

冻融环境下玄武岩纤维泡沫混凝土损伤-声发射特征

牛瀚仪 陈波 高志涵 郭凌云

Damage-acoustic emission characterization of basalt fiber foam concrete under freeze-thaw environment

NIU Hanyi, CHEN Bo, GAO Zhihan, GUO Lingyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玄武岩纤维泡沫混凝土的微观结构及损伤特性

Microstructure and damage characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete

复合材料学报. 2024, 41(8): 4223–4233 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.005>

冻融环境下泡沫混凝土的孔结构与力学性能

Pore structure and mechanical properties of foam concrete under freeze-thaw environment

复合材料学报. 2024, 41(2): 827–838 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230608.001>

冻结状态聚乙烯醇纤维/水泥基复合材料抗压本构模型

Compressive constitutive model of polyvinyl alcohol fiber/cement composite material in frozen state

复合材料学报. 2022, 39(5): 2356–2368 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210622.002>

橡胶-砂-聚氨酯复合材料冻融循环后强度特性及本构模型

Strength characteristics and constitutive model of rubber-sand-polyurethane composites after freeze-thaw cycles

复合材料学报. 2022, 39(7): 3415–3427 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210804.003>

玄武岩纤维特征参数对混凝土单轴受拉性能的影响

Influence of basalt fiber characteristic parameters on uniaxial tensile properties of concrete

复合材料学报. 2023, 40(5): 2897–2912 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220706.003>

考虑异形孔的泡沫混凝土单轴压缩离散元模拟

Discrete element simulation of foam concrete under uniaxial compression considering non-spherical pores

复合材料学报. 2024, 41(7): 3730–3740 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231127.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.005

冻融环境下玄武岩纤维泡沫混凝土损伤-声发射特征



分享本文

牛瀚仪^{1,2,3}, 陈波^{*1,2}, 高志涵^{1,2,4}, 郭凌云^{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. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 4. 水利部珠江水利委员会, 广州 510611)

摘要: 对 600 和 1 000 kg/m³ 密度下 4 种不同玄武岩纤维掺量 (0vol%、0.15vol%、0.30vol% 和 0.45vol%) 泡沫混凝土 (BFRFC) 试样进行不同冻融环境下 (0、20、40、60 和 80 次冻融循环) 单轴压缩联合声发射试验, 探究了密度、纤维掺量、冻融循环次数对 BFRFC 单轴压缩性能的影响, 并依据声发射与单轴压缩试验参数建立冻融环境下 BFRFC 受压损伤本构模型, 定量分析不同冻融循环下 BFRFC 的损伤。结果表明: BFRFC 在受压过程有明显的阶段性, 分为密实、弹性、屈服和平台 4 个阶段, 声发射特征呈现出接触期、陡增期和缓增期 3 个阶段; 不同冻融循环次数下各试样的强度损失率范围为 3.4%~63.6%; 冻融环境会降低声发射的活跃度, 严重影响 BFRFC 力学性能; 玄武岩纤维掺入使试样累计振铃数先增加后减小, 能在一定程度上减缓峰值强度的损失; 冻融循环加速裂纹开展, 玄武岩纤维可有效抑制裂纹发展, 但高掺量时纤维团聚现象凸显, 内部损伤加剧; BFRFC 在受压前期损伤较低, 在相对峰值应力大于 0.7 时损伤发展加速, 直至破坏。

关键词: 玄武岩纤维增强泡沫混凝土; 冻融循环; 声发射; 单轴压缩; 本构模型**中图分类号:** TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)04-2062-12

Damage-acoustic emission characterization of basalt fiber foam concrete under freeze-thaw environment

NIU Hanyi^{1,2,3}, CHEN Bo^{*1,2}, GAO Zhihan^{1,2,4}, GUO Lingyun^{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. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The uniaxial compression-acoustic emission tests were carried out on four different basalt fiber admixture (0vol%, 0.15vol%, 0.30vol%, and 0.45vol%) foam concrete (BFRFC) specimens at 600 and 1 000 kg/m³ densities in different freeze-thaw environments (0, 20, 40, 60, and 80 freeze-thaw cycles) to investigate the effects of density, fiber admixture, and number of freeze-thaw cycles on the uniaxial compression performance of BFRFC. The compression damage model was established based on the acoustic emission and uniaxial compression parameters to quantitatively analyze the damage of BFRFC under different freezing and thawing cycles. The results show that: BFRFC has obvious stages in the compression process, which are divided into four stages of dense, elastic, yield and platform, and the acoustic emission characteristics show three stages of contact, steep increase and slow increase; The strength loss rate of each specimen under different numbers of freezing and thawing cycles ranges from 3.4% to

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-05-30; 录用日期: 2024-06-09; 网络首发时间: 2024-06-18 15:34:57

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.005>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079049; 52239009); 国家重点实验室基本科研业务费 (522012272)

General Program of National Natural Science Foundation of China (52079049; 52239009); Basic Scientific Research Business Expenses of National Key Laboratories (522012272)

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: 牛瀚仪, 陈波, 高志涵, 等. 冻融环境下玄武岩纤维泡沫混凝土损伤-声发射特征 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2062-2073.

NIU Hanyi, CHEN Bo, GAO Zhihan, et al. Damage-acoustic emission characterization of basalt fiber foam concrete under freeze-thaw environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2062-2073(in Chinese).

63.6%; The freezing and thawing environment would reduce the activity of acoustic emission, which would seriously affect the mechanical properties of BFRFC; Basalt fiber doping causes the cumulative ringing number of the specimen to increase and then decrease, which could slow down the loss of peak strength to a certain extent; Freeze-thaw cycle accelerates the crack development, basalt fibers could effectively inhibit the development of cracks, but the fiber agglomeration phenomenon is highlighted at high doping, and the internal damage is aggravated; The damage of the BFRFC in the pre-pressure stage is low, and the damage development is accelerated at the relative peak stress of more than 0.7, until the damage is damaged.

Keywords: basalt fiber reinforced foam concrete; freeze-thaw cycle; acoustic emission; uniaxial compression; constitutive model

水工建筑物在服役过程中会经历数次冻融循环，极易诱发混凝土结构的损伤破坏，影响结构运行安全和服役寿命^[1-2]。泡沫混凝土作为轻质多孔材料在寒区保温防护领域应用前景广阔^[3]，高志涵等^[4]开展了泡沫混凝土冻融试验，从宏观和微观角度研究得出密度为 1 000 kg/m³ 的试样具有良好抗冻融侵蚀能力。叶林杰等^[5]开展了循环荷载-冻融循环条件下泡沫混凝土微观力学性能的研究，得出冻融会使其内部孔隙产生裂缝并随破坏力持续扩展，直至破坏。泡沫混凝土中孔隙的存在削弱了整体强度，且冻融环境加速材料弱化。

纤维作为公认的提高水泥基材料力学性能的掺物，被广泛用于各类混凝土的改性增韧^[6-7]。玄武岩纤维的导热系数较低，对整体保温性能影响不大，是较为理想的改性增强材料^[8-9]。王小娟等^[10]对玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BFRFC) 拉伸和压缩性能展开研究，发现玄武岩纤维可显著提高试件的峰值强度。Gencel 等^[11]研究了 450 kg/m³ 密度的 BFRFC 的单轴抗压强度的变化情况，量化了玄武岩纤维对 BFRFC 的补强增韧效果。周程涛等^[12]研究了细观结构特征和不同纤维掺量对其损伤特性的影响。然而，现有的研究主要集中于常温环境下 BFRFC 性能变化情况，其冻融循环下的力学性能和损伤破坏情况尚不明确。声发射 (AE) 技术通过释 AE 信号还原其内部开裂的过程，实现 BFRFC 试样破坏全过程的动态监测^[13-14]。因此，可以借助单轴压缩-AE 联合试验来探究冻融环境

下 BFRFC 破坏机制及内部损伤情况。

本文通过开展不同密度及纤维掺量下泡沫混凝土的冻融循环试验，探究了 BFRFC 在不同冻融循环次数下的物理力学性能变化规律，并通过单轴压缩-AE 试验，分析了不同冻融循环次数和不同纤维掺量下 BFRFC 声发射参数动态变化特征。同时，依据声发射累计事件数，并结合损伤力学基本理论，建立了冻融循环下 BFRFC 受压损伤本构模型，定量评估了不同纤维掺量下泡沫混凝土的抗冻性能，以期 BFRFC 冻融环境健康服役提供技术支撑。

1 试验材料制备与方法

1.1 试验材料制备

原材料为水泥、发泡剂、9 mm 短切玄武岩纤维和水。水泥选用海螺牌硅酸盐水泥 P·O 42.5；发泡剂为 HTW-1 型复合发泡剂，稀释倍数为 1 : 30^[15]；玄武岩纤维由海宁安捷复合材料公司提供，长度为 9 mm，纤维体积掺量设计为 0vol%、0.15vol%、0.30vol%、0.45vol%^[16]；水为实验室自来水，水灰比为 0.5。BFRFC 的配合比如表 1 所示，其中湿密度为养护 28 d 结束后所称量的密度，干密度为在 105℃ 烘干箱 (DHG-9070A，上海一恒科学仪器公司) 中烘干 4 h 后各试样的密度。试验共制备 8 组 BFRFC 立方体试样，设计干密度为 600 kg/m³、1 000 kg/m³，边长 100 mm 的立方体，分别进行 0、20、40、60 和 80 次冻融循环，以测得其基本力学性能。

表 1 玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BFRFC) 的配合比及密度
Table 1 Mix ratio and density of basalt fiber reinforced foam concrete (BFRFC)

Density level	Cement/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)	Foam/(kg·m ⁻³)	Basalt fiber volume fraction/vol%	Mass of basalt fiber/(kg·m ⁻³)
A06	416.67	208.33	35.49	0, 0.15, 0.3, 0.45	0, 4.2, 8.4, 12.6
A10	743.05	371.53	21.83	0, 0.15, 0.3, 0.45	0, 4.2, 8.4, 12.6

Note: A06 and A10 represent BFRFC with the density level of 600 and 1 000 kg/m³, respectively.

1.2 试验方法

BFRFC 的冻融循环试验参考《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)^[17] 中规定的快冻法，使用北京建研建材公司生产的 CABR-HDK 快速冻融

试验机，温度范围为-18~20℃，过程如图 1(a) 所示，设定冻融循环次数为 20、40、60 和 80。试验前将 BFRFC 放置在 (20±5)℃ 水中浸泡 4 d 使其充

分吸水饱和，在开始冻融循环前测定各试样的初始质量，每隔 20 次循环从各组中取出 5 块试样，充分干燥后进行单轴压缩-声发射联合试验 (MTS-AE)。

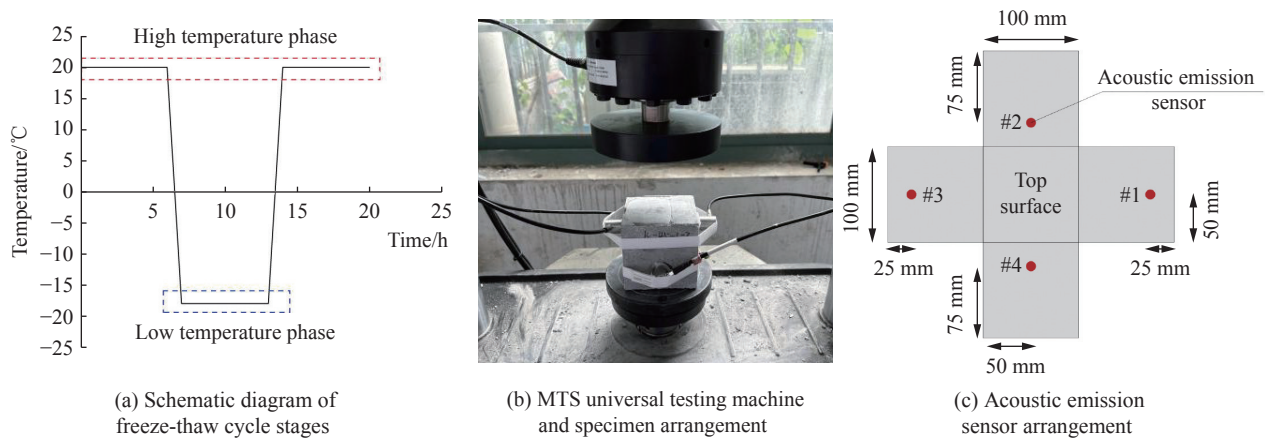


图 1 试验方法与仪器

Fig. 1 Test method and apparatus

单轴压缩试验借助美国 MTS 系统公司生产的 MTS Landmark 370 液压伺服试验机完成，试样布置如图 1(b) 所示。采用位移控制的加载模式，设定加载速率为 0.8 mm/min，当试样的轴向位移达到 8 mm 时停止加载，每组重复试验 3 次，在压缩过程中记录荷载与位移数据。

BFRFC 的声发射试验与单轴压缩试验同步进行，采用美国物理声学公司 (PAC) 生产的 Sensor Highway III 型全天候结构健康监测系统，待测试样 4 个侧面各布置一个 PK6I 型传感器，通过松紧带固定，为排除现场环境噪声干扰，试验前根据预实验结果设定 AE 门槛为 40 dB，并以凡士林作为耦合剂，传感器布置情况见图 1(c)。

2 BFRFC 的单轴压缩结果

2.1 不同纤维掺量 BFRFC 的单轴压缩性能

分析各纤维掺量的 A06 和 A10 试样在未进行冻融循环时的应力-应变关系。由于各试样在受压过程中曲线的发展情况存在差异，直接取平均值会存在较大的误差 [4, 18]，因此选取具有中间峰值应力的试样作为代表试样，来表征其应力-应变关系。各纤维掺量的 A06 和 A10 试样在未进行冻融循环时的应力-应变关系曲线如图 2 所示。

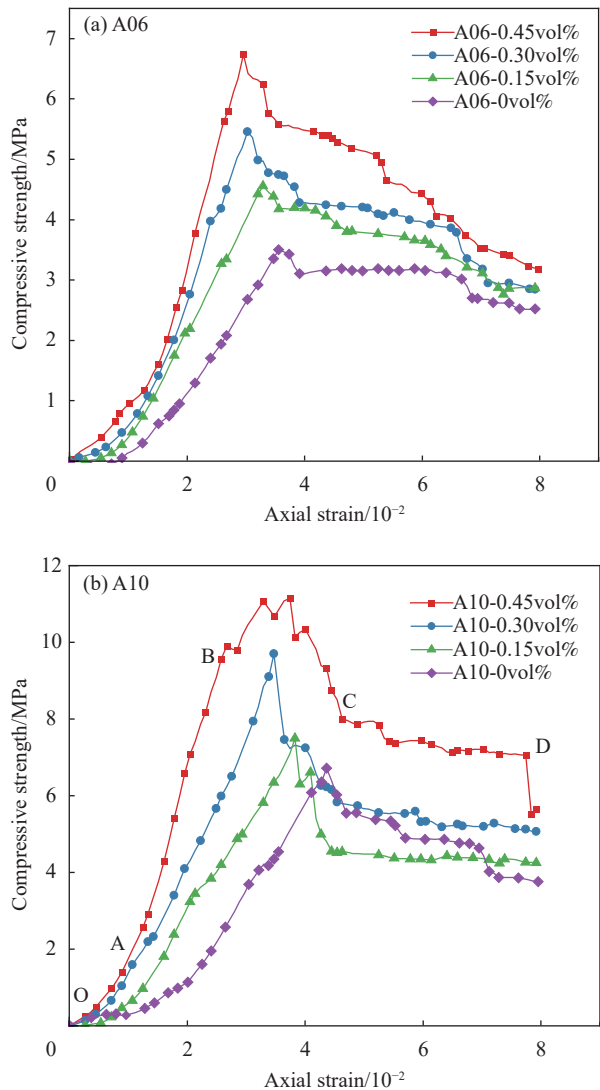
由图 2 可知，BFRFC 单轴压缩过程中的应力-应变关系曲线存在明显的阶段性，根据曲线特征，BFRFC 的破坏过程可大致分为密实、弹性、屈服

和平台阶段 [19]。本文以 A10-0.45% 试样 (图 2(b)) 为例，对 BFRFC 各特征阶段进行分析：

O-A 初步密实阶段：在受压初期 BFRFC 具有良好的变形能力，受到外界荷载时首先发生的是表层孔隙的塌陷和填充，应力增长较为缓慢，随着孔隙结构的压实，试样的弹性模量随之增大 [4]；A-B 弹性阶段：密实后孔隙已初步压缩致密，水泥基质以弹性变形的形式承受荷载，其弹性能随着荷载的增大而不断累积 [20]，弹性响应遵循线性关系；B-C 屈服阶段：BFRFC 材料在达到峰值之后开始进入屈服，其承载能力逐渐下降，试样的孔壁被压垮，其表面出现宏观裂缝并伴随砂浆块体的剥落。

由于玄武岩纤维的加强作用，纤维在裂缝处仍然将水泥基体的两侧连接起来，这有效地减缓了试样的开裂速度。此外，由于孔壁受到破坏，引起了孔隙的进一步密实，剩余的水泥基质发生摩擦和互锁，抵消了部分因屈服破坏造成的强度损失，使得 BFRFC 具有一定的缓冲能力 [4, 14, 21]。C-D 平台阶段：随着压缩持续进行，试样孔隙逐渐闭合，施加荷载基本维持在稳定水平，轴向变形不断增大，直至达到 8 mm 时停止加载。

观察不同纤维掺量下的 BFRFC 峰值承载力，如表 2 所示。数据显示了随着纤维含量的增加，BFRFC 的峰值强度呈显著上升趋势。具体来说，对于 A06 试件，相较于无纤维的泡沫混凝土，纤



Sample number A06-0.15vol% represents the design of dry density of 600 kg/m³ and the volume of basalt fiber mixed with 0.15vol%. The rest of the sample numbers are the same rules

图2 BFRFC的应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain relationship curves of BFRFC

维含量为 0.15vol%、0.30vol% 和 0.45vol% 的试件峰值强度增加了 26.8%、73.8% 和 108.18%；而对于 A10 试件，相应的增幅为 9.5%、29.62% 和 73.78%。随纤维掺量增加，A06 试样相对 A10 试样峰值应变增幅更高，峰后曲线下降更平缓，呈现出明显的延性破坏特征，说明玄武岩纤维具有良好的增韧效果，且低密度 BFRFC 韧性更高。

为深入了解玄武岩纤维的增强机制，本研究选取具有代表性的 BFRFC 试样的破坏界面进行观察，如图 3 所示。可以看出：随机分布在混凝土内部的玄武岩纤维有效增大了水泥基质之间的粘结程度。在试样破坏的过程中，位于开裂路径上

的纤维可以延缓裂缝的发展速率，从而显著提高试样的峰值强度。

表 2 不同纤维含量下 BFRFC 峰值差异 (MPa)
Table 2 Differences in peak values of BFRFC with different fiber contents (MPa)

Density grade	0vol%	0.15vol%	0.30vol%	0.45vol%
A06	3.164	4.012	5.500	6.587
A10	6.431	7.042	8.336	11.176



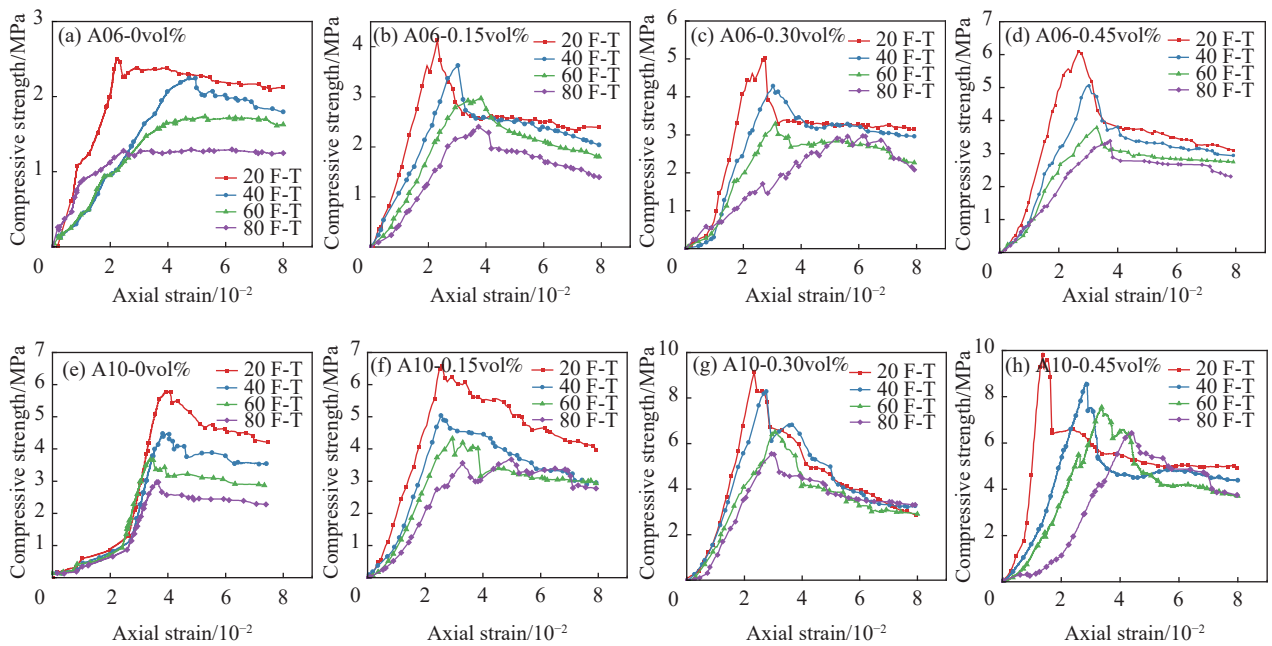
图 3 BFRFC 代表性试样的破坏界面
Fig. 3 Damage interface of representative specimen of BFRFC

2.2 冻融循环对 BFRFC 单轴压缩破坏特征的影响

评估冻融环境下 BFRFC 试样的力学性能变化是理解材料抗冻性的关键内容。本节通过分析两种不同密度等级 (A06 和 A10) 的 BFRFC 试样在 20、40、60 和 80 次冻融循环后的单轴抗压强度变化，探讨冻融侵蚀对材料强度的具体影响。冻融循环后各样的应力-应变关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可知：在冻融循环的影响下，各试样的承载能力均有所下降，经过冻融循环的 BFRFC 的应力-应变曲线依旧存在阶段性特征。在弹性阶段，随着冻融循环次数的增加，BFRFC 的应力-应变斜率逐渐减小，这是由于 BFRFC 受冻融侵蚀导致试样的孔隙结构发生变化，弹性模量减小，试样更易于发生轴向变形进而导致试样整体强度的降低^[22-23]。BFRFC 的脆性随着冻融循环次数的增大而不断降低^[14]，这一特征在各试样的屈服阶段表现尤为明显。以经历 20、40、60 和 80 次冻融循环的 A10-0.45vol% 试样为例，在屈服阶段前后承载力下降幅度分别为 35.71%、29.08%、26.67% 和 18.53%。这是由于冻融循环增加了孔隙占比并加强了缓冲作用，从而降低了试样的脆性，导致承载力下降幅度逐步减小。

不同冻融情况下 BFRFC 的平均峰值强度损失情况如图 5 所示。可以看出，BFRFC 的平均峰值



20 F-T refers to the specimen with 20 freeze-thaw cycles. The rest of the specimen numbering rules are the same

图 4 冻融环境下各等级 BFRFC 试样的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship curves of BFRFC specimens of various grades in freeze-thaw environment

强度损失率随着冻融循环次数的增加而不断上升。未参加纤维的 A06 和 A10 试样在经历 80 次冻融循环后，其强度损失率分别高达 63.6% 和 54.8%，可见冻融循环对泡沫混凝土强度影响较大。相比之下，加入玄武岩纤维能在一定程度上减缓峰值强度的损失，提高抗冻融侵蚀能力。这种改善情况是由于冻融循环过程中，玄武岩纤维有效地限制试样内部裂纹的扩展，进而抵消冻融侵蚀造成的

损伤，增强试样的抗冻性能。
值得注意的是，0.30vol% 纤维掺量试样在高密度下起伏波动较明显，并且该掺量下的峰值强度损失率与 0.45vol% 纤维掺量较为接近，低密度时甚至优于 0.45vol% 掺量的试样。这表明 BFRFC 并非掺量越大峰值强度损失越小，而是存在最佳掺量值。
低密度下 0.45vol% 纤维掺量的试样团聚现象

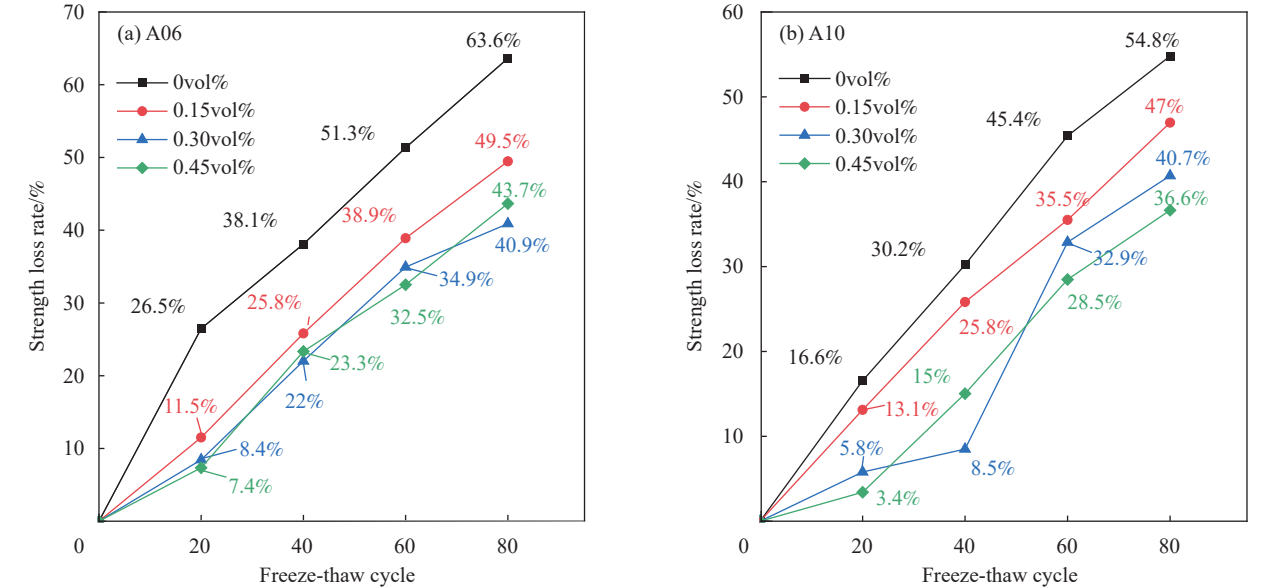


图 5 BFRFC 的平均峰值强度损失情况

Fig. 5 Average peak intensity loss for BFRFC

明显,研究^[24]指出,当玄武岩纤维掺量过高时,内部容易出现纤维团聚和成簇现象。而高密度下 0.30vol% 和 0.45vol% 掺量的试样都有团聚现象,这是由于高密度的水泥基质较多,在搅拌时与纤维未充分拌匀。纤维团聚和搅拌不充分会影响纤维的均匀分布,从而降低其桥接和抗裂效果,导致 0.45vol% 掺量的 BFRFC 在冻融循环后的峰值强度损失率反而增大。

3 BFRFC 的声发射信号特征

声发射 (AE) 事件指的是材料内部局部源迅速释放能量时产生的瞬态弹性波现象,该现象通常通过弹性波进行检测。AE 测试中,振铃计数用来表示 AE 信号源的活跃程度,即在一个 AE 事件持续期间,信号幅值超过预设门槛值的次数。同时,幅值用于表示内部损伤情况。在一个测试周期内,振铃计数的增多和幅值的提高均表明 BFRFC 在受压过程中内部开裂次数增多,损伤发展更为剧烈^[25-27]。

以未经冻融循环的 A06、A10 两等级试样为例,借助 AE 累计振铃计数曲线结合应力-应变关系全面分析 BFRFC 的压缩过程,如图 6 所示。

由图 6 可知,两等级 BFRFC 试样的 AE 累计振铃计数曲线均出现明显的阶段性,根据曲线的增长趋势可将 BFRFC 声发射过程大致分为 3 个阶段:接触期、陡增期和缓增期。

(1) 接触期:在 BFRFC 压缩的初期,AE 累计振铃计数曲线增长缓慢,几乎无声发射现象,对应试样受压的密实阶段,试样内部开始萌生微裂缝,内部应力增长较慢;

(2) 陡增期:陡增期对应试样受压的弹性阶段和屈服阶段,水泥基质的开裂和破碎引起累计振铃计数曲线的快速增长。随着外界荷载的增大,试样内部微裂缝不断连通发展,随着孔隙壁的破坏和坍塌,产生大量 AE 信号,试样表面出现大量宏观裂缝;

(3) 缓增期:随着试件受压的持续进行,平台阶段的 AE 信号活跃度开始下降,持续时间较长,但曲线增长幅度较低。该阶段 BFRFC 试样已发生了较大程度的宏观开裂,试样内部孔隙不断闭合,压缩后的水泥基质的承载力维持在稳定水平,因此声发射活动比较平稳。

横向对比 A06、A10 两试样的特征曲线可知:随着玄武岩纤维掺量的增大,试样的累计振铃计

数先增加后减小,这是由于玄武岩纤维增强了泡沫混凝土抵抗变形的能力,减少了内部损伤,从而先出现 AE 事件活动频率降低的现象,而后纤维掺量持续增加,纤维团聚现象凸显,内部损伤加剧,增加了 AE 事件活跃度。缓增期试样 AE 事件的活跃程度不断提高,表现为曲线斜率的不断增大。这是由于玄武岩纤维在试样内部起到了抵抗裂缝开展的作用。高掺量的 BFRFC 试样在平台阶段开裂程度更小,随着荷载的增加,裂缝的开展仍在进行,因此 AE 信号仍较为活跃。随着密度的增大,试样累计振铃计数呈减少趋势,这是由于高密度 BFRFC 抵抗变形能力更好,内部损伤也较少。

以纤维掺量为 0.30vol% 的 A10 试样为例,探究冻融循环下 BFRFC 的声发射信号特征,如图 7 所示。可知,随着冻融循环次数的增加,AE 累计振铃计数逐渐下降,陡增期-缓增期分界点随冻融循环次数增加而在时间上向后推移。冻融循环降低了 BFRFC 中的水泥基质占比,裂缝开展增多,变形产生的弹性波在孔隙内多次弹射导致信号衰减^[4],对 AE 事件的定位与捕获较为不利,使得信号的活跃度降低。加载过程中 AE 幅值也呈现阶段性,在接触期,微裂缝产生,损伤程度逐渐增加但并未发生明显破坏,幅值信号比较稀疏。陡增期微裂缝不断连通发展为宏观裂缝,试件逐渐被压实破坏,幅值信号大幅度上升且信号密集。缓增期结构损伤仍在持续,幅值信号略微减弱且稀疏。随冻融循环次数增加,幅值密集程度不断上升,集中分布于屈服阶段,平台阶段幅值集中程度下降明显。结合累计振铃计数分析,BFRFC 历经冻融循环后,试样在峰值强度时已接近最大损伤。

4 冻融环境下 BFRFC 受压损伤模型

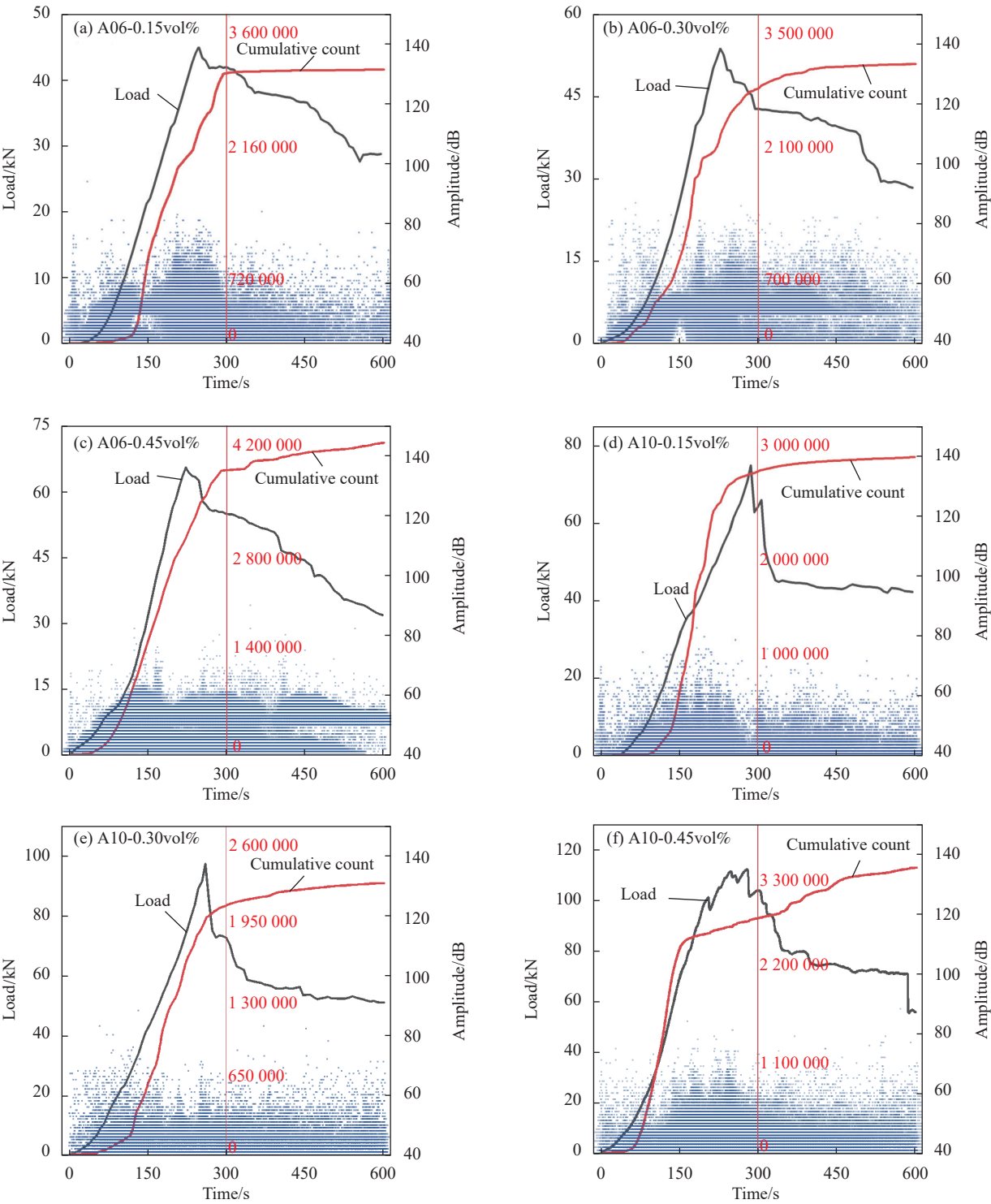
4.1 受压损伤本构模型建立

参考混凝土的声发射损伤机制^[28-29],建立 BFRFC 声发射累计事件数 N 与应力 σ 之间的联系,如下所示:

$$N = c\sigma^m e^{n\sigma} \tag{1}$$

式中: c 为常量; m 和 n 为材料损伤特性相关参数。

研究表明^[30-31],累计声发射事件数与混凝土由荷载引起的损伤变量之间存在一致性,如下所示:



The red vertical line represents the cumulative number of acoustic emission events

图 6 A06、A10 等级各试样的声发射累计振铃计数-荷载关系曲线

Fig. 6 Acoustic emission cumulative ring count-load relationship curves for each specimen of A06 and A10 grades

$D_h = KN$ (2)

式中： D_h 为由荷载引起的损伤变量； K 为常量。

根据应变等效假设^[32]，受损材料的本构关系可表示为

$\sigma = E_0\varepsilon(1 - D)$ (3)

式中： ε 为应变； D 为损伤变量； E_0 为初始弹性模量。

冻融条件下，BFRFC 的总损伤变量 D 包含了

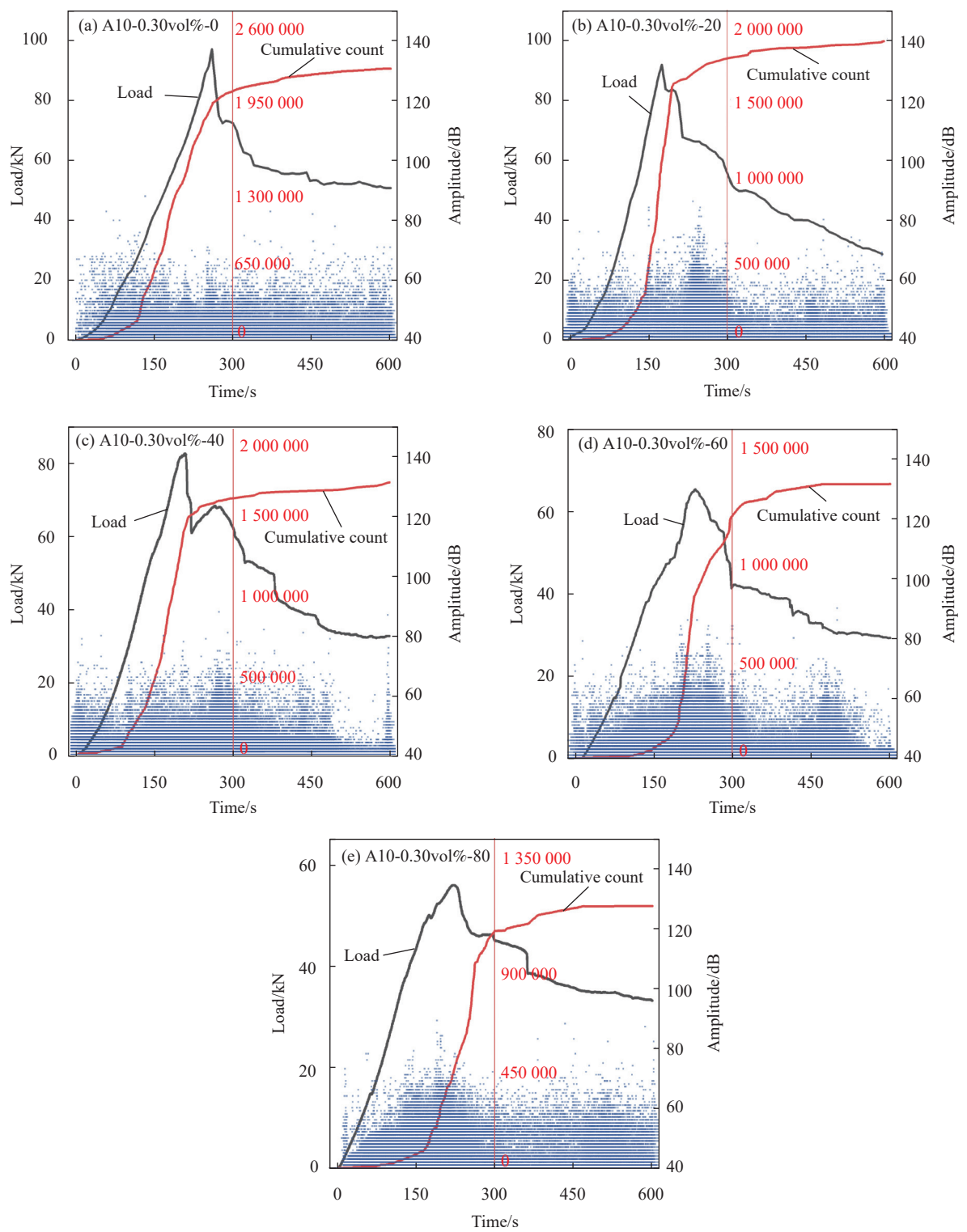


图 7 A10-0.30vol% 不同冻融循环次数下的声发射累计振铃计数-荷载关系曲线

Fig. 7 Acoustic emission cumulative ring count-load curves for A10-0.30vol% with different number of freeze-thaw cycles

由冻融引起的损伤变量 D_i 和由荷载引起的损伤变量 D_h [33]:

$$D = D_i + D_h \tag{4}$$

综合以上公式，BFRFC 经过冻融循环后的受

压损伤本构模型可以表示为

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D_i - D_h) = E_0 \varepsilon (1 - D_i - KN) \tag{5}$$

4.2 冻融循环下 BFRFC 受压损伤本构模型验证

以试件 A10-0.30vol% 为例，对冻融循环下

BFRFC 受压损伤本构模型进行验证。当冻融循环次数为 0 时，此时冻融损伤变量 D_i 也为 0。

根据试验得到的 BFRFC 声发射累计事件数和应力参数，采用式 (1) 拟合得到参数 c 、 m 、 n ，拟合值见表 3。

表 3 不同冻融循环次数下 A10-0.30vol% 试件的拟合参数值
Table 3 Fitted parameter values of A10-0.30vol% specimens under different freeze-thaw cycles

Freeze-thaw cycle	c	m	n
0	1.8347	3.7982	-0.0363
20	2 019.3510	0.4204	0.0490
40	681.7456	1.2910	0.0227
60	203.2789	0.3836	0.1033
80	172.9196	-0.6244	0.1847

Notes: c represents a constant; m and n are parameters related to material damage properties.

将拟合后的参数值代入式 (3)，并结合实测的应力-应变数据进行拟合，得出 E_0 值为 189.325 MPa， K 值为 5.263×10^{-7} ，相关系数 R^2 达到 0.981。将 E_0 代入式 (5)，对冻融循环次数为 20、40、60、80 的 A10-0.30vol% 试件应力-应变数据与式 (5) 进行拟合分析，从而求出不同冻融循环次数下 BFRFC 总损伤变量 D 值和参数 K ，绘制受压损伤与相对峰值应力 σ_r 演化过程如图 8 所示。

从图 8 可以看出，BFRFC 在受压前期演化较为平缓，在相对峰值应力大于 0.7 时损伤发展加速，直至峰值强度达到损伤变量最大值。

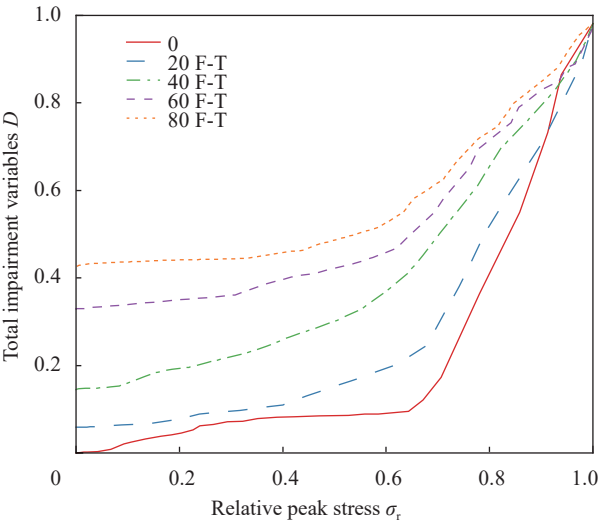


图 8 不同冻融循环次数下 A10-0.30vol% 的受压损伤演化
Fig. 8 Compression damage evolution of A10-0.30vol% under different number of freeze-thaw cycles

4.3 BFRFC 冻融损伤评价

通过上述方法，分别建立了 A06 和 A10 各掺量试样在不同冻融循环次数下的受压损伤本构模型，拟合的相关系数 R^2 范围在 0.921~0.994，相关性较好，并求出初始的冻融损伤变量 D_i ，根据其值可以定量评价 BFRFC 的冻融损伤状态，见图 9。

由图 9 可知，随着冻融循环次数的增加，初始 D_i 呈现增长趋势。低密度冻融损伤整体大于高密度试样，可见试样的密度等级越高，其抵抗冻融侵蚀的能力就越强。纤维的加入显著提升了试样的抗冻性，在无掺量和 0.15vol% 掺量下，不同冻融次数下的损伤变量值都呈现较高的发展趋势，

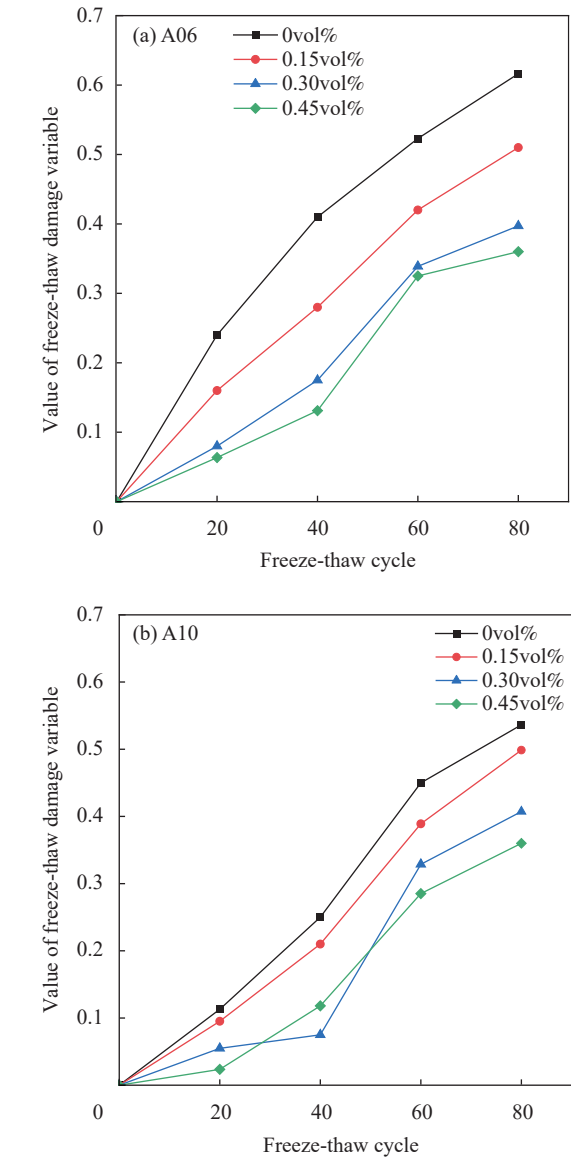


图 9 不同密度和纤维掺量 BFRFC 初始冻融损伤变量
Fig. 9 Initial freeze-thaw damage variables of BFRFC with different densities and fiber dopings

表明低纤维掺量对试样抗冻性影响较少,而 0.3vol% 和 0.45vol% 掺量的 BFRFC 初始冻融损伤变量值较为接近并且维持在 0.4 以下,二者抗冻性能良好且差异较小。

5 结论

(1) 玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BFRFC) 单轴压缩过程中的应力-应变关系曲线呈现明显的阶段性,主要分为密实阶段、弹性阶段、屈服阶段和平台阶段。声发射特征呈现出接触期、陡增期和缓增期 3 个阶段。BFRFC 的声发射特征与单轴压缩各阶段均有对应。

(2) 随着玄武岩纤维掺量的提升,试样的累计振铃值先减小后增大,试样的抗压强度显著提高。位于开裂路径上的纤维可以延缓裂缝的发展速率,从而显著提高试样的峰值强度,然而掺量过高会导致纤维团聚现象,导致内部损伤加剧。因此,纤维的引入起到了增强和增韧作用,并且存在最优掺量。

(3) 随着冻融循环次数增加,BFRFC 承载力下降,声发射信号活跃度减弱。这是由于冻融侵蚀导致了 BFRFC 弹性模量减小,水泥基质占比降低,裂缝开展增加,变形产生的信号较难捕捉。

(4) 本文建立的损伤本构模型可以有效模拟冻融循环作用下 BFRFC 的损伤特征:在受压初期 BFRFC 损伤演化缓慢,当相对峰值应力达到 0.7 后,BFRFC 的损伤发展加速;纤维掺量的增加能显著降低试件的初始冻融损伤变量值,从而有效提升材料的抗冻性能;0.3vol% 和 0.45vol% 掺量的 BFRFC 抗冻性接近且较好。

本研究成果的局限性:由于采用的试件尺寸较小,应变均匀度不够,且支撑面的挤压和变形约束难以消除,有待进一步试验进行补充和完善。

参考文献:

[1] 吴中如,陈波. 大坝变形监控模型发展回眸 [J]. 现代测绘, 2016, 39(5): 1-3, 8.
WU Zhongru, CHEN Bo. A retrospective look at the development of dam deformation monitoring model[J]. Modern Surveying and Mapping, 2016, 39(5): 1-3, 8(in Chinese).
[2] 郑茂盛. 寒区水利水电工程设计与施工技术 [J]. 中国水利, 2010(20): 72-74.
ZHENG Maosheng. Design and construction technology of

water conservancy and hydropower projects in cold regions[J]. China Water Resources, 2010(20): 72-74(in Chinese).
[3] LIN J, CHEN Z, DING X, et al. BIM-based construction technologies for precast foamed lightweight concrete wall-boards[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2022, 38(3): 270-277.
[4] 高志涵,陈波,陈家林,等. 冻融环境下泡沫混凝土的孔结构与力学性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 827-838.
GAO Zhihan, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Pore structure and mechanical properties of foam concrete under freeze-thaw environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 827-838(in Chinese).
[5] 叶林杰,夏新华,吴迪高,等. 基于冻融循环和疲劳荷载共同作用下泡沫混凝土的微观力学性能研究 [J]. 混凝土, 2022(9): 56-61.
YE Linjie, XIA Xinhua, WU Digao, et al. Study on the micromechanical properties of foam concrete based on the combined effect of freeze-thaw cycle and fatigue loading[J]. Concrete, 2022(9): 56-61(in Chinese).
[6] AMRAN M, FEDIUK R, VATIN N, et al. Fibre-reinforced foamed concretes: A review[J]. Materials, 2020, 13, 4323.
[7] 董进秋,杜艳廷,闻宝联,等. 玄武岩纤维混凝土力学性能与增韧机理研究 [J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 638-641.
DONG Jinqiu, DU Yanting, WEN Baolian, et al. Mechanical properties and toughening mechanism of basalt fiber concrete[J]. Industrial Building, 2011, 41(S1): 638-641(in Chinese).
[8] 李为民,许金余,沈刘军,等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 135-142.
LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Liujun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 135-142(in Chinese).
[9] 王起台,任根立. 冻融循环作用下玄武岩纤维混凝土抗压和抗折性能分析 [J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2023, 32(4): 6-12.
WANG Qitai, REN Genli. Analysis of compressive and flexural properties of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science Edition), 2023, 32(4): 6-12(in Chinese).
[10] 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. Uniaxial tensile and quasi-static compressive properties of basalt fiber reinforced foam concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1569-1585(in Chinese).
[11] GENCEL O, NODEHI M, BAYRAKTAR O Y, et al. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume:

- An experimental study[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 326: 126861.
- [12] 周程涛, 陈波, 张娟, 等. 玄武岩纤维泡沫混凝土微观结构及损伤特性 [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 foamed concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8): 4236-4245(in Chinese).
- [13] 段力群, 董璐, 马林建, 等. 泡沫混凝土单轴压缩下声发射特征试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 742-747.
DUAN Liqun, DONG Lu, MA Linjian, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of foam concrete under uniaxial compression[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2018, 47(4): 742-747(in Chinese).
- [14] 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. Uniaxial compression damage characteristics of foam concrete with different density grades[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1146-1153(in Chinese).
- [15] 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. Foam concrete: JG/T 266—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).
- [16] 王丹薇. 常用纤维对水工泡沫混凝土物理力学性能的影响研究 [J]. *吉林水利*, 2022(3): 10-13, 18.
WANG Danwei. Study on the influence of common fibers on the physical and mechanical properties of hydraulic foam concrete[J]. *Jilin Water Resources*, 2022(3): 10-13, 18(in Chinese).
- [17] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Test procedure for hydraulic concrete: SL/T 352—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020(in Chinese).
- [18] 周宏元, 王业斌, 王小娟, 等. 泡沫混凝土压缩性能尺寸效应研究 [J]. *材料导报*, 2021, 35(18): 18076-18082, 18095.
ZHOU Hongyuan, WANG Yebin, WANG Xiaojuan, et al. Study on the size effect of compression properties of foam concrete[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(18): 18076-18082, 18095(in Chinese).
- [19] 朱兴一, 张启帆, 于越, 等. 基于离散元的 EMAS 泡沫混凝土贯入力学性能研究 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(2): 122-128.
ZHU Xingyi, ZHANG Qifan, YU Yue, et al. Study on penetration mechanical properties of EMAS foam concrete based on discrete elements[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(2): 122-128(in Chinese).
- [20] 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 foam concrete under freeze-thaw environment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(4): 1233-1241(in Chinese).
- [21] 黄海健, 宫能平, 穆朝民, 等. 泡沫混凝土动态力学性能及本构关系 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 466-472.
HUANG Haijian, GONG Nengping, MU Zhaomin, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive relationship of foam concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 466-472(in Chinese).
- [22] 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).
- [23] 张亚梅, 孙超, 王申, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔隙结构 [J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(8): 54-63.
ZHANG Yamei, SUN Chao, WANG Shen, et al. Performance and pore structure of foam concrete with different density grades[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(8): 54-63(in Chinese).
- [24] 王静文, 王伟. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土响应面多目标优化 [J]. *材料导报*, 2019, 33(24): 4092-4097.
WANG Jingwen, WANG Wei. Multi-objective optimization of response surface of basalt fiber reinforced foam concrete[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(24): 4092-4097(in Chinese).
- [25] BENABOUD S, TAKARLI M, POUTEAU B, et al. Fatigue process analysis of aged asphalt concrete from two-point bending test using acoustic emission and curve fitting techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124109.
- [26] DE SMEDT M, VRIJDAGHS R, VAN STEEN C, et al. Damage analysis in steel fibre reinforced concrete under monotonic and cyclic bending by means of acoustic emission monitoring[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2020, 114: 103765.
- [27] LI S, CHEN X, ZHANG J. Acoustic emission characteristics in deterioration behavior of dam concrete under post-peak cyclic test[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123324.
- [28] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 1987, 6(2): 99-108.

[29] 陈波, 袁志颖, 陈家林, 等. 冻融循环后蒸汽养护混凝土的损伤—声发射特性 [J]. [建筑材料学报](#), 2023, 26(2): 143-149.
CHEN Bo, YUAN Zhiying, CHEN Jialin, et al. Damage-acoustic emission characteristics of steam-cured concrete after freeze-thaw cycles [J]. [Journal of Building Materials](#), 2023, 26(2): 143-149(in Chinese).

[30] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析 [J]. [岩石力学与工程学报](#), 2006, 25(12): 2493-2501.
ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG Qiang, et al. Damage modeling and statistical analysis of acoustic emission from quasi-brittle materials [J]. [Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2006, 25(12): 2493-2501(in Chinese).

[31] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料声发射与应力-应变参量耦合关系及应用 [J]. [岩石力学与工程学报](#), 2003, 22(2): 227-231.
JI Hongguang, CAI Meifeng. Coupling relationship between acoustic emission and stress-strain parameters in concrete materials and applications [J]. [Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2003, 22(2): 227-231(in Chinese).

[32] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. [Nuclear Engineering and Design](#), 1984, 80(2): 233-245.

[33] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性损伤模型 [J]. [硅酸盐学报](#), 2019, 47(7): 855-864.
LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. Durability and damage model of self-compacting concrete filled layer under load-freeze-thaw coupling [J]. [Journal of the Chinese Ceramic Society](#), 2019, 47(7): 855-864(in Chinese).