含充填裂隙冻结砂岩损伤破坏的声光联合研究*

赵勇[1]，阎宗岭[2]，康胜清[1]，张小松[2]，刘佳龄[3]，聂飞雪[3]，杨永浩[4]

（1.重庆高速建设管理有限公司， 重庆 401147；
2.招商局重庆交通科研设计院有限公司， 重庆 400067；
3.重庆市交通建设管理有限公司第四分公司， 重庆 402558；
4.重庆交通大学 土木工程学院， 重庆 400074）

摘要：高寒地区岩石内部存在水-冰相变、冰楔作用、填充物溶解/结晶等复杂物理化学作用，易导致含充填裂隙岩石产生不可逆损伤，严重威胁高寒地区露天矿边坡与交通基础设施的安全稳定。以含充填裂隙冻结砂岩（FSFF）为研究对象，采用声光联合测试技术，研究裂隙长度和裂隙倾角对岩样宏观力学特性、表面应变场及声发射（AE）参数的影响。结果表明：随裂隙长度增加，岩样抗压强度呈持续降低趋势，岩样裂纹扩展以S1、S3型剪切裂纹与M型拉伸-剪切混合裂纹为主；当裂隙长度较短时，岩样AE振铃计数的骤升集中于裂纹扩展阶段，随裂隙长度增加，岩样振铃计数骤升现象延伸至弹性阶段和裂纹扩展阶段；随裂隙倾角增大，岩样抗压强度呈先减小后增大的变化规律，岩样内部AE振铃计数骤升事件增多，声发射事件的空间分布越来越分散；岩样裂纹扩展以S1、S2、S3型剪切裂纹和M型拉伸-剪切混合裂纹为主；含冻结充填裂隙砂岩破坏模式以剪切破裂为主，岩样的抗压强度越低，内部剪切裂纹所占比例越大。研究结果可为寒区裂隙岩体的工程稳定性评估提供理论依据。

关键词：高寒地区；含充填裂隙冻结砂岩；力学特性；声发射；数字图像相关技术

中图分类号：TD315 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)08-0193-13

Acousto-Optic Combined Study on Damage and Failure of Frozen Sandstone with Filling Fractures

Zhao Yong[1], *Yan Zongling*[2], *Kang Shengqing*[1], *Zhang Xiaosong*[2], *Liu Jialing*[3], *Nie Feixue*[3], *YangYonghao*[4]

(1.Chongqing Expressway Construction Management Co., Ltd., Chongqing 401147, China;
2.China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China;
3.Chongqing Transportation Construction Management Co., Ltd., Fourth Branch, Chongqing 402558, China;
4.School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In high-altitude cold regions, complex physicochemical processes such as water-ice phase transitions, ice wedging, and filler dissolution/crystallization occur within rocks, which can easily lead to irreversible damage in rocks with filling fractures, seriously threatening the safety and stability of open-pit mine slopes and transportation infrastructure in these regions. Taking frozen sandstone with filling fractures (FSFF) as the research object, the acousto-optic combined testing technique was employed to investigate the effects of fracture length and fracture angle on the macroscopic mechanical properties, surface strain field, and acoustic emission (AE) parameters of the rock samples. The results show that as the fracture length increases, the compressive strength of the rock samples exhibits a continuously decreasing trend, and the crack propagation in the rock samples is dominated by S1 and S3 type shear cracks and M type tensile-shear mixed cracks. When the fracture length is short, the sharp increase in the AE ring count of the rock samples is concentrated in the crack propagation stage. As the fracture length increases, the phenomenon of the sharp increase in the ring count extends to the elastic stage and the crack propagation stage. With the increase in the fracture angle, the compressive strength of the rock samples first decreases and then increases. The number of sharp increase events in the AE ring count within the rock samples increases, and

* **收稿日期**：2025-08-12

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFB2604404）；重庆市交通科技项目（CQJT-CZKJ2023-05）；新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2022B03033-2）；重庆市博士后研究项目特别资助（2023CQBSHTB3065）

作者简介：赵勇（1978—），男，湖北公安人，硕士，高级工程师，主要从事高速公路建设与运营管理方向的研究工作。E-mail：zhaoyong@cegc.com.cn

the spatial distribution of AE events becomes increasingly dispersed. The crack propagation in the rock samples is dominated by S1, S2, and S3 type shear cracks and M type tensile-shear mixed cracks. The failure mode of FSFF is primarily shear rupture. The lower the compressive strength of the rock sample, the greater the proportion of internal shear cracks. The research results can provide a theoretical basis for the engineering stability assessment of fractured rock masses in cold regions.

Key words: High-altitude cold region, Frozen sandstone with filling fractures, Mechanical property, Acoustic emission, Digital image correlation technology

0 引言

高寒地区岩体受风化作用、地质构造和人类活动的共同影响,岩体内部发育大量的节理和裂缝,且岩体内部裂隙形态复杂多样[1]。岩体裂缝内部通常被破碎的岩石碎片或黏土等物质填充[2]。高寒环境下,岩石内部发生水-冰相变、冰楔作用、填充物溶解/结晶等复杂物理化学作用,会导致含充填裂隙岩石产生不可逆的冻融损伤[3-4],劣化岩体的力学性能,进而造成边坡失稳、隧道围岩冻胀垮塌、地面沉降等地质灾害,严重威胁高寒地区露天矿边坡和交通基础设施的长期安全与稳定。

目前,针对低温环境下岩石力学性能的研究多围绕冻融循环的作用机制展开。Tan 等[5]研究了冻融-荷载联合作用下裂隙砂岩的力学特性变化规律,建立了载荷作用下的冻融砂岩损伤演化方程。孔维秋[6]采用室内试验与数值模拟相结合的研究方法,系统研究了填充节理岩体的冻融损伤特性与破坏特征。但现有研究对冻结岩石损伤破坏演化机理的探讨仍不充分,尤其是温度效应[7]、水冻结产生的冻胀力[8-9]对岩样变形及损伤破坏影响机制未得到充分揭示。

针对含充填裂隙岩石,国内外学者围绕力学性能与裂纹扩展行为开展了大量研究工作。Zhuang 等[10]通过对类岩石试件进行单轴压缩试验,对比分析了含充填裂隙与未含充填裂隙试件的扩展规律,发现裂纹萌生阶段含充填裂隙的岩样应力水平更高,裂纹倾角更小。Miao 等[11]研究了充填材料与裂隙倾角对裂隙砂岩力学特性和裂缝扩展行为的影响。然而,高寒地区含充填裂隙岩石在冬季多处于冻结状态,目前针对含充填裂隙冻结岩石力学特性与损伤特征的研究仍然不充分。

现有冻结岩石损伤破坏特性的测试方法主要包括核磁共振、扫描电镜、CT 实时测试等[12],如 An 等[13]开展了低温条件下岩石断裂特征的原位观测,对比了 Cryo-SEM 与标准 SEM 对煤、砂岩等低温裂缝形态的成像差异。宋勇军等[14]对 20 ℃、-5 ℃、-10 ℃条件下的红砂岩开展单轴加载试验,并在加载过程中进行多次 CT 动态扫描,获取了岩样 CT 扫描图像和扫描层数据,揭示了冻结岩石的宏观力学特性与损伤演化机理。但上述试验方法难以实现对岩石压缩过程的实时动态监测。数字图像相关(DIC)技术测试可获取岩石试样空间维度的损伤可视化(如裂缝形态、应变梯度)数据,声发射(AE)监测可捕捉时间维度的动态损伤演化信息(如裂纹萌生时序、能量累积)。二者结合可实现单轴压缩过程中岩石损伤的"空间-时间"协同监测。

本文以含充填裂隙冻结砂岩(Frozen Sandstone with Filling Fractures,FSFF)为研究对象,采用声光力学(Acousto-Optic Mechanics,AOM)技术,研究单轴压缩过程中的岩样表面应变场演化规律与 AE 参数(振铃计数、Ib 值、活度和 RA-AF 值)的时空响应特征,揭示裂隙长度和裂隙倾角对 FSFF 力学特性、变形破坏机理及损伤演化特征的影响。研究成果不仅可提升高寒地区露天矿边坡和交通基础设施的安全管理水平,还能丰富寒区裂隙岩石力学的理论体系。

1 材料、方法和试验装置

1.1 岩样制备

本文岩样为灰色砂岩,该类岩石广泛分布于季节性冻土地区。试验用砂岩的主要矿物组成为石英(10.5%)、斜长石和钾长石(73.7%)、黑云母(14.3%)、滑石(1.5%);岩样天然密度为 2.36 g/cm^3,饱和含水率为 5.13%,完整砂岩的单轴抗压强度约为 26.4 MPa。参照国际岩石力学学会(ISRM)推荐的试验测试标准[15],砂岩试样尺寸(长×宽×高)为 70 mm×70 mm×140 mm 的长方体,采用端面磨床对岩样端面进行抛光处理,所有岩样的表面粗糙度均小于 0.02 mm,相邻表面之间的垂直度偏差小于 8°。采用超薄岩石切割片在岩样上预制不同几何状态的贯通裂隙,所有裂隙张开度统一为 2.0 mm,如图 1 所示。其中 α 为裂隙倾角,L 为裂隙长度。

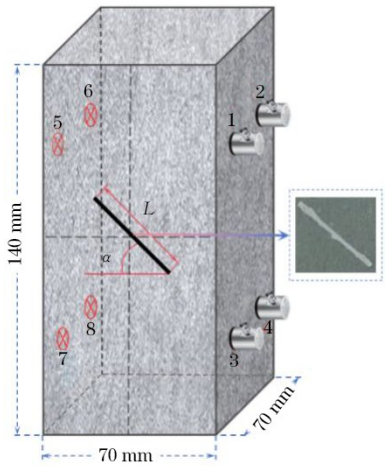


图 1　岩样裂缝分布示意

Fig.1　Fracture distribution of rock specimen

裂隙内填充石膏(磷石膏：水＝1：0.4)，充填石膏的单轴最大抗压强度为 2.4 MPa。将加工完成的岩样置于 105 ℃的烘干箱内恒温干燥 24 h，取出后放入干燥器内冷却至室温。随后将岩样放入真空饱和装置中采用自来水进行真空饱水。抽真空 4 h 后保持负压状态，将岩样继续在水中浸泡 24 h。将饱水岩样采用保鲜膜密封处理后，置于温度为－10 ℃的低温冷藏箱中冻结 24 h，取出后立刻开展相关试验。

1.2　试验方案

本文以含充填裂隙冻结砂岩为研究对象，设置 2 组对照试验方案，分别研究裂隙长度(L＝20 mm、30 mm、40 mm 和 50 mm)与裂隙倾角(α＝30°、45°、60°和 90°)对 FSFF 的力学特性、变形破坏机理及损伤演化特征的影响，具体试验方案见表 1。每个工况设置 3 个平行试样，最终抗压强度取试样的平均值。

表 1　砂岩试件裂隙状态参数

Table 1　Fracture state parameters of sandstone specimens

试验组数	充填物类型	裂隙长度 L/mm	裂隙倾角 α/(°)
1	石膏	20	45
		30	
		40	
		50	
2	石膏	40	30
			45
			60
			90

试验开始前，在－10 ℃低温环境中粘贴应变片和 AE 采集器，然后将试件置于岩石力学试验系统进行加载。其中，为降低岩石预制裂隙内部冰融化对试验结果的影响，在岩石力学试验系统中配备低温保温箱，保温箱上部切割圆洞保证压力机压头部分与试件接触，并且保温箱内部有低温酒精在塑料管内循环流动，控制保温箱内部温度在－10 ℃左右。

1.3　试验设备

本次试验采用连续声光力学同步观测系统，包括加载系统、声发射 AE 监测系统和光学监测系统三部分(见图 2)。在测试中，加载系统、AE 系统和光学监测系统三个系统同时触发，获得数据。

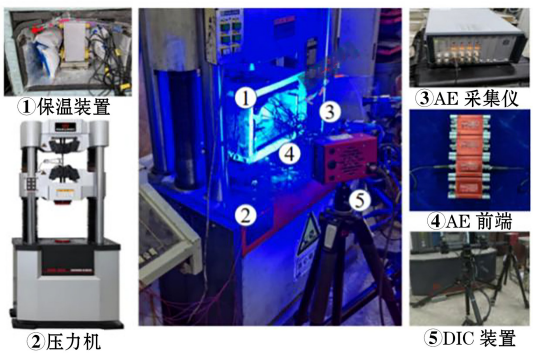


图 2　试验设备

Fig.2　Test experiments

(1) 加载系统。

单轴压缩试验在 MTS 815 Flex Test GT 岩石力学试验系统上开展，采用准静态位移加载方式。本次试验以位移控制方式进行单轴压缩并采集加载过程中载荷信息，正式加载前在垂直方向施加 0.4 kN 的预应力，确保岩样与压头端面完全接触，加载速率为 0.004 mm/s，同步采集载荷与位移数据。

(2) AE 系统。

材料受压基体产生微变形时，AE 信号会以瞬态弹性波形式释放应变能，该物理现象即为声发射[16]，其信号特征参数主要包括上升时间、振铃计数、能量、幅值、频率等。全程监测岩石压缩过程中岩石试样的 AE 参数，可有效地识别岩样中裂纹的萌生和扩展，反映裂缝产生时岩样中各单元之间的损伤演化、断裂扩展和失稳破坏规律[17-19]。本研究采用了德国物理声学公司的 8 通道声发射监测系统，配置 8 个声发射探头。探头与岩样接触面均匀涂抹 3 号真空封脂作为耦合剂，采用 502 速干胶将探头通过固定装置固定于岩样表面(具体位置见图 1 中红色标记，颜色标识见电子版)，以确保声波传导效率最大化。前置放大器的增益设置为 40 dB，AE 信号放大 100 倍。阈值设置为 40 dB，仅幅值超过阈值的 AE 信号才能被有效记录为声发射事件。采样率为 3 MHz，峰值定义时间(PDT)为 300 μs，

撞击定义时间(HDT)为 800 μs,撞击闭锁时间(HLT)为 1 000 μs。

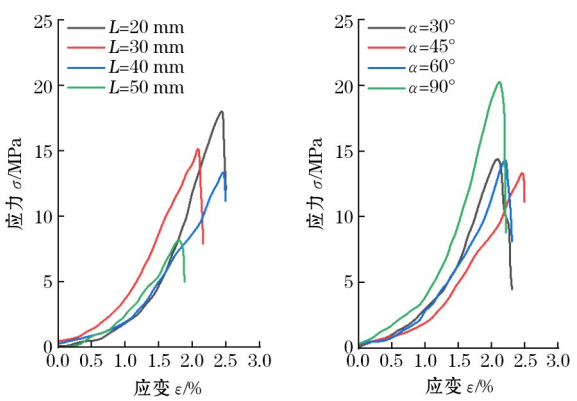
(3) 光学监测系统。

利用 DIC 技术,分析单轴压缩过程中不同形态的 FSFF 界面开裂与变形特性。考虑到岩石的最终破坏发生在 0.1 s 内,故高速摄像机的采集频率设置为 20 Hz,采集系统的图像分辨率为 1 392 px×1 040 px,像素物理尺寸为 4.5 μm×4.5 μm,透镜的焦距为 300 mm。采集的图像序列采用 GOM Correlate 软件处理,得到岩样应变场的演变规律[20]。

2 试验结果与分析

2.1 不同裂隙形态下 FSFF 的力学特性

图 3 为不同裂隙状态下 FSFF 的单轴压缩应力-应变曲线。从图 3 可以看出,低应力阶段应力-应变曲线略向上弯曲,当应力增加到一定数值后,应力-应变曲线逐渐变为直线,直至岩石发生失稳破坏。基于岩样的应力-应变曲线,可将 FSFF 的变形破坏特征划分为压实阶段、弹性阶段、裂纹扩展阶段及破坏阶段。随着裂隙长度的增加,岩样单轴抗压强度持续降低。其中,裂隙长度 $L=20$ mm 时的岩样抗压强度最高,为 18.18 MPa。裂隙长度 $L=50$ mm 的岩样抗压强度最小,为 8.30 MPa。随着裂隙倾角的增大,岩样的抗压强度呈先减小后增大的变化趋势。其中,裂隙倾角为 45°时岩样抗压强度最小,为 13.50 MPa,裂隙倾角为 90°时岩样抗压强度最大,为 20.54 MPa。上述结果表明,裂隙倾角和裂隙长度均对岩样抗压强度产生显著的影响。



(a) 不同裂隙长度　(b) 不同裂隙倾角

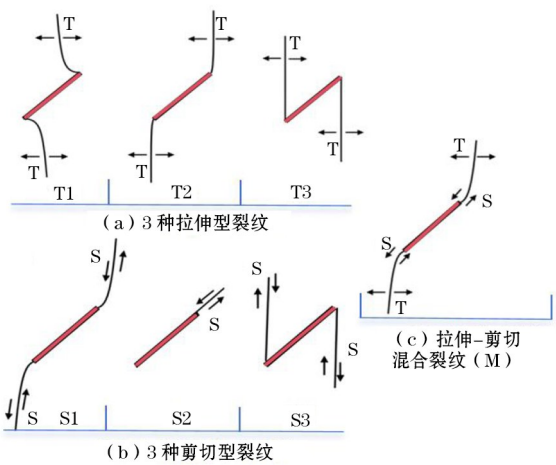
图 3 不同裂隙状态下 FSFF 的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of FSFF under different fracture conditions

2.2 不同裂隙形态下 FSFF 的裂纹特征

在裂纹演化分析中,通常根据裂纹的萌生位置和扩展方向对其进行分类[21-24]。DIC 技术可精准识别肉眼难以观测的裂纹扩展过程。因此,可将不同裂隙状态下 FSFF 应变场的演化与岩样的应力-应变曲线相结合,系统分析岩样中裂纹的萌生、扩展和贯通过程。

单轴压缩条件下,岩样表面可观测到多种不同类型的裂纹(见图 4)。本文采用 Wong 等[25]提出的能够同时区分不同扩展路径和形成机制的裂纹分类体系,该体系包含 7 类裂纹:3 种拉伸型裂纹(T1～T3)、3 种剪切型裂纹(S1～S3)以及 1 种拉伸-剪切混合裂纹(M)。



(a) 3 种拉伸型裂纹　(b) 3 种剪切型裂纹　(c) 拉伸-剪切混合裂纹(M)

图 4 裂纹类型

Fig.4 Crack types

各裂纹的分类体系可概括如下。

(1) 拉伸裂纹。T1 型拉伸裂纹是在两个裂纹尖端处或附近开始的第一个裂纹,随后向轴向应力方向扩展。呈翼形形态,起裂位置与试件的裂纹倾角相关。该类裂纹以稳定的方式扩展,几乎贯穿整个加载过程。T2 型拉伸裂纹的起裂角小于 T1 型拉伸裂纹,且沿缺陷向垂直载荷方向移动。T3 型拉伸裂纹呈反翼形态,通常在峰后阶段萌生。拉伸裂纹的破裂面光滑,无明显粉碎或破碎现象。

(2) 剪切裂纹。剪切裂纹的破裂面表面粗糙,通常伴随破碎与剪切后的材料[26]。S1 型剪切裂纹外观与 T2 型拉伸裂纹相似,但实际裂纹模式完全不同。S2 型剪切裂纹从裂纹尖端萌生,扩展方向与裂纹共面或准共面。S3 型剪切裂纹与 T2 型拉伸裂纹具有相似的外观,同样萌生于裂纹尖端,扩展方向与翼裂纹平行,但延伸方向与 T2 型拉伸裂纹相反。

（3）拉伸-剪切混合裂纹。M 型拉伸-剪切混合裂纹由拉伸段和剪切段组成。

图 5 为不同裂隙长度 FSFF 的应变场演化过程。由图 5 可知，当裂隙长度 $L=20$ mm 时，拉应力首先集中于预制裂隙两端，诱发 T2 型拉伸裂纹萌生；随压力的增大，岩样内部应力重新分布，剪切作用逐渐占据主导，裂纹类型逐渐发展为 S1 型剪切裂纹；在岩样达到最大峰值应力前，预制裂隙两端进一步萌生 S3 型剪切裂纹。峰后阶段，岩样受力薄弱区受剪切力和拉力共同作用，岩样预制裂隙上端新增 M 型拉伸-剪切混合型裂纹，且其张开程度大于前期出现的 S1 型剪切裂纹，最终裂纹贯通岩样。

当裂隙长度 $L=30$ mm 和 40 mm 时，T2 型拉伸裂纹同样先在岩样预制裂隙两端萌生，随后演化为 S1 型剪切裂纹，裂纹不断发展直到岩样达到峰值应力；峰后阶段岩样预制裂隙上下两端均新增 M 型拉伸-剪切混合裂纹，S1 型剪切裂纹和 M 型拉伸-剪切混合裂纹逐渐张开，最终贯穿岩样，其中 M 型拉伸-剪切混合裂纹比最先出现的 S1 型剪切裂纹张开度大。裂隙长度为 $L=30$ mm 和 40 mm 下岩样的最终破坏形态相似，表面均形成与预制裂隙两端相连的 2 条宏观裂缝。

当裂隙长度 $L=50$ mm 时，T2 型拉伸裂纹于岩样预制裂隙两端萌生后，岩样内部应力重新分布，岩样受力薄弱处受剪切力和拉力共同作用，逐渐演化为 M 型拉伸-剪切混合裂纹，但随着轴向荷载的持续增大，岩样表面未萌生其他类型裂纹，仅 M 型拉伸-剪切混合裂纹逐渐张开，直至裂纹贯穿整个岩样。

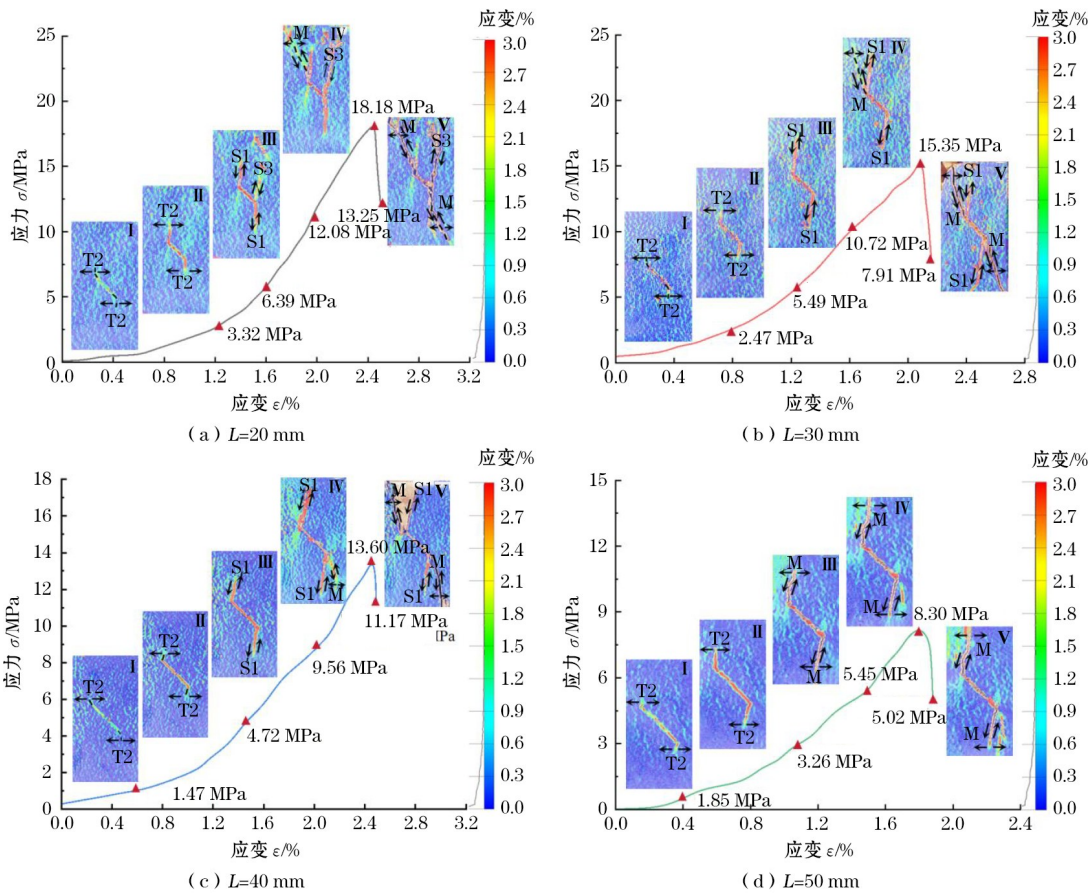


图 5　不同裂隙长度 FSFF 的应变场演化规律

Fig.5　The strain field evolution law of FSFF with different fracture lengths

图 6 为不同裂隙倾角 FSFF 的表面应变场演化规律。由图 6 可知，当裂隙倾角为 30°时，拉应力集中于预制裂隙两端，首先诱发 T2 型拉伸裂纹萌生，随压力逐渐增大，岩样内部应力重新分布使薄弱区受剪切力和拉力共同作用，逐步演化为 M 型拉伸-剪切混合裂纹，同时伴随 S3 型剪切裂纹萌生。当岩样达到最大应力后，S3 型剪切裂纹贯穿岩样，而 M 型拉伸-剪切混合裂纹未贯穿砂岩。

当裂隙倾角为 45°和 60°时，岩样表面均先萌生 T2 型拉伸裂纹，随后演化为 S1 型剪切裂纹。当

岩样达到最大应力后,岩样表面新增 M 型拉伸-剪切混合裂纹,S1 型剪切裂纹和 M 型拉伸-剪切混合裂纹逐渐张开,最终贯穿岩样,其中 M 型拉伸-剪切混合裂纹比最先出现的 S1 型剪切裂纹张开度大。

当裂隙倾角为 90°时,裂纹扩展规律最为特殊,裂纹未从预制裂隙处萌生,而是首先从岩样左上角延伸出一条裂纹,随着压力增大,裂纹竖直向下扩展,且当应力 $\sigma=12.24$ MPa 时,岩样表面左上角新增一条向预制裂隙处扩展的裂纹。当岩样达到最大应力后,岩样右上角出现 2 条裂纹,一条靠近砂岩中间位置并连接预制裂隙,另一条在预制裂隙下方出现了 S3 型剪切裂纹。

从最终破坏形态来看,当裂隙倾角为 30°时,预制裂隙上端发育两条竖直贯穿岩样上端的裂缝,预制裂隙下端发育一条竖直且贯穿岩样下端的裂缝。当裂隙倾角为 45°和 60°时,岩样被 2 条裂缝切割成 3 部分,且当裂隙倾角为 60°时,岩样预制裂隙两端的两条裂缝夹角更小。当裂隙角度为 90°时,岩样被 4 条明显的裂缝切割为多个小块。

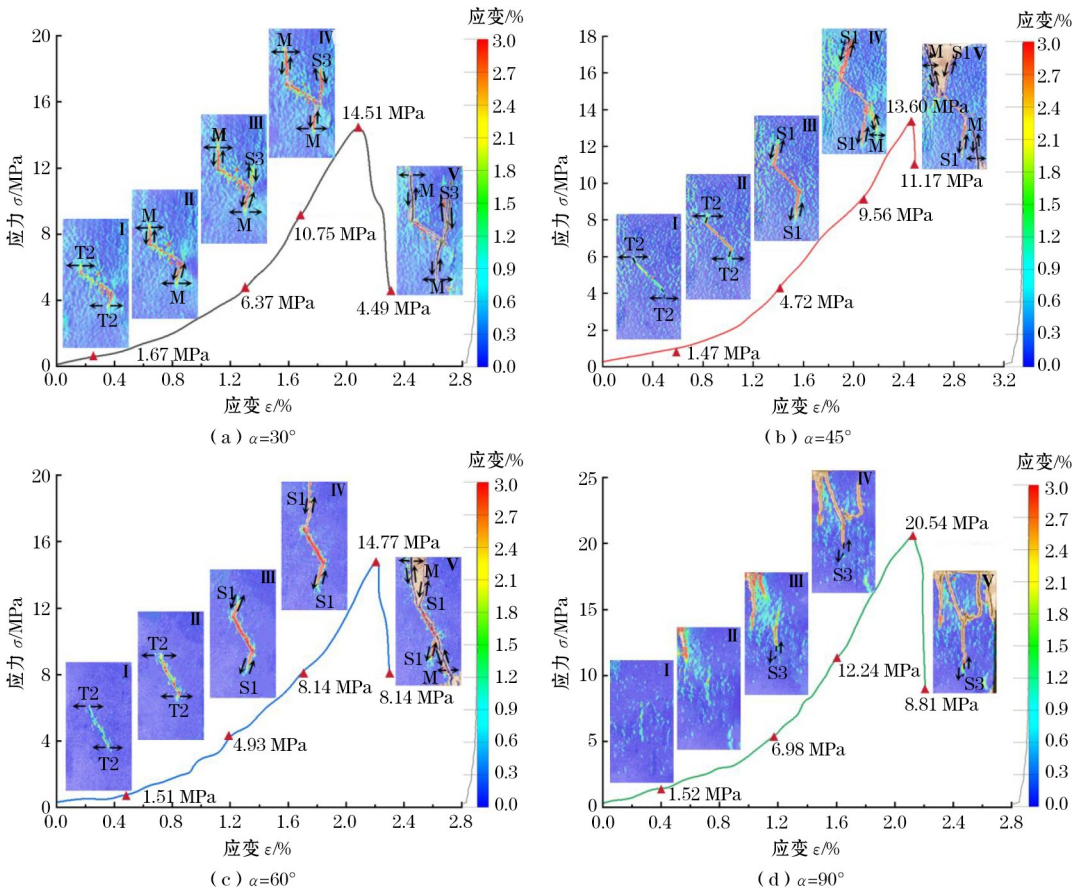


图 6 不同裂隙角度 FSFF 的应变场演化规律

Fig.6 The strain field evolution law of FSFF with different fracture angles

3 不同裂隙形态下 FSFF 的 AE 特征

3.1 AE 振铃计数特征分析

声发射(AE)振铃计数是指 AE 信号超过设定阈值信号的振荡次数,可分为振铃计数和累计振铃计数两类。AE 振铃计数可综合反映声发射信号的强度和频率,是评价 AE 活动的常用指标[27]。图 7 和图 8 为不同裂隙长度和裂隙倾角 FSFF 的轴向压力-时间曲线、AE 振铃计数和 AE 累计振铃计数。图中Ⅰ~Ⅳ分别对应岩样单轴压缩过程中的压实阶段、弹性阶段、裂纹扩展阶段和失稳破坏阶段。

由图 7 可知,压实阶段不同裂隙长度 FSFF 的 AE 振铃计数变化规律基本一致,该阶段初始轴向应力较低,岩样内部原生孔隙与微裂纹被压实闭合,基本无振铃计数较大的 AE 事件发生,AE 振铃计数基本没有发生变化,累计振铃计数曲线增长缓慢。

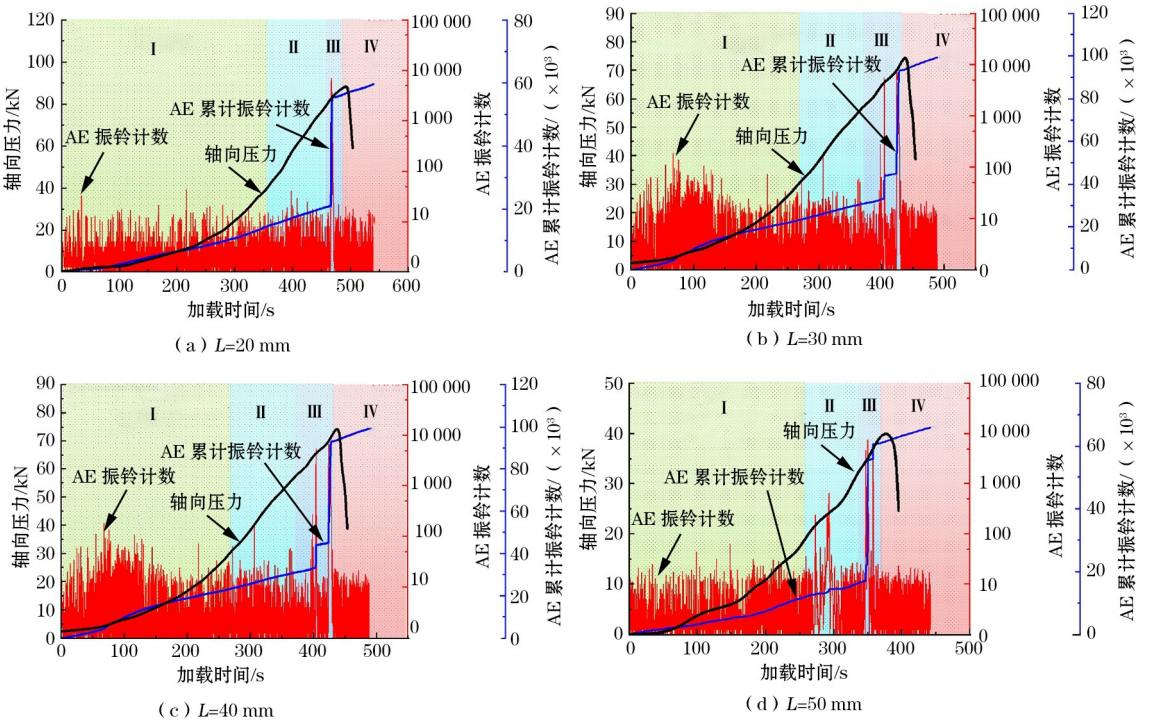
弹性阶段,岩样内部先天裂纹闭合后,矿物晶体颗粒之间发生可恢复的弹性变形,同时伴随着晶体

颗粒间的摩擦和滑动。裂隙长度较短的 FSFF(L=20 mm、L=30 mm)，AE 累计振铃计数逐渐增加，曲线斜率平缓，裂隙长度较长的 FSFF(L=40 mm、L=50 mm)内部萌生了新的裂纹，在此阶段可检测到 AE 振铃计数较大的声发射事件。

裂纹扩展阶段，岩样内部宏观裂纹逐渐形成并迅速扩展，不同裂隙长度下 FSFF 的 AE 累计振铃计数快速上升，该阶段岩样内部的孔隙和裂纹相互贯通，声发射事件数量显著多于弹性阶段，曲线增速提升显著。

失稳破坏阶段，不同裂隙长度下，FSFF 的 AE 累计振铃计数均趋于平稳，累计振铃计数拐点对应的 AE 能量达到峰值，此时岩石发生失稳破坏。当裂隙长度 L=40 mm 和 50 mm 时，FSFF 均在弹性阶段和裂纹扩展阶段 AE 累计振铃计数骤升。

上述结果表明，裂隙长度较短的 FSFF，应变能释放集中在裂纹扩展阶段，裂隙长度较长的 FSFF，应变能释放集中在弹性阶段和裂纹扩展阶段。可见裂隙长度越长，FSFF 的抗压强度越小，越容易损伤。



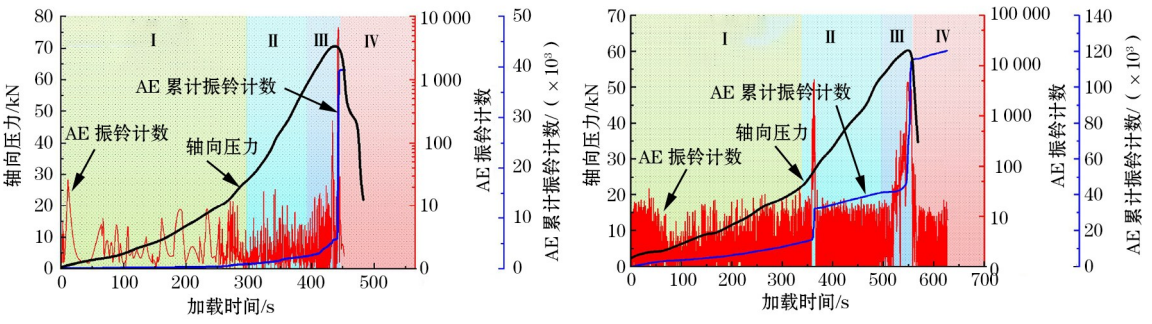
(a) L=20 mm　(b) L=30 mm

(c) L=40 mm　(d) L=50 mm

图 7　不同裂隙长度 FSFF 的轴向压力-时间曲线、AE 振铃计数和 AE 累计振铃计数

Fig.7　Axial pressure-time curves, AE ringing counts and AE cumulative ringing counts of FSFF with different fracture lengths

由图 8 可知，随着裂隙倾角的变化，AE 振铃计数的演化规律存在显著差异。当裂隙倾角为 30°和 60°时，FSFF 岩样 AE 振铃计数的骤升集中在裂纹扩展阶段。当裂隙倾角为 45°和 90°时，FSFF 岩样 AE 振铃计数在弹性阶段和裂纹扩展阶段出现明显增大。其中裂隙倾角 90°的岩样在压实阶段、弹性阶段和裂纹扩展阶段 AE 振铃计数均出现峰值，但其抗压强度高于其余 3 种裂隙倾角的工况。



(a) α=30°　(b) α=45°

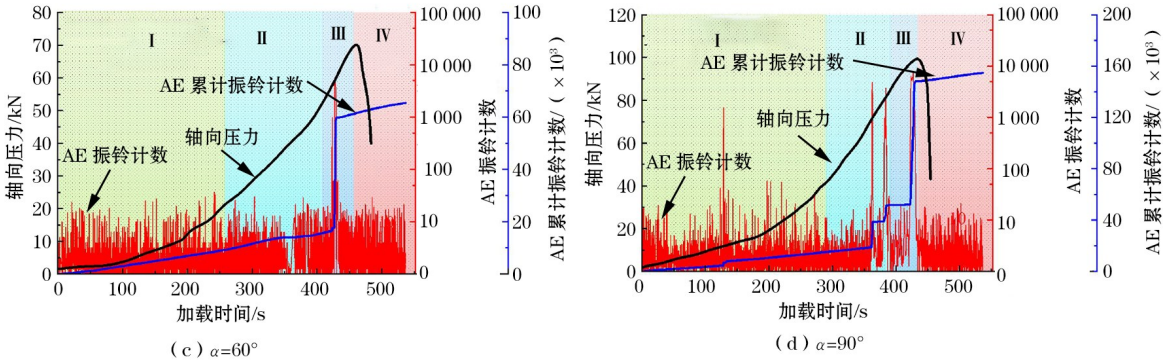


图 8 不同裂隙倾角 FSFF 的轴向压力-时间曲线、AE 振铃计数和 AE 累计振铃计数

Fig.8 Axial pressure-time curves, AE ringing counts and AE cumulative ringing counts of FSFF with different fracture angles

为揭示该现象的内在机制,绘制了不同裂隙倾角 FSFF 的 AE 定位图,如图 9 所示。图中球体尺寸代表声发射事件的能量大小,颜色代表声发射事件发生的时序(颜色标识见电子版)。由图 9 可知,当裂隙倾角为 30°和 45°时,FSFF 的声发射事件集中分布于岩样裂纹扩展区域;当裂隙倾角为 60°时,FSFF 的声发射事件较为分散;当裂隙倾角为 90°时,FSFF 的声发射事件均匀分布于岩样内部。

该规律表明,裂隙倾角为 90°的 FSFF 在整个加载过程中受力更均匀,有效避免了局部应力集中,受力状态接近无裂隙缺陷岩样。而裂隙倾角较小(如 30°~60°)时,岩样的声发射事件多集中于裂隙尖端或沿裂隙面分布,反映出试样局部化损伤和应变能提前释放,最终导致试样强度降低。

结合图 6 中裂隙倾角为 90°的 FSFF 裂缝演变规律可知,由于裂隙面与加载方向近似垂直,在加载初期裂隙面主要承受压应力。裂隙面之间是“面对面”的接触状态,剪切应力分量极小;该应力状态显著抑制了裂隙尖端的应力集中,降低了翼裂纹或次生裂纹的萌生概率,延缓了岩样的整体破坏失稳过程[28]。因此,裂隙倾角为 90°的 FSFF 抗压强度最高。

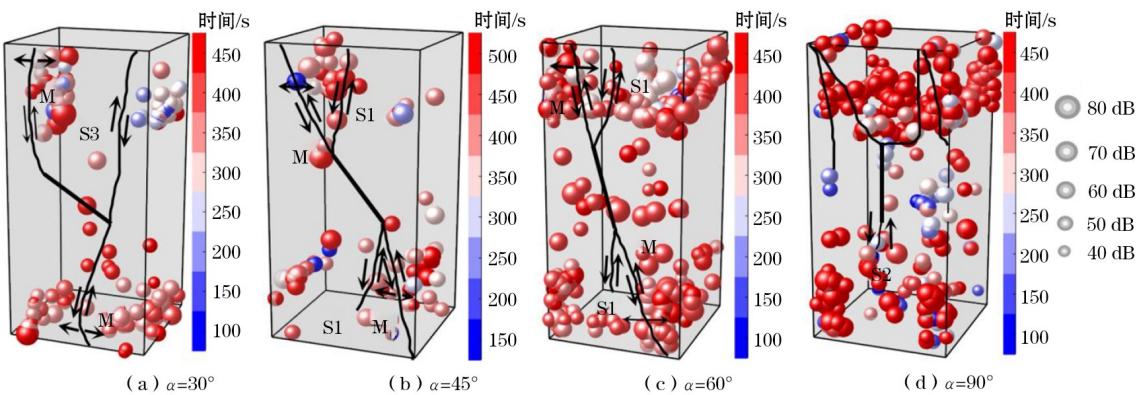


图 9 不同裂隙倾角 FSFF 的 AE 定位

Fig.9 AE localization of FSFF with different fracture angles

3.2 声发射 Ib 值和活度

声发射 Ib 值用于表征岩石内部小尺度破裂事件与大尺度破裂事件的相对比例:Ib 值越大,表明岩样内部以中小破裂事件为主;Ib 值越小,表明岩样内部以大尺度破裂事件为主。声发射 Ib 值计算公式[29]如下:

$$\lg N = a - b(M) \tag{1}$$

$$M = \frac{A_{\mathrm{dB}}}{20} \tag{2}$$

式中:N 为滑动统计窗口内幅度大于 A_{dB} 的 AE 事件的数量;M 为震级;a 为拟合常数;b 为所求的 Ib 值;A_{dB} 表示声发射事件的最大振幅。

在对数据进行处理计算声发射 Ib 值时,对式(1)进行一元线性最小二乘法拟合[30]。

$$Ib=\frac{\sum_{i=1}^{m}M_i\sum_{i=1}^{m}\lg N_i-m\sum_{i=1}^{m}M_i\lg N_i}{m\sum_{i=1}^{m}M_i^2-\left(\sum_{i=1}^{m}M_i\right)^2} \tag{3}$$

式中：m 为震级分档总数；M_i 为第 i 档的震级中值；N_i 为第 i 档震级的声发射事件数。

AE 活度 S 是综合反映事件频率、平均能级与最大能级的参数。可表征 AE 源的集中程度和岩石中活动裂纹的数量。AE 活度 S 较小时，表明岩样内部活动裂纹较少，AE 活度 S 较大时，表明岩样内部活动裂纹较多，AE 活度 S 计算公式[31] 如下：

$$S=0.117\lg(N+1)+0.029\lg\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{0.075m_{si}}+0.000\ 75m_s \tag{4}$$

式中：m_{si} 为每个 AE 事件的震级；m_s 为滑动统计窗口内最大 AE 事件的震级。

本文采用滑动窗口法[32] 分析 AE 事件。滑动窗口长度为 500 个事件，滑动步长为 200 个事件，通过最小二乘法计算每个滑动窗口的 Ib 值。图 10 和图 11 为不同裂隙长度和裂隙倾角 FSFF 的 Ib 值与活度 S 随加载时间的演化规律。从图中可以看出，在压实阶段，Ib 值和活度 S 呈“增大-波动-减小”的变化趋势，说明该阶段裂缝活动强度较低，以小尺度破裂为主，但微裂缝数量逐渐增加。在弹性阶段，Ib 值持续减小，活度 S 持续增大，反映出岩样内部的原生裂纹逐步扩展，晶粒间的摩擦作用增强。在裂纹扩展阶段，Ib 值降至最小值，活度 S 升至最大值，说明该裂纹活动以大尺度破裂为主，高频声发射事件集中爆发。在失稳破坏阶段，Ib 值不断增大，活度 S 不断减小，表明该阶段裂纹扩展已达到最大规模，岩样失稳破坏。

在裂纹扩展阶段，不同裂隙长度 FSFF 的 Ib 值均大幅度减小，活度 S 均大幅度增大，并在该阶段 Ib 值降至最小值，活度 S 达到最大值。当裂隙长度 $L=20$ mm、30 mm、40 mm 和 50 mm 时，FSFF 的 Ib 值在裂纹扩展阶段的降幅分别为 39.2%、38.3%、42.9%和 41.26%，FSFF 的活度 S 在裂纹扩展阶段的升幅分别为 81.4%、81.2%、80%和 79.7%。此外，不同裂隙倾角 FSFF 的 Ib 值和活度 S 在裂纹扩展阶段分别达到了最小值和最大值。当裂隙倾角 $\alpha=30°$、45°、60°和 90°时，FSFF 的 Ib 值在该阶段的降幅分别为 23.2%、42.9%、43.9%和 50.9%，活度 S 在该阶段的升幅分别为 79.5%、80%、97.37%和 117%。结果表明：随 FSFF 的裂隙倾角增大，FSFF 的声发射 Ib 值和活度 S 呈增大趋势。

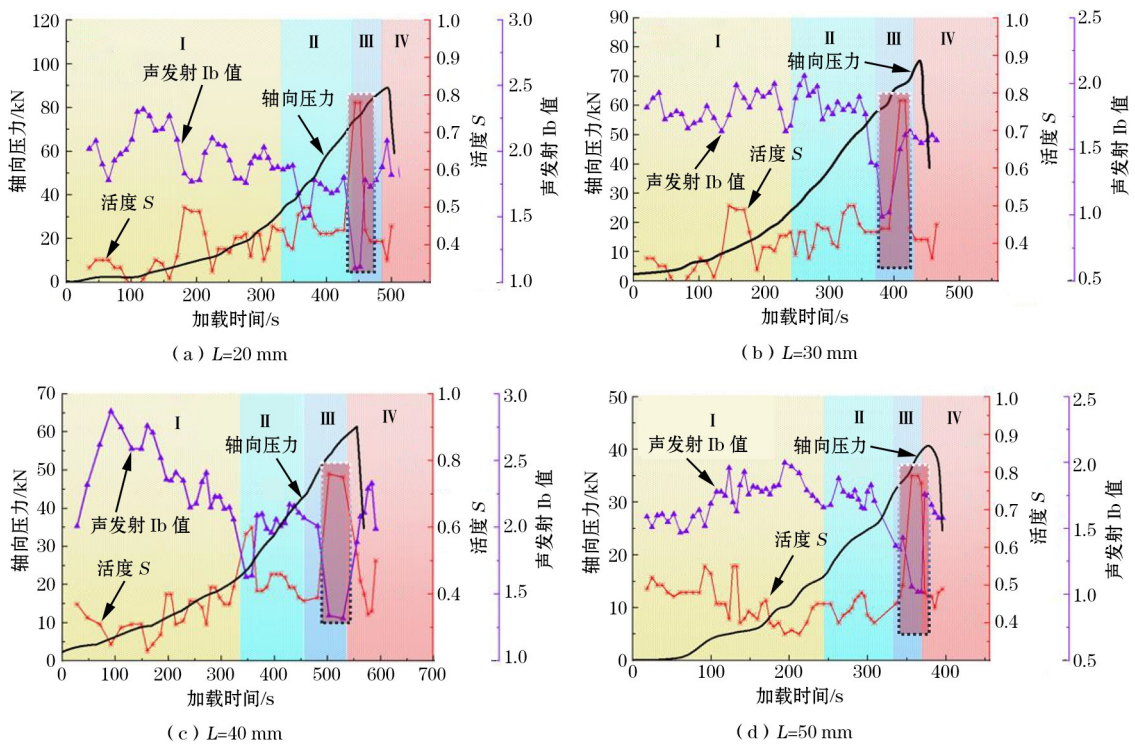


图 10　不同裂隙长度 FSFF 的声发射 Ib 值和活度 S

Fig.10　Acoustic emission Ib value and activity S of FSFF with different fracture lengths

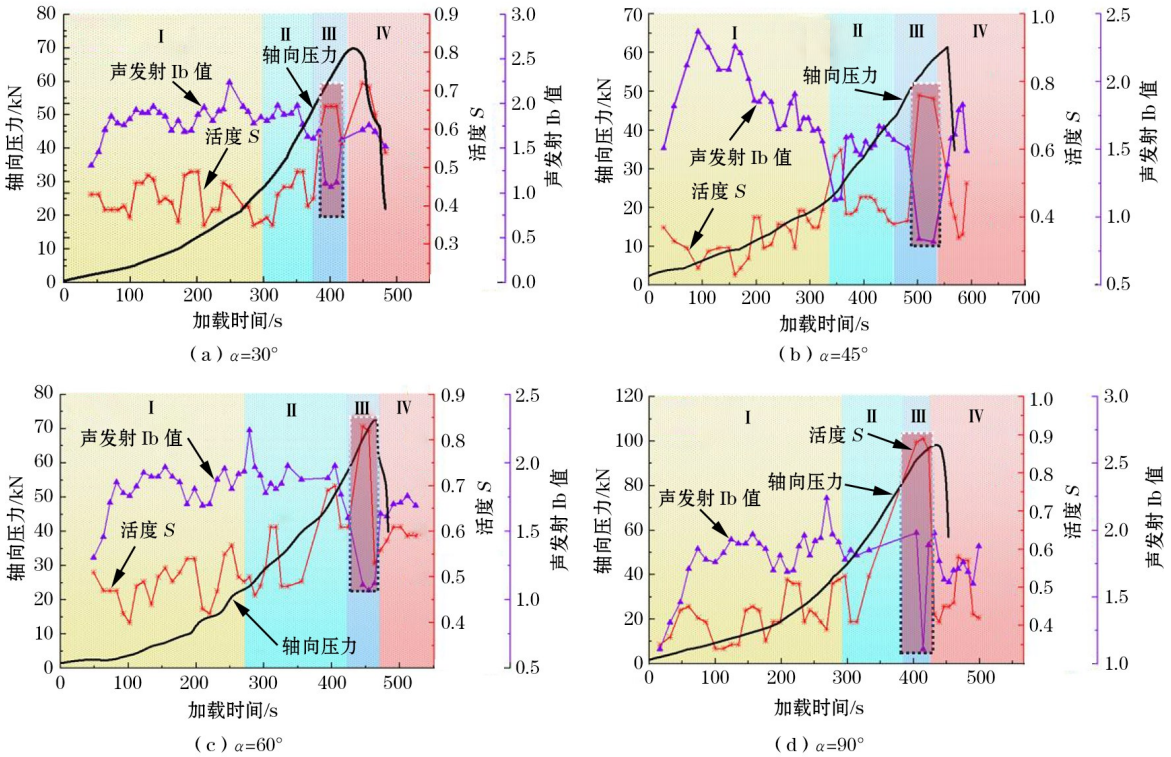


图 11 不同裂隙倾角 FSFF 的声发射 Ib 值和活度 *S*

Fig.11 Acoustic emission Ib value and activity *S* of FSFF with different fracture angles

3.3 RA-AF 值裂纹分类

RA 值为 AE 上升时间与幅值的比值,AF 值为 AE 振铃计数与持续时间的比值。RA-AF 值是一组判定试件损伤模式的重要特征参数。在岩样内部裂纹破裂事件中,拉伸裂纹的声信号主要以长纵波形式传播,导致 RA 值较低。剪切裂纹的声信号主要以剪切波的形式传播,导致 AF 值较低[33]。据此可将砂岩单轴压缩过程中的损伤模式划分为张拉破裂和剪切破裂两类,其中张拉破裂表现为 RA 值较小而 AF 值较大,剪切破裂表现为 RA 值较大而 AF 值较小。为定量分析不同工况下 FSFF 的裂纹特征,对 AE 信号的 RA 值进行归一化处理[34],归一化公式如式(5)所示,统计可得到张拉破裂和剪切破裂在全部岩样内部破裂中的占比。图 12 和图 13 为不同裂隙长度和裂隙倾角 FSFF 的声发射 RA-AF 特征。由图 12 和图 13 可知,随裂隙长度增加,剪切裂纹的占比持续增大;随裂隙倾角增大,剪切裂纹占比呈先增大后减小的变化规律。结合 2.1 力学试验结果可知:岩样内部剪切裂纹所占比例越高,岩样的抗压强度越小。

$$RA=\frac{RA-\min(RA)}{\max(RA)-\min(RA)} \tag{5}$$

式中:RA 为原始数据值;$\min(RA)$为 RA 值在数据集中的最小值;$\max(RA)$为 RA 值在数据集中的最大值;RA 为归一化后的 RA 值。

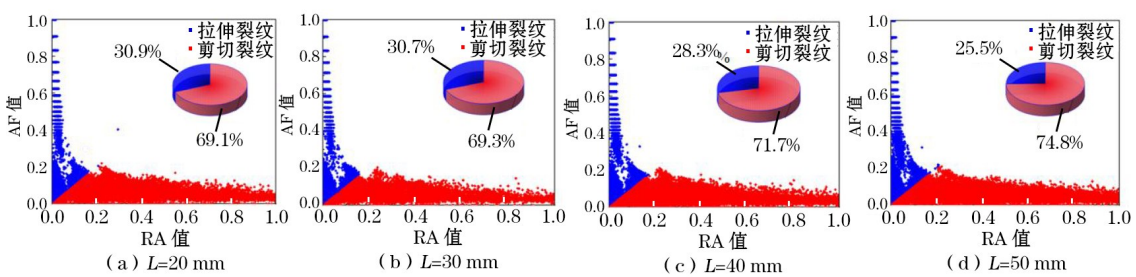


图 12 不同裂隙长度 FSFF 声发射 RA-AF 特征

Fig.12 Acoustic emission RA-AF characteristics of FSFF with different fracture lengths

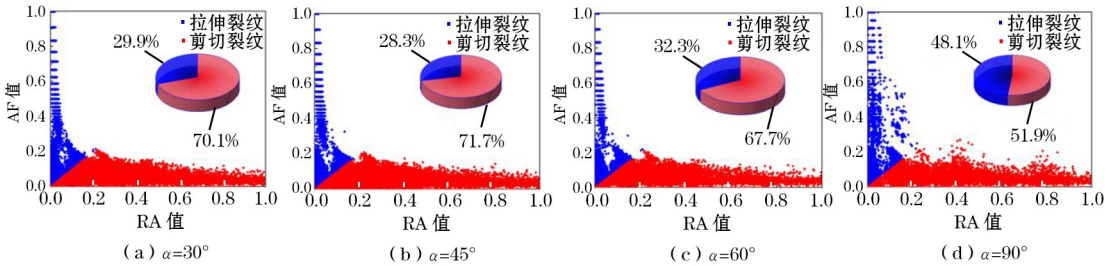


图 13　不同裂隙角度 FSFF 声发射 RA-AF 特征

Fig.13　Acoustic emission RA-AF characteristics of FSFF with different fracture angles

4　结论

本文以含充填裂隙冻结砂岩(FSFF)为研究对象，采用声光力学测试技术，系统研究了单轴压缩过程中岩样表面应变场演化规律及 AE 参数(振铃计数、声发射 Ib 值、活度、RA-AF 值)的时空响应特征，主要结论如下。

(1) 随着裂隙倾角的增大，岩样抗压强度呈先减小后增大的变化趋势。随着裂隙长度的增加，岩样抗压强度持续减小。

(2) 不同裂隙长度下，岩样均首先在拉应力作用下以 T2 型的拉伸裂纹萌生，之后岩样内部应力重分布，裂纹在拉应力和剪应力的共同作用下内部裂纹扩展，直至岩样破坏。其中，当裂隙长度 $L=20$ mm 时，岩样裂纹扩展以 S1、S3 型剪切裂纹和 M 型拉伸－剪切混合型裂纹为主；当裂隙长度 $L=30$ mm 和 40 mm 时，岩样裂纹扩展以 S1 型剪切裂纹和 M 型拉伸－剪切裂纹为主；当裂隙长度 $L=50$ mm 时，岩样裂纹扩展以 M 型拉伸－剪切混合型裂纹为主。

(3) 裂隙倾角显著改变裂纹扩展路径。当裂隙倾角为 30°时，岩样裂纹扩展以 S3 型剪切裂纹为主。当裂隙角度为 45°和 60°时，岩样裂纹扩展以 M 型拉伸－剪切混合型裂纹和 S1 型剪切裂纹为主。当裂隙倾角为 90°时，裂岩样裂纹扩展以 S3 型剪切裂纹为主。

(4) 当裂隙长度较短时，FSFF 的 AE 振铃计数骤升集中在裂纹扩展阶段；随裂隙长度的增加，FSFF 的 AE 振铃计数骤升集中在弹性阶段和裂缝扩展阶段。随裂隙倾角的增大，岩样内部 AE 振铃计数骤升事件增多，声发射事件在岩样内部的分布更趋分散。

(5) AE 参数中的 Ib 值与活度 S 可有效表征岩石损伤从微破裂向宏观主破裂转化的临界状态。FSFF 的 Ib 值与活度 S 在裂纹扩展阶段分别达到最小值和最大值，表明岩样在该阶段以大尺度破裂为主，高频声发射事件集中爆发。

(6) 单轴压缩条件下，岩样的破裂模式以剪切破裂为主，且剪切裂纹所占比例随裂隙长度增加而持续增大；随裂隙倾角增大，剪切裂纹所占比例呈先增大后减小的变化规律；岩样的抗压强度越低，内部剪切裂纹所占比例越大。因此，在寒区实际工程中，对含充填裂隙岩体进行加固的核心在于控制裂隙面的剪切滑移。

参考文献(References)：

[1] Horii H, Nemat Nasser S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1985, 90: 3105-3125.

[2] Zhao Zhihong, Zhou Dong. Mechanical properties and failure modes of rock samples with grout-infilled flaws: a particle mechanics modeling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 702-715.

[3] Kong Xiangchao, He Faguo, Lyu Ran, et al. Experimental study on the degradation of sandstone-petroglyph carriers in Helankou: effects of freeze-thaw and wet-dry cycles[J]. iScience, 2024, 27(8): 110576.

[4] Chen Longxiao, Li Kesheng, Song Guilei, et al. Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 12315.

[5] Tan Tao, Zhang Chunyang, Dai Bibo, et al. Damage and failure characteristics of single fractured cyan sandstone subjected to freeze-thaw cycles under uniaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 130: 104272.

[6] 孔维秋.填充节理岩体冻融损伤和破坏模式的试验研究及离散元分析[D].济南：山东大学，2022.
Kong Weiqiu. Experimental and discrete element analysis of freeze-thaw damage and failure modes in filled jointed rock mass[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[7] 张志镇,高峰,徐小丽.花岗岩力学特性的温度效应试验研究[J].岩土力学,2011,32(8):2346-2352.
Zhang Zhizhen, Gao Feng, Xu Xiaoli. Experimental study of temperature effect of mechanical properties of granite[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(8):2346-2352.

[8] 黄诗冰,刘泉声,程爱平,等.低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J].岩土力学,2018,39(1):78-84.
Huang Shibing, Liu Quansheng, Cheng Aiping, et al. Preliminary experimental study of frost heaving pressure in crack and frost heaving propagation in rock mass under low temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 78-84.

[9] 李云鹏,王芝银.花岗岩低温强度参数与冰胀力的关系研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):4413-4418.
Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Study of relationship between strength parameters and ice expansion force of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(2):4413-4418.

[10] Zhuang Xiaoying, Chun Junweiu, Zhu Hehua. A comparative study on unfilled and filled crack propagation for rock-like brittle material[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2014,72:110-120.

[11] Miao Shuting, Pan Pengzhi, Wu Zhenghua, et al. Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204:319-343.

[12] 刘波,刘念,李东阳,等.含冰软弱面的冻结裂隙红砂岩的强度试验[J].煤炭学报,2016,41(4):843-849.
Liu Bo, Liu Nian, Li Dongyang, et al. Strength test on frozen cracked red sandstone combined with ice[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(4):843-849.

[13] An Qi, Hong Chunyang, Wen Haitao. Fracture patterns of rocks observed under cryogenic conditions using cryo-scanning electron microscopy[J]. Processes, 2023, 11(7):2038.

[14] 宋勇军,杨慧敏,张磊涛,等.冻结红砂岩单轴损伤破坏CT实时试验研究[J].岩土力学,2019,40(增刊1):152-160.
Song Yongjun, Yang Huimin, Zhang Leitao, et al. CT real-time monitoring on uniaxial damage of frozen red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(Suppl.1):152-160.

[15] Fairhurst C E, Hudson J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(3):279-289.

[16] Li Huigui, Li Huamin. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of thick hard roof sandstone in Shendong coal field[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2017,4(2):147-158.

[17] 左建平,裴建良,刘建锋,等.煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1564-1570.
Zuo Jianping, Pei Jianliang, Liu Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(8):1564-1570.

[18] Long Dayu, Wang Yu, Li Changhong, et al. Energy mechanism and acoustic emission characteristics in rock-backfill composite structure specimens under multi-level cyclic loads:cement-tailings ratio effect[J]. Minerals,2024,14(7):665.

[19] Pan Jishun, Yuan Shuangxi, Jiang Tong, et al. Experimental study on crack characteristics and acoustic emission characteristics in rock-like material with pre-existing cracks[J]. Scientific Reports,2021,11(1):23790.

[20] Chen Chen, Chen Xudong, Ning Yingjie. Identification of fracture damage characteristics in ultra-high performance cement-based composite using digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. Composite Structures, 2022,291:115612.

[21] Lei Daxing, Lin Hang, Wang Yixian. Damage characteristics of shear strength of joints under freeze-thaw cycles[J]. Archive of Applied Mechanics, 2022, 92(5): 1615-1631.

[22] Zhang Shengwen, Lin Hang, Chen Yifan, et al. Analysis on the evolution of frost heaving pressure of penetrating crack considering water content and migration[J]. Simulation, 2023,99(1):41-54.

[23] Zhou X P, Bi J, Qian Q H. Numerical simulation of crack growth and coalescence in rock-like materials containing multiple pre-existing flaws[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(3):1097-1114.

[24] Zhao Yanlin, Liu Qiang, Zhang Chunshun, et al. Coupled seepage-damage effect in fractured rock masses: model development and a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,144:104822.

[25] Wong L N Y, Einstein H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2009,46(2):239-249.

[26] Park C H, Bobet A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: a comparison[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5):819-829.

[27] Zhao Tongbin, Zhang Pengfei, Xiao Yaxun, et al. Master crack types and typical acoustic emission characteristics during rock failure[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2023,10(1):73-86.

[28] 郭奇峰,武旭,蔡美峰,等.预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究[J].煤炭学报,2019,44(增刊2):476-483.
Guo Qifeng, Wu Xu, Cai Meifeng, et al. Crack initiation mechanism of pre-existing cracked granite[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(Suppl.2):476-483.

[29] Liu Xiling, Han Mengsi, He Wei, et al. A new b value estimation method in rock acoustic emission testing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(12):1-14.

[30] Shiotani T. Application of AE improved *b*-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete-materials[J]. Journal of Acoustic Emission, 2001, 19: 118-133.

[31] Yang Jing, Mu Zonglong, Yang Shengqi. Experimental study of acoustic emission multi-parameter information characterizing rock crack development[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 232: 107045.

[32] Colombo I S, Main I G, Forde M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using "*b*-value" analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 280-286.

[33] Li Su, Lin Hang, Hu Shengbin, et al. Mechanical behavior of anchored rock with an infilled joint under uniaxial loading revealed by AE and DIC monitoring[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 123: 103709.

[34] Li Hang, Ma Hongling, Yang Chunhe, et al. Acoustic emission characteristics of rock salt under multi-stage cyclic loading[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107911.