

# PVA 纤维增强珊瑚混凝土静动态力学性能试验研究

周进毅<sup>1</sup>, 龙志林<sup>1\*</sup>, 郭瑞奇<sup>1</sup>, 旷杜敏<sup>1</sup>, 蔡洋<sup>2</sup>, 陈莎莎<sup>3</sup>, 陈劲杰<sup>1</sup>

(1.湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

3.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为增强珊瑚混凝土的力学性能, 对其进行了5种聚乙烯醇纤维体积分数(0、0.5%、1%、1.5%和2%)条件下的静态力学试验, 并采用直径为100 mm的分离式霍普金森杆研究其在4种应变率下的冲击压缩性能。结果表明: 掺入适量纤维能明显提高混凝土静态抗压强度与劈裂抗拉强度; 动态力学试验表明珊瑚混凝土具有明显的应变率效应, 加入纤维后能提高动态增强因子对应变率的敏感性, 增强效果在纤维掺量为1.5%时趋于饱和; 纤维在混凝土中起到了阻裂与耗能的作用, 能明显地改善混凝土的破坏形态与冲击韧性。

**关键词:**全珊瑚海水混凝土; 聚乙烯醇纤维; 冲击压缩力学性能; 应变率效应

中图分类号: U414

文献标志码: A

## Experimental Study on Static and Dynamic Mechanical Properties of PVA Fiber-Reinforced Coral Concrete

ZHOU Jinyi<sup>1</sup>, LONG Zhilin<sup>1\*</sup>, GUO Ruiqi<sup>1</sup>, KUANG Dumin<sup>1</sup>, CAI Yang<sup>2</sup>, CHEN Shasha<sup>3</sup>, CHEN Jinjie<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China; 2.College of Civil Engineering,

Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 3.School of Traffic and Transportation Engineering,

Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** To enhance the mechanical properties of coral concrete, static mechanical tests were conducted at five polyvinyl alcohol fiber volume fractions (0, 0.5%, 1%, 1.5% and 2%). The impact compression properties were investigated under four strain rates using a split Hopkinson pressure bar with a diameter of 100 mm. The results show that the incorporation of an appropriate number of fibers can significantly improve the static compressive strength and splitting tensile strength of concrete. Dynamic mechanical tests show that coral concrete has an obvious strain rate effect, and the incorporation of fibers can improve the sensitivity of the dynamic reinforcement factor to strain rate, with the reinforcement effect becoming saturated at 1.5% of fiber incorporation. The fibers serve to crack resistance and energy dissipation in concrete and can significantly improve the concrete damage morphology and impact toughness.

**Keywords:** coral aggregate seawater concrete; PVA fiber; impact compression mechanical properties; strain rate effect

## 0 引言

随着南海岛礁建设工程的迅速发展, 对混凝土

的需求急剧增加<sup>[1]</sup>, 然而偏远岛屿物资匮乏, 若将材料从大陆运输必定会增加大量成本并影响工期<sup>[2]</sup>。因此, 在不影响自然环境的条件下, 利用破碎后的珊

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 湖南省教育厅项目(编号: 21C0065)

作者简介: 周进毅, 男, 硕士研究生. E-mail: 745622059@qq.com

\*通信作者: 龙志林, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: longzl@xtu.edu.cn

珊瑚代替传统骨料,海水代替淡水制备海水珊瑚混凝土(Seawater Coral Aggregate Concrete, SCAC)具有较好的经济效益。近年来,众多科研成果及工程实践表明珊瑚混凝土在工程中应用具有良好的可行性<sup>[3-5]</sup>。

珊瑚骨料具有空隙率高、强度低及吸水率大的特点<sup>[6-7]</sup>,因此在珊瑚混凝土研究初期时强度大多小于 30 MPa,不适合用于主体结构<sup>[8-9]</sup>。随着研究深入,珊瑚混凝土强度在不断提升的同时,呈现出明显的脆性破坏,在面对频繁撞击、爆炸等荷载时无法充分吸收能量发挥防护作用,而掺入纤维可以有效提高混凝土的塑性与抗冲击性能。目前常用的增强增韧纤维有聚丙烯纤维<sup>[10-12]</sup>、钢纤维<sup>[13-16]</sup>、玻璃纤维<sup>[17-18]</sup>、碳纤维<sup>[19-20]</sup>、玄武岩纤维<sup>[21-22]</sup>等。

聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)纤维耐腐蚀性强,其弹性模量为聚丙烯纤维的 3~4 倍,并且在混凝土中可以分散均匀,具有良好的黏结性能,可考虑用于海水珊瑚混凝土中,但已有相关研究较少,Wang 等<sup>[23]</sup>研究了低掺量 PVA 纤维(体积掺量为 0~0.3%)与钢纤维对其的影响,发现在低纤维掺量情况下,PVA 纤维对 SCAC 的静态力学性能增强效果要优于钢纤维,所以高掺量 PVA 纤维对其影响值得探讨与研究。本文拟采用体积掺量为 0~2% 的 PVA 纤维对 SCAC 进行改性,研究 PVA 纤维对 SCAC 静态抗压强度和劈裂抗拉强度的影响,并使用直径为 100 mm 的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)进行 4 个不同应变率的冲击压缩试验,对高韧性珊瑚混凝土的研究具有重要意义。

1 原材料及试验配合比

本研究采用的原材料主要包括珊瑚粗集料、珊瑚细集料、普通硅酸盐水泥、粉煤灰、硅灰、矿渣、减水剂、人工海水以及 PVA 纤维。

1.1 珊瑚集料

试验前将来自南海某岛礁的珊瑚进行破碎、清洗、晾晒并筛分,其密度为 2.57 g/cm<sup>3</sup>、吸水率为 10.9%、抗压强度为 3.8 MPa,其中粗集料最大粒径不超过 10 mm。由于细集料级配曲线对珊瑚混凝土强度有较大的影响,需采用合理的级配曲线,如图 1 所示。

1.2 胶凝材料

本研究所用胶凝材料为 P.O52.5 级普通硅酸盐

水泥、I 级粉煤灰、S95 级矿渣、硅灰,各胶凝材料化学成分如表 1 所示。

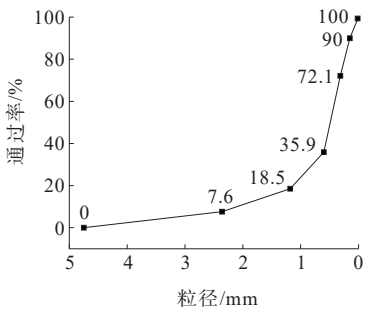


图 1 珊瑚细骨料筛分通过率  
Figure 1 Sieving through rate of coral fine aggregate

表 1 胶凝材料化学技术指标  
Table 1 Chemical specifications of cementitious materials

胶凝材料	含量/%							比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	烧失量	
水泥	56.77	5.90	20.86	3.61	3.50	2.43	1.16	385
粉煤灰	2.23	14.45	73.07	2.76	0.96	0.82	3.84	—
硅灰	0.60	1.30	93.50	0.90	0.50	0.10	1.77	—
矿渣	34.63	16.02	28.04	1.22	5.94	0.32	2.88	—

1.3 PVA 纤维

本研究所用 PVA 纤维为日本生产的 REC15×12PVA 纤维,相对于中国产 PVA 纤维,该纤维强度更高,且更容易分散在混凝土中,其性能参数如表 2 所示。

表 2 PVA 纤维性能参数  
Table 2 Performance parameters of PVA fiber

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	长度/ mm	直径/ μm	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa
1.3	12	39	42	1 600

1.4 人工海水

本研究人工海水根据美国相关规定 ASTM D 1141—2003 配制,其主要化学成分见表 3。

表 3 人工海水化学组成成分  
Table 3 Chemical composition of artificial seawater kg/m<sup>3</sup>

NaCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl
24.5	11.1	4.1	1.2	0.7

1.5 试验配合比及试样制备

试验配合比如表 4 所示,为了使纤维能在混凝

土中均匀分布,拌和前提前将其进行分散,如图 2 所示。拌和工艺使用纤维后掺法:首先将胶凝材料与珊瑚粗细骨料干拌 2 min,加入 1/2 的总海水量拌和 5 min,然后把减水剂与剩余的海水加入搅拌 5 min,此时混凝土已具有较好的流动性,最后分多次加入分散好的 PVA 纤维(图 2)并搅拌 5 min,用手

触摸拌和物以确保纤维没有成团。搅拌完毕后分两次浇筑试块,第一次浇筑 1/3,振捣 2 min 后把剩余的量浇筑完毕,最后振捣 3 min。为防止水分蒸发,表面覆盖一层保鲜膜待 24 h 后拆模,随后将试块放入湿度 90%、温度 23 ℃ 的养护箱养护 28 d 测试其性能。

表 4 不同 PVA 纤维掺量增强珊瑚混凝土配合比

Table 4 Mix proportions of coral concrete reinforced with different PVA fiber contents

编号	材料组成/(kg·m <sup>-3</sup> )								纤维/ %
	水泥	粉煤灰	矿渣	硅灰	珊瑚砂	珊瑚石	减水剂	水	
PVASCAC-0	650	150	100	50	700	300	9.3	266	0
PVASCAC-0.5	650	150	100	50	700	300	9.3	266	0.5
PVASCAC-1.0	650	150	100	50	700	300	9.3	266	1.0
PVASCAC-1.5	650	150	100	50	700	300	9.3	266	1.5
PVASCAC-2.0	650	150	100	50	700	300	9.3	266	2.0

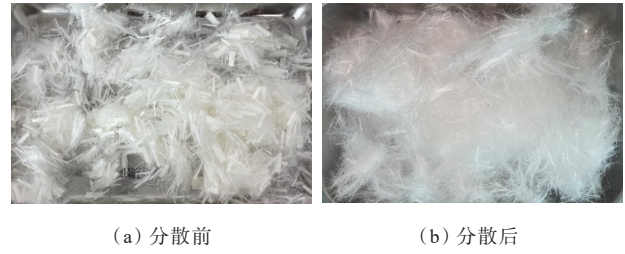


图 2 PVA 纤维形貌

Figure 2 Morphologies of PVA fibers

本研究试验试块尺寸分为两种:φ90 mm×50 mm 的圆柱体试块和 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,前者用于动态压缩试验,后者用于静态抗压与劈裂抗拉试验。图 3 为制作圆柱体试块的模具形貌。因圆柱体试块端面的不平整度要控制在 0.05 mm 以内,试验前需将试块进行打磨,如图 4 所示。各试验每组分别制备 3 个试块,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),舍弃误差≥15% 的数据,有效数据取平均值。由于尺寸效应,静态抗压强度应乘以 0.95,劈裂抗拉强度结果乘以 0.85 得到最终试验结果。

2 静态抗压与劈裂抗拉试验

2.1 纤维掺量对抗压强度的影响

抗压强度试验结果如图 5 所示。由图 5 可见:相同条件下,珊瑚混凝土的抗压强度随着 PVA 纤维掺量的增加呈先减小再增大再下降的趋势,当纤维掺

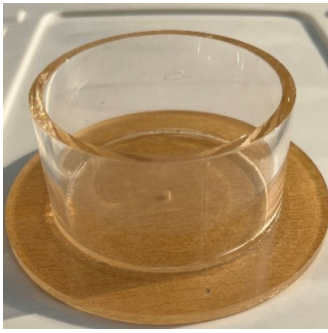


图 3 圆柱体试块模具

Figure 3 Cylindrical test block grinding tool

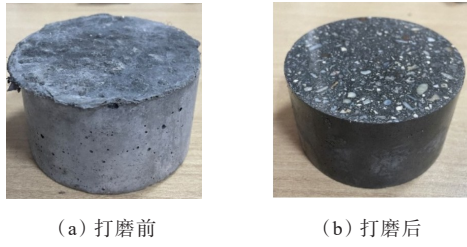


图 4 试件打磨前后形貌

Figure 4 Morphology of specimen before and after grinding

量为 0.5% 时,抗压强度为 58.3 MPa,相比空白对照组下降了 3.3%;随着纤维掺量的增加,抗压强度也随之增加,当纤维掺量达到 1.5% 时,抗压强度达到了最高值 72.2 MPa,相对于空白对照组提高了 19.7%。王龙玲<sup>[24]</sup>的研究也表明 PVA 纤维能有效提高混凝土



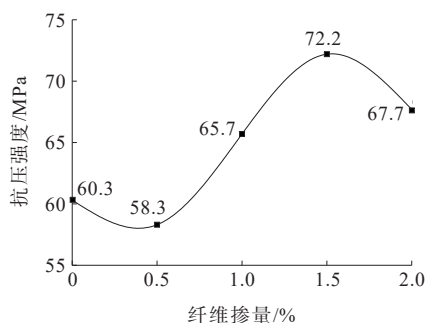


图5 抗压强度与纤维掺量的关系

Figure 5 Relationship between compressive strength and fiber admixture

的抗压强度。当纤维掺量超过1.5%时,抗压强度开始有下降的趋势。试验表明纤维对混凝土抗压强度的影响有一个竞合过程<sup>[25]</sup>:一方面,纤维会使混凝土密实度下降,对强度起负面的作用;另一方面,PVA纤维具有高强高模的特点,抑制混凝土侧向变形作用的同时,能够起到较好的阻裂作用,从而提高强度。在纤维掺量为0.5%时,纤维对SCAC的负面作用要大于正面作用,因此抗压强度相对空白对照组有所下降。当纤维掺量为1%和1.5%时,纤维的正

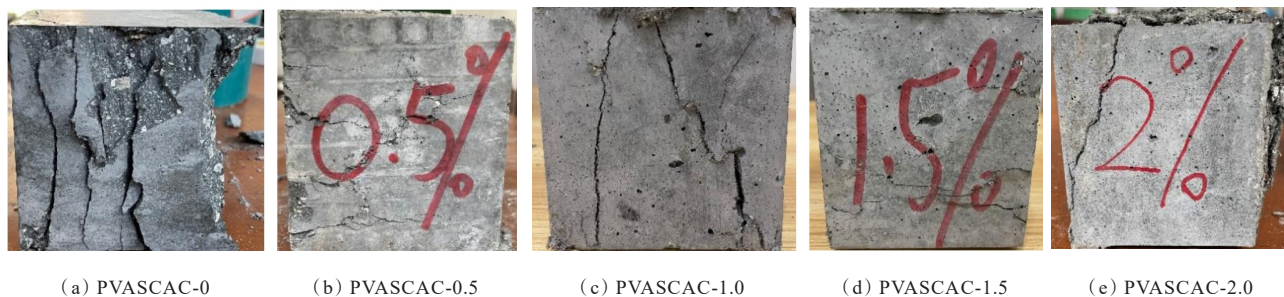
面作用要大于负面作用,抗压强度大幅度提高,但纤维掺量达到2%后,纤维掺量过高,极易成团且在混凝土内部分散不均匀,严重影响混凝土的密实度,抗压强度出现下降趋势。

## 2.2 纤维掺量对静态抗压破坏模式的影响

不同纤维掺量下珊瑚混凝土试件静态抗压破坏形态如图6所示。PVASCAC-0在试验过程中伴随着毫无征兆的响声,出现几条粗大的主裂缝,并且试块破坏后不能保持原来的主要形态,呈现明显的脆性破坏。PVASCAC-0.5的破坏形态较空白对照组有较大的提升,但表面混凝土仍有脱落的现象。各组试块中损伤程度最小为PVASCAC-1.5,裂缝较少的同时,混凝土表面无明显脱落,在加载过程中,混凝土的薄弱处逐渐出现多条微小裂缝,随着受力的不断增加,小裂缝延伸并相互贯通,直至试件破坏,破坏后没有发生坍塌,仍能较好地保持整体性。试验表明PVA纤维能明显改善珊瑚混凝土静态抗压的破坏形态。

## 2.3 纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

劈裂抗拉试验结果如图7所示。



(a) PVASCAC-0

(b) PVASCAC-0.5

(c) PVASCAC-1.0

(d) PVASCAC-1.5

(e) PVASCAC-2.0

图6 立方体抗压破坏形态

Figure 6 Failure patterns of cube samples

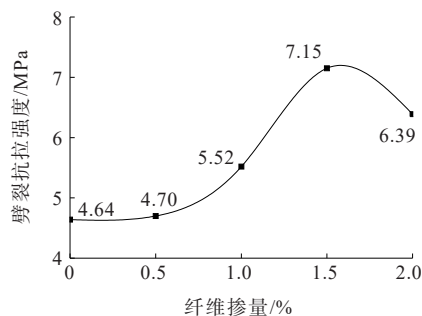


图7 劈裂抗拉强度与纤维掺量的关系

Figure 7 Relationship between splitting tensile strength and fiber content

由图7可知:劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加大幅度提升,在纤维掺量为1.5%时达到了7.15 MPa,相比空白对照组提高了54.1%,当纤维掺量超过1.5%后,劈裂抗拉强度开始出现了下降的趋势。上述现象表明:适量的PVA纤维能有效提高混凝土的劈裂抗拉强度,因为PVA纤维是一种亲水性材料,在混凝土中具有很强的物理黏结与化学黏结,并在混凝土中随机乱向分布组成空间网络结构,使一部分纤维可以承受横向的应力。因此在加载过程中即使混凝土发生开裂,也没有发生破坏,从而对劈裂抗拉

强度有显著的提升,但当纤维掺量达到2%时,纤维数量过多容易互相缠绕成团,增加了混凝土的初始缺陷,使劈裂抗拉强度下降。

### 3 PVA 珊瑚混凝土动态力学性能

#### 3.1 SHPB 试验方法

本试验采用湘潭大学动态力学试验室直径为100 mm的霍普金森杆压杆,试验设备如图8所示,子弹长度为600 mm,入射杆长5 000 mm,透射杆长3 000 mm,通过不同加载气压,对材料进行不同应变率加载。根据试验得到的入射信号、反射信号、透射信号,用经典三波法计算得出材料的应力-应变曲线,三波法公式如下:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{c_0}{l_s} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \quad (2)$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{c_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \quad (3)$$

式中: $\sigma_s(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_s(t)$ 、 $\epsilon_s(t)$ 分别为试块的应力(MPa)、应变率( $s^{-1}$ )和应变; $A_0$ 、 $A_s$ 分别为杆件与试块横截面积( $mm^2$ ); $l_s$ 为试块的长度(mm); $c_0$ 为弹性杆波速(m/s); $E_0$ 为杆件的弹性模量(GPa); $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$ 和 $\epsilon_t$ 分别为杆件的入射应变、反射应变与透射应变,其中 $c_0 \approx 5\,189$  m/s。

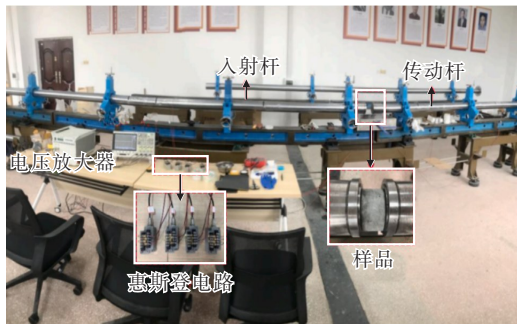


图8 霍普金森杆装置<sup>[26]</sup>

Figure 8 Split Hopkinson pressure bar apparatus<sup>[26]</sup>

SHPB试验的一个假设是应力平衡假定,为确保试验的准确性与有效性,在处理数据之前先进行应力平衡验证。一般认为,若入射波与反射波叠加后接近于透射波,可认为达到应力平衡状态,应力平衡验证如图9所示。

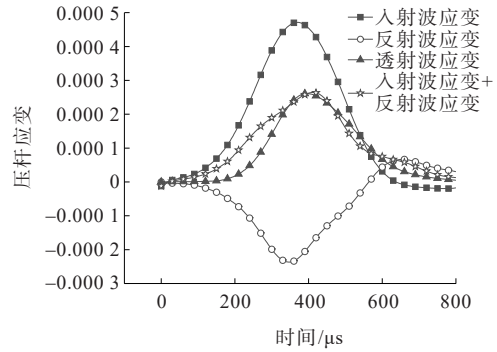


图9 应力平衡验证

Figure 9 Verification of stress balance

#### 3.2 应变率效应

通过SHPB压缩试验得到的应力-应变曲线如图10所示。在应力-应变曲线初始阶段,试块的损伤程度较小,所以曲线大致呈线性增长,可认为处于弹性阶段;当应力达到一定程度时,试件内部裂缝数量增加,应力-应变曲线斜率逐渐减小,进入应变硬化状态;随着裂缝不断发展并相互贯通,试块进入应变软化状态,强度迅速下降。各组试验所承受的峰值应力、弹性模量与应变率均呈正相关,具有明显的应变率效应,因为试块在承受高速荷载的时间极短,应力上升的时间段通常为100~200  $\mu s$ ,导致混凝土裂缝的发展速度远小于应力波的加载速度,试块内部所累积的能量在裂缝完全展开之前无法及时耗散,故应变率增大,会表现出较大的峰值应力。

动态增强因子(Dynamic Increase Factor,  $f_{DIF}$ )通常被定义为动态抗压强度与静态抗压强度之比。在邻近的应变率中掺PVA纤维的4组材料与空白对照组相比 $f_{DIF}$ 值有明显的提高,其中PVASCAC-1.5在50.02~182.18  $s^{-1}$ 范围内可达PVASCAC-0的1.15~1.19倍。为了探讨各纤维掺量的 $f_{DIF}$ 与应变率之间的规律,本文采用被广泛认可的对数线性方程对 $f_{DIF}$ 与应变率进行拟合,如式(4)所示,拟合结果如表5所示,纤维掺量从0.5%~1.5%的应变率敏感性逐渐升高,1.5%~2%时出现了下降的趋势,但与1.5%差别并不大,可认为纤维掺量达1.5%时对应变率的敏感性提升逐渐饱和。

$$f_{DIF} = a \log \dot{\epsilon} + b \quad (4)$$

式中: $\dot{\epsilon}_s$ 为应变率; $a$ 和 $b$ 为拟合参数,参数 $a$ 可以看作 $f_{DIF}$ 对应变率的敏感性,即 $a$ 值越大,敏感性越高,反之则越小。

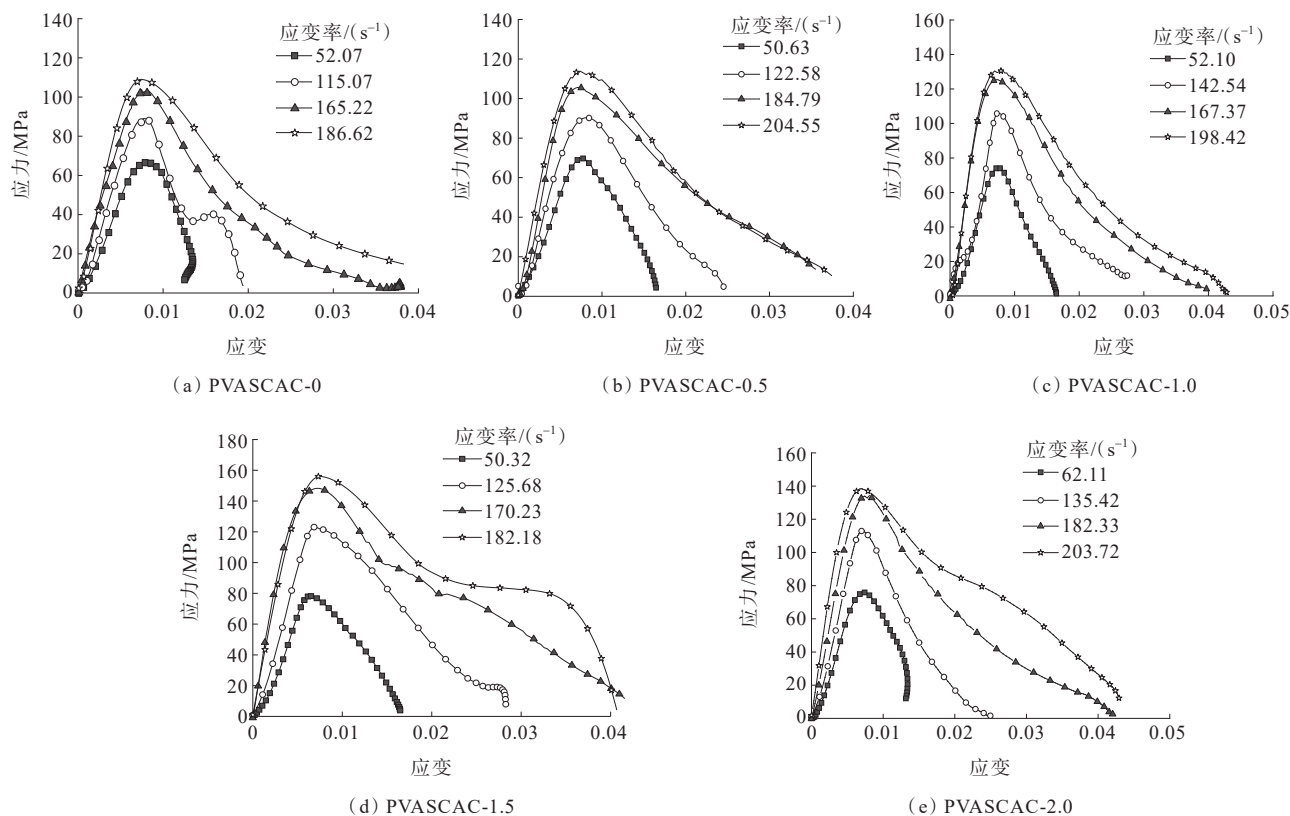


图10 应力-应变曲线

Figure 10 Stress-strain curves

表5 冲击压缩 $f_{DIF}$ 拟合结果Table 5 Fitted results of  $f_{DIF}$ 

纤维掺量/%	$a$	$b$	$R^2$	$\dot{\epsilon}_s$ 范围/( $s^{-1}$ )
0	1.256 73	-1.068 87	0.98	52.07~186.62
0.5	1.182 39	-0.846 33	0.95	50.63~204.55
1.0	1.447 78	-1.377 36	0.92	52.10~198.42
1.5	1.869 76	-2.124 59	0.97	50.32~182.18
2.0	1.807 78	-2.134 75	0.99	62.11~203.72

### 3.3 破坏形态分析

5种纤维掺量的PVASCAC在4种加载气压下的破坏形态如图11所示。由图11可知:随着气压的增大,试块的损伤程度越来越严重。在相同气压下,随着纤维掺量的增加,具体表现为试件表面的裂缝数量减少及大尺寸碎片数目增多,当气压为0.2 MPa时最为明显,PVASCAC-0产生了多条裂缝并互相贯穿,最终完全破坏,其他4种材料在此冲击气压下形态均能保持完好,PVASCAC-0.5与PVASCAC-1.0试块表面有明显裂缝,并有少数相互贯穿,而PVASCAC-1.5只在试件的边缘处产生了微小裂缝。上述现象表明:PVA纤维发挥着非常好的增韧效果,

大量的纤维增强了各个小单元之间的协调作用,并且提升了试件内部的约束力,有效抑制了混凝土在冲击荷载下裂缝的发展。

为了进一步对此试验的破坏形态进行定量分析,舍去破坏后整体保持完整的试块,将其余破坏产物进行筛分,得到不同纤维掺量在不同气压下破坏产物的级配曲线,并将每种试验的3条级配曲线取平均值作为最终的试验数据,结果如图12所示。把级配曲线累计筛余率为50%对应的颗粒粒径定义为破坏产物的平均粒径<sup>[27]</sup>。筛分结果表明:在同一加载气压下,纤维掺量在0~1.5%时破坏产物的平均粒径随着PVA纤维掺量的增加而增大,掺量为1.5%时平均粒径是空白对照组的3.8~4.5倍。

### 3.4 PVASCAC冲击韧性

冲击韧性通常用以衡量材料的能量吸收能力,可用应力-应变曲线中的包络面积表示,采用式(5)计算,计算结果如图13所示。

$$W_T = \int_0^{\epsilon_u} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

式中: $W_T$ 为材料的冲击韧性指标( $J/cm^3$ ); $\epsilon_u$ 为冲击



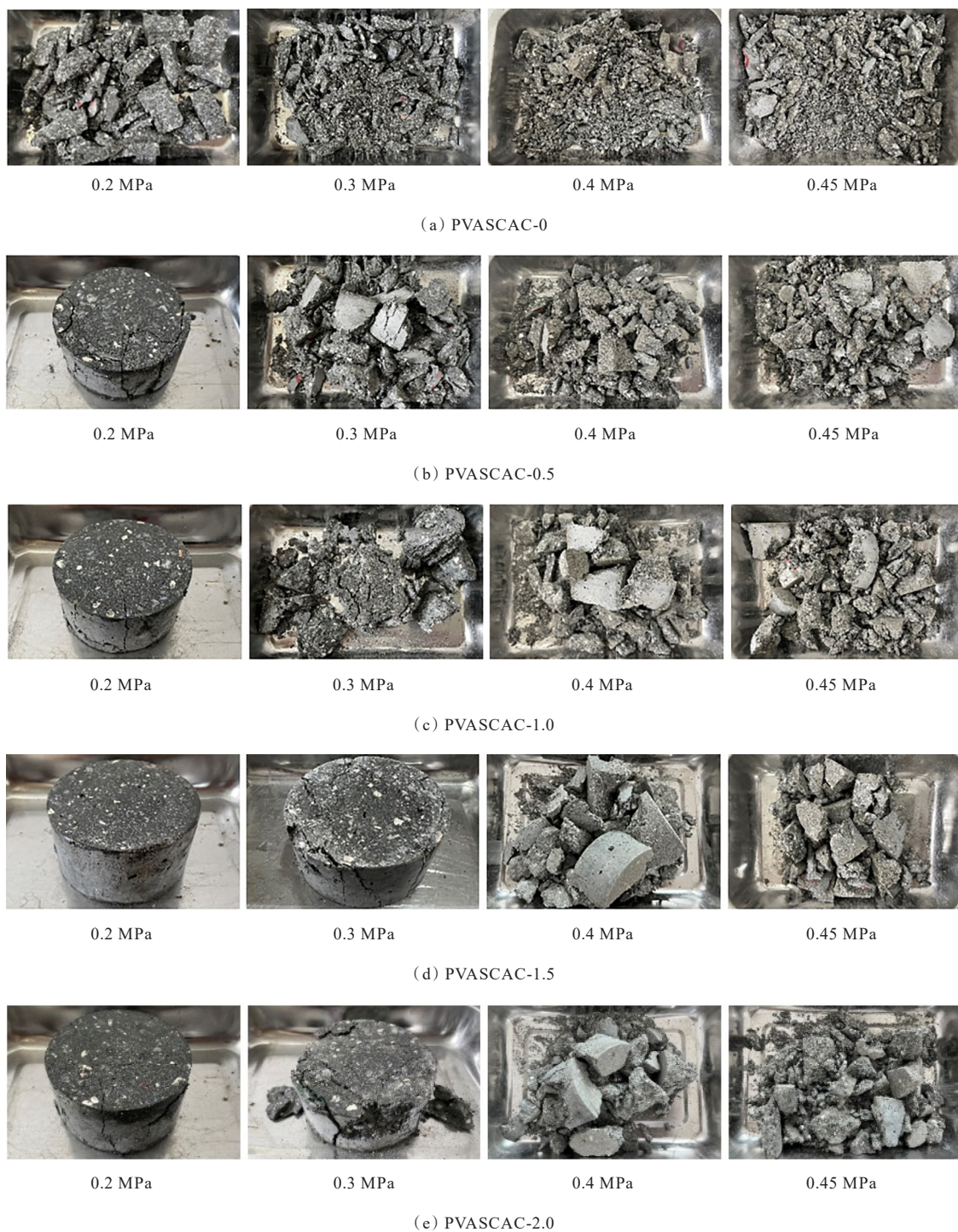


图 11 相同冲击气压下 PVASCAC 的破坏形态

Figure 11 Failure patterns of PVASCAC under similar impact pressure

荷载下的极限应变; $\sigma(\epsilon)$ 为冲击荷载下的应力-应变曲线。

由图 13 可知:试块裂缝的数量与发展程度随应变率的上升而提高,导致试块所吸收的能量增多,所以各纤维掺量中的冲击韧性指标与应变率大致呈线性关系增长,各纤维掺量的混凝土冲击韧性

指标在加载气压为 0.45 MPa 时是 0.2 MPa 时的 2.7~4.3 倍。冲击韧性最优为 PVASCAC-1.5,在邻近应变率中,较空白对照组提高了 34%~110%。由前文讨论可知,破坏产物的平均粒径会随着纤维掺量的增大而增大,说明裂缝在小纤维掺量情况下较容易充分发展,相互贯通后使试块分散成多个碎

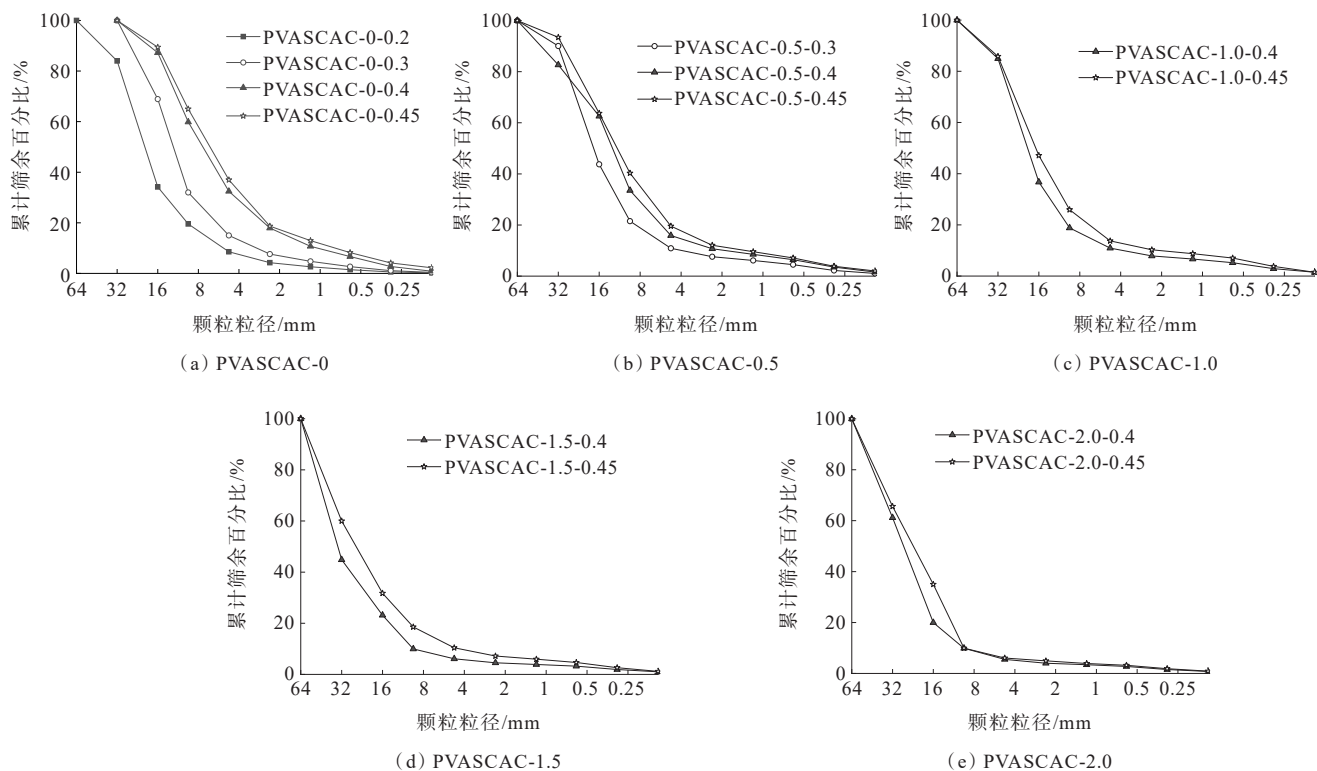


图12 PVASCAC破碎产物的量化分析

Figure 12 Quantitative analysis of PVASCAC crushing products

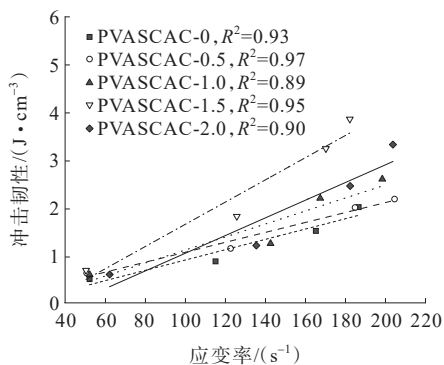


图13 PVASCAC冲击韧性与应变率的关系

Figure 13 Relationship between PVASCAC impact toughness and strain rate

片,而在大纤维掺量的情况下,纤维乱向分布组成的三维网络会良好地抑制裂缝发展,所以大纤维掺量混凝土吸收的能量更多用于形成裂缝而非发展裂缝,导致掺入纤维的试块破坏后平均粒径虽然大于空白对照组,但其内部的裂缝可能会更多,这与谢磊等<sup>[28]</sup>得到的结论相似。在本研究中,PVASCAC-2.0吸能能力低于PVASCAC-1.5,因为当纤维掺量达到2%时,大量的纤维会影响其与浆体的黏结性能,导致混凝土内部缺陷严重,其吸能能力下降,平均粒径

也有了下降的趋势。

## 4 结论

本研究进行了静态抗压、劈裂抗拉和冲击压缩试验,以了解珊瑚混凝土在不同PVA纤维掺量下的材料行为及其差异性。得到以下结论:

(1) PVA纤维能有效提高珊瑚混凝土的静态抗压与劈裂抗拉强度,最优掺量为1.5%,抗压强度和劈裂抗拉强度比空白对照组分别提高了19.7%和54.1%。

(2) PVA纤维能显著改善混凝土在冲击荷载下的破坏形态,在相同气压下的荷载下,纤维掺量为1.5%的珊瑚混凝土破坏产物的平均粒径是空白对照组的3.8~4.5倍。

(3) 珊瑚混凝土具有明显的应变率效应,掺入纤维后能提升动态增强因子 $f_{DIF}$ 对应变率的敏感性,其增强效果在纤维掺量为1.5%时已趋于饱和。

(4) PVA纤维能明显提高珊瑚混凝土的冲击韧性,但过多的纤维会导致其不易分散且极易成团,影响纤维与浆体的黏结性能,降低增强效果。



## 参考文献:

## References:

- [1] WU W J, WANG R, ZHU C, et al. The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 69-78.
- [2] HUANG Y J, LI X W, LU Y, et al. Effect of mix component on the mechanical properties of coral concrete under axial compression[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 736-754.
- [3] 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. Research progress on properties and applications of coral concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2471-2477.
- [4] 范学勇, 徐刚, 马强. 水泥稳定珊瑚礁岩混合料配合比设计及性能研究[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 210-214.
- FAN Xueyong, XU Gang, MA Qiang. Study on mix design and performance of cement stabilized coral reef mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 210-214.
- [5] 苏丽, 牛荻涛, 罗大明. 珊瑚骨料混凝土力学性能及耐久性研究[J]. 材料导报, 2018, 32(19): 3387-3393.
- SU Li, NIU Ditao, LUO Daming. Research of coral aggregate concrete on mechanical property and durability [J]. Materials Review, 2018, 32(19): 3387-3393.
- [6] 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.
- KUANG Dumin, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, 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.
- [7] CHEN S S, ZHANG J H, LONG Z L, et al. Effects of particle size on the particle breakage of calcareous sands under impact loadings[J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127809.
- [8] HOWDYSHELL P A. The use of coral as an aggregate for portland cement concrete structures[R]. Construction Engineering Research Lab (Army) Champaign IL, 1974.
- [9] 陈飞翔, 陈尚雷, 张国志, 等. 珊瑚礁砂制备超高性能混凝土的可行性研究[J]. 混凝土, 2020(7): 65-69.
- CHEN Feixiang, CHEN Shanglei, ZHANG Guozhi, et al. Feasibility study on preparation of ultra high performance concrete with coral reef sand[J]. Concrete, 2020(7): 65-69.
- [10] 吕志恒, 程铭, 蒋喜生, 等. 玻璃纤维和聚丙烯纤维改善混凝土微观结构研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 267-270.
- LYU Zhiheng, CHENG Ming, JIANG Xisheng, et al. Study on microstructure of glass fiber and polypropylene fiber improved concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 267-270.
- [11] 崔海军. 聚丙烯纤维对海砂混凝土的耐久性试验研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 203-205.
- CUI Haijun. Experimental study on durability of polypropylene fiber to sea sand concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 203-205.
- [12] 单景松, 刘建, 王敏, 等. 聚丙烯纤维透水水泥混凝土受力性能研究. 中外公路, 2020, 40(6): 276-280.
- SHAN Jingsong, LIU Jian, WANG Min, et al. mechanical properties of porous cement concrete with polypropylene fiber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 276-280.
- [13] 熊辉, 刘洪辉. 掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 206-211.
- XIONG Hui, LIU Honghui. Influence of high performance recycled concrete mixed with steel fibers and slags[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 206-211.
- [14] 郭广磊, 孙世强, 李颖, 等. 钢纤维和聚合物乳液对混凝土力学性能及微观结构特征影响研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 259-264.
- GUO Guanglei, SUN Shiqiang, LI Ying, et al. Influence of steel fiber and polymer emulsion on mechanical properties and microstructure of concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 259-264.
- [15] 邱建冬. 钢-聚丙烯复掺纤维橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 274-278.
- QIU Jiandong. Experimental study on mechanical properties of steel-polypropylene mixed fiber rubber concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 274-278.
- [16] 梁志成. 钢纤维增强砼力学及耐久性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(3): 81-85, 96.
- LIANG Zhicheng. Study on mechanics and durability of steel fiber reinforced concrete[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(3): 81-85, 96.
- [17] TIBEBU A, MEKONNEN E, KUMAR L, et al. Compression

- and workability behavior of chopped glass fiber reinforced concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62:5087-5094.
- [18] 王伟,戴梦丹,俞文杰.短龄期玻璃纤维水泥土的三轴力学特性研究[J].中外公路,2023,43(3):218-225.  
WANG Wei, DAI Mengdan, YU Wenjie. Study on triaxial mechanical properties of glass fiber reinforced cement soil in short age[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):218-225.
- [19] 李建仙.碳纤维对自密实混凝土性能的影响及其微观机理分析[J].中外公路,2020,40(1):243-248.  
LI Jianxian. Influence of carbon fiber on properties of self-compacting concrete and analysis on the microcosmic mechanism[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1):243-248.
- [20] 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):61-73.  
ZHENG Zhihao, REN Huiqi, LONG Zhilin, 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):61-73.
- [21] 边旭辉,申爱琴,连城,等.基于灰靶决策优化的玄武岩纤维混凝土配合比设计及其阻裂增韧性能评价[J].中外公路,2021,41(5):259-263.  
BIAN Xuhui, SHEN Aiqin, LIAN Cheng, et al. Proportioning design of basalt fiber reinforcement concrete based on grey target decision optimization and evaluation of crack resistance and toughness performance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5):259-263.
- [22] 马峰,闫志彬,傅珍,等.基于响应曲面法的玄武岩纤维沥青混合料设计及路用性能研究[J].功能材料,2021,52(12):12137-12142,12151.  
MA Feng, YAN Zhibin, FU Zhen, et al. Basalt fiber asphalt mixture design and road performance research based on response surface methodology[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12):12137-12142, 12151.
- [23] 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, 340:127801.
- [24] 王龙玲.PVA-FRCC的力学性能和裂纹自愈合研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.  
WANG Longling. Research on mechanical properties and crack self-healing of PVA fiber reinforced cementitious composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [25] LI V C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 1992, 14(2):131-141.
- [26] 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.
- [27] ZHANG S R, WANG X H, WANG C, et al. Compressive behavior and constitutive model for roller compacted concrete under impact loading: Considering vertical stratification[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:428-440.
- [28] 谢磊,李庆华,徐世烺.纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J].复合材料学报,2021,38(9):3086-3100.  
XIE Lei, LI Qinghua, XU Shilang. Influence of fiber volume fraction on dynamic compressive properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3086-3100.