

单轴及双轴加载下含裂隙岩石的破裂行为研究

王洪播*, 雷磊, 苏美亮, 危欢欢

中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京

收稿日期: 2025年4月26日; 录用日期: 2025年5月18日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

探索在工程力作用下岩石裂隙的起裂扩展行为及裂隙岩体的强度变形特性是极其必要的。本文针对含预制双裂隙的立方体岩石试样开展单轴及双轴加载试验, 基于DIC岩石表面应变场演化、声发射振铃计数及声发射事件时间间隔函数对单轴、双轴加载下裂隙岩石的破裂行为进行研究, 结果表明: (1) 声发射事件率函数可以很好地表征岩石的破坏过程, 其能提供相较于声发射振铃计数更多的信息; (2) 加载过程中, 裂隙岩石表现出较强的渐进破裂特性, 峰后阶段轴向承载能力缓慢丧失, 相对于单轴加载, 双轴加载下裂隙岩石试样的峰值强度增加9.6%; (3) 相对于单轴加载, 双轴加载下试样破坏后相对更完整, 主要宏观破裂面减少, 这是由于横向围压约束抑制了破裂面的产生。

关键词

裂隙岩石, 单轴加载, 双轴加载, 破裂行为, 强度特性

Rupture Behavior of Fractured Rock under Uniaxial and Biaxial Loading

Hongbo Wang*, Lei Lei, Meiliang Su, Huanhuan Wei

North China Electric Power Design Institute Co., LTD., China Power Engineering Consulting Group, Beijing

Received: Apr. 26th, 2025; accepted: May 18th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

Exploration in engineering force under the action of rock fracture crack propagation and the strength of the fractured rock mass deformation characteristics is very necessary. In this paper, uniaxial and biaxial loading tests are carried out on cubic rock samples with prefabricated double fractures. This study investigates the rupture behavior of fractured rocks under uniaxial and biaxial loading based on the evolution of surface strain fields using Digital Image Correlation (DIC),

*通讯作者。

文章引用: 王洪播, 雷磊, 苏美亮, 危欢欢. 单轴及双轴加载下含裂隙岩石的破裂行为研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1125-1134. DOI: 10.12677/hjce.2025.145120

acoustic emission ring count, and the inter-event time function of acoustic emission events. The results show that: (1) the acoustic emission event rate function can well characterize the failure process of rock and can provide more information than the acoustic emission ringing count. (2) During the loading process, fractured rocks exhibit strong progressive fracture characteristics, with a slow loss of axial bearing capacity in the post peak stage. Compared to uniaxial loading, the peak strength of the two types of fractured rock samples under biaxial loading increased by 9.6%. (3) Compared with uniaxial loading, the sample under biaxial loading is relatively more complete after failure, and the main macroscopic fracture surface is reduced, which is because the lateral confining pressure constraints inhibit the generation of the fracture surface.

Keywords

Fractured Rock, Uniaxial Loading, Biaxial Loading, Rupture Behavior, Strength Characteristic

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

岩石(体)失稳破坏的实质就是其内部不同尺度的原生或次生结构面的起裂、扩展、相互作用及贯通的过程[1]-[5]。结构面的存在削弱了岩体的力学强度并在一定程度上控制着岩体的破坏模式[6]-[10]。因此,为了防止和预警工程岩体的局部失稳破坏,探索在工程力作用下岩石裂隙的起裂扩展行为及裂隙岩体的强度变形特性是极其必要的。

Wong 等[11]对含预制单裂隙的石膏及大理岩试样进行单轴加载测试,借助高速摄影技术,基于裂纹的扩展路径及张拉/剪切扩展机制归纳出 7 种基本裂纹类型。Yang 等[12]探究了单轴加载下含预制共面双裂隙砂岩的强度变形特性及破裂行为,试验结果显示,裂隙试样的峰值强度及峰值应变均低于完整试样,且降低幅度与预制共面裂隙的倾角有关,预制裂隙试样的宏观破坏模式是 9 种基础裂纹类型的若干种组合。武旭等[13]基于声发射及 DIC 技术探究了单轴压缩下含正交型交叉裂隙岩石的强度特征及裂纹扩展行为,研究表明,试样峰值强度与弹性模量随主裂隙倾角增大先增大后减小,当岩石中存在与加载方向垂直的裂隙时,岩石破裂受此类裂隙的影响最为明显。Bobet 等[14]对含张开及闭合裂隙的石膏试样进行双轴加载,试验结果显示,在单轴加载及低围压下,翼裂纹从预制裂隙尖端起裂,然而在高围压条件下,翼裂纹从预制裂隙中心开始起裂或者翼裂纹消失。Prudencio 等[15]对含断续多裂隙的水泥砂浆试样进行双轴加载试验,研究了节理间距、节理倾角等参数变化对试样破坏模式、强度和变形特征的影响。刘学伟等[16]对含预制单裂隙及交叉裂隙石膏试样进行了双轴压缩试验,系统地研究侧向压力对裂隙岩体的破坏形式及强度特征的影响。杨圣奇等[17]对含预制断续裂隙的大理岩进行三轴加载,探究围压及裂隙分布对试样扩容特性的影响规律,并揭示断续预制裂隙大理岩扩容特性与裂纹演化之间的联系。结果表明:裂隙试样的强度低于完整试样,且岩桥长度越长,试样的单轴抗压强度越大,饱水试样强度低于干燥试样。陈结等[18]研究了岩桥长度和含水情况对砂岩力学特性及损伤演化规律的影响,通过声发射(AE)和数字图像相关技术(DIC)实时监测了砂岩内部损伤及表面裂纹扩展情况。虽然很多研究者对于裂隙岩石的破坏特征进行了研究,但对于共线型裂隙的岩石的破坏失稳研究较少。

岩石试样在受压破坏过程中,由于内部微裂隙会不断萌生、发育、贯通,这些行为会造成持续的声信号,同时岩石表面也会发生变形。根据现有研究,岩石的表面变形和内部的声发射信息变化具有一定的关联性[19][20]。Triantis 等[21]则提出了一种基于 AE 事件时间间隔函数 $F(\tau)$ 的分析方法,重点关注

破坏前最后阶段的声发射活动特征, 结果发现相比传统的事件率图, $F(\tau)$ 通过滑动窗口和逆时间轴对数图, 放大了破坏前最后阶段的细节, 提供了更密集的数据点。Niu 等[22]对立方体试样进行了加载试验, 并指出 AE 事件率的演化特征能够很好地表征裂隙岩石试样的渐进破裂过程, 试样每一次宏观破裂均伴随着 AE 事件率的突增。Zhou 等[23]借助声发射事件率函数研究了裂隙花岗岩的破坏过程, 发现岩石在过程区成核时, AE 事件率通常表现出阶跃上升, 具有可识别的振荡特征。

因此, 本文针对含预制共线型双裂隙的立方体试样开展单轴及双轴加载试验, 试验过程中, 采用 DIC 技术实时获取试样表面的位移场与变形场, 结合声发射监测, 并引入声发射事件时间间隔函数, 基于试验结果分析单轴及双轴加载下裂隙岩石的破断行为。

2. 试验方案

试验所用岩石为红砂岩, 原始岩石被加工成正方形试样, 试样尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。预制裂隙砂岩试样为共线双裂隙试样, 如图 1 所示, 加工预制裂隙时, 首先在每一条裂隙的中心位置穿孔, 然后将直径为 0.3 mm 的金刚石砂线穿过圆孔, 根据裂隙设计的长度和角度对试样进行线切割。试样加工 3 块, 其中两块分别进行单轴及双轴加载试验, 另一块试样作为备用。

加载设备采用 ZTRS-210 岩石直剪仪, 如图 2 所示。声发射监测采用北京软岛科技有限公司研发的 DS5 声发射分析仪。该声发射分析仪采用多通道同步、全波形采集的方式, 具有信号门限触发、外部触发两种触发方式。试验过程中, 采用两个 RS-2A 宽频声发射传感器监测试样的加载破裂过程, DIC 采用 VIC-3D 非接触式全场应变测量设备, 其基本原理是对变形前图像中的感兴趣区域进行网格划分, 并将每个子区域视为刚性运动。然后, 对于每个子区域, 基于预定义的相关函数采用指定的搜索方法来执行必要的计算。在图像变形之后, 识别互连区域中表现出最高相关值的子区域。该确定标记了变形图像中子区域的变化位置, 从而能够计算其位移。通过对所有子区域重复该过程, 可以全面获得关于整个场的变形信息。DIC 图像采集速率设为 1 张/s 。

正式试验开始时, 确保加载控制系统、声发射系统、DIC 系统三个系统同时启动。图 3 为试验加载设置示意图。为方便后续分析, 本章对进行试验的 2 块试样进行如下编号: S1-0、S1-5, 其中数字 0 及 5 分别表示围压数值进而区分单轴压缩及双轴压缩情况。

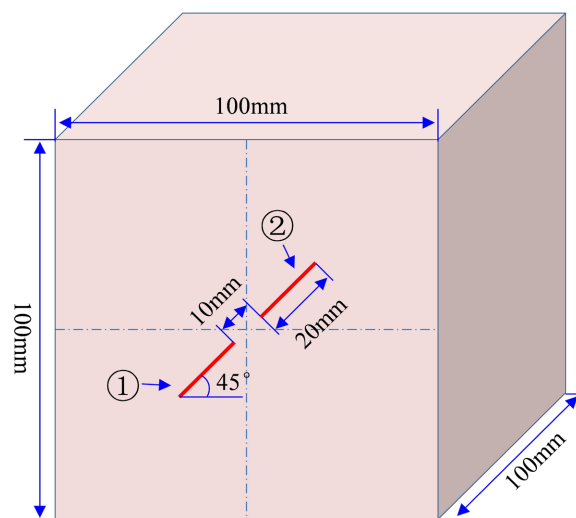


Figure 1. Geometry of fissured sandstone specimens
图 1. 裂隙砂岩试样的几何尺寸

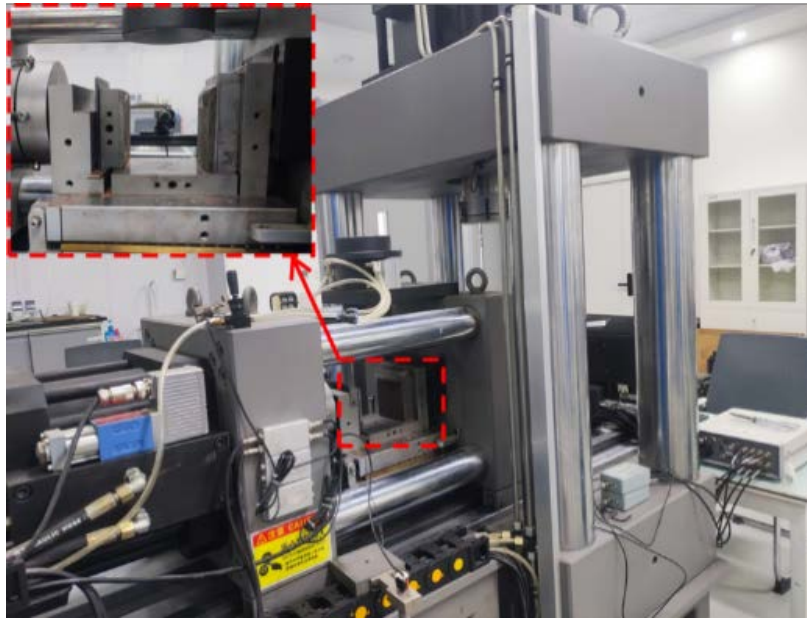


Figure 2. ZTRS-210 large tonnage rock straight shear instrument
图 2. ZTRS-210 大吨位岩石直剪仪

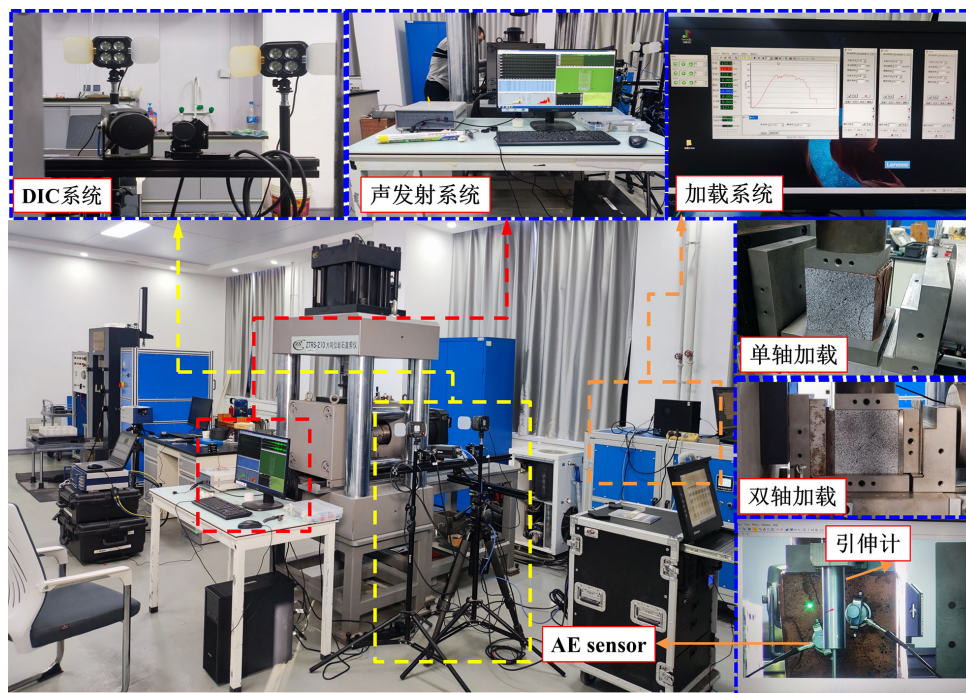


Figure 3. Schematic diagram of the test loading setup
图 3. 试验加载设置示意图

3. 声发射事件时间间隔函数

声发射事件时间间隔函数 $F(\tau)$ 也称为声发射事件率，其定义是在 N 个连续事件的事件窗口长度为 T ，在 T 时间窗口内的声发射事件的平均发生频率[24]。

声发射事件率的定义为：

首先, 计算每组 N 个连续声发射事件在 T 中的平均时间 τ_i

$$\tau_i = \frac{\Delta t_i}{N} = \frac{(t_{N+i-1} - t_{i-1})}{N}, i = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

式中, t_{N+i-1} 和 t_{i-1} 分别表示 $N+i-1$ 个和 $i-1$ 个声发射事件发生的瞬时时间。

因此, τ_i 可以被定义为:

$$\tau_1 = \frac{(t_N - t_1)}{N} \quad (2)$$

如此, 声发射事件时间间隔函数 $F(\tau)$ 被表示为平均时间 τ_i 的倒数, 表示如下:

$$F(\tau_i) = \tau_i^{-1}, i = 1, 2 \dots \quad (3)$$

最终, 每个 $F(\tau_i)$ 的值被定义为在 T 时间窗口内的声发射事件的平均发生频率, 如下:

$$\bar{t}_i = \frac{1}{N} \sum_i^{N+i-1} t_i, i = 1, 2 \dots \quad (4)$$

根据声发射事件间隔时间函数理论, 裂隙岩石试样的整个加载过程, 最后 $N-1$ 个声发射事件没有被定义, 但这不影响分析结果。

4. 裂隙岩石的破裂过程分析

借助 Ncorr 算法软件提取裂隙岩石受压破坏过程中表面最大主应变的变化过程, 挑选相应的特征点 (已经在图 4(a) 和图 5(a) 中标出), 对比相应的特征点的岩石表面最大主应变云图, 并借助声发射事件率函数 $F(\tau)$, 振铃计数分析岩石破裂的过程。以下分别分析单轴加载条件下和双轴加载条件下的岩石破裂过程。

4.1. 单轴加载裂隙岩石破裂过程分析

图 4 为试样 S1-0 的应力、振铃计数、AE 事件率演化特征, 图 6 为试样 S1-0 的表面最大主应变演化特征。

由图 4(a) 可以看出, 试样 S1-0 的应力-时间曲线可简单划分为 4 个阶段, 分别为压密阶段(I)、弹性变形阶段(II)、屈服阶段(III)以及峰后渐进破坏阶段(IV)。在加载初期的压密阶段(I), 轴向应力随时间增加表现出非线性增长趋势并整体呈现为下凸形态, 这是由于试样内部孔隙、裂隙在外部载荷作用下逐渐受压闭合, 同时也与试验机及试样之间的接触调整有关, 由图 4(b) 可知, 在这一阶段 AE 事件率始终维持在较低水平, 这说明试样内部未出现损伤。随着外部载荷持续增加, 试样进入弹性变形阶段(II), 轴向应力-时间曲线的斜率近似维持恒定, 同时 AE 事件率开始持续增加并在这一阶段后期处于较高水平, 这表明试样内部离散的微破裂逐步增多, 但并未对试样的宏观受载响应特征造成改变。此外, 还可注意到在这一阶段振铃计数未出现明显突增且累计振铃计数增长缓慢。当试样内部的微破裂增加到一定程度, 量变引起质变, 试样就进入到屈服阶段(III), 这一阶段持续时间较短, 轴向应力-时间曲线的斜率逐渐减小, 同时 AE 事件率始终处于较高水平, 最终关键部位的微破裂集聚造成试样整体结构失稳, 但试样并未瞬间完全丧失承载能力。当轴向应力达到峰值时(31.3 MPa), 试样开始进入峰后阶段(IV), 此阶段轴向应力随加载时间增加上下起伏波动一段时间后逐步缓慢下降, 表现出一种明显的渐进破坏特性, 对应于轴向应力波动时刻, 可以看到声发射振铃计数及累计振铃计数的突增以及 AE 事件率的突变, 直至试样整体结构丧失大部分承载能力后振铃计数及 AE 事件率降低至较低水平。

对比 S1-0 的声发射振铃计数与 AE 事件率演化特征, 发现振铃计数与 AE 事件率都是在弹性变形阶段(II)开始出现微小波动, 但在屈服阶段, 振铃计数在靠近岩石峰值应力点 b 点时才发生特别明显的振铃

特征,但对于 AE 事件率,其在弹性变形阶段后期持续到屈服阶段,整个过程一直保持高水平的振铃特征,对比峰后渐进破坏阶段,振铃计数的在 c 点以后呈现断崖式下降的特征,而 AE 事件率保持了渐进式下降的特点,与岩石破坏的应力变化曲线对应更加贴近。因此对于岩石破坏的内部信息表征而言,AE 事件率在整个岩石破坏的表征过程中,能捕获表现更多的信息,能更完整地表征岩石的破坏过程。

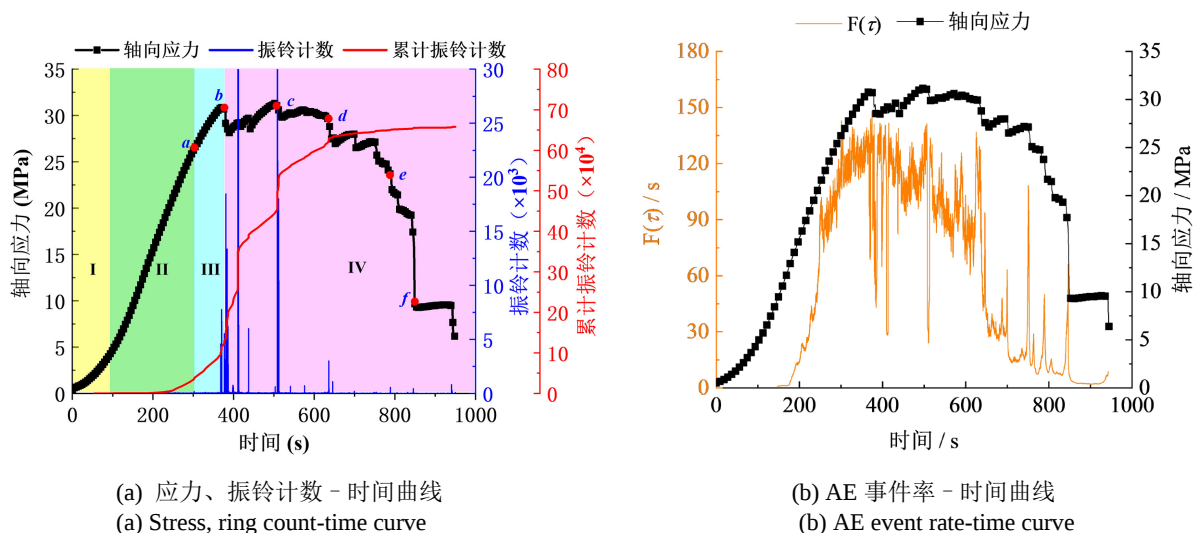


Figure 4. Evolutionary characteristics of stress, ringing counts, and AE event rate for specimens S1-0

图 4. 试样 S1-0 的应力、振铃计数、AE 事件率演化特征

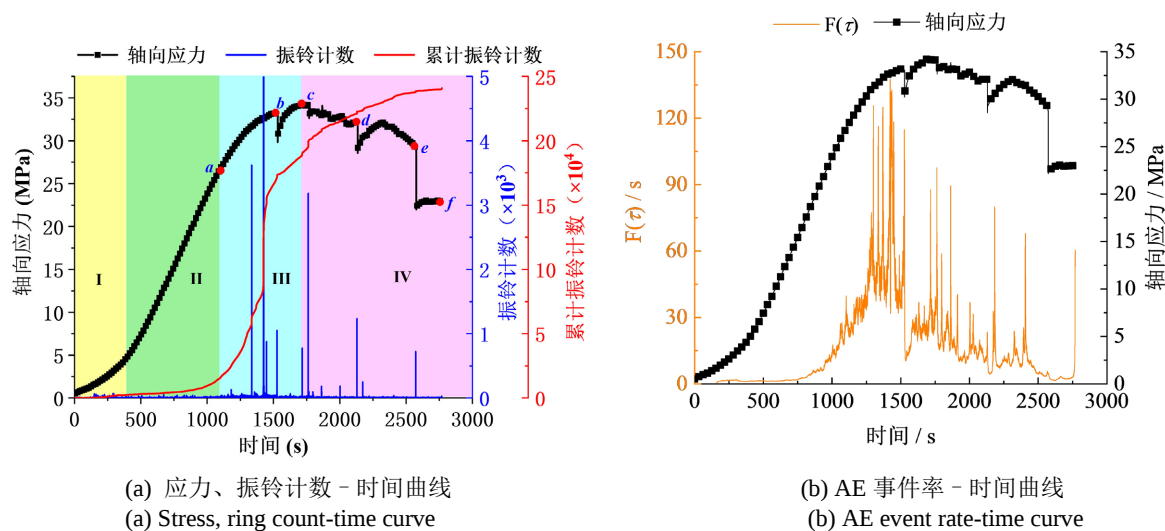


Figure 5. Evolutionary characteristics of stress, ringing counts, and AE event rates for specimens S1-5

图 5. 试样 S1-5 的应力、振铃计数、AE 事件率演化特征

图 6 展示了试样 S1-0 加载全过程中 6 个典型应力状态下暴露面的最大主应变云图,图 4(a)中标出了 6 个应力状态在轴向应力 - 时间曲线中的具体位置。由图可知,当轴向应力加载至 a (24.6 MPa)点时,预制裂隙①及预制裂隙②的内、外两个尖端均开始出现最大主应变集中现象,这预示随着加载的持续进行最大主应变集中处可能发展为开裂裂纹,此时岩石表面最大主应变值为 0.06%。当试样受载至峰值应力状态时,其预制裂纹端部的应力集中现象更加明显,相较于塑性应变开始阶段,最大主应变值提高了 3 倍

(0.2%), 说明此时裂隙已经发生贯通。当试样受载状态发展至峰后 c (30.1 MPa) 及 d (29.3 MPa) 点时, 裂尖附近最大主应变持续增加, 应变集中程度愈加显著, 同时可以观察到 4 条主应变集中带成 X 状交叉分布。此时, 最大主应变值持续增大(达到 0.8%)。当轴向应力处于峰后 e (23.4 MPa) 点时, 裂纹 1 从预制裂隙①外尖端起裂并扩展至试样底部; 在峰后 f (9.3 MPa) 点, 裂纹 2 从预制裂隙①外尖端起裂并向试样底部扩展, 同时裂纹 1 趋于闭合, 裂纹 3 从裂隙①外尖端起裂并向试样上部扩展, 裂纹 4 从裂隙②外尖端起裂并扩展至试样顶部, 裂纹 5 从试样右侧边缘起裂向试样内部延伸, 但此时的岩石最大主应变值的变化趋于稳定, 说明此时岩石的表面已经发生断裂, 最终试样整体结构失去承载能力。

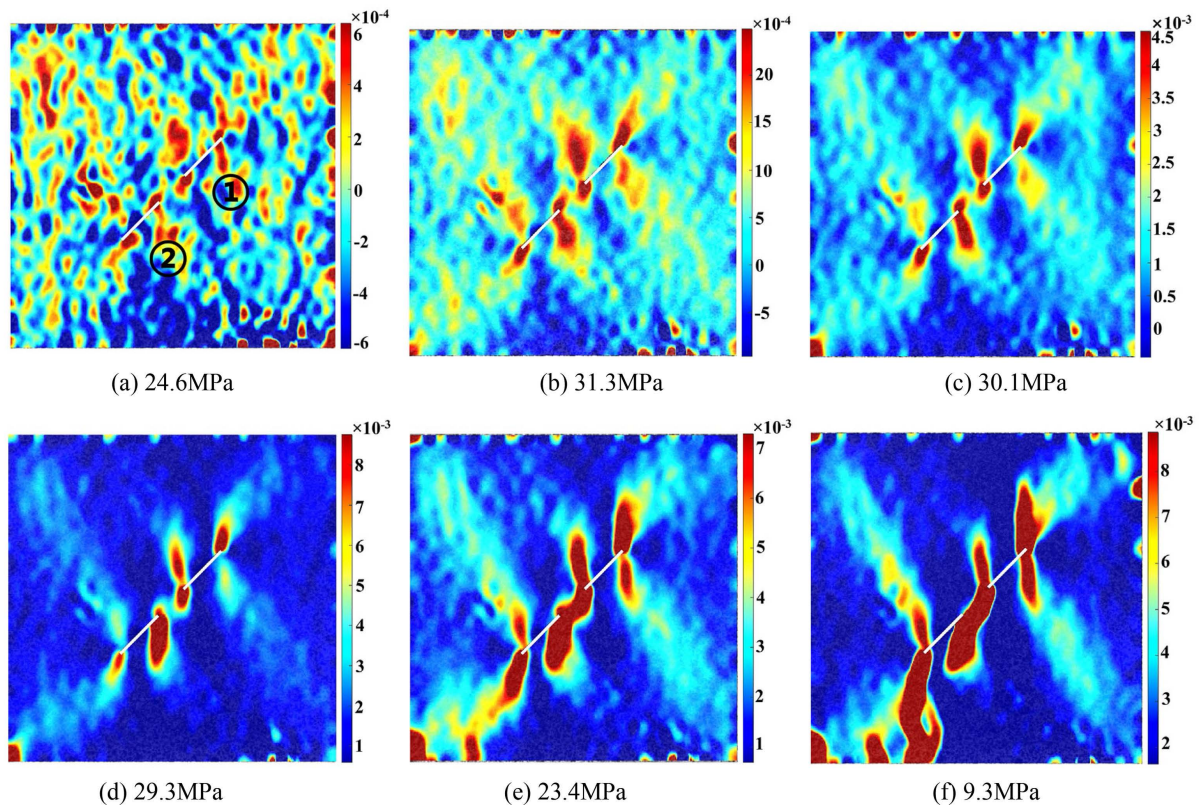


Figure 6. Evolutionary characteristics of the surface strain field (maximum principal strain) for specimens S1-0
图 6. 试样 S1-0 的表面应变场(最大主应变)演化特征

4.2. 双轴加载裂隙岩石破裂过程分析

图 5 为试样 S1-5 的应力、振铃计数、AE 事件率演化特征, 双轴加载下试样 S1-5 的轴向应力 - 时间曲线仍可划分为 4 个阶段, 压密阶段(I)、弹性变形阶段(II)、屈服阶段(III)以及峰后渐进破坏阶段(IV)。由图可以发现在压密阶段(I)和弹性变形阶段(II), 砂岩的轴向应力呈现出与单轴加载砂岩相同的特征, 先下凹, 后呈现近直线式上升, 振铃计数和 AE 事件率都整体处于较低水平, 且在弹性阶段末期呈现出缓慢上升趋势, 这说明裂隙在弹性阶段末期, 岩石内部的微裂隙才开始发育; 在屈服阶段(III)岩石的轴向应力发生明显的下降及回升, 即跳动现象, 对应于振铃计数和 AE 事件率的特征, 发现振铃计数和 AE 事件率在轴向应力跳动发生前达到最大值, 这说明岩石内部出现了较大规模的破坏, 进而造成了一次较大规模的应力调整, 因此轴向应力发生跳动现象; 在峰后渐进破坏阶段(IV), 岩石的轴向应力也发生了多次阶梯式的跳动现象, 伴随这些跳动的是 AE 事件率和振铃计数的突增, 这说明在峰后渐进破坏阶段(IV), 岩石

内部依旧发生了多次的裂隙的贯通,造成了岩石内部的应力调整。

对比 S1-5 破坏过程的振铃计数和 AE 事件率的变化特征,可以发现当振铃计数几乎无变化时,AE 事件率的变化特征更加明显,能更好地反应岩石内部的裂隙发育信息。

图 7 为 S1-5 的表面应变场演化特征,可以发现岩石在塑性变形阶段以前,岩石表面应变场一直在变化调整,此时岩石表面的最大主应变值也相对较小(0.05%),在达到塑性变形阶段的末期,轴向应力达到 30.5 MPa 的(b)点时,表面应变出现局部化趋势,预制裂隙①和②的端部出现高应变区,此时岩石的最大主应变值为(0.2%),随着岩石进一步被加载,岩石表面应变场呈现出“X”型的高应变带,并且预制裂隙①和②的端部出现的高应变区更加明显,但随着岩石轴向应力步入峰后阶段,岩石底部出现多条局部化趋势的条带,之后岩石轴向应力急剧下降,加载过程中,岩石表面的最大主应变值首先变化不大(d 点和 e 点的最大主应变值都在 0.7%~0.8%),在停止岩石加载前,岩石的最大主应变之发生突变,增大到 2.2%。相较于单轴加载情况,岩石表面最终并未呈现出“X”型的破坏形式,而是呈现 X 状交叉分布的 4 条主应变集中带,就主破裂带而言,呈现出从上下底面贯穿预制裂隙的压剪型破坏,具体而言,其中裂纹 1 从试样右下角起裂并沿试样右侧边缘向上开裂扩展,裂纹 2 从预制裂隙②外尖端起裂并扩展至试样底部,裂纹 3 从预制裂隙①外尖端起裂并同样扩展至试样底部,裂纹 4 从试样左下端起裂并沿试样左侧边缘向上延伸扩展。

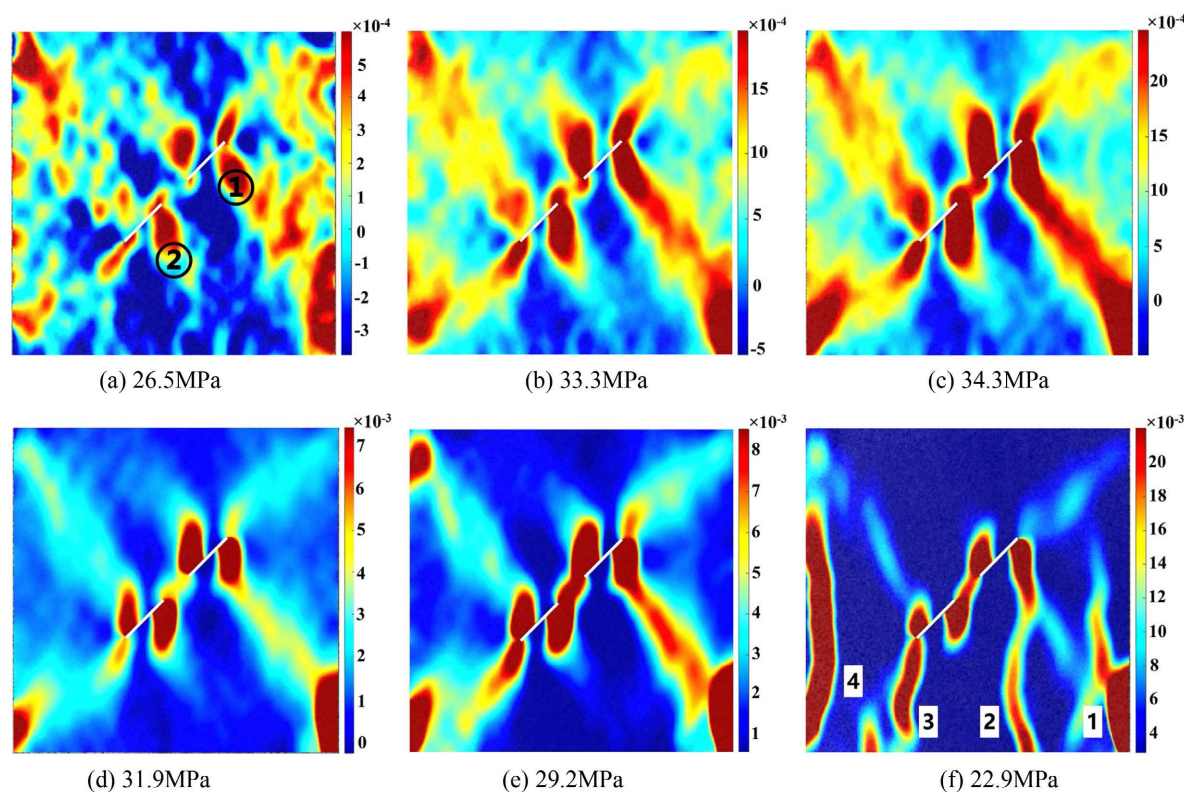


Figure 7. Evolutionary characteristics of the surface strain field (maximum principal strain) for specimens S1-5

图 7. 试样 S1-5 的表面应变场(最大主应变)演化特征

5. 讨论

对比 S1-0 的破坏过程, S1-5 在压密阶段(I)、弹性变形阶段(II)与 S1-0 各个指标都十分相近,不做对比分析。但屈服阶段(III)的振铃计数特征更加明显,高水平振铃计数持续时间更长,这说明双轴加载下的

裂隙砂岩在屈服阶段的微裂隙扩展发育更加明显。对比两个岩石的峰后渐进破坏阶段(IV)，可以发现 S1-5 的渐进破坏过程中应力下降的过程对比 S1-0 不大明显，这是由于双轴加载作用下，对岩石从单向受力变为二向受力，导致砂岩的强度有所提升，具体而言，其峰值强度为 34.3 MPa，相对于单轴加载强度增加了 9.6%。而且，S1-5 具有明显的轴向应力跳动现象，具体而言，S1-5 在轴向应力发生突降后，往往迅速地回升，而 S1-0 发生轴向应力的突降后，回升很缓慢，跳动现象不明显，造成这个现象的原因是岩石内部的轴向应力调整，往往会造成岩石轴向和侧向的变形调整，进而造成岩石的承载能力下降，而对于双轴加载，侧向的约束会限制岩石的侧向变形，进而造成岩石相较于单轴加载器承载能力下降较小，恢复较快。

对比试样 S1-0 及 S1-5 的 AE 事件率-时间曲线可以看出，试样 S1-5 的高 AE 事件率阶段基本集中在屈服阶段并且持续时间较短，但 AE 事件率突增时刻相对更多且更明显。同时，试样 S1-5 的声发射振铃计数及累计振铃计数突增时刻也基本集中在屈服阶段，在压密及弹性阶段增长缓慢。

对比两个试样的表面应变的变化过程，可以发现 S1-5 相较于 S1-0 更早地出现岩石的应变局部化现象，但 S1-0 的最大应变值更大，两者表面应变都在达到峰值应力时呈现出“X”型的高应变带，在岩石进入峰后渐进破坏阶段后，两者的高应变带都向预制裂隙端部方向靠拢，并在最终呈现出具有多条自底部或顶部发育的高应变带的破坏形式。总体而言，无论是单轴加载还是双轴加载情况，随着岩石的受载，岩石预制裂隙间的岩桥首先发生断裂，之后沿着预制裂隙的端部，裂隙逐渐发育、扩展，同时部分裂隙从岩石整体的端部开始发育，和预制裂隙端部的裂隙逐渐交汇，最终导致岩石的宏观破坏。对比单轴加载的情况，可以发现最终破坏时，双轴加载情况下的岩石最大主应变值较小，这说明双轴加载对岩石的裂隙发育扩展具有限制作用。同时进一步分析裂隙的发育方向，可以发现双轴加载情况下的裂隙发育方向趋于一致，这说明围压对岩石的破坏过程中裂隙的发育的方向具有控制作用。

6. 结论

(1) 声发射事件率函数可以很好的表征岩石岩石的破坏过程，其能提供相较于声发射振铃计数更多的信息。

(2) 加载过程中，裂隙岩石表现出较强的渐进破裂特性，峰后阶段轴向承载能力缓慢丧失，相对于单轴加载，双轴加载下裂隙岩石试样的峰值强度增加 9.6%。

(3) 相对于单轴加载，双轴加载下试样破坏后相对更完整，主要宏观破裂面减少，这是由于横向围压约束抑制了破裂面的产生。

参考文献

- [1] 王婷静. 不同倾角单裂隙对非均质岩石失稳演化研究[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(5): 539-547.
- [2] 吉东亮, 高新强, 董北毅, 等. 动载作用下复合岩体力学失稳机制与损伤本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(19): 103-116.
- [3] 陈光波, 唐薇, 李谭, 等. 裂隙煤岩组合体单轴压缩力学响应及失稳机制[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2633-2652.
- [4] Zhang, J., Zou, Q. and Guan, H. (2024) Fracture Characterization of Fractured Rock Bodies Based on Acoustic and Optical Characteristics. *Frontiers in Earth Science*, 12, Article 1421355. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1421355>
- [5] Kang, Z., Wang, Z., Shao, L., Feng, J. and Yao, X. (2024) Surface Crack Evolution Patterns in Freeze-Thaw Damage of Fissured Rock Bodies. *Journal of Mountain Science*, 21, 3094-3107. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8631-3>
- [6] 宋腾蛟, 茅献彪, 陈剑平, 等. 复杂结构岩质边坡破坏模式分析中结构面优势分组的影响研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 595-603.
- [7] 李子旋, 雷涛, 叶海旺, 等. 含软弱结构面石灰岩巴西劈裂破坏模式研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1): 11-15.
- [8] 陈昊祥, 王明洋, 靳天伟, 等. 岩石结构面破坏模式与剪切强度关系初探[J/OL]. 长江科学院院报, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20240829.1337.004.html>, 2025-05-20.

-
- [9] Hong, R., Jian, W., Zhang, D. and Chen, R. (2022) Experimental Study on Damage and Degradation of Structure Plane in Rock Mass under Cyclic Shear Load. *Geofluids*, **2022**, Article ID: 7016581. <https://doi.org/10.1155/2022/7016581>
- [10] Wu, J., Zhang, X.Y., Yu, L.Y., Zhang, L.W. and Wu, T. (2022) Rockburst Mechanism of Rock Mass with Structural Planes in Underground Chamber Excavation. *Engineering Failure Analysis*, **139**, Article ID: 106501. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106501>
- [11] Wong, L.N.Y. and Einstein, H.H. (2009) Systematic Evaluation of Cracking Behavior in Specimens Containing Single Flaws under Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.006>
- [12] Yang, S. (2011) Crack Coalescence Behavior of Brittle Sandstone Samples Containing Two Coplanar Fissures in the Process of Deformation Failure. *Engineering Fracture Mechanics*, **78**, 3059-3081. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.09.002>
- [13] 武旭, 王帆, 席迅, 等. 正交型交叉裂隙岩石强度特征与破裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2681-2690.
- [14] Bobet, A. and Einstein, H.H. (1998) Fracture Coalescence in Rock-Type Materials under Uniaxial and Biaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**, 863-888. [https://doi.org/10.1016/s0148-9062\(98\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0148-9062(98)00005-9)
- [15] Prudencio, M. and Van Sint Jan, M. (2007) Strength and Failure Modes of Rock Mass Models with Non-Persistent Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**, 890-902. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.01.005>
- [16] 刘学伟, 刘泉声, 刘滨, 等. 侧向压力对裂隙岩体破坏形式及强度特征的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2405-2411.
- [17] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2188-2197.
- [18] 陈结, 孟历德仁, 崔义, 等. 基于声光联合试验的预制双裂隙砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(1): 30-42.
- [19] Xing, T., Zhu, H. and Song, Y. (2024) Experimental Study on Rock Deformation Localization Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission. *Applied Sciences*, **14**, Article 5355. <https://doi.org/10.3390/app14125355>
- [20] Omondi, B., Aggelis, D.G., Sol, H. and Sitters, C. (2016) Improved Crack Monitoring in Structural Concrete by Combined Acoustic Emission and Digital Image Correlation Techniques. *Structural Health Monitoring*, **15**, 359-378. <https://doi.org/10.1177/1475921716636806>
- [21] Triantis, D. and Kourkoulis, S.K. (2018) An Alternative Approach for Representing the Data Provided by the Acoustic Emission Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **51**, 2433-2438. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1494-1>
- [22] Niu, Y., Liu, P., Zhang, C., Hu, Y. and Wang, J. (2023) Mechanical Properties and Dynamic Multifractal Characteristics of Shale under Anisotropic Stress Using AE Technology. *Geoenergy Science and Engineering*, **226**, Article ID: 211748. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211748>
- [23] Zhou, X., Zhang, J., Qian, Q. and Niu, Y. (2019) Experimental Investigation of Progressive Cracking Processes in Granite under Uniaxial Loading Using Digital Imaging and AE Techniques. *Journal of Structural Geology*, **126**, 129-145. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.06.003>
- [24] 牛勇. 裂隙岩石破裂过程声发射表征及失稳预警研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021.