

玄武岩纤维泡沫混凝土细观结构及损伤特性

周程涛 陈波 张娟 李松

Microstructure and damage characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete

ZHOU Chengtao, CHEN Bo, ZHANG Juan, LI Song

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231109.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响

Effects of different damage sources on pore structure change characteristics of basalt fiber reinforced concrete

复合材料学报. 2020, 37(9): 2285–2293 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200219.001>

碳纤维增强环氧树脂复合材料螺栓连接结构在拉伸载荷下损伤过程的声发射分析

Acoustic emission analysis of carbon fiber reinforced polymer bolted joints damage process under tensile load

复合材料学报. 2019, 36(8): 1854–1863 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181009.001>

预应力活性粉末混凝土受弯过程声发射特性

Acoustic emission behavior of prestressed reactive powder concrete under flexural loads

复合材料学报. 2018, 35(10): 2860–2870 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180124.001>

玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1926–1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>

冻融循环作用下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土压拉强度试验与细观结构

Compression-tensile tests and meso-structure of basalt fiber-slag powder-fly ash concrete under freeze-thaw cycles

复合材料学报. 2021, 38(3): 953–965 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.002>

含紧固件碳纤维增强树脂复合材料在雷电流A分量下的损伤特性

Damage characteristics of carbon fiber reinforced polymer composites with fastener subjected to lightning A current

复合材料学报. 2020, 37(2): 356–365 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190515.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

玄武岩纤维泡沫混凝土细观结构及损伤特性



分享本文

周程涛^{1,2}, 陈波^{*1,2}, 张娟³, 李松^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098;

3. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

摘要: 为了研究玄武岩纤维增强泡沫混凝土的细观结构特征和不同纤维掺量对其损伤特性的影响, 本文对密度等级 1 000 kg/cm³ 的玄武岩纤维增强泡沫混凝土开展了 X-CT 试验及单轴压缩-声发射联合试验, 基于 Avizo 图像处理及声发射 b_1 值 (改进版 b 值) 等参数分析了纤维及孔隙的细观结构特征及材料损伤演化特性。结果表明: 掺入玄武岩纤维可有效改善泡沫混凝土力学性能, 掺入 0.5vol%、1.5vol%、2.5vol% 纤维后试件平均抗压强度分别提升了 1.37 MPa、4.58 MPa、2.77 MPa; 2.5vol% 掺量的试件中纤维分形维数主要在 1.0~1.3, 纤维团聚明显, 纤维角度集中, 试件性能较 1.5vol% 掺量有所降低; 掺入玄武岩纤维后试件声发射 b_1 值趋势更平缓, 玄武岩纤维可有效抑制裂纹发育。

关键词: 玄武岩纤维泡沫混凝土; 细观结构; 声发射; 损伤特性; 单轴压缩; b_1 值

中图分类号: TU528.2; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)08-4236-10

Microstructure and damage characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete

ZHOU Chengtao^{1,2}, CHEN Bo^{*1,2}, ZHANG Juan³, LI Song^{1,2}

(1. College of Water-conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources CO., LTD., Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to study the microstructure characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete and the influence of different fiber content on its damage characteristics, this paper carried out X-CT test and uniaxial compression acoustic emission joint test on basalt fiber reinforced foam concrete with density grade of 1 000 kg/cm³. Based on Avizo image processing and acoustic emission basic parameters and b_1 values (Improved b value), the microstructure characteristics of fibers and pores and the damage evolution characteristics of materials were analyzed. The results show that the addition of basalt fiber can effectively improve the mechanical properties of foam concrete. The average compressive strength of the specimens with 0.5vol%, 1.5vol% and 2.5vol% fibers increase by 1.37 MPa, 4.58 MPa and 2.77 MPa, respectively. The fiber fractal dimension of the specimen with 2.5vol% content is mainly in the range of 1.0-1.3, the fiber agglomeration is obvious, the fiber angle is concentrated, and the performance of the specimen is reduced. After adding basalt fiber, the trend of acoustic emission b_1 value of the specimen is gentler, and basalt fiber can effectively inhibit crack development.

Keywords: basalt fiber reinforced foam concrete; microstructure; acoustic emission; damage characteristics; uniaxial compression; b_1 value

泡沫混凝土是将发泡剂水溶液制成的泡沫加入含钙质、硅质材料、水及外加剂组成的拌合物

中混合浇筑后养护而成的轻质多孔材料, 具有轻质、保温、隔热、防火、吸能等良好的性能, 被

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-10-20; 录用日期: 2023-11-02; 网络首发时间: 2023-11-10 15:34:19

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231109.001>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52079049); 国家重点实验室基本科研业务费 (522012272; 5230248 A2)

General Program of National Natural Science Foundation of China (52079049); Basic Scientific Research Business Expenses of National Key Laboratories (522012272; 5230248 A2)

通信作者: 陈波, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水工混凝土新材料 E-mail: chenbo@hhu.edu.cn

引用格式: 周程涛, 陈波, 张娟, 等. 玄武岩纤维泡沫混凝土细观结构及损伤特性[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4236-4245.

ZHOU Chengtao, CHEN Bo, ZHANG Juan, et al. Microstructure and damage characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4236-4245(in Chinese).

广泛应用于房屋建筑、铁路路基地建设^[1-2]。但是，多孔结构同时降低了其强度和耐久性^[3]，限制了使用范围，因此泡沫混凝土增强受到了广泛关注。

在拌合物中掺入纤维被证明能有效提升泡沫混凝土的强度^[4]。研究表明，相比天然纤维、钢纤维或是聚合物基纤维，玄武岩纤维具有耐腐蚀性、耐温性、耐磨性及优异的吸能性能^[5]，玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BFRFC) 具有显著优势。针对 BFRFC，许多学者开展了其宏观力学性能及抗收缩开裂能力的研究，例如，王小娟等^[6]研究了不同纤维体积掺量和纤维长度的 BFRFC 的拉伸性能和压缩吸能性能；程新等^[7]则研究了玄武岩纤维体积掺量对泡沫混凝土收缩开裂的影响；范然森等^[8]研究了 BFRFC 的抗裂性能并建立相关评价指标。Yavuz Bayraktar 等^[9]利用工业废料和玄武岩纤维制成泡沫混凝土复合材料，研究了其孔隙率、吸水率、导热性能和干缩性能等。但是，现有研究在评价和分析玄武岩纤维宏观性能的同时较少涉及其细观结构和损伤特性，而泡沫混凝土的细观结构对其热、力学性能影响显著^[10-11]。运用 X-CT 技术感知材料细观结构已较成熟，例如，焦华喆等^[12]借助 CT 扫描技术对玄武岩纤维喷射混凝土微观结构进行可视化分析，测定了玄武岩纤维不同掺量下的孔隙大小组分结构、纤维分布；分析了纤维掺量与孔隙结构的响应关系，揭示了纤维增强微细观机制。声发射 (AE) 技术可用于描述材料损伤演化过程，在混凝土领域已得到较广泛的应用^[13]，但基于 AE 技术的玄武岩纤维泡沫混凝土损伤演化过程的研究仍鲜有报道。

因此，本文通过 X-CT 试验扫描得到 4 种不同纤维掺量的泡沫混凝土纤维空间分布特征、孔结构特征，并开展了单轴压缩和声发射联合试验，研究了玄武岩纤维增强泡沫混凝土细观结构和纤维掺量对泡沫混凝土破坏过程及损伤特性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试样制备参照 JG/T266—2011《泡沫混凝土》^[14]，试验采用标准立方体试样，尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm，试件现场浇筑，24 h 后脱模，标准养护 28 天。水泥采用 P·O 42.5 级水泥，水为自来水，发泡剂采用华泰新材市售的 HT 复合发泡剂，泡沫混凝土密度等级为 1 000 kg/m³，纤维掺量以文献^[6-8]为参考并作了一定延展，分别为 0vol%、0.5vol%、1.5vol%、2.5vol%，纤维长度为 9 mm，如图 1 所示；每组掺量浇筑 3 块，共计 12 块试件；每组另外浇筑 1 块 50 mm×50 mm×50 mm 立方体试件用于 X-CT 试验。试件编号如 0.5%BF/FC-1，其中 0.5%BF/FC 代表玄武岩纤维的体积掺量，1 代表试件编号，试件配合比见表 1。



图 1 玄武岩纤维

Fig. 1 Basalt fiber

表 1 玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BFRFC) 的配合比

Table 1 Mix proportion of basalt fiber reinforced foam concrete (BFRFC)

Sample	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				Wet density/(kg·m ⁻³)	Dry density/(kg·m ⁻³)
	Cement	Water	Foam	Basalt fiber		
0%BF/FC-1	743.05	371.53	21.38	0	1 170	1 033
0%BF/FC-2	743.05	371.53	21.38	0	1 200	1 046
0%BF/FC-3	743.05	371.53	21.38	0	1 180	1 041
0.5%BF/FC-1	743.05	371.53	21.38	4.2	1 206	1 052
0.5%BF/FC-2	743.05	371.53	21.38	4.2	1 200	1 050
0.5%BF/FC-3	743.05	371.53	21.38	4.2	1 199	1 048
1.5%BF/FC-1	743.05	371.53	21.38	8.4	1 169	1 032
1.5%BF/FC-2	743.05	371.53	21.38	8.4	1 170	1 035
1.5%BF/FC-3	743.05	371.53	21.38	8.4	1 172	1 036
2.5%BF/FC-1	743.05	371.53	21.38	12.6	1 181	1 045
2.5%BF/FC-2	743.05	371.53	21.38	12.6	1 203	1 047
2.5%BF/FC-3	743.05	371.53	21.38	12.6	1 208	1 050

Notes: The specimen number as 0.5%BF/FC-1, where 0.5%BF/FC represents the volume ratio of basalt fiber, and 1 represents the specimen number; BF—Basalt fiber; FC—Foam concrete.

1.2 试验方法

采用德国 Y.CT Precision S 微焦点 X 射线 CT 系统对 4 种不同掺量的 BFRFC 开展 X-CT 试验, 得到试样 2D 切片, 扫描的图像空间分辨率 $35.9\ \mu\text{m}/\text{体素}$ 。图像后处理借助 Avizo 软件去噪、切分、滤波、阈值划分后三维重构得到 BFRFC 三维细观模型如图 2 所示, 其中滤波采用中值滤波。

对试样开展单轴压缩-声发射联合试验, 单轴压缩试验参照 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》^[14] 进行, 试验装置采用美特斯工业系统生产的 SANS

型电液伺服万能试验机。试验前, 试件放置在温度为 $(60\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 干燥箱内烘干至前后两次相隔 4 h 质量差不大于 1 g 时的恒质量, 根据规范设置加载速率 $2.5\ \text{kN/s}$, 当位移达到 6 mm 时停止试验, 过程中记录位移和荷载值。声发射试验参照 GB/T 26644—2011《无损检测声发射检测总则》^[15], 试验前根据现场噪声情况调整前置放大器增益为 40 dB, 阈值值设置为 40 dB, 滤波频率 1~60 kHz, 声发射试验在待测试样的 4 个侧面各布置一个声发射传感器, 为降低误差, 以凡士林为耦合剂。

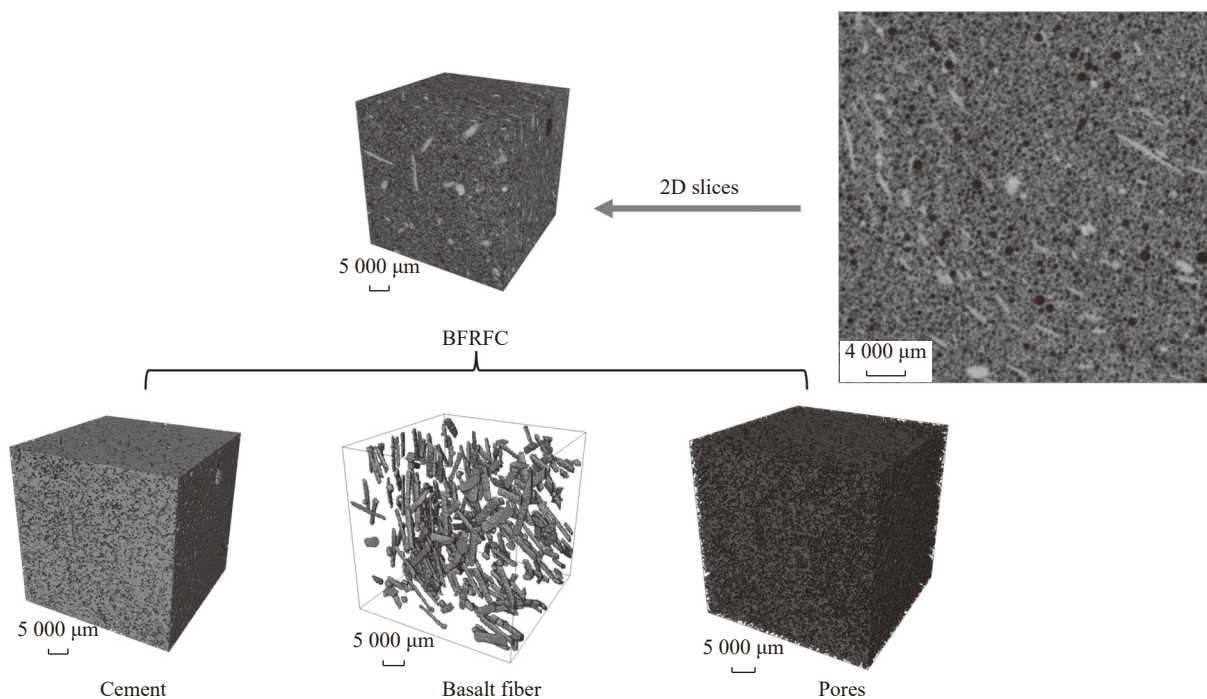


图 2 BFRFC 的 X-CT 图像分析示意图

Fig. 2 X-CT image analysis diagram of BFRFC

2 分析与讨论

2.1 纤维几何特征和空间分布

图 3 为经过三维图像处理后的玄武岩纤维分布图, 借助 Avizo 中 Volume Fraction 功能计算得到实际纤维体积占比分别为 $0.88\text{vol}\%$ 、 $1.28\text{vol}\%$ 、 $2.53\text{vol}\%$, 与设计值偏差分别为 $0.38\text{vol}\%$ 、 $0.22\text{vol}\%$ 、 $0.03\text{vol}\%$, 其中 $0.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 的偏差最大。由图 3 可见, $0.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 和 $2.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 中出现了较典型的纤维粘结和纤维团聚现象, 其中 $0.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 的纤维粘结是由于纤维在拌合浇筑时少数纤维粘合成团而形成的, 在 CT 图像上呈现块状, 该现象的出现具有一定的偶然性, 导致试件中纤维体积

占比高于设计值; 而 $2.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 的团聚是由于高纤维掺量导致的, 其特点是在部分空间区域上众多纤维的聚集, 在 CT 图像上呈现条带状。

玄武岩纤维在泡沫混凝土中分布的均匀性对材料性能的稳定性有较大影响^[6]。为了分析 BFRFC 中纤维分布的均匀性, 沿着 XYZ 这 3 个方向对 X-CT 二维切片的纤维平面占比和分形维数进行统计分析, 结果如图 4 所示。可见, $0.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 和 $1.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 在各方向上的纤维占比相对较均匀, 其中 $0.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 主要在 $0\%\sim 1.2\%$ 之间波动, 最大值接近 2.5% , 最小值接近 0% ; $1.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 则主要在 $1\%\sim 2\%$ 之间波动, 整体更均匀; $2.5\%\text{BF}/\text{FC}$ 纤

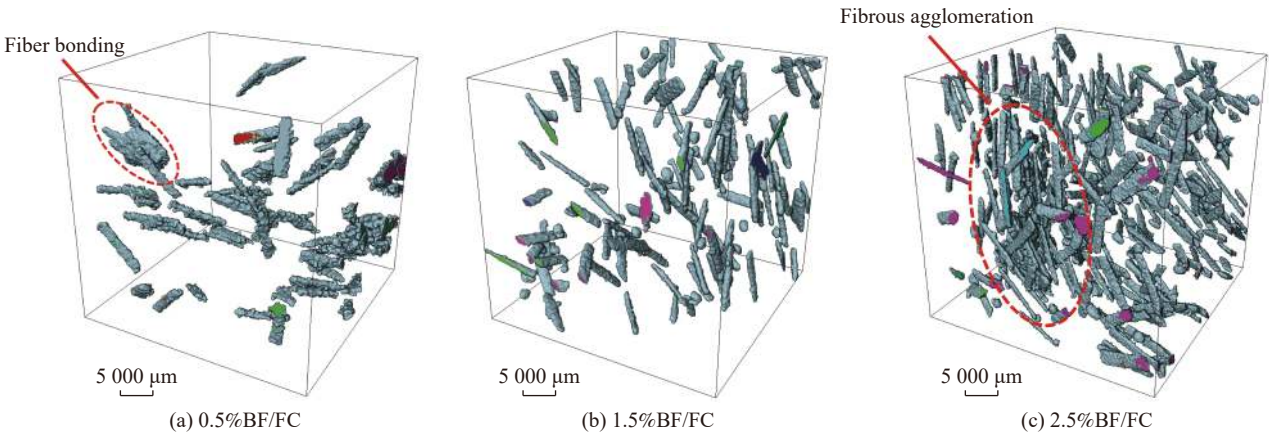


图3 泡沫混凝土中玄武岩纤维三维分布图

Fig. 3 Three-dimensional distribution of basalt fiber in foam concrete

维三向平面占比波动幅度较大，最直接的原因是高纤维掺量的BFRFC中易出现纤维团聚，表现为切片上的不均匀，这种不均匀性会导致试件中产生薄弱区，影响试件性能。

分形维数为定量描述几何复杂性提供了参考^[16]，一般认为，分形维数表征了分形体的复杂程度，玄武岩纤维空间三向切面分形维数如图4所示。

可见，0.5%BF/FC和1.5%BF/FC的分形维数主要在0.85~1.15，而2.5%BF/FC的分形维数则主要在1.0~1.3，这说明2.5%BF/FC的纤维结构更复杂，这与其易团聚的特征相符。BFRFC中玄武岩纤维空间角度是否均匀对材料力学特性同样有一定影响，一般认为，纤维的各向角度越均匀，其受到多向荷载作用时，纤维所能发挥的作用也越大。

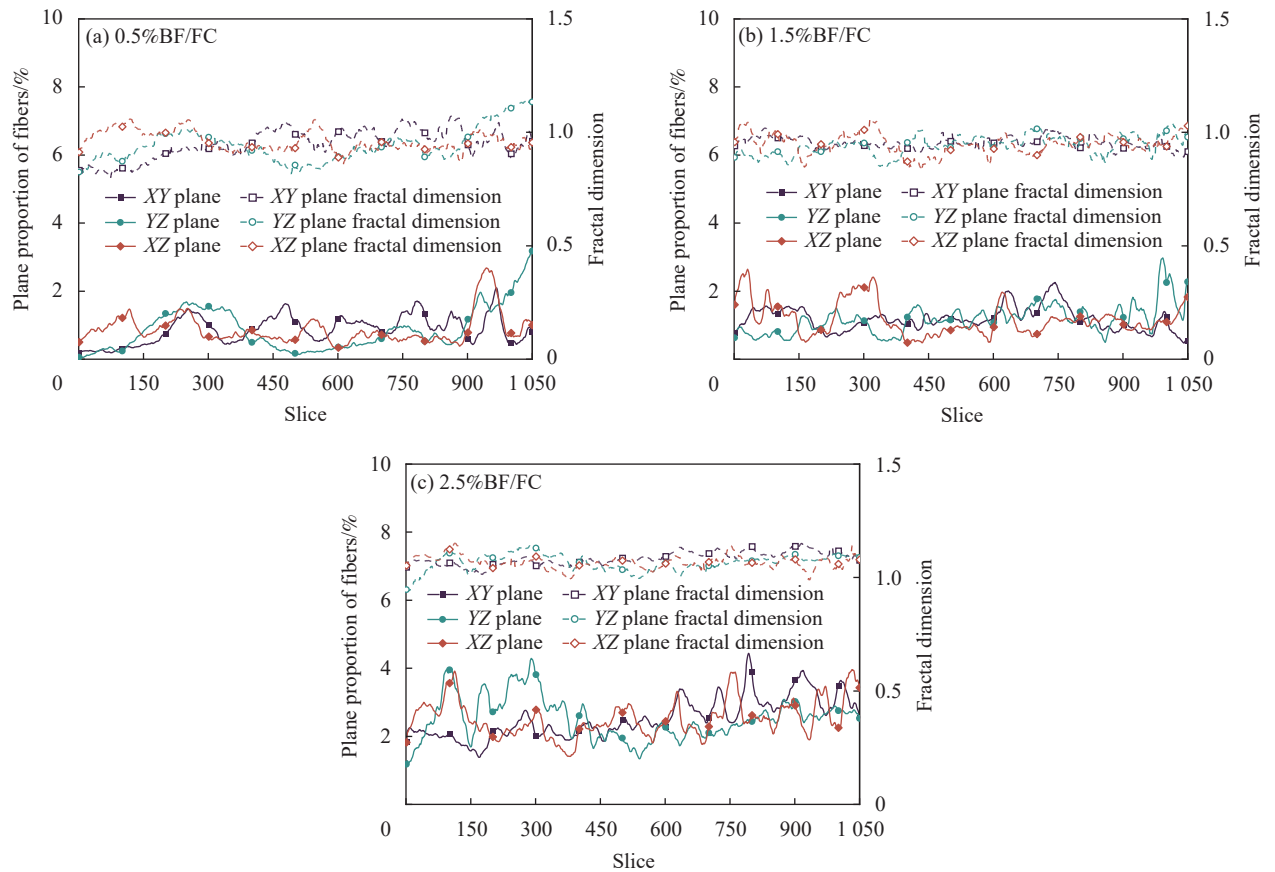


图4 玄武岩纤维三向均匀性分析图

Fig. 4 Three-dimensional uniformity analysis diagram of basalt fiber

为了定量描述纤维空间角度，以方向角和极角来表征纤维方向，其中方向角指XY平面上起始于X轴，沿逆时针方向的角度，以 θ 表示；极角指Z轴与r的夹角，用 φ 表示，见图5。

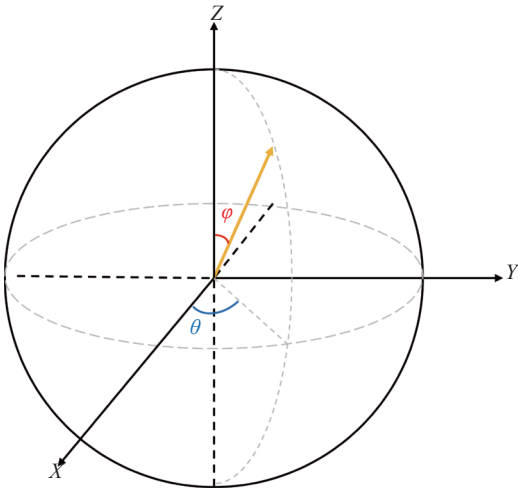


图5 空间方位角 θ 和极角 φ 示意图
Fig. 5 Spatial azimuth θ and polar angle φ diagram

图6是BFRFC中玄武岩纤维空间角度分布情况。可知，2.5%BF/FC在 φ 角和 θ 角上的集中性均较强，其中 φ 主要集中在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 方向上，占比约为60%， θ 主要集中在 $-150^\circ\sim -180^\circ$ 方向上，占比约为40%。而0.5%BF/FC和1.5%BF/FC的均匀性则更好，其中，1.5%BF/FC的均匀性最佳。该结论与纤维平面占比分析和分形维数分析结果基本一致。

2.2 BFRFC 孔隙形态

孔隙率和球形度是评价泡沫混凝土孔隙的重

要指标^[2]，经X-CT试验测得的0%BF/FC、0.5%BF/FC、1.5%BF/FC和2.5%BF/FC的孔隙率分别为33.42%、34.80%、33.24%和33.88%，标准差0.6。球形度则是评价孔隙与球体接近程度的指标，其具体含义是与孔隙相同体积的球体表面积与该孔隙表面积之比，计算方法见下式：

$$\psi = \frac{4\pi(3V_p/4\pi)^{2/3}}{S_p} \tag{1}$$

式中： V_p 为孔隙体积； S_p 为孔隙表面积。

图7是试件中孔隙球形度分布图。可见，0%BF/FC、0.5%BF/FC、1.5%BF/FC和2.5%BF/FC的球形度都集中在0.9~1.0之间，占比分别为72.54%、70.82%、70.04%和69.47%，泡沫混凝土在掺入0.5vol%、1.5vol%、2.5vol%的玄武岩纤维后，球形度为0.9~1.0的孔隙占比分别下降了1.72%、2.50%和3.07%，上述结果表明，在泡沫混凝土中掺入玄武岩纤维会对其孔隙形状产生一定的影响，但并不显著，可能的原因是掺入纤维导致泡沫在搅拌过程中破裂、合并，试件中部分纤维穿过孔隙而影响了孔结构特征^[17]。总体而言，2.5vol%及以下掺量的玄武岩纤维对泡沫混凝土孔结构的破坏程度较低。

2.3 BFRFC 单轴压缩特性

研究表明，泡沫混凝土单轴压缩应力-应变曲线具有明显的阶段特征^[18-19]，图8是BFRFC单轴压缩应力-应变曲线图，以2.5%BF/FC-1曲线为例，OA段为初步密实阶段，AB段为密实阶段，BC段

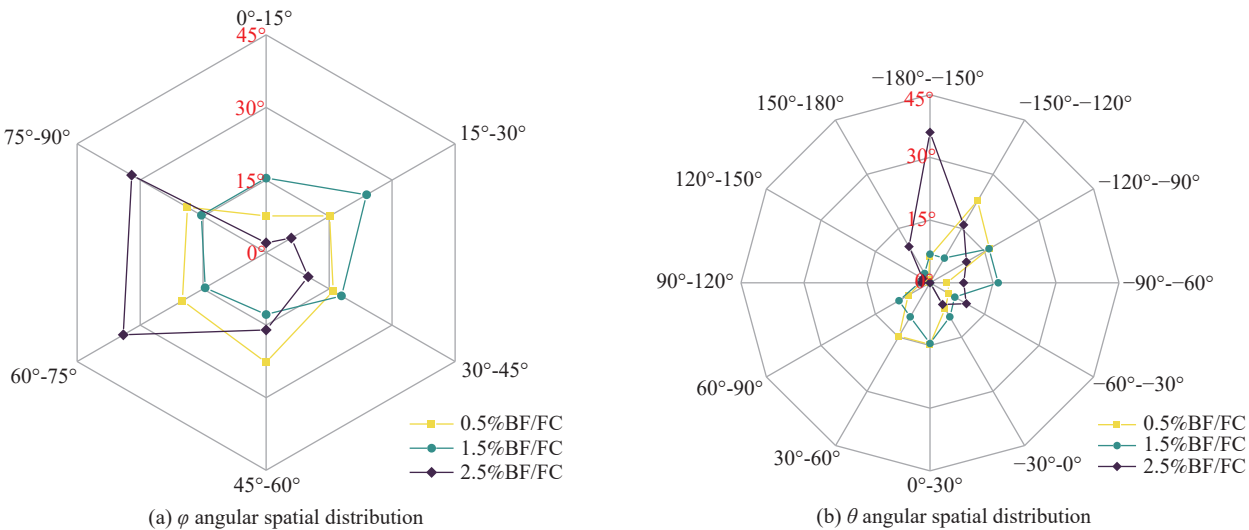


图6 纤维角度空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of fiber angle

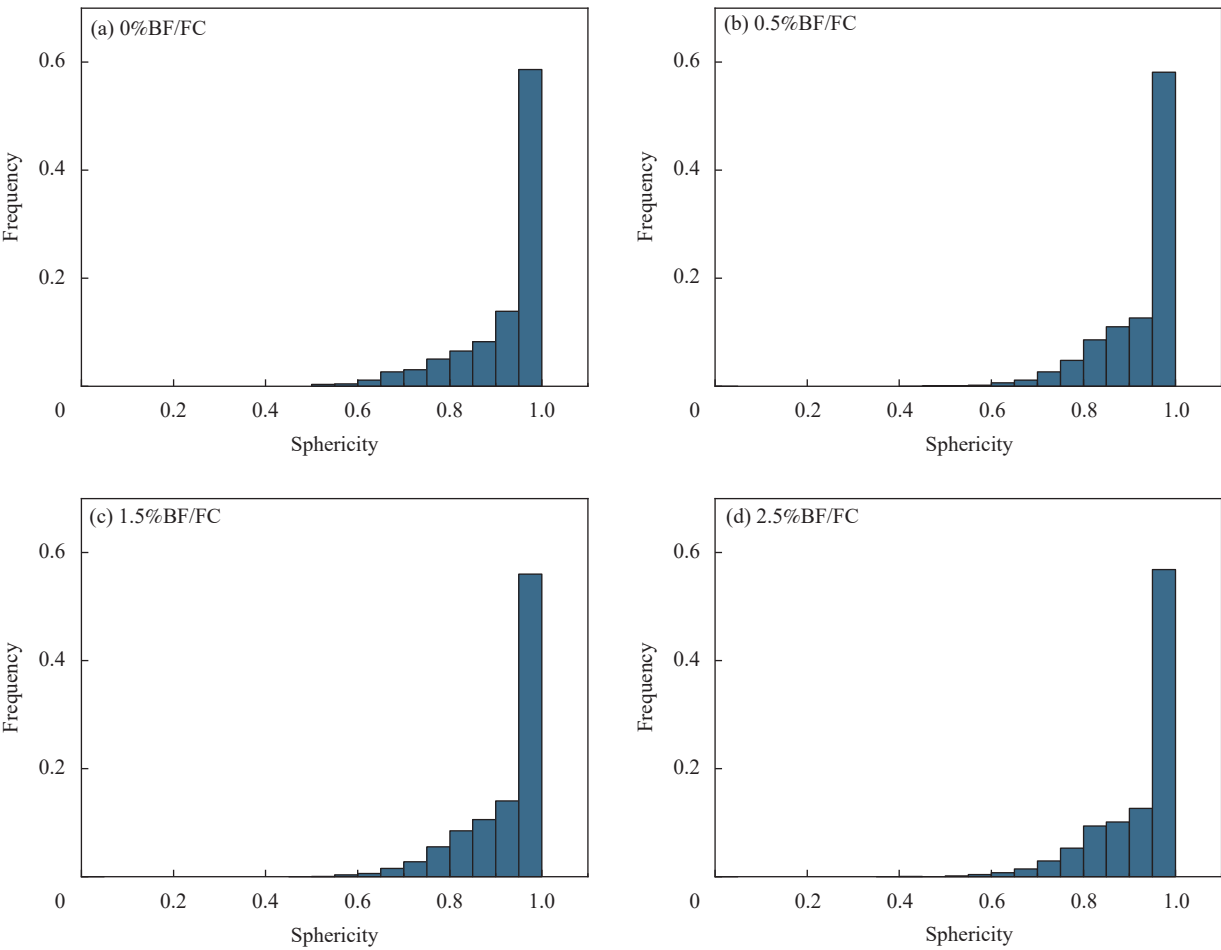


图7 BFRFC的孔隙球形度

Fig. 7 Pore sphericity of BFRFC

为屈服阶段，CD段为平台阶段。由图可知，0%BF/FC 应力-应变曲线呈现出典型的低强度泡沫混凝土缓慢破坏的特征^[19]，其初步密实阶段和密实阶段的界限不明显，屈服破坏更多呈现振荡屈服；0.5%BF/FC 在泡沫混凝土中掺入了0.5vol%的玄武岩纤维，由图 8(b) 可见，其屈服方式既有振荡屈服也有点屈服，这与纤维掺量较少有一定的关系；1.5%BF/FC 和 2.5%BF/FC 的屈服过程则是明显的点屈服，表现为材料达到峰值荷载之后承载能力的陡降，这是由于掺入纤维后，纤维一定程度上抑制了材料断裂和破坏进程，当荷载达到纤维所能承受的临界强度时，试件发生点屈服。

试验结果表明，0%BF/FC、0.5%BF/FC、1.5%BF/FC 和 2.5%BF/FC 的平均抗压强度分别为 6.81 MPa、8.18 MPa、11.39 MPa、9.58 MPa，相较于未掺纤维的情况，掺入0.5vol%、1.5vol%、2.5vol% 玄武岩纤维后试件平均抗压强度分别提升了 1.37 MPa、4.58 MPa、2.77 MPa，其中 1.5%BF/FC

的强度提升最大，与 1.5%BF/FC 相比，2.5%BF/FC 的抗压强度反而下降了 1.81 MPa。该结果与 X-CT 细观结构分析结论一致，即 2.5%BF/FC 中的纤维易团聚，空间分布和纤维角度不均，分形维数较大，几何结构复杂，导致其内部受力不均，纤维难以发挥应有的作用，表现在宏观力学性能上即为抗压强度的下降。

2.4 BFRFC 声发射振幅及累计振铃曲线

图 9 是 BFRFC 声发射信号参数图，对声发射幅值、累计振铃数和应力曲线进行综合分析可知，泡沫混凝土声发射幅值随时间具有明显的阶段特征，在初步密实和密实阶段，声发射信号较稀疏，幅值普遍较小；当试件初次屈服时，声发射信号强度陡增，幅值一般增大至 60 dB 左右，说明材料内部出现了较明显的断裂和损伤；而在试件达到平台阶段之后，声发射信号再次降低，进入平缓期。由图可见，与 0%BF/FC、0.5%BF/FC 相比，1.5%BF/FC 和 2.5%BF/FC 的初密和密实阶段声发

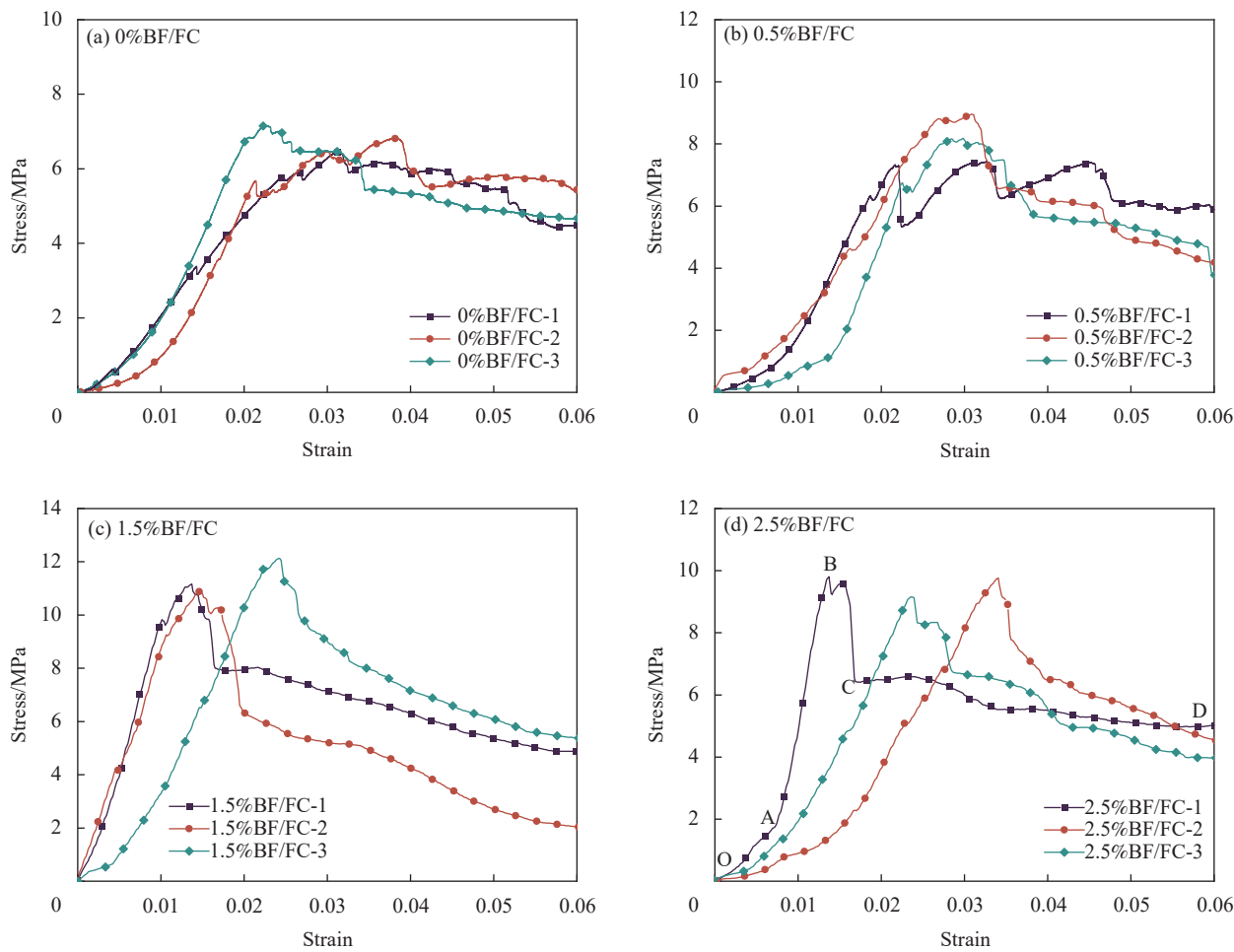


图8 BFRFC 的单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 8 Uniaxial compression stress-strain curves of BFRFC

射信号显著减少，这是由于纤维在一定程度上抑制了内部损伤的发育，直至外部荷载超过纤维所能承受的临界强度，随后材料发生点屈服。

从累计振铃曲线看，累计振铃曲线同样具有较明显的阶段特征，在初步密实和密实阶段，声发射事件数较少，累计振铃曲线缓慢增长，在试件发生屈服后，累计振铃曲线陡增，在试件进入平台阶段后再次进入缓慢增长的状态。掺入玄武岩纤维后，累计振铃曲线的峰值随着纤维掺量增加先降低后微增，累计振铃曲线在屈服阶段的陡增量减小，说明玄武岩纤维的存在减少了试件内部声发射事件的数量，减小了材料内部损伤和开裂，表现在宏观领域即为材料耐久性和强度的提升，该结论与上述 X-CT 分析和单轴压缩应力-应变曲线特征分析一致。此外，声发射累计振铃曲线及幅值等损伤信号在时间轴上同单轴压缩应力-应变曲线相吻合，图 9(d) 说明借助声发射来研究

BFRFC 的损伤演化过程是合理且可靠的。

2.5 BFRFC 声发射 b_i 值

声发射 b 值最早由 Gutenberg 和 Richter 提出^[20]，其物理意义为岩石、混凝土破裂过程中声发射小事件数与大事件数的比值，可以反映岩石、混凝土的破裂过程。但是，声发射 b 值只考虑了声发射信号中的峰值幅度，忽略了小信号产生的能量，对结构裂纹发育的分析不够全面。因此，近年来将声发射 b 值进行改进得到 b_i 值 (Improved b value) 并应用于混凝土开裂的研究已较成熟^[21-22]。 b_i 值计算公式如下：

$$b_i = \frac{\lg N(\mu - \alpha_1 \sigma) - \lg N(\mu + \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 + \alpha_2) \sigma} \tag{2}$$

式中： N 是一组用于计算 b_i 值的 AE 信号段， N 取 100，利于分析数值较小的 AE 事件； μ 和 σ 是每组中声发射幅值信号的平均值和标准差； $N(\mu - \alpha_1 \sigma)$ 是 AE 振幅大于 $(\mu - \alpha_1 \sigma)$ 的信号数量， $N(\mu + \alpha_2 \sigma)$

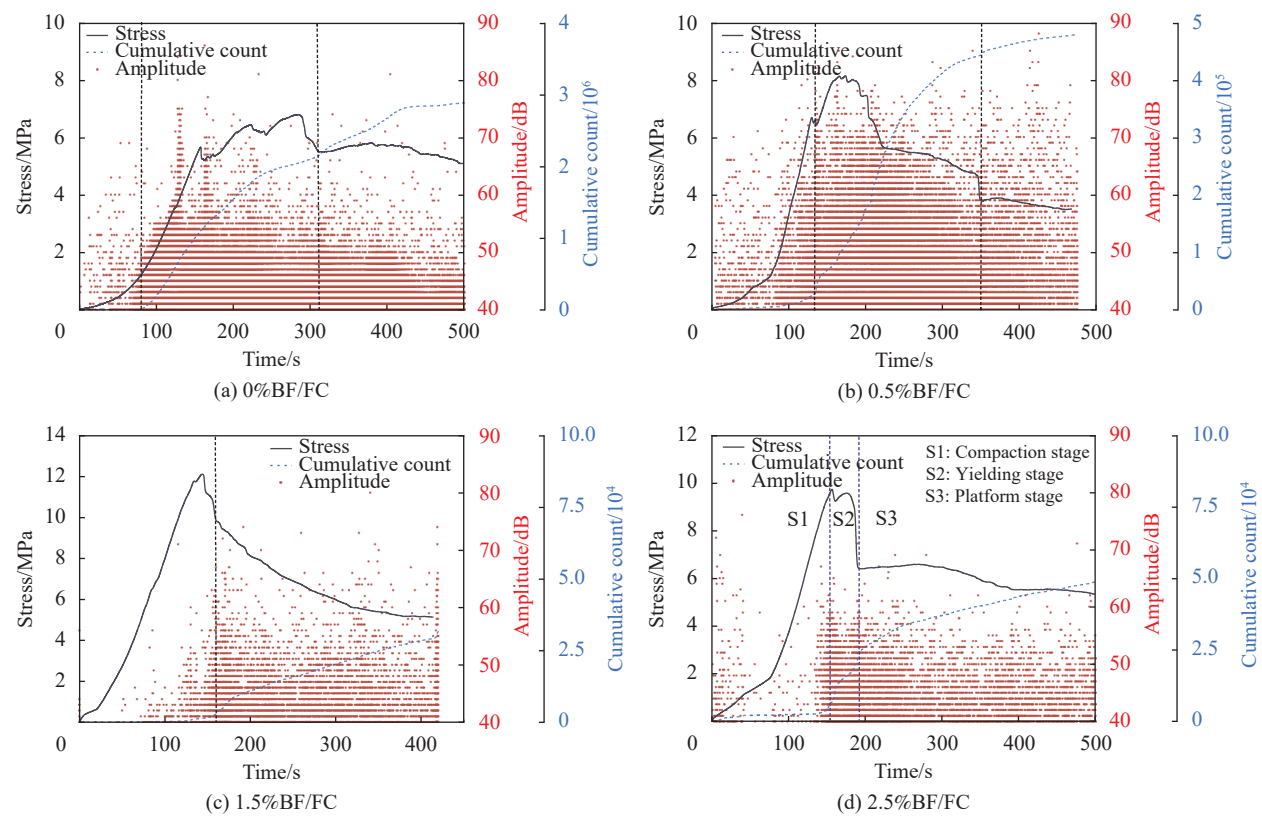


图9 BFRFC 的声发射信号参数
Fig. 9 Acoustic emission signal parameters of BFRFC

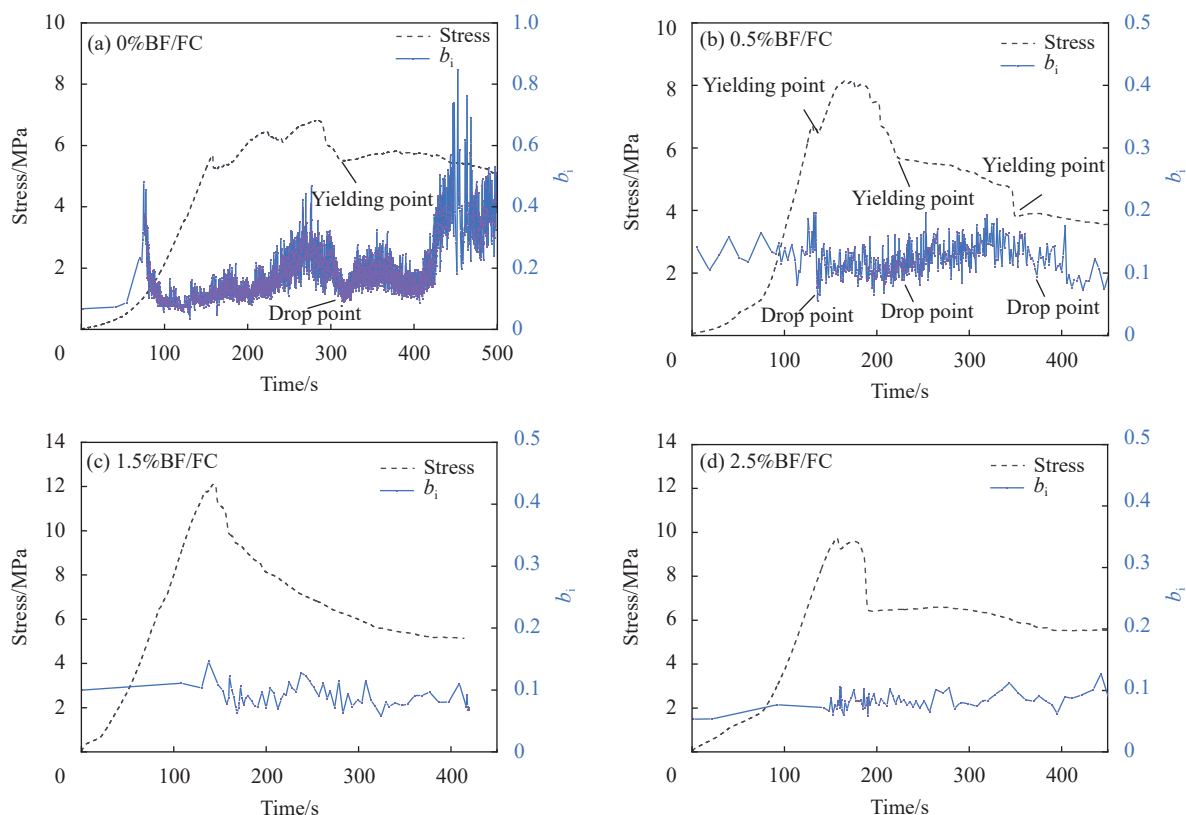
是振幅大于 $(\mu + \alpha_2\sigma)$ 的信号数量； α_1 和 α_2 是经验常数， α_1 是与声发射信号中较小振幅相关的系数， α_2 是与裂纹水平相关的系数。

研究表明^[23]， b_1 值主要表征某一 AE 信号段上小破裂事件和大破裂事件的相对数量， b_1 值增加时，材料内部破坏以微裂纹为主； b_1 值减小时，材料内部破坏以大尺度破坏为主。图 10 是 BFRFC 声发射 b_1 值随时间的变化图。可知，0%BF/FC 的 b_1 值主要在 0.1~0.6 之间，且波动幅度较大，0.5%BF/FC 的 b_1 值主要在 0.1~0.2 之间，波动幅度较 0%BF/FC 要小，1.5%BF/FC 和 2.5%BF/FC 的 b_1 值主要在 0.1 附近，波动幅度较小。在单轴压缩初期，4 种不同纤维掺量的试件 b_1 值都呈现出波动上升的趋势，说明试件初期的破坏主要以微裂纹的发育为主；在屈服阶段，以 0%BF/FC 的屈服阶段和平台阶段分界点为例，该处 b_1 值出现骤降，能量释放达到峰值，说明材料内部微裂纹贯通，发生了较大的断裂和破坏并拓展成为宏观大裂纹，表现在应力-应变曲线上则是承载能力的骤降；而同样是在屈服阶段，0.5%BF/FC 中 b_1 值则显得更平缓，在屈服点附近， b_1 值会出现一定程度的下

降，但并不明显，说明其裂纹发展较轻微，类似的现象在 1.5%BF/FC 和 2.5%BF/FC 中则更明显，说明在泡沫混凝土中掺入玄武岩纤维可以有效地抑制大尺度裂纹的发育。在平台阶段，0%BF/FC 的 b_1 值表现为先波动升高后波动下降的趋势，说明在残余应力的影响下，试件内部持续产生微裂纹，贯通后再次形成宏观大裂纹；而 0.5%BF/FC、1.5%BF/FC、2.5%BF/FC 的 b_1 值在平台阶段的趋势较 0%BF/FC 更平缓，说明其裂纹发育较缓和。

3 结论

- (1) 泡沫混凝土中掺入 0.5vol%、1.5vol%、2.5vol% 的 9 mm 玄武岩纤维后试件平均抗压强度分别提升了 1.37 MPa、4.58 MPa、2.77 MPa；试件单轴压缩屈服特征由振荡屈服逐渐变为点屈服，纤维一定程度上抑制了材料断裂和破坏进程。
- (2) 玄武岩纤维掺量为 0.5vol% 和 1.5vol% 的泡沫混凝土在各方向上的纤维占比相对较均匀，分别在 0%~1.2%和 1%~2% 之间波动；掺量为 2.5vol% 的泡沫混凝土纤维三向占比波动幅度较大，高纤维掺量的泡沫混凝土中易出现纤维团聚，纤维角

图 10 BFRFC 的声发射 b_i 值Fig. 10 Acoustic emission b_i value of BFRFC

度空间分布易集中, 这种不均匀性会导致试件中产生薄弱区, 影响试件性能。

(3) 泡沫混凝土在掺入 0.5vol%、1.5vol%、2.5vol% 的玄武岩纤维后, 球形度为 0.9~1.0 的孔隙占比仅分别下降了 1.72%、2.50% 和 3.07%, 说明在泡沫混凝土中掺入 2.5vol% 以下的玄武岩纤维对材料孔结构有一定影响但不显著。

(4) 掺加玄武岩纤维减少了材料声发射事件数, 抑制了材料内部损伤和开裂, 声发射累计振铃曲线的峰值随纤维掺量的增加先降低后微增, 累计振铃曲线在屈服阶段的陡增量减小; 声发射 b_i 值在单轴压缩初期都呈现出波动上升的趋势, 说明试件初期破坏主要以微裂纹的发育为主; 掺入玄武岩纤维后试件声发射 b_i 值趋势更平缓, 说明在泡沫混凝土中掺入玄武岩纤维可有效抑制裂纹发育。

参考文献:

- [1] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 398-410.
SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiwen, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. Journal of

the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 398-410(in Chinese).

- [2] GUO Y Z, CHEN X D, CHEN B, et al. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121773.
- [3] 袁志颖, 陈波, 陈家林, 等. 泡沫混凝土孔结构表征及其对力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4117-4127.
YUAN Zhiying, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Characterization of pore structure of foamed concrete and its influence on performance [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 4117-4127(in Chinese).
- [4] AMRAN M, FEDIU K, VATIN N, et al. Fibre-reinforced foamed concretes: A review [J]. Materials, 2020, 13(19): 4323.
- [5] GENCEL O, NODEHI M, YAVUZ BAYRAKTAR O, et al. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: 126861.
- [6] 王小娟, 崔浩儒, 周宏元, 等. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及准静态压缩性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1569-1585.
WANG Xiaojuan, CUI Haoru, ZHOU Hongyuan, et al. Mechanical performance of basalt fiber reinforced foam

concrete subjected to quasi-static tensile and compressive tests[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1569-1585(in Chinese).

[7] 程新, 詹炳根, 周安. 玄武岩纤维对泡沫混凝土收缩开裂的影响 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2019, 42(8): 1114-1118.
CHENG Xin, ZHAN Binggen, ZHOU An. Effect of basalt fiber on shrinkage and cracking of foam concrete[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(8): 1114-1118(in Chinese).

[8] 范然森, 程新, 詹炳根. 玄武岩纤维泡沫混凝土性能研究及抗裂评价 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43(9): 1223-1228.
FAN Ransen, CHENG Xin, ZHAN Binggen. Performance study and crack resistance evaluation of basalt fiber foam concrete[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(9): 1223-1228(in Chinese).

[9] YAVUZ BAYRAKTAR O, KAPLAN G, GENCEL O, et al. Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123128.

[10] 高志涵, 陈波, 陈家林, 等. 基于 X-CT 的泡沫混凝土孔隙结构与导热性能 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7): 723-730.
GAO Zhihan, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Pore structure and thermal conductivity of foam concrete based on X-CT[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7): 723-730(in Chinese).

[11] 庞超明, 王少华. 泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1): 93-98.
PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1): 93-98(in Chinese).

[12] 焦华喆, 吴亚闯, 陈峰宾, 等. 基于可视化分析的玄武岩纤维喷射混凝土微观结构研究 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1): 371-377.
JIAO Huazhe, WU Yachuang, CHEN Fengbin, et al. Micro-structure of basalt fiber shotcrete based on visual analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S1): 371-377(in Chinese).

[13] CHEN B, CHEN J L, CHEN X D, et al. Experimental study on compressive strength and frost resistance of steam cured concrete with mineral admixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325: 126725.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泡沫混凝土: JG/T 266—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Foamed concrete: JG/T 266—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无损检测 声发射检测 总则: GB/T 26644—2011 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General principles of acoustic emission testing for non-destructive testing: GB/T 26644—2011[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011(in Chinese).

[16] PÉREZ BERNAL J L, BELLO M A. Fractal geometry and mercury porosimetry[J]. *Applied Surface Science*, 2001, 185: 99-107.

[17] 詹奇洪, 詹炳根. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土韧性及抗压强度试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43(5): 667-672.
ZHAN Qiqi, ZHAN Binggen. Experimental study on toughness and compressive strength of basalt fiber reinforced foamed concrete[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(5): 667-672.

[18] 周程涛, 陈波, 高志涵. 冻融环境下泡沫混凝土的单轴压缩特性 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(4): 1233-1241.
ZHOU Chengtao, CHEN Bo, GAO Zhihan. Uniaxial compression characteristics of foamed concrete under freeze-thaw environment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(4): 1233-1241(in Chinese).

[19] 李升涛, 陈徐东, 张锦华, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的单轴压缩破坏特征 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1146-1153.
LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Failure characteristics of foam concrete with different density under uniaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1146-1153(in Chinese).

[20] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California[J]. *Nature*, 1945, 156: 371.

[21] LI S L, HOU J, GUO P, et al. Analysis of acoustic emission parameters of steel plate reinforcement effect on shearing zone of ECC-NC composite beams[J]. *Engineering Structures*, 2022, 266: 114505.

[22] LIU F, GUO R, LIN X J, et al. Monitoring the damage evolution of reinforced concrete during tunnel boring machine hoisting by acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 127000.

[23] 曾鹏, 曹蔚, 赵奎, 等. 选矿废水拌合尾砂胶结充填体强度演化规律及声发射特征 [J/OL]. *煤炭学报*: 1-13[2024-06-17]. 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0498.
ZENG Peng, CAO Wei, ZHAO Kui, et al. Strength evolution and acoustic emission characteristics of cemented tailing filling body mixed with mineral processing wastewater[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1-13[2024-06-17]. 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0498(in Chinese).