

## 基于声发射-数字图像相关技术的泡沫混凝土冻融破坏特征及损伤演化规律

牛瀚仪 陈波 袁志颖

### Freeze-thaw damage characteristics and evolution law of foam concrete based on acoustic emission-digital image correlation technique

NIU Hanyi, CHEN Bo, YUAN Zhiying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240718.004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 基于声发射信号的不同密度C/SiC复合材料损伤演化

Damage evolution of C/SiC composite materials with different densities based on acoustic emission signal analysis

复合材料学报. 2019, 36(2): 425-433 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180416.001>

#### 基于数字图像技术的C/SiC复合材料拉伸行为与失效机制

Tensile behavior and failure mechanism of C/SiC composite based on digital image technology

复合材料学报. 2022, 39(5): 2387-2397 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210629.003>

#### 基于孔体积分形维数的稻壳灰混凝土冻融损伤劣化机制

Freeze-thaw damage deterioration mechanism of rice husk ash concrete based on pore volume fractal dimension

复合材料学报. 2023, 40(8): 4733-4744 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.004>

#### 稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构

Freeze-thaw cycle and microstructure of rice husk ash rubber concrete

复合材料学报. 2023, 40(5): 2951-2959 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220712.002>

#### 基于数字图像相关技术的木纤维/高密度聚乙烯复合材料界面力学行为

Interfacial mechanical behavior of wood fiber/high density polyethylene composites based on digital image correlation

复合材料学报. 2020, 37(9): 2173-2182 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200122.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240718.004

# 基于声发射-数字图像相关技术的泡沫混凝土冻融破坏特征及损伤演化规律



分享本文

牛瀚仪<sup>1,2,3</sup>, 陈波<sup>\*1,2</sup>, 袁志颖<sup>4</sup>

(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. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

**摘要:** 为研究冻融环境下泡沫混凝土压缩破坏特征及损伤演化规律, 对密度为  $800 \text{ kg/m}^3$  的泡沫混凝土开展了单轴压缩-声发射 (AE)-数字图像相关 (DIC) 技术联合测试试验, 获取了泡沫混凝土加载过程中的应变演化云图及声发射参数变化特征。结果表明: 泡沫混凝土的压缩破坏过程曲线呈现明显的阶段效应, 且试件经历的冻融循环次数越多, 延性破坏特征越明显; 随着冻融循环次数的增加, DIC 监测到试件应变集中带面积逐渐递增, 应变场均值逐渐下降, 同时试件表面裂缝的形态由最初的垂直型单一裂缝向倾斜的剪切型多裂缝演变; 冻融为 0、20、40、60 和 80 次的泡沫混凝土试件最终破坏时剪切裂缝所占比例分别为 52.5%、57.8%、59.2%、65.3% 和 69.2%, 声发射  $b$  值下降阶段分别出现在加载进程的 92.3%、89.1%、88.5%、76.5% 和 72.3%; 冻融环境可以促进泡沫混凝土由拉伸破坏向剪切破坏的转变, 加剧泡沫混凝土内部损伤, 从而在材料内部诱发大尺度破裂现象; AE 和 DIC 的结果相辅相成, 它们的结合有助于全面了解泡沫混凝土中微裂缝的发展规律和损伤破坏机制。

**关键词:** 冻融循环; 声发射; 数字图像相关技术; 损伤演化; 裂缝**中图分类号:** TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)05-2742-11

## Freeze-thaw damage characteristics and evolution law of foam concrete based on acoustic emission-digital image correlation technique

NIU Hanyi<sup>1,2,3</sup>, CHEN Bo<sup>\*1,2</sup>, YUAN Zhiying<sup>4</sup>

(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. Hydro China Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

**Abstract:** To study the compression damage characteristics and damage evolution law of foam concrete under a freeze-thaw environment, a joint test combining uniaxial compression, acoustic emission (AE), and digital image correlation (DIC) technology was carried out on foam concrete with a density of  $800 \text{ kg/m}^3$ . The strain evolution cloud diagram and acoustic emission parameter change characteristics of the foam concrete during the loading process were obtained. The results show that the compression damage process curve of foam concrete presents an obvious staged effect. The more freeze-thaw cycles the specimen experiences, the more pronounced the ductile damage characteristics become. With the increase in the number of freeze-thaw cycles, the area of the strain concentration zone of the specimen monitored by the DIC gradually increases, while the average value of the strain field gradually decreases. Meanwhile, the morphology of surface cracks in the specimen evolves from initial vertical

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-07-09; 网络首发时间: 2024-07-20 21:59:34

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240718.004>**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](mailto:chenbo@hhu.edu.cn)

**引用格式:** 牛瀚仪, 陈波, 袁志颖. 基于声发射-数字图像相关技术的泡沫混凝土冻融破坏特征及损伤演化规律 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2742-2752. NIU Hanyi, CHEN Bo, YUAN Zhiying. Freeze-thaw damage characteristics and evolution law of foam concrete based on acoustic emission-digital image correlation technique[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2742-2752(in Chinese).

single cracks to tilted shear-type multi-fractures. The proportion of shear cracks in the final damage of foam concrete specimens with 0, 20, 40, 60, and 80 freeze-thaw cycles are 52.5%, 57.8%, 59.2%, 65.3%, and 69.2%, respectively. The stages of decreasing acoustic emission *b*-value appear in 92.3%, 89.1%, 88.5%, 76.5%, and 72.3% of the loading process, respectively. The freeze-thaw environment can promote the transition from tensile to shear damage in foam concrete, exacerbates the internal damage of foam concrete, and thus induces large-scale rupture phenomena within the material. The results of AE and DIC complement each other, and their combination contributes to a comprehensive understanding of the developmental pattern of microcracks and damage mechanisms in foam concrete.

**Keywords:** freeze-thaw cycle; acoustic emission; digital image correlation technique; damage evolution; crack-ing

泡沫混凝土作为多孔结构的轻质混凝土，因其保温隔热性好、节能、缓冲、利废等优点，符合国家绿色发展需求，在寒区保温防护领域应用前景广阔<sup>[1-3]</sup>。泡沫混凝土的抗压强度相较普通混凝土差异较大，其力学特性一直是研究重点，目前已有多位学者开展了单轴压缩试验<sup>[4-8]</sup>，结果表明，泡沫混凝土在单轴压缩状态下应力-应变曲线呈现明显的阶段效应，其抗压强度受密度、孔结构、龄期及尺寸效应的影响，龄期长、密度大、尺寸小的试块孔结构更均匀，抗压强度也越高。

当泡沫混凝土用于寒区保温防护时，受冻融环境的影响，内部孔隙水结冰膨胀产生的压力作用会导致泡沫混凝土物理力学性能发生显著变化<sup>[9]</sup>。多位学者在常温所得研究成果基础上，进一步探索了冻融环境下的相关研究。Bayraktar等<sup>[10]</sup>通过超声波脉冲速度法 (UPV) 对冻融条件下不同水泥和泡沫含量的泡沫混凝土 7 d/28 d 抗折、抗压强度做出评估，总结得到冻融循环下水泥含量为 500 kg/m<sup>3</sup>、泡沫含量为 20 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫混凝土表现出最佳的抗冻性能。高志涵等<sup>[11]</sup>借助 X-CT 设备对冻融后不同密度泡沫混凝土进行孔结构扫描检测，从微观角度得出冻融循环会增大孔隙率，分散孔径，进而引起力学性能下降的结论。叶林杰等<sup>[12]</sup>对冻融循环和疲劳荷载共同作用下的泡沫混凝土进行 SEM 切片扫描处理，研究发现冻融会使其内部孔隙产生裂缝，且随循环荷载次数的增加微裂缝数量逐渐增加。然而，现有研究主要集中在冻融前后的力学性能和孔结构等方面，对冻融条件下泡沫混凝土的单轴压缩开裂破坏过程研究较少，其冻融损伤演化规律尚未明确。若要优化泡沫混凝土的结构设计和提高其在寒区环境下的应用性能，仅从抗压强度这单一角度考虑是不够全面的，必须进一步对冻融环境下泡沫混凝土压缩破坏全过程进行动态监测，分析其变形破坏

机制。而如何观测冻融后泡沫混凝土的压缩破坏过程，测量多点开裂和裂缝发展情况是目前亟待解决的关键问题。

针对上述问题，许多新兴的无损监测方法已被应用于混凝土材料破坏试验研究中。声发射 (AE) 技术通过采集混凝土材料压缩过程中内部开裂产生的弹性波信号，可对其内部损伤演化过程进行动态分析<sup>[13]</sup>。数字图像相关 (DIC) 技术可以记录混凝土材料表面的位移场和应变场，从而对试件的裂缝萌生及扩展过程进行实时量化<sup>[14-16]</sup>。两种方法的结合可以有效克服单一测试方法的局限性，更能全面地反映泡沫混凝土材料受压过程中损伤演化规律。然而目前结合两种方法对冻融循环后泡沫混凝土压缩破坏全过程进行无损监测的研究较少。

因此，本文采用 AE 和 DIC 两种监测技术，测试了不同冻融次数下泡沫混凝土的抗压强度，利用 DIC 技术得到的应变场探讨了冻融环境下泡沫混凝土的破裂形式和裂缝的发展情况，并分析了 AE 信号累计计数、上升角与平均频率值 (RA-AF) 和损伤指数 *b* 值多个参数与冻融后泡沫混凝土损伤演化过程之间的关系。DIC 与 AE 监测结果互为补充和验证，将宏观力学性能与微观裂缝开展相结合，分析冻融条件下泡沫混凝土单轴压缩破坏演变过程，研究结果有助于进一步了解冻融循环后泡沫混凝土的变形模式和损伤演化规律，为泡沫混凝土性能评估和寒区应用提供一定的参考。

1 试验材料制备与方法

1.1 试验材料制备

采用的原材料为水泥、发泡剂和水。水泥选用安徽省芜湖市生产的海螺牌硅酸盐水泥 P·O 42.5；发泡剂为杭州舒之城生产的高性能蛋白类发泡剂，稀释倍数为 1 : 30<sup>[17]</sup>；水为自来水，水灰比是 0.5。制备密度为 800 kg/m<sup>3</sup> 泡沫混凝土试样，记为 A08

试样，配合比为：水泥 540 kg/m<sup>3</sup>、水 270 kg/m<sup>3</sup>、发泡剂 0.52 kg/m<sup>3</sup>、泡沫含量为 24.6 kg/m<sup>3</sup>。浇筑若干边长 100 mm 的立方体分别进行 20、40、60 和 80 次冻融循环，具体试样编号见表 1。

表 1 泡沫混凝土的配合比及密度 (单位: kg/m<sup>3</sup>)  
Table 1 Mix ratio and density of foam concrete (Unit: kg/m<sup>3</sup>)

| Sample | Cement | Water  | Foam  | Wet density | Dry density | Freeze-thaw cycle |
|--------|--------|--------|-------|-------------|-------------|-------------------|
| A08-0  | 416.67 | 208.33 | 35.49 | 944.31      | 868.03      | 0                 |
| A08-20 | 416.67 | 208.33 | 35.49 | 944.31      | 868.03      | 20                |
| A08-40 | 416.67 | 208.33 | 35.49 | 944.31      | 868.03      | 40                |
| A08-60 | 416.67 | 208.33 | 35.49 | 944.31      | 868.03      | 60                |
| A08-80 | 416.67 | 208.33 | 35.49 | 944.31      | 868.03      | 80                |

Note: Sample number A08-40 represents the design of dry density of 800 kg/m<sup>3</sup> and 40 freeze-thaw cycles. The rest of the sample numbers are the same rules.

1.2 试验方法

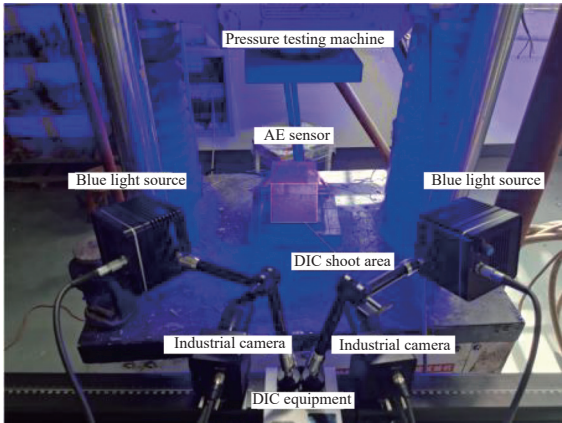
泡沫混凝土冻融循环试验依据《水工混凝土试验规程》<sup>[18]</sup>中规定的方法进行，试验机型采用建研华测(北京)仪器设备有限公司生产的 CABR-HDK 型快速冻融试验机，温度范围为 -20~20℃，设定冻融循环次数为 20、40、60 和 80。试验前将试样放置在 (20±5)℃ 水中浸泡 2 d 使其充分吸水饱和，在开始冻融循环前测定各试样的初始质量，每隔 20 次循环从各组中取出 5 块试样，充分干燥后进行单轴压缩试验。

采用济南方圆试验仪器有限公司生产的 WAW-1000 电液伺服万能试验机进行泡沫混凝土单轴压缩试验，通过荷载控制的加载方式，设置加载速率为 50 N/s，测试试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体，每种试验工况重复 3 次。在泡沫混凝土单轴压缩过程中，同时通过声发射 (AE) 和数字图像 (DIC) 技术进行辅助监测。单轴压缩-AE-

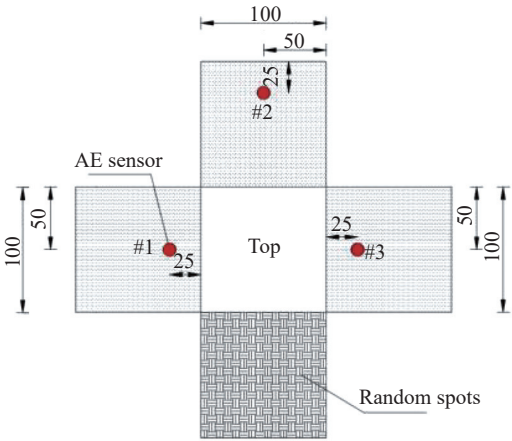
DIC 联合测试试验装置及声发射探头布置如图 1(a) 和图 1(b) 所示。

声发射监测设备是由美国 PAC 公司设计制造的 Sensor Highway III 型全天候结构健康监测系统，在试件侧面共布置 3 个用于采集声发射数据的探头，型号为 PK6 I。涂抹凡士林作为声发射探头与试件表面的耦合剂，以确保采集声发射信号的有效性，信号采集门槛值为 40 dB。

DIC 监测系统采用美国 Correlated Solutions 公司 VIC-3D 系统，同时使用两个工业摄像机捕捉图像。根据 DIC 软件系统的测量需求，在试件正表面 100 mm×100 mm 区域内喷涂随机散斑，试件表面散斑喷涂的质量对试验结果至关重要，散斑制备流程如下：首先用砂纸将泡沫混凝土试件表面打磨光滑，然后先在试件表面喷涂一层白色底漆，最后用黑色哑光喷漆喷涂分布均匀的散斑。本文中的散斑直径大约为 0.5 mm，对应大小约为 7 个像素。



(a) MTS universal testing machine and specimen arrangement



(b) Acoustic emission sensor arrangement (Unit: mm)

AE—Acoustic emission; DIC—Digital image correlation; MTS—Mechanical testing & simulation

图 1 试验方法与仪器

Fig. 1 Test method and apparatus

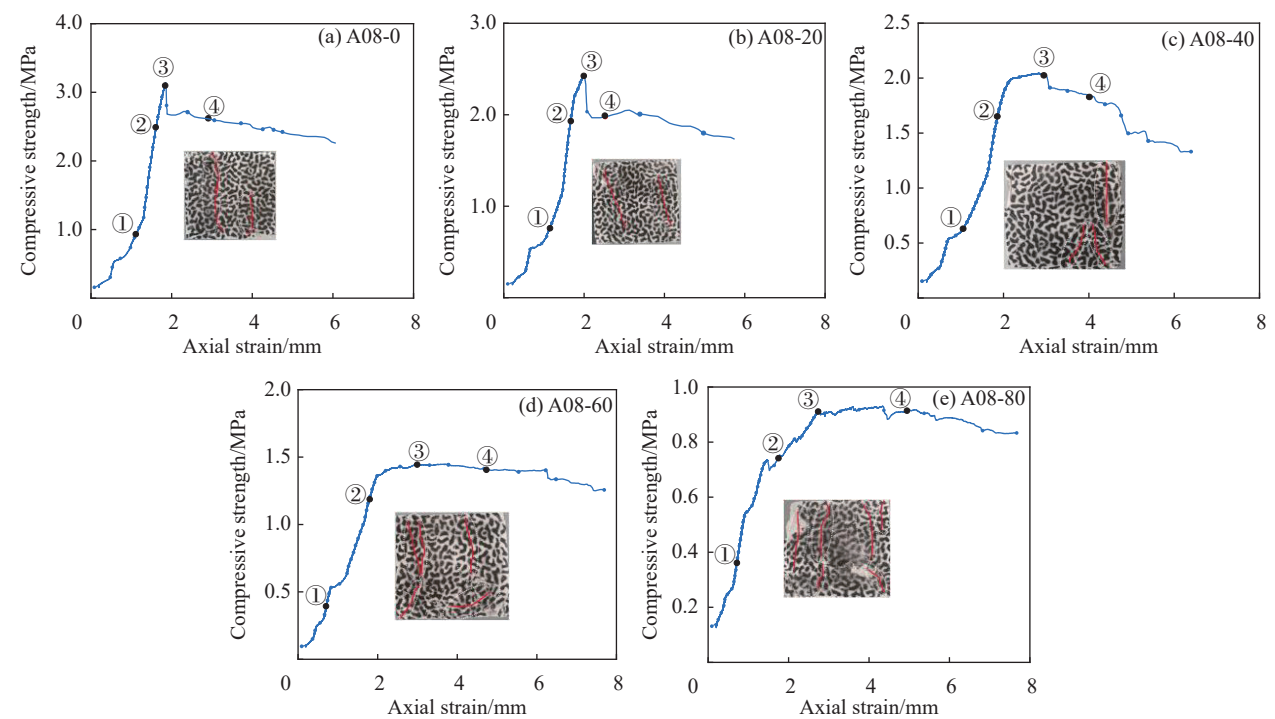
2 不同冻融循环下泡沫混凝土单轴压缩破坏过程

A08 泡沫混凝土试件经历不同冻融循环次数单轴压缩应力-应变曲线图及破坏后的表面形态见图 2，同时选取曲线上具有代表性的加载时刻点进行分析(点①为  $0.3P_{\max}$  应力时刻，点②为  $0.8P_{\max}$  应力时刻，点③为  $P_{\max}$  应力时刻，点④为峰后阶段某时刻，其中  $P_{\max}$  为峰值应力)。通过 DIC 获得泡沫混凝土试件在不同加载时刻纵向(单轴受压方向)应变云图如图 3~图 7 所示。

通过对图 2 中泡沫混凝土破坏后表面形态分析可知，随冻融循环次数的增加，试件表面裂缝

由单一的垂直型裂缝向倾斜的剪切型多裂缝发展，这种剪切型的多裂缝在 A08-80 试件中尤为显著。

从 A08-0 试件各时刻应变云图可以看出，在加载初期 ( $0.3P_{\max}$ ) 泡沫混凝土应变场整体处于压缩状态，应变集中区域主要出现在试件一侧，这主要是由于泡沫混凝土是一种非均质多孔水泥基材料，在浇筑及养护过程中由于操作不当可能会出现一些初始微裂纹，在这些区域容易发生应变集中现象；随着荷载进一步增加 ( $0.8P_{\max}$ )，试件原有呈点状出现的应变集中区域不断聚合贯通，在左侧形成明显的应变集中带，同时其他区域应变进一步增加；在应力峰值时刻 ( $P_{\max}$ )，应变集



A08-40 refers to the specimen of  $800\text{ kg/m}^3$  with 40 freeze-thaw cycles, the rest of the specimen numbering rules are the same

图 2 A08 试件在不同冻融循环次数下单轴压缩应力-应变曲线及破坏形态

Fig. 2 Uniaxial compressive stress-strain curves and damage patterns of A08 specimens under different freeze-thaw cycle times

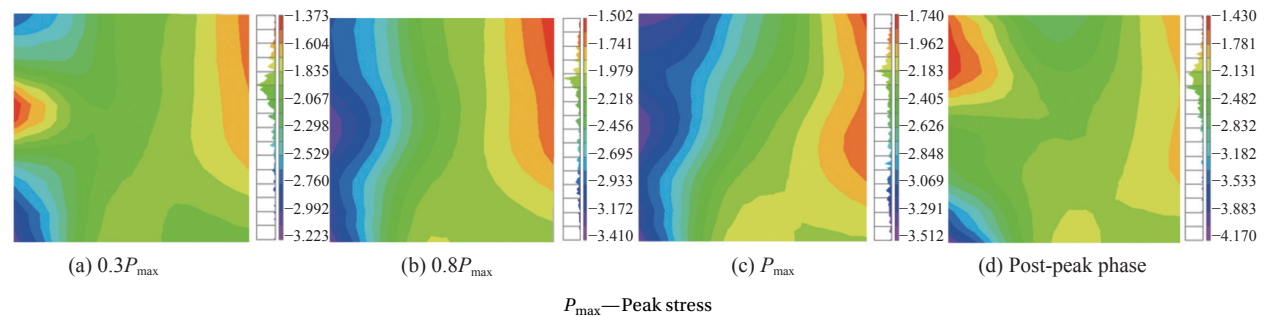


图 3 A08-0 试件在不同时刻的表面应变演化云图

Fig. 3 Cloud diagram of surface strain evolution at different moments of A08-0 specimen

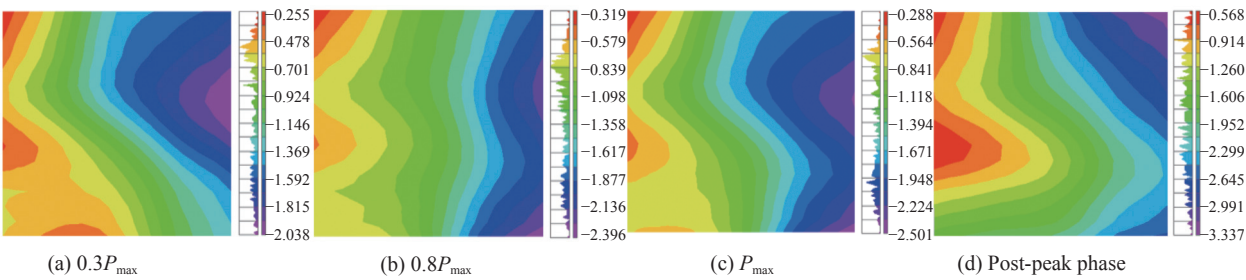


图 4 A08-20 试件在不同时刻的表面应变演化云图

Fig. 4 Cloud diagram of surface strain evolution at different moments of A08-20 specimen

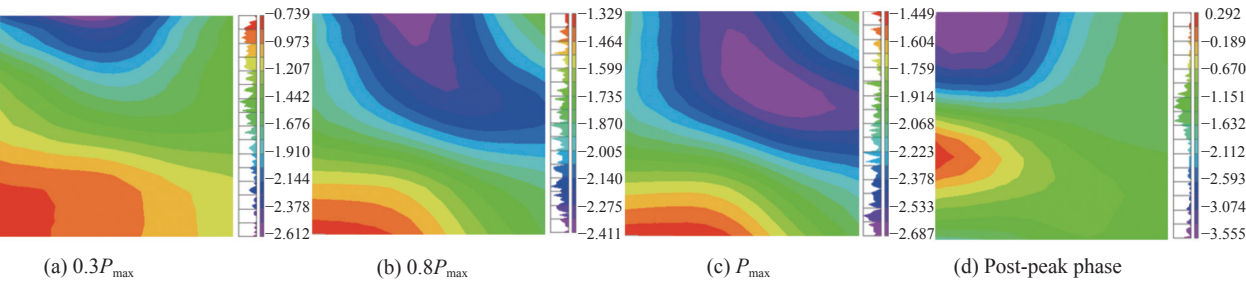


图 5 A08-40 试件在不同时刻的表面应变演化云图

Fig. 5 Cloud diagram of surface strain evolution at different moments of A08-40 specimen

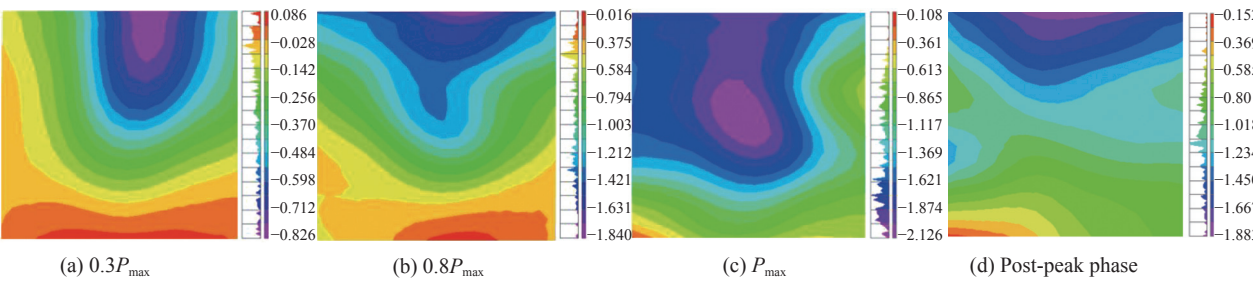


图 6 A08-60 试件在不同时刻的表面应变演化云图

Fig. 6 Cloud diagram of surface strain evolution at different moments of A08-60 specimen

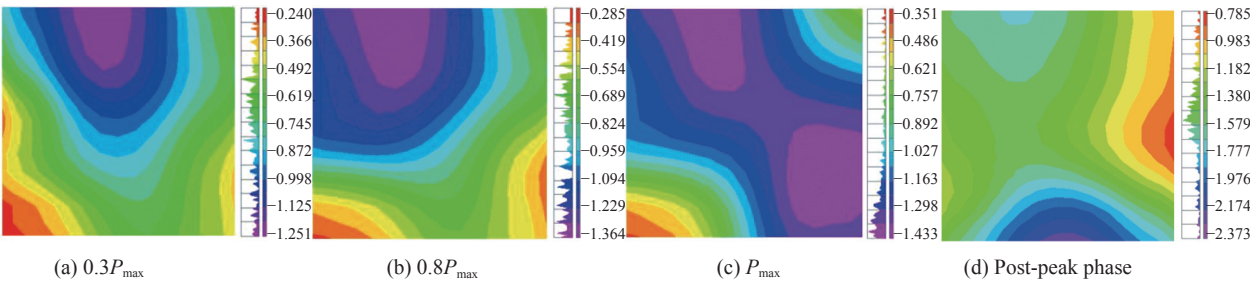


图 7 A08-80 试件在不同时刻的表面应变演化云图

Fig. 7 Cloud diagram of surface strain evolution at different moments of A08-80 specimen

中带面积发展达到最大，表明此时裂缝正在迅速发展并贯穿试件，试件内部开始出现局部失稳状况；在峰后阶段，由于主裂缝的形成，试件内部应变沿着裂缝逐渐释放，此前形成的应变集中带已不复存在，整体应变场也较均匀，冻融次数为 20 的试件在不同加载时刻也大致呈现上述规律。

在冻融循环 40、60 和 80 次时，应变集中区域多发生于中间，并且随着泡沫混凝土冻融循环次数的增加，在各试件应力峰值时刻，应变集中带的面积呈现递增的趋势，同时应变场均值在逐渐下降，该现象也表明冻融损伤破坏了泡沫混凝土内部完整性，增大了试件可能发生破裂的区域。

这主要是由于冻融循环次数越多，试件内部产生的微裂缝也就越多，由能耗最小原则可知，在受载过程中，主裂缝会沿着试件的“薄弱区域”发展，而因冻融产生的内部微裂缝正好充当了上述的“薄弱区域”，随着荷载的不断增加，主裂缝在发展过程中不断与冻融产生的微裂缝汇聚贯通，因此冻融循环次数越多的试件，可能发生破裂的区域就越大，从而形成的应变集中带的面积也就越大。

上述结果表明，冻融损伤使泡沫混凝土试件的破坏模式发生了变化，冻融循环次数越多，泡沫混凝土表现出的延性破坏特征越明显，破坏由贯穿型裂缝逐渐转变为缓慢发展的分散性裂缝。

3 不同冻融循环下声发射特征分析

3.1 声发射振铃计数分析

声发射振铃计数是指单位时间内振铃脉冲越过声发射系统阈值值的次数，是混凝土内部结构声发射信号强弱程度的表征，它的变化规律能够反映混凝土试件破坏过程中的实时形态<sup>[19-21]</sup>。本文以 A08 试件经历不同冻融循环次数试验结果为例，对受压破坏过程中声发射特征参数进行分析说明，其余密度泡沫混凝土试件声发射规律均类似。

图 8 为 A08 泡沫混凝土试件受压过程中 AE 计数、荷载与时间的关系曲线，由图可知，不同冻融循环次数下泡沫混凝土试件声发射振铃计数呈现出试验初期增长较快，随后增长速率减缓，因

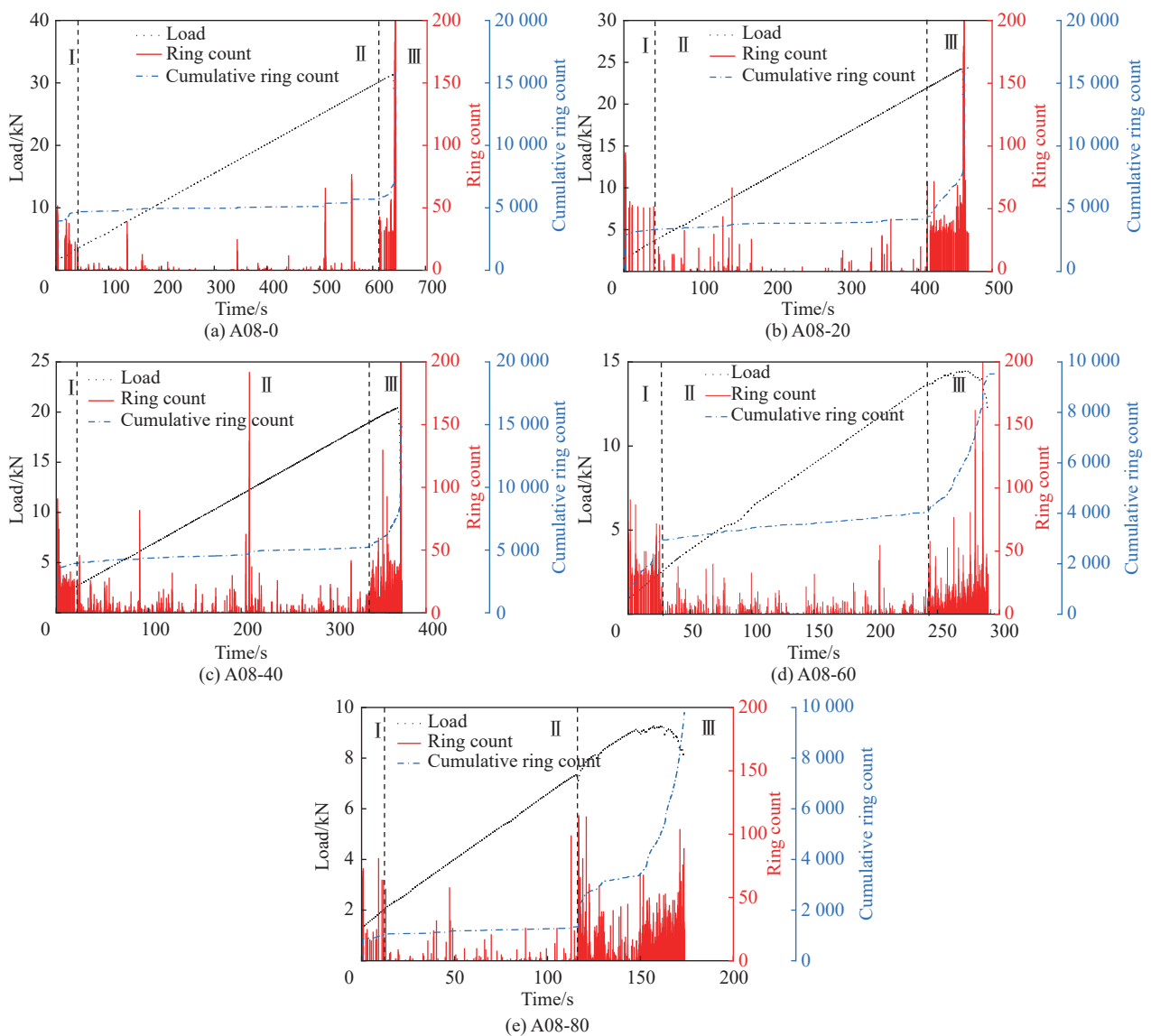


图 8 A08 等级不同冻融循环次数下的声发射振铃计数-荷载关系曲线

Fig. 8 Acoustic emission ringing count-load relationship curves for different number of freeze-thaw cycles for A08 grade

此, 可将不同冻融循环次数下泡沫混凝土试件受压破坏过程大致分为如下 3 个阶段:

(1) 接触段: 接触阶段主要发生在受压过程的初期, 各试块声发射振铃计数小幅增长。这主要是由于在受压阶段初期, 泡沫混凝土内部分孔隙被压密, 产生初始裂纹, 造成短期内声学信号增强, 振铃计数增加较快;

(2) 平静段: 平静阶段内声发射信号主要来自泡沫混凝土内部孔隙的挤压闭合及新生裂纹的二次扩展, 由于裂纹的二次扩展需要一定能量, 因此导致此阶段内声发射活动较平稳, 振铃计数值保持在较低水平, 且持续时间较长;

(3) 陡增段: 经历平静阶段之后, 泡沫混凝土试件积累的能量越来越多, 在达到峰值应力前裂隙迅速发展, 声发射信号显著增强, 振铃计数快速增长并达到峰值, 这是损伤加剧的重要标志。当接近峰值荷载时, 试件破坏, 内部裂隙迅速扩展至表面。

此外, 从图 8 还可以看出, 经历 0、20、40、60 和 80 次冻融循环的泡沫混凝土试件总累计振铃计数值分别为 17 572、16 635、14 874、9 762 和 9 403, 总累计振铃计数随冻融循环次数的增加而逐渐减小。这主要是由于泡沫混凝土经历的冻融循环次数越多, 其内部产生的微裂隙也就越多, 导致微裂隙汇聚、贯通所需的能量就减少, 因而在受压过程中声发射传感器捕捉到的振铃计数信号就越少<sup>[22-23]</sup>。

表 2 为不同冻融循环次数下平静阶段-陡增阶段分界点特征参数。通过分析可知, 经历 0、20、40、60 和 80 次冻融循环的泡沫混凝土试件相对峰值荷载分别为 0.95、0.90、0.88、0.84 和 0.75, 随着冻融循环次数的增加, 相对峰值荷载逐渐下降, 该现象也表明平静阶段-陡增阶段分界点随冻融循

表 2 不同冻融循环次数下 A08 试样平静段-陡增段分界点特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the boundary between the quiet stage and the steep increase stage of A08 specimens under different freeze-thaw cycles

| Freeze-thaw cycle | Breakpoint load/kN | Peak load/kN | Relative peak load |
|-------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 0                 | 29.88              | 31.33        | 0.95               |
| 20                | 21.82              | 24.24        | 0.90               |
| 40                | 17.81              | 20.24        | 0.88               |
| 60                | 12.15              | 14.47        | 0.84               |
| 80                | 7.16               | 9.30         | 0.75               |

Note: Relative peak load = Breakpoint load/Peak load.

环次数增加在时间域上发生前移。

3.2 声发射 RA-AF 值分析

声发射上升角 (RA) 值与平均频率 (AF) 值可反映混凝土试件的破裂模式。RA 值越小, AF 值越大, 表明声发射信号波形梯度大, 信号频率高, 对应拉伸破坏裂纹特征; RA 值越大, AF 值越小, 表明声发射信号波形梯度小, 信号频率低, 对应剪切破坏裂纹特征<sup>[24]</sup>。

图 9 为不同冻融循环次数下泡沫混凝土 RA-AF 值分布图。可知, 不同冻融循环次数下声发射 RA 和 AF 值在不同阶段内均有不同程度的占比, 表明泡沫混凝土试件受压破坏并非由单一类型裂缝模式控制, 而是由拉伸裂缝与剪切裂缝之间交替转化决定的, 从而最终导致主裂缝形成, 使试件发生受压破坏<sup>[25-26]</sup>。冻融循环次数为 0 时, 泡沫混凝土试件接触阶段、平静阶段和陡增阶段剪切裂缝所占比例分别为 20.4%、36.7% 和 52.5%, 随着受压过程的进行, 剪切裂缝所占比例逐渐升高, 该现象也表明泡沫混凝土破裂模式正逐步由张拉破坏向剪切破坏转变, 且越接近极限荷载, 剪切破裂现象越显著。

冻融为 0、20、40、60 和 80 次的泡沫混凝土试件最终破坏时剪切裂缝所占比例分别为 52.5%、57.8%、59.2%、65.3% 和 69.2%, 随着冻融循环次数的增加, 泡沫混凝土压缩破坏过程中内部裂缝主要表现为张拉裂缝逐渐减少, 剪切裂缝逐渐增多, 表明冻融环境能够加速泡沫混凝土由张拉破坏向剪切破坏的转变。这主要是由于在冻融条件下, 由于静水压力作用导致泡沫混凝土内部发生冻融损伤, 使其在受载之前就产生大量拉伸裂缝, 并且随着冻融循环次数的增多, 拉伸裂缝所占比例也越高, 泡沫混凝土受载时, 其内部所积累的应变能也主要以剪切裂缝的形式耗散, 与 DIC 所测得的试验规律一致。

3.3 声发射 b 值分析

声发射 b 值是表征声发射事件震级-频度分布尺度的参数, 可有效反映混凝土受压破坏时内部损伤演化过程。b 值增大, 混凝土内部小事件数量占比增加, 小尺度破裂增多; 反之, 大尺度破裂增多<sup>[27]</sup>。声发射 b 值传统计算方法主要包括最小二乘法和最大似然法, 但上述两种方法均需先确定一个声发射幅值范围, 然后再确定声发射事件数, 这导致计算结果随机性较大且划分时间长

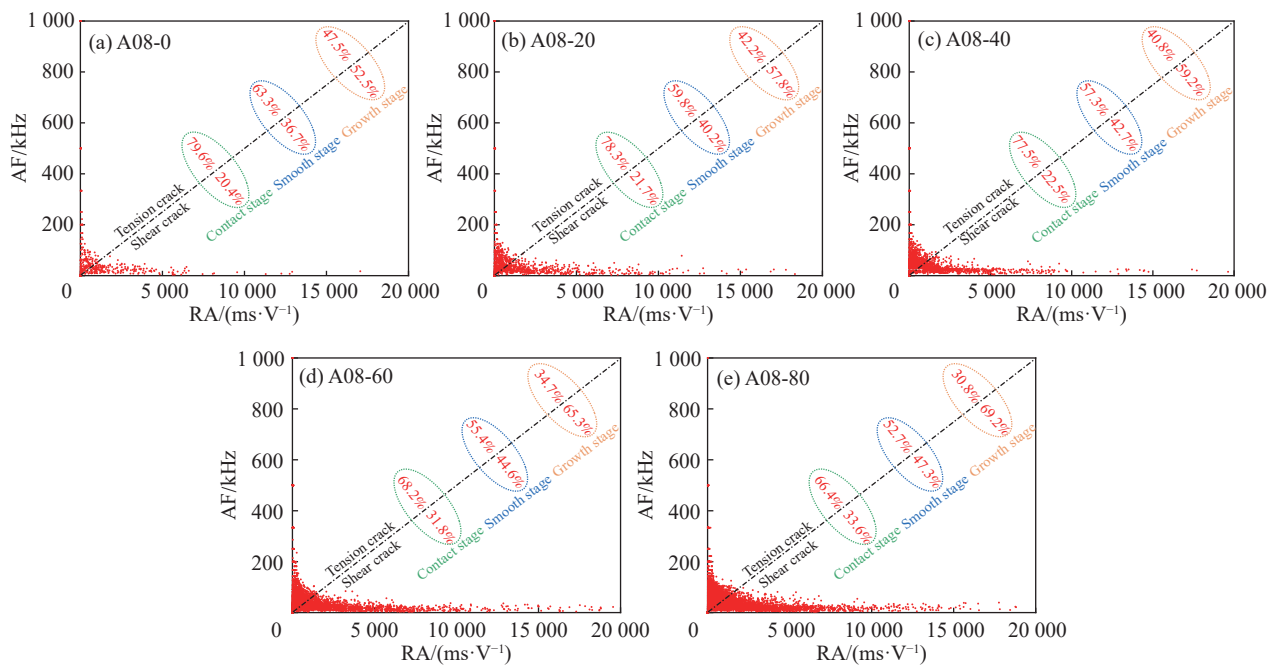


图9 不同冻融循环次数下A08泡沫混凝土声发射上升角(RA)-平均频率(AF)值

Fig. 9 Acoustic emission rise angle (RA)-average frequency (AF) values of A08 foam concrete with different number of freeze-thaw cycles

短不一。因此，本文通过改进的  $b$  值计算方法分析不同冻融循环次数下泡沫混凝土试件的声发射信号分布特征，计算公式如下<sup>[28]</sup>：

$$b = \frac{\lg N(\mu - \alpha_1 \sigma) - \lg N(\mu + \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 + \alpha_2) \sigma} \tag{1}$$

式中： $N$ 为声发射事件数，本文取20； $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为经验常数，一般取1； $\mu$ 为  $N$ 次声发射事件平均振幅 (dB)； $\sigma$ 为  $N$ 次声发射事件振幅标准方差； $N(\mu - \alpha_1 \sigma)$ 为振幅高于  $(\mu - \alpha_1 \sigma)$  的累积声发射撞击数； $N(\mu + \alpha_2 \sigma)$ 为振幅高于  $(\mu + \alpha_2 \sigma)$  的累积声发射撞击数。

图10为不同冻融循环次数下泡沫混凝土声发射  $b$  值分布图。可知，声发射  $b$  值随加载进程的增加呈波动变化，大致可分为I、II和III3个阶段，反映了裂隙的萌生扩展及贯通过程。I为上升阶段，该阶段主要表现为声发射  $b$  值逐渐上升，表明此时混凝土试件内部微裂纹开始形成和扩展，小尺度破裂数量增多；II为波动阶段，表现为声发射  $b$  值在一定阈值范围内波动，表明该阶段内小尺度与大尺度的裂纹扩展交替占据主导地位，混凝土内部裂纹处于一种渐进式稳定扩展演化过程，且能量发生阶段性的累积；III为下降阶段，此阶段内声发射  $b$  值逐渐下降，但声发射信号密度显著增加，声发射活跃度上升，该阶段内混凝土内部微裂纹聚集贯通形成大尺度破裂面，宏观

裂纹扩展较剧烈，并释放大 量应变能。

声发射  $b$  值下降阶段的出现标志着混凝土内部破裂现象由小尺度向大尺度进行转变，其变化趋势是混凝土破裂失稳的重要指示<sup>[29]</sup>。通过对声发射  $b$  值下降阶段分界点进行分析可知，0、20、40、60和80次冻融循环的声发射  $b$  值下降阶段分别出现在加载进程的92.3%、89.1%、88.5%、76.5%和72.3%，随冻融循环次数的增加， $b$  值下降阶段分界点在时间域上发生前移，表明冻融环境能够加剧泡沫混凝土内部损伤，迫使其内部提前发生大尺度破裂现象，这也与前述振铃计数变化规律一致。

4 结论

- (1) 冻融条件下泡沫混凝土的压缩破坏过程曲线呈现明显的阶段效应，且试件经历的冻融循环次数越多，延性破坏特征越明显，内部缺陷发展越迅速。
- (2) 泡沫混凝土压缩破坏过程的数字图像相关(DIC)特征表明，随冻融循环次数的增加，试件应变集中带的面积呈现递增的趋势，应变场均值在逐渐下降，表面裂缝由垂直的贯穿型单一裂缝向倾斜的剪切型多裂缝发展。
- (3) 冻融环境下泡沫混凝土压缩破坏过程的声发射振铃计数呈现接触阶段、平静阶段、陡增阶

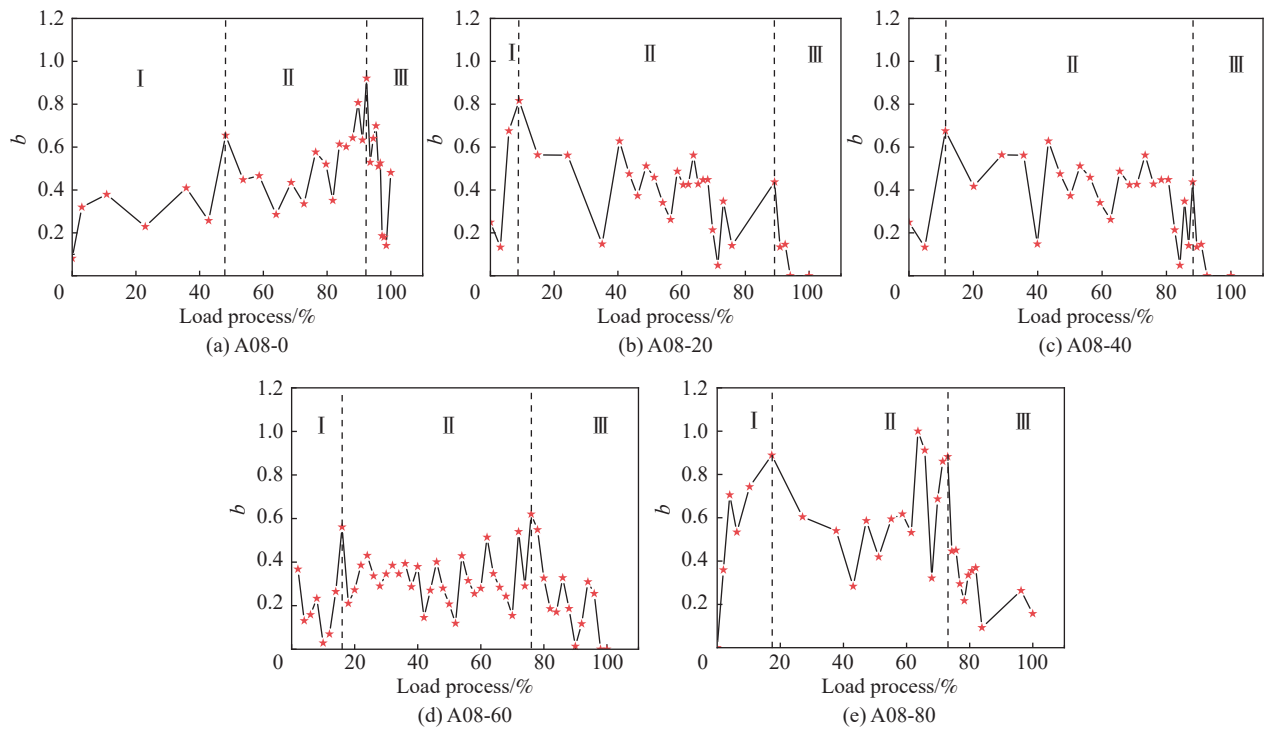


图 10 不同冻融循环次数下 A08 泡沫混凝土声发射  $b$  值  
Fig. 10 Acoustic emission  $b$ -value of A08 foam concrete with different number of freeze-thaw cycles

段三阶段变化规律；冻融为 0、20、40、60 和 80 次的泡沫混凝土试件相对峰值荷载分别为 0.95、0.90、0.88、0.84 和 0.75，最终破坏时剪切裂缝所占比例分别为 52.5%、57.8%、59.2%、65.3% 和 69.2%，声发射  $b$  值下降阶段分别出现在加载进程的 92.3%、89.1%、88.5%、76.5% 和 72.3%；声发射上升角 (RA)-平均频率 (AF) 值和  $b$  值的分布规律表明，冻融环境能够加速泡沫混凝土由张拉破坏向剪切破坏的转变，迫使材料内部提前发生大尺度破裂现象。

(4) DIC 技术在泡沫混凝土试件破坏过程中的微裂纹演化分析方面发挥了重要作用。此外，声发射 (AE) 和 DIC 的结果相辅相成，它们的结合有助于全面了解冻融环境下泡沫混凝土微裂缝的发展规律和损伤破坏机制。

参考文献：

[1] 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. Uni-axial tensile and quasi-static compressive properties of basalt fiber reinforced foam concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1569-1585(in Chinese).

[2] SHI X N, HUANG J J, SU Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 11889.  
[3] 刘鑫, 姚云龙, 张思卿, 等. 浇筑期温度对泡沫混凝土性能和微孔结构的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 1123-1131.  
LIU Xin, YAO Yunlong, ZHANG Siqing, et al. Influence of temperature on the performance and microporous structure of foamed concrete during the pouring period [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 1123-1131(in Chinese).  
[4] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.  
SU Buyun. Mechanical properties of foam concrete and its elastic-plastic damage intrinsic study [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017(in Chinese).  
[5] 尚帅旗, 李丹, 陈星明, 等. 泡沫混凝土的单轴抗压力学特性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 24-29.  
SHANG Shuaiqi, LI Dan, CHEN Xingming, et al. Uniaxial compressive properties of foam concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(12): 24-29(in Chinese).  
[6] 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.

Size effect of foam concrete subjected to quasi-static compression[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(18): 18076-18082, 18095(in Chinese).

[ 7 ] 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).

[ 8 ] 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).

[ 9 ] CHAO S, YU Z, JIAN G, et al. Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 833-839.

[10] BAYRAKTAR O Y, SOYLEMEZ H, KAPLAN G, et al. Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and freeze-thaw[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302: 124229.

[11] 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).

[12] 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).

[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 & Technology*, 2018, 47(4): 742-747(in Chinese).

[14] 郭玉柱, 陈徐东, 胡良鹏, 等. 花岗岩-喷射混凝土梁损伤的声发射可视化表征 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(8): 90-99.

GUO Yuzhu, CHEN Xudong, HU Liangpeng, et al. Visualized characterization of damage in granite-shotcrete beams based on acoustic emission[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(8): 90-99(in Chinese).

[15] 张伟光, 钟靖涛, 于建新, 等. 基于机器学习和图像处理的路面裂缝检测技术研究 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2021, 52(7): 2402-2415.

ZHANG Weiguang, ZHONG Jingtao, YU Jianxin, et al. Research on pavement crack detection technology based on convolution neural network[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2021, 52(7): 2402-2415(in Chinese).

[16] 许颖, 樊悦, 王青原, 等. 基于 DIC 的聚丙烯纤维增强混凝土断裂过程分析 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52(2): 103-111.

XU Ying, FAN Yue, WANG Qingyuan, et al. Fracture process analysis of polypropylene fiber reinforced concrete based on DIC[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(2): 103-111(in Chinese).

[17] 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 People's Republic of China. Foam concrete: JG/T 266—2011[S]. Beijing: Standard Press of China, 2011(in Chinese).

[18] 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 People's Republic of China. Test procedure for hydraulic concrete: SL/T 352—2020[S]. Beijing: Standard Press of China, 2020(in Chinese).

[19] 苏占东, 孙进忠, 夏京, 等. 冻融循环对花岗岩声发射特性影响的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(5): 865-874.

SU Zhandong, SUN Jinzhong, XIA Jing, et al. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the acoustic emission properties of granite[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(5): 865-874(in Chinese).

[20] 刘慧, 蔺江昊, 杨更社, 等. 冻融循环作用下砂岩受拉损伤特性的声发射试验 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 830-839.

LIU Hui, LIN Jianghao, YANG Gengshe, et al. Acoustic emission test on tensile damage characteristics of sandstone under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(4): 830-839(in Chinese).

[21] 宋彦琦, 马宏发, 刘济琛, 等. 冻融灰岩单轴声发射损伤特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 2603-2614.

SONG Yanqi, MA Hongfa, LIU Jichen, et al. Uniaxial acoustic emission damage characterization of freeze-thawed chert[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 2603-2614(in Chinese).

[22] CHOI W C, YUN H D. Acoustic emission activity of CFRP-

- p>strengthened reinforced concrete beams after freeze-thaw cycling[J].
- [Cold Regions Science and Technology](#)
- , 2015, 110: 47-58.
- [23] QIU J, PAN D, GUAN X, et al. Acoustic emission characteristics of compression damage of coal gangue concrete after freeze-thaw cycles[J]. [Journal of Building Materials](#), 2018, 21(2): 196-201.
- [24] 陈波, 陈家林, 强晟, 等. 冻融环境下泡沫混凝土声发射试验研究 [J]. [华中科技大学学报 \(自然科学版\)](#), 2023, 51(8): 41-46. CHEN Bo, CHEN Jialin, QIANG Sheng, et al. Acoustic emission test study of vaporized concrete under freeze-thaw environment[J]. [Journal of Huazhong University of Science and Technology \(Natural Science Edition\)](#), 2023, 51(8): 41-46(in Chinese).
- [25] ZHOU X, YANG Y, LI X, et al. Acoustic emission characterization of the fracture process in steel fiber reinforced concrete[J]. [Computers and Concrete](#), 2016, 18(4): 923-936.
- [26] 李京军, 闫琨, 牛建刚. 冻融作用对自密实轻骨料混凝土声发射特性影响 [J]. [工程力学](#), 2022, 39(9): 133-140, 169. LI Jingjun, YAN Jun, NIU Jiangang. Effect of freezing and thawing on acoustic emission characteristics of self-compacting lightweight aggregate concrete[J]. [Engineering Mechanics](#), 2022, 39(9): 133-140, 169(in Chinese).
- [27] 刘伟琪, 陈波, 陈家林. 基于声发射的泡沫混凝土受压损伤特性试验研究 [J]. [水利水电科技进展](#), 2023, 43(1): 50-55, 62. LIU Weiqi, CHEN Bo, CHEN Jialin. Experimental study on compressive damage characteristics of autoclaved concrete based on acoustic emission[J]. [Progress of Water Resources and Hydropower Science and Technology](#), 2023, 43(1): 50-55, 62(in Chinese).
- [28] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究 [J]. [岩土力学](#), 2020, 41(7): 2324-2332. GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Research on the evaluation index of granite splitting damage based on acoustic emission rise time/amplitude and average frequency value[J]. [Geotechnics](#), 2020, 41(7): 2324-2332(in Chinese).
- [29] 宋勇军, 程柯岩, 孟凡栋. 冻融作用下裂隙岩石损伤破坏声发射特性研究 [J]. [采矿与安全工程学报](#), 2023, 40(2): 408-419. SONG Yongjun, CHENG Keyan, MENG Fandong. Acoustic emission characterization of fractured rock damage under freeze-thaw[J]. [Journal of Mining and Safety Engineering](#), 2023, 40(2): 408-419(in Chinese).