DOI: 10.11883/bzycj-2-23-0466

CF/SSF 增强珊瑚砂水泥砂浆微观结构分析及动态劈裂拉伸试验研究*

郭瑞奇[1], 李江南[1], 马林建[2], 欧　灿[1], 许　鑫[1]
（1. 湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411105；
2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007）

摘要： 珊瑚混凝土是一种拉压强度严重不对称的材料, 研究其动态拉伸力学性能对岛礁防护工程具有重要意义。为了探究碳纤维（carbon fiber, CF）和不锈钢纤维（stainless steel fiber, SSF）增强珊瑚砂水泥砂浆在冲击荷载作用下的动态拉伸力学性能, 采用 ∅100 mm 的分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）装置进行动态劈裂试验, 对比分析不同纤维掺量的珊瑚砂水泥砂浆在不同应变率下的动态抗拉强度和能量耗散规律, 并结合扫描电子显微镜揭示混杂纤维的作用机理。结果表明: 复掺 CF 和 SSF 的珊瑚砂水泥砂浆试样的静、动态抗拉强度均有显著提高, 最大动态抗拉强度增长率为 66.03%。在相同应变率下, 试样的动态抗拉强度与纤维掺量呈正相关, 其破碎程度与纤维掺量呈负相关, 纤维的桥接作用对试样裂缝开展具有良好的抑制效果。在同一纤维掺量下, 动态增长因子随应变率的升高明显增大, 动态增长因子最大值为 2.44, 表现出明显的拉伸应变率效应。珊瑚砂水泥砂浆试样的破碎程度及耗散能量均与应变率呈正相关, 且纤维掺量越高, 试样破坏时需要耗散的能量越多。

关键词： 珊瑚砂水泥砂浆；混杂纤维；动态劈裂拉伸；应变率效应；能量耗散
中图分类号： O347.3; TU377　　**国标学科代码：** 13015　　**文献标志码：** A

Microstructure and dynamic splitting tensile properties of CF/SSF reinforced coral sand cement mortar

GUO Ruiqi[1], LI Jiangnan[1], MA Linjian[2], OU Can[1], XU Xin[1]
（1. *College of Civil Engineering*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *Hunan*, *China*;
2. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact*,
Army Engineering University of PLA, *Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*）

Abstract: Coral concrete is a material with severely asymmetric tensile and compressive strengths. Therefore, studying the dynamic tensile mechanical properties of coral concrete is of great significance for island reef protective engineering. To investigate the dynamic tensile mechanical properties of carbon fiber (CF) and stainless steel fiber (SSF) reinforced coral sand cement mortar under impact loading, dynamic splitting tests were conducted using a 100 mm diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) device. Comparative analysis was carried out on the dynamic tensile strength and energy dissipation patterns of coral sand cement mortars with different fiber contents at various strain rates. In the SHPB tests, cement mortar specimens with different fiber contents were prepared: no fiber, 1.5% CF, 1.5% CF with 0.5% SSF, 1.5% CF with 1.0% SSF, and 1.5% CF with 1.5% SSF. The specimens were subjected to four impact velocities: 3.45, 4.86, 6.54, and 7.34 m/s. This allowed for impact-splitting tests conducted at different strain-rate ranges. In addition, scanning electron microscope (SEM) tests were performed to reveal the action mechanism of the hybrid fibers. The results indicate that the static and dynamic

* 收稿日期: 2023-12-27；修回日期: 2024-03-30
基金项目: 湖南省自然科学基金（2023JJ40610, 2023JJ30569）; 湖南省教育厅优秀青年项目（23B0124）; 湖南省研究生科研创新项目（QL20230162）
第一作者: 郭瑞奇（1993—　），男，博士，讲师，grq@xtu.edu.cn
通信作者: 马林建（1984—　），男，博士，教授，patton.4400@163.com

tensile strengths of CF and SSF-reinforced coral sand cement mortar specimens are significantly improved, with a maximum dynamic tensile strength increase ratio of 66.03%. At the same strain rate, the dynamic tensile strength of the specimens positively correlates with the fiber content, while the fragmentation degree negatively correlates with the fiber content. The fiber bridging effect effectively suppresses the development of cracks in the specimens. Under the same fiber content, the dynamic increase factor increases significantly with the increase of strain rate, with a maximum increase factor of 2.44, demonstrating a clear tensile strain rate effect. The fragmentation degree and dissipated energy of coral sand cement mortar specimens positively correlate with the strain rate, and samples with higher fiber dosages require more energy to dissipate during failure.

Keywords: coral sand cement mortar; hybrid fiber; dynamic splitting tension; strain rate effect; energy dissipation

南海岛礁工程远离内陆，缺乏工程建设材料，从内陆运输砂石等混凝土原材料，不仅增加建筑成本，也会对施工进度造成影响。使用珊瑚砂和海水制备珊瑚混凝土进行岛礁工程建设，既可以缓解海洋工程中原材料短缺的问题，又能因地制宜合理开发利用海洋资源[1]。因此，近年来，众多学者对珊瑚混凝土的基本物理力学性能开展研究，并取得了一定的进展[2-4]。

由于珊瑚砂脆性明显且疏松多孔，利用珊瑚骨料制备的混凝土材料的强度和韧性普遍较低[5]。因此，学者们通过在珊瑚混凝土中加入一种或多种不同类型的纤维材料（如玄武岩纤维[6-7]、钢纤维[8]、碳纤维[9-10]、聚丙烯纤维[11] 等）来提高其强度和韧性。其中，掺入单种纤维的改性效果有限，而将不同性质的纤维混杂掺入珊瑚混凝土中，则可以充分发挥不同纤维的协同作用，在结构受力破坏的不同阶段发挥优势，抑制裂缝的生成和扩展。Kim 等[12] 和赵焕起等[13] 分别研究了钢纤维/聚乙烯纤维混杂以及聚丙烯纤维/芳纶纤维混杂对水泥基复合材料的影响，证明了纤维混杂可产生明显的正混杂效应。

南海岛礁的工程结构除需要承受静载外，还需要承受地震、海啸等多种形式的动荷载，因此，需要对建筑材料的动态力学性能进行充分研究。Qin 等[14] 研究了珊瑚混凝土的单轴冲击压缩力学性能，结果表明，珊瑚混凝土具有显著的应变率效应；吴文娟等[15] 使用分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）装置对珊瑚混凝土和普通砂石混凝土进行了冲击加载对比试验，结果表明，珊瑚混凝土的能量吸收能力强于普通砂石混凝土，抗冲击性能更好；程雨竹等[16] 对改性聚丙烯纤维高强珊瑚混凝土开展了冲击压缩试验，研究了聚丙烯纤维对珊瑚混凝土的增强增韧效果。

目前，对于珊瑚混凝土动态力学性能的研究主要以单轴冲击压缩试验为主，而针对动态拉伸力学性能的研究相对较少。珊瑚砂混凝土是一种典型的脆性材料，拉压比严重不对称，静载作用下其抗拉强度比抗压强度小约一个量级[17]。强动载作用下混凝土的剥落、震塌与其动态抗拉强度密切相关，因此，充分研究珊瑚混凝土材料的静、动态拉伸力学性能，对岛礁防护工程具有重要的现实意义。基于此，采用 ⌀100 mm 的 SHPB 装置对制备的碳纤维（carbon fiber, CF）/不锈钢纤维（stainless steel fiber, SSF）珊瑚砂水泥砂浆进行 4 种应变率下的动态劈裂拉伸试验，研究混杂纤维珊瑚砂水泥砂浆的应变率效应、破坏形态、能量耗散规律，并从微观角度分析纤维的增强机理，旨在为制备高性能珊瑚砂水泥砂浆及南海岛礁工程建设提供借鉴与参考。

1　试　验

1.1　原材料与配合比

试验所用原材料为 PO42.5 普通硅酸盐水泥、硅灰、一级粉煤灰、珊瑚砂细骨料、碳纤维、不锈钢纤维、聚羧酸高效减水剂及人工海水，水泥、粉煤灰和硅灰的化学成分如表 1 所示，碳纤维和 316L 不锈钢纤维的基本性能参数如表 2 所示。珊瑚砂细骨料最大粒径为 2.36 mm，细度模数为 2.03，分类为细砂，粒径 0.075～0.15、0.15～0.30、0.30～0.60、0.60～1.18、1.18～2.36 的珊瑚砂质量分数分别为 1.35%、13.56%、64.43%、20.59%、0.07%。考虑到珊瑚砂水泥砂浆主要应用于高盐、高湿、高温、高辐照的严酷海洋环境下，使用 316L 材质生产的不锈钢纤维（316L-SSF），由于加入了金属铬和钼，所以比普通 304 不锈钢具有更高的耐腐蚀性。

表 1　水泥、粉煤灰和硅灰的化学成分

Table 1　Chemical compositions of cement, fly ash, and silica fume

组分	质量分数/%					
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	SO_3
水泥	51.42	8.26	24.99	4.03	3.71	2.51
粉煤灰	5.60	30.14	50.26	4.16	0	2.16
硅灰	0.11	0.32	96.74	0.08	0.10	0

表 2　碳纤维和 316L 不锈钢纤维的基本性能参数

Table 2　Basic performance parameters of carbon and 316L stainless steel fibers

材料	长度/mm	直径/μm	抗拉强度/MPa	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	伸长率/%
CF	10	7～10	3 700	1.76	1.5
SSF	12	200	1 950	7.98	5.0

试验中的配合比设计基于 JGJ/T 221—2010《纤维混凝土应用技术规程》和 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》，如表 3 所示。

根据课题组前期研究成果[5, 18]，碳纤维体积掺量分别设置为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%，发现碳纤维掺量为 1.5% 时对抗压强度具有明显的增强效果，因此，确定 CF 的最佳体积掺量为 1.5%，以 SSF 体积掺量为变量。其中工况 1 为空白对照组，工况 2～5 依次为掺加 CF 最佳体积掺量（1.5%）和 SSF 体积掺量分别为 0%、0.5%、1.0% 和 1.5% 的试验组。

表 3　碳纤维/不锈钢纤维珊瑚砂水泥砂浆配合比

Table 3　Mix ratios of carbon fiber/stainless steel fiber reinforced coral sand cement mortar

工况	配合比/($kg\cdot m^{-3}$)							
	水泥	粉煤灰	硅灰	珊瑚砂	人工海水	减水剂	CF	SSF
1	711	253	95	1 373	274	9	0	0
2	711	253	95	1 373	274	9	26.4	0
3	711	253	95	1 373	274	9	26.4	39.9
4	711	253	95	1 373	274	9	26.4	79.8
5	711	253	95	1 373	274	9	26.4	119.7

1.2　试验方案

根据确定的配合比，将制备的试样标准养护 28 d 后用于后续的静态和动态劈裂抗拉强度试验，具体试验方案分为以下 3 个部分。

(1) 静态力学性能试验

水泥砂浆试样的静态力学性能试验按照 GB/T 5008—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。对养护 28 d、尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的水泥砂浆立方体试件采用 MTS 液压万能试验机和水泥砂浆劈裂夹具进行静态劈裂拉伸试验，该万能试验机的量程为 0～1 000 kN。

(2) 微观结构试验

静态劈裂拉伸试验结束后，对试件中心区域范围的水泥砂浆进行取样，样品尺寸约为 1 cm。首先，将取得的样品置于装满无水乙醇的试剂瓶中浸泡 24 h，以终止其水化反应；然后，将浸泡后的试样进行烘干处理；接着，在试件表面喷涂金以增强其导电性能；最后，采用 JSM-IT500LV 型扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）对样品进行观测。

(3) 动态力学性能试验

动态劈裂拉伸试验以纤维掺量和冲击速度为变量，利用⌀100 mm 的 SHPB 装置作为加载设备，对 5 种不同纤维体积掺量的试件进行不同加载速率下的冲击劈裂拉伸试验，冲击气压分别为 0.12、0.16、0.20、0.24 MPa。为避免偶然误差，每组工况重复试验 3 次。进行动态劈裂拉伸试验前，用磨平机对圆柱形试样的 2 个端面进行打磨处理，为提高试验精度，保证试样端面不平行度小于 1%[19]。试验时，为了减小波形振荡，在入射杆撞击面粘贴⌀30 mm、厚 2 mm 的橡胶片作为整形器。同时调整试件位置，保持入射杆、透射杆与试件中心位于同一水平线，以保证试件轴心受力。

SHPB 装置主要由发射装置、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、测速仪和数据采集系统组成，如图 1 所示。基于一维应力波假定和试样应力均匀分布假定[20]，通过入射杆和透射杆上的应变片采集入射杆中的入射脉冲、反射脉冲以及透射杆中的透射脉冲，然后根据一维应力波理论推导出试样的应力-时间、能量-时间、应变率-时间等结果，进而研究材料的动力学性质。

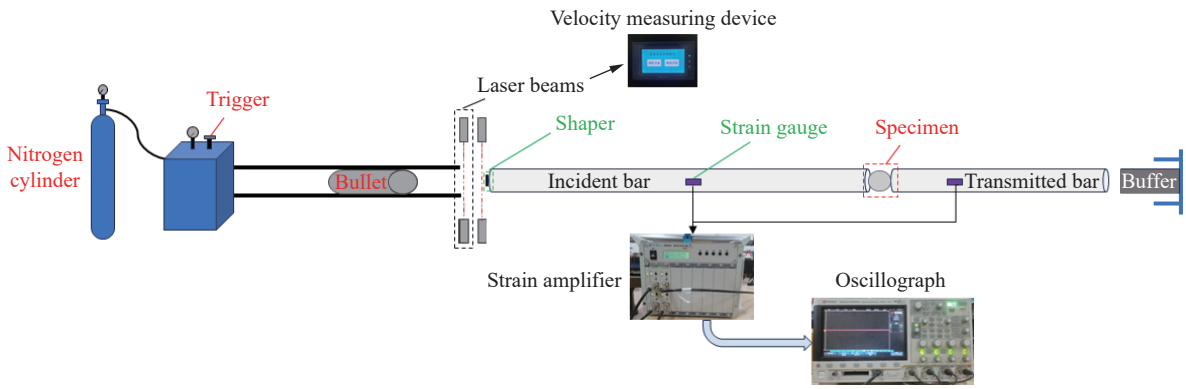


图 1　SHPB 试验设备示意图

Fig. 1　Schematic diagram of SHPB test device

通过一维应力波理论和牛顿第三定律，可以得到 SHPB 劈裂试验中试样的动态抗拉强度 $\sigma_p(t)$、应变 $\varepsilon_p(t)$、应变率 $\dot{\varepsilon}_p(t)$ 等动态力学参数：

$$\sigma_p(t)=\frac{2p_{max}(t)}{\pi Dl_s}=\frac{2EA_0\varepsilon_T(t)}{\pi Dl_s} \tag{1}$$

$$\varepsilon_p(t)=-\frac{2c_0}{D}\int_0^t[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_T(t)]\mathrm{d}t=-\frac{2c_0}{D}\int_0^t\varepsilon_R(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}_p(t)=-\frac{2c_0}{D}[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_T(t)]=-\frac{2c_0}{D}\varepsilon_R(t) \tag{3}$$

式中：$p_{max}(t)$ 为加载过程中的最大载荷，$\varepsilon_I(t)$、$\varepsilon_R(t)$ 和 $\varepsilon_T(t)$ 分别为入射波、反射波、透射波的应变脉冲信号，c_0、A_0 和 E 分别为杆件的波速、横截面积和弹性模量，l_s 和 D 分别为试样的长度和直径。

2　准静态力学试验与微观结构分析

2.1　准静态劈裂试验

为了测定不同纤维体积掺量试样的静态劈裂强度，使用压力试验机和标准的 70.7 mm 水泥砂浆劈裂夹具对养护龄期达 28 d 的试样进行准静态劈裂试验。由于珊瑚砂水泥砂浆是一种非均质材料，同一纤维体积掺量下的试样劈裂抗拉强度也可能存在较大的差距。为了试验的准确性，将压力荷载的峰值离散性控制在 15% 以内，舍弃离散性大于 15% 的数据。将所得有效数据进行处理并取平均值，得到标准养护 28 d 的珊瑚砂水泥砂浆试样的静态劈裂抗拉强度，如表 4 所示。

表 4　同一龄期下不同纤维掺量试样静态抗拉强度

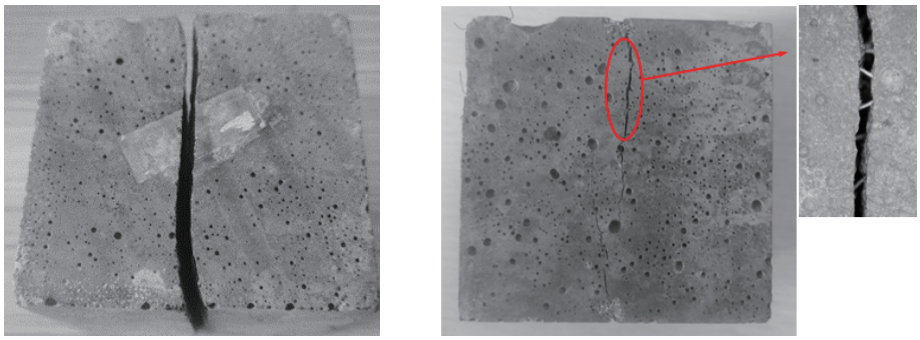
Table 4　Static tensile strengths of specimens with different fiber contents at the same age

试件编号	静态劈裂拉伸强度/MPa			平均强度/MPa	强度增长率/%
	第1次试验	第2次试验	第3次试验		
CF/SSF-0/0	5.0	5.6	5.6	5.4	
CF/SSF-1.5/0	6.1	5.9	6.4	6.1	12.96
CF/SSF-1.5/0.5	8.2	7.5	7.5	7.7	42.59
CF/SSF-1.5/1.0	7.6	8.3	8.4	8.1	50.00
CF/SSF-1.5/1.5	9.3	8.8	8.7	8.9	64.81

注：试件编号CF/SSF-0/0表示CF的体积分数为0%，SSF体积分数为0%。

由表 4 可知，加入不同体积掺量的纤维对试件的抗拉强度均有提高，且加入 SSF 后抗拉强度提高更加明显，最大增长率达 64.81%。结合图 2 的破坏形态可以看出，无纤维的试样抗拉强度较低，直接劈裂成两半。加入纤维后，纤维在试样内部纵横交错，起到良好的桥接作用，初始裂缝萌生之后，纤维对裂缝

的开展有明显的约束作用，直至加载结束之后试样仍能保持相对完整。通过不同掺量的珊瑚砂水泥砂浆静态抗拉强度及破坏形态分析，表明混杂纤维的加入可以有效提高普通珊瑚砂水泥砂浆的抗拉强度。



(a) CF/SSF-0/0　　(b) CF/SSF-1.5/1.5

图 2　静态劈裂破坏形态

Fig. 2　Static splitting failure morphologies

2.2　微观结构分析

硅酸盐水泥水化产物的特性在水泥的水化反应研究中具有重要意义，水化产物的成分及性质对水泥砂浆的强度发展具有决定性的影响[21]。水泥水化后的产物中主要有水化硅酸钙（C-S-H）、氢氧化钙（CH）、钙矾石（Aft），其中 C-S-H 对水泥砂浆的物理化学性能有较大的影响。水化初期，可见大量球形的粉煤灰颗粒（fly ash）、针棒状钙矾石、片层状氢氧化钙及大量凝胶状水化硅酸钙分布在表面及裂缝、孔洞中，弥补水泥砂浆内部空间缺陷。

图 3 给出了水化产物的微观形貌，可以看出，原有的水泥砂浆内部的细小孔洞缺陷和材料原有的孔隙被水化产物填充，增加了水泥砂浆的密实性。此外，大量凝胶状水化硅酸钙与水泥颗粒、粉煤灰颗粒及各种水化产物交叉，形成空间结合紧密的整体，有助于提高珊瑚砂水泥砂浆后期的强度。

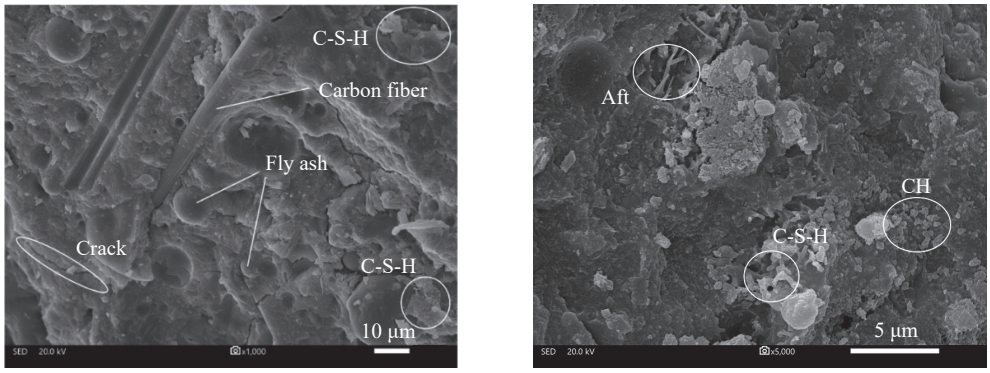
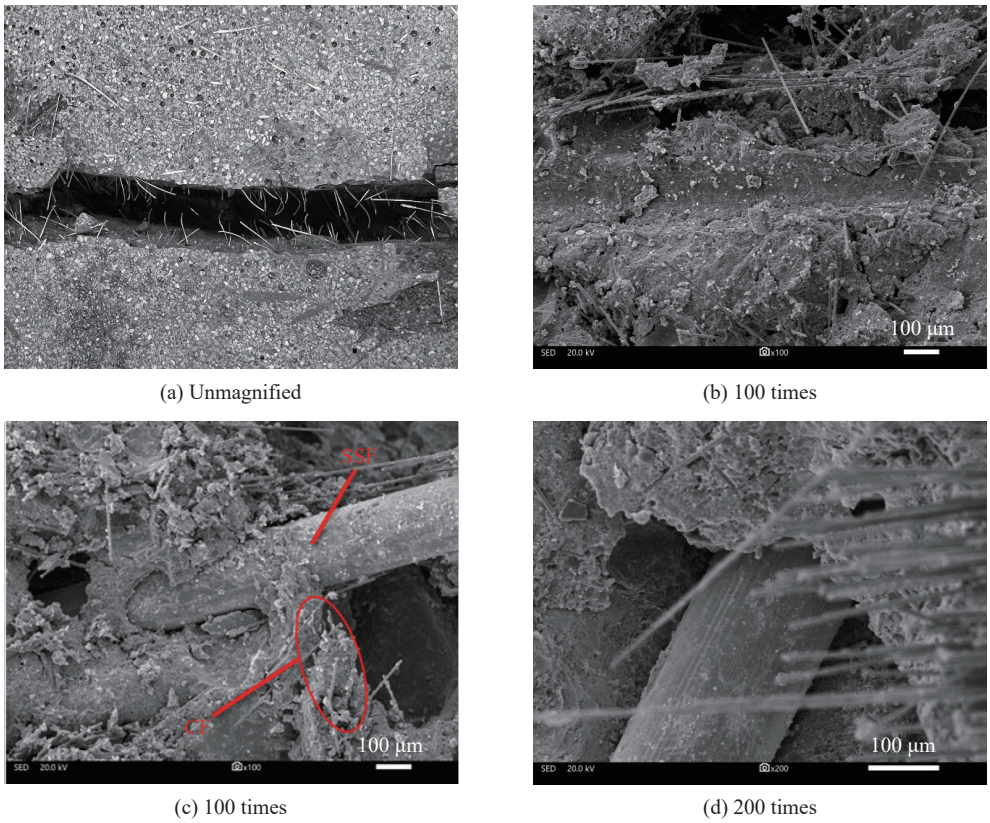


图 3　水化产物微观形貌

Fig. 3　Microscopic morphology of hydration products

纤维在珊瑚砂水泥砂浆内部主要起到两方面增强作用：一方面由于纤维纵横交织形成网状，改善了砂浆基体的空间结构，增强了试样整体的抗拉能力；另一方面，纤维表面被各种水化产物和水化硅酸钙包裹形成紧密的结构，增强了纤维与浆体之间的握裹力和摩擦力，导致试样破坏时拔出或拔断纤维需要更大的拉力。图 4 给出了不同纤维含量的材料在不同倍率下断裂面的微观形貌。从图 4 可以清晰地观察到复合材料断面的显微结构、基体内部孔洞、基体与纤维的结合情况以及混杂纤维的分散情况。直径较小的碳纤维纵横交错，比较均匀地分散在水泥砂浆基体中。碳纤维表面有大量浆体附着，使得纤维与基体之间紧密结合，并且有部分纤维横穿基体内部孔洞，弥补了水泥砂浆的原生缺陷。不锈钢纤维直径较大，表面有更多的浆体附着并且部分碳纤维交错在钢纤维表面，使得纤维与基体之间的咬合力、摩擦

力更大。随着不锈钢纤维含量的增加，珊瑚砂水泥砂浆内部形成的空间网状结构也更加致密。由此可见，碳纤维与钢纤维的共同作用，从不同尺度改善了珊瑚砂水泥砂浆的力学性能。



(a) Unmagnified　(b) 100 times　(c) 100 times　(d) 200 times

图 4　不同放大倍率下纤维的断面 SEM 图像

Fig. 4　SEM images of fiber cross-sections at different magnifications

3　动态劈裂拉伸试验

3.1　应力平衡检验

试验采集的数据是电压脉冲信号，将电压信号进行处理转化为应变后再进行数据处理。数据处理之前需对应力平衡进行检验，若将入射波和反射波叠加后与透射波基本一致，则认为试样满足应力均匀性假定。选取 SHPB 劈裂试验过程中的应变时程曲线进行应力平衡验证，如图 5 所示，可以看出，入射波

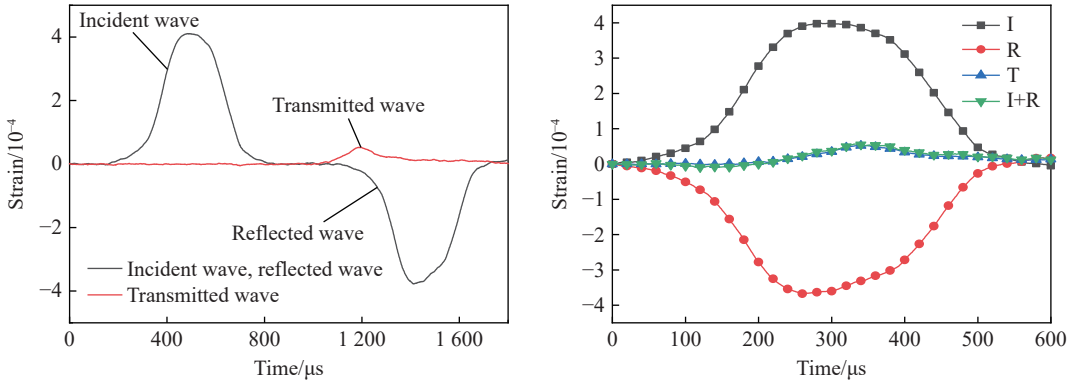


图 5　水泥砂浆动态劈裂试样动态平衡曲线

Fig. 5　Dynamic equilibrium curves of cement mortar dynamic splitting specimen

叠加反射波(I+R)的曲线与透射波(T)的一致性较好，则认为试验中的珊瑚砂水泥砂浆试样满足应力均匀性假定。

3.2　动态抗拉破坏形态

图 6 给出了不同应变率下珊瑚砂水泥砂浆试样的动态劈裂拉伸破坏形态。可以看出，试样动态劈裂拉伸破坏先由中心点起裂[22-23]，由中心微小裂缝沿着加载方向延伸，直至形成明显的主裂缝。在应变率为 26～30 s^{-1} 时，随着纤维掺量增加，试样裂缝宽度明显减小。在应变率为 74～78 s^{-1} 时，未加纤维的试样破坏程度比较严重，试样碎成多块不规则块体，且有较多碎渣产生。各组珊瑚砂水泥砂浆试样与入射杆和透射杆接触端均有不同程度的三角区域局部破坏，这是由于珊瑚砂水泥砂浆试样在中心裂缝贯通之前，端面承受的应力大于试样的抗压强度，导致 2 个端面出现局部破坏。掺入 SSF 的 3 组试样破坏形态主要以中心裂缝为主，而且破坏后的形态相对较完整，由于纤维的桥接作用限制了试样裂缝的开展，可见混杂纤维有助于降低试样的破坏程度，掺入纤维的试样完整性优于无纤维试样。

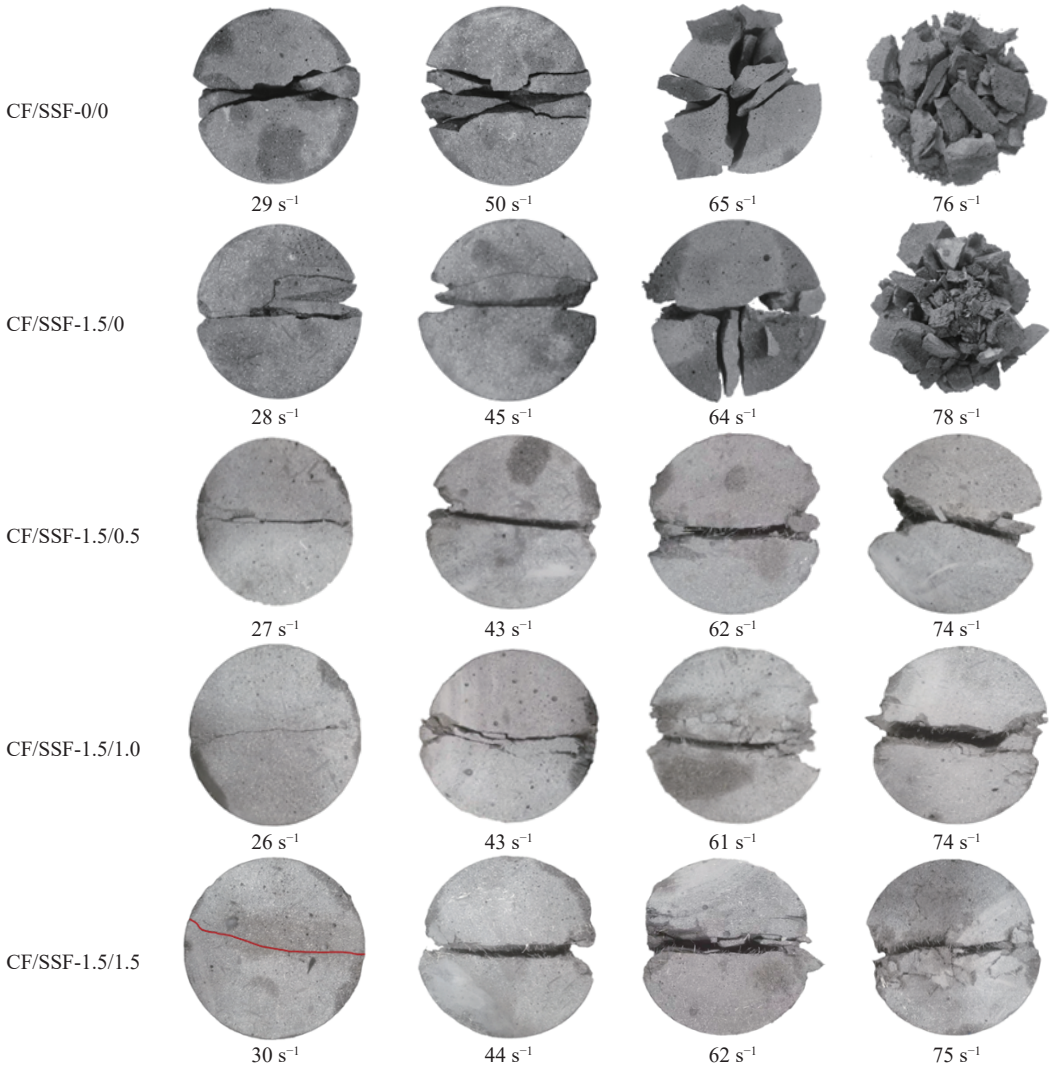


图 6　不同应变率下水泥砂浆试样破坏形态

Fig. 6　Failure morphology of cement mortar specimens under different strain rates

同一纤维掺量的试件，随着应变率的升高，裂缝开展程度加剧，被拔出纤维的数量也在增加。不锈钢纤维受拉弯曲，其表面裹有部分水泥基体(见图 4)，主要失效模式为拉伸失效，即纤维承受拉力超过纤

维与基体之间的黏结力导致纤维被拔出。而碳纤维的主要破坏模式为拉伸和断裂失效，即碳纤维受拉后既有从基体中拔出的情况，也存在作用荷载超过碳纤维抗拉强度而导致的纤维断裂现象。因此，可以认为碳纤维的拉伸和断裂失效、不锈钢纤维的拉伸失效是试件的主要吸能和增强增韧机理。

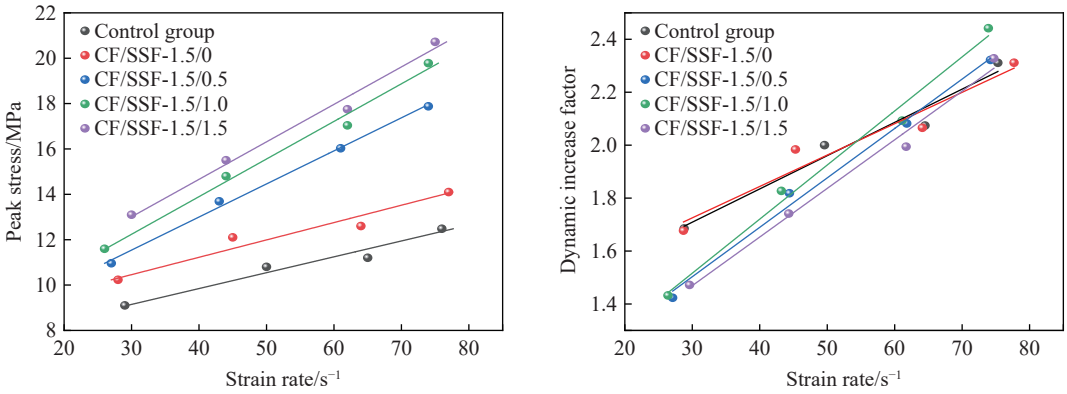
3.3　动态抗拉强度

通过式 (1)～(3) 得到试样的动态抗拉强度和应变率，将复掺 CF 与 SSF 珊瑚砂水泥砂浆的动态劈裂拉伸峰值应力与应变率的关系进行线性拟合，如图 7(a) 所示。可以看出，随着应变率的逐渐升高，不同纤维掺量试样的峰值应力均呈增大趋势，说明珊瑚砂水泥砂浆材料具有明显的拉伸应变率效应[24]。在同一冲击气压下，试样的动态抗拉强度与纤维的掺量呈正相关，且随着纤维掺量的增加，试样抗拉强度增长率也增大。单掺 CF 对试样的动态抗拉强度提升并不明显，与对照组相比仅提高约 13%。在不同冲击气压下，复掺 CF 与 SSF 的试样动态抗拉强度增幅均超过 20%。由于 SSF 在珊瑚砂水泥砂浆内部多向分布，纵横交错形成网状结构，所以对试样的动态抗拉强度提高显著，复掺 1.5% SSF 的试样动态抗拉强度增幅最大为 66.03%。

动态劈裂抗拉强度与准静态劈裂抗拉强度之比即为动态增长因子(dynamic increase factor)，为研究珊瑚砂水泥砂浆的应变率效应，对试样动态增强因子与应变率的关系进行线性拟合，如图 7(b) 所示，不同纤维掺量试样的动态增长因子表示为：

$$\delta = \begin{cases} 1.331\,9 + 0.012\,6\dot{\varepsilon} & R^2 = 0.961 & \text{Control group} \\ 1.369\,6 + 0.011\,9\dot{\varepsilon} & R^2 = 0.944 & \text{CF/SSF-1.5/0} \\ 0.942\,9 + 0.018\,7\dot{\varepsilon} & R^2 = 0.993 & \text{CF/SSF-1.5/0.5} \\ 0.903\,3 + 0.020\,4\dot{\varepsilon} & R^2 = 0.989 & \text{CF/SSF-1.5/1.0} \\ 0.918\,1 + 0.018\,4\dot{\varepsilon} & R^2 = 0.988 & \text{CF/SSF-1.5/1.5} \end{cases} \tag{4}$$

式中：δ 为动态增长因子；$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，单位为 s^{-1}；R^2 为线性拟合的决定系数。



(a) Relationship between strain rate and peak stress

(b) Relationship between strain rate and dynamic increase factor

图 7　应变率与峰值应力和动态增长因子的关系

Fig. 7　Relationships between peak stress, dynamic increase factor, and strain rate

由试验结果可以看出：(1) 试样的峰值应力与应变率呈现明显的正相关性，且不同纤维掺量试样的峰值应力与应变率相关系数不同。当复掺 1.0% SSF 与 1.5% SSF 时，经线性拟合后，两者斜率相似，可以认为这 2 种配合比下峰值应力与应变率具有一致性；(2) 在应变率约为 30 s^{-1} 时，无纤维试样的 δ 略高于掺入纤维的试样，但随着应变率的升高，掺入纤维的试样的 δ 增幅更加明显，表明纤维的掺入提高了试样的应变率敏感性；(3) 试样的 δ 随着应变率的升高而增大，最大值为 2.44，动态增长因子与静态劈裂抗拉强度密切相关[25]。

3.4　能量耗散

在利用 SHPB 试验装置对珊瑚砂水泥砂浆进行劈裂拉伸试验时，伴随着弹性应力波的传播过程，入

射波、反射波、透射波分别携带入射能、反射能和透射能。劈裂试验从开始加载到加载完成过程中，入射波ε_I、反射波ε_R 和透射波ε_T 所携带的能量以 Lundberg[26] 提出的岩石能量分析方法为参考依据，可以得到珊瑚砂水泥砂浆试样吸收能量的计算公式[27]：

$$W_I = \frac{A_0 c_0}{E}\int_0^T \sigma_I^2 \mathrm{d}t = A_0 c_0 E \int_0^T \varepsilon_I^2 \mathrm{d}t \tag{5}$$

$$W_R = \frac{A_0 c_0}{E}\int_0^T \sigma_R^2 \mathrm{d}t = A_0 c_0 E \int_0^T \varepsilon_R^2 \mathrm{d}t \tag{6}$$

$$W_T = \frac{A_0 c_0}{E}\int_0^T \sigma_T^2 \mathrm{d}t = A_0 c_0 E \int_0^T \varepsilon_T^2 \mathrm{d}t \tag{7}$$

$$W_S = W_I - W_R - W_T \tag{8}$$

$$\eta = \frac{W_S}{W_I} \tag{9}$$

式中：W_I 为入射波能量，W_R 为反射波能量，W_T 为透射波能量，W_S 为试样吸收的能量，η 为试样的吸能系数。由 SHPB 试验采集到的波形数据和能量耗散公式，得到试样在动态劈裂过程中的入射能量、反射能量、透射能量和试样吸收能量，根据计算得到不同应变率下复掺 1.5% CF 与 1.5% SSF 的能量时程曲线，如图 8 所示。

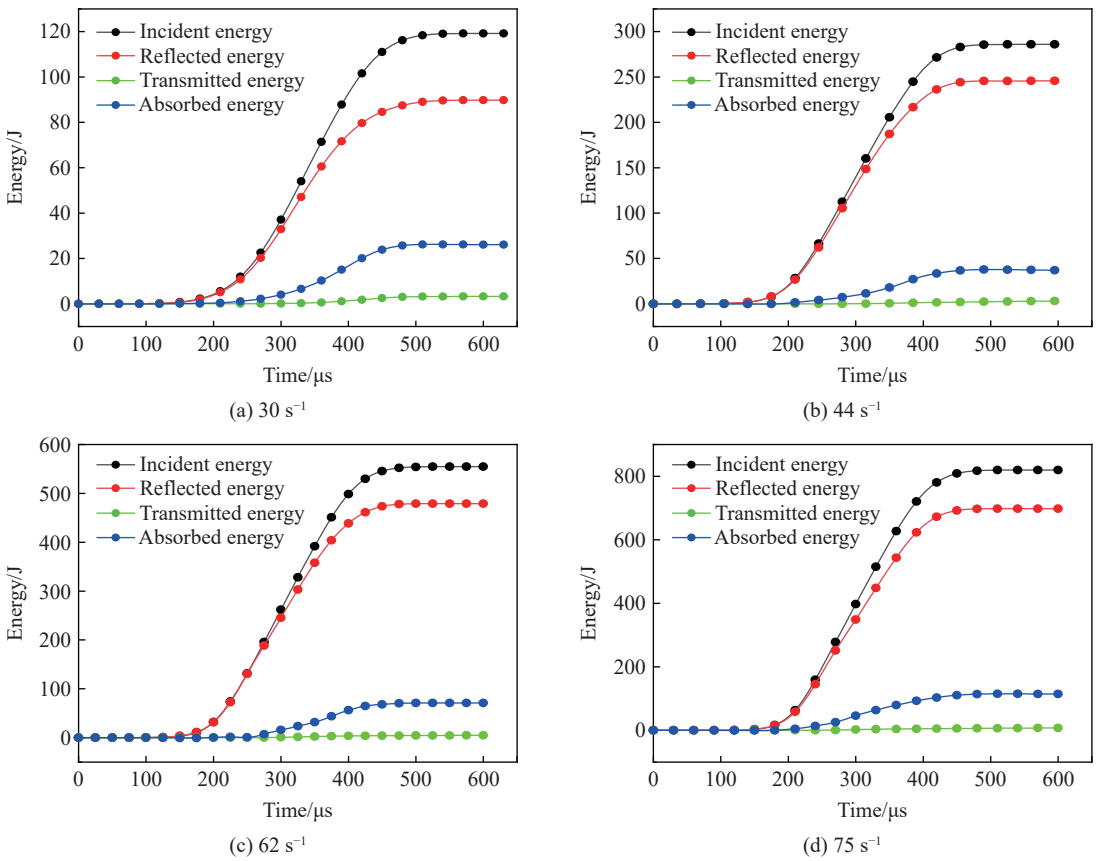


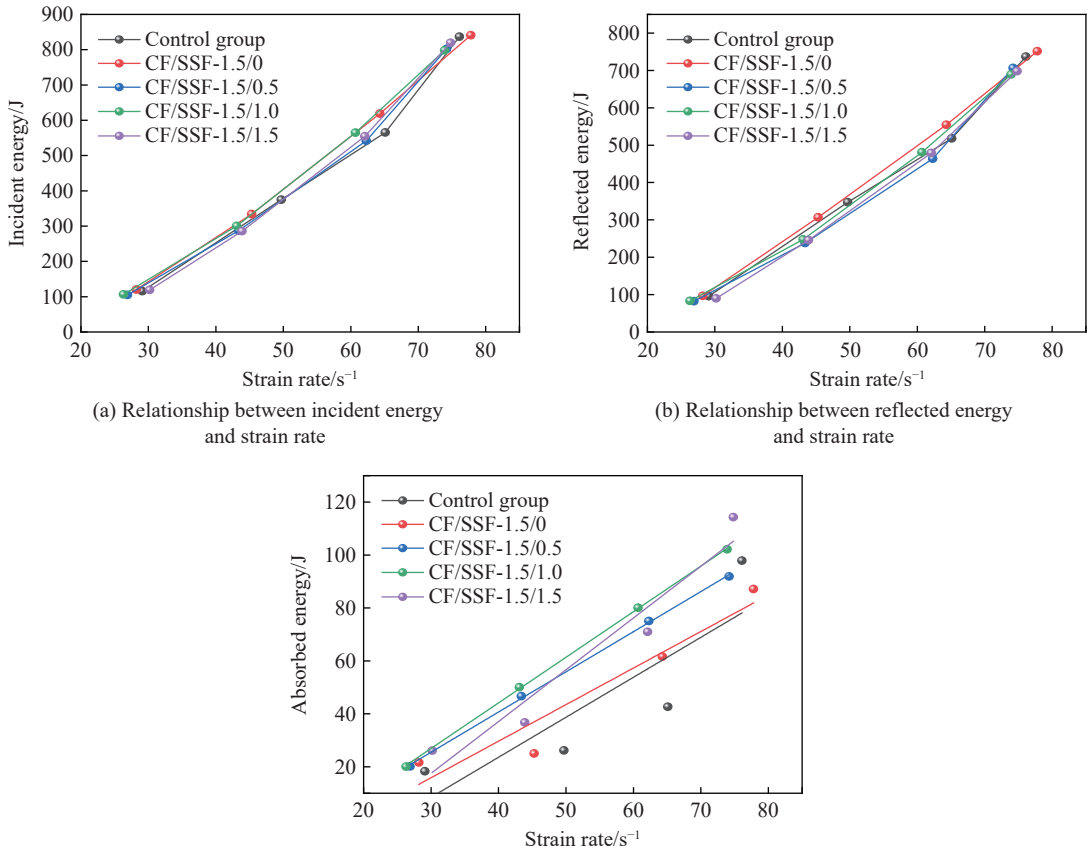
图 8　不同应变率下劈裂拉伸的能量时程曲线

Fig. 8　Time history curves of splitting tensile energies under different strain rates

在同一应变率下，入射能量、反射能量及试样吸收能量曲线随着时间的增加呈上升趋势，在达到某一时刻后上升趋势减缓，能量变化趋于稳定。由于珊瑚砂水泥砂浆是一种脆性材料，破坏应变小且抗拉强度低，相应的透射波比较微弱（见图 5），大部分入射能量被反射，剩余的能量则大多被试样耗散，透射

能占比较小。所以随着应变率提高，反射能量增加最明显，而透射能量基本上没有发生明显变化，曲线大致呈水平状态。不同应变率下能量随着时间增长，约在 450 μs 时各能量值均达到最大，此后能量曲线趋于水平。

入射能量、反射能量、耗散能量与应变率的关系曲线如图 9 所示，3 种能量均随应变率的升高而增加，其中入射能主要与加载工况（即发射气压）有关，可以看到，相近应变率下，不同纤维掺量试样的入射能量相差不大，表明各试验加载工况一致性较好。图 9(a) 与 (b) 的曲线走势及数值相差不大，表明入射波产生的能量绝大部分都被反射，只有少部分透过试样和用于试样耗散。



(a) Relationship between incident energy and strain rate

(b) Relationship between reflected energy and strain rate

(c) Relationship between absorbed energy and strain rate

图 9　入射能量、反射能量、吸收能量与应变率的关系

Fig. 9　Relationships of incident, reflected, and absorbed energies with strain rate

纤维掺量对吸收能的影响较明显，掺入纤维的试样吸收的能量相对较高，其中掺入 SSF 的试样吸收能与应变率表现出较好的线性关系。吸收的能量以不同形式耗散，形成开裂的表面能、摩擦热能，部分以声发射甚至碎块动能释放，大部分都耗散于试样裂缝的产生和发展过程中[28]。试样在初始发生的多条细微裂缝的基础上，随着吸收能量的增加，裂缝宽度沿着试样径向开展，最终形成一条宏观主裂缝，导致试样断裂，从而失去承载能力。

结合 3.2 节试样破坏形态分析可知：(1) 同种纤维掺量的试样吸收能量随着入射能量的增加而增加，试样破坏更严重，产生的碎块越多，即耗散能量越大；(2) 在同一应变率下，随着纤维掺量的增加，吸收能量呈现明显的增加趋势，观察试样破坏后的断面可以看出，纤维有明显的拔出和弯曲，吸收的能量分别作用于试样及纤维中，使得试样首先产生微小损伤，随着裂纹的扩展与延伸导致纤维拔出，并最终脱离基体试样发生破坏。这证实了在一定范围内，随着纤维掺量的增加，纤维的桥接作用更加明显，试样破坏需要更高的能量。

4 结　论

对复掺 CF 和 SSF 的珊瑚砂水泥砂浆进行了静、动态劈裂抗拉试验，并从纤维对珊瑚砂水泥砂浆静、动态抗拉强度增强效果、破坏形态和能量耗散规律等方面进行了分析，得到以下主要结论。

(1) 复掺 CF 和 SSF 的珊瑚砂水泥砂浆试样的静、动态抗拉强度都有明显的提高，最大动态抗拉强度增长率为 66.03%。CF 和 SSF 材料对珊瑚砂水泥砂浆增韧效果较好，随着纤维掺量增加，试样的破坏程度有所降低。结合 SEM 测试结果和宏观破坏形态分析，可以判断得出，碳纤维和不锈钢纤维从水泥砂浆基体中拔出是试件的主要吸能和增强增韧机理。

(2) 珊瑚砂水泥砂浆具有明显的拉伸应变率效应，且掺入纤维的试样具有更高的应变率敏感性，最大动态增长因子达 2.44。

(3) 同一应变率下，入射能量及反射能量相近，而吸收能随着应变率的升高而增加，掺入 SSF 的试样的吸收能与应变率表现出较好的线性关系。在入射能相近的情况下，纤维掺量越多，试样产生裂缝所需要的能量越多，耗散能量也就更高。

参考文献：

[1] 陈宗平, 庞云升, 许瑞天, 等. CFRP-钢复合约束海洋混凝土柱轴压性能试验研究及承载力计算 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 116–128. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2022.0102. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0102.
CHEN Z P, PANG Y S, XU R T, et al. Experimental study on axial compression performance and bearing capacity calculation of CFRP-steel confined ocean concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(7): 116–128. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0102.

[2] SUN L, WANG C, ZHANG C W, et al. Experimental investigation on the bond performance of sea sand coral concrete with FRP bar reinforcement for marine environments [J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(3): 533–546. DOI: 10.1177/13694332221131153.

[3] DENG Z H, WU D, WANG Y M. Mechanical properties and failure criteria of coral concrete under true triaxial compression [J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(37): 17622–17636. DOI: 10.1007/S10853-022-07728-1.

[4] WANG A G, HUANG M, CHU Y J, et al. Optimization of mix proportion of basic magnesium sulfate cement-based high-strength coral concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127709.

[5] SUN J L, MA W C, GUO R Q, et al. Preparation and dynamic mechanical properties of fiber-reinforced high-strength all-coral-sand seawater concrete [J]. Structures, 2023, 54(1): 1623–1636. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.06.006.

[6] FU Q, XU W R, HE J Q, et al. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete [J]. Composites Communications, 2021, 28: 100983. DOI: 10.1016/j.coco.2021.100983.

[7] FU Q, WANG Z H, PENG G, et al. Pore structure related triaxial mechanical response and strength criterion of basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(4): 1325–1344. DOI: 10.1007/s11771-023-5298-4.

[8] WANG Z B, LI P F, HAN Y D, et al. Dynamic compressive properties of seawater coral aggregate concrete (SCAC) reinforced with mono or hybrid fibers [J]. Construction and Building Materials, 2022, 340(1): 127801. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127801.

[9] LIU B, ZHOU J K, WEN X Y, et al. Experimental investigation on the impact resistance of carbon fibers reinforced coral concrete [J]. Materials, 2019, 12(23): 4000. DOI: 10.3390/ma12234000.

[10] 王磊, 谷文慧, 汪稔, 等. 碳纤维增强珊瑚混凝土抗冲击性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3339–3343. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.10.044.
WANG L, GU W H, WANG R, et al. Experimental study on shock resistance of carbon fiber reinforced coral concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3339–3343. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.10.044.

[11] 张继旺, 黄满锋, 苏仕参, 等. 高强珊瑚混凝土 (HSCC) 单轴受压性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7): 2275–2291.

DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.07.029.

ZHANG J W, HUANG M F, SU S C, et al. Experimental study on uniaxial compression performance of high strength coral concrete (HSCC) [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(7): 2275–2291. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2022.07.029.

[12] KIM M, YOO D, YOON Y. Effects of geometry and hybrid ratio of steel and polyethylene fibers on the mechanical performance of ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 1835–1848. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.001.

[13] 赵焕起, 李国忠. 混杂纤维增强水泥基复合材料的力学性能 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 140–145. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2014.01.021.

ZHAO H Q, LI G Z. Mechanics performance of hybrid fiber reinforced cement-based composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1): 140–145. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2014.01.021.

[14] QIN Q L, MENG Q S, MEI Q H, et al. Dynamic response characteristics of coral reef sand concrete under impact loading [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105847. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.105847.

[15] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.01.002.

WU W J, WANG R, ZHU C Q, et al. Experiment study on dynamic compression performance of coral aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 7–14. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.01.002.

[16] 程雨竹, 马林建, 王磊, 等. 冲击荷载作用下改性聚丙烯纤维高强珊瑚混凝土动力特性研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(5): 23070191. DOI: 10.11896/cldb.23070191.

CHENG Y Z, MA L J, WANG L, et al. Dynamic mechanical properties of modified polypropylene fiber-reinforced high-strength coral concrete under impact load [J]. Materials Reports, 2024, 38(5): 23070191. DOI: 10.11896/cldb.23070191.

[17] 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.

[18] 郑志豪, 任辉启, 龙志林, 等. PP/CF 增强珊瑚砂水泥基复合材料冲击压缩力学性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(7): 073104. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0297.

ZHENG Z H, REN H Q, LONG Z L, et al. A study on impact compression mechanical properties of PP/CF reinforced coral sand cement-based composites [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(7): 073104. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0297.

[19] YUAN P, WEI N N, MA Q Y. Effect of nonparallel end face on energy dissipation analyses of rocklike materials based on SHPB tests [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 2040947. DOI: 10.1155/2019/2040947.

[20] 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.

[21] 李妤茜, 乔秀臣. 外部因素对钙矾石晶体结构及形貌的影响综述 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 31–47. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20221118.004.

LI Y X, QIAO X C. Review on influences of external factors on crystal structure and morphology of ettringite [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1): 31–47. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20221118.004.

[22] 黄勇, 史才军, 欧阳雪, 等. 混凝土劈裂拉伸测试方法及性能研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35(1): 1131–1140. DOI: 10.11896/cldb.20010003.

HUANG Y, SHI C J, OUYANG X, et al. Research progress on splitting tensile test methods and mechanical properties of concrete [J]. Materials Reports, 2021, 35(1): 1131–1140. DOI: 10.11896/cldb.20010003.

[23] 姚勇, 杨贞军, 张昕, 等. UHPFRC 圆盘动态劈裂试验及基于 μXCT 图像的破坏机理研究 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(5): 053103. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0243.

YAO Y, YANG Z J, ZHANG X et al. Dynamic split tests of UHPFRC discs and failure mechanism analysis based on μXCT images [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(5): 053103. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0243.

[24] 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.

[25] 刘婷, 麻海燕, 吴彰钰, 等. 碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩性能 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 562–570. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9626.2021.03.016.
LIU T, MA H Y, WU Z Y, et al. Impact compressive properties of basic magnesium sulfate cement concrete [J]. Journal of Bilding Materials, 2021, 24(3): 562–570. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9626.2021.03.016.

[26] 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.

[27] 田正宏, 江桂林, 吴军, 等. 高应变率下新型纤维砂浆动态劈拉特性 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 189–195. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9626.2018.02.003.
TIAN Z H, JIANG G L, WU J, et al. Dynamic splitting tensile properties of mortar mixed with new fibers subjected to high strain rate [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 189–195. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9626.2018.02.003.

[28] 党发宁, 李玉涛, 任劼, 等. 混凝土冲击破坏动态力学及能量特性分析 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 083202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0444.
DANG F N, LI Y T, REN J, et al. Analysis of dynamic mechanics and energy characteristics of concrete impact failure [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(8): 083202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0444.

(责任编辑　蔡国艳)