

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0297

# PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料 冲击压缩力学性能研究\*

郑志豪<sup>1</sup>, 任辉启<sup>2</sup>, 龙志林<sup>1</sup>, 郭瑞奇<sup>1</sup>, 蔡洋<sup>1</sup>, 黎智健<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 在人工海水制备珊瑚砂水泥基复合材料中混杂加入碳纤维和聚丙烯纤维, 得到 4 种不同纤维掺量的碳-聚丙烯混杂纤维增强珊瑚砂水泥基复合材料。采用直径 100 mm 的分离式 Hopkinson 压杆, 对材料进行 5 种应变率下的冲击压缩试验, 采用 LS-DYNA 进行相应的冲击压缩数值模拟。结果表明: (1) 试验应变率临界值为  $200 \text{ s}^{-1}$ , 当试验应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  时, 混杂碳纤维和聚丙烯纤维所形成的纤维网络对试块的增韧效果加强; (2) 碳-聚丙烯混杂纤维增强珊瑚砂水泥基复合材料峰值应力具有明显的应变率效应, 且动态增强因子对应变率的敏感程度较高; (3) 使用珊瑚砂细骨料导致试块内微裂纹和微空洞等缺陷较多, 在珊瑚砂水泥基复合材料内混杂掺加碳纤维和聚丙烯纤维后, 试块冲击抗压强度的提升有限, 但珊瑚砂水泥基复合材料的抗冲击韧性显著提升; (4) 通过试验数据和参数调试确定了 HJC 模型的参数, 试块峰值应力的模拟结果与试验结果的误差在 5.97% 以内。

**关键词:** 碳纤维; 聚丙烯纤维; 珊瑚砂水泥基复合材料; 分离式 Hopkinson 压杆; 冲击压缩力学性能; LS-DYNA

中图分类号: O346

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## A study on impact compression mechanical properties of PP/CF reinforced coral sand cement-based composites

ZHENG Zhihao<sup>1</sup>, REN Huiqi<sup>2</sup>, LONG Zhilin<sup>1</sup>, GUO Ruiqi<sup>1</sup>, CAI Yang<sup>1</sup>, LI Zhijian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

2. Institute of Defense Engineering, Military Academy of Sciences, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** Four kinds of carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites with different fiber content were obtained by mixing carbon fiber and polypropylene fiber into coral sand cement-based composites prepared by artificial seawater. Impact compression tests of this material under five strain rates were carried out with a 100-mm diameter split Hopkinson pressure bar. The parameters of Holmquist-Johnson-Cook model are determined by experimental data and parameter debugging. Based on Holmquist-Johnson-Cook model, LS-DYNA is used to simulate the impact compression of this material. By analyzing the failure mode, stress-strain curve and energy dissipation of the test blocks, the impact compression mechanical properties of carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites are studied. The results are as follows. (1) The critical value of test strain rate is  $200 \text{ s}^{-1}$ ; when the test strain rate is greater than  $200 \text{ s}^{-1}$ , the fiber network formed by hybrid carbon fiber and polypropylene fiber strengthens the toughening effect of the test block. (2) The peak stress of carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites exhibits obvious strain rate

\* 收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51971188); 湖南省科技重大专项 (2019GK1012);  
湖湘高层次人才聚集工程-创新团队项目 (2019RS1059)

第一作者: 郑志豪 (1998—), 男, 硕士研究生, zzhxtu@163.com

通信作者: 任辉启 (1953—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, huiq\_ren@163.com

effect, and the dynamic increase factor is highly sensitive to the strain rate. (3) The use of fine aggregate of coral sand results in more defects such as micro-cracks and micro-voids in the test block; after mixing carbon fiber and polypropylene fiber into the coral sand cement-based composites, the improvement of the impact compressive strength of the test block is limited, but the impact toughness of the coral sand cement-based composites is significantly enhanced. (4) LS-DYNA is used to numerically simulate the impact compression test process of hybrid carbon fiber ( $15.75 \text{ kg/m}^3$ ) and polypropylene fiber ( $1.82 \text{ kg/m}^3$ ), while the error between the simulation results of peak stress and the test results is within 5.97%. The study is of great significance for the preparation of high performance coral sand cement-based composites and the emergency repair of offshore islands and reefs.

**Keywords:** carbon fiber; polypropylene fiber; coral sand cement-based composites; split Hopkinson pressure bar; impact compression mechanical properties; LS-DYNA

南海岛礁距离大陆较远,在南海岛礁工程建设中,面临工程建设物资匮乏、海洋环境对混凝土材料产生不利影响<sup>[1]</sup>、工程建设周期长成本高等难题。南海区域位于低纬度地区且靠近赤道,属于热带季风气候,气候环境具有高温高盐高湿的特点。因此,用于南海岛礁工程的建筑材料,需要有较强的抗渗透能力和耐腐蚀能力<sup>[2]</sup>。

南海岛礁区域的建筑物和构筑物受到海水的侵蚀、海浪的冲击及海风的剥蚀;若建筑物和构筑物的选址处于地震带,需要考虑地震荷载作用;若建筑物和构筑物较高,需要考虑风荷载影响;机场跑道需承受飞机降落的冲击荷载,防护堤坝需承受海浪的冲击作用<sup>[3]</sup>。因此,用于南海岛礁工程的建筑材料,需要考虑其动态力学性能<sup>[4]</sup>。

在南海岛礁工程建设中,使用海水制备珊瑚砂水泥基复合材料,能较大程度降低工程成本,减少对大陆资源的依赖,具有重要的工程应用价值。珊瑚质轻、多孔,强度并不高,制备的珊瑚混凝土强度较低且脆性大。如何制备高强度和高韧性的珊瑚混凝土,困扰着研究人员和工程技术人员。目前,纤维增强水泥基复合材料所使用的增强增韧纤维主要有聚丙烯纤维<sup>[5-6]</sup>、聚乙烯醇纤维<sup>[7]</sup>、钢纤维<sup>[8]</sup>、碳纤维<sup>[9-10]</sup>和玄武岩纤维<sup>[11]</sup>等。碳纤维(carbon fiber, CF)材料具有高强度、耐高温和耐腐蚀的优点;聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PP)材料具有高强度、耐腐蚀、拉伸应变硬化、伸长率大且在水泥砂浆中分散均匀的优点,应用范围十分广泛。单掺纤维有一定局限性,为综合改善材料的力学性能,可考虑在材料中掺加混杂纤维<sup>[12]</sup>。

本文中,基于碳纤维和聚丙烯纤维的优良性能,混杂碳纤维和聚丙烯纤维对海水制备珊瑚砂水泥基复合材料进行改性。采用直径 100 mm 分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对改性复合材料进行 5 种应变率下的冲击压缩试验,研究碳-聚丙烯混杂纤维(PP/CF)增强珊瑚砂水泥基复合材料的冲击压缩力学性能,以期对制备高性能珊瑚砂水泥基复合材料及南海岛礁抢修抢建工程提供参考。

## 1 试 验

### 1.1 原材料和配比

原材料包括安宜特牌快硬硫铝酸盐水泥、一级粉煤灰、珊瑚砂细骨料、日本东丽牌碳纤维、湖南长沙梓祥聚丙烯纤维、人工海水和西卡牌聚羧酸减水剂。珊瑚砂细骨料的最大粒径为 2.5 mm,细度模数为 1.88,分类为细砂。碳纤维和聚丙烯纤维的性能参数,见表 1。

表 1 碳纤维和聚丙烯纤维的性能参数

Table 1 Properties of carbon fiber and polypropylene fiber

原材料	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	长度/mm	直径/ $\mu\text{m}$	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
碳纤维	1.75	12	7.0	228	3 500
聚丙烯纤维	0.91	19	32.7	4.236	469

PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的原材料配比见表 2。采用纤维后掺法: 先将珊瑚砂细骨料、水泥和粉煤灰与 2/3 用水量搅拌约 2 min, 再加入减水剂与 1/3 用水量搅拌 2 min; 最后, 将纤维均匀撒入珊瑚砂水泥基复合材料拌合物中, 尽可能使纤维分散均匀。待搅拌均匀后, 采用塌落度桶法测定材料的塌落度。

表 2 PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的配比

Table 2 Proportion of carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites

复合材料	w/(kg·m <sup>-3</sup> )							水胶比	塌落度/mm
	水泥	粉煤灰	珊瑚砂	人工海水	减水剂	碳纤维	聚丙烯纤维		
1	450	450	1 080	225	9	0	0	0.25	0
2	450	450	1 080	225	9	5.25	1.82	0.25	70
3	450	450	1 080	225	9	10.50	1.82	0.25	65
4	450	450	1 080	225	9	15.75	1.82	0.25	60

标定材料强度等级的试块为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体, 冲击压缩试验的试块为  $\varnothing 90$  mm×50 mm 的圆柱体, 圆柱体试块模具为亚克力材质。模具外观如图 1 所示, 圆柱体试块如图 2 所示。在冲击压缩试验前, 需对试块端面进行打磨, 试块两端面的不平度应小于 0.05 mm。试块动态增强因子  $d_{if}$  为试块动态抗压强度与静态抗压强度的比, 其中静态抗压强度取 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体龄期 28 d 的静态抗压强度。

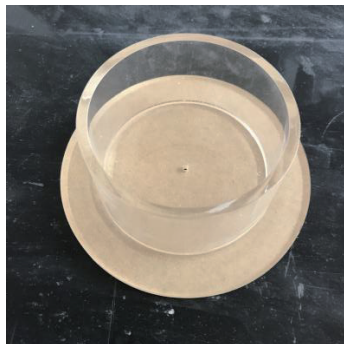


图 1 圆柱体试块模具

Fig. 1 Cylindrical test block mold



图 2 圆柱体试块

Fig. 2 Cylinder test block

## 1.2 静态压缩试验

试块达到 7、28 d 龄期后, 使用 SYE-2000 型压力试验机进行静态压缩试验。静态压缩试验每种情况均有 3 个试块, 因珊瑚砂水泥基复合材料为非均质材料、具有离散性, 将峰值压力荷载的离散性控制在 15% 以内, 舍弃离散性大于 15% 的数据。对有效数据进行处理, 得到不同龄期试块的平均静态抗压强度, 见表 3。龄期 7 d 试块的静态抗压强度可达到龄期 28 d 的 90% 以上, 表现了明显的早强性, 这与使用了快硬硫铝酸盐水泥关系密切。复合材料具有明显的早强性, 可用于南海岛礁抢修抢建工程中。

表 3 不同龄期试块的静态抗压强度

Table 3 Static compressive strengths of test blocks at different ages

试块	龄期/d	静态抗压强度/MPa	强度升降/%
1	7	37.64	0
	28	40.67	0
2	7	34.80	-7.54
	28	35.11	-13.67
3	7	39.52	4.99
	28	42.06	3.41
4	7	47.64	26.57
	28	48.31	18.78

在相同龄期下,随着混杂纤维掺量的不断增加,试块静态抗压强度呈现先减小后增大的趋势。与未掺加纤维的试块相比,混杂掺加  $5.25 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的 7 d 试块的静态抗压强度降低了 7.54%, 28 d 的降低了 13.67%, 这说明该掺量混杂纤维在珊瑚砂水泥基复合材料内出现负混杂效应, 降低了材料的强度。而混杂掺加  $15.75 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的 7 d 试块的静态抗压强度提升了 26.57%, 28 d 的提升了 18.78%, 这说明该掺量混杂纤维对珊瑚砂水泥基复合材料增强作用明显。

静态压缩试验中较为典型的破坏形态,有材料严重剥落和外观较为完整,如图 3~4 所示。未掺加纤维试块的静态压缩破坏形态较为严重,出现严重的材料剥落。随着混杂碳纤维和聚丙烯纤维掺量的增加,试块静态压缩破坏严重程度逐渐降低,混杂纤维在试块内部形成的纤维网络起到桥接作用,显著提升了试块的韧性。



图 3 材料严重剥落

Fig. 3 Severe material spalling of test block

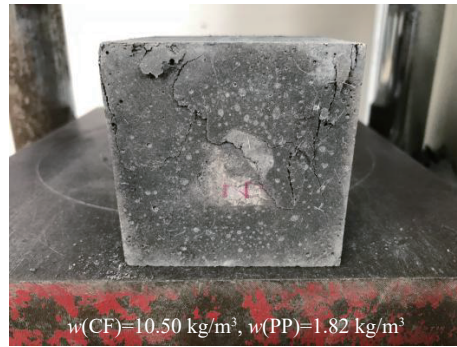


图 4 外观较为完整

Fig. 4 Complete appearance of test block

### 1.3 SHPB 试验及波形整形

分离式 Hopkinson 压杆的直径为 100 mm, 入射杆长度为 5 000 mm, 透射杆长度为 3 000 mm, 子弹长度为 600 mm, 试验装置如图 5 所示。通过控制加载气压, 对材料实现不同应变率的加载。使用经典三波法处理试验数据, 可得材料的应力、应变<sup>[13]</sup>:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{L_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0}{2A_s} E [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_I$ 、 $\varepsilon_R$  和  $\varepsilon_T$  分别为入射应变、反射应变和透射应变,  $A_0$ 、 $c_0$  和  $E$  分别为压杆的横截面积、波速和弹性模量,  $A_s$  和  $L_s$  分别为试块的即时横截面积和即时长度。其中,  $c_0 = (E/\rho)^{1/2}$ ,  $\rho$  为压杆密度。

SHPB 冲击压缩试验每个加载气压下均有 3 个试块, 因珊瑚砂水泥基复合材料为非均质材料、具有离散性, 且在打磨试块端面时有人工误差, 将峰值应力的离散性控制在 20% 以内, 舍弃离散性大于 20% 的数据。对有效数据进行处理, 取最接近峰值应力平均值的数据为最终数据。

使用不同尺寸的橡胶实心圆进行波形整形, 波形整形后的入射波应力曲线如图 6 所示。改变波形整形器的直径或厚度, 可得不同的入射波波形和加速度脉冲<sup>[14]</sup>。SHPB 冲击压缩试验前, 需选择合适的波形整形器材料及尺寸<sup>[15]</sup>。试验结果发现, 通过调整橡胶实心圆的厚度和直径, 可得不同撞击速度下较为光滑的入射波形。为保证入射波为半正弦状且减小入射波振荡, 使用直径 37 mm、厚 2 mm 的橡胶实心圆, 作为 SHPB 试验的波形整形器。



图 5 分离式 Hopkinson 压杆试验装置

Fig. 5 Split Hopkinson pressure bar test device

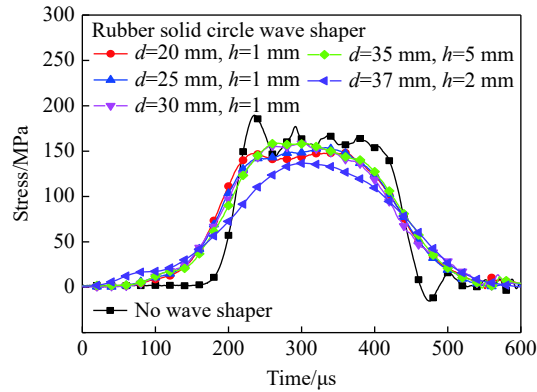


图 6 入射波应力曲线

Fig. 6 Stress curves of incident waves

## 2 SHPB 试验结果

将试验的电压信号换算成应变, 初始应变波如图 7 所示。处理试验数据前, 先进行应力平衡验证, 验证试验数据是否满足 SHPB 试验的应力平衡假定。若入射波和反射波叠加后接近透射波, 则认为试块达到了应力平衡状态。应变率为  $79.86 \text{ s}^{-1}$  时, 试块的应力平衡验证如图 8 所示。

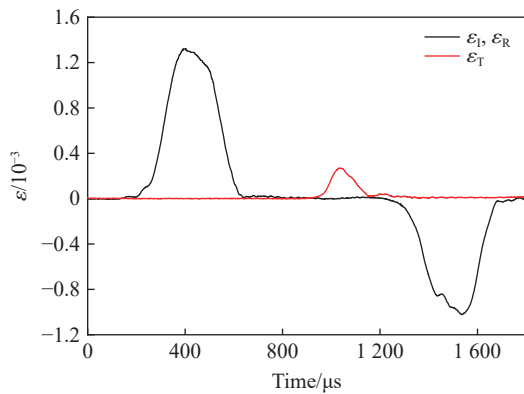


图 7 初始应变波

Fig. 7 Initial strain waves

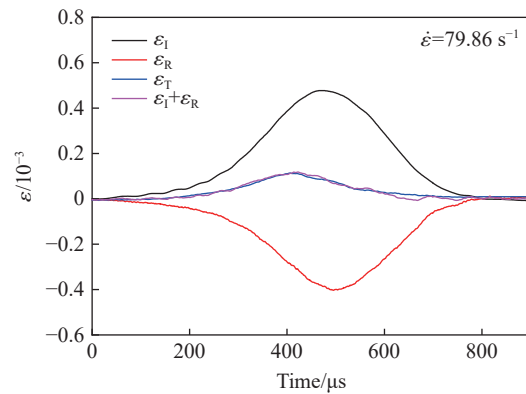


图 8 应力平衡验证

Fig. 8 Verification of stress balance

应力波在试块内来回反射 4 次可保证应力均匀<sup>[16]</sup>, 在峰值点前半段, 应力波来回反射次数可满足应力均匀要求, 应力平衡状态较为理想。在峰值点后半段, 试块已出现不同程度的破坏, 应力波来回反射次数无法满足应力均匀要求, 应力平衡效果稍差。在高应变率下, 峰值点后半段应力不平衡现象更加明显。

### 2.1 试块破坏形态

不同应变率下, 试块呈现不同的破坏形态, 破坏形态可大致分为大碎块、小碎块和粉碎。在应变率  $70 \text{ s}^{-1}$  附近, 随着混杂纤维掺量的逐渐增加, 试块的破坏程度逐渐降低, 破坏碎块逐渐变大且碎块数量逐渐减少, 材料抗冲击性能显著提升。在应变率  $220 \text{ s}^{-1}$  附近, 冲击荷载带来的巨大能量远大于材料的极限承载力, 随着混杂纤维掺量的不断增加, 试块的破坏形态无明显差异, 破坏形态均为粉碎。

对混杂  $10.50 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的试块, 当应变率为  $75.90 \text{ s}^{-1}$  时, 试块的破坏碎块较大且碎块数量较少。随着应变率的不断增加, 破坏程度趋于严重, 破坏产生的碎块逐渐变小。当应变率达到  $220.31 \text{ s}^{-1}$  时, 试块的破坏形态为粉碎。这是因为, 受高应变率冲击荷载所携带的巨大能量作用, 试块从受力较为薄弱截面开始发生破坏, 随后分区域整体来抵抗冲击荷载的影响, 直至耗散尽冲击

荷载所释放的巨大能量,最终呈现粉碎破坏状态<sup>[17]</sup>。试验结果表明,随着应变率的逐渐增大,试块所承受的动态荷载迅速增加,发生变形的时间极短,裂纹来不及扩展,试块迅速达到破坏状态,破坏形态趋于严重。

水泥基复合材料性脆,其破坏形态为典型的脆性破坏<sup>[18]</sup>。在珊瑚砂水泥基复合材料内混杂掺加碳纤维和聚丙烯纤维后形成纤维网络,纤维网络在试块内产生约束作用,从而提升了试块的变形能力。在相同冲击荷载作用下,混杂碳纤维和聚丙烯纤维试块的破坏程度较轻,具有更好的抗冲击性能,混杂纤维对珊瑚砂水泥基复合材料有明显的增韧作用。

## 2.2 应力-应变曲线

在冲击压缩荷载作用下,试块的冲击压缩应力-应变曲线可分为上升段、平台段和下降段<sup>[19]</sup>。上升段近似为线弹性阶段,当冲击荷载达到试块的破坏临界峰值,材料应力-应变曲线进入平台段,因高应变率下材料变形时间极短,平台段并不明显。试块达到峰值应力后处于卸载状态,应力-应变曲线进入下降段。PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的冲击压缩应力-应变曲线,如图 9 所示。

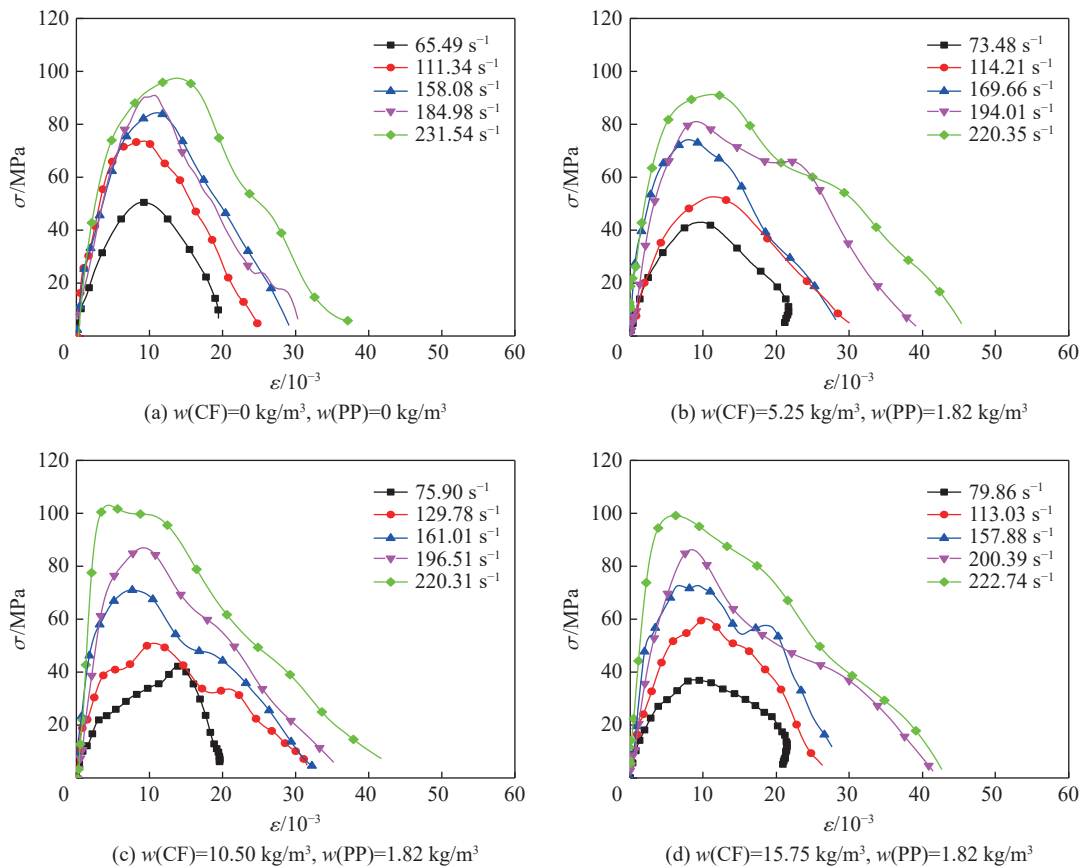


图 9 应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves

试验结果表明,随着应变率的逐渐增大,相同材料的峰值应力不断增大,应力-应变曲线下降段面积逐渐增大,平台段无明显变化。而混杂  $10.50 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的试块,当应变率为  $220.31 \text{ s}^{-1}$  时,冲击压缩应力-应变曲线呈现明显平台段。随着碳纤维和聚丙烯纤维混杂掺量的增加,应力下降速率变慢,这说明:混杂纤维与水泥基耦合良好,混杂纤维在试块内部形成的纤维网络起到了桥接作用,在一定程度上提升了材料的变形能力。

混凝土材料内骨料级配、粒径及表面结构,对材料动态响应影响较大<sup>[20]</sup>。基于南海岛礁建设的工程背景,本试验中细骨料为珊瑚砂,其粒径均小于  $2.5 \text{ mm}$ ,珊瑚砂骨料的使用致使试块内微裂纹和微空洞

等缺陷较多。在珊瑚砂水泥基复合材料内混杂掺加碳纤维和聚丙烯纤维后, 试块的冲击抗压强度的提升有限, 而抗冲击韧性显著提升。

### 2.3 应变率效应

PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的峰值应力与应变率的关系, 如图 10 所示。可见, 随着应变率的逐渐增加, 试块的峰值应力呈增大趋势, 这说明材料峰值应力有明显的应变率效应。PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的动态增强因子  $f_{di}$  与应变率的关系, 如图 11 所示。可见, 动态增强因子呈现应变率敏感性特征。

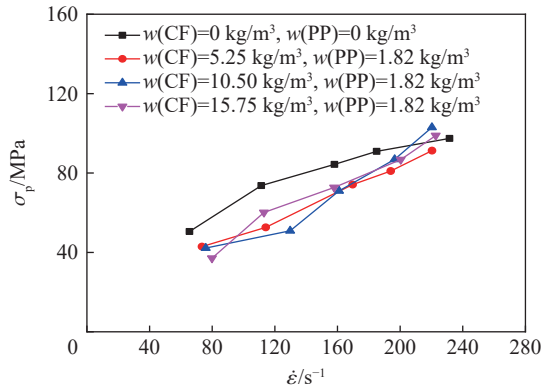


图 10 峰值应力与应变率的关系

Fig. 10 Relations between peak stress and strain rate

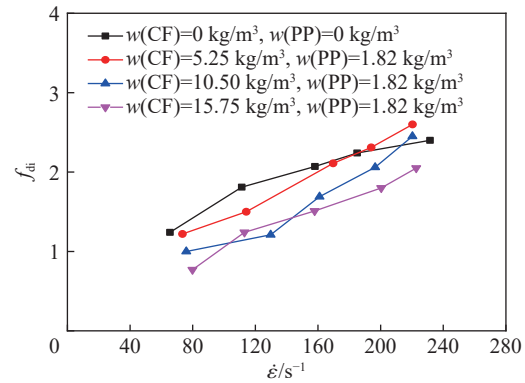


图 11 动态增强因子与应变率的关系

Fig. 11 Relations between dynamic increase factor and strain rate

试验结果表明: (1) 当应变率小于  $200 \text{ s}^{-1}$  时, 未掺加纤维的试块呈现更大的峰值应力和动态增强因子, 这是因掺加的混杂纤维起了负混杂作用, 纤维负混杂作用占优势并降低了试块的动态抗压强度; 当应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  时, 混杂纤维的试块呈现更大的峰值应力和动态增强因子, 混杂纤维对试块增韧作用加强。(2) 当应变率临界值为  $200 \text{ s}^{-1}$ 、应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  时, 混杂纤维对珊瑚砂水泥基复合材料起了增强增韧作用。(3) 随着应变率的增加, 动态增强因子逐渐增大, 最大为 2.60, 动态增强因子与静态抗压强度关系密切<sup>[21]</sup>。

### 2.4 能量耗散

分析混杂纤维增强珊瑚砂水泥基复合材料能量耗散问题, 可参考岩石耗散能量分析方法<sup>[22]</sup>。耗散能量为:

$$W_s = W_I - W_R - W_T \quad (4)$$

$$W_I = \frac{A_0 c_0}{E} \int_0^t \sigma_I^2 dt = A_0 c_0 E \int_0^t \varepsilon_I^2 dt \quad (5)$$

$$W_R = \frac{A_0 c_0}{E} \int_0^t \sigma_R^2 dt = A_0 c_0 E \int_0^t \varepsilon_R^2 dt \quad (6)$$

$$W_T = \frac{A_0 c_0}{E} \int_0^t \sigma_T^2 dt = A_0 c_0 E \int_0^t \varepsilon_T^2 dt \quad (7)$$

式中:  $W_s$  为试块耗散的能量,  $W_I$  为入射波能量,  $W_R$  为反射波能量,  $W_T$  为透射波能量。

入射波能量与应变率的关系如图 12 所示, 耗散能量与应变率的关系如图 13 所示。在相近应变率下, 入射撞击产生的能量基本相同, 入射波能量最大值为 2 795.22 J。当应变率小于  $200 \text{ s}^{-1}$  时, 未掺加纤维的试块耗散能量较多, 而混杂纤维产生的负混杂效应大于纤维正向桥接作用。当应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  后, 掺加混杂纤维的试块耗散能量较多, 此时混杂纤维形成的纤维网络对试块增韧作用加强, 增强了材料的延性、耗散了更多的能量。

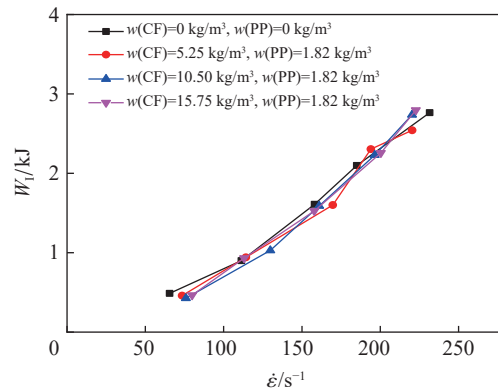


图 12 入射波能量与应变率的关系

Fig. 12 Relations between incident wave energy and strain rate

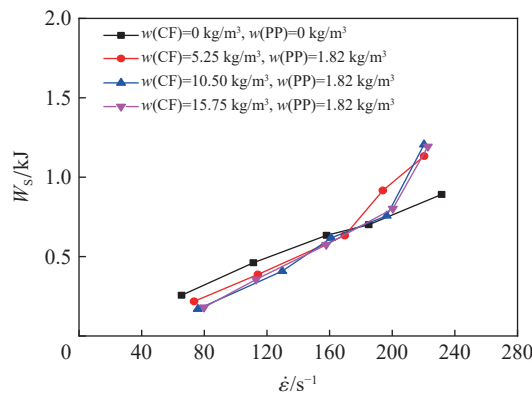


图 13 耗散能量与应变率的关系

Fig. 13 Relations between energy dissipation and strain rate

耗散能量与入射波能量的关系如图 14 所示。当应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  后, 即入射波能量大于  $2300 \text{ J}$  后, 与未掺加纤维试块相比, 掺加混杂纤维试块的耗散能量更多, 混杂纤维对珊瑚砂水泥基复合材料起了增强增韧作用。混杂纤维形成的纤维网络增强了试块的延性, 导致试块表面产生更多的裂纹, 最终形成更多的破裂面、更多的耗散能量。

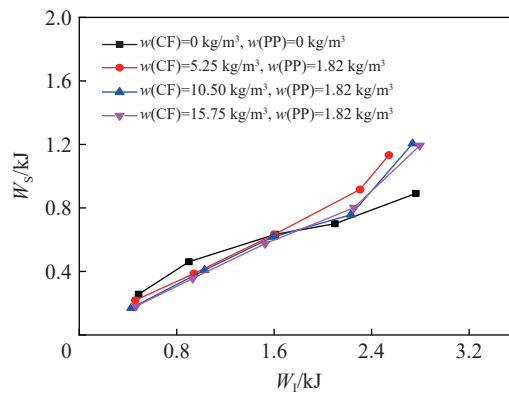


图 14 耗散能量与入射波能量的关系

Fig. 14 Relations between energy dissipation and incident wave energy



### 3 数值模拟

Holmquist-Johnson-Cook(HJC)本构模型常用于混凝土等非均质材料在爆炸冲击下的数值模拟<sup>[23]</sup>。HJC 强度模型的特征化等效应力为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (8)$$

式中:  $\sigma^* = \sigma/f_c$  为特征化等效应力,  $p^* = p/f_c$  为特征化静水压力,  $\sigma$  为实际等效应力,  $p$  为实际静水压力,  $f_c$  为试块单轴静态抗压强度;  $A$ 、 $B$  和  $N$  为本构模型强度参数, 其中  $A$  为特征化黏聚强度参数,  $B$  为特征化压力硬化系数,  $N$  为特征化压力硬化指数;  $C$  为应变率效应系数,  $D$  为压缩损伤因子;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  为特征化应变率,  $\dot{\varepsilon}$  为实际应变率,  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率。

本文中, 基于 HJC 本构模型, 采用 LS-DYNA, 对 SHPB 冲击试验进行数值模拟。

#### 3.1 模型

采用 LS-PrePost 建立简化模型, 入射杆长度为 5 000 mm, 透射杆长度为 3 000 mm, 杆直径为 100 mm, 圆柱体试块直径为 90 mm、长度为 50 mm。采用 Solid 164 八节点六面体单元, 入射杆和透射杆均采用线弹性模型<sup>[24]</sup>, 其中密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 杆件与试块之间为侵蚀面接触, 参照文献 [25]取罚参数因子为 2.0。模型中未引入额外的失效准则来控制单元失效, 而采用 HJC 本构模型自带的失效类型参数作为单元的破坏准则, 即  $S_f=0.002$ 。混凝土中, 碳纤维和聚丙烯纤维融入砂浆中并均匀分布。SHPB 有限元模型如图 15 所示。

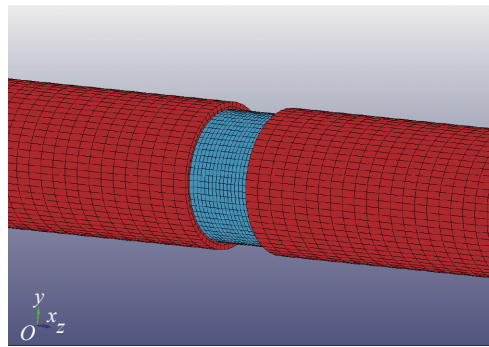


图 15 SHPB 有限元模型

Fig. 15 A finite element model of the SHPB

#### 3.2 参数和结果

由材料的静态试验, 可得  $\rho$ 、 $f_c$ 、 $G$  和  $T$ ; 设压缩损伤因子与材料强度无关, 由文献 [26] 取原始值,  $D_1=0.04$ ,  $D_2=1.0$ ,  $\varepsilon_{f,\min}=0.01$ ,  $p_c=f_c/3$ ; 由文献 [27] 取原始值,  $K_1=85$  GPa,  $K_2=171$  GPa,  $K_3=208$  GPa。参照文献 [28], 调试参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $N$ 。混杂掺加碳纤维 15.75 kg/m<sup>3</sup> 和聚丙烯纤维 1.82 kg/m<sup>3</sup> 的珊瑚砂水泥基复合材料的 HJC 模型参数, 见表 4。

表 4 PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的 HJC 模型参数

Table 4 HJC model parameters of the carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$G/\text{GPa}$	$A$	$B$	$f_c/\text{MPa}$	$C$	$N$	$S_{\max}$	$T/\text{MPa}$	$D_1$
2.12	10.66	0.62	1.60	48.31	0.006 5	0.61	7	4.009	0.04
$D_2$	$\varepsilon_{f,\min}$	$p_c/\text{MPa}$	$\mu_c$	$p_f/\text{MPa}$	$\mu_f$	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$	$S_f$
1.0	0.01	16.10	0.001	800	0.1	85	171	208	0.002

为保证数值模拟真实的试验, 采用试验的入射波数据为数值模拟的加载曲线。当应变率分别为 113.03、157.88、200.39 和 222.74  $s^{-1}$  时, 混杂掺加 15.75  $kg/m^3$  碳纤维和 1.82  $kg/m^3$  聚丙烯纤维试块的冲击压缩试验的应力-应变曲线如图 16 所示。数值模拟结果的应力-应变曲线上升段与试验结果拟合较好, 但下降段偏差较大。

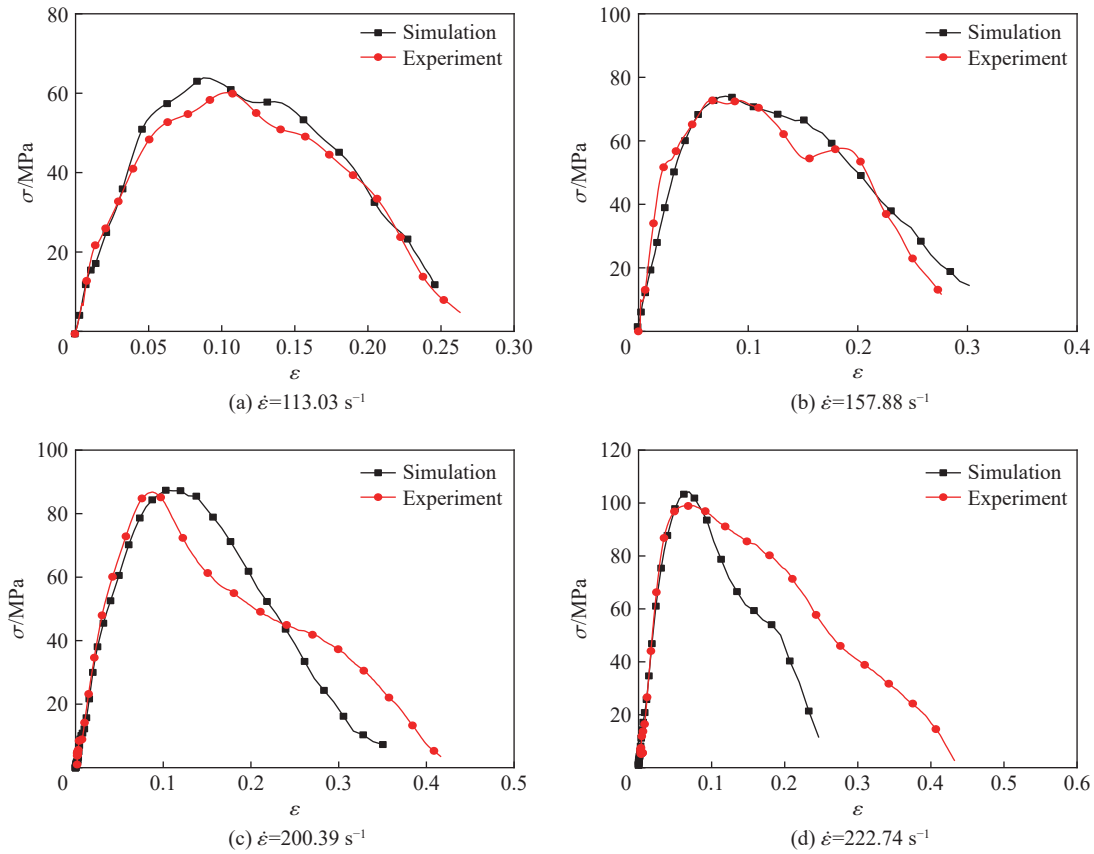


图 16 PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料的应力-应变曲线

Fig. 16 Stress-strain curves of the carbon-polypropylene hybrid fiber reinforced coral sand cement-based composites

数值模拟的应力-应变曲线下降段与试验的偏差较大, 主要因试验过程中有压碎、重组和压实所致, 而有限元数值模拟无法准确模拟冲击压缩破坏过程。

### 3.3 有效性验证

数值模拟与试验结果的数据比较, 见表 5。在 4 个应变率下, 数值模拟的峰值应力与试验结果的误差为 0.67%~5.97%, 数值模拟的峰值应变与试验结果的误差为 1.47%~15.90%。这说明, 参数调试后的 HJC 模型能较好地适用于 PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料。

表 5 数值模拟结果有效性验证

Table 5 A validation of numerical simulation results

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$f_c/MPa$	$\sigma_p/MPa$		$\eta_{\sigma}/\%$	$\epsilon_p$		$\eta_{\epsilon}/\%$
		试验	模拟		试验	模拟	
113.03	48.31	60.12	63.71	5.97	0.0103	0.0092	10.68
157.88	48.31	72.71	73.72	1.39	0.0068	0.0073	7.35
200.39	48.31	86.76	87.34	0.67	0.0088	0.0102	15.90
222.74	48.31	98.89	104.28	5.45	0.0068	0.0069	1.47

## 4 结 论

(1) 随着混杂碳纤维和聚丙烯纤维掺量的增加, 混杂纤维增强珊瑚砂水泥基复合材料的静态抗压强度先减小、后增大。混杂掺加  $15.75 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的珊瑚砂水泥基复合材料与未掺加纤维的相比, 龄期 7 d 的静态抗压强度增加了 26.57%, 28 d 的增加了 18.78%。

(2) 使用珊瑚砂细骨料, 导致试块内微裂纹和微空洞等缺陷较多。混杂掺加碳纤维和聚丙烯纤维后, 珊瑚砂水泥基复合材料的抗压强度提升有限、抗冲击韧性提升较明显。

(3) 在相同冲击荷载下, 混杂碳纤维和聚丙烯纤维珊瑚砂水泥基复合材料的破坏程度比未掺加纤维的轻。应变率大于  $200 \text{ s}^{-1}$  后, 混杂纤维形成的纤维网络对试块的增韧作用加强, 试块耗散能量更多, 呈现更好的冲击韧性。

(4) PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料峰值应力具有明显的应变率效应, 且材料动态增强因子对应变率的敏感度较高。

(5) 基于 HJC 模型, 采用 LS-DYNA 对混杂  $15.75 \text{ kg/m}^3$  碳纤维和  $1.82 \text{ kg/m}^3$  聚丙烯纤维的珊瑚砂水泥基复合材料进行冲击压缩试验过程的数值模拟, 根据试验数据和参数调试确定 HJC 模型参数。峰值应力数值模拟与试验结果的误差为 0.67%~5.97%, 参数调试后的 HJC 模型适用性较好。

在进一步研究中, 将建立考虑纤维随机分布的纤维混凝土细观模型, 利用数值计算拓展试验结果, 再优化碳纤维和聚丙烯纤维的掺量。

## 参考文献:

- [1] 岳承军, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土动态冲击性能试验研究 [J]. *材料导报*, 2019, 33(16): 2697–2703. DOI: 10.11896/cldb.18070094.  
YUE C J, YU H F, MA H Y, et al. Experiment study on dynamic impact properties of coral aggregate seawater concrete [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(16): 2697–2703. DOI: 10.11896/cldb.18070094.
- [2] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海岛礁普通混凝土结构耐久性的调查研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(8): 1034–1040. DOI: 10.11990/jheu.201505051.  
DA B, YU H F, MA H Y, et al. Investigation of durability of ordinary concrete structures in the South China Sea [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(8): 1034–1040. DOI: 10.11990/jheu.201505051.
- [3] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素 [J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 253–260. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.11.  
DA B, YU H F, MA H Y, et al. Factors influencing durability of coral concrete structure in the South China Sea [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(2): 253–260. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.11.
- [4] 旷杜敏, 龙志林, 周益春, 等. 珊瑚礁岩土材料的物理力学性能研究综述 [J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2018, 40(5): 108–126. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2018.05.017.  
KUANG D M, LONG Z L, ZHOU Y C, et al. A review of the physical and mechanical properties of coral reef [J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2018, 40(5): 108–126. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2018.05.017.
- [5] 谭国金, 朱德祺, 梁春雨, 等. 桥梁用聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的力学性能 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 1396–1402. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20190914.  
TAN G J, ZHU D Q, LIANG C Y, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced engineering cementitious composites for bridges [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1396–1402. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20190914.
- [6] SINGH S, SHUKLA A, BROWN R. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(10): 1919–1925. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.014.
- [7] LI V C, WANG S X, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483–492.
- [8] 严少华, 李志成, 王明洋, 等. 高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(3): 237–241.  
YAN S H, LI Z C, WANG M Y, et al. Dynamic compressive behaviour of high-strength steel fiber reinforced concrete [J].

- Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 237–241.
- [9] 谢金, 杨伟军. 碳纤维增强水泥基复合材料的制备及热电性能研究 [J]. *功能材料*, 2020, 51(4): 4148–4152,4159. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2020.04.025.
- XIE J, YANG W J. Preparation and thermoelectric properties of carbon fiber reinforced cement-based composite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(4): 4148–4152,4159. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2020.04.025.
- [10] LIU G J, BAI E L, XU J Y, et al. Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 119995. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119995.
- [11] 张娜, 周健, 徐名凤, 等. 玄武岩纤维高延性水泥基复合材料的动态力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 053101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0351.
- ZHANG N, ZHOU J, XU M F, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber engineered cementitious composites [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(5): 053101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0351.
- [12] PAKRAVAN H R, JAMSHIDI M, LATIFI M. Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 739–746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.112.
- [13] 郭瑞奇, 任辉启, 张磊, 等. 分离式大直径 Hopkinson 杆实验技术研究进展 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
- GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Research progress of large-diameter split Hopkinson bar experimental technique [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 1518–1536. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.07.023.
- [14] 周广宇, 胡时胜. 高 g 值加速度发生器中的波形整形技术 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 479–486. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0479-08.
- ZHOU G Y, HU S S. Pulse-shaping techniques of high-g-value acceleration generators [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 479–486. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0479-08.
- [15] 果春焕, 周培俊, 陆子川, 等. 波形整形技术在 Hopkinson 杆实验中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 881–887. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0881-07.
- GUO C H, ZHOU P J, LU Z C, et al. Application of pulse shaping technique in Hopkinson bar experiments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 881–887. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0881-07.
- [16] SONG B, CHEN W. Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(3): 300–312. DOI: 10.1007/BF02427897.
- [17] MA H, YUE C, YU H, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137: 103466. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103466.
- [18] 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. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20190823.002.
- ZHANG C, YU Z H, HAN S C, et al. Compression constitutive relation of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(5): 1221–1226. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20190823.002.
- [19] 徐世焯, 陈超, 李庆华, 等. 超高韧性水泥基复合材料动态压缩力学性能的数值模拟研究 [J]. *工程力学*, 2019, 36(9): 50–59. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.03.0147.
- XU S L, CHEN C, LI Q H, et al. Numerical simulation on dynamic compressive behavior of ultra-high toughness cementitious-composites [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9): 50–59. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.03.0147.
- [20] 王道荣, 胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响 [J]. *实验力学*, 2002, 17(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2002.01.004.
- WANG D R, HU S S. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(1): 23–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2002.01.004.
- [21] 董凯, 任辉启, 阮文俊, 等. 珊瑚砂应变率效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(9): 093102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0432.
- DONG K, REN H Q, RUAN W J, et al. Study on strain rate effect of coral sand [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 093102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0432.

- [22] LUNDBERG B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(6): 187–197. DOI: 10.1016/0148-9062(76)91285-7.
- [23] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 9–16. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.002.  
REN G M, WU H, FANG Q, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 9–16. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.002.
- [24] 郭瑞奇, 任辉启, 龙志林, 等. 大直径 SHTB 实验装置数值模拟及混凝土细观骨料模型动态直拉研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(9): 093101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0015.  
GUO R Q, REN H Q, LONG Z L, et al. Numerical simulation on a large diameter SHTB apparatus and dynamic tensile responses of concrete based on mesoscopic models [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 093101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0015.
- [25] 郭瑞奇, 任辉启, 张磊, 等. 基于混凝土细观骨料模型的 SHPB 仿真模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(22): 107–116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.22.015.  
GUO R Q, REN H Q, ZHANG L, et al. Simulation for SHPB tests based on a mesoscopic concrete aggregate model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(22): 107–116. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.22.015.
- [26] 刘海峰, 韩莉. 冲击荷载作用下混凝土动态力学性能数值模拟研究 [J]. *固体力学学报*, 2015, 36(2): 145–153. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2015.02.007.  
LIU H F, HAN L. Numerical simulation research on dynamic mechanical behaviors of concrete subjected to impact loading [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36(2): 145–153. DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2015.02.007.
- [27] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. *弹道学报*, 2001, 13(4): 12–16, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2001.04.003.  
ZHANG F G, LI E Z. A method to determine the parameters of the model for concrete impact and damage [J]. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(4): 12–16, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2001.04.003.
- [28] 吴赛, 赵均海, 王娟, 等. 基于砼 SHPB 试验数值分析的 HJC 模型参数研究 [J]. *计算力学学报*, 2015, 32(6): 789–795. DOI: 10.7511/jslx201506012.  
WU S, ZHAO J H, WANG J, et al. Study on parameters of HJC constitutive model based on numerical simulation of concrete SHPB test [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(6): 789–795. DOI: 10.7511/jslx201506012.

(责任编辑 丁峰)