

钢-塑钢混杂纤维再生混凝土单轴压缩动态力学性能试验

冯俊杰 尹冠生 刘柱 梁建红 张云杰 牛志强 王鹏博

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

FENG Junjie, YIN Guansheng, LIU Zhu, LIANG Jianhong, ZHANG Yunjie, NIU Zhiqiang, WANG Pengbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211221.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

形状记忆环氧树脂及其四枚缎纹碳纤维织物增强环氧树脂的动态力学性能

Dynamic mechanical properties of shape memory epoxy polymer and 4-harness satin carbon fiber weave reinforced composites

复合材料学报. 2017, 34(6): 1271–1277 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161028.002>

环氧树脂-混凝土的早龄期压缩性能

Compressive properties of epoxy resin-concrete at early-age

复合材料学报. 2019, 36(12): 2735–2744 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190729.003>

超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究

A review on constitutive relationship of ultra-high-performance concrete under uniaxial compression and tension

复合材料学报. 2019, 36(5): 1295–1305 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180703.004>

编织角和承载方向对三维四向编织复合材料动态压缩性能的影响

Influence of braid angle and bearing direction on dynamic compressive properties of 3D four directional braided composites

复合材料学报. 2018, 35(4): 823–833 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170720.001>

钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型

Experiment on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/ concrete subjected to uniaxial compression

复合材料学报. 2021, 38(7): 2359–2369 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200916.001>

炭黑充填重塑粉土单轴压缩裂隙群体发展演化测试

Development of fissures in silt filled with carbon during uniaxial compression

复合材料学报. 2017, 34(3): 691–697 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160616.029>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211221.002

钢-塑钢混杂纤维再生混凝土单轴
压缩动态力学性能试验



分享本文

冯俊杰¹, 尹冠生^{*1}, 刘柱², 梁建红², 张云杰², 牛志强³, 王鹏博¹

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 陕西铁投工程检测科技有限公司, 西安 710304;
3. 郑州科技学院 土木建筑工程学院, 郑州 450064)

摘 要: 为探究钢-塑钢混杂纤维再生混凝土的压缩动态力学性能, 设计了 A、B 和 C 3 个系列混杂纤维再生混凝土包含 3 种再生粗骨料取代率和 5 种体积分数 1.5vol% 的钢纤维和塑钢混掺纤维组合, 采用了 4 种加载应变率。试验表明: 随应变率增加, 混杂纤维再生混凝土峰值应力、弹性模量和压缩韧性增大, 峰值应变减小。相较于基准组, 在相同应变率下 3 个系列中的含纤维组峰值应力最大增幅分别为 23%、16% 和 16%; 峰值应变最大增幅分别为 19%、12% 和 13%; 弹性模量最大增幅分别为 15%、14% 和 35%; 压缩韧性最大增幅分别为 46%、32% 和 37%。在试验应变率范围内, 再生粗骨料显著提高峰值应力、弹性模量和压缩韧性的应变率敏感性, 对峰值应变的应变率敏感性并无明显影响; 掺入纤维降低混凝土峰值应变和弹性模量的应变率敏感性, 提高普通混凝土峰值应力和压缩韧性的应变率敏感性, 降低再生混凝土峰值应力和压缩韧性的应变率敏感性。提出的动态损伤本构模型考虑了纤维增强系数、再生粗骨料取代率和应变率, 计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 混杂纤维再生混凝土; 单轴压缩; 动态力学性能; 动态增长因子; 应变率敏感性; 动态损伤本构模型
中图分类号: TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5386-17

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

FENG Junjie¹, YIN Guansheng^{*1}, LIU Zhu², LIANG Jianhong², ZHANG Yunjie²,
NIU Zhiqiang³, WANG Pengbo¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Tietou Engineering Testing Technology CO., LTD., Xi'an 710304, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: The dynamic compressive behavior of hooked-end steel (HES) and macro-polypropylene (MPP) hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete (HyF/RAC) was studied. Three series (A, B and C) of HyF/RAC specimens were designed, which include three different recycled coarse aggregates (RCA) replacement ratios and five combinations of hybrid fibers at the total volume fraction of 1.5vol%, and four different strain rates were conducted. The results show that with the increase of strain rate, the peak stress, elastic modulus and compressive toughness increase, while the peak strain decreases. Compared with control groups in three series under the same strain rate, the largest increases of peak stress for specimens with fibers are 23%, 16% and 16%, respectively. The largest increases of peak strain are 19%, 12% and 13%, respectively. The largest increases of elastics modulus are

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-12-10; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发时间: 2021-12-22 11:42:49
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211221.002>
基金项目: 长安大学博士研究生创新能力培养资助项目 (300203211121); 陕西省交通运输厅交通科研项目 (21-67K); 长安大学相变蓄能建筑材料创新开放实验室项目 (2018CXSY06); 河南省科技厅科技攻关项目 (182102311091); 郑州科技学院自然科学项目 (2017-XYZK-002)
通信作者: 尹冠生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为混凝土结构 E-mail: yings@chd.edu.cn
引用格式: 冯俊杰, 尹冠生, 刘柱, 等. 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土单轴压缩动态力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5386-5402.
FENG Junjie, YIN Guansheng, LIU Zhu, et al. Experiment on dynamic mechanical properties of steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5386-5402(in Chinese).

15%, 14% and 35%, respectively. The largest increases of compressive toughness are 46%, 32% and 37%, respectively. In the strain rate range, the strain rate sensitivity of peak stress, elastic modulus and compressive toughness increase with the RCA, and the RCA replacement ratio does not affect the strain rate sensitivity of peak strain. The strain rate sensitivity of peak strain and elastic modulus decrease with the addition of fiber. The addition of fibers enhances the strain rate sensitivity of peak stress and compressive toughness for natural aggregate concrete (NAC). While the strain rate sensitivity of peak stress and compressive toughness decrease for recycled aggregate concrete (RAC). The dynamic constitutive damage model was proposed considering the reinforcing index of fibers, RCA replacement ratio and strain rates. And all the models agree well with the experimental curves.

Keywords: hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete; uniaxial compression; dynamic mechanical properties; dynamic increase factor; strain rate sensitivity; dynamic damage constitutive model

混凝土材料具有明显的应变率效应，其力学性能受应变率影响显著^[1-2]。不同加载速率对应混凝土不同静动力作用效应，即蠕变($10^{-8}\sim 10^{-6}/s$)、静态($10^{-6}\sim 10^{-5}/s$)、地震($10^{-4}\sim 10^{-2}/s$)、冲击($1\sim 10^2/s$)和爆炸($10^2\sim 10^3/s$)^[3]。对于再生混凝土，由于附着的砂浆颗粒和表面裂缝的存在，再生骨料具有较高的孔隙率和吸水性，这对再生混凝土应变率敏感性产生更复杂的影响。白卫峰等^[4]进行了再生混凝土在地震量级应变率下的单轴压缩性能试验，结果显示随应变率增大，抗压强度和弹性模量逐渐增大，而峰值应变逐渐减小，再生混凝土(再生粗骨料取代率 $r_g=100\%$)具有更显著的应变率敏感性。Xiao 等^[5]研究了海水海砂再生混凝土在地震量级应变率下的压缩性能，结果表明峰值应力和弹性模量的动态增长因子随应变率增加而增大。董海龙等^[6]进行了再生混凝土冲击试验，指出峰值应力和弹性模量具有应变率敏感性，取代率对峰值应力上升速度和幅度的影响不明显。Tang 等^[7]开展了地聚物再生混凝土冲击试验，结果表明抗压强度动态增长因子随再生骨料取代率增加而快速增大，地聚物再生混凝土表现出更显著的应变率敏感性。再生混凝土中掺入纤维构成纤维增强再生混凝土可以显著提高其强度、抗冲击性、延性和韧性等力学性能，进而扩大了再生混凝土的应用范围^[8-10]。Xie 等^[11]指出纤维对新拌再生混凝土工作性能产生不利影响，但通过桥接作用提高混凝土的力学性能。王兴国等^[12]研究了聚乙烯醇(PVA)纤维再生混凝土的冲击力学性能，结果表明 PVA 纤维降低了动态峰值应力，提高了动态峰值应变，对动态增长因子影响不明显。孔祥清等^[13]分析了混杂掺入钢-聚丙烯纤维对再生混凝土抗冲击性能的影响，结果表明，单掺钢纤维或混掺纤维均能提高再生混凝土的抗冲击性；相较于同等掺量下单掺钢纤维，混掺钢纤维和聚丙烯纤维对

再生混凝土抗冲击性能的提高效果更好。综上，目前对于再生混凝土在地震量级应变率下的压缩试验和高应变率下的冲击试验已有较多研究，而对于纤维再生混凝土多为高应变率下的冲击性能研究。为推广纤维再生混凝土的工程应用，有必要对纤维再生混凝土在地震量级应变率下动态力学性能进行研究。

本文设计了 3 种再生粗骨料取代率和 5 种体积含量为 1.5vol% 的钢纤维和塑钢混掺纤维组合，研究了钢-塑钢混杂纤维再生混凝土 (Hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete, HyF/RAC) 在准静态加载应变率下和 3 种地震量级加载应变率下的力学性能，探讨了纤维组合、再生粗骨料取代率和加载应变率对混杂纤维再生混凝土的峰值应力、峰值应变、弹性模量和压缩韧性等力学特征参数的影响规律，提出了适用于地震量级加载应变率下的 HyF/RAC 动态损伤本构模型，以期对纤维再生混凝土的结构设计和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料和配合比

采用细度模数为 2.9 的天然河砂(细骨料)、普通硅酸盐水泥 (P-O 42.5) 及粒径为 5~20 mm 的连续级配天然粗骨料和再生粗骨料进行混凝土配合比设计。所用纤维为山东欧德化纤制品有限公司生产的端钩钢纤维 (Hooked-end steel fiber, HES) 和塑钢纤维 (Macro-polypropylene fiber, MPP)，其性能属性如表 1 所示。纤维总体积含量为 1.5vol%，HES 纤维的体积分数在 0.5vol%~1.5vol% 之间变化，MPP 纤维的体积分数在 0vol%~1.0vol% 之间变化，设计 5 种不同的纤维组合形式。将再生粗骨料等质量取代混合料中的天然粗骨料，设计 0wt%、50wt% 和 100wt% 3 种质量取代率的再生混凝土，

含再生粗骨料混合料中的吸附水用水量由再生粗骨料实际含水率和吸水率确定。本文设计 3 个系

列 (A、B 和 C 系列), 每个系列中不掺纤维试件作为基准组, 具体配合比如表 2 所示。

表 1 端钩钢纤维 (HES) 和塑钢纤维 (MPP) 属性
Table 1 Properties of hooked-end steel fiber (HES) and macro-polypropylene fiber (MPP)

Fiber type	Equivalent diameter/mm	Length/mm	Aspect ratio	Density/(kg·m ⁻³)	Tensile strength/MPa	Young's modulus/GPa
HES	0.75	35	47	7 800	1 120	200.0
MPP	0.94	28	30	910	580	5.5

表 2 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土 (HyF/RAC) 配合比设计
Table 2 Designed mix proportions of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete (HyF/RAC)

		kg/m ³							
Mix	Notation	Water	Cement	Sand	RCA	NCA	HES	MPP	AW
A0	NAC	251	467	639	0	1 044	0	0.00	0
A1	1.5%HES/NAC	251	467	639	0	1 044	117	0.00	0
A2	1.25%HES-0.25%MPP/NAC	251	467	639	0	1 044	98	2.28	0
A3	1.0%HES-0.5%MPP/NAC	251	467	639	0	1 044	78	4.55	0
A4	0.75%HES-0.75%MPP/NAC	251	467	639	0	1 044	59	6.83	0
A5	0.5%HES-1.0%MPP/NAC	251	467	639	0	1 044	39	9.10	0
B0	RAC(50%)	251	467	639	522	522	0	0.00	20
B1	1.5%HES/RAC(50%)	251	467	639	522	522	117	0.00	20
B2	1.25%HES-0.25%MPP/RAC(50%)	251	467	639	522	522	98	2.28	20
B3	1.0%HES-0.5%MPP/RAC(50%)	251	467	639	522	522	78	4.55	20
B4	0.75%HES-0.75%MPP/RAC(50%)	251	467	639	522	522	59	6.83	20
B5	0.5%HES-1.0%MPP/RAC(50%)	251	467	639	522	522	39	9.10	20
C0	RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	0	0.00	40
C1	1.5%HES/RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	117	0.00	40
C2	1.25%HES-0.25%MPP/RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	98	2.28	40
C3	1.0%HES-0.5%MPP/RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	78	4.55	40
C4	0.75%HES-0.75%MPP/RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	59	6.83	40
C5	0.5%HES-1.0%MPP/RAC(100%)	251	467	639	1 044	0	39	9.10	40

Notes: NAC—Natural aggregate concrete; RAC—Recycled aggregate concrete; RCA—Recycled coarse aggregate; NCA—Natural coarse aggregate; AW—Absorbed water; In *i*HES-*j*MPP/RAC(*k*), *i*—Volume fraction of HES, *j*—Volume fraction of MPP, *k*—Replacement ratio by mass of RCA.

1.2 试验方法

设计 4 种加载应变率 $\dot{\epsilon}$ 为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 和 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 应变率 10^{-5} s^{-1} 作为准静态加载应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 。试件采用几何尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体, 相同加载应变率设计 3 个试件进行试验, 4 种应变率加载工况下每组制备 12 个试件, 3 个系列共 216 个试件。在量程为 1 000 kN 电液伺服万能试验机 (济南中路昌试验机制造有限公司, WAW-1000D) 进行单轴压缩试验, 如图 1 所示。加载过程采用位移控制的等应变率加载方法, 为消除系统松弛和避免偏心加载, 正式加载前进行预加载至 10 kN 保持 60 s 并以相同速度卸载, 反复 3 次。然后以恒定应变率正式加载并采集数据, 直至试件破坏。轴向力直接由试验机测试系统自动采集。轴向位移通过试件中

部对称安装的两个电子千分表 (成都远恒精密测控技术有限公司, B531C) 采集, 标距长度为 100 mm。

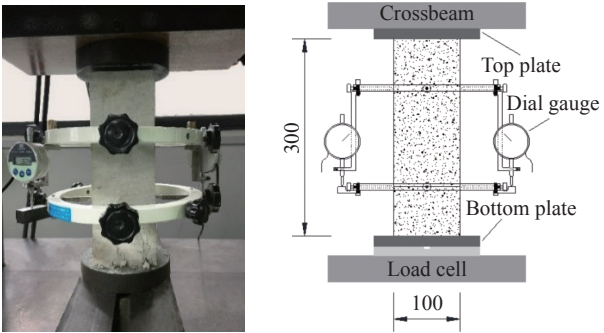


图 1 压缩试验加载装置 (单位: mm)
Fig. 1 Loading setup for compressive test (Unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 HyF/RAC 破坏形态

再生粗骨料取代率对混凝土破坏形态并无本

质上的影响，限于篇幅，本文仅对 C 系列在应变率 $10^{-5}\sim5\times10^{-3}\text{s}^{-1}$ 下的破坏形态进行分析和讨论。图 2 给出了每种应变率下 C0 和 C3 组试件对称侧面的破坏形态。准静态应变率下，当外荷载达到峰值应力点附近时，再生混凝土试件表面的角点和中部出现竖向和斜向细微裂缝，随着试件损伤积累，微裂缝进一步扩展，同时伴随新的裂缝产生，最终形成一条贯穿的斜裂缝。由于整个过程速度较平缓，在贯穿斜裂缝周围分布的竖向微裂缝有足够的时间在试件内部薄弱部位扩展，形成数量较多且具有一定长度的竖向微裂缝，如图 2(a) 中 C0-1 试件所示。随着应变率增加，试件表面的微裂缝萌生和扩展的形态和路径发生了改变。应变率越大，表面贯穿裂缝与试件端面的夹角越大。当应变率为 $5\times10^{-3}\text{s}^{-1}$ 时，表面形成平行于受压方向的竖向贯穿裂缝，且数量变为多条，如图 2(a) 中 C0-10 试件所示。另外，随着应变率增加贯穿裂缝扩展路径更平直，裂缝宽度更大，周围的微

裂缝数量和长度减小。在高应变率下，试件破坏过程中裂缝发展很快，破坏时会产生爆裂声，试件局部会被击溃剥落，不能保持整体性。由图 2(b) 可知，不同应变率下的 C3 组试件的破坏形态不同于 C0 组试件。试件内随机分布的纤维形成三维网架结构，对基体起到“箍筋”作用，使试件受到侧向被动压力，试件主要以劈裂形式破坏，且具有较好的整体性，纤维逐渐被拔出而显示出延性破坏。在相同应变率下，含纤维试件破坏后的裂缝宽度变小。在准静态应变率下，试件达到峰值应力后两端面受到试验机压盘的环箍效应，中部发生横向鼓胀，随之萌生微裂缝并向两端扩展，破坏前伴随的劈裂声持续较长时间。纤维与基体之间的作用导致裂缝扩展路径更复杂多变，试件最终以斜向贯穿裂缝形式破坏。在动态应变率下，试件横向鼓胀与裂缝形成基本同时发生，裂缝数量增多，并形成以斜向贯穿裂缝为主的剪切带，破坏形态与准静态应变率下类似。

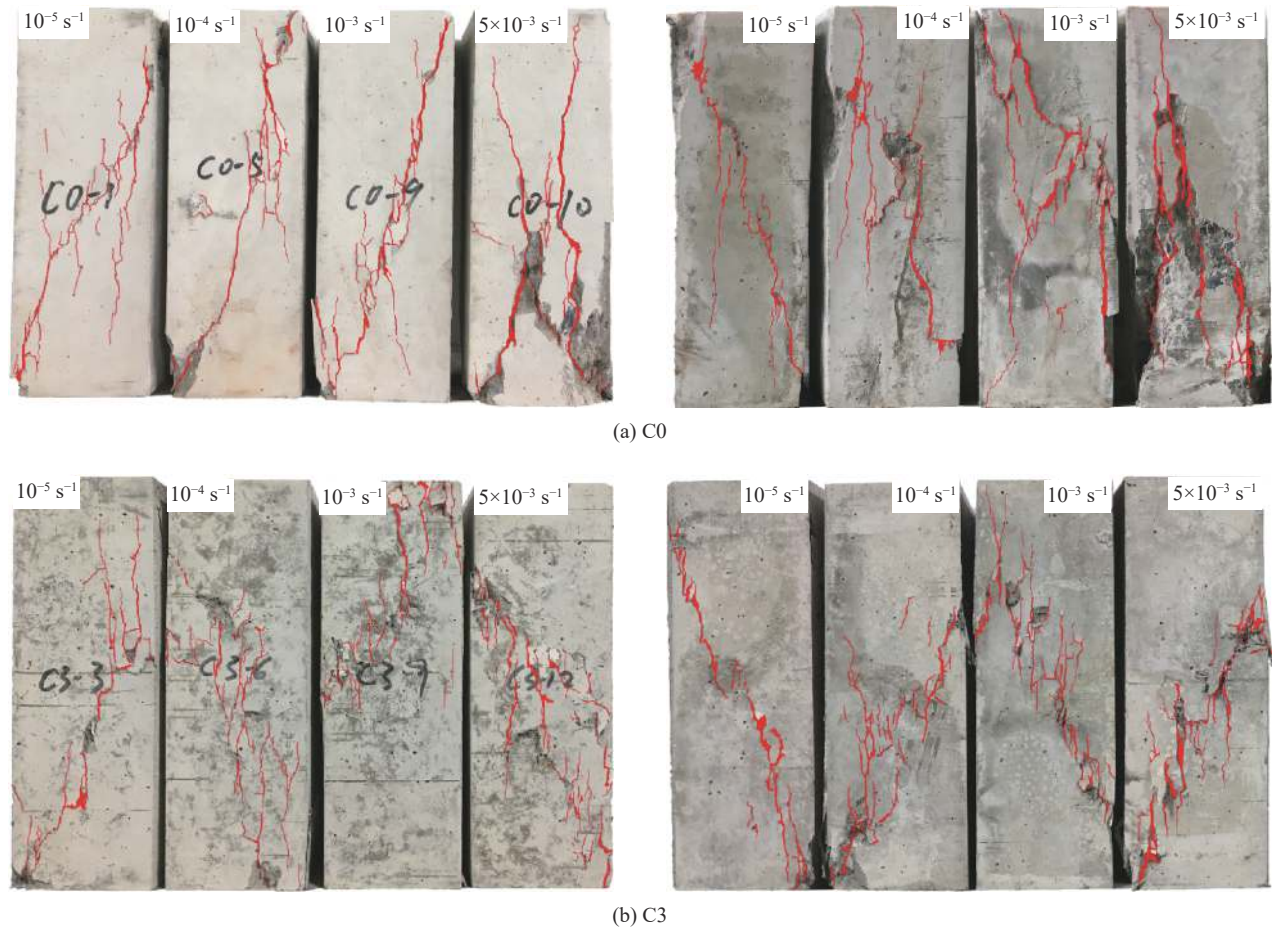
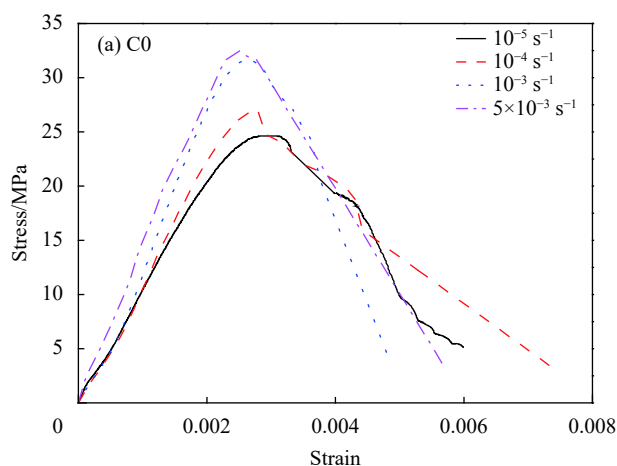


图 2 不同应变率下 HyF/RAC(C0 和 C3 组) 试件破坏形态

Fig. 2 Failure modes of C0 and C3 specimens for HyF/RAC at different strain rates

2.2 HyF/RAC 试验曲线

3个系列在不同应变率下应力-应变曲线形状比较相似,且曲线具有较好的连续性和光滑性。限于篇幅,本文仅提供C系列中的C0和C3组试验曲线进行分析,如图3所示。Feng等^[14]结合试件的破坏过程将准静态加载应变率下应力-应变全曲线分为线弹性阶段、微裂缝稳定扩展阶段、宏观裂缝不稳定扩展阶段和残余应力阶段。C0和C3组试件在上升段形状类似,随着应变率增加,上升段斜率、峰值应力逐渐增大,峰值应变逐步减小;线弹性阶段变化甚微,微裂缝稳定扩展阶段变短。C0和C3组试件在下降段存在明显差异。



应变率越高, C0组损伤发展速度越快,下降段越陡,即脆性特征越明显。动态应变率下,下降段没有出现拐点,即峰后曲线主要为宏观裂缝不稳定扩展阶段,无残余应力阶段,且残余应力很小。C3组试件达到峰值应力后裂缝的数量增加,宽度增加,因跨越裂缝和靠近裂缝尖端的纤维起到桥接作用,缓和裂缝尖端的应力集中,延缓裂缝的扩展速度,从而使试件的承载力下降速度减慢,塑性变形能力和延性提高。在应变率 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内, C3组下降段有明显的拐点,残余应力基本相同;在应变率 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 下,其下降段无明显拐点,残余应力变得更小。

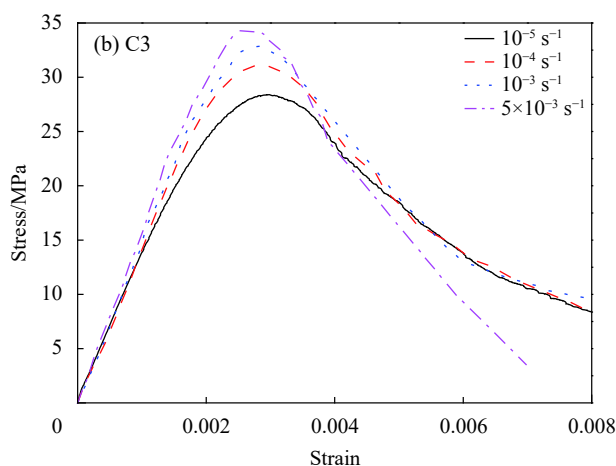


图3 不同应变率下 HyF/RAC(C0 和 C3 组) 试件应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of C0 and C3 specimens for HyF/RAC at different strain rates

2.3 HyF/RAC 力学特征参数

为探究混杂纤维再生混凝土的动态受压性能,本文从应力-应变曲线中提取力学特征参数,计算不同应变率条件下的A、B和C3个系列动态增长因子(Dynamic increase factor, F_D),并分析纤维、再生骨料及应变率对力学特征参数和 F_D 的影响。表3~表6列出了所有试件在不同应变率下力学特征参数,即峰值应力 σ^p 、峰值应变 ε^p 、弹性模量 E 和压缩韧性 T 。

2.3.1 HyF/RAC 峰值应力

峰值应力动态增长因子为 $F_D^{\sigma^p} = \sigma^p / \sigma_s^p$,其中 σ_s^p 为准静态峰值应力。图4和图5分别为不同应变率下 HyF/RAC 的峰值应力及其动态增长因子。由图4可知:A、B和C3个系列峰值应力随应变率增加而增大。在相同动态应变率下,3个系列中掺纤维组峰值应力大于基准组,且每个系列中

最大峰值应力组分别为A3、B5和C3,其最大增幅分别为23%、16%和16%。由此可说明,在动态应变率下,掺入纤维提高了峰值应力,且混杂纤维呈现出协同效应。尽管混凝土材料随机性引起的峰值应力离散性会弱化一部分应变率强化效应,由图5仍可看出,峰值应力动态增长因子与应变率基本呈线性变化关系。对于A0、B0和C0组,在应变率 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 下峰值应力相较于准静态应变率时最大提高幅度分别为10.9%、20.1%和31.9%。由于再生粗骨料自身缺陷及再生混凝土内部过多空隙导致试件整体性能差异较大,再生混凝土表现出更显著的应变率敏感性。A系列,在相同动态应变率下,含纤维组峰值应力动态增长因子均大于A0组,含纤维组的动态增长因子最高值分别为1.12(A3)、1.20(A1)和1.22(A2)。B系列,随着动态应变率增加,B0组峰值应力动态增长因

表 3 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应力 σ^p

Table 3 Results of peak stress σ^p of HyF/RAC at different strain rates

Mix	10 ⁻⁵ s ⁻¹		10 ⁻⁴ s ⁻¹		10 ⁻³ s ⁻¹		5×10 ⁻³ s ⁻¹	
	σ^p /MPa	C_v /%	σ^p /MPa	C_v /%	σ^p /MPa	C_v /%	σ^p /MPa	C_v /%
A0	31.3	1.58	32.4	2.84	33.7	3.15	34.7	0.00
A1	32.4	2.53	34.0	2.72	38.8	4.01	39.3	1.03
A2	32.9	4.31	36.3	0.98	39.1	1.27	40.1	5.14
A3	34.9	0.17	39.0	2.90	41.3	0.34	41.9	0.84
A4	31.5	3.59	32.8	5.40	35.2	4.22	36.9	4.41
A5	32.7	5.19	34.4	3.29	36.6	2.61	37.3	5.13
B0	28.3	1.00	29.1	3.87	32.4	1.46	34.0	2.29
B1	29.6	2.15	30.8	1.15	34.6	4.71	35.7	4.56
B2	31.9	1.30	33.6	5.27	34.2	3.93	36.1	3.73
B3	31.2	0.23	32.4	1.97	35.7	1.98	37.2	6.84
B4	30.4	1.51	32.3	1.99	35.3	3.13	36.1	0.78
B5	31.6	1.59	33.7	1.70	37.3	0.57	38.3	2.22
C0	24.6	8.57	26.9	2.74	30.6	4.48	32.5	0.22
C1	26.2	4.04	27.8	3.89	31.6	1.14	32.4	3.45
C2	26.8	2.24	28.8	0.72	32.2	2.64	32.8	1.72
C3	28.4	2.69	31.1	0.68	33.0	2.69	34.4	3.63
C4	27.8	0.95	30.0	6.21	32.7	2.60	33.1	5.32
C5	26.3	0.79	27.3	2.23	30.6	5.46	32.7	0.43

Note: C_v —Coefficients of variation.

表 4 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应变 ε^p

Table 4 Results of peak strain ε^p of HyF/RAC at different strain rates

Mix	10 ⁻⁵ s ⁻¹		10 ⁻⁴ s ⁻¹		10 ⁻³ s ⁻¹		5×10 ⁻³ s ⁻¹	
	$\varepsilon^p/10^{-3}$	C_v /%	$\varepsilon^p/10^{-3}$	C_v /%	$\varepsilon^p/10^{-3}$	C_v /%	$\varepsilon^p/10^{-3}$	C_v /%
A0	2.376	4.73	2.330	8.37	2.224	1.67	2.101	9.02
A1	2.410	2.87	2.340	7.71	2.256	10.77	2.199	11.43
A2	2.413	1.55	2.390	0.74	2.378	11.52	2.321	6.02
A3	2.599	8.68	2.555	3.18	2.528	3.98	2.500	3.42
A4	2.419	2.70	2.425	6.95	2.413	10.11	2.312	11.72
A5	2.443	6.27	2.432	8.62	2.330	6.22	2.254	1.68
B0	2.593	3.67	2.469	0.79	2.370	3.18	2.325	6.08
B1	2.651	9.27	2.631	6.65	2.620	6.75	2.510	6.20
B2	2.673	3.61	2.645	9.62	2.592	5.28	2.481	9.76
B3	2.760	5.68	2.708	7.48	2.631	7.32	2.610	5.55
B4	2.583	0.39	2.544	2.43	2.544	7.28	2.533	8.45
B5	2.666	2.41	2.658	6.79	2.630	4.84	2.591	2.11
C0	2.814	4.46	2.726	3.44	2.621	2.51	2.524	2.73
C1	2.933	1.81	2.815	11.43	2.708	5.28	2.694	0.33
C2	2.950	1.47	2.813	1.33	2.769	2.75	2.733	2.20
C3	2.941	1.62	2.853	0.99	2.845	6.83	2.648	3.47
C4	3.041	3.67	2.996	4.01	2.891	0.79	2.861	9.33
C5	2.981	3.50	2.859	1.67	2.754	7.66	2.701	0.46

子逐渐增大且在应变率 10⁻³ s⁻¹ 和 5×10⁻³ s⁻¹ 下大于 B2 和 B3 组；在相同动态应变率下，含纤维组的动态增长因子最高值分别为 1.07(B5)、1.18(B5) 和 1.21(B5)。C 系列，在相同动态应变率下，C0 组峰值应力动态增长因子大于含纤维组，含纤维组的动态增长因子最高值分别为 1.09(C3)、1.21(C1) 和 1.24(C5)。含纤维试件在外荷载作用下受到侧

向被动压力，应变率越高侧向被动压力越大，纤维混凝土的动态增长因子越大。在本文加载应变率范围内，纤维的掺入提高了普通混凝土峰值应力的应变率敏感性，降低了再生混凝土峰值应力的应变率敏感性。

2.3.2 HyF/RAC 峰值应变
峰值应变动态增长因子为 $F_D^{\varepsilon^p} = \varepsilon^p / \varepsilon_s^p$ ，其中 ε_s^p

表 5 不同应变率下 HyF/RAC 弹性模量 *E*
Table 5 Results of elastic modulus *E* of HyF/RAC at different strain rates

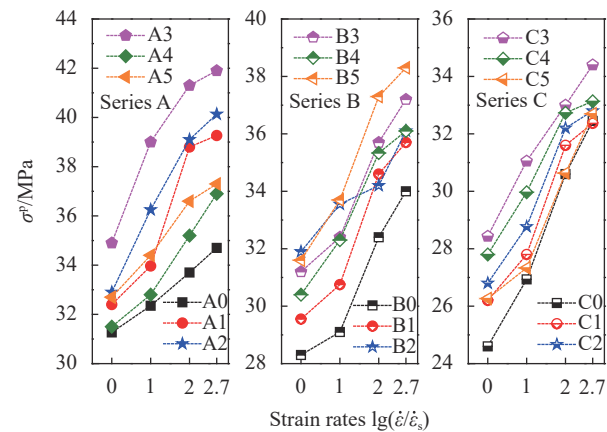
Mix	10 ⁻⁵ s ⁻¹		10 ⁻⁴ s ⁻¹		10 ⁻³ s ⁻¹		5×10 ⁻³ s ⁻¹	
	<i>E</i> /GPa	<i>C_v</i> /%	<i>E</i> /GPa	<i>C_v</i> /%	<i>E</i> /GPa	<i>C_v</i> /%	<i>E</i> /GPa	<i>C_v</i> /%
A0	29.5	3.86	33.2	9.20	37.6	9.87	41.2	2.37
A1	31.8	8.13	35.3	1.34	38.6	3.95	42.0	9.60
A2	32.1	7.05	34.3	1.09	38.3	4.35	41.4	4.92
A3	34.1	7.30	34.1	2.88	34.7	0.61	38.1	10.65
A4	32.5	7.19	33.7	5.58	35.7	4.14	37.4	11.49
A5	33.9	4.75	34.0	5.06	35.0	3.23	38.2	2.85
B0	24.8	7.61	26.2	8.55	28.6	3.24	30.8	2.69
B1	25.6	9.08	26.2	0.91	28.6	5.58	30.8	9.23
B2	27.1	0.22	28.1	11.70	29.4	8.73	33.9	8.52
B3	27.3	0.70	28.7	9.85	31.0	6.90	31.7	1.92
B4	28.2	1.65	29.9	3.60	33.2	0.66	33.6	6.38
B5	27.2	4.70	27.8	11.33	28.9	9.67	32.9	11.19
C0	18.7	3.06	21.9	11.63	24.9	6.18	26.7	9.24
C1	20.7	8.05	22.8	11.44	26.3	11.54	27.8	7.55
C2	23.2	7.56	24.3	2.31	26.1	1.54	29.5	10.99
C3	25.1	6.06	26.3	4.08	28.0	11.09	28.1	2.47
C4	22.9	0.56	23.3	2.43	25.2	4.69	28.3	9.75
C5	22.7	0.56	24.4	9.26	27.9	3.17	29.2	9.11

表 6 不同应变率下 HyF/RAC 压缩韧性 *T*
Table 6 Results of compressive toughness *T* of HyF/RAC at different strain rates

Mix	10 ⁻⁵ s ⁻¹	10 ⁻⁴ s ⁻¹	10 ⁻³ s ⁻¹	5×10 ⁻³ s ⁻¹
	<i>T</i> /MPa	<i>T</i> /MPa	<i>T</i> /MPa	<i>T</i> /MPa
A0	0.042	0.044	0.046	0.043
A1	0.047	0.049	0.051	0.050
A2	0.047	0.051	0.053	0.047
A3	0.055	0.058	0.060	0.062
A4	0.047	0.048	0.052	0.053
A5	0.047	0.049	0.047	0.051
B0	0.041	0.043	0.043	0.045
B1	0.046	0.048	0.050	0.052
B2	0.049	0.051	0.053	0.056
B3	0.051	0.051	0.055	0.057
B4	0.048	0.050	0.054	0.057
B5	0.050	0.051	0.057	0.058
C0	0.038	0.040	0.043	0.045
C1	0.043	0.046	0.050	0.053
C2	0.048	0.049	0.051	0.057
C3	0.052	0.053	0.055	0.052
C4	0.051	0.054	0.054	0.057
C5	0.047	0.047	0.047	0.052

为准静态峰值应变。图 6 和图 7 分别表示 HyF/RAC 的峰值应变及其动态增长因子随应变率的变化规律。关于应变率对峰值应变的影响，文献 [3] 总结了 3 种观点：(1) 峰值应变随应变率增加而增大；(2) 峰值应变随应变率增加无明显变化；(3) 峰值应变随应变率增加而减小。本文的峰值应变数据离散性较大，但从整体上来说，峰值应变随应变率增加仍表现为降低趋势，表明增加应变率提

高了 HyF/RAC 脆性，降低了其延性。在外荷载作用下，混凝土的变形主要由弹性变形、黏性变形和裂纹形成及扩展 3 部分组成^[15]。随着应变率增加，黏性效应降低^[16]，砂浆及界面过渡区裂纹的扩展数量减少、路径缩短及速度变快，从而导致宏观的峰值应变降低。由图 6 可知，在相同应变率下普通混凝土峰值应变小于再生混凝土。掺入纤维提高了混凝土的适应变形能力，增加了延性，



$\dot{\epsilon}$ —Strain rate; $\dot{\epsilon}_s$ —Quasi-static strain rate

图4 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应力 σ^p

Fig. 4 Peak stress σ^p of HyF/RAC at different strain rates

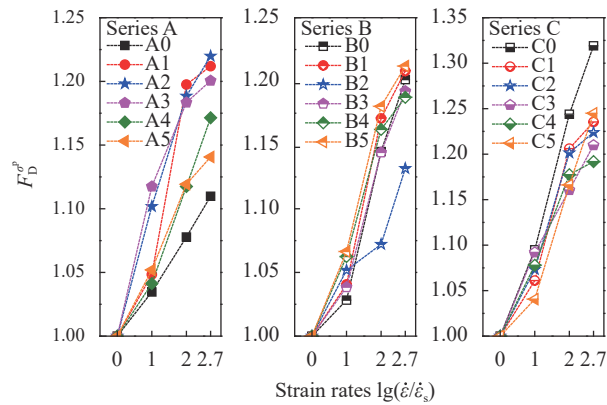


图5 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应力动态增长因子 $F_D^{\sigma^p}$

Fig. 5 Dynamic increase factor $F_D^{\sigma^p}$ of peak stress of HyF/RAC at different strain rates

在相同应变率下其峰值应变大于3个系列中基准组，增幅最大的组分别为A3(19%)、B3(12%)和C4(13%)，混杂纤维表现出优异的协同效应。从图7可知，峰值应变的动态增长因子随应变率增加基本呈线性递减变化。A0、B0和C0组的峰值应变动态增长因子在应变率 $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 下分别减少12%、10%和10%，表明再生粗骨料对混凝土峰值应变动态增长因子并无明显影响。另外，在相同应变率下含纤维组峰值应变动态增长因子下降幅度小于基准组，表明掺入纤维降低了混凝土峰值应变的应变率敏感性。这是由于掺入纤维可延缓混凝土初期开裂，并提高其整体变形能力。在动态应变率下，纤维能缓冲混凝土快速加载时内部裂缝急剧扩展，延长了破坏过程，淡化了峰值应变的应变率敏感性^[17]。相较于纤维再生混凝土，普通混凝土中纤维与砂浆基体的粘结作用更大，

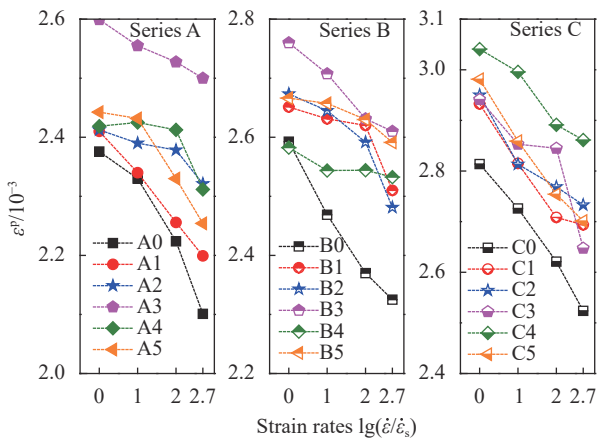


图6 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应变 ϵ^p

Fig. 6 Peak strain ϵ^p of HyF/RAC at different strain rates

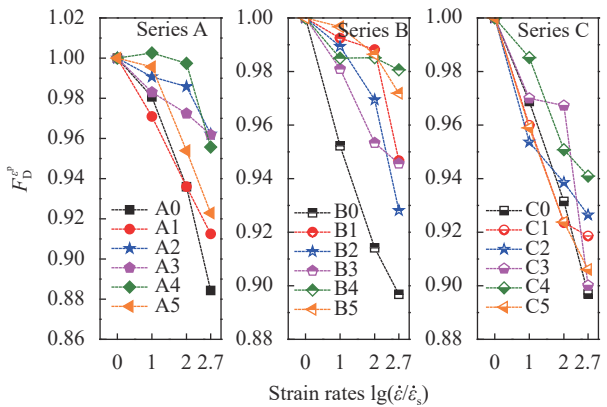


图7 不同应变率下 HyF/RAC 峰值应变动态增长因子 $F_D^{\epsilon^p}$

Fig. 7 Dynamic increase factor $F_D^{\epsilon^p}$ of peak strain of HyF/RAC at different strain rates

对峰值应变应变率敏感性的淡化更明显，A系列中纤维组的峰值应变动态增长因子大于C系列，且混杂纤维组效果更显著。

2.3.3 HyF/RAC 弹性模量

为方便计算，本文取40%峰值应力处的割线模量作为弹性模量代表值。弹性模量动态增长因子为 $F_D^E = E/E_s$ ，其中 E_s 为准静态弹性模量。图8和图9分别表示HyF/RAC弹性模量及其动态增长因子随应变率的变化规律。由图8可知，HyF/RAC弹性模量随应变率增加而增大。在动态应变率下混凝土弹性模量随再生粗骨料取代率增大而减小，与准静态应变率下情况一致。究其原因：一方面，随着应变率增加，微裂纹产生、扩展、串联直至形成宏观裂缝的路径越来越平直，更多的裂缝穿越骨料。骨料的弹性模量高于砂浆和界面过渡区，则混凝土弹性模量随应变率增加而增大^[4]；另一方面，再生骨料的表面被弹性模量较低的旧砂浆

包裹，故再生混凝土的弹性模量低于普通混凝土^[6]。在准静态应变率下，每个系列含纤维组弹性模量均大于基准组，增幅最大的组别分别为 A3 (15%)、B4 (14%) 和 C3 (35%)。然而，应变率越大纤维的增强效果越不明显。在动态应变率下，A 系列中 A1 和 A2 组弹性模量大于 A0 组；B 和 C 系列中含纤维组弹性模量均大于基准组，且混杂纤维协同效应显著。产生这一结果的原因可能是掺入适量弹性模量高的 HES 纤维提高混凝土的刚度。虽然 MPP 纤维与 HES 纤维混杂在混凝土基体中能形成网架结构并降低混凝土受损面积和程度，但含量过高的 MPP 纤维在高应变率作用下其低弹性模量的劣势超过混杂纤维的协同效应^[8, 18]，在普通混凝土中尤为突出。再生混凝土因其自身缺陷拥有较低的弹性模量，掺入纤维减少其内部过多空隙，增强彼此粘结力，进而提高再生混凝土整体刚度。混杂纤维再生混凝土在动态应变率作用下表现出

显著协同效应，纤维、再生骨料、砂浆及相互间界面的细观受力机制还需做进一步的细观研究。从图 9 可知，HyF/RAC 弹性模量动态增长因子随应变率增加呈近似线性或指数增大。A 系列与 C 系列，在相同动态应变率下，A0 组动态增长因子小于 C0 组，基准组动态增长因子大于含纤维组，单掺 HES 纤维组动态增长因子大于混杂纤维组。这一现象表明再生粗骨料提高了混凝土弹性模量的应变率敏感性，纤维降低了混凝土弹性模量的应变率敏感性。

2.3.4 HyF/RAC 压缩韧性

压缩韧性反映试件从开始加载到发生破坏过程中吸收能量的能力，目前关于压缩韧性的定义还未有统一的评价标准^[19]，本文采用达到峰值应力时的应力-应变曲线与应变坐标轴所围成的面积表征^[3, 18]。压缩韧性动态增长因子为 $F_D^T = T/T_s$ ，其中 T_s 为准静态压缩韧性。不同应变率下 HyF/RAC 的压缩韧性及其动态增长因子的变化情况，如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知：HyF/RAC 压缩韧性随应变率增加而增大，与文献^[18]结论一致。在准静态应变率下，普通混凝土的压缩韧性大于再生混凝土，随应变率增加，二者差异越来越小。相同应变率下，3 个系列中基准组掺入纤维提高了其压缩韧性，且对 B 和 C 系列的影响更明显。与单掺 HES 纤维对比，3 个系列中混杂纤维在压缩韧性方面表现出显著协同效应。例如，A 系列中，A3 组的压缩韧性表现最佳，最大增幅为 46%，A2、A4 和 A5 组与 A1 组差别不大。B 系列中，混杂纤维组 (B2~B5) 压缩韧性均大于单掺 HES 纤维组 (B1)，其中 B5 组增幅最大 (32%)。C 系列中，C2~C4 组压缩韧性大于 C1 组，其中 C4 组增幅最大

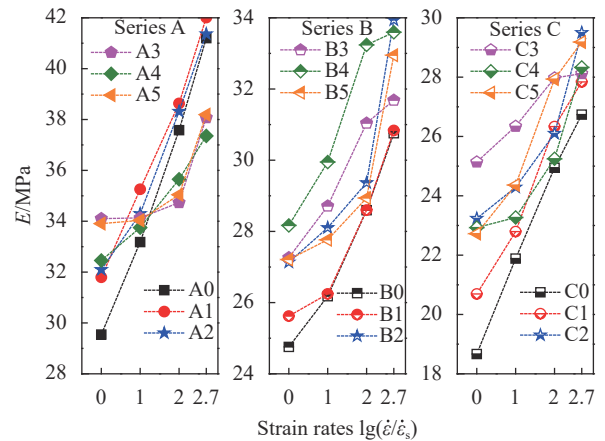


图 8 不同应变率下 HyF/RAC 弹性模量 E

Fig. 8 Elastic modulus E of HyF/RAC at different strain rates

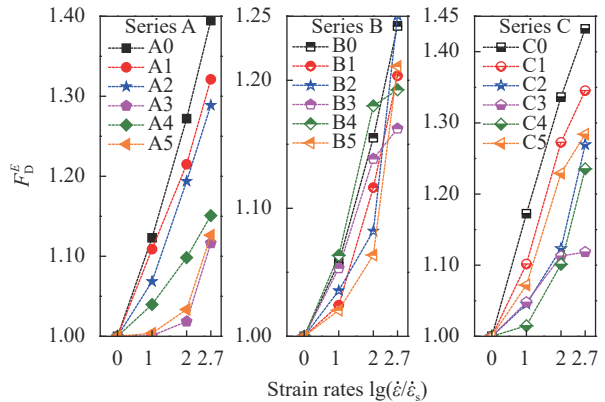


图 9 不同应变率下 HyF/RAC 弹性模量动态增长因子 F_D^E

Fig. 9 Dynamic increase factor F_D^E of elastic modulus of HyF/RAC at different strain rates

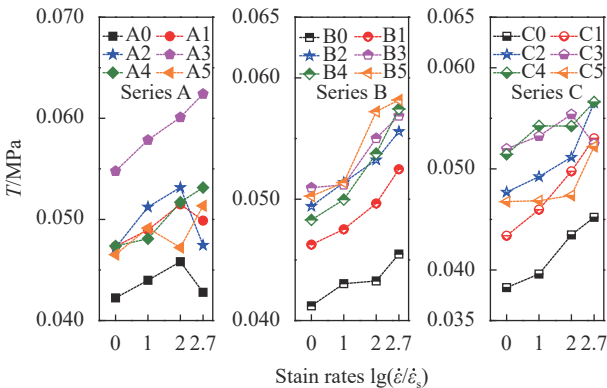


图 10 不同应变率下 HyF/RAC 压缩韧性 T

Fig. 10 Compressive toughness T of HyF/RAC at different strain rates

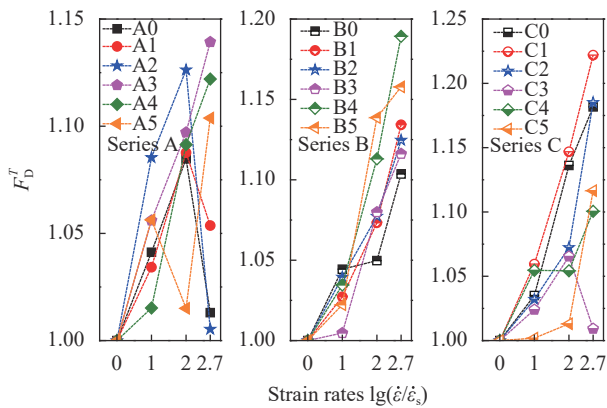


图 11 不同应变率下 HyF/RAC 压缩韧性动态增长因子 F_D^T
Fig. 11 Dynamic increase factor F_D^T of compressive toughness of HyF/RAC at different strain rates

(37%)。原因分析：当混凝土破坏时，试件内随机分布的纤维从基体中拔出的过程中吸收了大量能量，提高了其压缩韧性。同时，纤维延迟了裂缝扩展和改变了裂缝路径，进而降低了混凝土的脆性。由图 11 可知，在应变率 10^{-3}s^{-1} 和 $5\times10^{-3}\text{s}^{-1}$ 下，试件的随机性和离散性造成个别组的动态增长因子降低。随着应变率增加，3 个系列压缩韧性动态增长因子整体基本呈增大趋势。相同动态应变率下，C0 组的动态增长因子大于 A0 和 B0 组，表明再生粗骨料提高了混凝土压缩韧性的应变率敏感性；A 和 B 系列混杂纤维组的压缩韧性动态增长因子大于基准组，C 系列基准组大于混杂纤维组，表明混杂纤维提高普通混凝土压缩韧性的应变率敏感性，降低再生混凝土压缩韧性的应变率敏感性。

2.3.5 讨论

由上述结果可知，相同应变率下纤维混凝土的力学特征参数优于未掺纤维混凝土。这主要是由于混凝土内部随机分布的纤维将混凝土内部集中应力进行应力重分布，缓和了裂缝尖端的应力集中并阻止了裂缝扩展^[14]。HES 纤维是一种亲水材料，其周围水化反应充分并在 HES 纤维表面形成致密界面过渡区^[20]。随着荷载增大，当 HES 纤维拉力大于其与基体之间的粘结力时，HES 纤维仍具有一定的传荷能力，在被拔出的过程中发生滑移破坏并吸收能量，有效改善混凝土峰后强度，提高其韧性^[18-19]。适量的 MPP 纤维等体积取代 HES 纤维，与 HES 纤维形成网状结构，可以提高 HES 纤维与基体的粘结强度。然而，MPP 纤维是一种疏水材料，其界面过渡区中的水膜有助于有

害晶体生成，而这些晶体只是粘附在 MPP 纤维表面，因而其与基体之间的粘结强度弱于 HES 纤维^[20]。如果 MPP 纤维添加过多，将增加混凝土内部缺陷，进而导致其强度和韧性下降。由图 4、图 6、图 8 和图 10 可知，当 HES 纤维含量大于 MPP 纤维时，相同应变率下混杂纤维表现出显著的协同效应。

3 HyF/RAC 动态损伤本构模型确定

3.1 现有模型比较

应力-应变关系是评价混杂纤维再生混凝土动态性能的重要指标之一。另外，通过理论分析和数值模拟对混杂纤维再生混凝土结构在地震荷载作用下的性能进行评价，须有可靠的应力-应变关系。一些学者提出了适用于不同材料在不同应变率范围内的典型动态本构模型，表 7 列出了每种模型的参数取值和适用范围。这些模型可分为 3 类：(1) 采用多项式、分式、幂函数或指数函数等数学描述；(2) 基于损伤模型修正；(3) 基于 ZWT 模型修正。由表 7 可知，Ibrahim 等^[21]采用的表达式简单，参数少，且与试验结果拟合较好，但未涉及材料的损伤演化过程。Zhou 等^[22]和 Hou 等^[23]基于统计理论提出的动态损伤本构模型参数意义表征明确，但统计损伤本构理论仍缺少严格的理论基础^[24]。Sun 等^[25]基于高应变率下损伤的延迟效应提出了损伤演化方程，未涉及低应变率下的适用性。Zhang 等^[26]和王礼立等^[27]基于 ZWT 模型提出的动态损伤本构模型参数多，且没有给出确定参数取值的拟合公式^[28]。

3.2 HyF/RAC 修正模型

针对上述模型存在的问题，本文通过修正混凝土结构设计规范 (GB/T 50010—2010^[29]) 中单轴受压本构模型参数，建立适用于 HyF/RAC 动态本构模型。规范中的混凝土单轴受压应力-应变曲线表达式如下：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma^p n x / (n - 1 + x^n) & (x \leq 1) \\ \sigma^p x / [\alpha (x - 1)^2 + x] & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

其中： $n = E\sigma^p / (E\sigma^p - \sigma^p)$ ； $x = \varepsilon / \varepsilon^p$ ； σ 和 ε 分别为应力和应变； α 为曲线下降段形状参数。

通过回归分析拟合了所有应力-应变曲线中的特征参数 (σ^p 、 ε^p 和 E) 和形状参数 α ，拟合方程考虑了纤维增强指数 (R_V)、 r_g 和应变率 ($\dot{\varepsilon}$) 的影响。

在已有研究中一般采用纤维掺量与其长径比的乘积定义纤维增强指数。然而，纤维的种类和形状及混杂纤维的几何特征等因素并没有考虑^[30-31]。

表 7 现有压缩动态本构模型

Table 7 Review of dynamic constitutive models under compression

Reference	Model	Parameter	Application range
Ibrahim et al ^[21]	$y = \frac{Ax + (B - 1)x^2}{1 + (A - 2)x + Bx^2}$ $A(A - 2) - B + 1 \geq 0$ $A + B > 1$ $\sigma = \sigma_m(1 - D) = E\varepsilon(1 - D)$	$A = 3.6 \exp\left(9.0 \times 10^{-8} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \left(1 + 0.01R_V^{0.82}\right)\right)$ $B = 0.22 \exp\left(3.8 \times 10^{-7} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \left(1 + 0.002R_V^{0.82}\right)\right)$	$25 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 125 \text{ s}^{-1}$ $1.2\% \leq V \leq 1.4\%$
Zhou et al ^[22]	$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F_0}\right)^m\right]$ $\sigma = \sigma_m(1 - C_n D) = E\varepsilon(1 - C_n D)$	$F_0 = 3.3578 \ln \dot{\varepsilon} - 10.6562$ $m = 1.2804 \ln \dot{\varepsilon} - 1.8711$ $F_0 = 0.0062 + 0.31V^{1.7} - 0.00167(0.1 + V) \ln \dot{\varepsilon}$ $m = -0.56 + 3V + (0.35 - 2V) \ln \dot{\varepsilon}$ $C_n = 0.977 - 1.4V + (0.004 + 0.25V) \ln \dot{\varepsilon}$	$19.8 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 281 \text{ s}^{-1}$
Hou et al ^[23]	$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F_0}\right)^m\right]$	$D = 0.35 - 8.2 \times 10^{-9} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) -$ $4.4V + 1.3 \times 10^{-7} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) V$	$\dot{\varepsilon} \leq 294 \text{ s}^{-1}$ $V \leq 5\%$
Sun et al ^[25]	$\sigma = \sigma_m(1 - D) = E\varepsilon(1 - D)$ $\dot{D} = AD(1 - D)$	$A = 234 + 1.3 \times 10^{-7} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) +$ $1718V - 8.6 \times 10^{-5} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) V$	$53 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 152 \text{ s}^{-1}$ $V \leq 6.0\%$
Zhang et al ^[26]	$\sigma = (1 - D)\sigma_m$ $\sigma_m = \sigma_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_1}\right) d\tau +$ $E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_2}\right) d\tau$ $\sigma_e(\varepsilon) = E\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3$ $D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon^{\text{th}}) \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon^{\text{th}}}{F_0}\right)^m\right] & (\varepsilon > \varepsilon^{\text{th}}) \end{cases}$ $\sigma = (1 - D)\sigma$	No fitting equation	$27 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 94 \text{ s}^{-1}$ $V \leq 0.2\%$
Wang et al ^[27]	$\sigma_m = \sigma_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_1}\right) d\tau +$ $E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_2}\right) d\tau$ $D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon^{\text{th}}) \\ K_D \dot{\varepsilon}^{\lambda - 1} (\varepsilon - \varepsilon^{\text{th}})^\kappa & (\varepsilon > \varepsilon^{\text{th}}) \end{cases}$	No fitting equation	$10^{-4} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^3 \text{ s}^{-1}$

Notes: $y = \sigma/\sigma^p, x = \varepsilon/\varepsilon^p$, σ —Stress, σ^p —Peak stress, ε —Strain, ε^p —Peak strain; R_V —Reinforcing index of hybrid fibers; D —Damage parameter; t —Loading time; τ —Delay time of stress; E_1, φ_1 —Elastic modulus and relaxation time at a low strain rate and frequency; E_2, φ_2 —Elastic modulus and relaxation time at a high strain rate and frequency; α, β —Elastic constant; K_D, λ, κ —Material parameter; ε^{th} —Strain threshold.

在本文中，混杂纤维增强指数计算如下：

$$R_V = \sum_{i=1}^n \kappa_i V_i \frac{l_i}{d_i} \frac{E_i}{E_{\text{HES}}} \tag{2}$$

其中： κ_i 为第*i*种纤维粘结系数； V_i 为第*i*种纤维体积掺量； l_i 为第*i*种纤维长度； d_i 为第*i*种纤维直径； E_i 和 E_{HES} 分别为第*i*种纤维和HES纤维弹性模量。在本文中，HES和MPP纤维的粘结系数分别设置为1和0.8^[32]。

采用平均相对误差 Err 评价模型的性能，其表达式如下：

$$\text{Err} = \sum \frac{|\text{Exp.} - \text{Pre.}|}{|\text{Exp.}|} \bigg/ N \tag{3}$$

其中：Exp.和Pre.表示实测值和预测值；*N*为本试验所有试验数据组数。

结合本文试验结果及对力学特征参数的定性分析结论，HyF/RAC力学特征参数的动态增长因子与应变率比的对数呈线性关系，一般采用下式进行表述^[33]：

$$F_D = 1 + a \lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s) \tag{4}$$

其中：参数*a*为应变率对动态增长因子的影响程度； $\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率； $\dot{\varepsilon}_s$ 为准静态加载应变率。

由相同应变率下特征参数的试验数据多元回归分析可知，参数 a 与纤维增强指数之间呈二次函数关系，与再生粗骨料替代率之间的关系可用幂函数拟合。因此，峰值应力、峰值应变和弹性模量动态增长因子与纤维增强系数、再生粗骨料取代率和应变率之间有如下关系：

$$F_D^{\sigma_p} = \sigma_p^p / \sigma_s^p = 1 + (0.07 - 0.04R_V + 0.07(R_V)^2 + 0.02(r_g)^{4.32}) \lg(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s) \tag{5}$$

$$F_D^{\epsilon_p} = \epsilon_p^p / \epsilon_s^p = 1 + (-0.03 + 0.11R_V - 0.13(R_V)^2 - 0.01(r_g)^{4.79}) \lg(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s) \tag{6}$$

$$F_D^E = E / E_s = 1 + (0.12 - 0.37R_V + 0.49(R_V)^2 + 0.02(r_g)^{338.96}) \lg(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s) \tag{7}$$

利用式 (5)~(7) 计算得到动态增长因子的预测值与实测值对比，如图 12 所示，误差在 $\pm 10\%$ 以内。Hou 等 [23] 也指出特征参数的变动通常在 $\pm 10\%$ 以内，在可接受的范围内。实测值与预测值之比的平均值基本等于 1，式 (5)~(7) 计算值均在 45° 线附近。标准差在 0.02~0.04 之间，变异系数在 5% 以内，平均相对误差在 1.20%~3.09% 之间，表明模型的波动小，预测性能较好 [8]。根据以上分析，通过本文提出的动态增长因子预测模型计算得到的预测值与实测值符合较好。

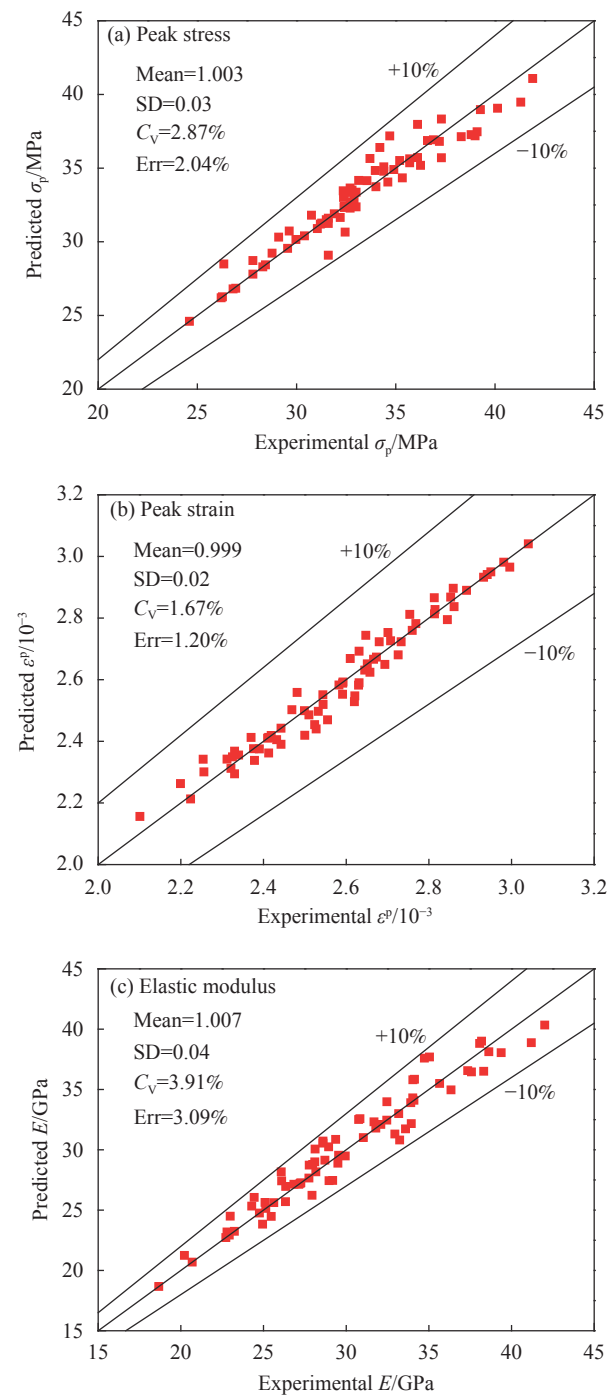
由式 (5)~(7) 计算得到的特征参数可确定方程 (2) 中的上升段参数 n ，下降段的参数 α 通过最小二乘法拟合每条试验曲线得到拟合值。表 8 列出了所有试验曲线的参数 α 拟合值。拟合曲线与试验曲线的相关系数均大于 0.93，表明参数 α 拟合值代入式 (1) 能很好地描述曲线下降段。

依据表 8 中参数 α 拟合值，参数 α 与纤维增强指数、再生粗骨料取代率和应变率的关系式如下：
 $\alpha = 1.61 - 1.26R_V + 2.73r_g + (0.30R_V + 0.59r_g - 0.35) \lg \dot{\epsilon} \quad (R^2 = 0.83) \tag{8}$

由式 (8) 可知，在恒定应变率下，参数 α 与纤维增强指数和再生粗骨料取代率之间呈线性关系。参数 α 与纤维增强指数之间成反比，即纤维增强指数越大，曲线下降段越平缓；参数 α 与再生粗骨料取代率之间成正比，即再生粗骨料取代率越高，曲线下降段越陡峭。保持纤维增强指数和再生粗骨料取代率不变，参数 α 与应变率的对数呈线性关系。

图 13 和图 14 为不同应变率下 C0 和 C3 组试

验曲线与不同模型曲线的对比。可以看出，Hou 等 [23] 提出的模型和本文修正模型曲线的上升段与试验曲线拟合良好，王礼立等 [27] 提出的模型高估了曲线上升段斜率，但二者均低估了峰值应力。对于下降段而言，王礼立等 [27] 提出的模型拟合效



SD—Standard deviation; Err—Mean relative error

图 12 HyF/RAC 应力-应变曲线特征参数预测模型性能

Fig. 12 Performance of prediction models for characteristic indices of HyF/RAC stress-strain curves

表 8 HyF/RAC 修正模型参数 α 拟合值
Table 8 Fitted results of parameter α in modified constitutive models for HyF/RAC

Mix	$\dot{\epsilon}$							
	10^{-5} s^{-1}		10^{-4} s^{-1}		10^{-3} s^{-1}		$5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	
	Fitted value	R^2	Fitted value	R^2	Fitted value	R^2	Fitted value	R^2
A0	3.434	0.991	3.399	0.946	2.597	0.953	2.285	0.940
A1	1.882	0.978	1.175	0.998	1.699	0.986	1.352	0.973
A2	1.386	0.999	1.401	0.997	1.020	0.981	1.039	0.994
A3	1.442	0.997	1.912	0.992	1.607	0.965	1.650	0.974
A4	2.219	0.994	2.431	0.970	2.057	0.965	1.466	0.984
A5	2.600	0.998	2.633	0.984	2.288	0.971	1.757	0.992
B0	3.524	0.991	3.742	0.994	2.589	0.942	3.053	0.997
B1	1.440	0.976	1.125	0.983	1.225	0.997	1.873	0.996
B2	1.932	0.985	2.124	0.991	2.001	0.996	1.583	0.979
B3	2.026	0.994	1.636	0.999	2.274	0.988	2.297	0.984
B4	1.876	0.990	2.683	0.992	2.305	0.994	2.613	0.935
B5	2.457	0.994	3.036	0.997	2.873	0.940	2.496	0.984
C0	3.173	0.978	2.958	0.978	3.609	0.986	4.137	0.954
C1	1.552	0.993	1.657	0.976	2.280	0.976	2.749	0.993
C2	1.673	0.975	2.013	0.999	2.259	0.999	2.364	0.953
C3	2.059	0.998	2.149	0.999	2.278	0.998	2.732	0.996
C4	1.868	0.976	2.174	0.997	3.339	0.968	2.842	0.934
C5	2.218	0.971	2.859	0.990	3.483	0.964	3.394	0.993

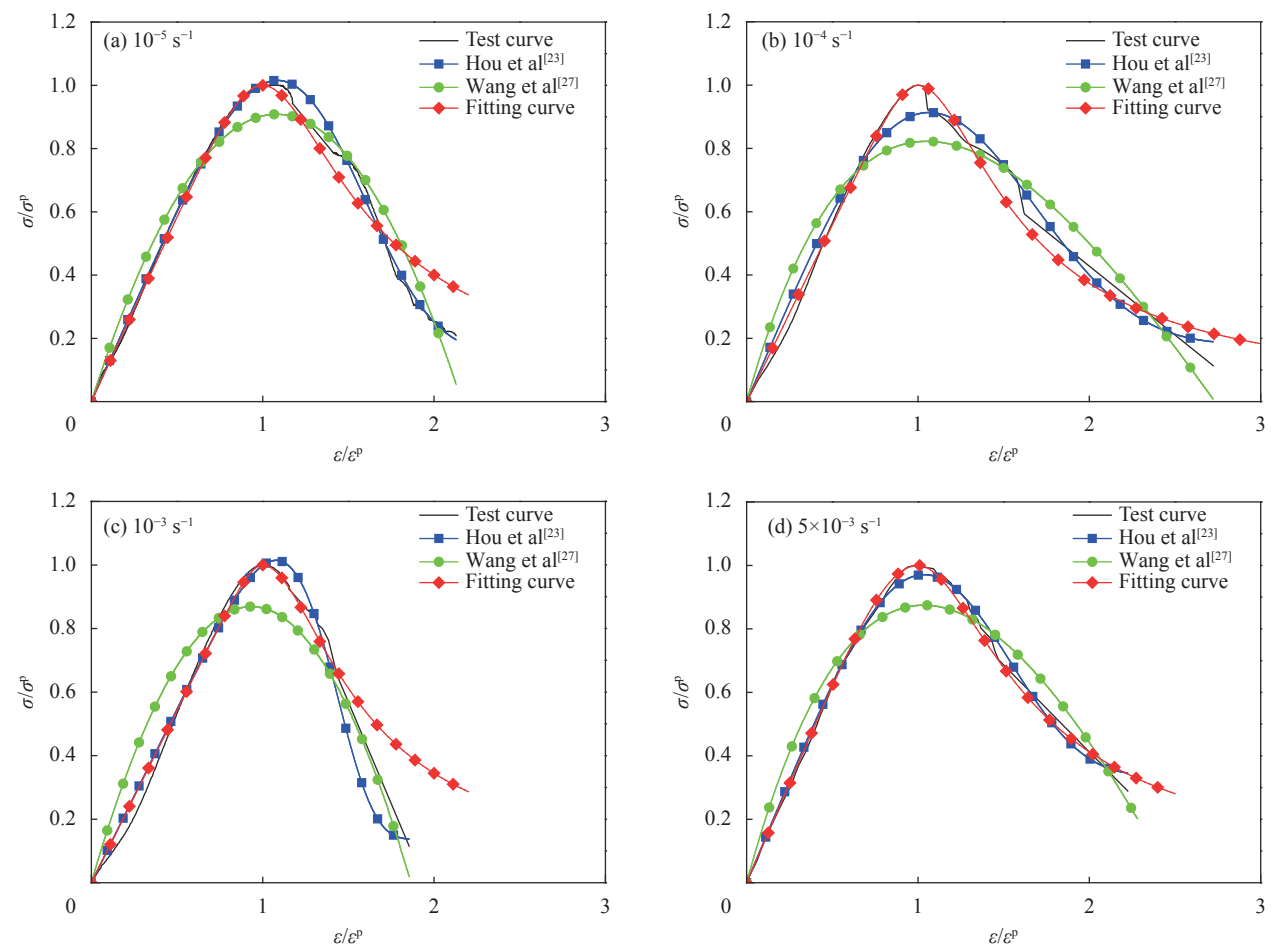


图 13 不同应变率下 HyF/RAC(C0 组) 试验曲线与各模型曲线对比

Fig. 13 Comparison of experimental and theoretical stress-strain curves of C0 for HyF/RAC at different strain rates

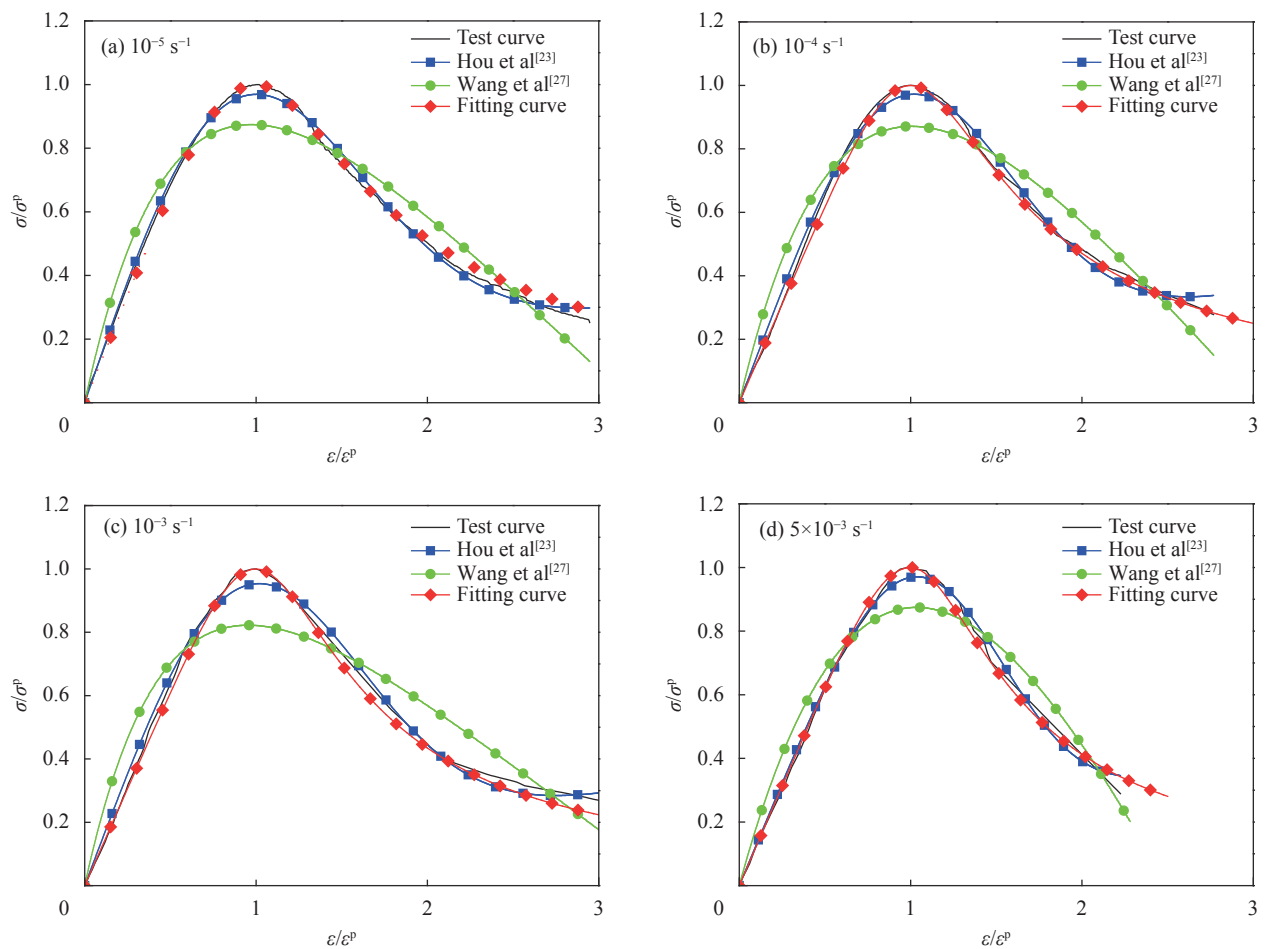


图 14 不同应变率下 HyF/RAC(C3 组) 试验曲线与各模型曲线对比

Fig. 14 Comparison of experimental and theoretical stress-strain curves of C3 for HyF/RAC at different strain rates

果较差，Hou 等^[23]提出的模型和本文修正模型拟合效果良好。由于未掺纤维的 C0 组试件脆性破坏造成曲线下降段的较大离散性，相对于 Hou 等^[23]提出的模型，本文修正模型的拟合效果略差；C3 组试件在曲线下降段具有一定的延性，离散性小，Hou 等^[23]提出的模型和本文修正模型拟合效果良好，然而其参数与纤维增强系数、再生粗骨料取代率和应变率之间无明显相关性。由上述对比分析可知，本文提出的修正模型考虑了纤维增强系数、再生粗骨料取代率和应变率的影响，并较好描述了 HyF/RAC 动态应力-应变关系。本文其他组的试验曲线拟合也可得到相似的结果。

式 (5)~(8) 应用范围为纤维总掺量为 1.5vol%，纤维增强指数在 0.242~0.705 之间，再生粗骨料取代率为 0~100%，应变率在 10^{-5} ~ 5×10^{-3} /s 之间。

3.3 HyF/RAC 动态损伤因子

混凝土的损伤过程是由于材料内部的微空隙

和微裂纹萌生和扩展导致宏观力学性能的软化行为，引入损伤因子 D 来描述混凝土的退化程度。本文采用李庆斌等^[34]提出的动态损伤因子与准静态损伤因子之间的关系，基于 Feng 等^[14]提出的准静态损伤演化方程建立动态损伤演化方程，用于描述不同应变率下混杂纤维再生混凝土的损伤增长，其表达式如下：

$$D = 1 - \left[1 + b(\varepsilon - \varepsilon^{th}) \right] \left[1 - D_s(\varepsilon / F_D^{\varepsilon^p}) \right] \tag{9}$$

$$D_s = \begin{cases} 1 - \frac{\left(n \frac{\sigma_s^p}{\varepsilon_s^p} \right)^2}{E_s E_r \left[n - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s^p} \right)^n \right]^2} & (\varepsilon \leq \varepsilon_s^p) \\ 1 - \frac{\left(\frac{\sigma_s^p}{\varepsilon_s^p} \right)^2}{E_s E_r \left[\alpha \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s^p} - 1 \right)^2 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_s^p} \right]} & (\varepsilon \geq \varepsilon_s^p) \end{cases} \tag{10}$$

其中： D 为损伤因子； ε 为应变； $b = \frac{F_D^{\sigma^p} / F_D^{\varepsilon^p} - F_D^E}{\varepsilon^p - \varepsilon^{th}}$ ， $\varepsilon^{th} = F_D^{\varepsilon^p} \varepsilon_s^{th}$ ， $\varepsilon_s^{th} = 0.7 \varepsilon_s^p$ ， ε_s^{th} 为准静态损伤应变阈值； D_s 为准静态损伤因子； n 为上升段参数值； α 为下降段参数值； E_s 为准静态弹性模量； E_r 为切线卸载弹性模量。

利用式 (9) 和式 (10) 计算得到不同应变率下 C0 和 C3 组损伤演化曲线，如图 15 所示。Feng 等^[14] 将损伤演化曲线分为初始损伤阶段、损伤快速增

长阶段和完全损伤阶段。可以看出，不同应变率下损伤演化过程相似。

(1) 初始损伤阶段：混凝土内部微缺陷被压闭合，相较于初始状态更密实，此时损伤没有发展。由于损伤应变阈值与峰值应变相关，而峰值应变随应变率增加而减小，因此，动态损伤应变阈值小于准静态损伤应变阈值，但变化不大。Dong 等^[35] 指出当 $\dot{\varepsilon} \leq 300 \text{ s}^{-1}$ 时损伤应变阈值变化很小；当 $\dot{\varepsilon} \geq 300 \text{ s}^{-1}$ 时应变率强化效应导致损伤延迟。

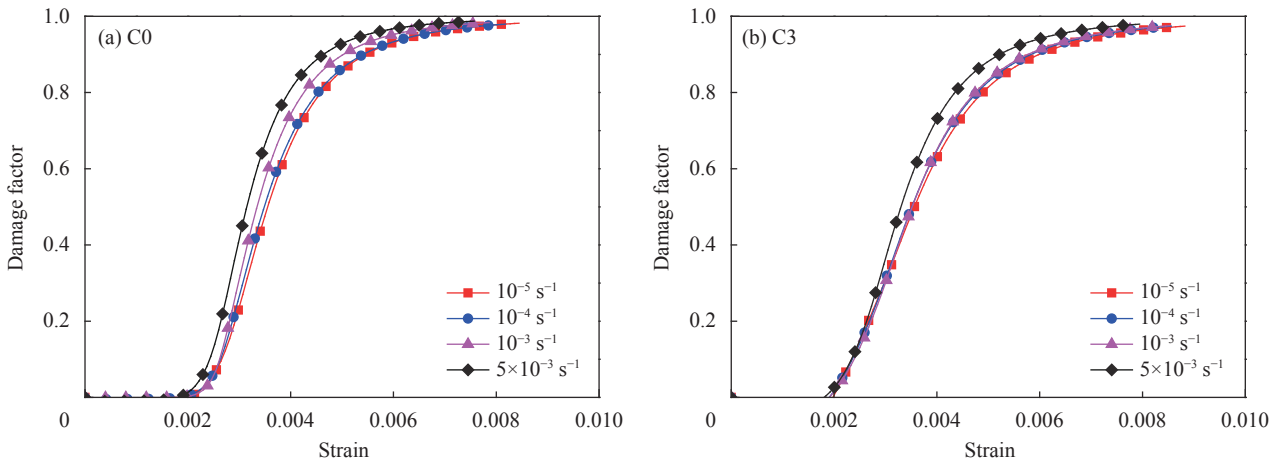


图 15 不同应变率下 HyF/RAC(C0 和 C3 组) 损伤演化

Fig. 15 Damage evolution curves of C0 and C3 for HyF/RAC at different strain rates

(2) 损伤快速增长阶段：微裂纹开始逐渐扩展，并出现宏观裂缝，损伤因子迅速增加。在相同应变下，损伤因子均随应变率增加逐渐增大，且 C0 组损伤因子对应变率更敏感；在相同应变率下，C0 组在该阶段的斜率大于 C3 组。这主要是由于纤维的掺入在试件内部起到约束作用，有效抑制了损伤的增长速度。

(3) 完全损伤阶段：应变率越大，试件破坏速度越快，对应的极限应变越小。相同应变率下，由于纤维的桥接作用，C3 组失去承载力时的损伤因子小于 C0 组。

4 结论

(1) 在动态应变率下，未掺纤维试件破坏时形成的贯穿斜裂缝路径更平直，宽度更大，周围微裂缝数量和长度减小；含纤维试件破坏时形成斜向贯穿裂缝为主的剪切带。

(2) 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土峰值应力随应变率增加而增大。在相同应变率下，再生粗骨料取代率越大，峰值应力越小；3 个系列基准组

掺入纤维提高峰值应力，最大增幅分别为 23%、16% 和 16%，混杂纤维协同效应显著。再生粗骨料显著提高峰值应力的应变率敏感性；掺入纤维提高普通混凝土峰值应力的应变率敏感性和降低再生混凝土峰值应力的应变率敏感性。

(3) 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土峰值应变随应变率增加而减小。在相同应变率下，普通混凝土峰值应变小于再生混凝土；3 个系列纤维混凝土峰值应变高于未掺纤维混凝土，最大增幅分别为 19%、12% 和 13%，有助于提高混凝土的延性，混杂纤维表现出协同效应。再生粗骨料对峰值应变的应变率敏感性并无明显影响；掺入纤维降低峰值应变的应变率敏感性。

(4) 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土弹性模量随应变率增加而增大。在相同应变率下，弹性模量随再生粗骨料取代率增大而减小；普通混凝土中单掺端钩钢纤维 (Hooked-end steel fiber, HES) 提高其弹性模量，而混杂纤维中塑钢纤维 (MPP) 含量过高则会造其弹性模量降低；再生混凝土中掺入纤维提高其弹性模量，且混杂纤维协同效应

显著。在准静态应变率下 3 个系列纤维的掺入提高弹性模量, 最大增幅分别为 15%、14% 和 35%, 然而, 应变率越大, 纤维的增强效果越不明显。再生粗骨料提高弹性模量的应变率敏感性, 掺入纤维降低弹性模量的应变率敏感性。

(5) 钢-塑钢混杂纤维再生混凝土压缩韧性随应变率增加而增大。在相同应变率下, 3 个系列中的基准组掺入纤维后其压缩韧性均有不同程度的提高, 最大增幅分别为 46%、32% 和 37%, 且混杂纤维协同效应显著。再生粗骨料提高压缩韧性的应变率敏感性; 混杂纤维提高普通混凝土压缩韧性的应变率敏感性, 降低再生混凝土压缩韧性的应变率敏感性。

(6) 提出的动态损伤本构模型考虑了纤维增强系数、再生粗骨料取代率和应变率, 计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] 高光发. 混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 261-270.
GAO Guangfa. Effect of strain-rate hardening on dynamic compressive strength of plain concrete[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 261-270(in Chinese).

[2] 王国盛, 路德春, 杜修力, 等. 混凝土材料真实动态强度及率效应机理研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 58-67.
WANG Guosheng, LU Dechun, DU Xiuli, et al. Research on the actual dynamic strength and the rate effect mechanisms for concrete materials[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 58-67(in Chinese).

[3] 艾思平, 唐鹏. 考虑地震量级作用下橡胶纤维混凝土受压动力性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1002-1010.
AI Siping, TANG Peng. Experimental study on the dynamic behavior of rubber fiber reinforced concrete under the action of earthquake magnitude[J]. Journal of Building Material, 2021, 24(5): 1002-1010(in Chinese).

[4] 白卫峰, 李思蕾, 管俊峰, 等. 再生混凝土单轴压缩动态力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5): 498-508.
BAI Weifeng, LI Silei, GUAN Junfeng, et al. Study on dynamic mechanical properties of recycled concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 498-508(in Chinese).

[5] XIAO J, ZHANG K, ZHANG Q. Strain rate effect on compressive stress-strain curves of recycled aggregate concrete with seawater and sea sand[J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 124014.

[6] 董海龙, 彭有开, 骆开静, 等. 粗骨料取代下的高性能再生混凝土率敏性研究[J]. 实验力学, 2019, 34(2): 249-257.
DONG Hailong, PENG Youkai, LUO Kaijing, et al. Study on

rate sensitivity of high performance recycled concrete with different coarse aggregate replacement ratios[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2): 249-257(in Chinese).

[7] TANG Z, LI W, TAM V W Y, et al. Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107776.

[8] FENG J, YIN G, TUO H, et al. Parameter optimization and regression analysis for multi-index of hybrid fiber-reinforced recycled coarse aggregate concrete using orthogonal experimental design[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121013.

[9] 陈宇良, 吉云鹏, 陈宗平, 等. 钢纤维再生混凝土三轴受压力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4005-4016.
CHEN Yuliang, JI Yunpeng, CHEN Zongping, et al. Experiment on mechanical properties of steel fiber recycled aggregate concrete under triaxial compression[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4005-4016(in Chinese).

[10] 丁亚红, 郭书奇, 张向冈, 等. 玄武岩纤维对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1228-1238.
DING Yahong, GUO Shuqi, ZHANG Xianggang, et al. Influence of basalt fiber on the anti-carbonation performance of recycled aggregate concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1228-1238(in Chinese).

[11] XIE J, KOU S, MA H, et al. Advances on properties of fiber reinforced recycled aggregate concrete: Experiments and models[J]. Construction and Building Materials, 2021, 277: 122345.

[12] 王兴国, 姜茂林, 陈旭, 等. 不同预浸骨料-PVA纤维对再生混凝土力学性能影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1205-1214.
WANG Xingguo, JIANG Maolin, CHEN Xu, et al. Effect of different pre-soaked aggregate-PVA fiber on the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1205-1214(in Chinese).

[13] 孔祥清, 何文昌, 周聪, 等. 混杂掺入钢/聚丙烯纤维再生混凝土力学性能及抗冲击性能试验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(3): 94-99.
KONG Xiangqing, HE Wenchang, ZHOU Cong, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and impact resistance of steel and polypropylene hybrid fiber reinforced recycled aggregates concrete[J]. Building Science, 2020, 36(3): 94-99(in Chinese).

[14] FENG J, YIN G, TUO H, et al. Uniaxial compressive behavior of hook-end steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124559.

[15] 周宏宇, 麻全周, 赵晓花, 等. 考虑应变率效应的混凝土材料单轴压缩特性尺寸效应研究[J]. 混凝土, 2021(1): 61-65, 69.
ZHOU Hongyu, MA Quanzhou, ZHAO Xiaohua, et al. Experimental study on dynamic rate relevance of concrete

- size effect[J]. *Concrete*, 2021(1): 61-65, 69(in Chinese).
- [16] 肖诗云, 张剑. 不同应变率下混凝土受压损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 40-45.
- XIAO Shiyun, ZHANG Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rates[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(3): 40-45(in Chinese).
- [17] 焦楚杰, 孙伟, 张亚梅, 等. 钢纤维高强混凝土在不同应变率时的单轴受压性能[J]. 建筑结构, 2004, 34(8): 65-67.
- JIAO Chujie, SUN Wei, ZHANG Yamei, et al. Mechanical properties of SFRHSC under uniaxial compression with different strain rates[J]. *Building Structure*, 2004, 34(8): 65-67(in Chinese).
- [18] 梁宇慧, 杨鹏, 刘新荣, 等. 高应变率下多尺寸聚丙烯纤维混凝土动态压缩力学性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 288-294.
- LIANG Ninghui, YANG Peng, LIU Xinrong, et al. A study on dynamic compressive mechanical properties of multi-size polypropylene fiber concrete under high strain rate[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(2): 288-294(in Chinese).
- [19] 沈才华, 钱晋, 陈晓峰, 等. 纤维掺量对PVA纤维混凝土力学参数的影响及压缩韧性指标的计算方法[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3152-3160.
- SHEN Caihua, QIAN Jin, CHEN Xiaofeng, et al. Influence of fiber content on mechanical parameters of PVA fiber concrete and method for calculating compression toughness index[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(10): 3152-3160(in Chinese).
- [20] HE W, KONG X, FU Y, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 120488.
- [21] IBRAHIM S M, ALMUSALLAM T H, AL-SALLOUM Y A, et al. Strain rate dependent behavior and modeling for compression response of hybrid fiber reinforced concrete[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2016, 13: 1695-1715.
- [22] ZHOU J, CHEN X. Stress-strain behavior and statistical continuous damage model of cement mortar under high strain rates[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(1): 120-130.
- [23] HOU X, CAO S, RONG Q, et al. Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170: 570-581.
- [24] CUI T, HE H, YAN W, et al. Compression damage constitutive model of hybrid fiber reinforced concrete and its experimental verification[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120026.
- [25] SUN X, ZHAO K, LI Y, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 657-669.
- [26] ZHANG H, WANG B, XIE A, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 154-167.
- [27] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 聊聊动态强度和损伤演化[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 169-179.
- WANG Lili, HU Shisheng, YANG Liming, et al. Talk about dynamic strength and damage evolution[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 169-179(in Chinese).
- [28] CAO S, HOU X, RONG Q. Dynamic compressive properties of reactive powder concrete at high temperature: A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 110: 103568.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[J]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015(in Chinese).
- [30] 张聪, 余志辉, 韩世诚, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的压缩本构关系[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1221-1226.
- ZHANG Cong, YU Zhihui, HAN Shicheng, et al. Compression constitutive relation of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(5): 1221-1226(in Chinese).
- [31] SHI X, PARK P, REW Y, et al. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233: 117316.
- [32] ABADAL A, ABBAS H, ALMUSALLAM T, et al. Mechanical properties of hybrid fibre-reinforced concrete-analytical modelling and experimental behaviour[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2016, 68: 823-843.
- [33] 施林林, 宋玉普, 沈璐. 不同应变率下大骨料及湿筛混凝土单轴受压试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(2): 270-276.
- SHI Linlin, SONG Yupu, SHEN Lu. Experimental study on uniaxial compression properties of large aggregate and wet-sieved concrete at different strain rates[J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(2): 270-276(in Chinese).
- [34] 李庆斌, 邓宗才, 张立翔. 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(8): 1088-1091.
- LI Qingbin, DENG Zongcai, ZHANG Lixiang. Dynamic damage constitutive model for concrete accounting for the difference of the initial elastic modulus[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003(8): 1088-1091(in Chinese).
- [35] DONG S, HAN B, YU X, et al. Dynamic impact behaviors and constitutive model of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 184: 602-616.