

DOI: 10.11779/CJGE202005013

开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究

陈国庆¹, 陈毅¹, 孙祥¹, 王栋², 秦昌安¹, 林之恒²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 端部开裂的裂隙岩体内部岩桥贯通是导致岩体突发失稳破坏的主要原因, 脆性破坏特征明显。利用声发射仪和岩石力学刚性试验机, 对不同长度开放岩桥开展单轴压缩试验, 结合高速摄像机记录信息, 分析了开放岩桥裂纹起裂、扩展、贯通规律及脆性破坏过程力学特性和声发射特征, 并通过三维断裂力学理论揭示了开放岩桥裂纹起裂扩展贯通机理。研究结果表明: 与闭合裂纹相比, 开放裂纹岩桥主裂纹从下部预制裂纹内尖端起裂, 往上部转折扩展贯通岩桥和上端面, 贯通过程岩桥发生逐次多级破坏, 次裂纹主要沿主裂纹转折处起裂扩展贯通岩桥及下端面; 应力曲线表现出峰前“波动上升”和峰后“滞留-突降”特征, 声发射参数“多峰值”现象明显, 阶段性和突发性特征突出; 同时, 三维理论分析表明裂纹起始扩展方向与岩桥长度无关, 沿最大压应力方向扩展。研究所得开放岩桥裂纹扩展贯通特征可为裂隙岩体突发失稳破坏过程提供理论依据。

关键词: 裂隙岩体; 开放岩桥; 裂纹贯通; 脆性破坏; 声发射

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)05-0908-08

作者简介: 陈国庆(1982—), 男, 重庆万州人, 教授, 主要从事岩石力学破坏机理和稳定性评价方面的研究。

Email: chgq1982@126.com。

Crack coalescence and brittle failure characteristics of open rock bridges

CHEN Guo-qing¹, CHEN Yi¹, SUN Xiang¹, WANG Dong², QING Chang-an¹, LIN Zhi-heng²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The coalescence of rock bridge of fractured rock mass with end cracking is the main cause of the sudden damage of the rock mass, and the brittle failure is obvious. The uniaxial compression tests are conducted on the open rock bridges with different lengths by using the acoustic emission tester and the rock mechanics rigidity tester. By use of the information recorded by high-speed camera, the crack coalescence laws and acoustic emission characteristics of open rock bridges are analyzed. The mechanism of crack initiation of open rock bridges is revealed by the theory of three-dimensional fracture mechanics. The results show that compared with the closed crack, the main crack of an open rock bridge starts from the tip of the crack at the lower part, and the main crack turns to the upper part expanding through the rock bridge and the top end. During the coalescence of the main crack, the rock bridge presents successive multi-stage failure. The secondary crack propagates along the inflection of the main crack and extends through the rock bridge and the lower end. The stress curve shows the “fluctuation rise” before the peak and “stagnation-sudden” after the peak, and the “multi-peak” phenomenon of the acoustic emission is obvious, with obvious stage and sudden features. Simultaneously, the three-dimensional theoretical analysis shows that the crack initiation direction is independent of the length of the rock bridge and extends along the direction of the maximum compressive stress. The obtained crack propagation characteristics of the open rock bridge may provide a theoretical basis for the sudden failure of the fractured rock mass.

Key words: fractured rock mass; open rock bridge; crack coalescence; brittle damage; acoustic emission

0 引言

裂隙岩体失稳破坏过程主要受内部锁固段岩桥和结构面控制。在外营力影响下, 岩体内部结构面逐渐成核、扩展并贯通锁固段岩桥, 导致整个岩体失稳破坏。因此, 端部开裂的裂隙岩体内部锁固段岩桥贯

通对岩体整体失稳破坏过程起着关键作用, 本文对开放岩桥裂纹扩展贯通过程进行研究, 有助于进一步研

基金项目: 国家自然科学基金项目(41521002, 41972284); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2019066(19-20))

收稿日期: 2019-07-17

究锁固型脆性裂隙岩体突发失稳破坏机制。

目前为止, 学者基于大量室内试验和理论分析, 开展了大量裂隙类岩石的裂纹扩展研究, Rao 等^[1]、Gou 等^[2]通过试验研究了岩石不同形状裂纹的闭合规律及断裂机理; Bobet 等^[3-4]通过试验观察和数值预测研究了岩石材料的裂纹聚结情况; Wong 等^[5-6]对不同裂隙岩石材料裂纹起裂和聚结过程进行了宏观和微观解释; 黄达等^[7-8]通过加卸载试验研究了裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化规律; 赵延林等^[9-10]对压、剪作用下断续节理岩桥进行了破断试验与数值研究; 杨圣奇等^[11-14]进行了断续裂隙岩石破坏形态研究及裂纹扩展颗粒流分析; Zhou 等^[15-16]通过数值模拟研究了多裂纹类岩石材料的裂纹扩展和聚结行为。

另外, 脆性岩石破裂伴随应变能释放, 破坏时有声发射前兆, 前人结合声发射和断裂理论分析, 也取得了丰硕成果, 纪洪广等^[17-18]通过室内试验研究了花岗岩破裂过程声发射特征; Chen 等^[19]基于声发射研究了岩桥的破坏机理; 宋义敏等^[20]对不同加载速率下预制裂纹花岗岩断裂特征进行了研究; 黎立云等^[21]对多裂纹岩桥贯通机理进行研究, 得出岩桥裂纹贯通性质由裂纹尖端应力极值的性质决定。综上, 前人对脆性岩桥裂纹扩展研究主要考虑了内部节理工况, 对开放型岩桥研究也是在封闭环境下进行试验, 没有直观分析岩桥裂纹扩展贯通过程, 对其脆性破坏机理研究还不够完善。

因此, 在以上研究成果的基础上, 本文结合 AE 监测及断裂理论分析, 对开放型花岗岩岩桥进行单轴试验, 研究其裂纹贯通过程及脆性破坏特征。试验结果表明, 单轴压缩下不同长度花岗岩岩桥裂纹扩展过程、贯通模式及力学特征明显不同, 其力学特性和 AE 参数特征能很好反映岩桥脆性破坏过程。此研究结果为端部开裂的裂隙岩体脆性破坏及突发失稳过程提供了理论依据。

1 试验方案

1.1 岩样制备

为模拟端部开裂的裂隙岩体内部锁固段岩桥贯通导致岩体整体突发失稳破坏过程, 本试验选用结构均匀、质地坚硬的细粒花岗岩为材料, 按照国际岩石力学试验标准将其加工成尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体标准试件, 再用岩石切割机制成3种不同长度开放型岩桥试样, 每种岩桥制作5个, 共15个岩样, 分3组进行试验。图1所示为不同长度岩桥试样示意图, 黑色箭头线表示预制裂纹高度, 红色箭头线表示岩桥长度, 试样上、下预制裂纹高度分别为25,

15 mm, 对应50, 60, 70 mm岩桥, 下部预制裂纹倾角 45° , 上部预制裂纹中垂向下, 试验时试样两端受压。鉴于篇幅限制, 本文分别选取典型岩样G-50-2、G-60-2、G-70-2作详细对比分析。

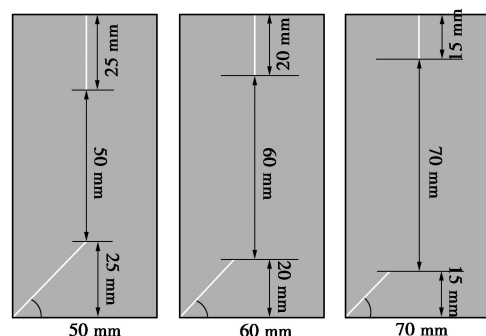


图1 不同长度花岗岩岩桥试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of granite bridge samples with different lengths

1.2 试验仪器与方法

加载设备采用MTS815多功能电液伺服刚性试验机, 采用位移方式控制, 以 0.1 mm/min 速率进行加载。声发射监测使用美国物理声学公司(PAC)研制的Micro-II AE系统, 频率范围 $1 \text{ kHz} \sim 3 \text{ MHz}$, 门槛值为 40 dB , 采样率 10 兆/秒 , 岩样周围布置4个探头, 采样间隔 $1 \mu\text{s}$ 。拍摄记录采用索尼CX900E高速摄像机。

便于高速摄像机观测岩桥裂纹扩展过程, 试样不用热缩管包裹, 除加载外不受任何约束。为尽量减小端部效应影响, 安放前在试件和上、下垫块之间抹适量耦合剂。试验后通过分析开放岩桥力学特性和AE特征, 结合高速摄像机记录信息, 对其裂纹扩展贯通过程及突发脆性破坏特征进行研究。

2 力学特性分析

2.1 开放岩桥应力应变曲线

图2为单轴压缩条件下不同长度花岗岩岩桥典型岩样力学特性曲线, 结合表1分析, 曲线大致分为5个阶段: 微裂纹压密段(OA), 曲线上凹, 试件局部微结构面调整; 主裂纹萌生段(AB), 曲线呈线性, 主裂纹萌生, B点附近轻微波动; 主裂纹扩展贯通段(BC), 曲线偏离线性, 主裂纹稳定扩展并贯通, 次裂纹萌生, C点附近出现明显应力降; 次裂纹扩展贯通段(CD), 曲线波动上升, 次裂纹快速扩展贯通, D点对应试件单抗强度; 整体脆性破坏段(DE), 峰后曲线滞留一段时间再突降, 可能是由于试件到达峰值强度时没有即时破碎, 滞留一定时间后才脆性破坏完全。同时, 随着岩桥长度增加, 裂纹压密段变长, 主裂纹贯通段变短, 曲线应力波动次数减少, 峰值附近曲线更尖锐, 峰后曲线滞留时间变长。

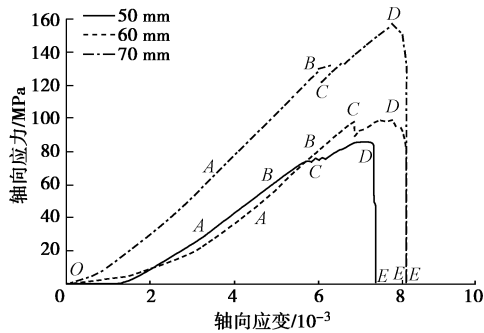


图2 不同长度岩桥单轴压缩轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock bridges with different lengths under uniaxial compression

表1 应力曲线分界点对应强度与单抗强度比

Table 1 Strengths and uniaxial compressive strength ratios of stress curve demarcation point

岩桥长度 /mm	强度比/%		
	A/D	B/D	C/D
50	36.05	72.09	87.21
60	45.63	74.76	95.15
70	41.77	81.00	83.54

2.2 开放岩桥力学参数分析

表2所示为不同长度花岗岩岩桥单轴压缩下力学参数平均值,可以看出,岩桥越长,平均强度越大,弹性模量均值越大。而随着岩桥长度增加,预制裂纹逐渐变短,当预制裂纹长度为零时,试件为完整岩样,说明与完整岩样相比,随着预制裂纹变长,岩桥变短,其单轴抗压强度逐渐降低,变形程度越来越小。

表2 单轴压缩下不同长度花岗岩岩桥力学参数均值

Table 2 Average mechanical parameters of granite bridges with different lengths under uniaxial compression

岩桥长度/mm	高度/mm	直径/mm	弹模/GPa	强度/MPa
50	99.95	50.04	11.23	88.86
60	99.92	50.02	13.65	114.11
70	100.01	50.05	16.95	147.82

2.3 开放与闭合裂纹应力特征对比

为了便于描述,把在花岗岩岩桥边缘切割贯穿的预制裂纹称为开放裂纹,把在花岗岩试样内部切割贯穿的预制裂纹称为闭合裂纹。闭合裂纹^[22-23]应力曲线经历了压密、弹性变形、非稳定破裂和破裂后4个阶段,破裂后表现出明显的脆性破坏特征,与完整岩样相比,强度减小,这与开放裂纹基本相似。闭合裂纹峰前曲线呈“阶梯状上升”,峰后曲线“突降”,而开放裂纹峰前曲线“波动上升”,峰后曲线“滞留-突降”,且随裂纹长度增加,滞留时间变长。

3 贯通破坏机制分析

3.1 开放岩桥贯通破坏特征

为清晰表述岩桥裂纹贯通过程,将最先起裂并贯通岩桥的裂纹定义为主裂纹;将后续产生的裂纹统称

为次裂纹。表3为单轴压缩条件下不同长度花岗岩岩桥典型岩样裂纹起裂贯通过程及脆性破坏前形态分析,由表可知,随轴向应力增加,不同长度岩桥裂纹扩展贯通特征共性在于:

(1) 主裂纹都从下部预制裂纹尖端起裂,偏转一个角度(起裂角 θ_0)后向上拐折扩展贯通,扩展路径是曲线。

(2) 主裂纹贯通过程不是一次性的,而是发生多次剪切-张拉破坏后逐级破坏贯通^[24]。

(3) 主裂纹贯通后大块崩落,次裂纹沿主裂纹多级破坏拐折处萌生并快速扩展贯通,岩桥发生脆性破坏,伴随一定响声,岩块弹射向四周。

主要差异在于短岩桥(50 mm)主裂纹起裂后向上趋于竖直扩展与上部预制裂纹贯通(简称贯通岩桥),次裂纹向内扩展贯通岩桥,长岩桥(60, 70 mm)主裂纹起裂后向上倾斜扩展贯通岩桥上端面,次裂纹向下扩展贯通岩桥下端面及向内扩展贯通岩桥。另外,随着岩桥长度增加,脆性破坏响声越大,岩块弹射越远,主裂纹贯通过程转折点减少,说明岩桥越长,破坏时释放能量越大,逐次多级破坏次数越少。

3.2 开放岩桥裂纹扩展机理分析

由3.1节分析可知,主裂纹由下部预制裂纹尖端起裂扩展,因此,本节着重分析下部预制裂纹断裂机理。下部预制裂纹是一个三维裂纹,以裂纹前缘边中点为坐标原点,该点的切线方向为z轴,平行于裂纹面方向为x轴,垂直于裂纹面为y轴,如图3所示。沿x轴方向的力平行于裂纹面向面内作用,属于II型,沿y轴方向作用的力垂直于裂纹面作用,属于I型,沿z轴方向的力平行于裂纹面向面外作用,属于III型。

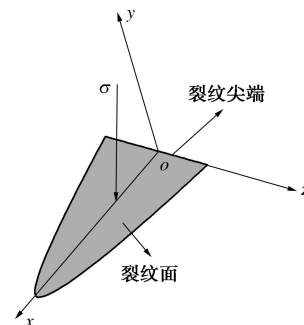


图3 下部预制裂纹坐标系

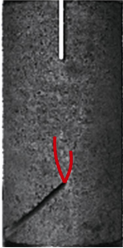
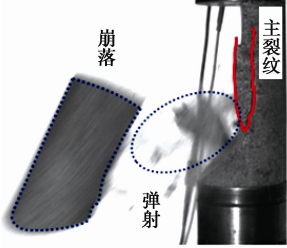
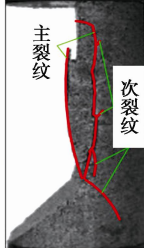
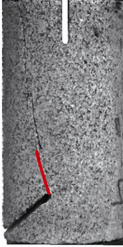
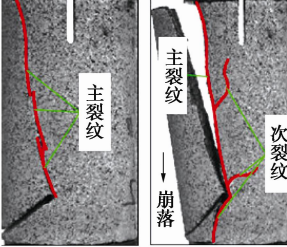
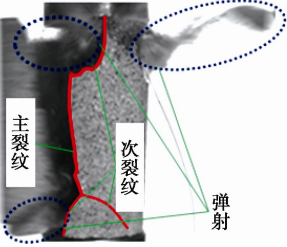
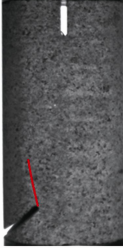
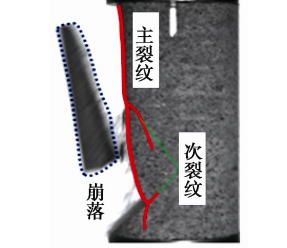
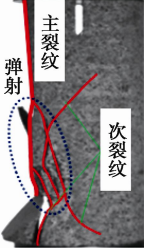
Fig. 3 Coordinate system of lower prefabricated crack

单轴加载应力 σ 在xoy平面内,且与裂纹面法线方向(y轴)的夹角为 45° ,以拉为正,压为负,对裂纹尖端一点应力进行描述,应力状态为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -\sin^2 45^\circ \sigma & -\sin 45^\circ \cos 45^\circ \sigma & 0 \\ -\sin 45^\circ \cos 45^\circ \sigma & -\cos^2 45^\circ \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

表 3 不同长度典型岩样裂纹起裂贯通过程及脆性破坏形态

Table 3 Crack initiation coalescence process and brittle failure morphology of typical rock samples with different lengths

岩样编号	裂纹起裂	裂纹扩展 - 贯通模式	脆性破坏形态	破坏特征描述
G-50-2				①主裂纹从下部裂纹尖端起裂, 产生 2 条张拉裂纹向上部扩展贯通岩桥; ②主裂纹贯通过程有多个折点, 说明岩桥不是一次性贯通, 而是多次张拉-剪切逐级破坏, 贯通后大块崩落, 次裂纹沿主裂纹发育; ③次裂纹快速扩展贯通为宏观裂纹, 试件发生脆性破坏, 伴随较小声响, 岩块轻微弹射。
G-60-2				①主裂纹从下部裂纹尖端起裂, 产生 1 条张拉裂纹向上倾斜扩展贯通岩桥上端面, 贯通过程发生多次剪切拉裂; ②主裂纹贯通过后大块崩落, 次裂纹沿主裂纹转折处萌生扩展; ③次裂纹向下扩展贯通岩桥下端面, 向内扩展贯通岩桥, 伴随较大响声, 岩桥脆性破坏, 岩块弹射远。
G-70-2				①主裂纹从下部裂纹尖端起裂, 产生 1 条张拉裂纹向上倾斜扩展贯通岩桥上端面, 贯通路径转折处明显减少; ②主裂纹贯通过后大块崩飞, 尖端处小岩块弹射, 次裂纹发育; ③次裂纹快速扩张, 部分贯通试件下端面, 部分向内扩展贯通岩桥, 试件发生脆性破坏, 响声大, 岩块弹射很远。

式中, $i, j=x, y, z$ 。

根据线弹性断裂力学理论分析^[25], 该三维裂纹尖端在柱坐标中应力分量为

$$\sigma_{ij} = \frac{K_h}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^h(\theta) + O(r^{-1/2}) \quad (2)$$

式中 $i, j=x, y, z$; $h=I, II, III$; K_h 为不同类型裂纹应力强度因子; $f_{ij}^h(\theta)$ 为不同类型裂纹关于 θ 的函数 (在二维应力中, θ 为裂纹扩展角)。

由应力状态分析式 (1) 可知, 该三维裂纹属于二维应力问题, 面内受剪和受压, 并且在轴向压应力作用下裂纹闭合, 属于 II 型 (滑开型)。

略去高阶无穷小, 裂纹尖端应力状态极坐标表达式为

$$\sigma_{rr} = \frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} (3 \cos \theta - 1) \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{3K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (3 \cos \theta - 1) \quad (5)$$

主裂纹受张应力作用张拉扩展, 并且该裂纹起始扩展在岩样下部预制裂纹尖端, 扩展路径最终趋于沿

竖直方向, 即纯 I 型 (张开型) 扩展。所以, 根据线弹性断裂力学扩展准则^[25], 宜采用最大周向应力理论分析。裂纹沿 $\sigma_{\theta\theta\max}$ 对应的 θ 扩展, 满足

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} = 0 \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6), 可得裂纹尖端起始扩展角 θ_0 :

$$\theta_0 = \arccos \frac{1}{3} = 70^\circ 32' \quad (7)$$

由以上分析可知, 裂纹起始扩展方向与岩桥长度无关, 沿最大压应力方向扩展。

图 4 为不同长度岩桥典型岩样破坏面及裂纹扩展角三维示意图, 表 4 为单轴压缩下不同长度花岗岩岩桥裂纹扩展角统计, 其中, 有 5 个岩样试验不成功, 无法统计数值。从图 4 及表 4 可知, 50, 60, 70 mm 岩桥裂纹扩展角试验均值分别为 $67.4^\circ, 70^\circ, 71^\circ$, 与理论值 70.53° 分别相差 $3.13^\circ, 0.53^\circ, 0.47^\circ$, 说明理论计算结果与试验结果基本符合, 且扩展最终路径趋于 I 型扩展。

3.3 开放与闭合裂纹起裂扩展破坏特征对比

图 5 所示为单轴压缩下闭合裂纹起裂扩展破坏特征示意图^[23], 由图可知, 水平裂纹主要受张拉破坏,

表4 单轴压缩下不同长度开放岩桥裂纹扩展角

Table 4 Crack propagation angle of open bridge with different lengths under uniaxial compression

试件编号	扩展角 $\theta_0/(^\circ)$	试件编号	扩展角 $\theta_0/(^\circ)$	试件编号	扩展角 $\theta_0/(^\circ)$
G-50-1	65	G-60-1	71	G-70-1	70
G-50-2	70	G-60-2	68	G-70-2	76
G-50-3	71	G-60-3	—	G-70-3	69
G-50-4	69	G-60-4	72	G-70-4	72
G-50-5	62	G-60-5	69	G-70-5	68
均角	67.40	均角	70.00	均角	71.00

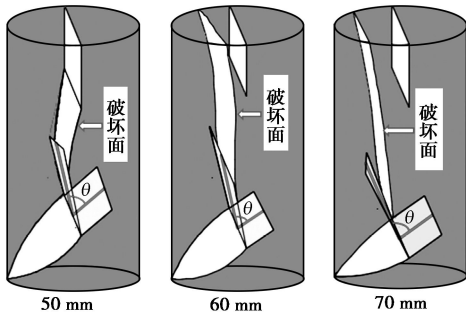


图4 不同长度典型岩样破坏面及裂纹扩展角 θ_0 三维示意图

Fig. 4 Three-dimensional diagram of failure surface and crack propagation angle θ_0 of typical rock samples with different lengths

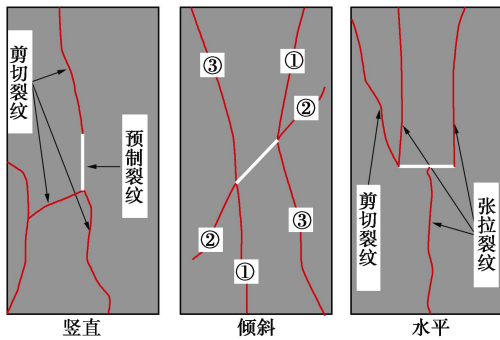


图5 闭合裂纹起裂扩展破坏特征示意图^[23]

Fig. 5 Schematic diagram of crack initiation and propagation failure characteristics of closed cracks^[23]

竖直裂纹主要受剪切破坏，倾斜裂纹受张拉-剪切混合作用，形成①翼裂纹、②共面裂纹和③反翼裂纹，裂纹主要从两端起裂，直接扩展贯通试件。图6所示为单轴压缩下开放裂纹起裂扩展破坏特征示意图，由图可知，开放裂纹面相当于倾斜临空面，为岩桥破坏提供了变形和滑移的让位空间，导致岩桥主裂纹贯通后沿临空面大块滑移-崩落，崩落方向受岩桥长度影响。

同时，开放裂纹内端受约束，主裂纹从内端起裂，向上多次拐折扩展贯通，扩展过程拐折处产生分支次

裂纹向内扩展，尖端产生次裂纹向下贯通，导致岩桥脆性破坏。与闭合裂纹相比，开放裂纹扩展过程不是直接贯通，而是经过多次应力调整，产生大量分支裂纹，导致岩桥发生多次逐级破坏。

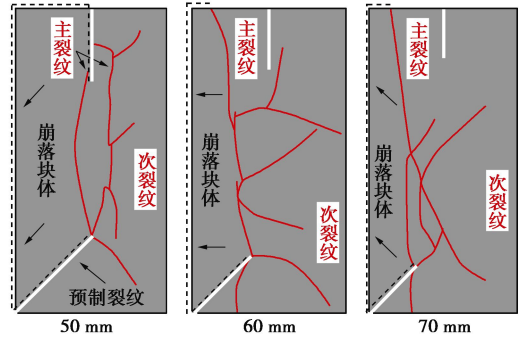


图6 开放裂纹起裂扩展破坏特征示意图

Fig. 6 Schematic diagram of crack initiation and propagation failure characteristics of open cracks

4 声发射特征分析

4.1 AE 参数与力学特性关系

根据 AE 监测结果，可将 AE 参数曲线分为上升期、稳定期和波动期 3 个阶段。AE 参数特征表现出明显的阶段性和突发性（图 7~9）。上升期 AE 事件数少，计数率和能率增长缓慢，应力曲线上凹，到①处计数率和能率微增，应力曲线轻微波动；稳定期计数率和能率比较稳定，应力曲线稳定上升，在②处计数率和能率突增，应力曲线突降；波动期计数率和能率快速增加，应力曲线波动上升，到③处应力曲线达到峰值，计数率和能率剧增；之后计数率和能率消失，应力曲线滞留-突降至零。

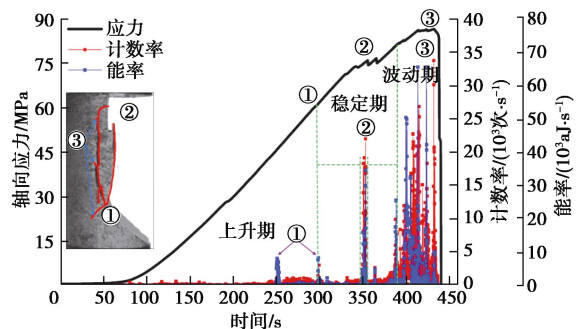


图7 50 mm 岩桥应力-时间-AE 参数曲线

Fig. 7 Stress-time-AE parameter curve of 50 mm-rock bridge

4.2 AE 特征与裂纹扩展关系

表 5 为单轴压缩条件下不同长度岩桥 AE 参数特征信息统计，主要为 3 个峰值点（微增、突增、剧增）和 2 次相对稳定期。从表 5 中可以看出，随着岩桥长度增加，主裂纹起裂时间变长，稳定扩展持续时间（分

表 5 不同长度岩桥 AE 特征信息统计

Table 5 Statistics of AE feature information of rock bridges with different lengths

试样 编号	微增		第一稳定期 起止时间/s	突增		第二稳定期 起止时间/s	剧增 (最大值)	
	计数 /(10 ⁶ 次)	能量 /(10 ⁶ aJ)		计数 /(10 ⁶ 次)	能量 /(10 ⁶ aJ)		计数 /(10 ⁶ 次)	能量 /(10 ⁶ aJ)
G-50-2	0.81	0.92	298~342	1.36	1.83	360~380	5.10	7.22
G-60-2	2.33	2.16	375~405	3.75	4.14	415~450	7.08	10.6
G-70-2	0.82	0.73	361~372	1.18	1.71	375~440	8.24	14.1

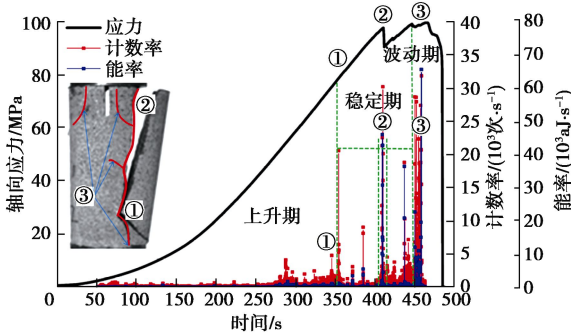


图 8 60 mm 岩桥应力 - 时间 - AE 参数曲线

Fig. 8 Stress-time-AE parameter curve of 60 mm-rock bridge

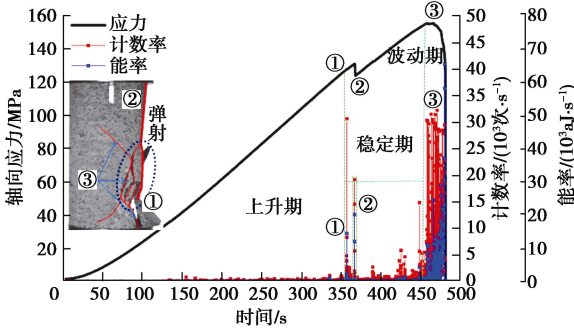


图 9 70 mm 岩桥应力 - 时间 - AE 参数曲线

Fig. 9 Stress-time-AE parameter curve of 70 mm-rock bridge
 别为 44, 30, 11 s) 减少, 次裂纹稳定扩展持续时间 (20, 35, 65 s) 增多, 计数和能量逐渐增大。说明岩桥越长, 主裂纹起裂越困难, 起裂后裂纹扩展速度越快, 脆性破坏特征越明显。

结合图 7~9 分析可知, 计数率和能率微增, 应力曲线轻微波动, 对应岩桥主裂纹起裂; 计数率和能率突增, 应力曲线发生明显应力降, 对应岩桥主裂纹贯通; 计数率和能率 2 次相对稳定期, 应力曲线稳定上升, 分别对应岩桥主、次裂纹稳定扩展; 计数率和能率剧增, 应力曲线达到峰值, 对应次裂纹快速贯通, 岩桥即将发生脆性破坏。

4.3 开放与闭合裂纹 AE 特征对比

闭合裂纹 AE 参数变化分为上升期、平静期和波动期^[26], 表现出明显阶段性, 加载初期基本没有声发射活动, 随应力增加, 声发射率突增, 集中出现在破坏前, 表现出明显突发性, 这和开放裂纹 AE 特征一致。主要差异在于开放裂纹 AE 参数脆性破坏前表现

出“多峰值”(至少 3 个)现象, 闭合裂纹 AE 参数大多只有 1~2 个峰值, 并且开放裂纹 AE 事件率最大值出现在峰值强度附近, 而闭合裂纹均发生在峰值应力前。

5 结 论

本文通过对不同长度开放型花岗岩岩桥开展单轴压缩试验, 得到以下 3 点结论。

(1) 开放岩桥裂纹贯通特征共性在于主裂纹从下部裂纹尖端起裂, 向上部转折扩展贯通, 贯通过程受张拉 - 剪切混合作用, 使岩桥发生逐次多级破坏; 次裂纹主要受剪切作用, 沿主裂纹转折处起裂扩展贯通岩桥及下端面, 导致岩桥脆性破坏。主要差异在于短岩桥主裂纹贯通岩桥, 长岩桥主裂纹贯通岩桥上端面。

(2) 开放岩桥裂纹起始扩展方向与岩桥长度无关, 倾向于最大压应力方向。其力学特性和 AE 参数特征能同步反映裂纹起裂扩展贯通破坏全过程。力学曲线出现明显应力降, AE 参数曲线突增, 表明岩桥主裂纹贯通; 力学曲线出现“滞留 - 突降”特征, AE 参数曲线剧增, 表明岩桥脆性破坏。

(3) 与闭合裂纹扩展特征相比, 开放裂纹岩桥表现出大块滑移 - 崩落和逐级破坏特征, AE 参数出现多峰值现象。并且, 随岩桥长度增加, 开放岩桥单轴抗压强度增大, 峰前波动次数和 AE 参数峰值数减少, 多级破坏过程和峰后滞留时间变短。

参考文献:

[1] RAO Q H, SUN Z Q, WANG G Y, et al. Mode II fracture mechanism of direct shearing specimen with guiding grooves of rock[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 2(11): 613 - 616.
 [2] GOU S H, SUN Z Q. Closing law and stress intensity factor of elliptical crack under compressive loading[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 5(12): 966 - 969.
 [3] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863 - 888.
 [4] BOBET A. Fracture Coalescence in Rock Materials:

- Experimental Observations and Numerical Predictions[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [5] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 1 Macroscopic observations and interpretation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, **42**(3): 475 - 511.
- [6] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 2 microscopic observations and interpretation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, **42**(3): 513 - 545.
- [7] 黄 达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(3): 502 - 512. (HUANG Da, HUANG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(3): 502 - 512. (in Chinese))
- [8] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 三轴加卸载下花岗岩脆性破坏及应力跌落规律[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, **33**(2): 1 - 6. (HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Brittle failure and stress drop of granite under triaxial loading and unloading[J]. *Civil Engineering and Environmental Engineering*, 2011, **33**(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [9] 赵延林, 彭青阳, 万 文, 等. 直剪作用下不共面断续节理岩桥破断试验与数值研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, **36**(1): 59 - 67. (ZHAO Yan-lin, PENG Qing-yang, WAN Wen, et al. Breakage test and numerical study of non-coplanar intermittent jointed rock bridge under direct shear[J]. *Civil Engineering and Environmental Engineering*, 2014, **36**(1): 59 - 67. (in Chinese))
- [10] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Study on uniaxial compression fracture test and wing fracture numerical simulation of ordered multi-cracked rock materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (in Chinese))
- [11] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (in Chinese))
- [12] 杨圣奇, 黄彦华, 刘相如. 断续双裂隙岩石抗拉强度与裂纹扩展颗粒流分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, **43**(2): 220 - 226. (YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua, LIU Xiang-ru. Analysis of tensile strength and crack propagation particle flow in intermittent double fracture rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, **43**(2): 220 - 226. (in Chinese))
- [13] YANG S Q, HUANG Y H, TIAN W L, et al. Effect of high temperature on deformation failure behavior of granite specimen containing a single fissure under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, **52**: 2087 - 2107.
- [14] YANG S Q, YIN P F, ZHANG Y C, et al. Failure behavior and crack evolution mechanism of a non-persistent jointed rock mass containing a circular hole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, **114**: 101 - 121.
- [15] 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.
- [16] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**(6): 1961 - 1986.
- [17] 纪洪广, 卢 翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(4): 694 - 702. (JI Hong-guang, LU Xiang. Study on acoustic emission characteristics and precursor rupture information of granite under conventional triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(4): 694 - 702. (in Chinese))
- [18] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(2): 3673 - 3678. (ZHAO Xing-dong, TANG Chun-an, LI Yuan-hui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(2): 3673 - 3678. (in Chinese))
- [19] CHEN G Q, ZHANG Y, HUANG R Q, et al. Failure mechanism of rock bridge based on acoustic emission technique[J]. *Journal of Sensors*, 2015: Article ID 964730.
- [20] 宋义敏, 邢同振, 吕祥锋, 等. 不同加载速率 I 型预制裂

- 纹花岗岩断裂特征研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 81 - 88, 96. (SONG Yi-min, XING Tong-zhen, LU Xiang-feng, et al. Fracture characteristics of type I pre-cracked granite with different loading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 81 - 88, 96.(in Chinese))
- [21] 黎立云, 许风光, 高峰, 等. 岩桥贯通机制的断裂力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(23): 4328 - 4334. (LI Li-yun, XU Feng-guang, GAO Feng, et al. Fracture mechanics analysis of rock bridge failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(23): 4328 - 4334. (in Chinese))
- [22] 张国凯, 李海波, 王明洋, 等. 单裂隙花岗岩破坏强度及裂纹扩展特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 1): 2760 - 2771. (ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, WANG Ming-yang, et al. Study on failure strength and crack propagation characteristics of single-fractured granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 2760 - 2771. (in Chinese))
- [23] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的强度特征与破坏模式试验[J]. 工程科学学报, 2019, **41**(1): 43 - 52. (GUO Qi-feng, WU Xu, CAI Mei-feng, et al. Strength characteristics and failure mode test of prefabricated fractured granite[J]. Journal of Engineering Science, 2019, **41**(1): 43 - 52. (in Chinese))
- [24] 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 Guo-qing, LIU Hui, QIN Chan-gan, et al. Study on mechanical properties and crack propagation of triaxial loading and unloading of central locking rock bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1162 - 1173. (in Chinese))
- [25] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. (LI Shi-yu, HE Tai-ming, YIN Xiang-chu, et al. Introduction to Rock Fracture Mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology China Press, 2010. (in Chinese))
- [26] 赵扬锋, 张超, 刘力强, 等. 预制裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, **45**(7): 44 - 49, 138. (ZHAO Yang-feng, ZHANG Chao, LIU Li-qiang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of pre-cracked granite during uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2017, **45**(7): 44 - 49, 138. (in Chinese))

标准摘录：标点符号用法（GB/T 15834—2011） 括号的定义与用法（二）

d) 标示引语的出处。

示例 7: 他说得好: “未画之前, 不立一格; 既画之后, 不留一格。”(《板桥集·题画》)

e) 标示汉语拼音注音。

示例 8: “的 (de)” 这个字在现代汉语中最常用。

3.2 标示作者国籍或所属朝代时, 可用方括号或六角括号。

示例 1: [英]赫胥黎《进化论与伦理学》

示例 2: [唐]杜甫著

3.3 报刊标示电讯、报道的开头, 可用方头括号。

示例: 【新华社南京消息】

3.4 标示公文发文字号中的发文年份时, 可用六角括号。

示例: 国发〔2011〕3号文件

3.5 标示被注释的词语时, 可用六角括号或方头括号。

示例 1: (奇观) 奇伟的景象。

示例 2: 【爱因斯坦】物理学家。生于德国, 1933 年因受纳粹政权迫害, 移居美国。

3.6 除科技书刊中的数学、逻辑公式外, 所有括号（特别是同一形式的括号）应尽量避免套用。必须套用括号时, 宜采用不同的括号形式配合使用。

示例: [茸 (r6ng) 毛]很细很细的毛。