	—	57.47	0.0084	1.45	破碎 broken
	0.20	4.40	71	—	74.89	0.0100	1.88	粉碎 crushed
R50	0.10	2.87	—	37.81	—	—	—	破裂 cracked
	0.15	3.76	65	—	55.43	0.0072	1.47	破碎 broken
	0.20	4.39	—	—	—	—	—	粉碎 crushed
R30 - P0.1	0.10	2.93	46	44.31	54.87	0.0076	1.24	破裂 cracked
	0.15	4.27	64	—	68.38	0.0082	1.54	破碎 broken
	0.20	4.41	85	—	77.93	0.0012	1.76	破碎 broken
R30 - P0.3	0.10	2.88	53	44.55	61.50	0.0084	1.38	轻微龟裂 slightly cracked
	0.15	3.55	—	—	—	—	—	破裂 cracked
	0.20	4.45	80	—	86.60	0.0112	1.94	破裂 cracked
R40 - P0.1	0.10	2.87	55	40.72	53.95	0.0082	1.32	破裂 cracked
	0.15	4.30	70	—	58.98	0.0087	1.45	破碎 broken
	0.20	4.40	88	—	72.26	0.0098	1.77	破碎 broken
R40 - P0.3	0.10	2.95	48	42.20	52.69	0.0077	1.25	轻微龟裂 slightly cracked
	0.15	4.27	75	—	77.20	0.0110	1.83	破裂 cracked
	0.20	4.40	85	—	81.80	0.0110	1.94	破裂 cracked
R50 - P0.1	0.10	3.14	48	39.89	45.93	0.0062	1.15	破裂 cracked
	0.15	4.32	67	—	56.89	0.0093	1.43	破碎 broken
	0.20	4.40	83	—	66.89	0.0122	1.68	破碎 broken
R50 - P0.3	0.10	2.97	46	40.79	49.88	0.0080	1.22	轻微龟裂 slightly cracked
	0.15	3.76	74	—	72.96	0.0108	1.79	破裂 cracked
	0.20	4.44	82	—	76.25	0.0111	1.87	破裂 cracked

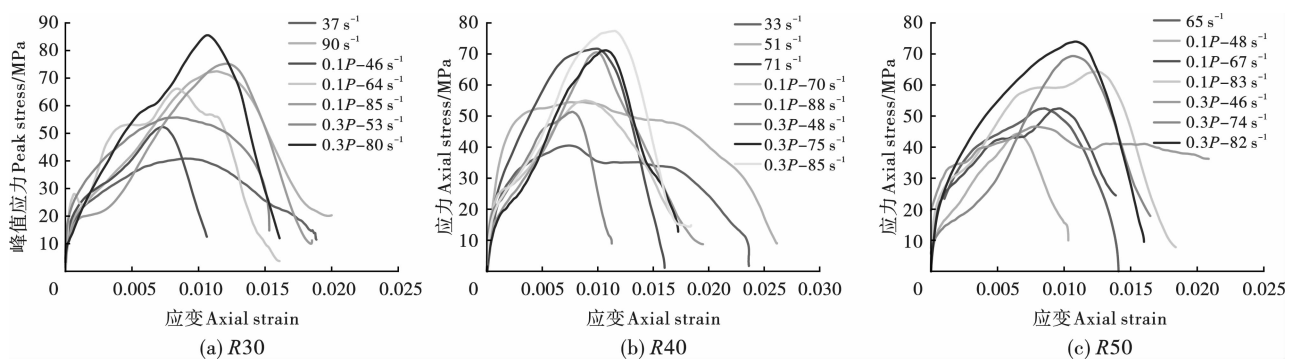


图 4 不同再生粗骨料取代率的应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of RCA with different replacement ratios

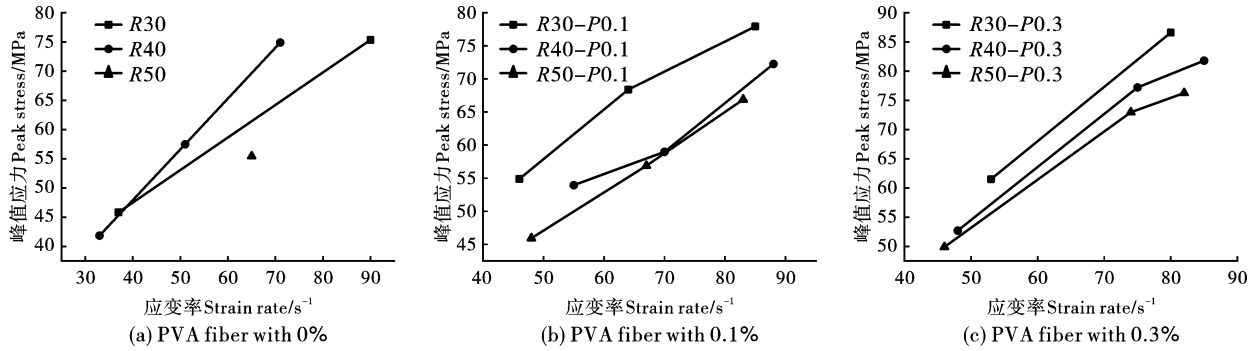


图5 再生粗骨料取代率对试样峰值应力-应变率曲线的影响

Fig. 5 Effect of RCA replacement ratio on peak stress-strain rate curves of specimens

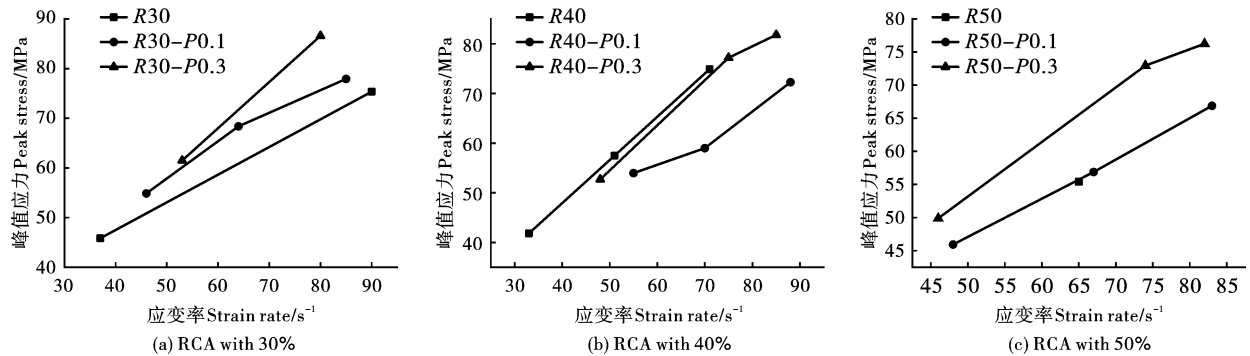


图6 PVA纤维体积比对试样峰值应力-应变率曲线的影响

Fig. 6 Effect of PVA fiber volume ratio on peak stress-strain rate curves of specimens

(3) RCA 取代率的提高虽会导致 RAC 动态强度的降低,但高孔隙率再生骨料内部复杂的裂纹扩展路径可显著促进能量耗散机制,从而部分补偿强度损失。这种动态强度折减与能量耗散增强的竞争效应导致动态增强因子随取代率增加呈现上升趋势。例如 R40 试样在 0.2 MPa 冲击气压下的 DIF 为 1.88,高于同条件下 R30 试样的 DIF(1.79),印证了再生骨料孔隙特征对动态力学响应的正向调控作用。

(4) 纤维分散不均可能引发局部弱界面区,削弱增强效果。如 R50-P0.1 试样在 0.15 MPa 冲击气压下的 DIF(1.43) 低于同取代率无纤维试样(1.47)。因此,需优化纤维分散工艺以保障性能稳定性。

参考文献 (References)

[1] 曹瑞雪. 固废砂粉再生混凝土力学及耐久性能影响因素[J]. 山西建筑, 2025, 51(3): 26-32.
 [1] CAO Rui-xue. Effect of mechanics and durability of recycled concrete with solid waste sand powder [J]. Shanxi Architecture, 2025, 51(3): 26-32. (in Chinese)
 [2] 李京京, 李 坤, 徐 军, 等. 碳中和背景下我国固废

资源化利用产业发展研究 [J]. 资源节约与环保, 2025(2): 139-142.

[2] LI Jing-jing, LI Kun, XU Jun, et al. Development of solid waste recycling industry of china in the context of carbon neutrality [J]. Resources Economization & Environment Protection, 2025(2): 139-142. (in Chinese)
 [3] 冯春花, 黄益宏, 崔卜文, 等. 建筑再生骨料强化方法研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(21): 88-95.
 [3] FENG Chun-hua, HUANG Yi-hong, CUI Bu-wen, et al. Research progress on treatment methods of building recycled concrete aggregates [J]. Materials Reports, 2022, 36(21): 88-95. (in Chinese)
 [4] 王永贵, 李帅鹏, HUGHES Peter, 等. 改性再生混凝土动力性能研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 269-278, 287.
 [4] WANG Yong-gui, LI Shuai-peng, HUGHES Peter, et al. Dynamic performance of modified recycled concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(23): 269-278, 287. (in Chinese)
 [5] R V Silva, J de Brito, R K Dhir. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 108-118.
 [6] R V Silva, J de Brito, R K Dhir. The influence of the use

- of recycled aggregates on the compressive strength of concrete; A review [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 19(7): 825-849.
- [7] K N Rahal, Y T Alrefaei. Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 866-876.
- [8] 陈英杰,杜嘉宾,林力生,等. 聚乙烯醇纤维再生混凝土力学性能及预制构件的应用研究 [J]. *混凝土*, 2025(2): 119-124.
- [8] CHEN Ying-jie, DU Jia-bin, LIN Li-sheng, et al. PVA fiber recycled concrete mechanical properties and the application of prefabricated research [J]. *Concrete*, 2025(2): 119-124. (in Chinese)
- [9] 陈宇良,刘志华,叶培欢,等. 聚乙烯醇纤维再生混凝土摩擦剪切力学性能试验 [J]. *实验力学*, 2022, 37(5): 722-730.
- [9] CHEN Yu-liang, LIU Zhi-hua, YE Pei-huan, et al. Experimental study on the mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber recycled aggregate concrete under frictional shear [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(5): 722-730. (in Chinese)
- [10] YU Feng, KUANG Guang-fei, BU Shuang-shuang, et al. Experimental study on flexural behavior of corrugated-steel plate PVA fiber reinforced recycled concrete composite slabs [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2025, 29(3): 100035.
- [11] 司 政,田 爽,皇甫秉辉,等. 玄武岩-聚乙烯醇纤维对再生混凝土抗冻性能的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(4): 187-193.
- [11] SI Zheng, TIAN Shuang, HUANGFU Bing-hui, et al. Influence of basalt-polyvinyl alcohol fiber on frost resistance of recycled concrete [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(4): 187-193. (in Chinese)
- [12] LIN Qian, LUO Su-rong, LIN Kai-da, et al. Effects of synthetic fibres on the fracture behaviours of recycled coarse aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 418: 135370.
- [13] 蒿昭东. PVA-玄武岩混杂纤维增强再生骨料透水混凝土力学性能研究 [J]. *铁道建筑技术*, 2025(2): 4-7, 25.
- [13] HAO Zhao-dong. Study on the mechanical properties of PVA-basalt hybrid fiber-reinforced recycled aggregate permeable concrete [J]. *Railway Construction Technology*, 2025(2): 4-7, 25. (in Chinese)
- [14] 张炳锋,高士武,杨晓林,等. 聚乙烯醇纤维掺量对混凝土动态力学性能的影响 [J]. *青海大学学报*, 2024, 42(3): 64-70.
- [14] ZHANG Bing-feng, GAO Shi-wu, YANG Xiao-lin, et al. Effects of PVA fiber content on dynamic mechanical properties of concrete [J]. *Journal of Qinghai University*, 2024, 42(3): 64-70. (in Chinese)
- [15] 杨国梁,李 峰,张志飞,等. 聚乙烯醇纤维混凝土动态断裂过程试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 454-462.
- [15] YANG Guo-liang, LI Feng, ZHANG Zhi-fei, et al. Experimental study on dynamic fracture process of polyvinyl alcohol fiber concrete [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(2): 454-462. (in Chinese)
- [16] 韩子默,杨国梁,李 峰,等. 动态荷载下聚乙烯醇纤维混凝土阻裂性能试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(1): 59-68, 100.
- [16] HAN Zi-mo, YANG Guo-liang, LI Feng, et al. Experimental study on cracking resistance of polyvinyl alcohol fiber concrete under dynamic loading [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(1): 59-68, 100. (in Chinese)
- [17] BASHIR H Osman, TIAN Zheng-hong, JIANG Gui-lin, et al. Experimental study on dynamic properties of UHMWPE and PVA fibers concrete [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(10): 2993-3011.
- [18] MA Yan-xuan, ZHAO Fei, LIU Jin, et al. Dynamic mechanical properties, interface structure evolution and deformation behaviors of PVA-carbon fiber reinforced concrete with negative Poisson's ratio design [J]. *Construction and building materials*, 2023, 391: 131897.
- [19] GB8076—2008 混凝土外加剂 [S].
- [19] GB8076—2008 Concrete admixture [S]. (in Chinese)
- [20] T H Lv, CHEN Xiao-wei, CHEN Gang. Analysis on the waveform features of the split Hopkinson pressure bar tests of plain concrete specimen [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103(3): 107-123.
- [21] 陈鹏飞. 玄武岩纤维和聚丙烯纤维混凝土抗冲击性能研究与数值分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [21] CHEN Peng-fei. Research and numerical analysis on impact resistance of basalt fiber and polypropylene fiber reinforced concrete [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021. (in Chinese)