

玄武岩纤维增强海水珊瑚混凝土冲击劈裂拉伸性能及微观结构分析

郭鑫伟

湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月20日; 发布日期: 2026年9月30日

摘要

本研究通过分离式霍普金森压杆(SHPB)系统, 针对玄武岩纤维增强海水珊瑚混凝土(BFRSCC)的冲击劈裂拉伸性能展开分析。系统探究了纤维掺量(0%、0.1%、0.3%、0.5%)与冲击气压(0.14、0.16、0.20、0.22、0.24 MPa)对材料动态力学行为的影响。结果表明: BFRSCC具有显著的应变速率强化效应, 动态抗拉强度与能量耗散能力随冲击能量提升而增强; 纤维掺量为0.3%时综合性能最优, 准静态劈裂强度达3.8 MPa, 此时微观层面可见纤维通过机械咬合与化学键合在骨料界面形成高效锚固, 界面过渡区无明显微裂纹; 玄武岩纤维的三维网络结构通过近端断裂耗能、远端纤维束完整的分级机制抑制裂缝扩展; 过量纤维大于0.3%则因团聚效应导致孔隙率增加。研究证实合理掺配玄武岩纤维可显著提升珊瑚混凝土抗冲击性能, 为岛礁防护工程提供材料设计依据。

关键词

珊瑚混凝土, 玄武岩纤维, 动态劈裂, 微观分析

Basalt Fiber Reinforced Seawater Coral Concrete Impact, Splitting, and Tensile Performance and Microstructure Analysis

Xinwei Guo

School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: August 29, 2026; accepted: September 20, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

This study analyzes the impact splitting tensile performance of basalt fiber reinforced seawater

文章引用: 郭鑫伟. 玄武岩纤维增强海水珊瑚混凝土冲击劈裂拉伸性能及微观结构分析[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 139-148. DOI: 10.12677/hjce.2026.159231

coral concrete (BFRSCC) using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) system. It systematically explores how fiber content (0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%) and impact air pressure (0.14, 0.16, 0.20, 0.22, 0.24 MPa) affect the material's dynamic mechanical behavior. The results show that BFRSCC has a significant strain rate strengthening effect, with dynamic tensile strength and energy dissipation capacity increasing with impact energy. When the fiber content is 0.3%, the overall performance is optimal, with a quasi-static splitting strength of 3.8 MPa. At the microscopic level, fibers form efficient anchoring at the aggregate interface through mechanical interlocking and chemical bonding, with no obvious microcracks in the interfacial transition zone. The three-dimensional network structure of basalt fibers suppresses crack propagation through a hierarchical mechanism of energy dissipation by near-end breakage and intact fiber bundles at the far end. Fibers exceeding 0.3% cause increased porosity due to agglomeration effects. The study confirms that appropriate basalt fiber content can significantly enhance the impact resistance of coral concrete, providing a reference for material design in island and reef protection projects.

Keywords

Coral Concrete, Basalt Fiber, Dynamic Splitting, Microanalysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国“海洋强国”战略的深入实施及“一带一路”倡议的推进，远洋岛礁基础设施建设对国家权益维护、资源开发与海上交通保障具有重大战略意义[1]。然而远离大陆的岛礁面临石骨料匮乏、淡水供应困难、高盐高湿高腐蚀等严峻挑战，传统建筑材料运输成本高昂且不可持续。在此背景下，海水珊瑚混凝土(Seawater Coral Concrete, SCC)凭借零陆源骨料依赖和就地资源化的优势，成为岛礁工程的核心建材。对实现岛礁工程快速化、经济化、绿色化建设至关重要。

玄武岩纤维增强海水珊瑚混凝土(Basalt fiber-seawater reinforced coral concrete, BFRSCC)是以南海岛礁珊瑚碎屑为骨料，加入海水，掺入玄武岩纤维[2] (Basalt Fiber, BF)，形成的特种复合材料。其核心特性包括高强度的拉压强度比、耐海洋腐蚀、界面粘结性好等优点。目前已有研究表明 BF 在海洋环境中的良好适应性，High C 等[3]对 BFRP 筋珊瑚混凝土梁的测试，显示了 BFRSCC 的铝离子扩散系数较普通混凝土降低 50%，显著延缓钢筋腐蚀。Niu 等[4]的研究从热重分析、纤维粘结性能和纤维界面特性等方面阐述了 BF 的增强机制。Nasim Shatarat [5]通过干湿循环试验表明，因纤维表面形成的硅氧网格阻隔氯离子渗透，1%体积分数的 BF 使 BFRSCC 在海水侵蚀 180 天后强度保留率 > 90%。其次 BF 为增强材料对再生混凝土的劈裂拉伸和弯曲承载能力分别提升 40.17%和 61.45%，这对岛礁工程环境问题和建筑废物利用提供解决方案。

关于 BFRSCC 的研究多集中于静态力学性能及耐久性方面[6]，对其在动态冲击荷载下的力学响应，特别是劈裂拉伸性能的研究尚显不足。而岛礁工程结构常面临台风、波浪拍击、船舶撞击、爆炸冲击等强动荷载威胁[7]，材料在高速冲击下的抗裂、耗能机制及破坏模式是评估其服役性能的核心。因此，深入探究 BFRSCC 在冲击荷载作用下的劈裂拉伸力学行为，揭示不同应变率下其强度演化、变形特征、能量吸收特性以及微观裂缝的萌生、扩展与纤维作用机制[8]，对于科学评价其抗冲击性能、优化材料设计、保障岛礁工程结构在极端工况下的安全具有重要的理论意义和工程应用价值[9]。

2. 试验

本实验选用南海某岛礁的珊瑚(粗骨料)与珊瑚砂(细骨料),二者呈碎屑状堆积,粗骨料为不规则块状,细骨料棱角分明且具纳米级凹坑与贯穿孔道。物性测试(参照 GB/T 14685-2022)显示:珊瑚粗骨料表观密度 2557 kg/m³、堆积密度 1062 kg/m³、孔隙率 58.5%;珊瑚细骨料表观密度 2500 kg/m³、堆积密度 1115 kg/m³、孔隙率 45.0%。为探究纤维掺量影响,试验设定玄武岩纤维体积掺量梯度为 0%、0.1%、0.3%和 0.5%,对应试样编号为 1-0、1-1、1-3、1-5。

制备依据 CECS13-2009 规范,骨料提前 24 小时预湿,搅拌前用水润湿内壁。将水泥、粉煤灰、硅灰与预湿骨料干混,随后加入 1/3 海水搅拌 4 分钟,再加入 1/2 减水剂及剩余 1/2 海水搅拌 4 分钟,待呈稀浆状态时投入纤维与剩余海水,直至纤维均匀分布。混合料注入圆柱(Φ90 mm × 50 mm)及立方体(100 mm)模具,振捣 1 分钟以排气泡并防沉降。覆膜静置 24 h 后脱模,于标准养护箱(95% ± 0.5%, 20℃ ± 2℃)养护 28 天。动态测试前,采用双端面磨平机处理试件端面,确保平整度以减小荷载传递误差。图 1 展示了动态冲击试样制作流程。

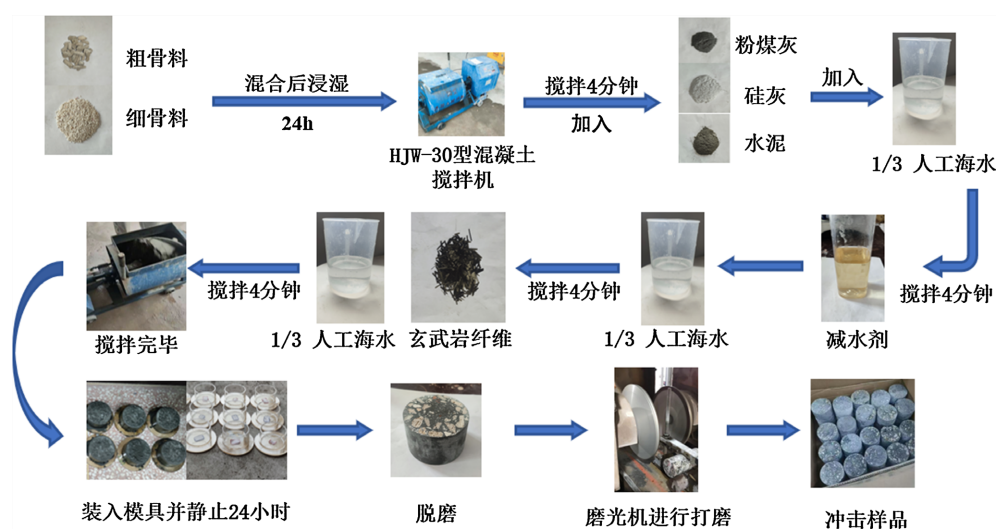


Figure 1. Dynamic impact test sample preparation process

图 1. 动态冲击试样制作流程

2.1. 动态测试方法

本研究采用湘潭大学土木工程学院 Φ100 mm 分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行 BFRSCC 动态劈裂试验。系统由入射杆(长 5 m)、透射杆(长 3 m)、子弹(长 0.4 m)及支撑、发射、数据采集和缓冲部件组成,杆件材质为 60Si2Mn 弹簧钢(屈服强度 ≥ 800 MPa, 泊松比 0.3)。试验时将圆柱试样夹持于入射杆与透射杆之间。

测试前,在入射杆撞击面粘贴波形整形片以获得近矩形或半正弦波,并在试样两端均匀涂抹凡士林润滑。通过调节气压控制应变速率,由杆上应变片记录入射、反射和透射波时程。SHPB 分析基于一维应力波和应力均匀性两个核心假设,利用三波法由透射波信息计算试件的动态应力、应变及应变率,满足能量守恒关系[10]。可以表示为方程(1)。

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (1)$$

上述公式中,应力(σ_s)、应变(ε_s)、和应变率($\dot{\varepsilon}$)可用公式(3)~(5)按照三波法分析应力 - 应变公式如

(2)~(4)所示。

$$\sigma_s = \frac{E_0 A_0}{2A_s} \varepsilon_t(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = \frac{-2c_0}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{-2c_0}{l_0} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (4)$$

其中 E 是压杆的弹性模量； A_0 是压杆的横截面积； A_s 是试件的横截面积； c_0 是应力波在压力棒中的传播速度； l_0 是试样的初始厚度。

2.2. 微观测试方法

采用 TESCAN MIRA4 型场发射扫描电镜(FE-SEM)表征 BFRSCC 微观结构, 观测玄武岩纤维、珊瑚骨料及水泥基体的形貌与界面结合。试样取自力学试验后纤维掺量 0%、0.1%、0.3%、0.5%的破碎试块, 选取代表性断裂面切取 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 样品, 研磨至底面光滑, 无水乙醇浸泡 24 小时终止水化, 再于 60°C 真空干燥 6 小时, 喷金后以导电胶粘贴于样品台, 抽真空后实施 SEM 观测。

3. 结果与分析

3.1. 应力平衡验证和冲击测试结果

为验证 SHPB 实验数据有效性, 基于三波平衡原理(入射波 + 反射波 = 透射波)检验 BFRSCC 试件内应力均匀性。图 2 验证平衡良好, 测试结果如表 1 所示。

3.2. 破坏模式

根据 ISRM 规范, 有效巴西劈裂判据为裂纹起裂于圆盘中心并沿加载直径贯通[11]。BFRSCC 动态劈裂随应变率升高。图 3 呈现三类破坏: 低应变率($<10\text{ s}^{-1}$)为单一主裂纹劈裂, 符合经典弹性理论; 中应变率($10\sim15\text{ s}^{-1}$)出现中心劈裂加端部粉碎及次级裂纹, 源于应力波反射增强与纤维脱粘加剧; 高应变率($>15\text{ s}^{-1}$)起裂点移至端部, 形成斜向剪切带并整体粉碎, 因超高应变率提升屈服强度但增大脆性, 且过量纤维团聚促进剪切失效。

3.3. 应变率效应

基于三波法动态劈裂试验结果, 不同纤维掺量(0%~0.5%)的 BFRSCC 应力 - 时间曲线形态相似, 但峰值应力随应变率升高显著增长(如 1-0 组从 6.89 s^{-1} 增至 17.85 s^{-1} 时提升约 59.8%), 且峰值应力到达时间明显缩短, 证实强应变率效应, 图 4 所示。在 $0\sim20\text{ s}^{-1}$ 范围内, 峰值应力与应变率对数呈良好线性关系(如图 5 所示), 斜率 k 表征应变率敏感性, 其中纤维掺量 0.3%时 k 值最大(较基准组提高 19.8%), 为动态抗拉强度预测提供了理论依据[12]。

$$\begin{cases} f_{td} = 1.3126 + 8.89134 \lg \dot{\varepsilon}, R^2 = 0.78238, C_{BF} = 0\% \\ f_{td} = 3.0931 + 8.23573 \lg \dot{\varepsilon}, R^2 = 0.94604, C_{BF} = 0.1\% \\ f_{td} = 2.0028 + 10.6569 \lg \dot{\varepsilon}, R^2 = 0.94759, C_{BF} = 0.3\% \\ f_{td} = 2.6736 + 9.28796 \lg \dot{\varepsilon}, R^2 = 0.97536, C_{BF} = 0.5\% \end{cases} \quad (5)$$

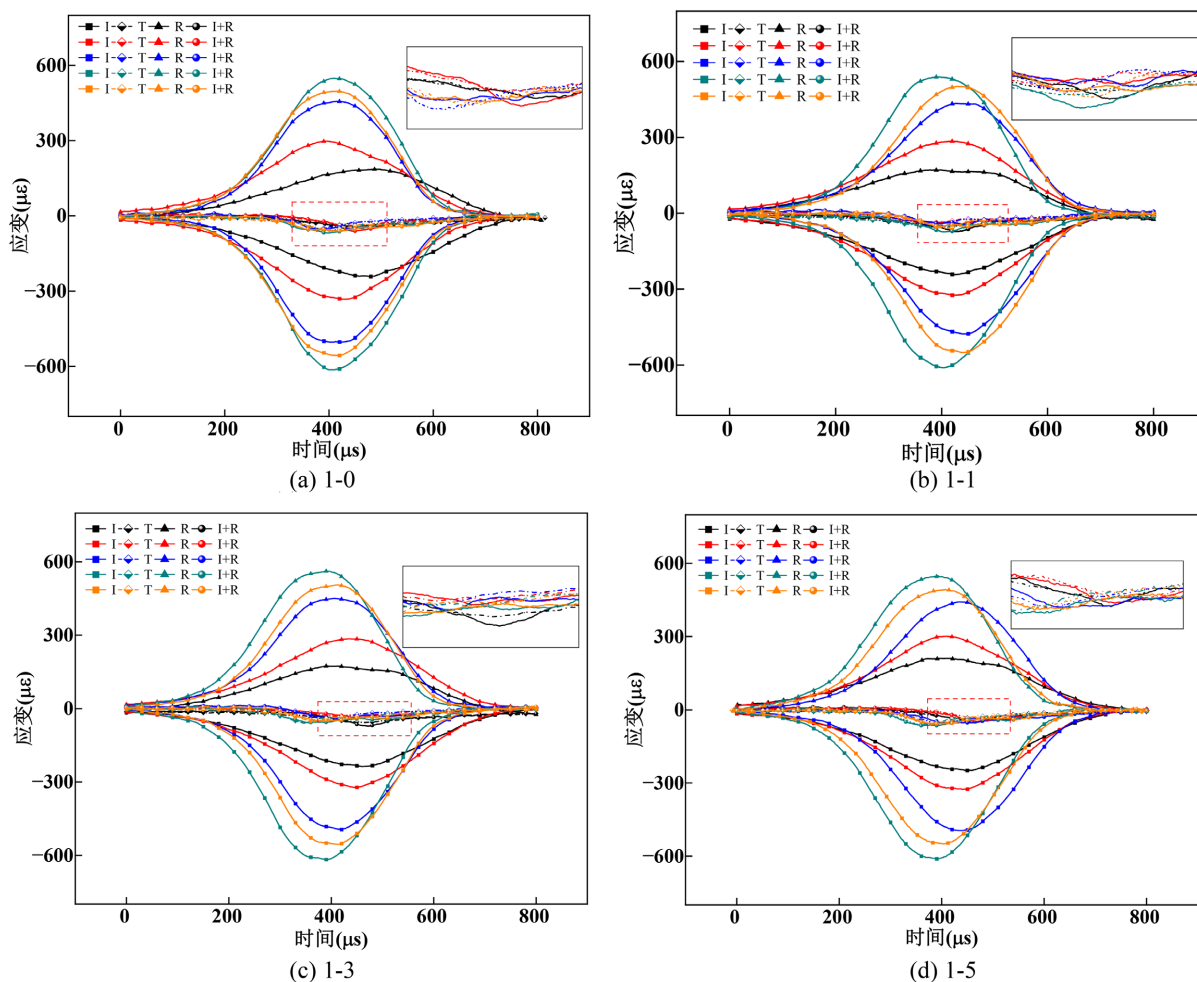


Figure 2. Stress balance verification chart for four fiber contents at the same strain rate

图 2. 不同应变速率下 4 种纤维含量的应力平衡验证图

Table 1. SHPB test results of BFRSCC

表 1. BFRSCC 的 SHPB 测试结果

试样	纤维 含量/%	动态劈裂 强度/MPa	动态压缩 强度/MPa	冲击 气压/MPa	应变率/ s^{-1}	失效应变 ($m\epsilon$)	峰值应力 /MPa	DIF
1-0	0	3.96	52.7	0.14	6.89	6.86	9.67	2.44
1-0				0.16	9.60	11.27	11.80	2.98
1-0				0.20	14.93	13.52	12.63	3.19
1-0				0.22	16.11	15.84	12.80	3.23
1-0				0.24	17.85	17.55	15.44	3.89
1-1	0.3	4.08	57.5	0.14	6.35	7.29	9.09	2.23
1-1				0.16	9.36	10.98	9.27	2.27
1-1				0.20	14.30	13.53	11.11	2.72
1-1				0.22	15.52	15.51	13.19	3.23
1-1				0.24	17.63	17.58	13.49	3.31

续表

1-3				0.14	6.25	7.24	8.42	1.92
1-3				0.16	9.37	11.31	7.89	1.79
1-3	0.6	4.4	63.7	0.20	14.61	13.84	8.88	2.02
1-3				0.22	16.54	16.21	12.32	2.80
1-3				0.24	18.39	18.70	13.95	3.17
1-5				0.14	6.79	7.41	9.54	2.11
1-5				0.16	9.81	11.31	10.17	2.25
1-5	0.9	4.53	58.6	0.20	14.46	14.52	13.10	2.89
1-5				0.22	16.02	15.83	13.60	3.01
1-5				0.24	18.90	18.90	15.07	3.33

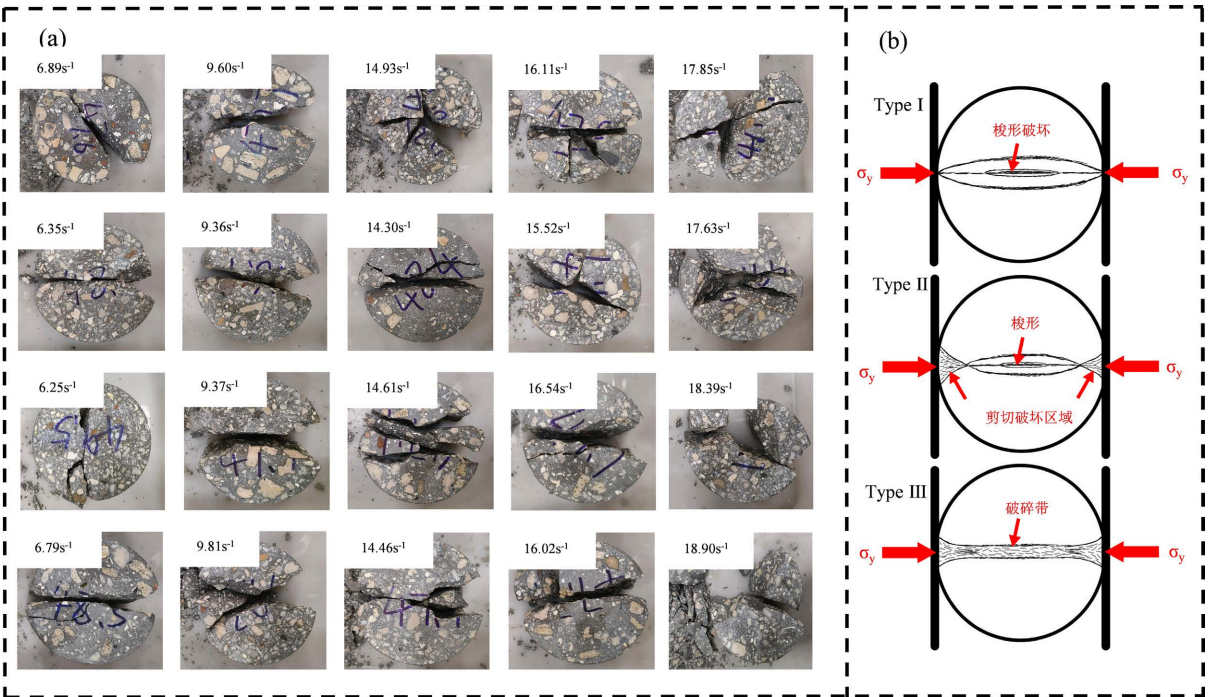


Figure 3. Failure mode of dynamic splitting samples
图 3.动态劈裂样品的失效模式

为了便于描述脆性材料，如混凝土类、煤样等材料，在动态加载条件下的强度特性，可以使用动态增长因子(Dynamic Increase Factor)作为一项指标进行分析[13]。动态增长因子表示在动态加载条件下，材料的动态强度相对于静态加载条件下的强度的增长倍数。通过计算动态加载试验中的样本的峰值应力，即动态劈裂拉伸强度，并与相应的准静态劈裂强度进行比较，可以计算出动态增长因子[14]，如公式(7)所示。

$$DIF = \frac{f_{td}}{f_{tb}} \tag{6}$$

DIF 的线性拟合结果如表 2 所示。 a 和 b 是拟合参数。 R^2 是拟合优度，值越接近 1，拟合结果的质量就越好。从拟合结果图 6(b)可以看出， R^2 大于 0.9，表示 DIF 与应变率对数的关系近似呈线性关系如图 6 所示。

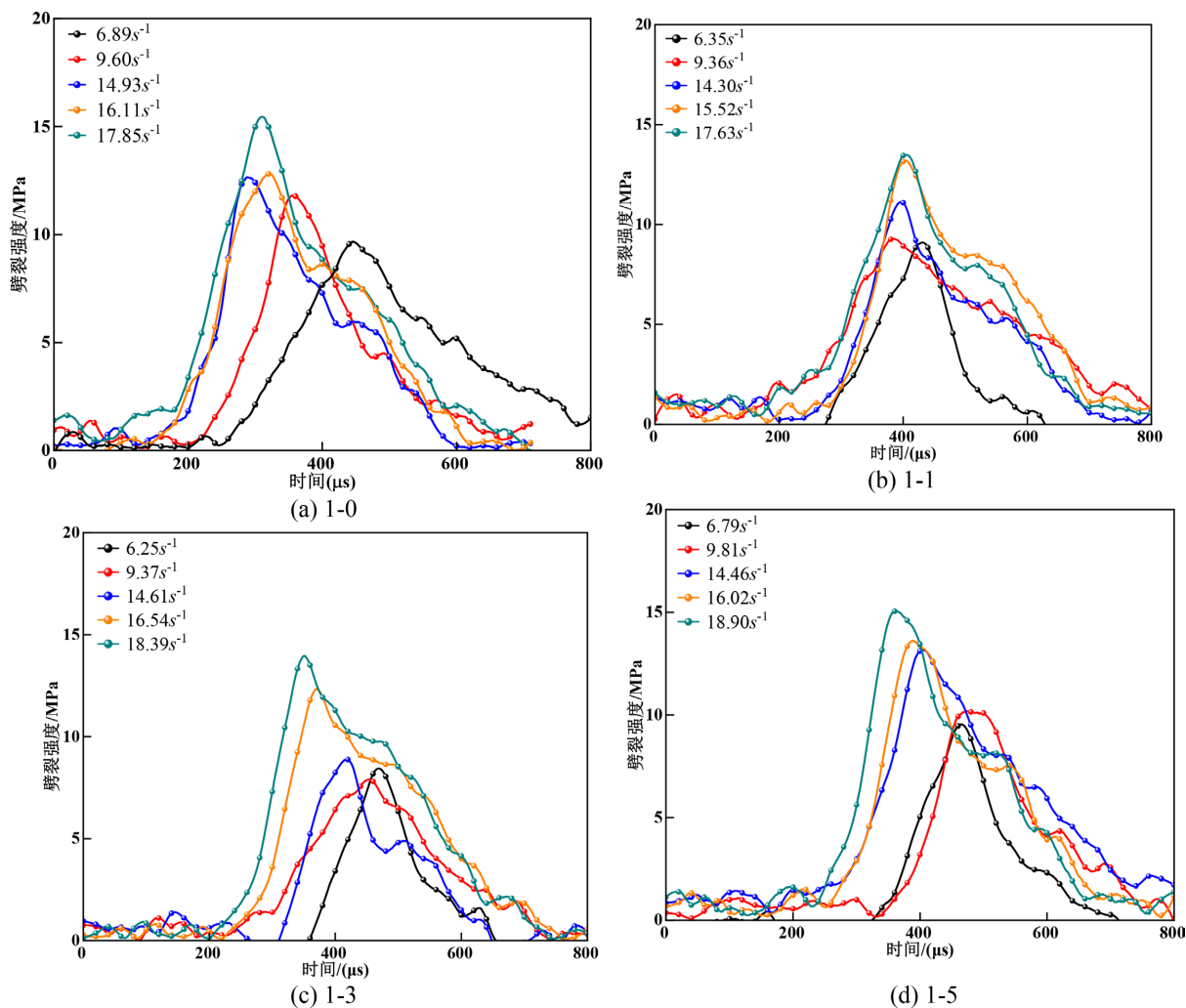


Figure 4. Stress-time curves of samples with different BF contents at different strain rates

图 4. 不同应变率下不同 BF 掺量试样的应力 - 时程曲线

3.4. SEM 测试的微观结构

1. 玄武岩纤维含量与裂缝发展变化

玄武岩纤维的加入能够很好的提高试块的整体强度，如图 7 所示。图中(a)显示，在纤维含量为 0% 时，呈现主裂缝主导 + 微裂缝伴随的特征。这是因为试件在受拉区域的应力集中会导致初始裂缝迅速扩展发展为裂缝，主裂缝消耗了大部分能量后，残余应力不足以维持次级裂缝的充分扩展，因此在主裂缝周围分布短且分散的微裂缝。由于缺乏纤维的增韧作用，主裂缝会发展迅速。当加入 0.1% 的纤维时，裂缝发展与纤维桥接作用如图 7(b)所示，当主裂缝发展过程中由于纤维横跨裂缝两侧，通过界面粘结力 [15] 和机械咬合力将裂缝的高应力分散开，但同时主应力的能量又不足以使纤维断裂，所以在经过纤维时主裂缝分散为两个裂缝。裂缝的发展在纤维处会发生改变如图 7(c)展示，纤维的存在改变了裂缝尖端原本的应力集中，迫使裂缝绕过纤维，寻找新的薄弱路径(骨料界面或水泥砂浆缺陷)，裂缝绕过纤维附近，表明纤维在水泥砂浆基体中表现出良好的局部桥接作用。随着纤维含量的增加，纤维含量靠近临界分散阈值，分散效果较为合理。如(d)、(e)所示，纤维破坏发生在根部并伴随裂缝扩展。此时由于单位面积的纤维数量增加，形成密集的桥接网络。桥接区的密度提升，破坏需同时克服多根纤维的约束，

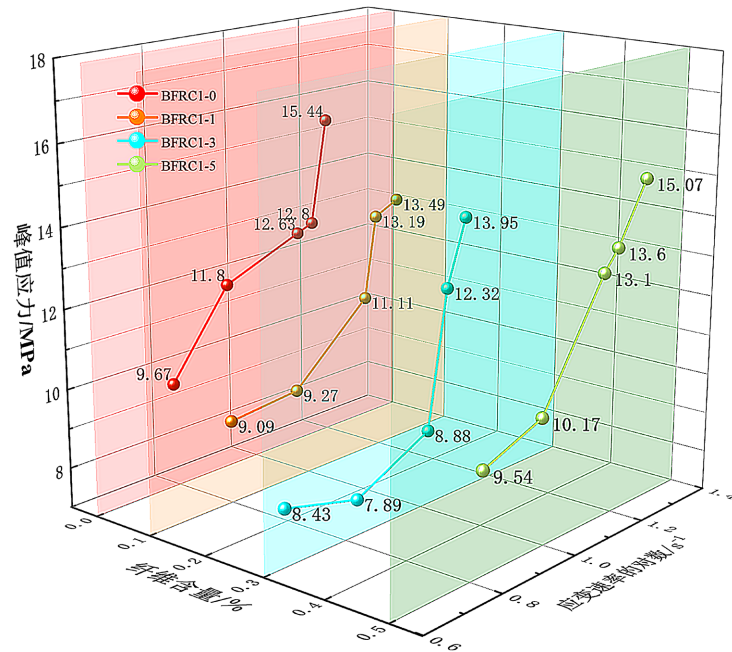


Figure 5. The relationship between peak stress and strain rate
图 5. 峰值应力与应变率的关系

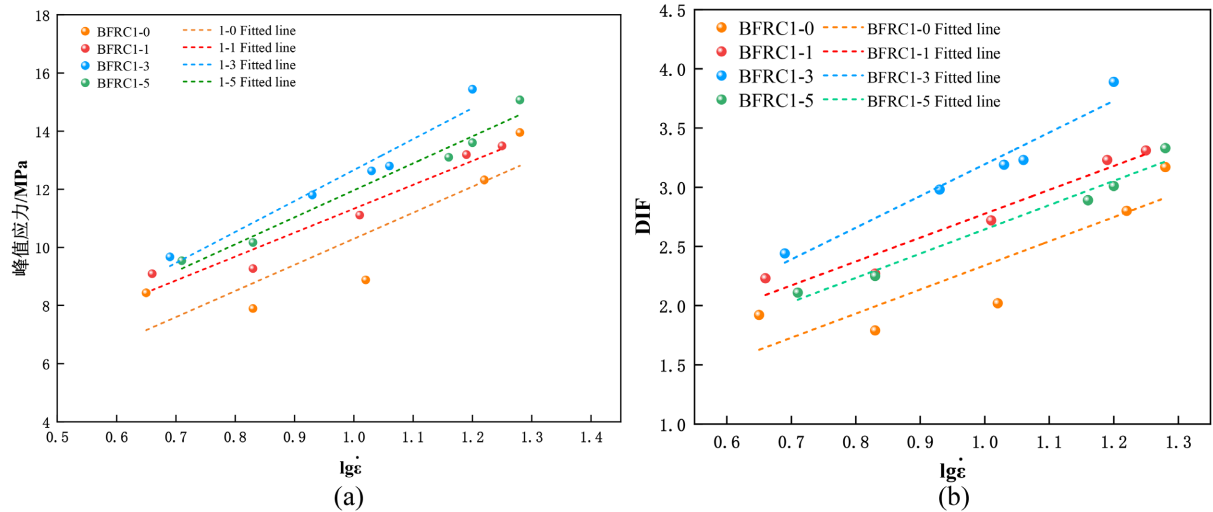


Figure 6. (a) Effect of strain rate on the peak stress of BFRCS; (b) Effect of strain rate on the DIF of BFRCS
图 6. (a) 应变速率对 BFRCS 的峰值应力的影响; (b) 应变速率对 BFRCS 的 DIF 的影响

Table 2. Linear fit results of the DIF function
表 2. DIF 函数的线性拟合结果

Specimen	BF content (%)	Function	R ²
1-0	0	$DIF = 0.51396 + 2.68029 \lg \dot{\epsilon}$	0.94957
1-1	0.1	$DIF = 0.75783 + 2.01839 \lg \dot{\epsilon}$	0.94469
1-3	0.3	$DIF = 0.30231 + 2.03796 \lg \dot{\epsilon}$	0.78706
1-5	0.5	$DIF = 0.59588 + 2.04838 \lg \dot{\epsilon}$	0.97502

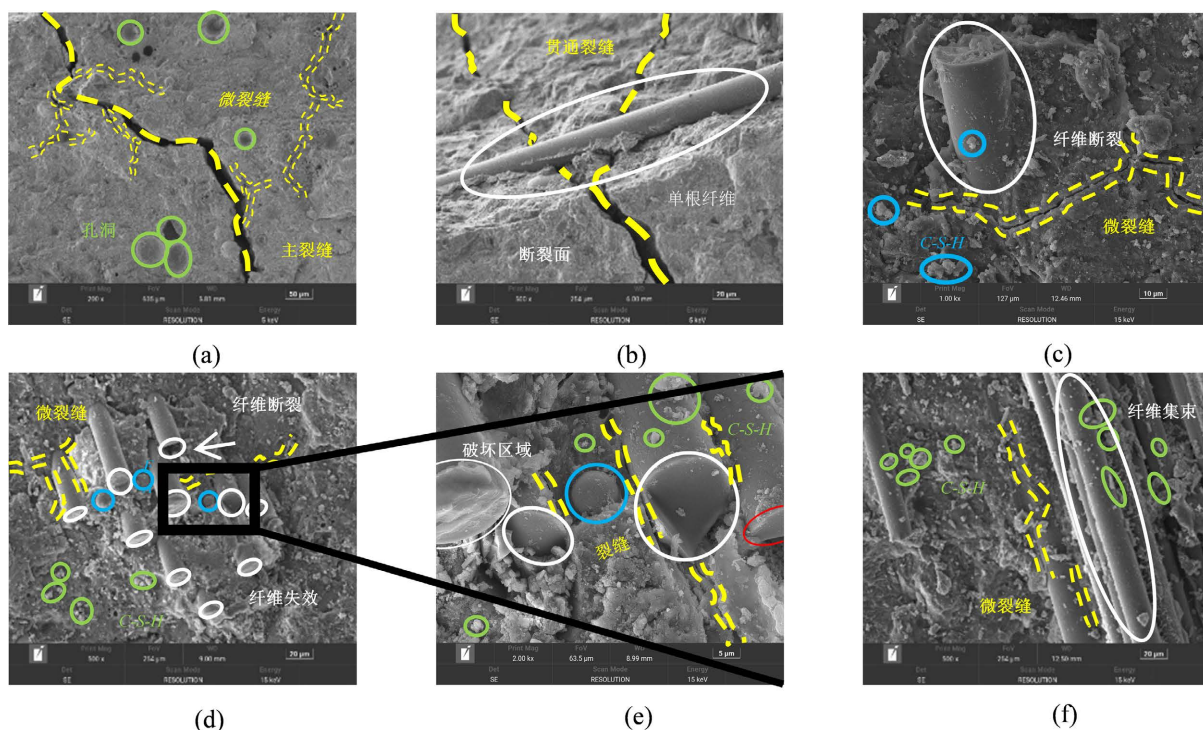


Figure 7. Different fiber content and crack development

图 7. 不同纤维掺量与裂缝发展

导致能量耗散集中在纤维根部。此时由于桥接效应，裂缝的传播从绕行到穿透。由于界面应力集中、桥接网络饱和及能量耗散集中化，其增韧机制从“裂缝绕行”转为“根部失效主导”。这一阶段标志着纤维增强混凝土从准脆性向韧性行为的跨越。当加入纤维含量达到 0.5% 时，图(f)中出现的纤维与水泥基体粘结[16]，纤维表面附水化产物(C-S-H)，纤维出现集束，集束内部纤维间距过小，导致水泥砂浆无法充分包裹每根纤维。集束边缘纤维因局部应力率先脱落，而内部纤维因应力屏蔽效应未被激活，破坏能量耗散局限于少数纤维。集束区域形成“类骨料”效应，由于集束区域存在孔隙，会成为优先开裂区域，但受限于集束区域尺寸，仅能发生微裂缝。

4. 结论

(1) 静态劈裂强度随纤维掺量 0%~0.5% 增加呈非线性提升，0.3% 为临界掺量：相较于基准组，0.3% BF 掺量使静态劈裂强度提升 11.1%，而 0.5% 时因纤维团聚导致增强效率下降，强度增长率降低 42%。动态劈裂性能存在显著应变率效应应变率在 $6.2 \sim 18.9 \text{ s}^{-1}$ 时，峰值应力最高提升 59.8%，动态增长因子 DIF 达到 3.89。0.3% BF 掺量下应变率敏感性最强(斜率 k 较基准组提高 19.8%)，其动态强度预测模型为： $\sigma_{td} = k \cdot \ln(\dot{\epsilon}) + b$ ($R^2 > 0.9$)。

(2) 在 BF 掺量为 0.1% 时，主裂缝绕行纤维扩展，体现“桥接 - 绕行”增韧机制；在掺量为 0.3% 时形成致密三维网络，裂缝穿透纤维根部，耗能密度达 0.22 J/cm^3 ；在高掺量 0.5% 时纤维团聚引发“类骨料效应”，集束区孔隙率增加，导致局部微裂缝优先萌生。

(3) 在相同的冲击压力下，与未添加玄武岩纤维的材料相比，添加玄武岩纤维的珊瑚海水混凝土材料的损伤较小，导致能量耗散更大。随着应变速率的增加，入射能量和吸收能也增加，表明具有良好的冲击韧性。

(4) 微观结构分析表明, 珊瑚骨料表面丰富的凹坑与孔洞为水化产物(钙矾石、C-S-H 凝胶)提供了附着位点, 纤维与基体间通过机械咬合和化学键合形成高效锚固。纤维在受载过程中主要呈现拔出与断裂两种失效形式, 前者发生于界面粘结较弱时, 后者则因局部应力超限, 二者共同决定了材料的能量耗散能力。随冲击能量提升, 入射能与吸收能同步增加, 证实 BFRSCC 具备良好的冲击韧性, 适用于岛礁防护工程抗冲击场景。

参考文献

- [1] Sun, X., Liu, J., Zhao, W., Wang, H. and Yang, Y. (2024) Mechanical Performance and Structural Application of a Novel Basalt-Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Seawater-Sea-Sand Concrete (UHPSSC) with Basalt Coarse Aggregate. *Structural Concrete*, **26**, 111-131. <https://doi.org/10.1002/suco.202300743>
- [2] Jamshaid, H. and Mishra, R. (2016) A Green Material from Rock: Basalt Fiber—A Review. *The Journal of the Textile Institute*, **107**, 923-937. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [3] High, C., Seliem, H.M., El-Safty, A. and Rizkalla, S.H. (2015) Use of Basalt Fibers for Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, **96**, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.138>
- [4] Niu, D., Su, L., Luo, Y., Huang, D. and Luo, D. (2020) Experimental Study on Mechanical Properties and Durability of Basalt Fiber Reinforced Coral Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **237**, Article ID: 117628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117628>
- [5] Katkhuda, H. and Shatarat, N. (2017) Improving the Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate Using Chopped Basalt Fibers and Acid Treatment. *Construction and Building Materials*, **140**, 328-335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.128>
- [6] Zhang, H., Liu, X., Ma, L. and Li, Z. (2024) Effects of Polypropylene Fibers and Aggregate Contents on the Impact Performance of Coral Aggregate Concrete. *Journal of Building Engineering*, **81**, Article ID: 108140. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108140>
- [7] Qin, Q., Meng, Q., Mei, Q., Wu, K., Wang, C. and Zhang, J. (2023) Dynamic Response Characteristics of Coral Reef Sand Concrete under Impact Loading. *Journal of Building Engineering*, **66**, Article ID: 105847. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105847>
- [8] Zhang, X. and Niu, D. (2024) Dynamic Compressive Behavior of Hybrid Basalt-Polypropylene Fibers Reinforced Coral Aggregate Concrete. *Journal of Building Engineering*, **95**, Article ID: 110291. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110291>
- [9] Zhang, H., Ji, S., Wang, L., Jin, C., Liu, X. and Li, X. (2022) Study on Dynamic Splitting Tensile Damage Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Concrete Based on AE and DSCM. *Journal of Building Engineering*, **57**, Article ID: 104905. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104905>
- [10] 袁康博, 杨建辉, 李泊立, 等. 基于 Hopkinson 杆的恒幅冲击疲劳试验方法研究[J]. 固体力学学报, 2024, 45(1): 1-15.
- [11] 张汉桥, 张遵国, 韩国庆, 等. 干燥及饱水粉砂岩劈裂过程阶段性力学响应[J]. 矿业研究与开发, 2026, 46(5): 185-191.
- [12] 张晓宇, 穆朝民, 秦玉琳, 等. 混杂纤维增强海水珊瑚水泥基复合材料动态拉伸性能研究[J]. 功能材料, 2026, 57(1): 188-200.
- [13] 王义超, 吴平飞, 余江滔, 等. 不同应变率下超高延性混凝土的动态拉伸性能[J]. 西南交通大学学报, 2026, 61(1): 74-84.
- [14] 仵鹏涛, 刘中宪, 吴成清, 等. 纳米材料对超高性能混凝土动态力学特性的影响实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3546-3555.
- [15] 倪敬尧, 邓年春, 彭修宁, 等. 内焊钢筋-钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 中国科技论文, 2024, 19(7): 769-776.
- [16] 楚金业. 环氧砂浆-基体混凝土界面粘结性能及耐久性能研究[J]. 砖瓦, 2025(7): 41-43+47.