

DOI: 10.11779/CJGE201910005

节理岩桥裂纹扩展的热红外前兆信息研究

陈国庆¹, 潘元贵¹, 张国政¹, 张广泽², 王 栋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: 由于岩质边坡内部锁固段岩桥应力聚集较高, 含节理的岩质边坡易发生突发性失稳。对含不同岩桥长度花岗岩试件开展单轴试验, 采用红外热像仪全程监测, 研究岩质边坡破裂前的热红外热像和温度变化特征, 并借助声发射和高速摄像机分析裂纹开展源、裂纹扩展趋势、声发射特征及演变机制。研究表明: 岩桥试件破裂前存在两种热红外前兆, 未来破裂处热像异常前兆和热红外平均温度-时间曲线异常; 热红外前兆出现时间提前于声发射前兆, 随着岩桥长度的增加, 热红外前兆提前性变得更为突出; 下部预制节理裂隙尖端处的热像变化可以预测未来裂纹扩展方向, 定位表面裂纹开展源头; 利用断裂力学应变能密度因子理论, 揭示了单轴应力状态下岩桥长度对起裂扩展的影响机制。热红外前兆相较于其他前兆形式更提前可靠, 采用红外热像仪监测岩桥试件破裂前的变化特征, 研究结果为节理岩质边坡的防治提供理论依据。

关键词: 岩桥; 热红外前兆; 声发射; 裂纹扩展; 应变能密度

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1817-10

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。E-mail: chgq1982@126.com。

Thermal infrared precursor information of crack propagation for rock bridges

CHEN Guo-qing¹, PAN Yuan-gui¹, ZHANG Guo-zheng¹, ZHANG Guang-ze², WANG Dong²

(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: Due to the high stress accumulation in the rock bridge of its locked section, the rock slope with joints is prone to sudden instability. The uniaxial tests are carried out on the granite specimens with different rock bridge lengths. By full use of infrared camera monitoring, the thermal infrared images and temperature variation characteristics before rock burst are studied, and the acoustic emission and high-speed cameras are used to analyze the crack propagation sources, crack propagation trend, acoustic emission characteristics and evolution mechanism. It is discovered from the experimental study that there are two types of thermal infrared precursors before fracture of the rock bridge specimens, anomalous thermal image precursor and thermal infrared ones, and with the increase in the length of the rock bridges, the thermal infrared precursors become more prominent. The variation in thermal images at the tip of the lower prefabricated joints can be used to predict future crack propagation directions and to locate the origin of surface cracks. Using the strain energy density factor theory of fracture mechanics, the influence mechanism of rock bridge lengths on initiation crack propagation under uniaxial stress is revealed. The thermal infrared precursors are more reliable than other precursors by using the infrared thermal imager to monitor the variation characteristics of rock bridge specimens before fracture. The research results may provide a theoretical basis for the prevention and control of jointed rock slopes.

Key words: rock bridge; TIR precursor; acoustic emission; crack propagation; strain energy density

0 引 言

岩质边坡经常发生突发性失稳垮塌, 众多节理型岩质边坡, 突发性失稳更为明显, 从而危及人民生命财产安全。岩质边坡的稳定性主要受锁固段岩桥控制, 岩质边坡节理裂隙尖端处应力集中, 裂纹多在此处孕育开展。发生失稳前, 裂隙尖端处并无异常, 从而难

以预测失稳的发生。因此, 对岩质边坡失稳前兆信息的研究尤为重要。

目前, 国内外众多学者对岩石破裂前兆信息进行

基金项目: 国家自然科学基金项目(41521002, 41572283); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2018010(18-19))

收稿日期: 2018-05-02

了大量研究。其中,杜坤^[1]采用红外热像仪观测岩石试件在不同中间主应力下表面温度变化特征,得出岩石的破坏模式随中间主应力变化而发生转变。运用红外热像仪研究不同围压状态下岩石破裂热红外前兆类型和出现几率,分析不同压力条件下岩石表面光谱辐射特性^[2-3]。吴立新等^[4-5]利用真三轴试验模拟了断层黏滑发震和交汇断层黏滑发震,通过红外热像仪观测每种发震机制下热红外前兆特征;对煤岩单轴加载时发现,其屈服过程中存在 3 种红外热像特征,分别对应 3 种屈服前兆信息。钟美娇等^[6]发现在祁连山地震带上,震中位置的热红外数据存在显著年变规律,呈现夏高冬低的变化。花岗岩在单向循环加卸载过程中,试件内部损伤有限时红外辐射温度提高,超过一定损伤界限时,循环加卸载反而使红外辐射温度降低^[7]。不同含水率的砂岩压缩过程中,干燥砂岩在临破前出现热像异常且温度升高,而潮湿砂岩不具备该图像特征^[8]。陈智强等^[9]运用热红外研究开挖诱发隧道围岩变形,发现开挖速度越大,隧道围岩表面热辐射温度升高越迅速。

综上所述,当前针对岩石破裂热红外前兆研究主要以完整岩石和含断层岩石为主,本文以含节理岩体的热红外前兆作为研究对象,对两种不同长度岩桥进行单轴加载试验,并采用红外热像仪记录岩石破裂前的热像和温度变化情况,根据热红外温度-时间曲线转折性变化判定岩石试件破裂程度,基于热像高亮温点位置判定裂纹开展源,根据热像发展趋势预测岩石试件中裂纹的扩展方向。

1 试样制备和试验方案

1.1 试样制备和试验布置

本次试验研究岩石试样为花岗岩,岩样构造密实,完整性好。岩样尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,端面平整度允许误差 ± 0.05 ,垂直度允许误差 $\pm 0.25^\circ$ 。单轴试验中,试件岩桥长度分为两种,每种 5 个岩样,一共 10 岩样。岩样预制节理裂隙尺寸及声发射探头布置如图 1 所示,其中一条走向是从上部中间垂直向下,另一条走向是从左下角斜向上方 45° ,两条节理裂隙面的垂直长度相等,分别为 35, 28 mm。相对应的每件试样岩桥长度分别为 30, 44 mm。

实验中采用菲利尔 SC305 红外热像仪对试件表面温度变化和热像变化进行全程监控,捕捉试件破坏前热像异常特征和温度-时间曲线转折变化特征;利用索尼 FDR-AX700 高速摄像机以每秒 1000 帧的速度对试件进行监测,获取试件表面裂纹的发育、扩展、贯

通特征;运用 32 通道 Micro-II 声发射仪进行全过程采集,捕获试件破坏前后计数率变化特征。

高速摄像机采集的图片像素为 1024×1024 ,声发射采样频率为 1 MHz,频率范围为 $1 \sim 400\text{ kHz}$,声发射信号采集阈值为 40 dB,声发射传感器的频率范围为 $75 \sim 750\text{ kHz}$ 。

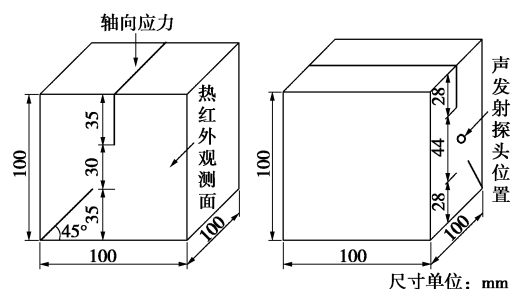


图 1 试件详细尺寸及声发射探头布设

Fig. 1 Sizes of specimen and layout of acoustic emission probe

1.2 单轴加载试验方案

加载设备采用 TAWZ-5000 型高压伺服动真三轴试验机,试验机加载量程为 5000 kN。将试件放置于试验台上,将试件与底座调整至完全重合。先在位移控制方式下施加荷载 0.1 MPa,待试件稳定后,再采用荷载控制方式,以 1 kN/s 的加载速率加载直至试件破坏,试件破坏后采用位移控制,获取峰后曲线。试验仪器布置如图 2 所示,试验中试样破坏全过程采用红外热像仪进行图像采集,并采用高速数字式摄像机系统同步采集。每种岩桥做 5 组试验,对比 5 组试验结果,第一组试验所获得的数据较好,本文中所呈现的热像图片、高速摄像机图片、温度-时间曲线图及应力应变曲线图均采用第一组试验数据。

试验中试件表面温度变化较小,为避免室内变温对试验的影响,实验室内布设 HMS-03B~HMS-60B 恒温恒湿机,其控制精度为 0.1°C ,使实验室内处于一个恒温恒湿环境,避免热红外数据采集时产生误差。

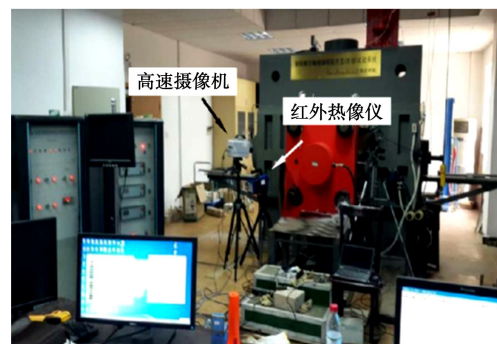


图 2 红外热像仪和高速摄像机

Fig. 2 Thermal imaging cameras and high-speed cameras

2 热红外前兆类型及表现形式

2.1 热红外热像异常特征

图 3 为第一组试件临破前夕, 下部预制节理裂隙尖端附近热红外图像变化特征和热像演化过程与应力应变曲线对应关系。从热像变化特征分析, 试件临破裂前在未来裂纹开展源头附近出现热像异常。异常表现: 首先在裂纹源头附近出现稀疏离散点, 离散点逐步形成离散面, 离散面扩展为异常条带。

图 3 (a), (b) 为 30 mm 岩桥试件在各应力阶段, 下部裂隙尖端附近热像变化特征图。热像演化过程: 首先在裂隙尖端处产生稀疏离散点, 随着应力增大, 离散点扩展成为离散面, 离散面发展为锥形异常面, 最终形成一条细长高温条带。热像演化各个阶段所对应的应力分别为 263.34, 268.54, 271.56, 280.86 MPa, 应力增至 281.95 MPa 时, 裂纹贯通岩样左上端。

图 3 (c), (d) 为 44 mm 岩桥试件各应力阶段, 裂隙尖端处热像变化特征图。热像演化过程: 首先在裂隙尖端附近产生较多离散点, 随之离散点聚拢并形成椭圆形高亮度温度条带, 椭圆形两端点上出现极高温点, 随应力增加, 极高温点逐渐消散。热像演化各个阶段所对应的应力分别为 256.35, 281.23, 325.67 MPa, 应力达到 346.92 MPa 时, 极高温点消散完毕, 裂纹随之贯通 (注: 试件中的张拉裂纹是由压剪致使张拉破裂, 所以裂纹处温度升高)。

由此可见: 可根据热像上异常条带变化特征来判断试件破裂程度; 通过分析热红外热像异常条带特征来预判裂纹的空间发展情况及未来裂纹开展源。

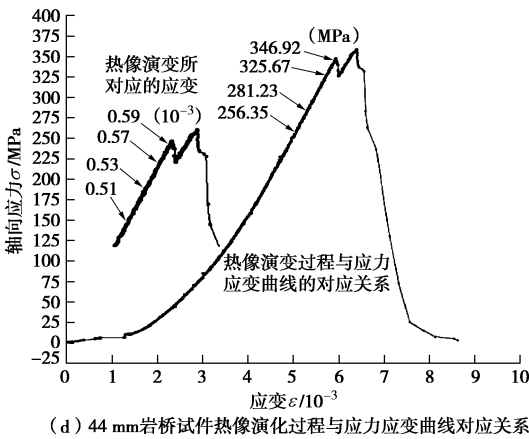
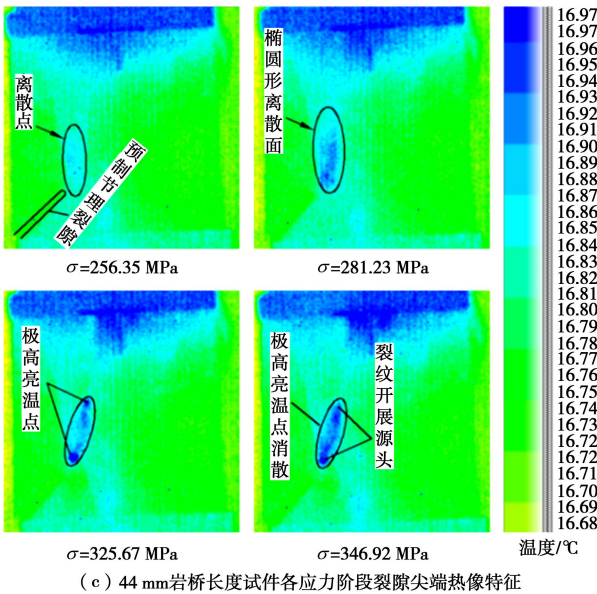
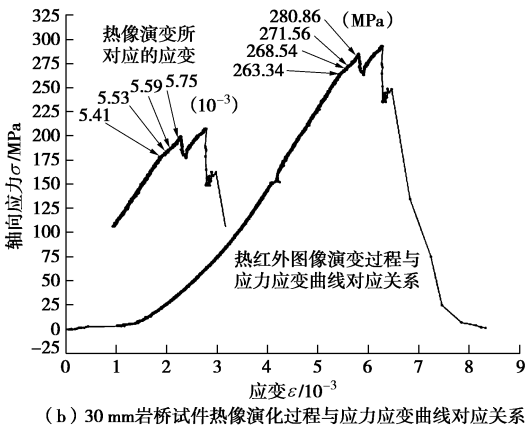
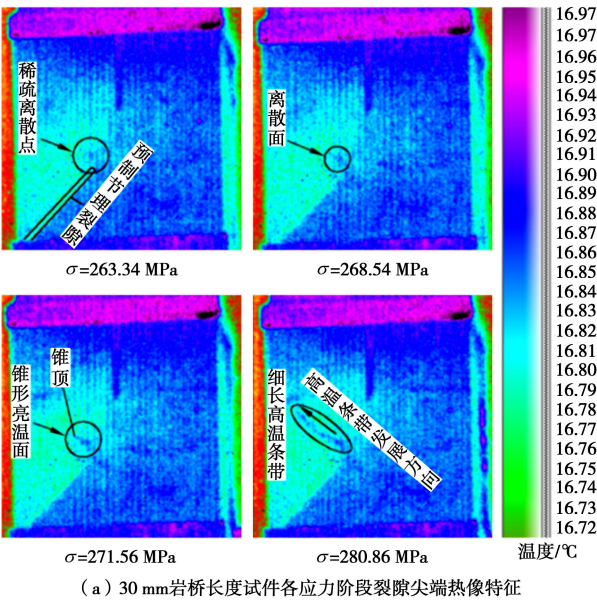


图 3 下部预制节理裂隙尖端附近热像异常特征

Fig. 3 Thermal image anomaly characteristics near tip of lower prefabricated joints

2.2 温度 - 时间曲线异常

对试件下部预制节理裂隙尖端附近区域进行重新采样, 分析该区域的温度变化特征, 重采样区域如图 4 所示。分析对象为重采样区域平均辐射温度, 温度 - 时

间曲线与应力-时间曲线对比分析,研究岩石破裂前夕温度-时间曲线变化特征,获取岩样破裂前热红外前兆信息。此方法主要以温度-时间曲线变化特征为依据,主要捕获前兆时间特性,缺乏空间特性,结合热像变化特征分析,弥补这一缺点,使热红外前兆能在时空上得以统一。研究发现:岩桥试件临破前夕,温度-时间曲线的开展趋势发生转折性变化。本文基于不同岩桥长度下,提出两种变化类型:30 mm 岩桥试件为降温缓升平静型,44 mm 岩桥试件为降温骤升平静型。

降温缓升平静型:表现形式为温度-时间曲线在试件临破前夕由原来的上升转为下降,然后缓慢上升至一定温度后保持微小循环变化,直至试件破坏。

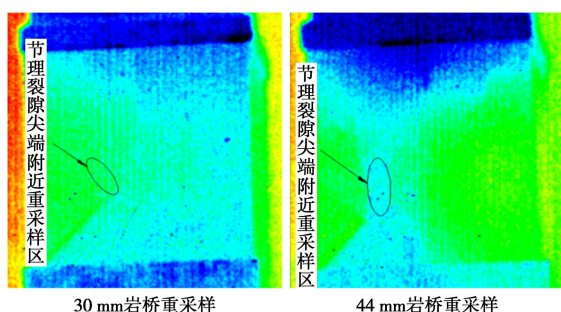


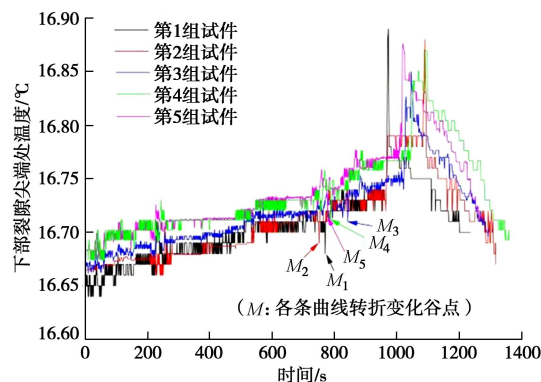
图4 温度-时间曲线重采样区域

Fig. 4 Temperature-time curve resampling area

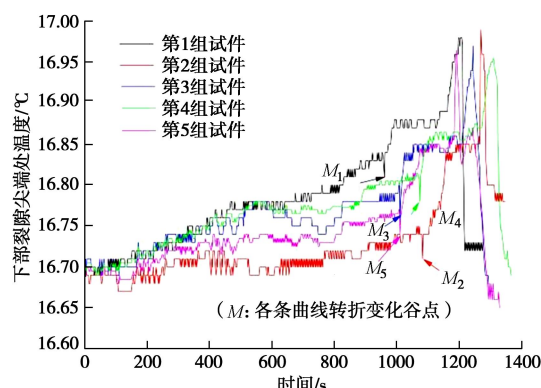
图5(a)为30 mm 岩桥试件下部裂隙尖端区温度-时间曲线。由图可知,第一组试件临破前温度陡降谷点 M 出现在786 s,此时温度为 16.68°C ,试验至846 s 温度回升至 16.72°C ,随后温度保持在 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 之间循环变化直至试件破裂,温度从谷点 M 回升至 16.72°C 用时60 s,前后温度差 0.04°C ,其升温速度较缓。这种趋势性的转折变化预示岩桥试件破裂即将来临,对比其他4组试件温度-时间曲线变化过程,5组试件的变化规律大体一致,都在临破前出现转折性变化。

降温骤升平静型:表现形式温度-时间曲线在试件破裂前由升转至下降,降至一定温度后快速上升再保持微小循环变化,直至试件破裂。

图5(b)为44 mm 岩桥试件下部裂隙尖端区温度-时间曲线图。由图可知,第一组试件临破前曲线谷点 M 出现在961 s,此时温度为 16.81°C 。随着试验的进行,在998 s时温度回升至 16.87°C ,随后温度保持在 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 之间循环变化直至试件破裂,温度回升用时37 s,前后温差 0.06°C ,其升温速度较快,温度-时间曲线在此时间段内较陡,对比其他4组曲线的变化过程,5组试件的曲线规律相对一致。根据以上研究,以试件临破前温度-时间曲线转折性变化作为岩石破裂的前兆信息是可靠的。



(a) 30 mm岩桥长度试件下部裂隙尖端处温度-时间曲线



(b) 44 mm岩桥长度试件下部裂隙尖端处温度-时间曲线

图5 不同岩桥长度下温度-时间曲线变化特征

Fig. 5 Variation of temperature-time curves under different rock bridge lengths

2.3 两种前兆之间的时序关系

图6为两种热红外前兆时序关系分析。岩石试件表面温度变化反映在热像上为异常斑块,理论上两种前兆时序是完全一致。物体某处的温度与该处主应力之和成正比^[10],岩石试件破裂前表面温度升高,相应该处热像出现异常斑块,但起初热像异常现象较微弱,肉眼难以辨别,通过图6可知,温度-时间曲线异常稍快于热像异常前兆。

3 声发射与热红外对应特征

3.1 声发射及应力-应变曲线特征

图7为应力应变曲线与声发射时序对比分析。基于图7中信息可知,不同岩桥长度,声发射各时期所占比例不同,平静期约占全过程的73%~85%,计数率频繁期约占全过程的2.3%~6.2%。试验前期声发射计数率低,裂纹贯通前夕,声发射计入计数率频繁期,裂纹贯通瞬间声发射计数率陡增后回落。计数率频繁期的出现预示裂纹即将贯通,可将此现象作为试件破坏前兆信息。

由图7可知:两组岩石试件的应力-应变曲线总体趋势大致相同,都存在“双峰值”现象;裂纹贯通前,曲线呈线性上升趋势,长岩桥曲线斜率较大;岩

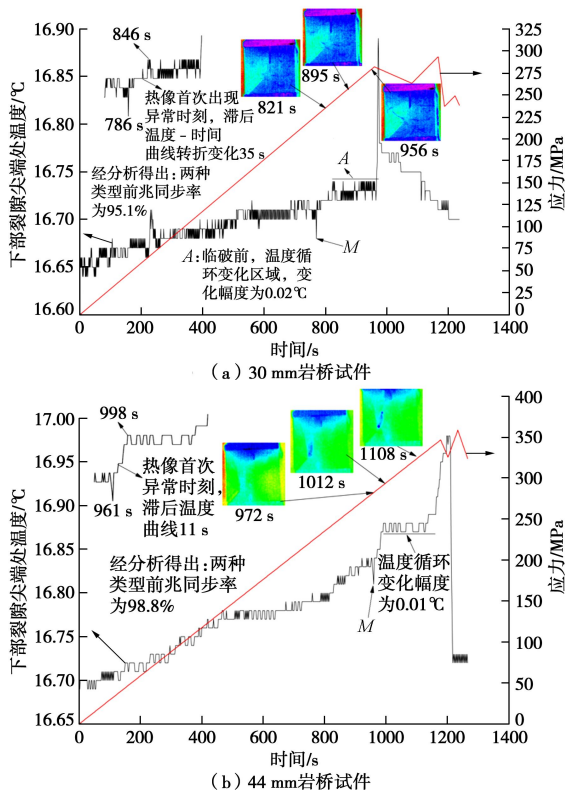


图 6 两种类型前兆时序特征图

Fig. 6 Two types of precursor timing features

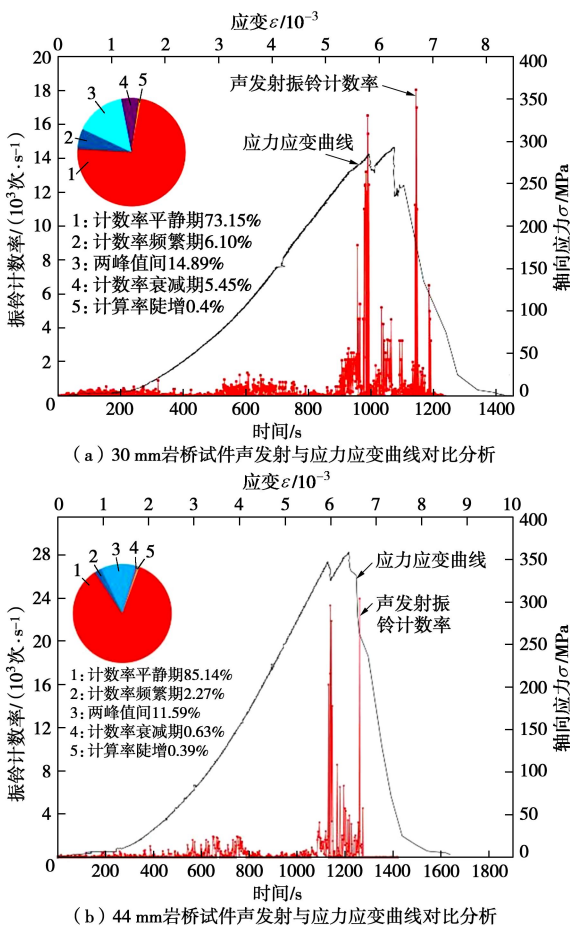


图 7 应力应变曲线与声发射时序对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of stress-strain curve and acoustic emission time series

石试件破坏前应力-应变曲线出现一次陡降回升, 试件破坏后, 应力-应变曲线急速下滑。对比分析图 7 中声发射与应力应变曲线的时序关系, 应力-应变曲线回落均发生在声发射计数率频繁期后, 应力应变曲线第一次回落与声发射计数率第一次陡增相吻合, 由此可见, 应力应变曲线的前兆性落后于声发射。

3.2 声发射的时序特征

本文通过量化声发射各时期持续时间及各时期内平均计数率、最大计数率值, 定量分析声发射前兆出现的时间及计数率变化值。

30 mm 岩桥试件: 0~899 s 期间为计数率平静期, 期间平均计数率为 $0.14(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $1.36(10^3/s^{-1})$; 试验进行至约 900 s 时, 计数率开始增加, 信号强度增强, 此现象持续至约 975 s, 期间称为计数率频繁期, 期间平均计数率为 $1.36(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $8.90(10^3/s^{-1})$; 计数率两次陡增分别发生在 976 s 和 1161 s, 两次计数率分别为 $16.52(10^3/s^{-1})$ 和 $18.04(10^3/s^{-1})$; 两次计数率陡增之间的平均计数率为 $1.04(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $15.46(10^3/s^{-1})$, 此期间内计数率变化极不稳定; 1161 s 后计数率逐渐衰减。

44 mm 岩桥试件: 0~1089 s 之间为计数率平静期, 平均计数率为 $0.19(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $1.55(10^3/s^{-1})$; 1090~1119 s 之间为计数率频繁期, 期间平均计数率为 $1.12(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $12.80(10^3/s^{-1})$; 计数率两次陡增分别发生在 1120 s 和 1270 s, 其计数率分别为 $23.33(10^3/s^{-1})$ 和 $23.96(10^3/s^{-1})$; 两次陡增之间的平均计数率为 $1.50(10^3/s^{-1})$, 最大计数率为 $17.52(10^3/s^{-1})$; 1271 s 后计数率逐渐衰减。

根据以上分析可知: 不同岩桥长度下, 声发射各时期持续时间不同, 短岩桥试件在频繁期和两峰值之间所持续的试件较长; 频繁期和两峰值之间的计数率变化较大, 两峰值间的计数率变化幅度比较突出, 计数率第二次陡增值最大; 长岩桥试件各时期内计数率均大于短岩桥试件。

3.3 声发射前兆与热红外前兆间对应关系

图 8 为第一组试件声发射与热红外前兆对比图; 表 1 为声发射前兆与热红外前兆出现时间对比分析 (其中 M 点位置见图 5)。将两种前兆信息进行对比分析, 发现声发射前兆信息出现时间滞后热红外前兆, 在不同岩桥长度下, 声发射前兆信息滞后时间有所不同。短岩桥试件中温度-时间曲线前兆信息提前于声发射前兆 2.7~3.11 倍, 热像异常前兆提前于声发射前兆 2.04~2.32 倍; 长岩桥中温度-时间曲线前兆信息提前声发射前兆 3.54~4.90 倍, 热像异常前兆提前

表 1 两种前兆出现时间对比分析
Table 1 Comparative analysis of two kinds of precursory time

岩桥长度 /mm	试件编号	M 出现时 刻/s	热红外热 像首次出 现异常/s	AE 首次进 入频繁期 时刻/s	AE 频繁期 至裂纹贯 通时间/s	AE 滞后 M 点出现时 间/s	AE 滞后热 像首次异 常时间/s	温度 - 时间 曲线前兆提 前倍数	热像前兆 提前倍数
30	1	786	821	900	75	114	79	2.52	2.05
	2	765	818	895	68	130	77	2.91	2.13
	3	759	809	892	63	133	83	3.11	2.32
	4	778	829	909	77	131	80	2.70	2.04
	5	762	815	891	71	129	76	2.82	2.07
44	1	961	972	1090	30	129	118	5.30	4.93
	2	965	968	1075	42	110	107	3.62	3.55
	3	981	985	1108	36	127	123	4.53	4.42
	4	969	965	1082	39	113	117	3.90	4.00
	5	979	981	1096	46	117	115	3.54	3.50

注：表中为每种岩桥全部试样数据，第 1 组试样的各项试验现象较为良好，故文中选取第 1 组作为分析对象。

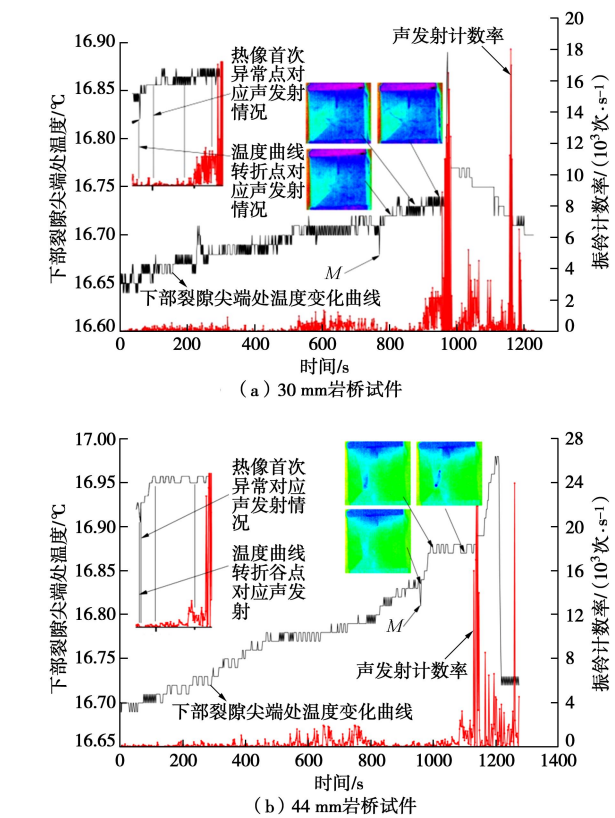


图 8 温度 - 时间曲线与声发射计数率对比图

Fig. 8 Comparison of temperature-time curves and acoustic emission count rates
声发射前兆 3.50~4.93 倍。由此可见，热红外前兆从时间判定和空间预测均优先于声发射。

4 热像与裂纹开展间的关系

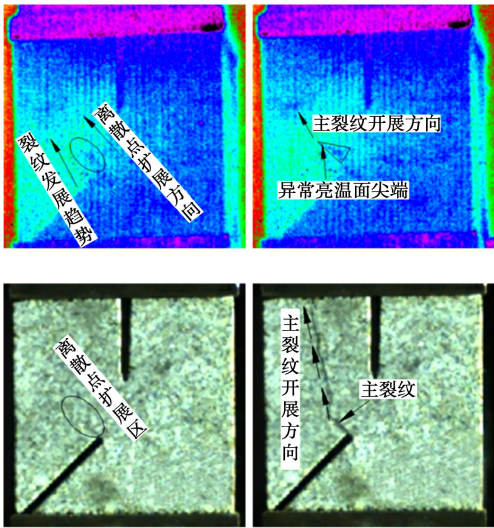
4.1 热像异常变化与裂纹发展关系

图 9 为第 1 组试件热像开展趋势与裂纹扩展方向

对应关系分析图。在试验过程中，裂纹首先在下部预制节理裂隙尖端处产生，裂纹出现前夕，此处热红外图像存在异常变化，将热像异常发展趋势与裂纹开展路径对比分析，发现以下规律：

- (1)异常离散点发展趋势与裂纹开展路径基本一致。
- (2)亮温面所形成的几何图形，图形尖端所指方向为主裂纹扩展方向。
- (3)热像异常面中亮温值最高处为裂纹开展源。

根据 Palaniswamy 提出的裂纹沿产生最大能量释放率的方向扩展^[11]，能量释放导致局部温度升高，从而引起热像异常变化，应力集中区域能量释放率最大；热像异常、裂纹扩展、应力、温度 4 者间存在相互联系。



(a) 30 mm岩桥试件

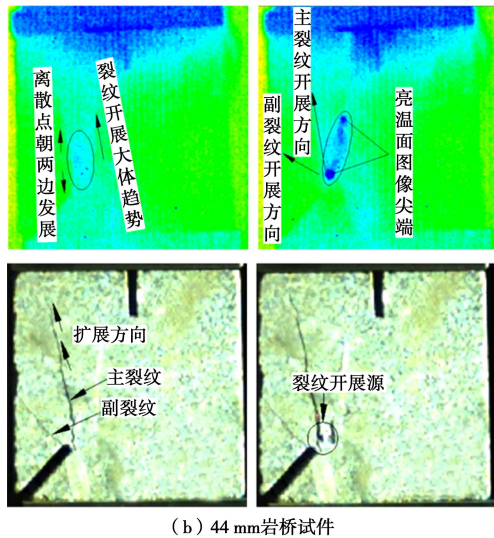


图 9 热像开展趋势与裂纹扩展方向对应关系

Fig. 9 Relationship between thermal image development trend and crack propagation direction

下部预制节理裂隙尖端处出现的裂纹为张拉裂纹, 其实际断裂强度 σ_f 可根据断裂力学中断裂的裂纹理论求得, 即

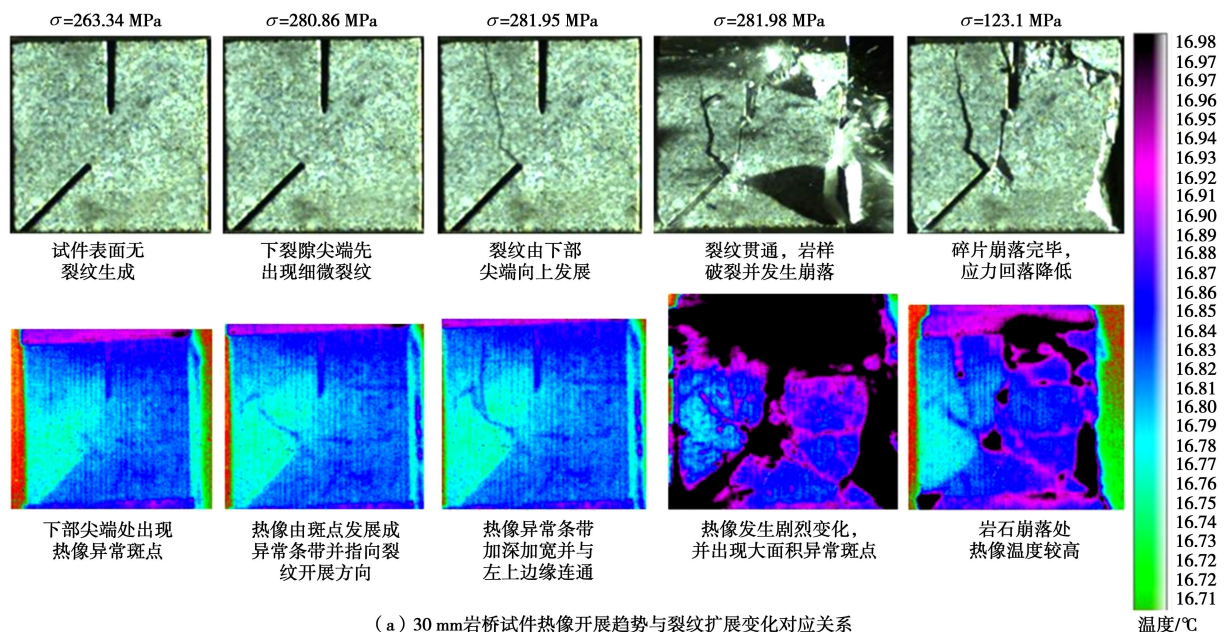
$$\sigma_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E\gamma}{a}} \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量, γ 为表面能, a 为裂纹一半长度。

根据表 1 和图 8 中信息可知, 声发射计数率频繁期出现时间均滞后热红外前兆, 温度-时间曲线前兆和热像异常前兆提前时间均较为稳定。对这种关系可做进一步分析:

将热像仪中的信号与主应力联系起来, 计算公式为^[12]

$$\Delta\sigma_1 = \frac{DGRS}{2048TeK} \quad (2)$$



(a) 30 mm 岩桥试件热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系

式中, σ_1 为主应力 (MPa), D 为热红外探测器的温度反映 ($K \cdot V^{-1}$), G 为灵敏度设置 (V), R 为表面温度的校正因子, S 为热像仪中的热弹信号 (U), T 为物体表面的绝对温度 (K), e 为表面的发射率, K 为热弹系数。

由式 (1) 与式 (2) 得

$$\frac{1024TeK\sqrt{\frac{E\gamma}{a}}}{DGRS} = \eta \quad (3)$$

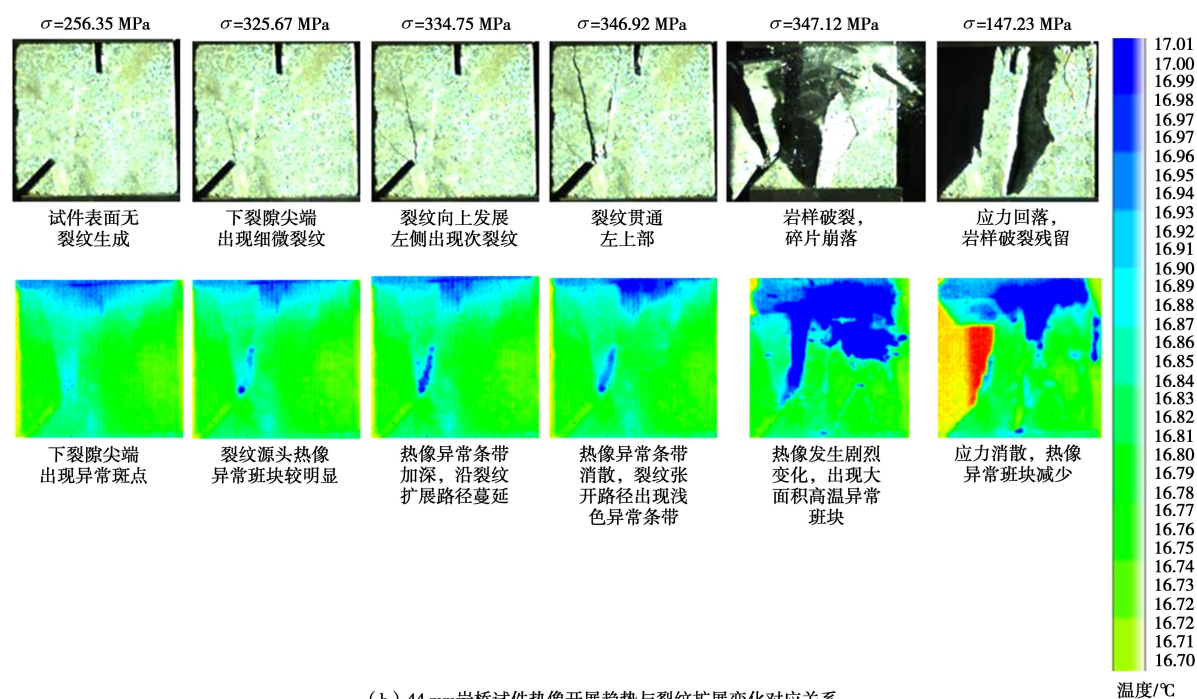
式中, η 为应力集中系数。

由式 (3) 可知, 应力集中系数 η 与温度 T 成正比, 应力集中区域其温度较高, 从而热像上出现明亮斑块, 裂纹沿产生最大能量释放率的方向扩展, 能量释放伴随温度升高, 裂纹也沿温度升高方向开展, 从而可以解释热像异常变化与裂纹开展方向间的关系。

根据以上分析结果可知, 热像异常变化与裂纹扩展间存在密切联系, 可根据热像异常变化规律, 预测裂纹开展源头和裂纹扩展方向, 这对岩质边坡稳定性评价和岩体破裂预测有实际意义。

4.2 热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系

图 10 为第 1 组试件热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系分析。图 10 (a) 为 30 mm 岩桥试件对应关系分析, 在未来裂纹出现处, 热像首次出现异常, 此时试件表面未出现裂纹, 异常斑点逐渐开展, 开展趋势与未来裂纹扩展趋势相吻合; 热像出现明显异常条带时, 下部节理尖端处出现首条细微裂纹, 裂纹向上扩展, 与此同时, 热像异常条带沿裂纹扩展路径延伸; 当裂纹贯通, 岩样破碎崩落, 热像出现大面积异常斑块且温度升高, 应力回落, 岩石崩落部位热像温度较高。图 10 (b) 为 44 mm 岩桥试件对应关系分析, 热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系与图 10 (a) 相



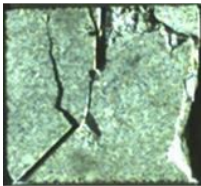

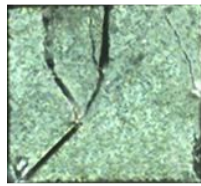
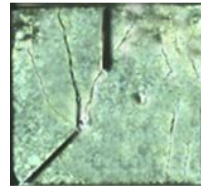
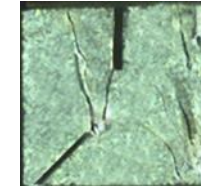
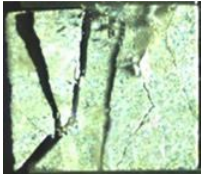
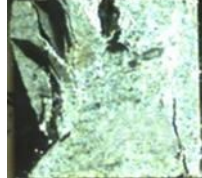
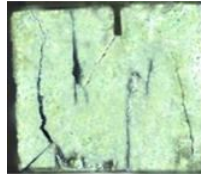
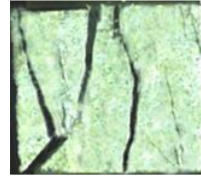
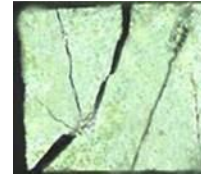
(b) 44 mm岩桥试件热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系

图 10 热像开展趋势与裂纹扩展变化对应关系

Fig. 10 Correspondence between thermal image development trend and crack propagation change

表 2 各组试件破裂模式及峰值前度

Table 2 Failure modes and peak strengths of specimens

岩桥长度	类型	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
30 mm	峰值强度	281.98 MPa	278.56 MPa	286.45 MPa	284.23 MPa	279.77 MPa
	破坏图片					
44 mm	峰值强度	347.12 MPa	352.45 MPa	345.54 MPa	351.46 MPa	348.67 MPa
	破坏图片					

吻合，热像异常均沿裂纹扩展路径延伸发育，热像异常均早于裂纹出现，试件破碎崩落时热像异常最明显。

表 2 列举各组试样的峰值强度和破坏图片，对比分析各组试件破坏形态，30 mm 岩桥试件破坏过程中，岩桥均被裂纹贯通，44 mm 岩桥试件破坏时，仅第 5 组试件的岩桥被贯通，其他 4 组试件的岩桥未被贯通。

5 机理分析

5.1 热红外热像异常机理分析

试件破裂前，在未来破裂区附近会出现热像异常斑块，从裂纹开展和能量集聚角度分析，试验过程中

岩桥内部积蓄大量能量，裂隙尖端为应力集中区域，裂纹开展前，尖端附近温度升高，热红外热像呈现出异常斑块；微裂纹开展过程中，能量释放，局部温度骤升，微裂纹开展处出现高亮温条带并伴随有极高亮温点，试件破裂能量耗散，局部温度稍有降低，极高亮温点消散。

5.2 温度 - 时间曲线异常机理分析

不同岩桥长度下，温度 - 时间曲线转折变化类型不同，短岩桥试件临破前曲线变化较为平缓，长岩桥试件则较为陡峭，这种分析差异的原因如下：

(1) 岩桥长度越长裂纹贯通所积蓄的能量就越大^[13]，长岩桥试件在临破前夕，岩桥内部积蓄较多能

量, 其温度变化较快, 反映在温度 - 时间曲线上为曲线下降至 M 点后快速陡升。

(2) 裂隙尖端为应力集中区域, 长岩桥试件此处应力变化更复杂, 单位时间内辐射温度变化幅值更大。

5.3 声发射时序特征及计数率变化

根据表 1 和图 7 中信息可以看出, 不同岩桥长度下, 各时期发生时间和持续时间不同, 各个时期内声发射计数率变化也不尽相同, 两峰值之间计数率变化极其复杂。呈现这种特征的原因可分析如下:

(1) 长岩桥试件中预制节理裂隙较短, 试件整体性较好, 微破裂形成所需应力更高, 所以长岩桥中平静期更长。

(2) 由于岩桥长度越大裂纹贯通所积蓄的能量就越大^[10], 微破裂产生时所释放能量较高, 所以长岩桥中频繁期及后续时期声发射计数率较高。

(3) 试件破坏前有大量裂纹出现, 导致 AE 辐射严重衰减, 甚至被裂纹阻住^[14], 从而在声发射两峰值间出现短暂“平静期”, 期间裂纹发育复杂, 对 AE 影响时强时弱, 导致 AE 计数率变化极不稳定。

5.4 声发射前兆与热红外前兆间对应关系

材料表面某点温度变化量与其该点应力之间的关系为^[12]

$$\Delta T = -KT\Delta\sigma_1, \quad (4)$$

式中, σ_1 为主应力 (MPa), ΔT 为温度变化量 (K), K 为热弹系数, T 为物体表面的绝对温度 (K)。

根据式 (4) 可以看出, 温度变化量随主应力增加而增加。试验中期, 岩石内部还未出现微破裂, 声发射未出现异常, 下部预制节理裂隙尖端处应力集中, 导致此处温度变化量较大, 使得温度 - 时间曲线发生趋势性转变。根据式 (2) 可知, 热红外辐射强度与物体温度和发射率等有关, 其发射率主要由材料的物质组成和内部结构决定, 此外也与表面的颜色和光洁度有密切关系。由此可知, 热像变化不仅受温度影响, 还受材料表面颜色和光洁度等客观条件影响。

6 结 论

本次研究对象为不同岩桥长度的花岗岩试件, 利用红外热像仪、声发射仪、高速摄像机等手段观测了加载过程中热像变化特征和声发射计数率变化特点, 并结合高速摄像机照片进行对比分析, 得出以下结论:

(1) 岩桥试件破裂前, 热红外存在两种前兆, 一种为热像异常前兆, 另一种为温度 - 时间曲线异常前兆, 两种前兆相互统一, 两种类型的前兆从不同角度反映了岩桥试件破裂前的预警信息。

(2) 长岩桥试件的声发射各时期平均计数率高于短岩桥试件, 计数率频繁期短于短岩桥试件; 临破前夕, 长岩桥试件中热像异常面温度值高于短岩桥, 热红外前兆比短岩桥明显; 长岩桥中裂纹数量比短岩桥多且扩展速度更快, 破裂更为剧烈。

(3) 岩桥越长, 热红外前兆提前特性越突出; 相较于声发射, 采用热红外来预警岩桥试件破裂更为可靠; 下部预制节理裂隙尖端处热像中的高亮温点为裂纹开展源; 热像中离散点发展趋势与裂纹扩展方向相一致。

参考文献:

- [1] 杜 坤. 真三轴卸载下深部岩体破裂特性及诱发岩爆机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (DU Kun. Study on the failure characteristics of deep rock and the mechanism of strainburst under true triaxial unloading condition[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [2] 刘善军, 吴立新, 王川婴, 等. 遥感-岩石力学(VIII)——论岩石破裂的热红外前兆[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1621 - 1627. (LIU Shan-jun, WU Li-xin, WANG Chuan-ying, et al. Remote sensing-rock mechanics (VIII)—TIR omens of rock fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1621 - 1627. (in Chinese))
- [3] 崔承禹, 邓明德, 耿乃光. 在不同压力下岩石光谱辐射特性研究[J]. 科学通报, 1993, 38(6): 538 - 541. (CUI Cheng-yu, DENG Ming-de, GENG Nai-guang. Study on spectral radiation characteristics of rock under different pressures[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(6): 538 - 541. (in Chinese))
- [4] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 遥感-岩石力学(II)——断层双剪黏滑的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 192 - 198. (WU Li-xin, LIU Shan-jun, WU Yu-hua, et al. Remote sensing-rock mechanics (II) ——Laws of thermalinfrared radiation from viscosity-sliding of bi-sheared faults and its meanings for tectonic earthquake omens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 192 - 198. (in Chinese))
- [5] 吴立新, 刘善军, 许向红, 等. 遥感-岩石力学(III)——交汇断层黏滑的热红外辐射与声发射规律及其构造地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 401 - 407. (WU Li-xin, LIU Shan-jun, XU Xiang-hong, et al. Remote sensing-rock mechanics (III) ——Laws of thermalinfrared radiation and acoustic emission from friction sliding

- intersected faults and its meanings for tectonic earthquake omens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 401 - 407. (in Chinese))
- [6] 钟美娇, 张元生, 张璇. 祁连山地震带中强地震前热红外异常研究[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(4): 1073 - 1076. (ZHONG Mei-jiao, ZHANG Yuan-sheng, ZHANG Xuan. Analysis of thermal infrared anomaly in Gansu Jingtai Ms4.7 Earthquake on March 21, 2016[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(4): 1073 - 1076. (in Chinese))
- [7] 谷中元, 周科平. 单轴循环加载下花岗岩力学特征及红外分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, **14**(8): 146 - 151. (GU Zhong-yuan, ZHOU Ke-ping. Mechanical properties and infrared analysis of granite under uniaxial cyclic loading[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, **14**(8): 146 - 151. (in Chinese))
- [8] 周子龙, 熊成, 蔡鑫, 等. 单轴载荷下不同含水率砂岩力学和红外辐射特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(5): 1189 - 1196. (ZHOU Zi-long, XIONG Cheng, CAI Xin, et al. Mechanical and infrared radiation properties of sandstone with different water contents under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, **49**(5): 1189 - 1196. (in Chinese))
- [9] 陈智强, 张永兴, 周检英. 开挖诱发隧道围岩变形的红外热像试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1271 - 1277. (CHENG Zhi-qiang, ZHANG Yong-xing, ZHOU Jian-ying. Experimental study on infrared photographs of deformation and failure of surrounding rock of tunnels procession induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1271 - 1277. (in Chinese))
- [10] THOMSON W. On the dynamical theory of heat[J]. Trans R Soc Edinburgh, 1853, **20**: 83 - 261.
- [11] PALANISWAMY K, KNAUSS W G. Propagation of a crack under general, in-plane tension[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1972, **8**(1): 114 - 117.
- [12] BARONE S, PATTERSON E A. The development of simultaneous thermo-and photo-elasticity for principal stress analyses[J]. Strain, 1999, **35**(2): 57 - 65.
- [13] 陈国庆, 刘顶, 徐鹏, 等. 节理岩桥真三轴开挖卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(增刊): 1 - 14. (CHEN Guo-qing, LIU Ding, XU Peng, et al. Unloading failure of joint rock bridge by true-triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S0): 1 - 14. (in Chinese))
- [14] 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 of China Press, 2010. (in Chinese))