

多级循环荷载作用下双裂隙花岗岩疲劳损伤与破裂特征试验研究

公绪飞^{1,2}, 谢童关^{1,2}, 吴震³, 宋贵磊^{1,2}, 程传超⁴, 孙伟超⁴, 郭伟耀^{1,2}

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省深部矿井动力灾害智能防控重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 内蒙古昊盛煤业有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

4. 兖矿能源集团股份有限公司 济宁二号煤矿, 山东 济宁 272072)

摘要:受地质构造控制, 岩体普遍发育大量裂隙。在深部开采扰动下, 围岩常承受频繁的循环荷载作用。为研究裂隙花岗岩在多级循环荷载下的力学特性与损伤破裂特征, 本研究对含双裂隙的花岗岩试样开展了不同应力路径下的多级疲劳力学试验, 并实时监测了声发射信号。结果表明: 随着岩桥长度增加, 双裂隙对花岗岩的劣化程度逐渐减弱, 试样的强度变形、疲劳寿命及动态弹性模量均呈增加趋势, 且多级等幅循环荷载下试样的疲劳力学参数更高。在多级循环荷载下, 花岗岩的弹性模量演化呈现阶梯式“增加-降低”两阶段特征, 且在多级等幅循环条件下, 其弹性模量的变化幅度更为显著。花岗岩声发射能量主要产生于每个疲劳阶段的初期及最终失稳阶段, 且累积声发射能量与岩桥长度呈显著正相关。相较于增幅循环荷载, 等幅循环荷载下花岗岩的累积声发射能量更高。在多级循环荷载作用下, 完整花岗岩试样呈典型轴向张拉破坏, 而裂隙花岗岩试样的破坏模式受岩桥长度控制, 随着岩桥长度增加, 其破坏模式由岩桥贯通破坏逐渐过渡至完整花岗岩的破坏模式; 然而, 循环应力路径对花岗岩宏观破裂特征的影响较小。

关键词:双裂隙花岗岩; 多级循环荷载; 疲劳损伤; 力学特性; 破裂特征

中图分类号: TU45; TD32

文献标志码: A

Experimental study on fatigue damage and fracture characteristics of double-fissured granite under multi-level cyclic loading

GONG Xufei^{1,2}, XIE Tongguan^{1,2}, WU Zhen³, SONG Guilei^{1,2},
CHENG Chuanchao⁴, SUN Weichao⁴, GUO Weiyao^{1,2}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Prevention and Control of Dynamic Disaster in Deep Mines,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Inner Mongolia Haosheng Coal Industry Co., Ltd., Ordos 017000, China;

4. Jining No. 2 Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 272072, China)

Abstract: Controlled by geological structures, rock masses commonly develop extensive fissures. Under the disturbance of deep mining operations, surrounding rock frequently suffers cyclic loading. To investigate the mechanical properties and damage-fracture characteristics of pre-fissured granite under multi-level cyclic loading, this study conducted multi-level fatigue mechanical tests and real-time acoustic emission (AE) monitoring on

收稿日期: 2025-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374097); 山东省泰山学者工程项目(tstp20221126)

作者简介: 公绪飞(1988—), 男, 山东临沂人, 讲师, 博士, 从事矿山冲击地压防治研究. E-mail: gong_xufei@163.com

宋贵磊(1998—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 从事矿山岩体结构力学研究, 本文通信作者.

E-mail: guilei_song@163.com

double-fissured granites under different cyclic stress paths. The results show that as the rock bridge length increases, the deterioration effect of the double fissure on the granite gradually decreases while the strength deformation, fatigue life, and dynamic elastic modulus of the specimens all show an upward trend. The fatigue mechanical parameters of the granite specimens are higher under a multi-level constant amplitude cyclic stress. Under multi-level cyclic loading, the elastic modulus shows two stages of “increase-decrease” in a stepwise pattern, and the variation in the elastic modulus is greater under multi-level constant-amplitude cyclic loading. AE energy from granite primarily occurs during the initial cycles of each fatigue stage and the instability stage, and the cumulative AE energy exhibits a significant positive correlation with rock bridge length. Compared to increasing-amplitude cyclic loading, granite has higher cumulative AE energy under constant-amplitude cyclic loading. Under multi-level cyclic loading, intact granite specimens show typical axial tensile failure, and the failure mode of pre-fissured granite is constrained by rock bridge length. As the length of rock bridges increases, the failure mode transitions gradually from rock bridge-induced failure to intact granite failure. However, the cyclic stress path has little effect on the macroscopic fracture characteristics of granite.

Key words: double-fissured granite; multi-level cyclic loading; fatigue damage; mechanical properties; fracture characteristics

在煤矿掘进与开采过程中,由于煤岩体结构和载荷发生变化,易发生矿井动力灾害,严重威胁安全生产^[1]。例如,顶板破断、采动应力波动、爆破作业等事件均会产生周期性循环应力载荷^[2],导致煤岩体失稳、诱发冲击地压事故,造成人员伤亡和财产损失。因此,研究循环荷载作用下岩体的疲劳力学特性及其前兆特征,对于冲击地压灾害防治及煤矿安全高效开采具有重要的理论价值与工程意义。

岩石疲劳对工程岩体稳定性具有不可忽视的影响^[3]。近年来,随着相关研究的持续深入,研究者发现工程岩体所承受的循环荷载具有多阶段和多层次特征^[4]。基于此,学者们针对岩石的多级疲劳力学特性开展了系列探索。杨圣奇等^[5]基于多阶段等幅循环荷载试验结果,分析了围压对红砂岩力学特性及损伤破裂特征的影响。李克升等^[6]以裂隙黄砂岩为研究对象,探讨了动态加载频率对试样多级疲劳力学特性及其细观损伤破裂机制的影响。龙大愚等^[7]研究了不同灰砂比岩充组合体的疲劳强度变形行为,并基于计算机断层扫描(computed tomography,CT)技术探讨了组合体试样的细观疲劳破裂特征。刘忠玉等^[8]研究了层理方向对煤样多级疲劳变形行为及损伤破坏机制的影响。徐颖等^[9]基于单轴多阶段等幅疲劳试验结果,分析了泥岩的疲劳强度及变形特征,发现泥岩试样的疲劳寿命与应力上限呈幂函数关系。刘汉香等^[10]着重分析了多级循环荷载条件下岩石的阻尼特性。李西蒙等^[11]揭示了砂岩多级疲劳损伤演化特征,建立了循环次数与轴向应变之间的理论模型,推导了岩石疲劳损伤演化方程。陈旭等^[12]阐明了多阶段循环荷载条件下围压和循环次数对砂岩特征应力、渗透率和声发射特征参数的影响。

煤矿开采的稳定性主要受控于煤岩体内部发育的结构面,如断层、节理、裂隙等^[13]。结构面显著弱化煤岩体的力学性能,导致其呈现非均质性、各向异性及非连续性特征^[14]。陈国庆等^[15]提出采用双裂隙模拟岩桥对地下工程失稳特征的影响。学者们研究了双裂隙岩石在常规压缩^[16]、卸荷^[17]及蠕变^[18]条件下的力学行为。一些研究聚焦于分析裂隙几何参数对岩石静力学行为的影响。Li 等^[19]分析了岩桥角度和长度对砂岩力学行为的影响,并基于近场动力学方法探讨了裂隙岩石的损伤破裂演化过程。Yang 等^[20]以裂隙花岗岩为研究对象,分析了温度和裂隙角度对其力学行为的影响,并基于颗粒流模拟阐述了单调荷载下裂隙花岗岩的微观损伤破裂机制。

目前关于岩石疲劳力学的研究多集中于完整试样,对含裂隙岩石的研究仍以静力学分析为主,针对裂隙脆性岩石在多级循环荷载下的力学响应及破坏前兆的研究尚显不足。鉴于此,本研究对预制断续双裂隙花岗岩开展多级增幅与等幅循环力学试验,系统分析试样的强度、轴向应变、弹性模量演化规律及宏观破裂模式;通过声发射实时监测技术,捕捉试样内部裂纹萌生、扩展直至贯通的完整过程的微破裂信号,分析多级疲劳过程中岩桥长度对损伤累积规律的影响。研究结果有助于揭示冲击地压等动力灾害发生前岩体损伤演化的前兆规律,可为确定冲击地压的预警阈值及制定防治措施提供一定理论指导。

1 试验概况

1.1 裂隙花岗岩试样制备

为研究岩桥长度和循环应力路径对脆性岩石力学特性和损伤破裂特征的影响,本研究选取花岗岩为研究对象,该花岗岩无天然宏观缺陷,无明显风化现象,完整性较好。将花岗岩岩块送至实验室进行精细加工,加工成国际岩石力学学会推荐的直径 50 mm、高度 100 mm 标准圆柱试样。参考陈国庆等^[15]的相关研究成果,采用线切割的方式在完整花岗岩试样上预制两条裂隙,基本参数如图 1 所示。其中, L 为预制双裂隙之间的距离,即岩桥长度。为模拟地下煤岩体节理裂隙实际赋存状态,用石膏模拟裂隙填充物,填充到预制裂隙内部。

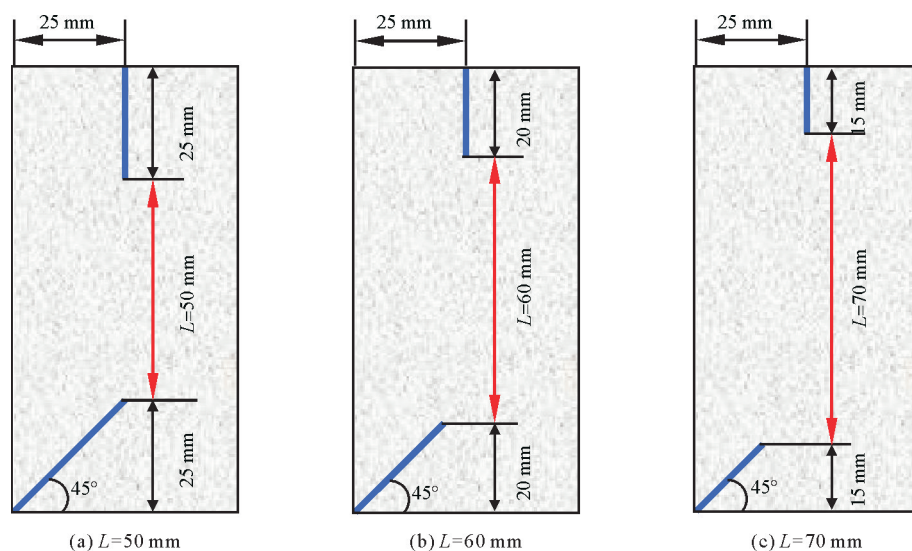


图 1 裂隙花岗岩试样制备

Fig. 1 Preparation of fissured granite specimens

1.2 试验加载程序

采矿活动引发的单一关键层周期性破断失稳与覆岩关键层联动破断失稳,本质上反映了结构失稳的尺度与联动性差异:前者受单一岩层控制,能量呈周期性稳定释放,呈现矿压的等幅循环特征;后者因多关键层协同失稳导致能量集中释放,对应矿压的多级增幅效应。本研究力学试验按照循环应力路径可分为两类:多级等幅循环荷载和多级增幅循环荷载。疲劳力学试验均在 MTS 816 岩石伺服控制试验系统上进行,该试验系统可进行常规单轴压缩试验和任意波形的单轴疲劳试验,其最大轴向力为 1 459 kN。根据工程现场监测数据,并参考文献[5-7],设计了多级疲劳力学试验的加载参数。

1) 多级等幅疲劳力学试验

如图 2(a)所示,首先采用应力控制以 10 MPa/min 速率施加轴向应力至 10 MPa;然后采用 0.1 Hz 的正弦波施加循环荷载,振幅为 15 MPa,每个疲劳阶段循环 30 次,下一个疲劳阶段的循环应力下限是上一个疲劳阶段的循环应力上限,直至试样完全失效。

2) 多级增幅疲劳力学试验

如图 2(b)所示,首先采用应力控制以 10 MPa/min 速率施加轴向应力至 10 MPa;然后采用 0.1 Hz 的正弦波施加循环荷载,每个阶段循环 30 次;第一个疲劳阶段,振幅为 15 MPa,在后续疲劳阶段,保持应力下限 10 MPa 不变,振幅增量为 15 MPa,直至试样完全失效。

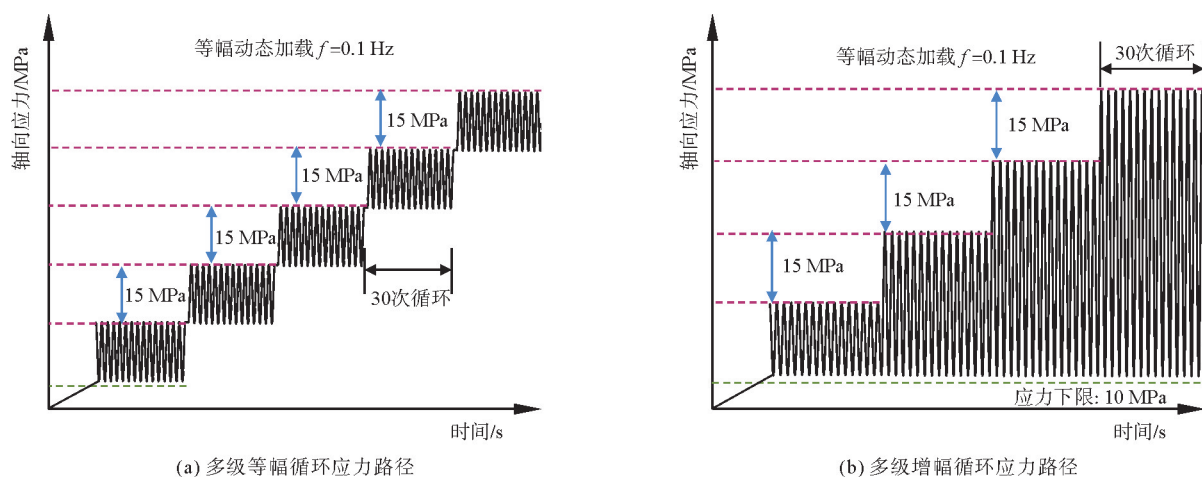


图 2 多级循环应力路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-level cyclic stress paths

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线

图 3 给出了多级循环荷载下裂隙花岗岩的应力-应变曲线。由图 3 可知,循环应力路径和岩桥距离均对试样力学行为有一定影响。与完整花岗岩相比,裂隙花岗岩试样的强度和变形明显降低,表明裂隙对花岗岩存在显著劣化效应。此外,随着岩桥距离的增加,花岗岩试样的抗疲劳能力呈上升趋势。具体表现为:当岩桥距离分别为 50、60 和 70 mm 时,等幅和增幅循环荷载下花岗岩的疲劳寿命分别为 122、181、210 次和 113、155、191 次。这是因为岩桥距离增加导致由预制裂隙处萌生的裂纹的扩展与贯通路径延长。由上述数据可知,循环应力路径对花岗岩疲劳寿命也存在一定影响:与等幅循环荷载相比,多级增幅循环荷载对花岗岩力学行为的劣化更为显著。

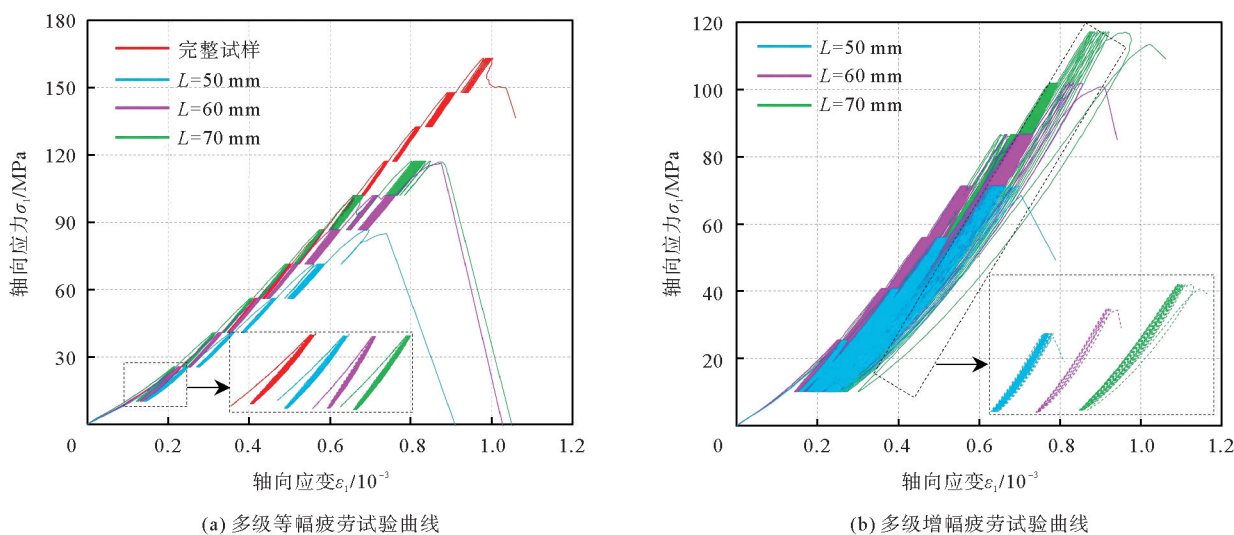


图 3 多级循环荷载作用下裂隙花岗岩试样应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of fissured granite specimens under multi-level cyclic loading

在循环加卸载过程中,加载曲线与卸载曲线并不重合,而是形成了明显的滞回环,试样内部产生了显著塑性变形,表明在循环荷载下花岗岩内部产生了不可逆损伤。进一步分析可知,随着循环应力水平增加,试样的塑性变形明显上升,表明花岗岩试样内部产生了渐进性损伤。对于单个疲劳阶段,滞回环呈现

由稀疏到密集的演化特征。然而,在最终疲劳阶段,滞回环通常呈现两类演化特征:“逐渐稀疏”和“稀疏-密集-稀疏”。以增幅循环应力路径为例,岩桥距离为 50 和 70 mm 时,最终疲劳阶段的滞回环特征为“稀疏-密集-稀疏”,岩桥距离为 60 mm 时,则表现为“逐渐稀疏”。该现象主要取决于试样所承受的最大荷载水平;当施加荷载超过岩石的疲劳极限时,滞回环在循环过程中逐渐稀疏,试样在有限周次内便迅速破坏;而当施加荷载接近疲劳极限时,岩石仍可承受一定周次的循环荷载,最终发生疲劳失效,其滞回环呈现“稀疏-密集-稀疏”的三阶段演化特征。

2.2 强度变形特性

根据图 3 所展示的多级循环荷载下裂隙花岗岩的应力-应变曲线,统计了其强度参数,如图 4 所示。完整花岗岩试样的疲劳峰值强度最高,预制裂隙的存在显著削弱了花岗岩试样的强度。由图 4 可知,随着岩桥长度增加,花岗岩试样的峰值强度呈上升趋势。具体而言,在等幅循环荷载下,当岩桥长度分别为 50、60 和 70 mm 时,花岗岩试样的峰值强度分别为 86.64、116.28、117.26 MPa;在增幅循环荷载下,峰值强度分别为 71.43、101.98、117.29 MPa。通过上述数据发现,多级循环应力路径对花岗岩强度参数存在一定的影响。相较于等幅循环荷载,增幅循环荷载条件下花岗岩的峰值强度较低。此外,随着岩桥长度增加,这种差异性逐渐缩小,这可能与裂纹扩展路径相关。

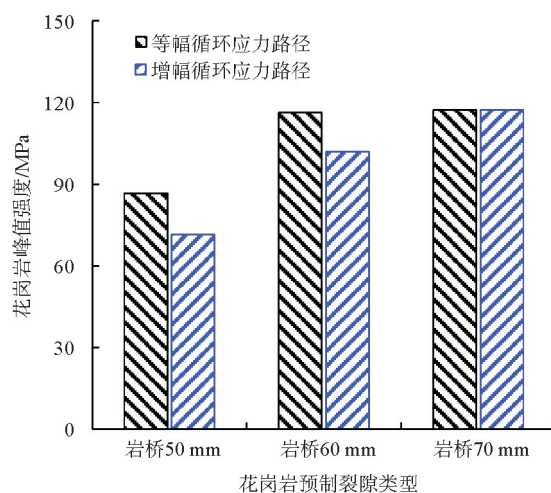


图 4 多级循环荷载下裂隙花岗岩强度对比

Fig. 4 Strength comparison of fissured granite under multi-level cyclic loading

图 5 给出了多级循环荷载期间花岗岩试样轴向应变演化曲线。由图 5 可知,随着应力上限增加,所有花岗岩试样的轴向应变均呈现阶梯状上升,这与岩石所承受的循环应力密切相关。随着循环应力水平上升,花岗岩试样的轴向应变速率呈显著上升趋势,且增长速率在疲劳加载前期较为缓慢,随着应力水平逐渐提高,尤其当平均应力水平提高至试样屈服强度之后,花岗岩试样的轴向应变速率逐渐加快。对于单个疲劳阶段,花岗岩试样的不可逆轴向应变均呈现减速疲劳变形和稳定疲劳变形;最后一个疲劳阶段,试样则表现为“减速-稳定-加速”三阶段变形特征,这与岩石的蠕变变形特征极其相似,进一步验证了文献[3]所提出的岩石“蠕变破坏”与“疲劳破坏”的同源性假设。

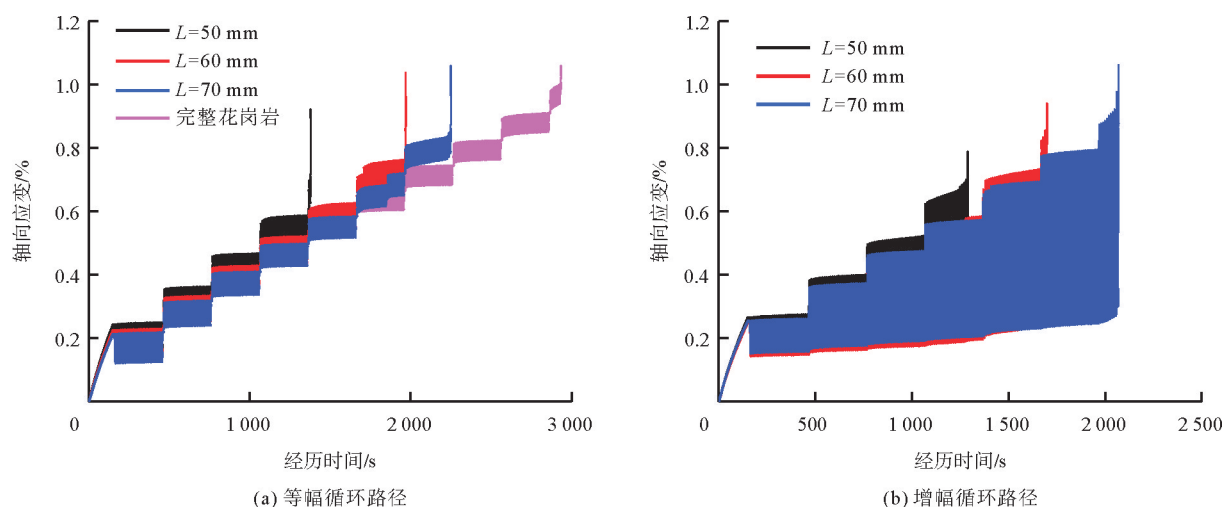


图 5 多级疲劳加载过程中裂隙花岗岩轴向应变演化

Fig. 5 Evolution of axial strain of fissured granite during multi-level fatigue loading

由图 5 进一步分析可知,与循环应力路径相比,岩桥长度对花岗岩试样的轴向应变影响更为显著。具体表现为:随着岩桥长度增加,花岗岩试样最终轴向应变呈上升趋势;但在相同的循环应力水平条件下,随着岩桥长度增加,花岗岩试样的轴向应变逐渐降低,这表明岩桥长度增加,使得试样裂纹的贯通距离增加,导致其抗疲劳变形的能力显著增强。

图 6 展示了多级循环过程中花岗岩试样动态弹性模量的演化规律。由图 6 可知,循环应力路径对裂隙花岗岩试样的弹性模量演化规律具有明显的影响。具体表现为:在多级等幅循环荷载条件下,花岗岩试样的弹性模量随着循环应力水平提高而增加,且增量逐渐降低;对于单个疲劳加载阶段,动态弹性模量先增加后趋于稳定,但在疲劳失效阶段,即最后一个疲劳阶段,弹性模量随着循环次数增加逐渐降低;每个疲劳阶段第一个循环所对应的弹性模量随着应力水平提高呈先上升后降低的趋势。在多级增幅循环荷载条件下,花岗岩弹性模量随着循环应力水平上升呈现先上升后降低的变化规律;在疲劳失稳阶段,试样弹性模量随着循环次数增加迅速降低,且降低速率明显上升。进一步分析发现,花岗岩在多级等幅循环作用下的弹性模量明显高于其在增幅循环荷载下的对应数值,这也证明了裂隙花岗岩在多级循环荷载条件下强度参数的变化特征。

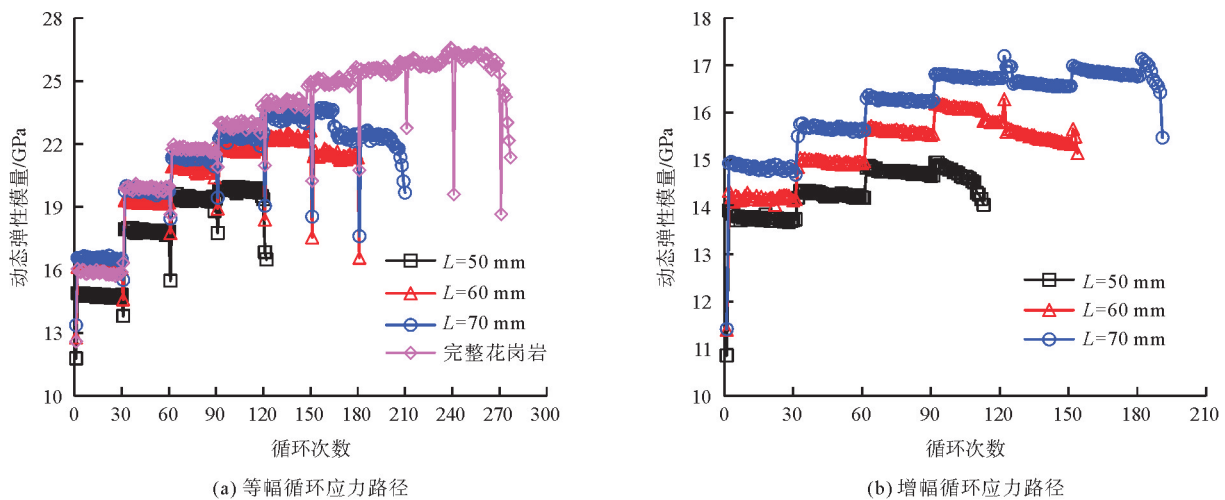


图 6 多级疲劳加载过程中裂隙花岗岩弹性模量演化

Fig. 6 Evolution of elastic modulus of fissured granite during multi-level fatigue loading

由图 6 可知,在多级循环荷载条件下,岩桥长度对花岗岩试样弹性模量的演化趋势无明显影响,但对其数值的影响较为显著。具体而言,与完整花岗岩相比,裂隙花岗岩的弹性模量不同程度降低(图 6(a)),表明裂隙对花岗岩产生一定的劣化作用;与循环应力路径无关,花岗岩试样的动态弹性模量均随着岩桥长度增加呈上升趋势,这表明增加岩桥长度可在一定程度上减缓花岗岩试样力学行为的劣化速率。与多级等幅循环荷载相比,增幅循环荷载条件下岩桥长度对花岗岩变形参数的影响更为明显(图 6(b))。

2.3 多级疲劳过程中裂隙花岗岩声发射能量特征

为探索多级循环荷载条件下花岗岩试样的损伤演化过程,对试验期间试样所产生的声发射信号进行了实时监测,图 7 给出了循环应力路径和岩桥长度对花岗岩试样声发射能量的影响。在单调加载阶段,可监测到声发射信号,这是初始孔隙压密阶段所导致的。随着应力水平增加,花岗岩试样在稳定变形阶段的声发射信号逐渐活跃,表明试样内部的损伤程度逐渐加剧。对于单个疲劳加载阶段,声发射信号主要产生于每个加载阶段的前期,随着循环次数增加,声发射信号逐渐沉寂,这是因为瞬时轴向压缩导致花岗岩内部弱晶体率先破坏和微裂纹的扩展,导致加载初期频繁的声发射信号;当弱晶体被破坏后,强晶体继续提供稳定的承载能力,导致声发射活跃度降低。在不稳定变形阶段,即最后几个疲劳阶段,花岗岩试样的声发射信号持续活跃,这表明该过程中试样内部裂纹急剧扩展和贯通,释放大量积累的弹性应变能驱动裂纹扩展,导致声发射能量处于较高水平。

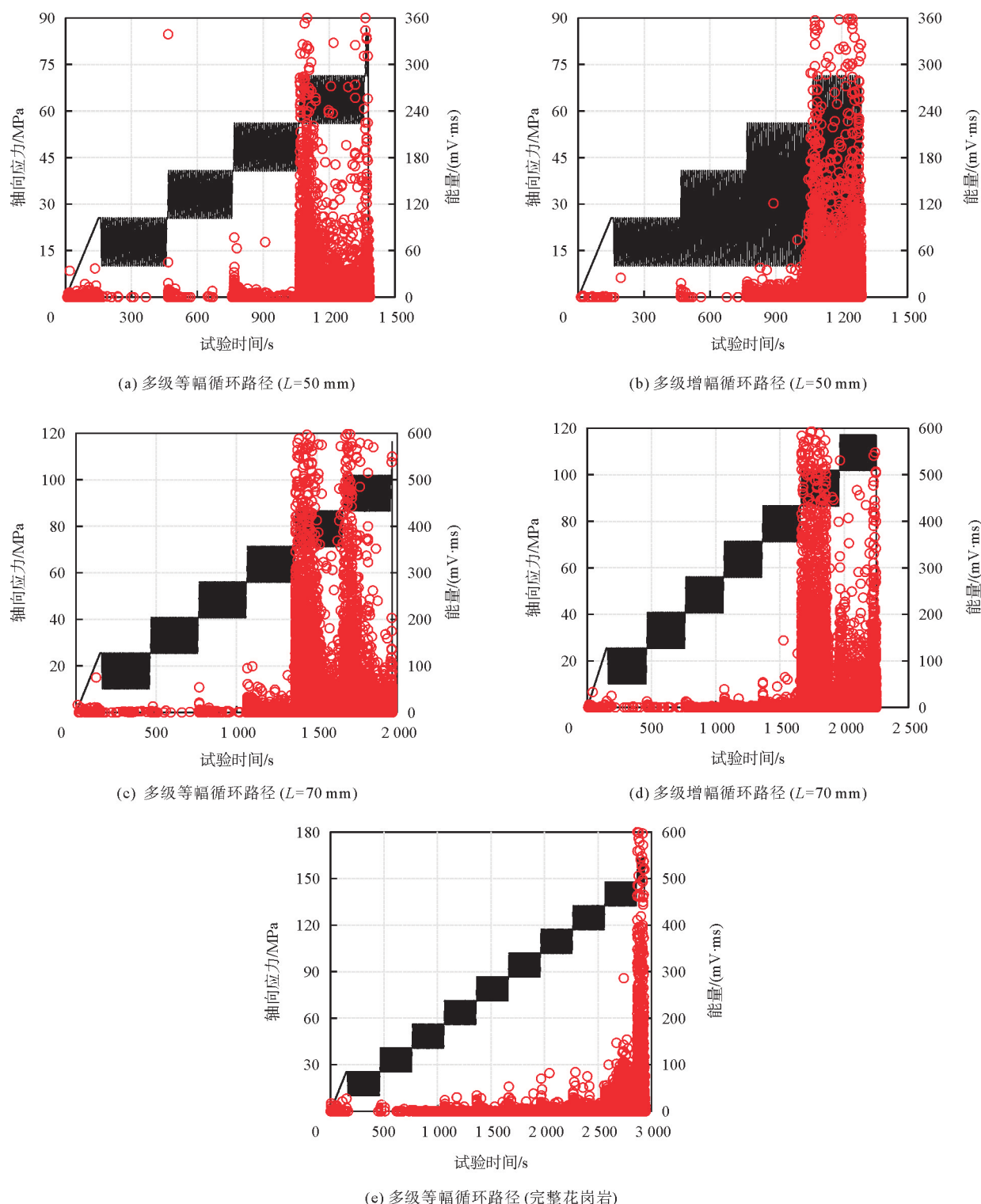


图 7 多级疲劳过程中循环应力路径和岩桥长度对花岗岩声发射能量的影响

Fig. 7 Effect of cyclic stress path and rock bridge length on the AE energy in granite during multi-level fatigue loading

由图 7(a)和图 7(b)可知,在每个疲劳加载阶段初期,多级等幅循环荷载下花岗岩声发射能量释放相较于增幅循环荷载更高,这是因为前者使得试样持续在较高应力条件下,试样内部弱晶体和微裂纹扩展时间较长;但在疲劳失稳阶段,增幅循环荷载下花岗岩试样积蓄应变能释放量明显高于等幅循环荷载,这表明增幅循环应力对花岗岩试样的损伤程度更为显著。

图 7(a)和图 7(c)~7(e)表明,完整花岗岩试样仅在疲劳失稳阶段释放大量的应变能,而裂隙花岗岩

试样在疲劳加载期间则相对均匀地释放能量,这是因为在循环荷载作用下裂隙岩石内部裂纹是由预制裂隙尖端萌生并逐渐扩展和贯通的。此外,随着岩桥长度增加,该现象逐渐减弱,且花岗岩试样声发射能量呈现降低趋势。

图 8 展示了不同岩桥长度和循环应力路径条件下花岗岩试样声发射累积能量演化曲线。由图 8 可见,在循环加载前期,花岗岩处于弹性变形阶段,声发射能量处于极低水平;随着循环应力增加,花岗岩试样累积能量呈现明显的“阶梯状”演化规律,且在疲劳加载后期能量呈非线性增长,此时试样内部裂纹快速扩展和贯通,从而导致试样迅速失去承载能力。随着岩桥长度增加,花岗岩试样声发射能量呈现降低趋势,且增幅循环荷载下试样累积能量略低。具体而言,等幅循环荷载条件下,当岩桥长度分别为 50、60 和 70 mm 时,试样的累积声发射能量分别为 804 259、1 546 993 和 1 881 469 mV · ms。

2.4 宏观破坏模式

图 9 和图 10 给出了多级循环荷载条件下裂隙花岗岩试样的宏观破坏模式。由图可知,循环应力路径和预制裂隙参数对花岗岩试样的宏观破裂特征均具有一定的影响,且与循环应力路径相比,岩桥长度对试样破裂特征的影响更为显著。

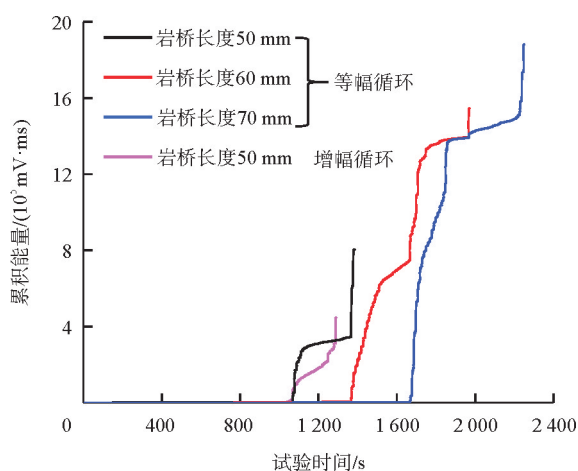


图 8 多级循环荷载下裂隙花岗岩声发射累积能量演化

Fig. 8 Evolution of cumulative acoustic emission energy of fissured granite under multi-level cyclic loading

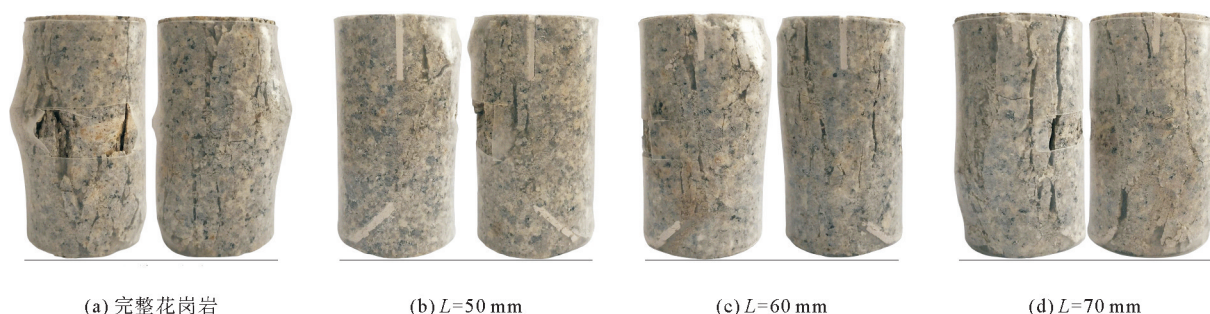


图 9 多级等幅循环荷载下裂隙花岗岩宏观破坏模式

Fig. 9 Macroscopic failure modes of fissured granite under multi-level constant-amplitude cyclic loading



图 10 多级增幅循环荷载下裂隙花岗岩宏观破坏模式

Fig. 10 Macroscopic failure modes of fissured granite under multi-level increasing-amplitude cyclic loading

完整花岗岩试样在多级循环荷载作用下呈典型的张拉劈裂破坏,且试样产生明显的膨胀,破裂程度剧烈。这是因为完整花岗岩在峰前阶段积蓄了大量弹性能,在疲劳失稳阶段,大量应变能释放,造成试样破裂尤为剧烈,这与声发射监测结果一致。进一步分析发现,岩桥长度对花岗岩试样裂纹分布具有明显的控制作用。当岩桥长度为 50 mm 时,在下端预制裂隙尖端处产生向上稳定扩展的翼裂纹,并逐渐与上部预制裂隙连接造成岩桥贯通或者向试样端部扩展,在上部预制裂隙附近形成贯通试样上端面的破坏;当岩桥长度为 60 mm 时,部分主裂纹与岩桥长度 50 mm 的花岗岩试样基本一致,但在其他区域发现了明显的主张拉裂纹,且岩桥贯通现象逐渐削弱;当岩桥长度为 70 mm 时,未见明显岩桥贯通现象,下部预制裂隙尖端产生的翼裂纹向试样上端扩展并贯通试样,同时在试样表面观察到局部劈裂裂纹,并且破裂后花岗岩试样产生一定程度的体积膨胀。进一步分析发现,循环应力路径对花岗岩试样产生的影响较小,仅在部分试样中观察到多级增幅循环荷载条件下花岗岩试样的破裂程度更为剧烈。

3 结论

1) 随着岩桥长度增加,花岗岩试样的峰值强度、轴向变形、疲劳寿命以及弹性模量均上升。与等幅循环荷载相比,增幅循环荷载对砂岩疲劳力学参数的劣化效应更为显著。随着岩桥长度增加,循环应力路径对试样力学参数的影响逐渐减弱。

2) 在多级循环荷载条件下,花岗岩动态弹性模量呈阶梯状演化特征,等幅循环荷载下花岗岩弹性模量增长幅度高于增幅荷载条件下的对应值。对于单个疲劳阶段,等幅循环荷载下试样弹性模量随着循环次数增加先提高后趋于稳定,而增幅循环荷载下弹性模量变化较小。

3) 声发射能量主要产生于单个疲劳加载阶段的前期和最后两个疲劳加载阶段。随着岩桥长度增加,声发射能量呈现上升趋势,且多级等幅循环荷载下声发射能量更高。随着疲劳进程推进,声发射累积能量呈阶梯状上升,在疲劳失稳阶段,其数值呈非线性骤增,暗示试样即将疲劳失效。

4) 与循环应力路径相比,岩桥长度对花岗岩宏观破裂特征存在显著的控制作用。完整花岗岩呈典型劈裂破坏模式。随着岩桥长度增加,花岗岩宏观破坏模式由岩桥贯通破坏逐渐过渡到轴向劈裂破坏,并且岩桥长度对试样破裂特征的影响逐渐减弱,有效解释了花岗岩的疲劳力学特性和声发射特征与岩桥长度之间的关系。

本研究仅针对含断续双裂隙的花岗岩试样开展了单轴多阶段等幅与增幅疲劳力学试验。然而,天然岩体中的裂隙通常以裂隙网络的形式分布,其应力环境与赋存条件也更为复杂,例如高地应力、高地温及高压水等。当前,复杂工况下裂隙岩体的力学特性与劣化机制尚不明确,特别是关于深部巷道裂隙围岩动态失稳破坏过程的研究,仍有待进一步深入。

参考文献:

- [1] 谷雪斌,郭伟耀,赵同彬,等.侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):46-52.
GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel under influence of lateral pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(1): 46-52.
- [2] ZHAO T B, ZHANG P F, ZHANG X F, et al. Microseismic behavior during mining of the working face under blasting presplitting of a hard roof[J/OL]. International Journal of Geomechanics. 2024, 24(3). DOI:10.1061/IJGNAL.GMENG-9042.
- [3] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
GE Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J].

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581-1585.

- [4] 蒋长宝, 魏财, 庄万军, 等. 等幅循环荷载下页岩的变形特性及能量演化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2416-2428.
- JIANG Changbao, WEI Cai, ZHUANG Wanjun, et al. Research on deformation characteristics and energy evolution mechanisms of shale under constant amplitude cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2416-2428.
- [5] 杨圣奇, 杨景, 孙博文, 等. 基于围压因素的分级应力扰动下砂岩损伤破裂特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 542-555.
- YANG Shengqi, YANG Jing, SUN Bowen, et al. Experimental study on damage and fracture characteristics of sandstone under graded stress disturbance based on confining pressure factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 542-555.
- [6] 李克升, 刘传孝. 梯级等幅周期循环荷载作用下双裂隙黄砂岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1945-1958.
- LI Kesheng, LIU Chuanxiao. Experimental investigation on mechanical properties of yellow sandstone samples containing two coplanar fissures under multistage constant-amplitude-cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1945-1958.
- [7] 龙大愚, 王宇, 李鹏, 等. 不同灰砂比岩充组合体疲劳损伤与破裂特性试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2669-2681.
- LONG Dayu, WANG Yu, LI Peng, et al. Experimental study on fatigue damage and failure characteristics of rock-backfill combination specimen with different cement-tailings ratios[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2669-2681.
- [8] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下煤层岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增 1): 2593-2602.
- LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2593-2602.
- [9] 徐颖, 李成杰, 郑强强, 等. 循环加卸载下泥岩能量演化与损伤特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2084-2091.
- XU Ying, LI Chengjie, ZHENG Qiangqiang, et al. Analysis of energy evolution and damage characteristics of mudstone under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2084-2091.
- [10] 刘汉香, 别鹏飞, 李欣, 等. 三轴多级循环加卸载下千枚岩的力学特性及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增 2): 265-274.
- LIU Hanxiang, BIE Pengfei, LI Xin, et al. Mechanical properties and energy dissipation characteristics of phyllite under triaxial multi-stage cyclic loading and unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 265-274.
- [11] 李西蒙, 刘长友, PENG S S, 等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 8-17.
- LI Ximeng, LIU Changyou, PENG S S, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(1): 8-17.
- [12] 陈旭, 肖义, 汤明高, 等. 多级等幅循环荷载作用下砂岩变形、渗透及声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8): 1923-1935.
- CHEN Xu, XIAO Yi, TANG Minggao, et al. Experimental study on deformation, permeability and AE characteristics of sandstone under multi-stage cyclic loading with a constant amplitude[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(8): 1923-1935.
- [13] ZHAO T B, ZHANG P F, XIAO Y X, et al. Master crack types and typical acoustic emission characteristics during rock failure[J/OL]. International Journal of Coal Science and Technology, 2023, 10(1). DOI: 10. 1007/s40789-022-00562-5.
- [14] WU X H, CAI M F, WU X, et al. Experimental study on nonlinear failure criterion of HDR under cyclic water-induced thermal shock[J/OL]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(5). DOI: 10. 1007/s10064-025-04313-z.

- [15] 陈国庆,赵聪,刘辉,等. 不同应力路径下岩桥试验的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(9):1792-1804.
- CHEN Guoqing,ZHAO Cong,LIU Hui,et al. Acoustic emission characteristics of rock bridge test under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(9):1792-1804.
- [16] 蒋力帅,李春盎,徐清,等. 砂型 3D 打印成型方向对含裂隙软岩试样力学特性的影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(5):22-29.
- JIANG Lishuang,LI Chun'ang,XU Qing,et al. Study on the influence of sand mold 3D printing direction on mechanical properties of soft rock specimens with crack[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2023,42(5):22-29.
- [17] 陈国庆,刘辉,秦昌安,等. 中部锁固岩桥三轴加卸荷力学特性及裂纹扩展研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(5):1162-1173.
- CHEN Guoqing,LIU Hui,QIN Chang'an,et al. Mechanical properties and crack model of central rock bridge in triaxial unloading test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(5):1162-1173.
- [18] 杨超,王娇,董星辰,等. 不同岩桥角度双裂隙砂岩单轴蠕变试验及三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(10):2466-2477.
- YANG Chao,WANG Jiao,DONG Xingchen,et al. Uniaxial creep test and three-dimensional numerical simulation of double flawed sandstone with different rock bridge angles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(10):2466-2477.
- [19] LI H,YANG S Q,YANG Z,et al. Experimental and numerical study on the mechanical behaviors and crack propagation of sandstone containing two parallel fissures[J/OL]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2023,126. DOI:10.1016/j.tafmec.2023.103965.
- [20] YANG S Q,TIAN W L,HUANG Y H,et al. An experimental and numerical study on cracking behavior of brittle sandstone containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49:1497-1515.

(责任编辑:吕海亮)