

主动围压下纳米 SiO₂ 增强珊瑚砂水泥砂浆动态力学性能

郭瑞奇¹, 许 鑫¹, 任辉启², 尤 奇³, 孙金磊¹, 李江南¹, 刘 兵¹

(1. 湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023;

3. 南京山河特种设备科技有限公司, 南京 210000)

摘 要: 在人工海水拌制的珊瑚砂水泥砂浆中复掺 2.0% 纳米 SiO₂ 和 0.4% 玄武岩纤维以提升其力学性能, 采用带有主动围压装置的分离式 Hopkinson 压杆对其进行不同围压(0~20 MPa)下的冲击压缩实验, 研究纳米 SiO₂ 增强珊瑚砂水泥砂浆在不同围压和不同应变率下的动态力学性能。结果表明: 无围压(单轴冲击)试件的破坏形态呈现为粉碎状, 具有明显的脆性特征; 主动围压作用下试件受冲击后的完整性较好, 属于压剪破坏, 而且试件发生由脆性到塑性的转变, 韧性得到提升。从得到的动态应力-应变曲线可以看出试件强度比静态下提高 2.08~3.43 倍, 动态抗压强度是无围压(单轴冲击)的 1.88~2.35 倍。通过分析材料的动态增强因子和围压增长因子对应变率和围压变化影响, 得到了相关经验公式。通过对能量耗散情况的分析, 结果表明围压可以提升纳米 SiO₂ 增强珊瑚砂水泥砂浆的比能量吸收值。

关键词: 珊瑚砂水泥砂浆; 主动围压; 冲击压缩实验; 动态力学性能; 能量耗散

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2931-11

网络出版时间: 2023-08-14



Dynamic Mechanical Properties of Silica Nanoparticles Reinforced Coral Sand Cement Mortar Under Confining Pressure

GUO Ruiqi¹, XU Xin¹, REN Huiqi², YOU Qi³, SUN Jinlei¹, LI Jiangnan¹, LIU Bing¹

(1. College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 2. Institute of Defence Engineering, AMS, Luoyang 471023, Henan, China; 3. Nanjing Shanhe Special Equipment Technology Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: A coral sand cement mortar was prepared with 2.0% SiO₂ nanoparticles, 0.4% basalt fiber and artificial seawater. The impact compression strength of the samples at different confining pressures (*i.e.*, 0–20 MPa) was determined by using a split Hopkinson pressure bar with an active confining pressure device. The dynamic mechanical properties of SiO₂ nanoparticles reinforced coral sand cement mortar were analyzed at different confining pressures and strain rates. The results show that the failure pattern of unconfined (uniaxial impact) specimens occurs, indicating the brittle characteristics. The better integrity of the specimen after being impacted appears under the active confinement, which belongs to a compressive-shear failure. Moreover, the specimen undergoes a transition from brittle to plastic, thus improving the toughness. From the obtained dynamic stress-strain curve, the strength of the specimen is increased by 2.08–3.43 times, compared to that under static conditions, and the dynamic compressive strength is 1.88–2.35 times greater than that of unconfined (uniaxial impact) specimens. The relevant empirical formulas were obtained via analyzing the dynamic increase factor and confinement increase factor of the material and their corresponding effects on strain rate and confining pressure variation. At the same confining pressure, the specific energy absorption of materials shows a linear increase with the incident wave energy. Through the analysis of energy dissipation, the confining pressure can increase the specific energy absorption value of SiO₂ nanoparticles reinforced coral cement mortar.

收稿日期: 2023-05-19。 修订日期: 2023-06-12。

基金项目: 湖湘高层次人才聚集工程创新团队(2019RS1059); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40610); 湖南省教育厅一般项目(21C0065); 国家大学生创新性实验计划资助项目(202210530039)。

第一作者: 郭瑞奇(1993—), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 任辉启(1953—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2023-05-19. Revised date: 2023-06-12.

First author: GUO Ruiqi (1993–), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: grq@xtu.edu.cn

Correspondent author: REN Huiqi (1953–), male, Ph.D., Professor

E-mail: Huiqi_ren@163.com

Keywords: coral sand cement mortar; active confining pressures; impact compression experiments; dynamic mechanical properties; energy dissipation

混凝土材料现如今广泛应用于土木水利等工程结构中, 得益于其本身良好的力学性能^[1]。由于岛礁工程建设需要大量的混凝土材料, 其运输成本高昂, 利用岛礁附近的珊瑚、海砂作为骨料, 用海水拌制得到的混凝土材料性价比高, 能使材料运输、结构维护等经济成本大幅降低^[2–3]。但由于珊瑚骨料自身的缺陷, 使得制备工程所需的高强或高韧性的珊瑚混凝土成为一个难题。

当前, 国内学者针对全珊瑚混凝土的疲劳特性开展了研究^[4–5], 也有学者使用纤维材料改善珊瑚混凝土的宏观和微观力学性能^[6–8], 其中玄武岩纤维具备耐腐蚀、耐高温等优良性能, 适合作为珊瑚混凝土的增强、增韧材料^[9]。然而, 采用纤维掺入的方式, 对水泥基复合材料的提升效果有限, 且提升方式单一。Abhilash^[10]和鲍玖文^[11]的研究表明纳米 SiO₂ 具有很高的火山灰活性, 可以促进混凝土的水化反应, 提高混凝土的抗压强度, 并且对孔隙结构有明显的填充效应。Zhang 等^[12]和 Xu 等^[13]对复掺纳米 SiO₂ 和钢纤维的混凝土开展了大量实验研究, 结果表明纳米材料和纤维材料两者结合能给混凝土带来更优越的力学性能。由此可见, 针对珊瑚骨料多孔、强度低的缺陷, 纳米 SiO₂ 有望改善珊瑚砂水泥砂浆的物理力学性能。

考虑到海洋工程恶劣的服役环境(地震、海啸、狂风), 沿海机场跑道受到的飞机下降的冲击力, 石油钻井平台、海上风电工程等结构在突发事件中受到的爆炸冲击载荷等等, 岛礁工程不可避免地会承受冲击波载荷的影响, 因此开展对岛礁工程材料动态力学性能的研究具有重要意义。当前对珊瑚骨料混凝土的动态力学性能的研究中, Qin 等^[14]对比了多种纤维增强珊瑚混凝土的抗冲击性能, 任辉启课题组^[15–16]也在这方面开展了研究。当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实验为主, 在围压下动态力学性能的研究涉及较少。由于水工结构、桩基等结构物在海水下会受到围压作用, 且在海洋环境中时常有海水的冲刷、海底火山爆发等冲击荷载^[17], 因此研究围压作用下冲击荷载

对珊瑚砂水泥砂浆的影响在实际工程的应用具备重要意义。

本工作制备了复掺 2.0% 纳米 SiO₂ 和 0.4% 玄武岩纤维的珊瑚砂水泥砂浆, 采用带有主动围压装置的 $\phi 100$ mm 分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)开展了 0~20 MPa 围压下不同应变率的冲击压缩试验, 研究围压对材料的破坏形态、动态抗压强度、动态应力–应变曲线的影响。并对材料的应变率效应和能量耗散规律进行分析, 为围压作用下珊瑚砂水泥砂浆本构模型的建立以及数值模拟提供参考依据。

1 实验

1.1 原材料和配合比

原材料包括 P·O·42.5 普通硅酸盐水泥、珊瑚砂细骨料、玄武岩纤维、亲水型纳米 SiO₂、一级粉煤灰、聚羧酸高效减水剂(含固量为 99%, 减水率为 27%)、S105 级矿渣粉、人工海水。其中珊瑚砂细骨料的最大颗粒粒径为 2.36 mm, 细度模数为 2.03, 分类为细砂, 颗粒粒径分布见图 1。拌养用的人工海水根据美国 ASTM D1141—2003 规范所配置, 配合比为 NaCl、MgCl₂·6H₂O、Na₂SO₄、CaCl₂、KCl 质量比为 24.5:11.1:4.1:1.2:0.7。玄武岩纤维基本性能见表 1。纳米 SiO₂ 的基本性能参数见表 2。水泥、粉煤灰和矿渣粉的化学组成见表 3。水泥、粉煤灰和矿渣粉的物理性能见表 4。

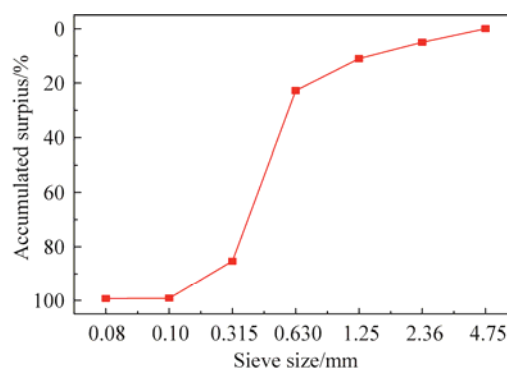


图 1 珊瑚砂的颗粒粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of coral sand

表 1 玄武岩纤维基本性能参数
Table 1 Basic performance parameters of basalt fiber

Length/mm	Diameter/ μ m	Tensile strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa	Density/(g·cm ⁻³)
10	7	3 000	91	2.64

表 2 纳米 SiO₂ 的基本性能参数
Table 2 Basic performance parameters of nano SiO₂

Appearance	Particle size /nm	Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	Surface properties	Purity/%
White powder	20	150	Hydrophilicity	99.9

表 3 水泥、粉煤灰和矿渣粉的化学组成
Table 3 Basic performance parameters of nano SiO₂

Type	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
Cement	51.42	8.26	24.99	4.03	3.71	2.51
Fly ash	5.60	30.14	50.26	4.16		2.16
Slag powder	35.30	16.70	34.50	1.50	5.01	1.24

w—Mass fraction.

表 4 水泥、粉煤灰和矿渣粉的物理性能
Table 4 Physical properties of cement, fly ash, and slag powder

Type	Water content/%	Specific area surface/(m ² ·kg)	Density / (g·cm ³)	Ignition loss/%	Setting time/h		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
					Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
Cement		358	3.11	4.00	172	234	27.2	48	5.5	8.6
Fly ash	0.52	340	2.25	2.24						
Slag powder	0.40	628	2.93	0.96						

制备复掺纳米 SiO₂ 和玄武岩纤维的珊瑚砂水泥砂浆的流程: 1) 将纳米 SiO₂ 颗粒与待使用的高效减水剂混合一起后加入拌合水中, 并进行人工搅拌 2 min, 得到纳米 SiO₂ 混合溶液, 并倒入烧杯中备用; 2) 将胶凝材料和珊瑚砂细骨料倒入搅拌桶中干拌 1 min 后, 将烧杯中液体一起加入搅拌机进行搅拌 10 min; 3) 把玄武岩纤维加入拌合物中搅拌 3 min; 4) 将拌合物倒入模具经过振捣后静置于标准养护箱, 24 h 后进行脱模处理。最后, 将脱模后的试件置于标准养护的环境(温度(20±1) °C, 湿度≥95%), 养护 28 d, 从而完成制样。

为了探究纳米 SiO₂ 和玄武岩纤维对珊瑚砂水泥砂浆的改性效果, 制备了不同配合比的 70.7 mm×

70.7 mm×70.7 mm 立方体试件来进行材料的静态力学实验。参照规范使用电液伺服压力试验机对试件进行静态压缩强度测试, 设定压力机的加载速度为 0.3 MPa/s, 直至试件破坏停止加载。静态压缩试验中每种工况进行 3 次平行实验, 剔除离散性较大的数据后, 取平均值作为材料的静态抗压强度。通过正交试验得到不同纳米 SiO₂ 掺量和不同玄武岩纤维掺量的珊瑚砂水泥砂浆的静态压缩强度, 结果表明: 复掺 2.0% 纳米 SiO₂ 和 0.4% 玄武岩纤维的珊瑚砂水泥砂浆静态压缩强度最高, 强度大小为 58 MPa。

确定了 SiO₂ 和玄武岩纤维的最佳掺量后(配合比见表 5), 下面以此配比为基准对珊瑚砂水泥砂浆进行主动围压下的 SHPB 冲击压缩试验。

表 5 纳米 SiO₂ 增强珊瑚砂水泥砂浆的配合比
Table 5 Proportion of nano SiO₂ reinforced coral sand coral cement mortar composites

Proportion/(kg·m ⁻³)					w(Nano SiO ₂)/%	φ(Fiber)/%	Superplasticizer/(kg·m ⁻³)
C	FA	SL	Sand	water			
600	480	120	1 320	312	2.0	0.4	3.0

Note: C, FA, SL represent cement, fly ash, and slag powder, respectively; The nano SiO₂ content is the mass ratio of the nano SiO₂ to the cement; φ: volume fraction.

1.2 SHPB 设备和主动围压装置介绍

φ100 mm 的 SHPB 装置主要包括发射装置、实心圆柱子弹、入射杆、透射杆、缓冲装置。冲击试件采用直径为 90 mm, 厚度为 50 mm 的短圆柱形状, 使用三波法^[18]对采集到的波形进行处理:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{l_s} [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0}{2A_s} E [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (3)$$

式中: ε_1 、 ε_R 和 ε_T 分别代表入射波、反射波、透射波应变脉冲信号; 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 A_s 分别为试件的高度和

横截面积。

目前 SHPB 主动围压实验方法是在冲击试验前分别对轴压室和围压室施加初始压力, 其主要缺陷首先是不能进行轴向加载, 只能径向加载, 而且较高围压下会使杆体发生运动而造成试件掉落。由于围压缸左右开合的设计, 导致试件装卸不方便, 影响试验效率。珊瑚砂水泥砂浆的动态力学实验使用了由南京山河特种设备科技有限公司研制的新型主动围压装置, 其同时具备轴向和径向加载功能, 可解决高围压下的杆体移动问题, 围压缸结构上设计为中间开合的方式, 方便试件的取放。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

为了观察纳米 SiO_2 对于珊瑚砂浆的作用效果, 使用型号为蔡司 Sigma500 扫描电镜 SEM 对珊瑚砂浆水化 28 d 后的微观形貌进行分析, 见图 2。图 2a 为空白对照组, 图 2b 为掺入纳米 SiO_2 后的微观形貌。从图 2a 可以看到并未开始水化或者水化初期的圆球形粉煤灰颗粒、以及片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、针状的钙矾石(Aft)、水化硅酸钙(C-S-H)等水化产物生成, 而且表面形貌存在微裂纹; 图 2b 所示圆球形粉煤灰颗粒明显减少, 是由于粉煤灰颗粒的二次水化被加快, 且有大量絮状的水化硅酸钙凝胶覆盖在基体表面, 表面的 C-S-H 凝胶更加致密。结果表明: 纳米 SiO_2 改善了珊瑚砂水泥基复合材料的微观形貌, 纳米 SiO_2 颗粒促进了水化, 其原因在于由于纳米 SiO_2 表面存在不饱和键, 而且纳米 SiO_2 具有高比表面积, 从而其具有很高的反应活性, 在水泥水化过程中纳米 SiO_2 会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体发生反应, 将低强度的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体转化为高强度的水化硅酸钙凝胶^[19], 絮状的凝胶填充了基体表面的孔隙, 从而增强了水泥基材料的密实性, 因此纳米 SiO_2 有利于提升珊瑚砂水泥基复合材料的力学性能。

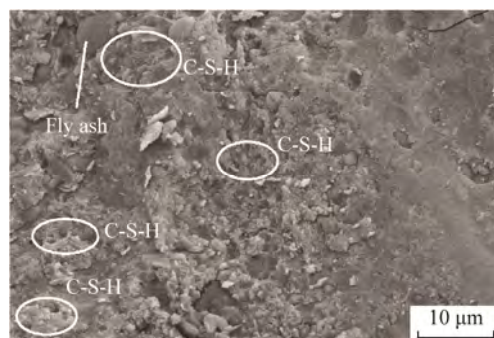
2.2 应力均匀性

大直径 SHPB 实验过程中的波形振荡^[20]会严重影响实验的可靠性, 根据前期实验结果^[16], 使用规格为 $\phi 37 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的橡胶片进行整形可以获得良好的半正弦入射波(见图 3 中的入射波)。在 SHPB 试验中, 应当对试件的应力平衡进行验证以保证实验结果的有效性^[21]。对测得的电压脉冲信号数据进行处理, 可以得到试件中的应变脉冲信号。图 3a 为珊瑚砂水泥基复合材料在无围压(单轴冲击)应变

率为 145 s^{-1} 下的应力平衡情况, 图 3b 为围压 15 MPa 应变率为 122 s^{-1} 的应力平衡情况。从应力平衡结果可以看出, 图 3a 透射应变曲线与入射波和反射波叠加的应变信号曲线重合良好, 可以认为满足应力平衡条件。对于图 3b, 透射波信号在 OA 段与入射波和反射波叠加的应变信号重合较好, 在 A 点之后两条曲线有一定的偏离。通常情况下, 应力波在试件中来回传播四次以上可认为达到应力平衡, 应力波在试件中来回传播 1 次所需时间大致为 $33 \mu\text{s}$ (已知试件尺寸为 50 mm , 假设试件波速 $c_s=3\,000 \text{ m/s}$), 在图 3b 透射波应变信号达到 A 点的时候已经超过 $132 \mu\text{s}$, 可以认为试件已经达到应力平衡状态。



(a) Blank control group



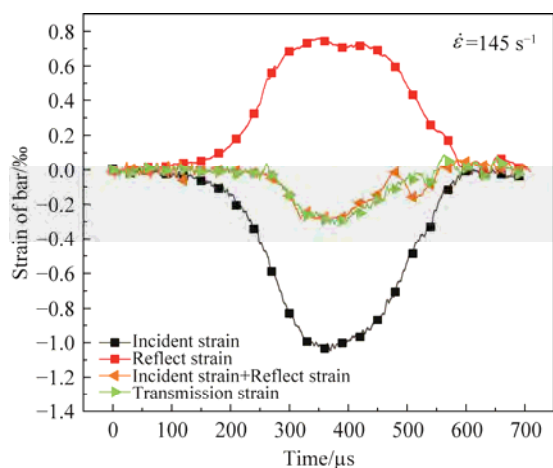
(b) After mixed with Nano- SiO_2

图 2 纳米 SiO_2 改性效果

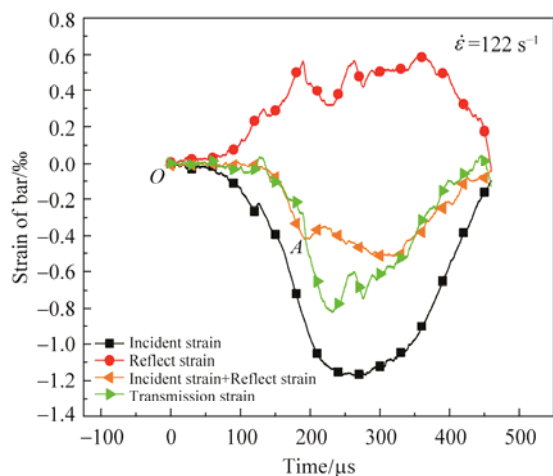
Fig. 2 Nano- SiO_2 modification effect

2.3 破坏形态分析

图 4 和图 5 为无围压(0 MPa)和(5~20 MPa)围压下试件的破坏形态, 可以明显看出未加围压时, 试件呈明显的脆性破坏, 试件处于完全粉碎的状态(见图 4)。未施加围压作用时, 由于混凝土材料的非均质性, 冲击载荷作用下试件会从薄弱的地方开始发生破坏, 然后由于裂纹的随机扩展延伸到各条裂纹的融汇贯通使得试件发生整体破坏, 最终破坏形态是以拉应力为主, 其他应力共同作用的结果^[22], 因此材料的破坏表现出明显的脆性特征。



(a) Waveform without confining pressure



(b) Waveform under 15 MPa confining pressure

图 3 应力平衡验证

Fig. 3 Verification of stress balance

主动围压下, 试件破坏程度较低, 主要破坏特征为表面的数条微小裂缝(见图 5), 在相近应变率下随着围压的增大, 试件表面产生的裂缝减少。从侧面破坏的裂缝与轴线方向的夹角可以看出试件的破坏形态接近为压剪破坏, 这与袁伟^[23]对混凝土在主动围压下的数值模拟结果相符合。主动围压的增加使得试件受到更大的径向约束作用, 试件将发生由脆性到延性的转变, 同时最终破坏形态从拉伸破坏慢慢转变至压剪破坏^[22], 而且剪切角与最大主应力方向基本呈 45° 夹角。

实验结果表明: 未施加围压的试件受到冲击时, 迅速增大的动态荷载达到了试件破坏的临界值, 导致试件发生粉碎性破坏。施加主动围压后, 径向的约束作用使得试件的增强、增韧效果明显, 且受到冲击后仍然具备一定的承载能力。相关研究表明, 在施加围压后, 混凝土类材料受到冲击后呈现一种伪塑性状态^[24], 从图 4 和图 5 还可以看到, 随着围

压的增大, 珊瑚砂水泥砂浆在冲击荷载的作用下也有从脆性到延性的转变现象, 使得试件在冲击荷载作用下的破坏程度降低。

(a) 65 s⁻¹(b) 137 s⁻¹(c) 165 s⁻¹

图 4 无围压(单轴冲击) 3 种应变率试件破坏形态

Fig. 4 Damage pattern of specimens with three strain rates without confining pressure (uniaxial impact)

2.4 应变率效应

根据三波法计算得到试件的应变率、应力和应变, 分别绘制试件在无围压(0 MPa)与 4 种围压下(5, 10, 15, 20 MPa) 3 种应变率的动态应力-应变曲线(见图 6)材料的动态应力-应变曲线主要分为上升阶段和下降阶段^[25]: 由图 6 可以看到, 冲击荷载作用下珊瑚砂水泥基复合材料的应力-应变曲线初始阶

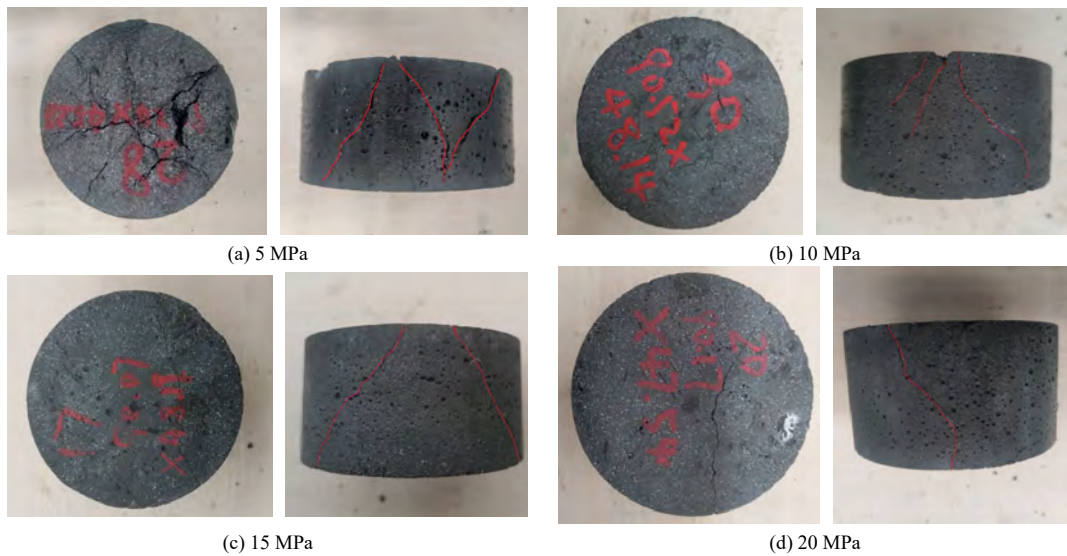
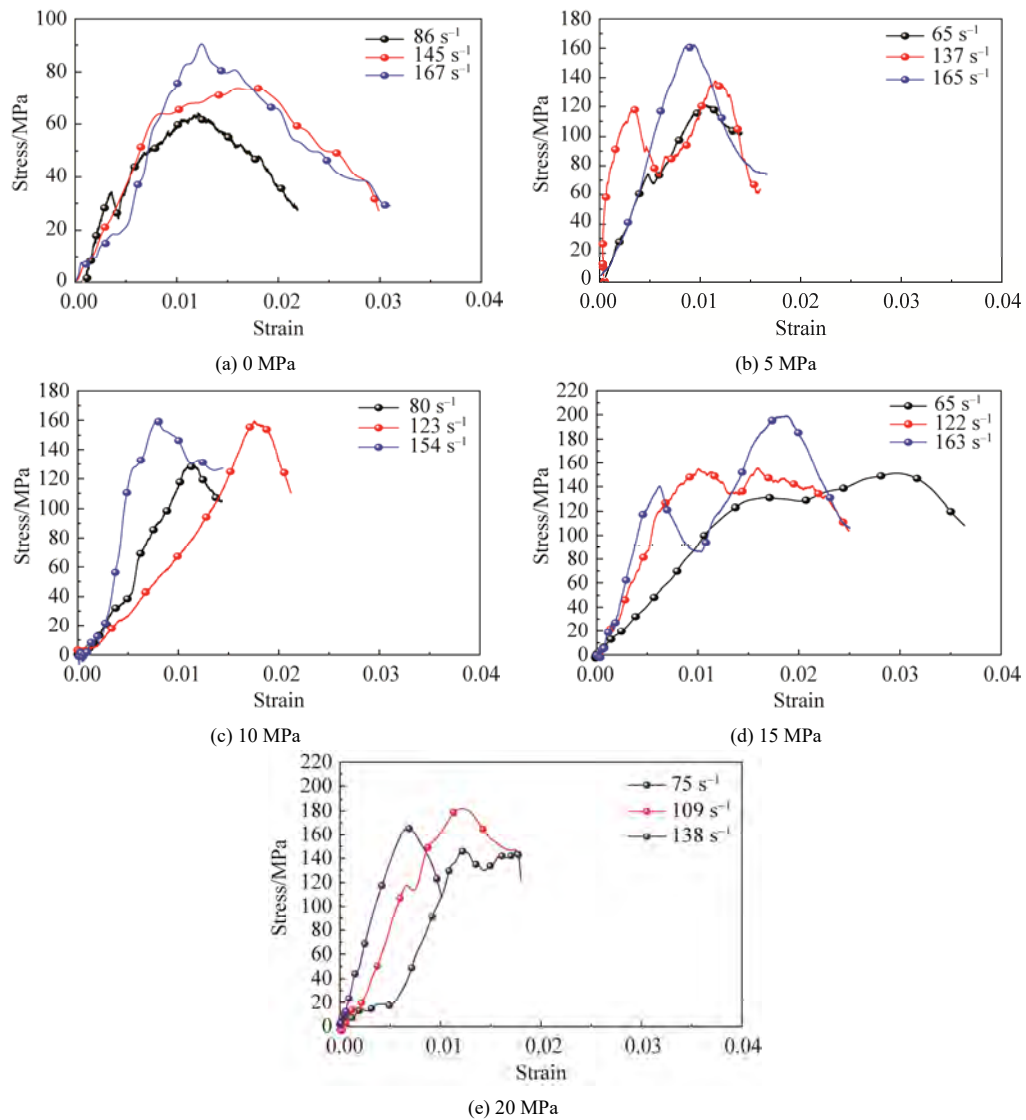
图 5 5~20 MPa 围压下应变率为 165 s^{-1} 时试样破坏形态Fig. 5 Damage pattern of specimens with strain rates 165 s^{-1} under 5–20 MPa confining pressure

图 6 珊瑚砂水泥基复合材料动态应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves of reinforced coral sand cement mortar

段为近似线弹性上升(主要为应变范围在 0~0.01 范围内的直线上升阶段), 达峰值应力后试件发生破坏, 随后由于加载的冲击力迅速得到卸载, 导致应力的下降, 但部分应力应变曲线仍然存在双峰现象。由于掺入的纤维材料在动态冲击过程中起到了有效的桥接作用, 应力波在传播过程中可以通过裂缝间连接的纤维实现基体-纤维-基体的反复传递, 纤维的掺入减少了裂缝的扩展, 从而增强了珊瑚砂水泥砂浆的延性, 但在这种高应变率的冲击作用下同时也会引起波形震荡, 导致应力应变曲线出现多峰值现象^[26]。其次, 由于主动围压的作用, 使得试件的延性进一步增加, 在径向围压和轴向冲击的共同作用下, 由于轴向冲击所引起试件的径向膨胀与围压的径向压缩作用耦合在一起, 会使围压产生小范围的波动, 从而导致试件在径向反复地膨胀-压密, 因此在应力应变曲线上表现为多段强化过程。

相对于珊瑚砂水泥砂浆的准静态抗压强度, 试件在冲击载荷作用下的动态峰值应力得到明显的提高。由不同围压下动态应力-应变曲线可见, 同一应变率下施加围压后峰值应力的增强效果要强于无围压状态。这是由于围压的施加对试件的变形产生了约束作用, 试件要达到发生破坏的体积应变, 需要提升至更高的峰值应力^[27]。

根据上述分析结果, 不同围压和不同应变率对材料的动态强度有着不同程度的影响, 为分析围压对动态抗压强度的影响, 绘制出围压与峰值应力关系(见图 7), 并对实验数据进行非线性拟合, 拟合结果为 3 次多项式关系。结果表明: 无围压状态下试件应变率为 86 s⁻¹ 时, 4 种围压对于动态抗压强度的提升分别为 1.88、2.02、2.35、2.28 倍; 无围压状态下试件应变率为 145 s⁻¹ 时, 4 种围压对于动态抗压强度的提升分别为 1.93 倍、2.16 倍、2.10 倍、2.25 倍; 无围压状态下试件应变率为 167 s⁻¹ 时, 4 种围压对于动态抗压强度的提升分别为 1.80、1.78、2.20、2.01 倍。由于围压的作用使得混凝土试件内部空隙被压密, 膨胀变形能力提高, 因此相对应的动态峰值应力也有所提高, 由图 7 可以看到围压对珊瑚砂水泥砂浆动态抗压强度的提升效果在小于 10 MPa 时较为明显。但这种压密作用效果是有限的^[23], 较高围压的作用下甚至会对试件造成初始损伤, 从而导致动态抗压强度的降低, 从图 7 还可以看到, 当围压大于 10 MPa 时, 材料的峰值应力的增长趋势有所减缓。

为分析围压对材料的影响, 定义围压增长因子(CIF):

$$\text{CIF} = \sigma_1 / \sigma_c \quad (4)$$

其中: σ_1 为存在围压时的动态抗压强度; σ_c 为与 σ_1 对应的应变率无围压下动态抗压强度。

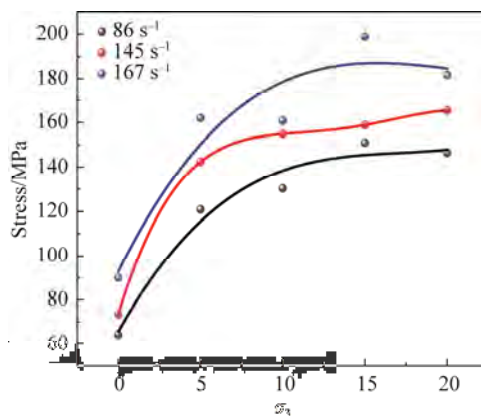


图 7 围压与峰值应力的关系

Fig. 7 Relationship between confining pressure and peak stress

珊瑚砂水泥砂浆在不同应变率下 CIF 拟合结果如图 8 所示, 可以看到 CIF 与无量纲围压 σ_3 / σ_c 近似呈现线性关系, 采用式(5)进行拟合:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right) \quad (5)$$

式中: α 为拟合系数; σ_3 为施加的围压。 α 值为拟合曲线斜率, 对应变率的变化敏感, 具体表现为随着应变率的增加, α 值大小降低, 张磊^[28]在对主动围压下钢纤维混凝土的动态力学性能研究中也发现了类似的规律。

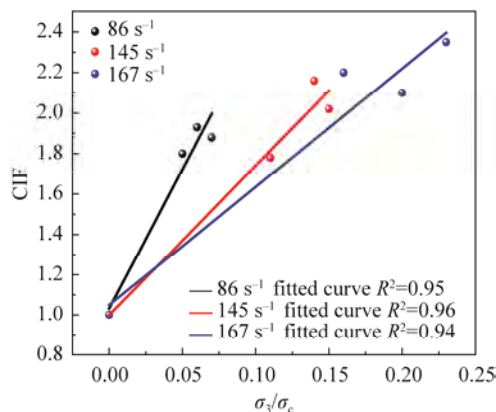


图 8 CIF 与 σ_3 / σ_c 的关系

Fig. 8 Relationship between CIF and σ_3 / σ_c

抗压强度动态增长因子曲线能够反映出材料对于动态荷载的抵抗能力, 可用于指导建筑结构

在动载荷作用下的分析与设计。主动围压下动态抗压强度与准静态抗压强度之比即为动态增长因子(DIF), 为研究材料的应变率效应, 绘制珊瑚砂水泥砂浆在围压下的 DIF 与应变率关系(见图 9)。结果表明珊瑚砂水泥砂浆具备应变率敏感性, 即在同种围压下, 随着应变率的提高, 材料的 DIF 增加, 并且在围压下的应变率效应要强于无围压下的情况。

通过方程拟合的形式可以得到 DIF 与应变率对数之间的关系^[29–32], 对于高应变率段以幂函数形式对数据结果进行拟合。不同围压下(0~20 MPa) DIF 与对数化后的 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s$ 拟合结果见图 10。结果表明: 珊瑚砂水泥砂浆具有明显的应变率效应, 在同一围压下 DIF 大小随着应变率的增加而增加, DIF 与应变率的对数之间存在明显的线性关系。拟合曲线与实验值之间近似可统一用式(6)表示:

$$\text{DIF} = b + a \lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \quad (6)$$

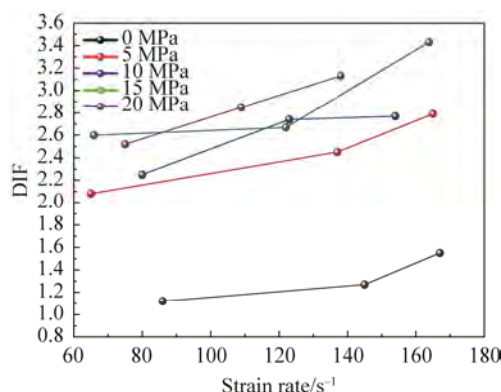


图 9 不同围压 DIF 与应变率

Fig. 9 Relationship between DIF and strain rate for different confining pressures

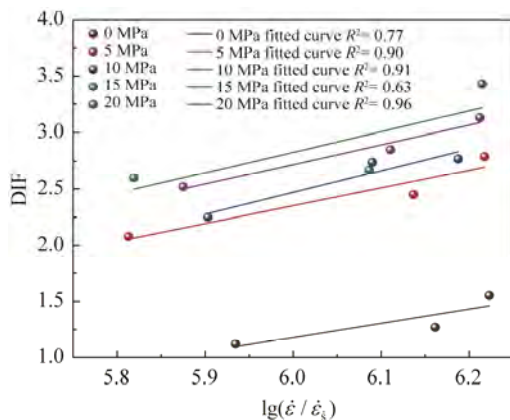


图 10 围压下 DIF 实验结果与拟合曲线

Fig. 10 Experimental results and fitted curves of DIF under confining pressure

式中: a 和 b 为 DIF 拟合结果得到的参数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率大小; $\dot{\varepsilon}_s$ 为准静态下应变率大小。

在不同围压下系数 a , b 取值不同, 拟合后式(6)线性函数的相关系数如表 6 所示:

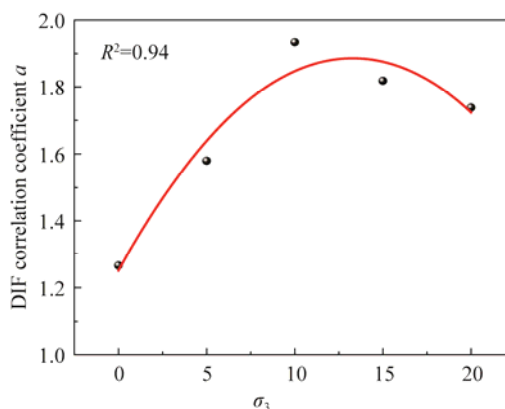
表 6 DIF 系数与围压的关系

Table 6 Relationship between DIF coefficient and confining pressure

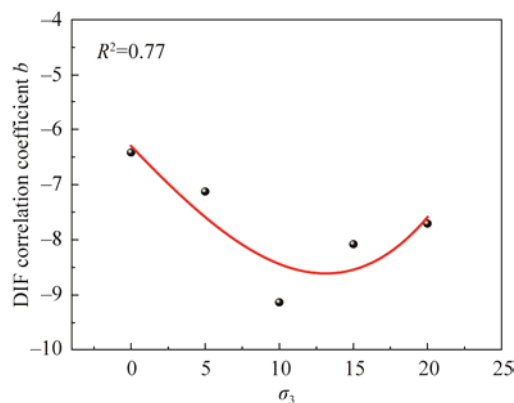
Pressure/MPa	a	b
0	1.266	-6.419
5	1.580	-7.127
10	1.934	-9.133
15	1.818	-8.079
20	1.738	-7.707

为建立 DIF 相关系数 a , b 与围压之间的关系, 将表 6 中的数据进行非线性拟合, 得到关系式(7), 图 11 所示为 DIF 相关系数 a , b 与围压的关系。

$$\begin{cases} a = 1.251 + 0.095\sigma_3 - 0.00359\sigma_3^2 \\ b = -6.303 - 0.280\sigma_3 + 0.00258\sigma_3^2 + 0.000410\sigma_3^3 \end{cases} \quad (7)$$



(a) Relationship between a and confining pressure



(b) Relationship between b and confining pressure

图 11 DIF 相关系数 a , b 与围压的关系

Fig. 11 Relationship between DIF correlation coefficient a , b and confining pressure

将式(7)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} \text{DIF} = & -6.303 - 0.280\sigma_3 + 0.00258\sigma_3^2 + \\ & 0.000410\sigma_3^3 + (1.251 + 0.095\sigma_3 - \\ & 0.00359\sigma_3^2) \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)建立了动态增强因子 DIF 与围压效应和应变率效应之间的关系式。混凝土作为一种各向异性材料,具有一定的离散性,在受到围压作用时可能出现围压增加而强度下降的现象^[33],具体表现为 DIF 相关系数 a , b 拟合出现非线性的结果。由于试验测试过程中重复测试次数有限,结果不可避免方差的存在,后续可对珊瑚砂浆在主动围压下的冲击压缩实验中增加重复实验组,降低数据的离散性,对研究结果进行优化,深入研究主动围压作用下珊瑚砂浆的应变率强化规律。

2.5 能量耗散

材料受到冲击荷载破坏时,能量会发生传递和耗散。为了从能量角度分析材料破坏的本质原因,需要分析试件能量耗散的情况^[34]。入射波能量、反射波能量和透射波能量的计算方式如下:

$$W_i = EA_0 c_0 \int_0^t \varepsilon_i^2(t) dt, i = I, R, T \quad (9)$$

SHPB 试验过程中,在不考虑其他能量损耗的情况下,材料吸收的能量 W_s 为:

$$W_s = W_i - W_R - W_T \quad (10)$$

入射能与应变率的关系如图 12 所示,结果表明入射波能量随着应变率的增加而增加。同一应变率下入射波能量大致相同,围压对入射波能量没有明显影响。

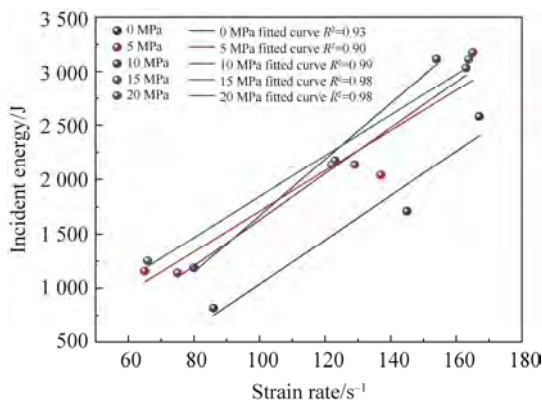


图 12 入射波能量与应变率的关系

Fig. 12 Relationship between incident energy and strain rate

由为了避免混凝土试件离散性对能量耗散分析结果的影响,采用比能量吸收(SEA)对能量耗散的情况进行分析^[35],其物理意义为单位体积吸收的能

量,计算公式如下:

$$\text{SEA} = \frac{W_s}{V} \quad (11)$$

通过式(12)和式(13)对数据进行线性拟合,SEA 与应变率和入射波能量的关系分别如图 13 和图 14 所示。式中 c 和 d 为 SEA 与应变率之间的拟合系数; A 和 B 为 SEA 与入射波能量之间的拟合系数。具体值见表 7。

$$\text{SEA} = c + d\dot{\varepsilon} \quad (12)$$

$$\text{SEA} = A + BW_i \quad (13)$$

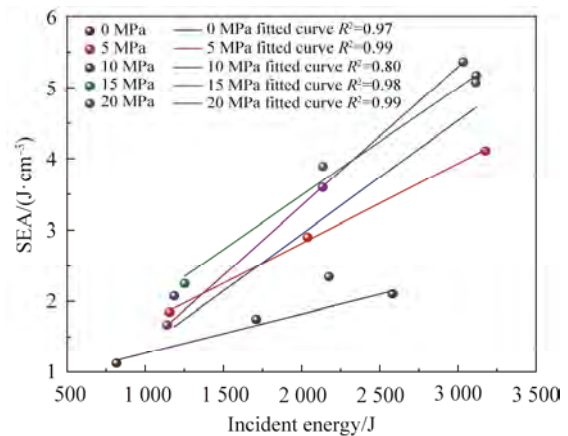


图 13 比吸收能与应变率的关系

Fig. 13 Relationship between specific absorbed energy and strain rate

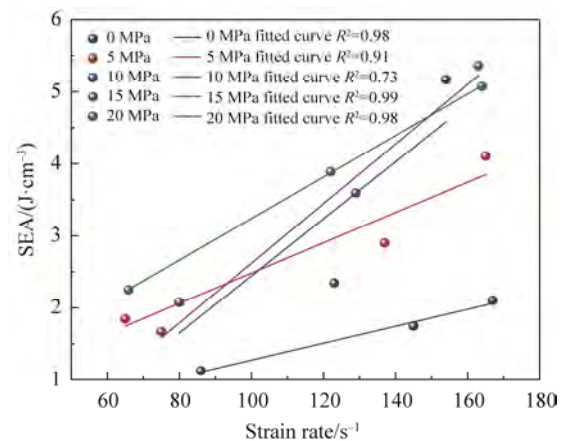


图 14 比吸收能和入射波能量的关系

Fig. 14 Relationship between specific absorbed energy and incident wave energy

表 7 c , d , A , B 的值和相关性系数 R^2

Table 7 Values of c , d , A , B and correlation coefficient R^2

c	d	R^2	A	B	R^2
0.100	0.011 7	0.98	0.715	0.000 53	0.97
0.379	0.021 0	0.91	0.579	0.001 12	0.99
-1.518	0.039 6	0.73	-0.242	0.001 59	0.80
0.356	0.028 8	0.99	0.458	0.001 51	0.98
-1.521	0.041 4	0.98	-0.561	0.001 95	0.99

结果表明: 1) 相同围压下, SEA 大小随着应变率的增加而增加, 呈现为线性关系, 试件的应变率和单位体积吸收的能量随着冲击载荷的增大而增大, 这与岩石介质应变率相关规律相似^[36]; 2) 相同围压下, SEA 和入射波能量呈线性增长关系, 结合试件的破坏形态分析可知, 冲击速率越大, 入射波携带的能量越大, 试件产生裂缝的耗能越多, 因此 SEA 随之增大; 3) 在入射能相近的情况下, 围压越大试件产生裂缝所需要的能量越多, 从而引起 SEA 的增大。

3 结论

使用主动围压 SHPB 装置对复掺纳米 SiO₂ 和玄武岩纤维的珊瑚砂浆开展冲击试验, 通过对不同围压、不同应变率下的试验结果进行分析, 结果表明:

1) 珊瑚砂浆在主动围压下的围压增长因子与无量纲围压呈现线性关系, 在同种应变率下为线性增长。随着应变率的增加, 围压增长因子显著降低。

2) 珊瑚砂浆在冲击载荷作用下, 应变率效应明显。主动围压的施加可以显著提升材料的动态抗压强度, 当围压增加到一定的程度后, 对材料动态抗压强度的增强效果有所减缓。

3) 在围压相同的情况下, 比能量吸收值与应变率和入射能都呈现出线性增长的规律, 并且围压越大, 试件产生裂缝所需要的能量越多, 从而引起比能量吸收值的增大。

在后续的研究中, 可以根据本试验结果构建珊瑚砂浆在围压下的动态强度准则, 基于分形理论研究主动围压作用下珊瑚砂浆的动态损伤本构关系, 从而为复杂应力状态下海洋工程结构设计以及岛礁防护工程建设提供参考依据。

参考文献:

- [1] 张研, 李廷秀, 蒋林华. 混凝土应变率型弹塑性损伤本构模型[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 396–400.
ZHANG Yan, LI Tingxiu, JIANG Linhua. J Build Mater(in Chinese), 2014, 17(3): 396–400.
- [2] 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.
- [3] WU Z Y, YU H F, MA H Y, et al. Physical and mechanical properties of coral aggregates in the South China Sea[J]. J Build Eng, 2023, 63: 105478.
- [4] 马林建, 陈欣星, 赵跃堂, 等. 全珊瑚混凝土的疲劳特性[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 214–219.
MA Linjian, CHEN Xinxing, ZHAO Yuetang, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 214–219.
- [5] 马林建, 刘基程, 张宁, 等. 循环荷载作用下珊瑚混凝土的阻尼特性[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1765–1770.
MA Linjian, LIU Jicheng, ZHANG Ning, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1765–1770.
- [6] ZHOU W, FENG P, YANG J Q. Advances in coral aggregate concrete and its combination with FRP: a state-of-the-art review[J]. Adv Struct Eng, 2021, 24(6): 1161–1181.
- [7] WANG L, SHEN N, YU D P, et al. Strengthening mechanism and microstructure of fibre-reinforced coral mortar and concrete[J]. Proc Inst Civ Eng Struct Build, 2022, 175(9): 671–681.
- [8] LIU B, GUO J H, ZHOU J K, et al. The mechanical properties and microstructure of carbon fibers reinforced coral concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 249: 118771.
- [9] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 476–481.
LI Weimin, XU Jinyu. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(4): 476–481.
- [10] ABHILASH P P, NAYAK D K, SANGOJU B, et al. Effect of nano-silica in concrete; a review[J]. Constr Build Mater, 2021, 278: 122347.
- [11] 鲍玖文, 张洪锐, 方晓龙, 等. 纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J/OL]. 硅酸盐学报, 2023(8): 1–9.
BAO Jiuwen, ZHANG Hongrui, FANG Xiaolong, et al. J Chin Ceram Soc, 2023(8): 1–9.
- [12] ZHANG P, ZHANG H S, CUI G, et al. Effect of steel fiber on impact resistance and durability of concrete containing nano-SiO₂[J]. Nanotechnol Rev, 2021, 10(1): 504–517.
- [13] XU Z, LIU Q F, LONG H Y, et al. Influence of nano-SiO₂ and steel fiber on mechanical and microstructural properties of red mud-based geopolymers concrete[J]. Constr Build Mater, 2023, 364: 129990.
- [14] Qin Q, Meng Q, Mei Q, et al. Dynamic response characteristics of coral reef sand concrete under impact loading[J]. J Build Eng, 2023: 105847.
- [15] CAI Y, REN H Q, LONG Z L, et al. Comparison study on the impact compression mechanical properties of coral aggregate concrete and ordinary Portland concrete[J]. Structures, 2022, 44: 1403–1415.
- [16] 郑志豪, 任辉启, 龙志林, 等. PP/CF增强珊瑚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): 59–71.
ZHENG Zhihao, REN Huiqi, LONG Zhilin, et al. Explos Shock Waves(in Chinese), 2022, 42(7): 59–71.
- [17] 桑登峰, 廖强, 林宇轩, 等. 围压对珊瑚岩动态力学行为影响[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(6): 588–595.
SANG Dengfeng, LIAO Qiang, LIN Yuxuan, et al. Trans Beijing Inst Technol(in Chinese), 2022, 42(6): 588–595.
- [18] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [19] WANG Y G, HUGHES P, NIU H C, et al. A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: composite addition of basalt fiber and nano-silica[J]. J Clean Prod, 2019, 236: 117602.
- [20] 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.

- GUO Chunhuan, ZHOU Peijun, LU Zichuan, et al. *Explos Shock Waves*(in Chinese), 2015, 35(6): 881–887.
- [21] 吕亚茹, 王明洋, 魏久洪, 等. 钙质砂的SHPB实验技术及其动态力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1262–1270.
- LYU Yaru, WANG Mingyang, WEI Jiuqi, et al. *Explos Shock Waves*(in Chinese), 2018, 38(6): 1262–1270.
- [22] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 主动围压下岩石的冲击力学性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6): 120–126.
- LIU Junzhong, XU Jingyu, LV Xiaocong, et al. *J Vib Shock*(in Chinese), 2011, 30(6): 120–126.
- [23] 袁伟, 金解放, 梁晨, 等. 混凝土主动围压SHPB试验波形数值分析[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(7): 141–146.
- YUAN Wei, JIN Jiefang, LIANG Chen, et al. *J Yangtze River Sci Res Inst*(in Chinese), 2018, 35(7): 141–146.
- [24] 薛志刚, 胡时胜. 水泥砂浆在主动围压下的动态力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(6): 561–564.
- XUE Zhigang, HU Shisheng. *Explos Shock Waves*(in Chinese), 2008, 28(6): 561–564.
- [25] 徐世煌, 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.
- XU Shilang, CHEN Chao, LI Qinghua, et al. *Eng Mech*(in Chinese), 2019, 36(9): 50–59.
- [26] 王振波, 李鹏飞, 韩宇栋, 等. 混杂纤维珊瑚骨料混凝土冲击压缩性能的试验与模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 2897–2908.
- WANG Zhenbo, LI Pengfei, HAN Yudong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(11): 2897–2908.
- [27] 张华, 鄢余伟, 武守锋. 混凝土材料SHPB主动围压实验的数值模拟[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(2): 216–220.
- ZHANG Hua, GAO Yuwei, WU Shoufeng. *J Hefei Univ Technol (Nat Sci)*(in Chinese), 2012, 35(2): 216–220.
- [28] 张磊, 郝龙, 项笑炎. 主动围压下钢纤维混凝土动态力学性能研究[C]//第五届全国强动载效应及防护学术会议. 北京: 2013: 150–159.
- [29] LV T H, CHEN X W, CHEN G. Analysis on the waveform features of the split Hopkinson pressure bar tests of plain concrete specimen[J]. *Int J Impact Eng*, 2017, 103: 107–123.
- [30] MA H Y, YUE C J, YU H F, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete[J]. *Int J Impact Eng*, 2020, 137: 103466.
- [31] FU Q, XU W R, LI D, et al. Dynamic compressive behaviour of hybrid basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete under confining pressure: experimental characterisation and strength criterion[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 118: 103954.
- [32] ZHANG H, WANG B, XIE A Y, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 152: 154–167.
- [33] 尤明庆. 围压对岩石试样强度的影响及离散性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 929–937.
- YOU M. *Chin J Rock Mech Eng*(in Chinese), 2014, 33(5): 929–937.
- [34] ZHOU Y, ZOU S Z, WEN J M, et al. Study on the damage behavior and energy dissipation characteristics of basalt fiber concrete using SHPB device[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 368: 130413.
- [35] LIANG W B, ZHAO J H, LI Y, et al. Research on the fractal characteristics and energy dissipation of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures under impact loading[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1902.
- [36] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 轴压和围压对循环冲击下砂岩能量耗散的影响[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3096–3102.
- JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. *Rock Soil Mech*(in Chinese), 2013, 34(11): 3096–3102.