

## 混杂纤维珊瑚骨料混凝土冲击压缩性能的试验与模拟

王振波<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 韩宇栋<sup>2</sup>, 郝如升<sup>1</sup>, 丁小平<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

**摘 要:** 为探究冲击荷载下纤维对海水珊瑚骨料混凝土(SCAC)的增强增韧效果, 采用  $\phi 75$  mm 分离式 Hopkinson 压杆测试了单掺聚乙烯醇(PVA)纤维或混杂 PVA-钢纤维 SCAC 在不同应变率下的动态力学响应, 利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟其冲击性能及破坏形态特征。结果表明, 掺加纤维可改善 SCAC 的脆化程度和动态力学性能; 混杂纤维对 SCAC 应变率敏感性和动态强度增长因子的提升效果优于单掺 PVA 纤维; SCAC 的破坏程度随 PVA 纤维掺量增加逐步改善, 而混杂纤维 SCAC 在各应变率下的完整性则更好; 模拟所得试块失效单元数在掺入纤维后显著减少, 模拟结果反映出各纤维掺量 SCAC 的动态力学行为与破坏程度。

**关键词:** 海水珊瑚骨料混凝土; Hopkinson 杆; 动态强度增长因子; 混杂纤维; 数值模拟

中图分类号: TU37 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2897-12

网络出版时间: 2022-09-30



## Test and Simulation of Impact Compressive Properties of Hybrid Fiber Reinforced Coral Aggregate Concrete

WANG Zhenbo<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>, HAN Yudong<sup>2</sup>, HAO Rusheng<sup>1</sup>, DING Xiaoping<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** To investigate the strengthening and toughening effect of fiber on seawater coral aggregate concrete (SCAC) under an impact load, the dynamic mechanical response of SCAC with mono PVA fiber or hybrid PVA-steel fiber at different strain rates was tested by using a  $\phi 75$  mm Split Hopkinson Pressure Bar. The impact properties and failure characteristics were simulated using a software named ANSYS/LS-DYNA. The results indicate that the addition of fibers may improve the embrittlement degree and dynamic mechanical properties of SCAC. The enhancement effect of hybrid fiber on the strain rate sensitivity and dynamic increase factor of SCAC is better than that of mono PVA fiber. The damage degree of SCAC gradually decreases with the increase of PVA fiber content, while the integrity of the hybrid fiber SCAC is better at each strain rate. The number of final deleted elements in the simulated sample is significantly reduced after adding fibers, and the simulated results show the dynamic mechanical properties and failure degree of SCAC with various fiber contents.

**Keywords:** seawater coral aggregate concrete; split Hopkinson pressure bar; dynamic increase factor; hybrid fiber; numerical simulation

随着中国岛礁工程建设的深入推进, 海工混凝土等基础建设材料的需求量不断增大<sup>[1-2]</sup>。就地取用海水与岛礁吹填过程中产生的珊瑚砂石等材料制备海水珊瑚骨料混凝土(SCAC)<sup>[3]</sup>, 已展现出节约运输成本、缩短施工周期的优势, 其对于快速建造岛礁防卫工事与生活基础设施具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

早期研究的珊瑚混凝土强度偏低<sup>[6]</sup>, 主要应用于挡浪墙、防波堤等水工构筑物。而在近年来, 为适应岛礁工程对混凝土的高性能、高质量要求, 已有研究通过改善搅拌工艺<sup>[7]</sup>、复掺矿物掺合料<sup>[8]</sup>、珊瑚骨料改性<sup>[9]</sup>等方法提升珊瑚混凝土的力学强度, 并在材料基本力学性能、断裂力学性能等方面取得

收稿日期: 2022-04-24。 修订日期: 2022-04-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808545); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022YQLJ05)。

第一作者: 王振波(1989—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2022-04-24. Revised date: 2022-04-28.

First author: WANG Zhenbo (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: wangzb@cumtb.edu.cn

重要进展<sup>[10–12]</sup>。应当关注,珊瑚混凝土的高强化发展势必带来脆性问题<sup>[13]</sup>,增大了结构破坏的风险。为此,有研究尝试通过掺加聚丙烯纤维等柔性非金属纤维来改善珊瑚混凝土的脆性<sup>[14–16]</sup>。试验发现掺量适当的纤维能够延缓 SCAC 的裂缝发展,提高其抗折强度、残余应力和极限应变,有效改善材料的脆性和耗能能力。

海洋岛礁工程面临复杂的服役环境,结构物除了承受常规荷载、海水侵蚀等作用以外,还可能遭受地震、爆炸冲击等瞬时荷载的威胁。因此,研究瞬时荷载下 SCAC 的力学响应对实际工程具有重要的指导意义。吴文娟等<sup>[17]</sup>通过试验对相同强度等级珊瑚混凝土和普通混凝土的冲击性能进行了比较,发现在相同应变率下,珊瑚混凝土由于珊瑚骨料疏松多孔的特性而拥有更显著的吸能效果,抗冲击能力优于普通混凝土。吴彰钰等<sup>[18]</sup>开展了珊瑚混凝土的冲击劈拉试验,结果表明在冲击荷载下材料主裂缝贯穿中心区域的珊瑚骨料,应变率和试件尺寸是影响珊瑚混凝土劈裂破坏模式的主要因素。岳承军等<sup>[19]</sup>对剑麻纤维珊瑚混凝土开展了冲击压缩试验,发现其在  $56.9\text{ s}^{-1}$  应变率时仅产生少量边缘裂缝,证明了剑麻纤维能够改善珊瑚混凝土的脆性破坏特征。但现有研究仅关注单掺纤维 SCAC 的力学性能,如果能在 SCAC 中混掺不同品种纤维,纤维间相互协调,发挥各自优势,则有望进一步提升 SCAC 的抗冲击性能。

基于以上分析,采用分离式霍普金森压杆研究不同应变率下单掺聚乙烯醇(PVA)纤维及混杂 PVA–钢纤维 SCAC 的冲击压缩力学性能,重点关注纤维混杂对 SCAC 动态压应力–应变曲线、动态强度增长因子及其冲击破坏形态的影响;开展纤维增强 SCAC 的冲击压缩数值模拟,通过模拟与试验结果的对比验证模型的适用性。本工作研究结果对于提升珊瑚混凝土的抗冲击性能,巩固其在岛礁防护工程中的应用基础具有重要意义。

## 1 实验

### 1.1 原材料与配合比

配制 SCAC 的水泥为金隅冀东牌 P·O 42.5 水泥,固盐剂为中冶建筑研究总院生产<sup>[20]</sup>,水泥和固盐剂的化学成分见表 1。珊瑚骨料是由采自某热带岛屿的珊瑚礁灰岩经破碎、过筛后得到。其中,粗骨料为粒径 5~20 mm 连续级配的破碎珊瑚礁石,筒压强度 1.65 MPa;细骨料为粒径小于 5 mm 的珊瑚砂,细度模数 2.35。珊瑚骨料的物理性质参数列于表 2。人工模拟海水是根据该热带海域海水水质报告配制而得,每升海水中 NaCl、CaCl<sub>2</sub>、MgSO<sub>4</sub>、MgCl<sub>2</sub> 的质量比为 13.62:1:3.25:3.22。外加剂包括高效聚羧酸减水剂、葡萄糖酸钠缓凝剂、有机硅消泡剂。所用的增强纤维为聚乙烯醇(PVA)纤维和镀铜钢(ST)纤维,其尺寸和物理力学性质参数列于表 3。

表 1 胶凝材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of cementitious materials

w/%

| Raw materials               | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|-----------------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------|------------------|-------------------|
| P.O 42.5 Cement             | 66.54 | 15.99            | 4.26                           | 3.83                           | 2.78            | 1.61 | 1.46             |                   |
| Composite mineral admixture | 31.58 | 42.62            | 1.07                           | 14.39                          | 1.48            | 6.6  | 0.52             | 0.54              |

w—Mass fraction.

表 2 珊瑚骨料物理性质

Table 2 Physical properties of coral aggregate

| Type                    | Bulk density/(kg·m <sup>-3</sup> ) | Apparent density/(kg·m <sup>-3</sup> ) | Water absorption/% | Crushing value% |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------|
| Coral coarse aggregates | 810                                | 2 018.3                                | 17.8               | 41.5            |
| Coral sand              | 1 503                              | 2 722.3                                | 6.5                | 13.9            |

表 3 聚乙烯醇纤维和钢纤维的相关性能参数

Table 3 Physical properties of PVA and steel fibers

| Type | Density/(g·m <sup>-3</sup> ) | Tensile strength/MPa | Elastic modulus/GPa | Diameter/mm | Length/mm |
|------|------------------------------|----------------------|---------------------|-------------|-----------|
| PVA  | 1.2                          | 1 620                | 42.8                | 0.039       | 12        |
| ST   | 7.8                          | 2 750                | 210.0               | 0.200       | 13        |

为获得高性能的海水珊瑚骨料混凝土,兼顾较高的经济效益,本工作在课题组已有配比的基础上掺入 PVA 纤维或钢纤维,设计了就地取材率(海水、

珊瑚骨料质量占混凝土总质量的比例)高于 70% 的纤维增强 SCAC 配合比。其中,不掺纤维的 SCAC 基材配合比(编号 S0)列于表 4。在 S0 中添加不同掺

量、不同品种的增强纤维，对比单掺或混杂纤维 SCAC 的动态力学性能，探索在单掺柔性纤维体系的基础上混掺刚性纤维带来的增益效果。考虑到珊瑚骨料的多孔特性及其在 SCAC 中较高的体积占比，经试配确定纤维掺量的最大值为 0.3%，纤维的具体掺量情况列于表 5。其中，S01、S02、S03 代表不同纤维掺量的单掺 PVA 纤维 SCAC，S11、S12 代表不同纤维掺量的混杂 PVA-ST 纤维 SCAC。注意到，所设计的钢纤维体积掺量仅有 0.1%。这是考

虑到所使用的 PVA 纤维和 ST 纤维直径均较小，纤维在基体中分散的难度增大。例如，按照纤维间距理论<sup>[21]</sup>可估算出 PVA 纤维掺量 0.2% 时的间距约为 12 mm，相较于珊瑚骨料的最大粒径 20 mm，纤维之间存在较高的聚集成团的可能性。在原本就密集 PVA 纤维体系中继续穿插入钢纤维将存在困难。综合考虑钢纤维的分散难度及其在实际工程中的防锈成本，本工作仅设计添加 0.1% 的钢纤维来考察其对原有 PVA 纤维体系的作用效果。

表 4 海水珊瑚骨料混凝土配合比

Table 4 Mix proportions of seawater coral aggregate concrete

kg/m<sup>3</sup>

| Sample No. | Cement | Composite mineral admixture | Coral sand | Coral coarse aggregates | Seawater | Superplasticizer | Retarder |
|------------|--------|-----------------------------|------------|-------------------------|----------|------------------|----------|
| S0         | 466    | 198                         | 557        | 770                     | 243      | 11.057 7         | 0.7968   |

Note: Coral aggregates default to the natural moisture state.

表 5 各组 SCAC 的纤维掺量情况

Table 5 Fiber addition of each SCAC mixtures  $\varphi/\%$ 

| Type | S01  | S02  | S03  | S11  | S12  |
|------|------|------|------|------|------|
| PVA  | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.10 | 0.20 |
| ST   | 0    | 0    | 0    | 0.10 | 0.10 |

Note: The mix proportion of matrixes for each group is identical to that of S0;  $\varphi$ : volume fraction.

由于高孔隙骨料的吸水特性，试验时应调整搅拌流程：首先在搅拌机中投入称取的珊瑚细砂并添加部分海水搅拌 1 min，待珊瑚细砂吸收足量水分后，投入水泥、固盐剂和缓凝剂再搅拌 30 s，之后将剩余海水、40%~50% 的外加剂依次投入搅拌机搅拌 30 s 得到海水珊瑚砂浆；接着均匀撒入纤维继续拌和 2 min，得到纤维增强珊瑚砂浆；倒入事先预湿的珊瑚砂石，缓慢加入剩余的外加剂，继续拌合 2~3 min 得到海水珊瑚混凝土拌合物。静置 2~5 min 缓解冒泡现象，最终得到纤维海水珊瑚骨料混凝土。在拌合物出料后浇筑入 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体模具，并覆盖保鲜膜防止水分散失。自然养护 1 d 后脱模，在标准环境中养护至 28 d。对立方体试块进行钻芯、切割、打磨，得到尺寸为  $\phi 75$  mm×50 mm 的冲击压缩圆柱体。加工时应确保圆柱体的两端平整度小于 0.2 mm、直径误差小于 0.3 mm。试验选取 5 个不同应变率，每个应变率测试 3 个圆柱体试块。

## 1.2 试验方法

采用电子液压试验机进行 SCAC 的准静态力学性能试验。按照现行国家标准 GB/T 50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[22]</sup>中的规定对立方体试块进行加荷，加载速率为 0.60 MPa/s，试块碎裂

失效后停止试验得到峰值荷载。

采用分离式 Hopkinson 压杆系统(SHPB)进行冲击压缩试验。其中，发射系统包括空气压缩机和发射装置；钢杆系统直径均为 75 mm，由子弹(400 mm)、入射杆(3 000 mm)、透射杆(3 000 mm)和缓冲杆组成，弹性模量 210 GPa，密度 7 850 kg/m<sup>3</sup>；测速装置采用精密测速仪；信号采集系统包括半导体应变片、动态电阻应变仪及示波器，其中应变片通过桥盒接线连通应变仪，并将应变片贴于入射杆与透射杆来获取脉冲信号。基于一维应力波传播和应力均匀性 2 个基本假设<sup>[23]</sup>，采用下列公式计算试件的应力( $\sigma_s$ )、应变( $\epsilon_s$ )和应变率( $\dot{\epsilon}_s$ )：

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = \frac{A_b}{A_s} E \epsilon_i(t) \\ \epsilon_s(t) = \frac{2C}{L_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \\ \dot{\epsilon}_s(t) = \frac{2C}{L_s} \epsilon_r(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中： $E$ 、 $C$  和  $A_b$  分别为钢杆的弹性模量、纵波波速和横截面积； $L_s$  和  $A_s$  分别为试件的长度和横截面积； $t$  为加载时间； $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$  和  $\epsilon_t$  分别为杆的透射应变、反射应变和入射应变。

## 2 结果与讨论

### 2.1 动态压缩应力-应变曲线

各个纤维掺量 SCAC 在 40、60、80、100 s<sup>-1</sup> 和 130 s<sup>-1</sup> 5 个应变率附近的动态压应力-应变曲线如图 1 所示。SCAC 的动态压应力-应变曲线经历 3 个阶段：1) 受压初始阶段为线弹性特征，此时应

力随应变线性增大; 2) 随后应力上升速率逐渐减小, SCAC 过渡到弹塑性阶段; 3) 峰值应力后 SCAC 结构发生劣化, 应力转入下降段。

随着应变率增加, SCAC 内部裂纹的变化速率逐渐滞后于应变波的传播, SCAC 材料刚度、峰值应力和峰值应变等力学参数同步提高, 呈现出应变率敏感性<sup>[24]</sup>。对于不掺纤维的 S0, 应变率增加导致曲线下降段变陡, 材料破坏更加剧烈。而掺加纤维

可以缓解这种材料脆化倾向, SCAC 应力-应变曲线即使在高应变率下也表现出相对平缓的下降段。这说明纤维与基材之间牢固的化学键键合可以抑制 SCAC 内部微裂缝的扩展, 减少微裂缝尖端的应力集中现象, 延缓材料破坏。此外, 掺入的纤维在高应变率下仍可提供有效桥接, 应力波可通过裂缝间连接的纤维形成破坏基材-纤维-基材的往复传递, 从而延长 SCAC 的破坏过程。

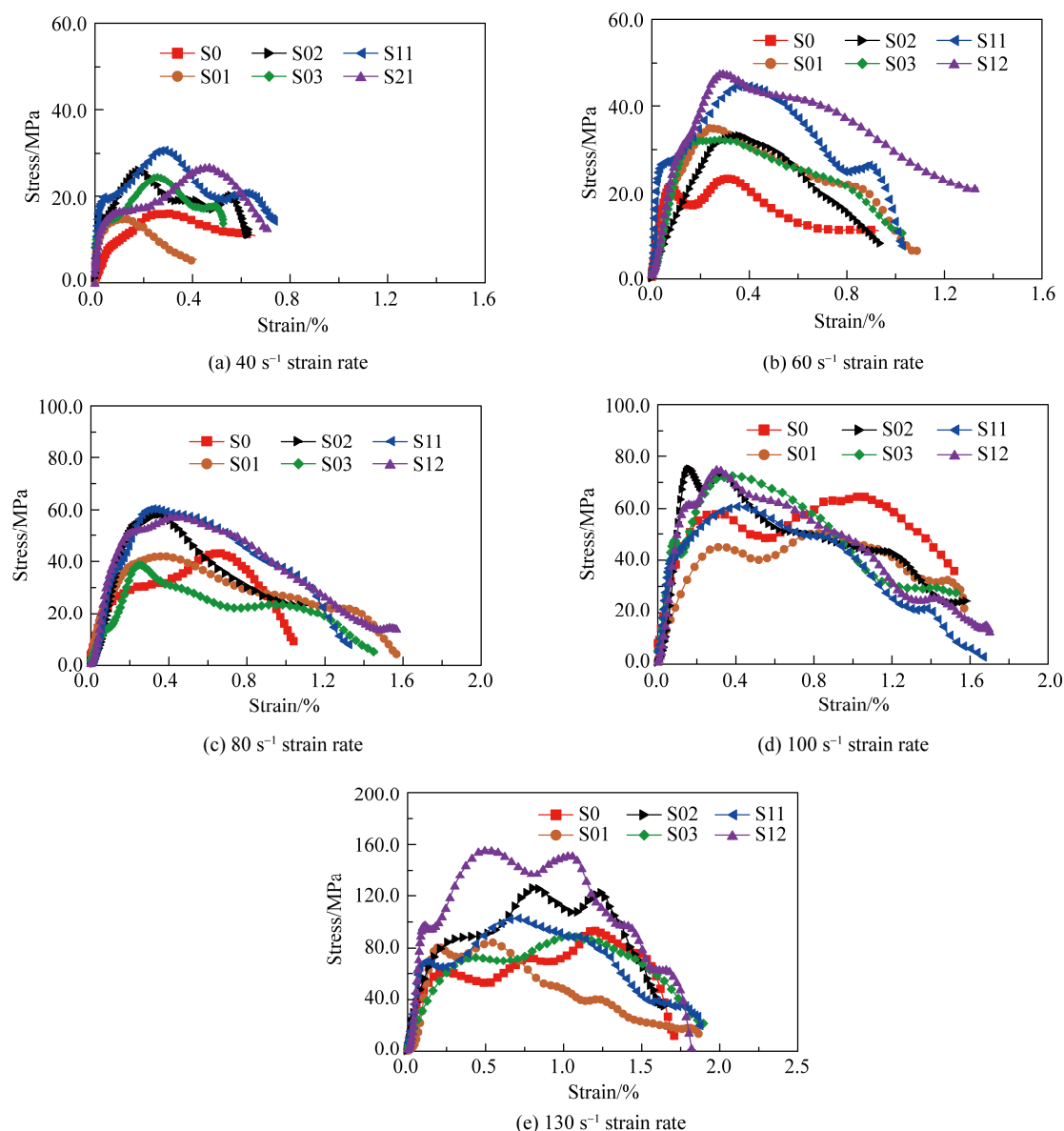


图1 不同应变率下纤维增强 SCAC 的动态应力-应变曲线

Fig. 1 Dynamic stress-strain curves of fiber reinforced SCAC at different strain rates

具体看, 掺加纤维可改善 SCAC 在各个应变率下的动态力学性能。低应变率(40~60 s<sup>-1</sup>)时, 单掺 PVA 纤维对 SCAC 的增强增韧效果随纤维掺量增大有所提高, 混杂纤维 SCAC 对强度和韧性的提升效果

更优于单掺 PVA 纤维体系。在中应变率(80~100 s<sup>-1</sup>)下, 掺加适量 PVA 纤维的 S02 在单掺纤维体系中表现最佳, 其在应变率 100 s<sup>-1</sup> 时甚至已超越混杂纤维的 S11 组。在高应变率 130 s<sup>-1</sup> 下, S02 的优势更为

明显, 优于其他单掺纤维(S01、S03)体系在该应变率下的动态响应。有研究表明<sup>[25]</sup>, 冲击压缩荷载下, 掺入短钢纤维不仅显著影响力-应变曲线的下降段趋势, 还可以提高峰值应变以及压缩强度, 高应变率下压缩强度最大可提升 45%。可以看出, 混杂纤维的 S12 各项性能指标在所有应变率下均明显优于 S02。这说明在 PVA 纤维掺量(0.2%)适当时再掺入钢纤维可以叠加 PVA 和钢纤维的优势, 二者协同工作带来最佳的增强增韧效果。综合所有应变率的情况, 混杂 PVA-钢纤维 SCAC 对于应变率增加的响应快于单掺 PVA 纤维, 即 PVA 纤维对于 SCAC 的增强作用滞后于钢纤维。

## 2.2 动态强度增长因子

为进一步研究 SCAC 冲击压缩力学性能的发展规律, 使用动态强度增长因子(DIF)表征其在动态荷载下的强度变化。其中的 DIF 为混凝土动态强度与准静态强度的比值。SCAC 的准静态抗压强度列于表 6。不同纤维掺量 SCAC 的 DIF 随应变率增大的变化规律绘制于图 2。借鉴广泛使用的拟合模型<sup>[26-27]</sup>, 以 DIF 与应变率的对数相关关系对图 2 中的数据进行拟合, 方程如下:

$$\text{DIF} = a \lg \dot{\varepsilon} + b \quad (2)$$

其中:  $a$  和  $b$  均为拟合参数, 取值结果列于表 7。在研究范围内, 对数相关方程能够较好地描述各纤维掺量 SCAC 的 DIF 随应变率的变化规律。

表 6 SCAC 28 d 准静态抗压强度

| S0   | S01  | S02  | S03  | S11  | S12  |
|------|------|------|------|------|------|
| 38.5 | 41.5 | 47.2 | 45.8 | 42.4 | 44.7 |

根据图 2, 单掺 PVA 纤维 SCAC 的准静态强度越高, 其在各应变率下的 DIF 越大。但其 DIF 在约  $80 \text{ s}^{-1}$  应变率以后又逐渐低于 S0, 表明 PVA 纤维在高应变率下的增强效率有所减弱。这可能是因为, 随着应变率提高, PVA 纤维的失效模式从界面脱粘或拔出逐渐转变为断裂破坏, 纤维对裂缝的桥接作用降低。掺入刚度和弹性模量较高的钢纤维后, S11 在各个应变率下的 DIF 始终高于单掺纤维体系, 并且其应变率敏感性阈值早于单掺纤维 SCAC。在 0.20% PVA 纤维基础上添加 0.10% 钢纤维能够在中高应变率时( $\geq 60 \text{ s}^{-1}$ )进一步提高 S02 的 DIF, 尤其在  $130 \text{ s}^{-1}$  的高应变率下, S12 的 DIF 比 S02 高出了 18%。这说明适量地混杂 PVA-钢纤维能够更有效地

提升 SCAC 的应变率敏感性和 DIF。但由于 SCAC 在低应变率下的动态强度主要取决于基体, 高混杂掺量会使纤维与基材间的缺陷增多, 这种纤维混杂负作用<sup>[28]</sup>会限制纤维桥接能力的发挥, 从而限制试件 DIF 的提升。

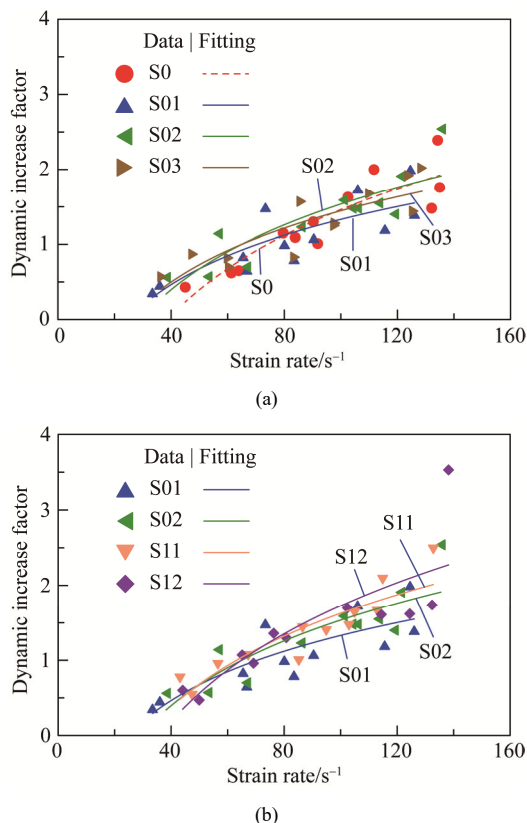


图 2 纤维增强 SCAC 动态因子的拟合结果

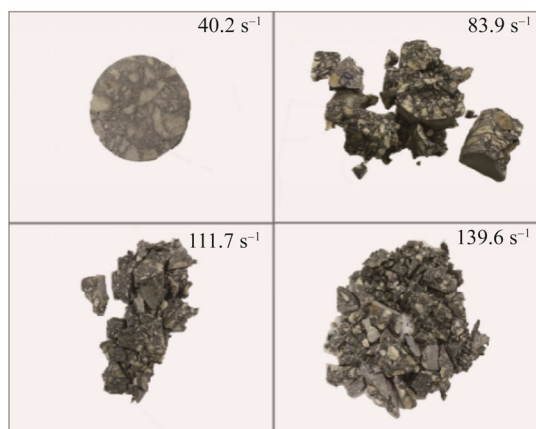
Fig. 2 Fitting results of dynamic increase factor of SCAC with fiber reinforcement

表 7 拟合参数结果

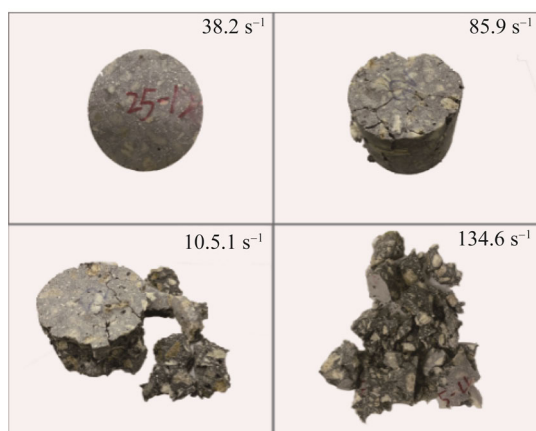
| Sample No. | $a$   | $b$    | $R^2$ | Strain rate range/ $\text{s}^{-1}$ |
|------------|-------|--------|-------|------------------------------------|
| S0         | 3.541 | -5.620 | 0.749 | 45.0-135.0                         |
| S01        | 2.177 | -3.024 | 0.763 | 33.4-126.0                         |
| S02        | 2.863 | -4.191 | 0.753 | 38.2-135.5                         |
| S03        | 2.380 | -3.315 | 0.742 | 36.8-128.7                         |
| S11        | 3.141 | -4.655 | 0.809 | 43.1-132.8                         |
| S12        | 3.878 | -6.027 | 0.660 | 44.1-138.2                         |

## 2.3 破坏形态

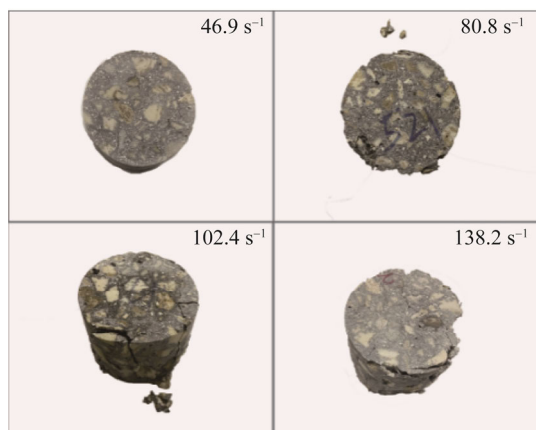
不同纤维掺量 SCAC 在各应变率下的典型破坏形态照片如图 3 所示。在低应变率下, 掺纤维 SCAC 均未发生明显的表观损伤, 而在不掺纤维的试块表面发现少量可见裂缝。这说明低应变率所产生的冲击能量不足以造成 SCAC 失效破坏, 特别是掺纤维 SCAC 仅产生轻度内部损伤。



(a) S0 (without fiber)



(b) S02 (with mono PVA fiber)



(c) S12 (with hybrid PVA-ST fiber)

图3 不同应变率下 SCAC 的破坏状态

Fig. 3 Failure patterns of SCAC at different strain rates

随应变率增大, 纤维掺量的不同使 SCAC 呈现出不同的破坏模式。不掺纤维的 S0 在应变率  $80 \text{ s}^{-1}$  附近即破碎解体成较大的碎块, 其破坏程度随应变率增大而更加严重, 碎块颗粒明显变小, 在高应变率  $139.6 \text{ s}^{-1}$  下甚至出现粉碎性的破坏特征, 这说明应变率提高后产生的能量由 SCAC 薄弱界面消纳转

化为整体地分步、分区域吸收, 直至材料粉碎。注意到, SCAC 的破碎路径均贯穿珊瑚骨料。这是因为珊瑚骨料强度低、疏松多孔<sup>[29]</sup>, 是 SCAC 的薄弱区, 冲击荷载下的吸能破坏往往由该区域诱发。

掺入纤维后, SCAC 的动态受压破坏模式得以改善。单掺 PVA 纤维的试块在应变率  $80 \text{ s}^{-1}$  附近仅在端面 and 侧面发生局部损伤, 并未出现整体碎裂。并且, 纤维在基体中的桥接作用使得 SCAC 即使在高应变率下破坏的碎块数量也明显减少。随 PVA 纤维掺量增加, 单掺纤维 SCAC 在各个应变率下的破碎程度得到更大程度的抑制。也有研究开展了单掺钢纤维混凝土的冲击试验<sup>[30]</sup>, 高强度的短钢纤维在试件破坏后多表现为拔出而不是拉断, 即使在高应变率下仍能约束混凝土使其保持整体。相比于单掺纤维体系, 混杂纤维 SCAC 的动态破坏模式明显更优, 它们在本文研究的应变率范围内均未发生破碎破坏。即使在高应变率  $138.2 \text{ s}^{-1}$  下, 混杂纤维 SCAC 也仅产生部分边缘破碎, 剥落的碎块少于整个试块的 10%, 保持较好的完整性。这说明 SCAC 内部错综杂乱的“纤维网”能支撑骨料与基材, 使 SCAC 整体三向受压而表现出优异的抗冲击增益效果。但高应变率下的 PVA 纤维因自身性能的限制会出现较多的纤维断裂失效, 而钢纤维的高抗拉强度使其在全应变率阶段仅发生纤维滑移, 其在高速冲击下拉结基材产生的增韧作用优于 PVA 纤维。因此, PVA-钢纤维混杂相比于单掺 PVA 纤维拥有更强的约束效果, 钢纤维的掺入可弥补 PVA 纤维在高应变率下的脆断缺陷, 能更高效地改善 SCAC 的动态破坏模式。

### 3 SCAC 冲击压缩数值模拟

由于在 SHPB 试验中 SCAC 被冲击杆撞碎的时间非常短, 试块的破坏过程难以捕捉。而数值模拟方法可以比较精确地计算和描述试块的破坏进程, 能够为揭示试件的瞬时破坏规律、量化试块的最终失效破坏程度提供支撑。Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型作为常用的混凝土动态本构模型之一, 能有效描述材料损伤及应变率敏感性<sup>[31–32]</sup>。基于 HJC 模型, 利用 ANSYS/LS-DYNA 模块进行 SCAC 数值模拟的前处理, 采用 LS-PrePost 软件对模拟进行后处理分析。依据 SHPB 装置中子弹、入射杆和透射杆的实际尺寸, 建立 SHPB 及试块的实体单元模型, 赋予子弹特定的初速度以达到接近真实的实验情况, 其中: 材料单元采用 Solid 164 单元; 设置钢杆

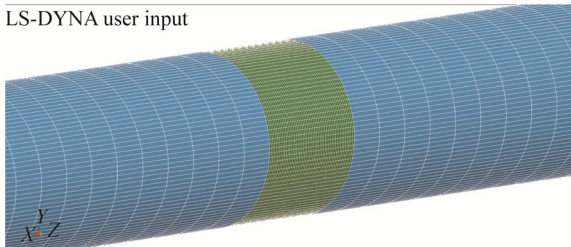
为线弹性本构模型，钢材参数为  $\rho=7.9 \text{ g/cm}^3$ ,  $E=210 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.3$ ；将纤维融入混凝土基材中建立均匀的混凝土材料模型；混凝土 HJC 模型参数根据试验获得，主要的混凝土材料参数和强度参数<sup>[33-34]</sup>列于表 8。其中， $\varepsilon_{f\min}$  为混凝土破碎的最小塑性应变，根据试验应力-应变曲线确定；压碎应力  $P_c=f'_c/3$ ；其余参数参照相应文献中的取值<sup>[35]</sup>；添加混凝土的应变破坏准则计算侵蚀单元以有效模拟 SCAC 在冲击压缩下的破碎状态，并以试块的单元消除数量表征模拟破坏程度；建立各装置和混凝土试件的 1/4 模型，子弹、入射杆、试件和透射杆分别在轴向 20、200、25、200 等分，在径向 20、20、25、20 等分，网格划分模型如图 4；杆件和试件之间的接触选择界面自动接触，不计摩擦，并施加边界约束。

表 8 SCAC 模拟参数

Table 8 Simulation parameters of SCAC

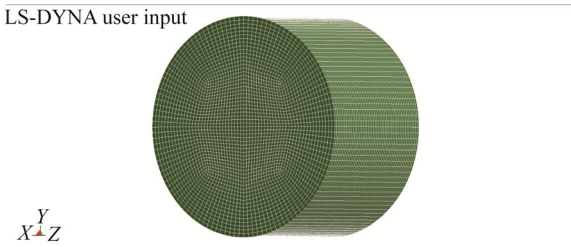
| Sample No. | Density/<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Elastic modulus/<br>GPa | Shear modulus/<br>GPa | Minimum plastic strain $\varepsilon_{f\min}$ | Crushing stress/<br>MPa |
|------------|-----------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|-------------------------|
| S0         | 2.10                                          | 39.68                   | 16.53                 | 0.006 4                                      | 12.85                   |
| S01        | 2.10                                          | 36.57                   | 15.24                 | 0.003 7                                      | 13.83                   |
| S02        | 2.10                                          | 39.46                   | 16.44                 | 0.004 2                                      | 15.74                   |
| S03        | 2.08                                          | 30.82                   | 12.84                 | 0.003 3                                      | 15.28                   |
| S11        | 2.08                                          | 43.69                   | 18.20                 | 0.005 4                                      | 14.12                   |
| S12        | 2.11                                          | 51.16                   | 21.32                 | 0.005 5                                      | 14.90                   |

LS-DYNA user input



(a) Local grid

LS-DYNA user input



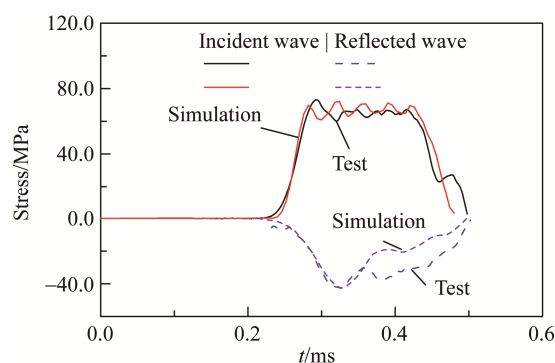
(b) Sample grid

图 4 网格划分示意图

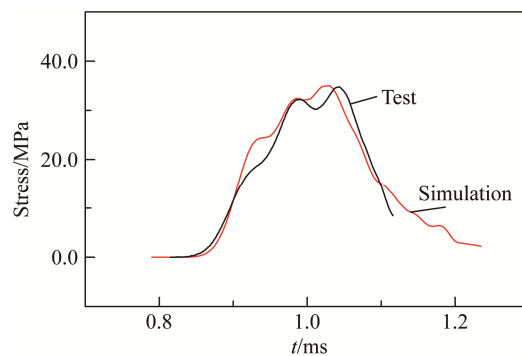
Fig. 4 Meshing diagram

模拟了各纤维掺量 SCAC 在应变率 40、60、80、100  $\text{s}^{-1}$  和 130  $\text{s}^{-1}$  下的冲击破坏过程。图 5 展示了模拟入射波、反射波和透射波与实测相应波形的比较，

可以看出，模拟波形与实测波形的相似度较高，并且模拟波形在理想环境下具有相对小的抖动幅度和较好的连续性。



(a) Incident wave/Reflected wave



(b) Transmitted wave

图 5 模拟波形与试验波形对比

Fig. 5 Comparison of simulated waveform and experimental waveform

为探究模拟结果的准确性，将模拟数据结合试验对比得到的模拟值和相对误差值列于表 9，模拟得到的 SCAC 动态应力-应变曲线绘制于图 6。可以看到，模拟应力-应变曲线的整体发展趋势与试验曲线吻合较好，模拟峰值应力与实际值的相对误差在 0.14%~10.86%，模拟峰值应变与实际值的相对误差也基本可以控制在 20%以内。比较而言，曲线上升段的发展趋势无明显差别，但下降段出现不同程度偏差。究其原因，弹性变形和初始损伤阶段的试块未发生明显破坏，具有较高的完整性与均匀性，应力-应变曲线的上升段遵循材料的一般发展规律；在峰值应力后 SCAC 发生解体、溃散，试块的破碎损伤不均匀，模拟的应力-应变曲线难以准确描述其力学响应<sup>[36]</sup>。具体地，不掺纤维的 SCAC 因其较高的脆性，在高应变率下几乎完全破碎，塑性破坏后期的模拟应力-应变曲线只有快速下降的趋势；掺纤维

SCAC 拥有更高的韧性, 在冲击模拟中纤维的增强增韧作用通过 SCAC 的强度、动态弹性模量与平均失效应变的提高来体现<sup>[37]</sup>, 使得试件在高应变率冲

击下仍保留更多的单元, 模拟应力–应变曲线下降段即使在高应变率下也相对比较平缓, 尤其在混杂 PVA–钢纤维体系中更为明显。

表 9 SCAC 冲击实验与模拟结果对比  
Table 9 Comparison of impact test and simulation results of SCAC

| Sample No. | Strain rate/s <sup>-1</sup> | Dynamic peak stress |                |                  | Dynamic peak strain   |                             |                  |
|------------|-----------------------------|---------------------|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
|            |                             | Test/MPa            | Simulation/MPa | Relative error/% | Test/10 <sup>-3</sup> | Simulation/10 <sup>-3</sup> | Relative error/% |
| S0         | 40                          | 15.93               | 16.19          | 1.63             | 2.46                  | 2.08                        | 15.45            |
|            | 60                          | 22.74               | 24.79          | 9.01             | 2.74                  | 2.27                        | 17.23            |
|            | 80                          | 43.07               | 45.30          | 5.18             | 6.45                  | 4.55                        | 29.46            |
|            | 100                         | 58.01               | 60.50          | 4.29             | 3.11                  | 4.51                        | 45.05            |
|            | 130                         | 93.29               | 95.30          | 2.15             | 11.97                 | 8.95                        | 25.23            |
| S01        | 40                          | 14.80               | 14.82          | 0.14             | 1.28                  | 1.48                        | 15.63            |
|            | 60                          | 34.95               | 35.35          | 1.14             | 2.58                  | 2.18                        | 15.50            |
|            | 80                          | 42.01               | 40.47          | 3.67             | 3.75                  | 3.48                        | 7.20             |
|            | 100                         | 50.68               | 50.96          | 0.55             | 8.32                  | 7.78                        | 6.49             |
|            | 130                         | 84.38               | 84.01          | 0.44             | 5.41                  | 4.84                        | 10.46            |
| S02        | 40                          | 26.14               | 26.02          | 0.46             | 1.81                  | 1.89                        | 4.14             |
|            | 60                          | 33.17               | 33.22          | 0.15             | 3.55                  | 3.92                        | 10.42            |
|            | 80                          | 58.45               | 60.89          | 4.17             | 3.14                  | 3.10                        | 1.32             |
|            | 100                         | 75.34               | 76.30          | 1.27             | 2.98                  | 2.45                        | 17.79            |
|            | 130                         | 126.23              | 124.15         | 1.65             | 8.20                  | 6.98                        | 14.88            |
| S03        | 40                          | 24.59               | 25.03          | 1.79             | 2.50                  | 1.95                        | 20.30            |
|            | 60                          | 32.35               | 33.18          | 2.57             | 2.66                  | 2.32                        | 12.83            |
|            | 80                          | 38.65               | 39.17          | 1.35             | 2.47                  | 2.98                        | 20.65            |
|            | 100                         | 72.52               | 73.37          | 1.17             | 3.79                  | 4.30                        | 13.36            |
|            | 130                         | 89.75               | 89.86          | 1.25             | 10.40                 | 11.78                       | 13.27            |
| S11        | 40                          | 30.62               | 31.02          | 1.31             | 2.73                  | 3.00                        | 9.79             |
|            | 60                          | 44.78               | 44.68          | 0.22             | 3.70                  | 4.51                        | 21.54            |
|            | 80                          | 60.46               | 59.96          | 0.83             | 3.09                  | 3.03                        | 2.05             |
|            | 100                         | 60.89               | 67.50          | 10.86            | 4.28                  | 4.22                        | 1.40             |
|            | 130                         | 102.69              | 105.48         | 2.72             | 7.01                  | 7.54                        | 7.56             |
| S12        | 40                          | 26.88               | 26.23          | 2.42             | 4.69                  | 4.19                        | 10.66            |
|            | 60                          | 47.71               | 50.18          | 5.18             | 2.90                  | 3.28                        | 13.02            |
|            | 80                          | 57.56               | 59.27          | 2.97             | 4.52                  | 4.02                        | 11.12            |
|            | 100                         | 75.05               | 77.88          | 3.77             | 3.05                  | 3.82                        | 25.32            |
|            | 130                         | 156.30              | 164.00         | 4.93             | 5.17                  | 6.07                        | 17.41            |

为揭示 SCAC 在冲击荷载下的瞬时破坏过程, 以 130 s<sup>-1</sup> 应变率下的 S02 试件为例, 选取其在 4 个时间节点的应变云图(图 7)进行分析。注意到, 初始阶段 SCAC 应变分布较均匀, 初始损伤发生在 0.6 ms 左右, 在冲击波传达后 SCAC 边缘处小部分单元开始失效, 端面出现十字交叉形破坏。在 SCAC 的损伤进一步演化后, 试件侧面的失效单元数增加, 但端面保持较高的完整性, 随后破坏方向逐渐转向试件内部, 直至多裂缝贯穿破坏。

不同纤维掺量 SCAC 在各应变率下的最终失效单元数列于表 10, 模拟破坏形态如图 8 所示。随应变率提升, 同一配比 SCAC 因破碎而失效消除的单元数量不断增加, 与试验所得 SCAC 对应变率的敏感性有效对应。对于不掺纤维 SCAC, 中应变率下其破坏模式呈“炸开状”, 内部已经出现裂缝并伴随有较多单元的破碎, 说明 SCAC 外围单元先于内部单元发生破坏; 高应变率下 SCAC 内部完全破碎成无规则整体, 大部分单元已经破坏消除。随着 PVA

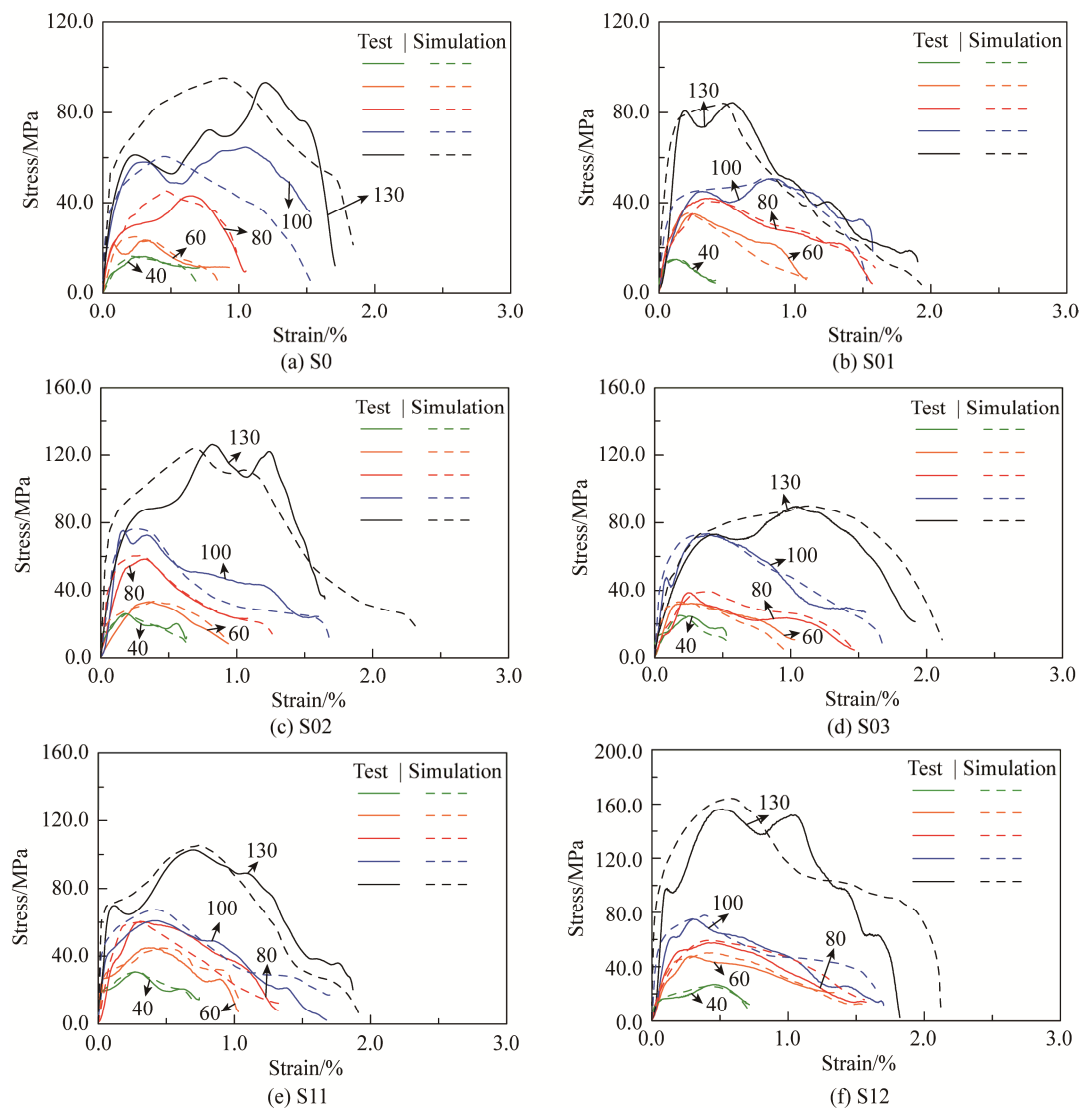


图 6 不同应变率下各纤维掺量 SCAC 的模拟动态应力-应变曲线

Fig. 6 Simulated dynamic stress-strain curves of SCAC with various fiber contents at different strain rates

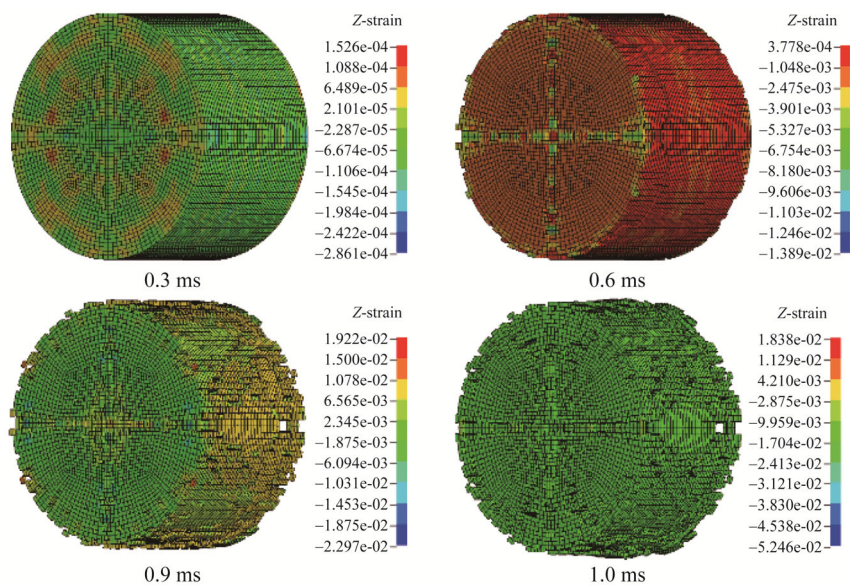


图 7 S02 试件破坏过程

Fig. 7 Failure process of S02 sample

表 10 不同应变率下 SCAC 的最终失效单元数

Table 10 Number of final Deleted Elements of SCAC at different strain rates

| Strain rate/s <sup>-1</sup> | S0     | S01    | S02    | S03    | S11   | S12   |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 40                          | 905    | 348    | 495    | 102    | 21    | 23    |
| 60                          | 1 999  | 889    | 696    | 509    | 102   | 95    |
| 80                          | 10 754 | 8 923  | 8 514  | 9 194  | 867   | 730   |
| 100                         | 20 791 | 9 903  | 9 245  | 10 003 | 2 797 | 1 865 |
| 130                         | 31 865 | 26 771 | 18 045 | 17 442 | 9 157 | 8 344 |

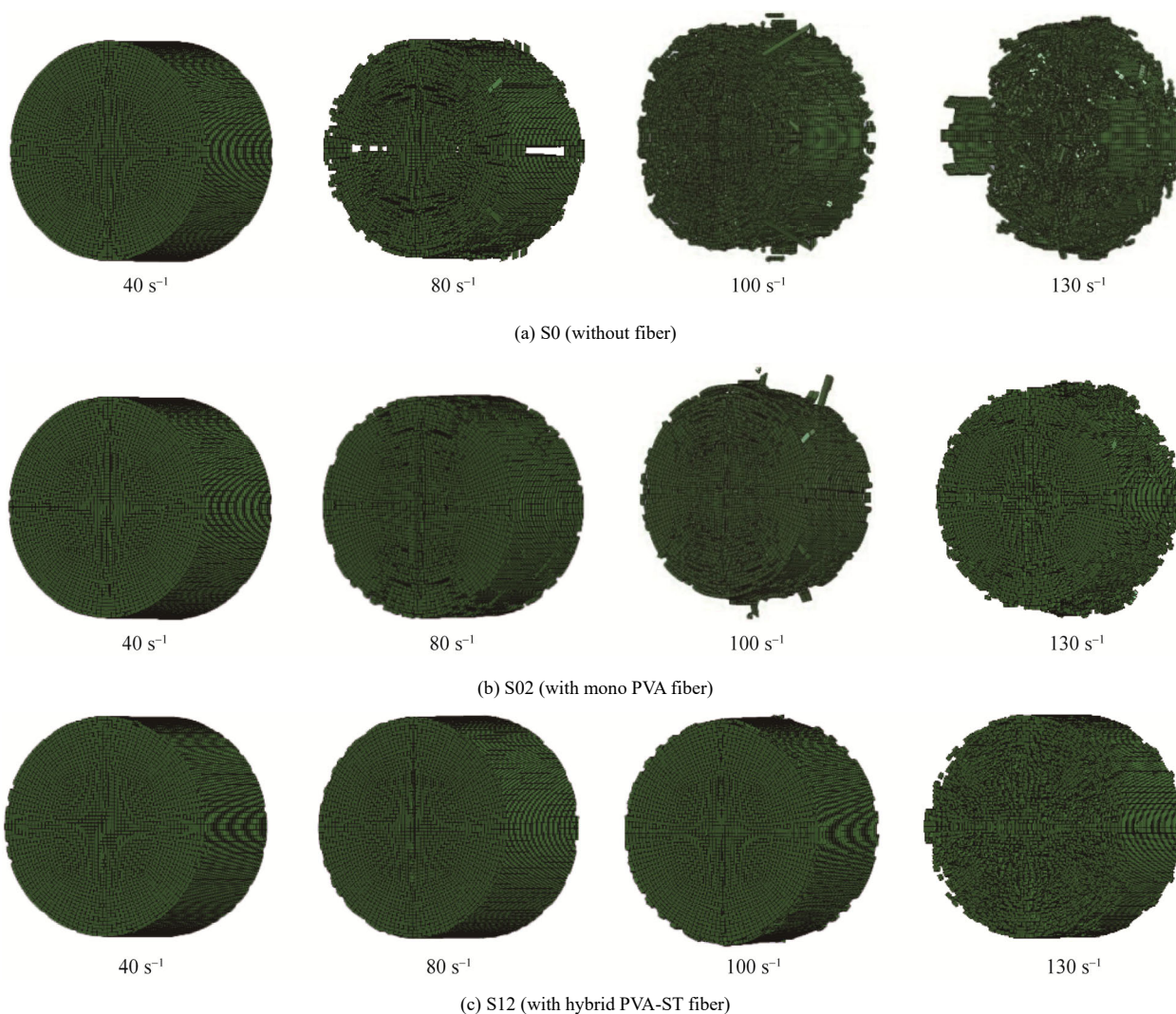


图 8 不同应变率下 SCAC 的模拟破坏状态

Fig. 8 Simulated failure patterns of SCAC at different strain rates

纤维和钢纤维的先后掺入, SCAC 的整体性能得到加强, 表征 SCAC 模拟破坏状态的参数也得到优化, 失效单元数明显减少。其中, 单掺 PVA 纤维的 SCAC 在各应变率下的模拟破坏状态显著优于不掺纤维, 而混杂 PVA-钢纤维即使在高应变率下仍保持较高整体性, 失效单元数最少, 外部仅存在少量单元的剥落, 验证了混杂 PVA-钢纤维 SCAC 优异的抗冲击能力。与试验情况比较, 模拟所得破坏状态并无

太大差异, 体现出 HJC 模型及 SCAC 模型参数的适用性。

## 4 结论

1) SCAC 的应变率敏感性随应变率增加而表现显著。掺入纤维减缓 SCAC 动态压应力-应变曲线的下降趋势, 显著改善 SCAC 的脆化程度和动态力学性能。其中, PVA 纤维对于 SCAC 的增强作用滞

后于钢纤维, 混杂纤维 SCAC 在各应变率下取得的增强增韧效果优于单掺 PVA 纤维体系。

2) 在本研究的应变率范围内, 对数相关方程能较好地描述各纤维掺量 SCAC 的 DIF 随应变率的变化规律。单掺 PVA 纤维 SCAC 的准静态强度越高, 其在各应变率下的 DIF 越大, 但 PVA 纤维在高应变率下的增强效率有所减弱。混杂 PVA-钢纤维能显著提升 SCAC 的应变率敏感性和 DIF, 尤其在高应变率  $130\text{ s}^{-1}$  时, S12 的 DIF 比 S02 高 18%。

3) 不掺纤维 SCAC 的冲击破碎程度随应变率增加而增大, 且破碎路径倾向于贯穿珊瑚骨料。纤维对基体的桥接作用可减轻 SCAC 的破碎程度, 并且纤维掺量越大, 其对 SCAC 破碎程度的抑制作用越强。随 PVA 纤维掺量增加, 单掺纤维 SCAC 在各应变率下的破碎程度得到更大的抑制。混杂纤维 SCAC 的动态破坏模式更优, 即使在高应变率  $138.2\text{ s}^{-1}$  下也仅产生局部边缘破碎, 剥落碎块少于试块的 10%。

4) 模拟所得 SCAC 动态压应力应变曲线与实际试验结果拥有较高的吻合度, 模拟动态峰值应力与实验值相对误差集中在 0.14%~10.86%, 动态峰值应变误差的分布基本在 20% 的范围内。SCAC 的失效消除单元数随应变率增加而逐渐增多, 在掺入纤维 (尤其是混杂 PVA-钢纤维) 后最终失效单元数显著减少, 印证了不同纤维掺量 SCAC 的破坏模式转变。

#### 参考文献:

- [1] 蔡新光, 赵青, 陈惠苏. 珊瑚混凝土研究现状[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1753–1764.  
CAI Xinguang, ZHAO Qing, CHEN Huifen, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(8): 1753–1764.
- [2] XIAO J Z, QIANG C B, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities[J]. Constr Build Mater, 2017, 155(30): 1101–1111.
- [3] 王振波, 刘伟康, 韩宇栋, 等. 实现高强度海水珊瑚骨料混凝土的配合比设计[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 181–185.  
WANG Zhenbo, LIU Weikang, HAN Yudong, et al. Ind Constr (in Chinese), 2021, 51(6): 181–185.
- [4] NIU D T, SU L, LUO Y, et al. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 237(20): 117628.
- [5] WANG A G, LYU B C, ZHANG Z H, et al. The development of coral concretes and their upgrading technologies: A critical review[J]. Constr Build Mater, 2018, 187: 1004–1019.
- [6] HOWDYSHELL P A. The Use of Coral as an Aggregate for Portland Cement Concrete Structures[R]. [S.l.]: Army Constr Eng Res Lab, 1974.
- [7] 周文, 周永祥, 宋普涛, 等. 低品位全珊瑚骨料混凝土强度提升技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(4): 1–3.  
ZHOU Wen, ZHOU Yongxiang, SONG Putao, et al. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2019(4): 1–3.
- [8] WU W J, WANG R, ZHU C Q, et al. The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 185(10): 69–78.
- [9] 鲁于, 黄一杰, 王海超, 等. 改性海水海砂珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(4): 150–154.  
LU Yu, HUANG Yijie, WANG Haichao, et al. Concrete (in Chinese), 2019(4): 150–154.
- [10] 韩宇栋, 王振波, 刘伟康, 等. 不同强度海水珊瑚骨料混凝土断裂性能对比研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 881–886.  
HAN Yudong, WANG Zhenbo, LIU Weikang, et al. J Build Mater (in Chinese), 2021, 24(4): 881–886.
- [11] ARUMUGAM R, A, et al. Study of compressive strength characteristics of coral aggregate concrete[J]. Mag Concr Res, 1996, 48(176): 141–148.
- [12] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 122(sep. 30): 81–89.
- [13] 马林建, 罗棕木, 段力群, 等. 全珊瑚混凝土的脆性评价[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 281–288.  
MA Linjian, LUO Zongmu, DUAN Liquan, et al. J Chin Univ Min Technol (in Chinese), 2021, 50(2): 281–288.
- [14] WANG Z B, ZUO J P, LIU C, et al. Stress-strain properties and gas permeability evolution of hybrid fiber engineered cementitious composites in the process of compression[J]. Materials, 2019, 12(9): 1382.
- [15] WANG L, SHEN N, YU D, et al. Strengthening mechanism and microstructures of fiber reinforced coral concrete[J]. Struct Build, 2020(2): 1–29.
- [16] LIU B, ZHOU J, WEN X, et al. Experimental investigation on the impact resistance of carbon fibers reinforced coral concrete[J]. Materials (Basel), 2019, 12(23): 4000.
- [17] 吴文娟, 汪稔, 朱长歧, 等. 珊瑚骨料混凝土动态压缩性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 7–14.  
WU Wenjuan, WANG Ren, ZHU Changqi, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(1): 7–14.
- [18] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Specimen size effect on the splitting-tensile behavior of coral aggregate concrete: A 3D mesoscopic study[J]. Eng Fail Anal, 2021, 127: 105395.
- [19] 岳承军, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土冲击压缩性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 283–290.  
YUE Chengjun, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Build Mater (in Chinese), 2021, 24(2): 283–290.
- [20] 韩宇栋, 郝挺宇, 王建平, 等. 一种用于海水珊瑚骨料混凝土的固盐剂[P]. CN Patent, CN106396531A, 2017-02-15.  
HAN Yudong, HAO Tingyu, WANG Jianping, et al. A Composite mineral admixture for seawater coral aggregate concrete (in Chinese), CN106396531A, 2017-02-15.
- [21] 关国英, 赵文杰. 纤维增强水泥基复合材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3342–3360.  
GUAN Guoying, ZHAO Wenjie. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(10): 3342–3360.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 50081-2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [23] SCHLANGEN E, MIER J. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. Mater

- Struct, 1992, 25(9): 534–542.
- [24] LI Q M, MENG H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test International Journal of Solids and Structures[J]. Inter J Solids Struct, 2003, 40(2): 343–360.
- [25] WANG Z L, LIU Y S, SHEN R F, et al. Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression[J]. Constr Build Mater, 2008, 22(5): 811–819.
- [26] TEDESCO J W, ROSS C A, KUENNEN S T J A M J. Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting tensile tests[J]. J ACI Mater, 1993, 90(2): 162–169.
- [27] GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization[J]. Inter J Impact Eng, 2001, 25(9): 869–886.
- [28] 华渊, 连俊英, 周太全. 长径比对混杂纤维增强混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005(1): 71–76.  
HUA Yuan, LIAN Junying, ZHOU Taiquan. J Build Mater (in Chinese), 2005(1): 71–76.
- [29] 马林建, 李增, 陈欣星, 等. 珊瑚混凝土基本特性及工程应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2471–2477.  
MA Linjian, LI Zeng, CHEN Xinxing, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(8): 2471–2477.
- [30] WANG Z L, SHI Z M, WANG J G, et al. On the strength and toughness properties of SFRC under static-dynamic compression[J]. Composites: Part B, 2011, 42(5): 1285–1290.
- [31] 余道兴, 宗周红, 李明鸿, 等. 基于不同材料模型的混凝土 SHPB 试验数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 124–129.  
YU Daoxing, ZONG Zhouhong, LI Minghong, et al. J Southeast Univ (Nat Sci, in Chinese), 2017, 47(1): 124–129.
- [32] JANKOWIAK T, RUSINEK A, VOYIADJIS G Z. Modeling and design of SHPB to characterize brittle materials under compression for high strain rates[J]. Materials (Basel), 2020, 13(9): 2191.
- [33] 巫绪涛, 李耀, 李和平. 混凝土 HJC 本构模型参数的研究[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2): 340–344, 443.  
WU Xutao, LI Yao, LI Heping. Chin J Appl Mech (in Chinese), 2010, 27(2): 340–344, 443.
- [34] WANG C, SONG R, WANG G, et al. Modifications of the HJC (Holmquist-Johnson-Cook) model for an improved numerical simulation of roller compacted concrete (RCC) structures subjected to impact loadings[J]. Materials (Basel), 2020, 13(6): 1361.
- [35] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. J Applied Mech-Transact Asm, 2011, 78(5): 051003.
- [36] 巫绪涛, 孙善飞, 李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 137–142.  
WU Xutao, SUN Shanfei, LI Heping. J Explos Shock Waves (in Chinese), 2009, 29(2): 137–142.
- [37] 焦楚杰, 蒋国平, 高乐. 钢纤维高强混凝土抗冲击性能的数值仿真[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 350–353.  
JIAO Chujie, JIANG Guoping, GAO Le. J Jiangsu Univ (Nat Sci, in Chinese), 2012, 33(3): 350–353.