

基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹扩展行为特性研究

李修磊, 谢飞, 陈臣, 黄锋, 凌天清

Investigation of crack propagation behavior of opening single fractured rock based on acoustic emission technology

LI Xiulei, XIE Fei, CHEN Chen, HUANG Feng, and LING Tianqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究

Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure

张科, 潘哲, 刘享华 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 103-111

预制裂隙岩样宏观力学行为颗粒流数值模拟

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample

王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 86-92

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析

An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test

杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 唐珏凌, 何宁 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 152-161

基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150-156



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303044

李修磊, 谢飞, 陈臣, 等. 基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹扩展行为特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 90-101.
LI Xiulei, XIE Fei, CHEN Chen, et al. Investigation of crack propagation behavior of opening single fractured rock based on acoustic emission technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 90-101.

基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹 扩展行为特性研究

李修磊¹, 谢飞¹, 陈臣², 黄锋², 凌天清²

(1. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 裂隙形态对岩石力学性能和裂纹扩展行为有重要影响, 为此分别针对完整花岗岩试样和不同预制裂隙倾角(0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°)的花岗岩试样开展了单轴压缩试验, 并同步进行了声发射监测和高清摄像记录。试验测试结果表明, 随着裂隙倾角的增大, 岩石的裂纹起裂角度逐渐减小, 岩石的峰值强度、起裂应力和峰值应变均呈逐渐增大趋势, 而弹性模量呈现出先增大后减小的变化规律; 岩石应力-应变关系曲线的初始压密段和线弹性段对应声发射平静期, 荷载超过起裂应力后声发射进入发展期, 荷载接近峰值强度时声发射处于高峰期直到岩石完全破坏; 裂隙倾角越大, 声发射高峰期的持续时间越长, 累计振铃计数越多, 岩石峰值强度与累计振铃计数之间有良好的线性关系, 并量化了裂隙形态对岩石强度损伤影响规律; 随着裂隙倾角的增大, 岩石的破裂模式由剪切断裂逐渐向张拉断裂过渡。根据岩石轴向应力与累计声发射撞击数之间的关系曲线, 并结合岩石起裂应力的计算方法, 计算值略大于摄像观测值, 二者之间的误差范围介于 1.7%~6.9%, 表明起裂应力的计算方法是合理的。上述成果对深入研究裂隙岩体的工程性质和破坏模式具有重要参考意义。

关键词: 裂隙岩石; 力学性能; 声发射; 破裂模式; 起裂应力

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0090-12

Investigation of crack propagation behavior of opening single fractured rock based on acoustic emission technology

LI Xiulei¹, XIE Fei¹, CHEN Chen², HUANG Feng², LING Tianqing²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The fissure morphology has an important influence on rock mechanical properties and crack propagation behavior. A series of uniaxial compression tests were carried out on the intact granite samples and granite samples with different prefabricated fissure dip angles (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°). Simultaneously, the rock failure process was monitored and recorded by acoustic emission (AE) and high-

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-06-06

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078090); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0841); 全职博士后留渝资助项目(2020919015)

第一作者: 李修磊(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学研究。E-mail: hellolixiulei@163.com

definition camera, respectively. As the fissure dip angle increases, the test results indicate that the crack initiation angle of rock decreases gradually; the peak strength, crack initiation stress, and peak strain of all the fractured rocks are increased gradually. The elastic modulus of rock increases firstly and then decreases with the increase of fracture dip angle. The initial compaction section and linear elastic section of the rock stress-strain relationship curve correspond to the quiet period of acoustic emission. The acoustic emission enters the development period after the load exceeds the crack initiation stress. When the load approaches the peak strength, the acoustic emission is in the peak period until the rock failure completely. The larger the fracture dip angle, the longer the peak duration period of acoustic emission and the more in quantity of the cumulative ringing count. A good linear relationship is presented between fracture rock peak strength and cumulative ringing count, and the influence of crack shape on rock strength damage is quantified. With the increase of fissure dip angle, the fracture mode of rock gradually transitions from shear fracture to tensile fracture. According to the relationship curves between rock axial stress and cumulative AE impact number, combined with the calculation method of rock initiation stress, It found that the calculated value is slightly larger than the camera observation value with the error range of 1.7% ~ 6.9%, indicating that the calculation method of rock crack initiation stress is reasonable. This study provides basic information for investigating the engineering properties and failure mode of fracture rock.

Keywords: fractured rock; mechanical properties; acoustic emission; fracture mode; crack initiation stress

岩石经过漫长复杂的地质作用后产生了不同形态的裂隙、节理、断层等不连续结构面,是影响岩体的抗剪强度和整体稳定性的重要因素^[1]。在深部地下岩体开挖工程中,复杂的高地应力环境和高速释放的能量使裂隙尖端萌生新裂纹,经历裂纹扩展和贯通后,导致岩体工程发生失稳破坏^[2]。部分研究^[3-6]表明,岩体裂隙几何形状和裂隙的不同分布对裂纹萌生位置和破坏形态有着不同影响,会极大影响岩体的整体稳定性。因此,开展裂隙岩石的裂纹扩展行为与贯通模式的破坏机理研究,对地下工程开挖、深部资源开采及岩石工程灾害防治均有重要的意义。

由于在岩石中预制裂隙有一定难度,现有研究大多通过制备类岩石材料(如,石膏、水泥砂浆)模拟研究裂隙岩石的裂纹扩展和破坏强度。如,赵延林等^[7]和 Prudencio 等^[8]均利用水泥砂浆制样预制裂隙,研究了类岩石材料破坏强度随裂隙密度、几何形态、闭合状态和裂隙倾角的变化规律;Zhou 等^[9]利用石膏制备裂隙试样开展单轴压缩试验,研究了裂隙形态和位置对裂纹起裂位置、扩展路径和贯通模式的影响;肖桃李等^[10]对预制裂隙的硅粉水泥砂浆试件开展三轴试验,研究表明裂纹起裂的位置取决于预制裂隙的倾角,裂纹的扩展模式主要受裂隙长度的影响。赵彦琳等^[11]利用高压水刀在制备的砂岩样(150 mm×150 mm×15 mm)中切割倾斜裂缝,研究了裂隙倾斜角度对起裂角的影响;Lee 等^[12]研究了单轴压缩荷载下裂隙有机玻璃材料(polymethyl methacrylate, PMMA)、石膏和花

岗岩中破裂过程,发现不同性质的材料裂纹扩展形态存有差异;张睿等^[13]利用数值模拟,基于平节理模型研究了岩石固有微裂纹对裂纹演化的影响。

近年来,声发射(acoustic emission, AE)技术已成为岩石力学状态和裂纹扩展发育分布的一种有效监测方法^[14-16]。岩石内部裂纹萌生和扩展过程中伴随声发射信号的释放和传播,可依据声发射信号蕴含的信息研究岩石损伤的时空演化规律^[17-19]。Rodríguez 等^[20]通过研究声发射参数,分别从定性和定量的角度分析了岩石的破坏过程;Yang 等^[21]通过单轴压缩试验的声学测试,发现岩石的宏观变形、裂纹发展、应力演化与声发射事件具有明显的阶段性和同步性;Liu 等^[22]从定量的角度对岩石破坏过程中累计声发射计数、频谱特征、幅值频率分布与加载速率的关系;董陇军等^[23]根据单轴压缩试验获得的声发射信息,利用机器学习模型构建了花岗岩破裂过程中的压密、弹性、稳定扩展和不稳定扩展状态的辨识方法。张国凯等^[24]和 Yang 等^[25]分别研究了单裂隙类岩石材料的裂纹扩展与声发射特征的关系,裂纹的间断性扩展对应于声发射事件变化率的陡升,导致裂隙岩石的应力-应变关系曲线呈阶梯状变化。由此可见,声发射技术已被广泛应用于研究岩石损伤和断裂行为。

综上,诸多学者已对裂隙岩石的力学性质开展了研究,指出荷载作用下裂隙岩石的起裂应力和起裂模式是岩石破裂演化的前兆信息^[23, 26-27],对判断岩石工程的稳定状态具有重要作用。然而,裂隙形态对岩石

的损伤程度和起裂破坏模式的影响规律尚不清楚。为此, 本文将针对真实裂隙岩石试样开展单轴压缩试验, 同步进行声发射测试和高清摄像, 研究不同裂隙形态岩石破裂全过程中声发射特征-裂纹扩展-应力演化之间的对应关系, 分析裂隙形态的影响规律, 并验证确定起裂应力的方法。

1 裂隙岩石的声发射测试

1.1 试样制备

试验选用主要由石英、长石、黑云母等矿物组成的花岗片麻岩, 取自重庆北碚采石场, 在同一块岩体上钻取花岗岩试样, 加工成尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件。按照国际岩石力学与岩石工程学会的试验标准, 对花岗岩试样两端面进行磨光处理, 确保两端面平整度以及端面与试样轴线垂直度满足要求。然后, 采用高压水刀对花岗岩试样的几何中心位置切割预制裂隙, 裂隙的长度和宽度分别约为 23 mm 和 2.5 mm, 预制裂隙与水平向的夹角 β 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° , 共 7 种裂隙形态。本文试验共包括上述 7 种裂隙岩石试样和完整岩石试样 (initial rock, IR), 如图 1 所示, 每种试样共包括 4 个平行试件。试验之前完成试样烘干, 测得花岗岩试样的密度为 2.78 g/cm^3 , 纵波波速为 $4\ 654.3 \text{ m/s}$ 。

1.2 试验仪器及传感器布设

加载设备采用美特斯工业生产的 Exceed 启标 E45.205 微机控制电子万能试验机, 该仪器可自动实

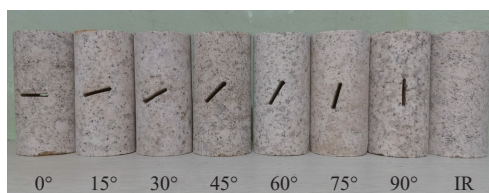


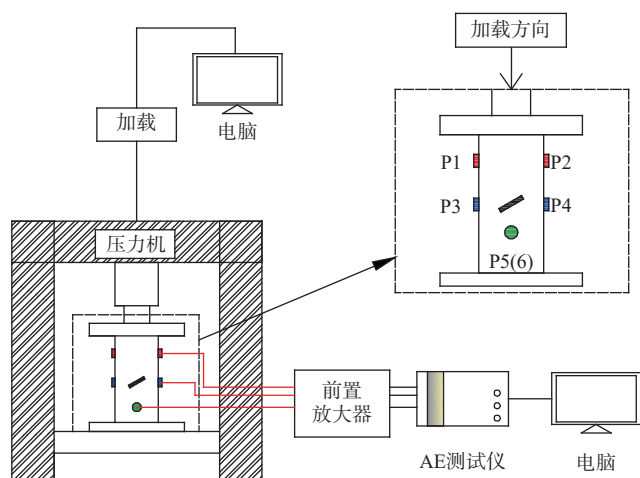
图 1 不同预制裂隙倾角的花岗岩试样

Fig. 1 Granite samples with different prefabricated fracture dip angles

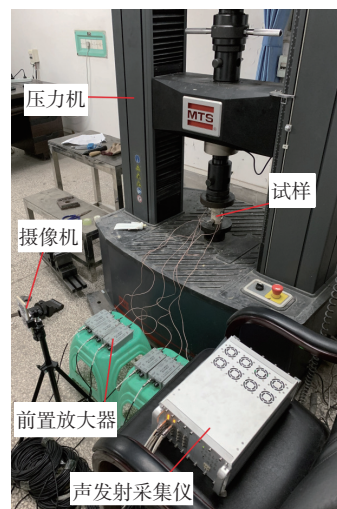
现荷载控制和位移控制。本文试验采用位移控制, 加载速度控制为 0.002 mm/min 。

声发射监测系统采用北京声华兴业科技有限公司生产的 SAEU3H 集中式 16 通道设备。该仪器还配备了与通道数等同的声发射传感器和前置放大器, 带宽工作频率范围为 $60 \sim 400 \text{ kHz}$, 可较好地覆盖大多数频率范围; 前置放大器的相应频率为 $1.3 \sim 1.2 \text{ MHz}$, 有 20 dB、40 dB 和 60 dB 3 挡可选。试验中设置声发射的门槛值为 40 dB, 采样频率为 10 MHz。试样安装成功后, 通过断铅试验反复测试确保每个传感器的数据采集效果。圆柱体岩样共布设 6 个的声发射传感器, 布置方式如图 2 所示。试件安装完成后, 在其正前方架设高速摄像机对岩样破坏的整个过程进行实时记录, 以便确定试样表观裂纹萌生时刻的起裂应力和分析裂纹萌生、扩展并最终贯通的整个过程。

通过上述设备对花岗岩试样开展单轴压缩试验, 监测岩样变形破坏全过程中产生的声发射信号和表观裂纹扩展过程, 为进一步研究裂隙岩石的破坏机理和裂纹扩展行为特性提供理论依据。



(a) 测试系统示意图



(b) 设备布置图

图 2 试验系统和设备布设

Fig. 2 Layout of test system and equipment

2 试验测试结果与分析

2.1 裂隙岩石的宏观变形破坏特征

基于单轴压缩试验, 不同裂隙岩石的宏观整体破坏形态, 如图 3 所示。当预制裂隙倾角 $\beta=0^\circ$ 和 15° 时, 裂隙尖端产生翼裂纹几乎是平行于加载方向逐渐扩展, 同时在裂隙中部也出现了裂纹扩展现象; 当 $\beta=30^\circ$ 时, 在预制裂隙的端部出现了多条翼裂纹和次生裂纹, 裂纹在扩展过程中向试样中部移动, 与 β 较小岩样的破坏形态差异较大; 对于 $\beta=45^\circ$ 的岩样, 在裂隙尖端产生了拉剪复合翼裂纹, 裂纹走向与加载方向形成了较大角度。对于裂隙倾角 β 为 60° 和 75° 的岩样, 在

预制裂隙的上下尖端产生张拉裂纹, 并扩展至试样上下两端形成的贯通裂纹, 裂纹走向与加载方向相差不大。当裂隙倾角 $\beta=90^\circ$ 时, 岩样破坏时形成的贯通主裂纹与预制裂隙近似在一条直线上。对于完整的花岗岩试样, 主裂纹主要是位于试样中部、近似与轴向平行的纵向裂纹, 由于约束作用在试样端部存在一定转折。裂隙岩石的裂纹起裂位置通常位于裂隙的端部, 并逐渐扩展形成贯通裂缝发生整体破坏。Wong 等^[28] 将预制裂隙尖端外侧向加载端一侧扩展的新生裂纹定义为翼裂纹, 与翼裂纹扩展方向相对的新生裂纹称为反翼裂纹。从破坏形态上, 翼裂纹与反翼裂纹的共同作用导致了岩样的整体破坏。

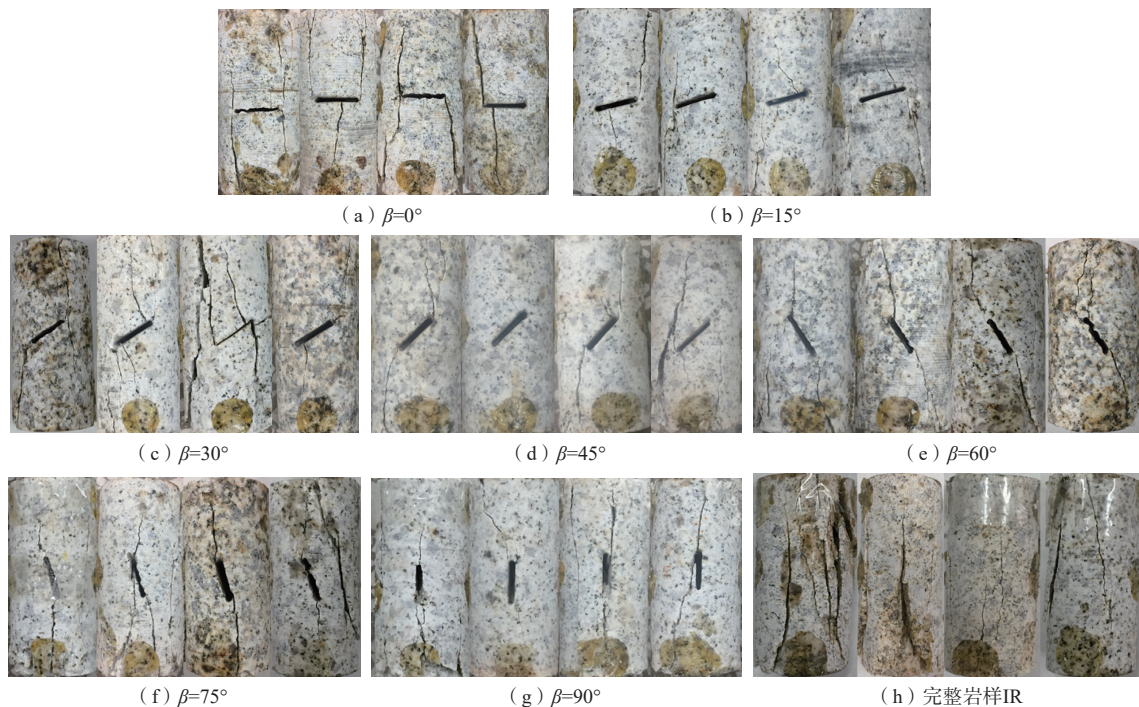


图 3 不同裂隙倾角花岗岩试样的破坏形态

Fig. 3 Failure patterns of granite samples with different fracture dip angles

根据图 3 中不同倾角裂隙花岗岩试样的破坏形态, 统计得到了裂纹起裂角度(即, 裂隙尖端初始裂纹扩展方向与裂隙长度方向的夹角)随预制裂隙倾角的变化规律, 如图 4 所示。可以看出, 随着预制裂隙倾角的增大, 裂隙尖端起裂角度呈逐渐减小的变化趋势。

2.2 裂隙岩石的试验测试结果

2.2.1 应力-应变关系

岩样的差异性会导致测试结果有一定波动, 每一组倾斜角度的裂隙岩石选择一个有效试件以便对试验结果进行比较分析。不同预制倾角裂隙花岗岩试样的应力-应变关系, 如图 5 所示。可以看出, 所有岩样

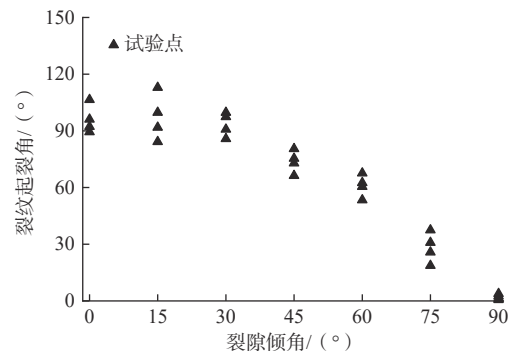


图 4 不同预制裂隙倾角花岗岩的裂纹起裂角
Fig. 4 Crack initiation angles of granite with different prefabricated crack inclinations

的应力-应变曲线具有类似的形状:初始段呈凹面弯形状,增长相对缓慢,此阶段岩石内部的微孔隙和微裂纹逐渐被压密;而后呈阶梯状,近似线性发展,此阶段的持续时间随着裂隙倾角的增大逐渐缩短;紧接着产生塑性变形快速达到峰值后急剧下降,表明形成贯通裂纹岩样完全破坏。由此,岩石的应力-应变曲线大致可划分为 4 个阶段:①初始压密;②线弹性变形阶段;③塑性变形阶段;④快速整体破坏阶段。其中,前 2 个阶段历时较长,后 2 个阶段历时较短,表现出明显的脆性破坏特征。以预制裂隙倾角为 60° 的岩石试样为例,其应力-应变曲线 4 个阶段的划分情况,如图 6 所示。

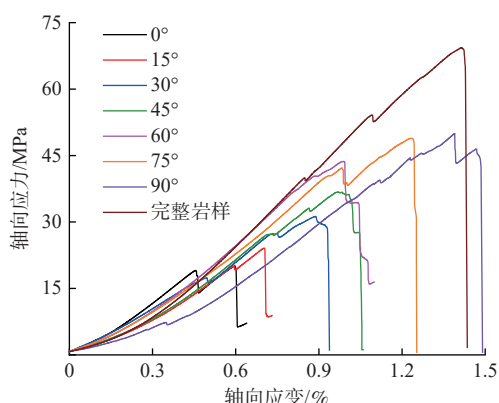


图 5 裂隙花岗岩的应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain responses of fractured granites

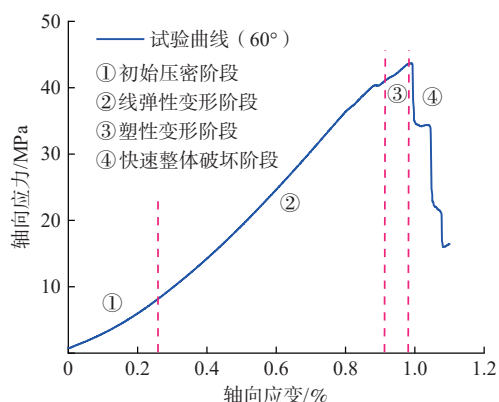


图 6 花岗岩试样应力-应变曲线各阶段的划分情况

Fig. 6 Division of stress-strain curves of granite samples at different stages

2.2.2 声发射测试结果

岩石破裂过程中伴随着声信号的产生,对每一个声发射信号的波形进行分析求解并不现实,也很难直观分析测试结果。声发射振铃计数是指 AE 脉冲越过预设门槛的振荡次数,能够准确响应岩石的破裂形态,通常用作表征岩石破裂过程中损伤演化的重要参数^[29-30]。某段时间内振铃计数的总和,称为累计振铃

次数。单轴压缩荷载下,不同预制裂隙岩石的声发射振铃计数(累计振铃计数)、应力与时间的变化关系,如图 7 所示。其中,加载速率与时间的乘积再除以试样高度即可得到轴向应变。

由图 7 可以看出,花岗岩试样从受力到完全破坏的整个声发射过程大致可分为 3 个阶段:①声发射平静期,岩样开始受力阶段,声发射现象很少,没有产生密集的声发射信号,累计振铃计数增长非常缓慢,说明岩石内部的微孔隙和微裂纹逐渐闭合,偶有少量弹性波释放,无较大断裂事件发生;该阶段对应着应力-应变关系曲线的初始压密段和线弹性变形段的前期;②声发射发展期,声发射次数陡然增多,局部范围有密集声发射信号产生,累计振铃技术快速增长,说明裂隙尖端有新的微裂纹产生和扩展;该阶段对应着应力-应变关系曲线的线弹性变形阶段后期;③声发射高峰期,该阶段出现了的多处密集声发射信号,受此影响累计振铃计数曲线斜率有所变缓,但伴有多处“陡增点”,说明岩石内部有大量断裂事件发生,导致微裂不断扩展、贯通直至岩石完全破坏;该阶段对应着应力-应变曲线的塑性变形阶段和整体破坏阶段。

声发射的平静期、发展期和高峰期分别对应图 7 中的 I、II 和 III 阶段。由图 7 可以看出,岩石应力-应变曲线的“阶梯状”位置处总伴有密集的声发射信号,说明此时岩石内部有较大的断裂事件发生;随着预制裂隙倾角 β 的增加,平静期与发展期的时间之和逐渐延长。相对于倾角较小的裂隙岩样,倾角 $\beta=90^\circ$ 裂隙岩样和完整岩样弹性变形阶段的声发射活动较多,可能原因有两个方面:一是岩石试样内部存在缺陷;二是与裂隙的形态和试样的完整程度有关。

2.3 试验结果分析与讨论

2.3.1 裂隙岩石的宏观力学特性

弹性模量(E)、峰值强度(σ_c)、峰值应变(ε_c)、起裂应力(σ_{ci})、起裂应力比(R_{ci})分别随着裂隙倾角(β)的变化规律,如图 8 所示。

由图 8(a)可知,完整试样的 σ_c 和 ε_c 为 69.80 MPa 和 1.46%,均大于裂隙岩石;当 β 由 0° 增加到 90° 时,裂隙岩石的 σ_c 和 ε_c 分别从 19.22 MPa 和 0.63% 逐渐增加到 50.60 MPa 和 1.38%,裂隙岩石 σ_c 和 ε_c 的变化幅度分别相当于完整岩样的 45.0% 和 51.4%。可知, β 越小对岩石 σ_c 和 ε_c 的影响越显著。

由图 8(b)可以看出,完整岩样的 E 为 60.48 GPa,明显大于含裂隙的岩石试样, E 随 β 呈现出先增大后减小的趋势; β 由 0° 增加 60° 时, E 的平均值从 37.82 GPa

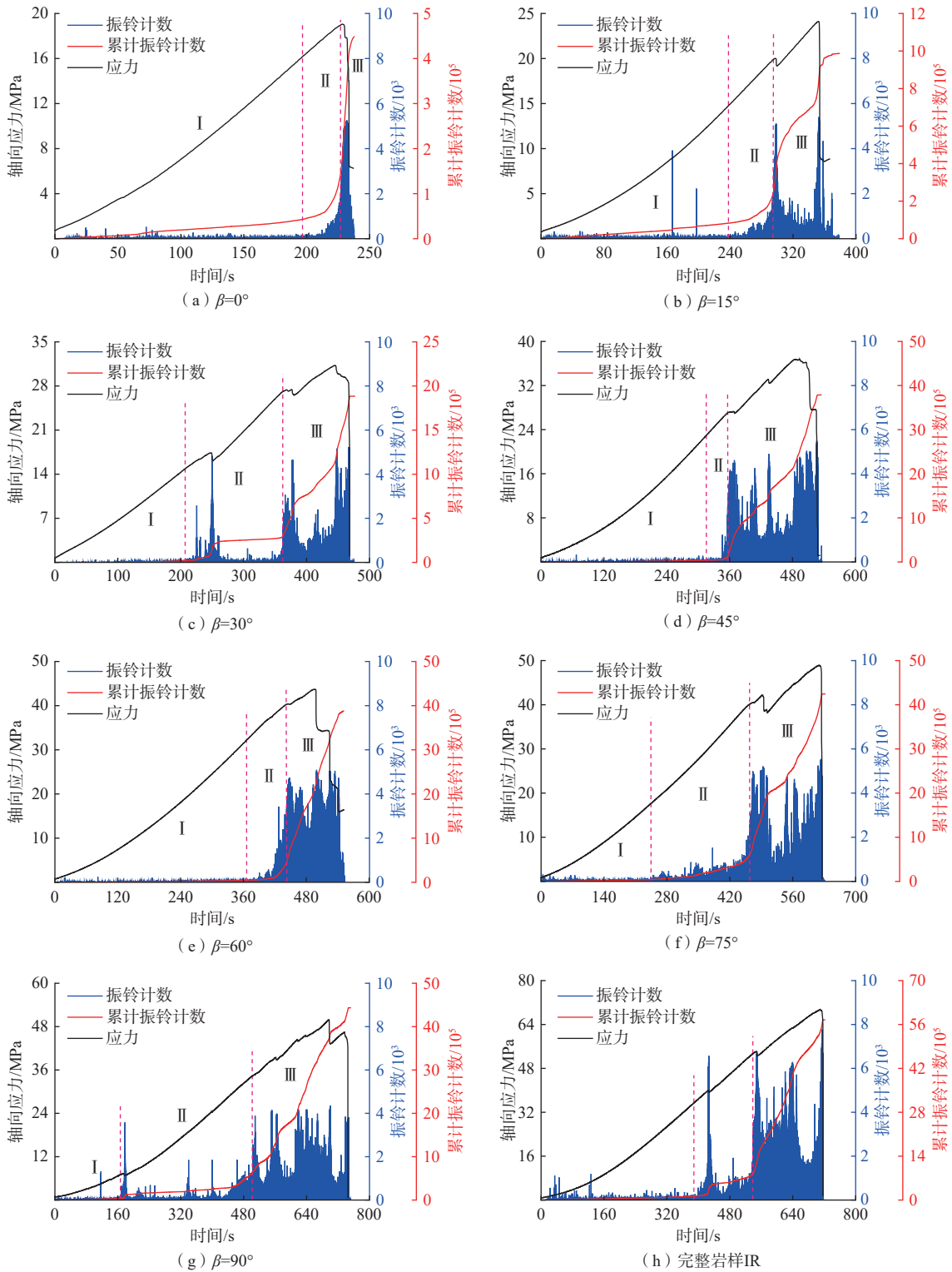


图 7 声发射振铃计数、累计振铃计数、轴向应力与加载时间的关系

Fig. 7 Relationships of acoustic emission ring count, cumulative ring count, and axial stress, with loading time

增加到 50.47 GPa; β 由 60° 增加 90° 时, E 的平均值从 50.47 GPa 减小到 42.12 GPa。裂隙岩石 E 的变化幅度相当于完整岩样的 20.8%。综上可知, β 的变化对 ε_c 、 σ_c 和 E 的影响依次减小。

由图 8(c) 可知, 完整岩样的 σ_{ci} 和 $R_{ci} = \sigma_{ci}/\sigma_c$ 分别为 34.16 MPa 和 0.49; 随着 β 由 0° 增加到 90° 时, 裂隙岩石的 σ_{ci} 由 9.04 MPa 逐渐增大到 23.66 MPa; R_{ci} 变化幅度较小, 位于 0.40 ~ 0.47 之间。

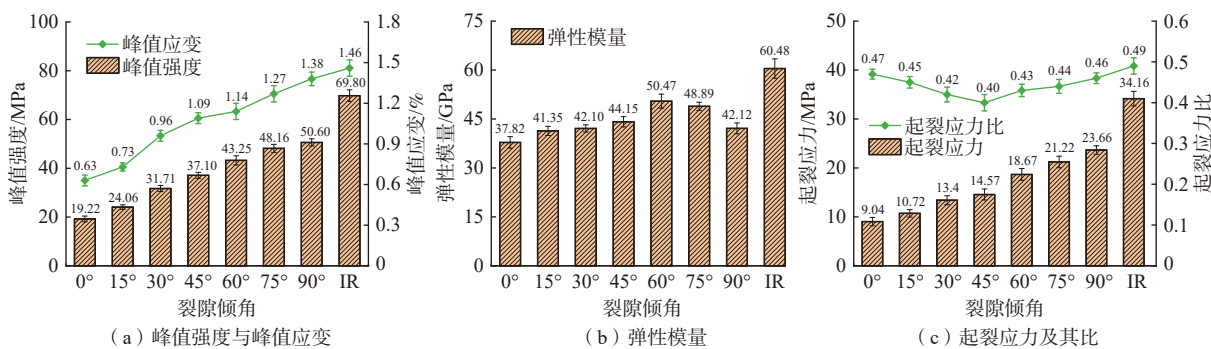


图 8 不同预制裂隙倾角花岗岩的宏观力学特性

Fig. 8 Macro mechanical properties of granite samples with different prefabricated crack inclinations

2.3.2 裂隙岩石的宏观力学特性与声发射参数之间关系

不同预制裂隙花岗岩试验的累计振铃计数,如图 9 所示,裂隙倾角 β 越大,累计振铃计数越多。为了更好描述预制裂隙形态对岩石宏观力学性能的影响,将裂隙岩石的“峰值强度”和“累计振铃计数”进行归一化处理,计算式为

$$X = \frac{N_{cf}}{N_{cIR}}; Y = \frac{\sigma_{cf}}{\sigma_{cIR}} \quad (1)$$

式中: X ——累计振铃计数比;

Y ——峰值强度比;

σ_{cf} 、 N_{cf} ——裂隙岩石的峰值强度和累计振铃计数;

σ_{cIR} 、 N_{cIR} ——完整岩石的峰值强度和累计振铃计数。

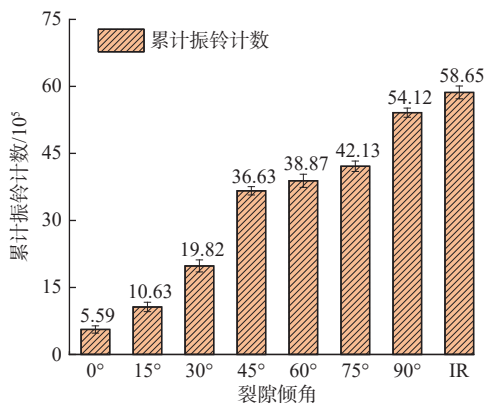


图 9 不同裂隙岩样的累计振铃计数

Fig. 9 Cumulative ringing count of granite samples with different prefabricated crack inclinations

由图 10 可以看出, X 与 Y 之间存在很好的线性变化关系。考虑裂隙倾角和尺寸的影响,将裂隙长度 (a)除以岩样的高度 (h)进行归一化,建立裂隙岩石单轴抗压强度随裂隙倾角的数学关系,见式(2)。由图 11 可知,式(2)能够很好地预测裂隙岩石单轴抗压强度随裂隙形态的变化规律,相关系数达 0.987。

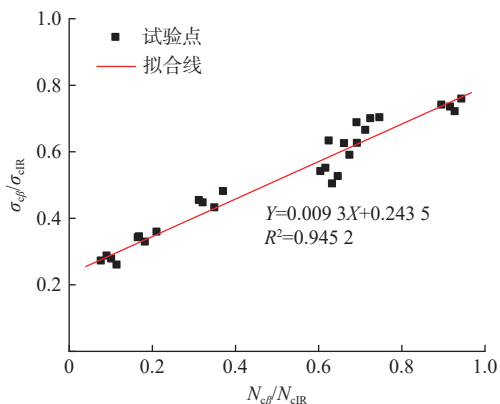


图 10 峰值抗压强度与累计振铃计数的关系

Fig. 10 Relationship between peak strength and cumulative ring count

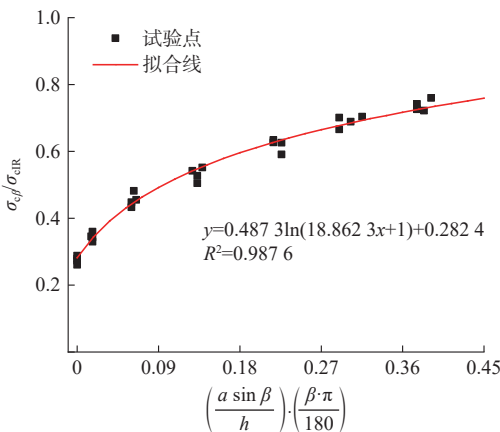


图 11 峰值抗压强度比与裂隙形态的变化关系

Fig. 11 Variation of peak strength ratio with fracture morphology

$$\frac{\sigma_{cf}}{\sigma_{cIR}} = 0.487 3 \ln \left[18.862 3 \left(\frac{a \sin \beta}{h} \right) \cdot \frac{\beta \pi}{180} + 1 \right] + 0.282 4 \quad (2)$$

参照连续介质损伤力学中损伤变量的概念,裂隙形态对岩石峰值强度的损伤程度,定义为

$$D_c = 1 - \frac{\sigma_{cf}}{\sigma_{cIR}} \quad (3)$$

2.3.3 基于声发射的裂隙岩石的裂纹扩展模式

根据声发射信号的振动波形,可以得到表征声发射事件的 2 个特征参数:平均频率(average frequency, AF)和上升角度(rising angle, RA)。其中,AF 反映了一个完整声发射信号的频率;RA 是指声发射信号从首次越过阈值最大振幅所经历时间与幅值的比值。声发射波形与特征参数 AF 和 RA 的关系,如图 12 所示。

AF 和 RA 计算表达式如下:

$$RA = \frac{t_r}{B}; AF = \frac{C_r}{t_d} \quad (4)$$

式中: t_r ——上升时间/ms;

B ——振动幅值/dB;

C_r ——振铃计数;

t_d ——持续时间/ms。

相关研究成果^[30]表明,岩石等脆性材料处于拉伸破裂状态时,声发射信号对应的 AF 值较大,RA 值较

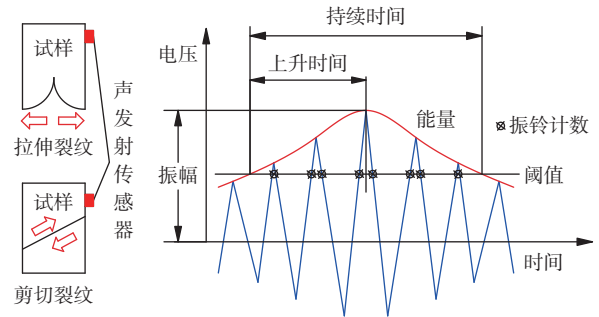


图 12 声发射波形与特征参数示意图

Fig. 12 Schematic diagram of acoustic emission waveform and parameters

小;当岩石处于剪切破裂状态时,情况恰好相反;AF 值和 RA 值越大,表明岩石内部断裂活动越剧烈。由此,可根据 AF 与 RA 比值来判断岩石的开裂模式,若 $AF/RA < 1.0$, 岩石则以张拉断裂为主;若 $AF/RA > 1.0$, 岩石则以剪切断裂为主。基于该方法,绘制了不同预制倾角裂隙岩石试样的 AF-RA 分布图,如图 13 所示。

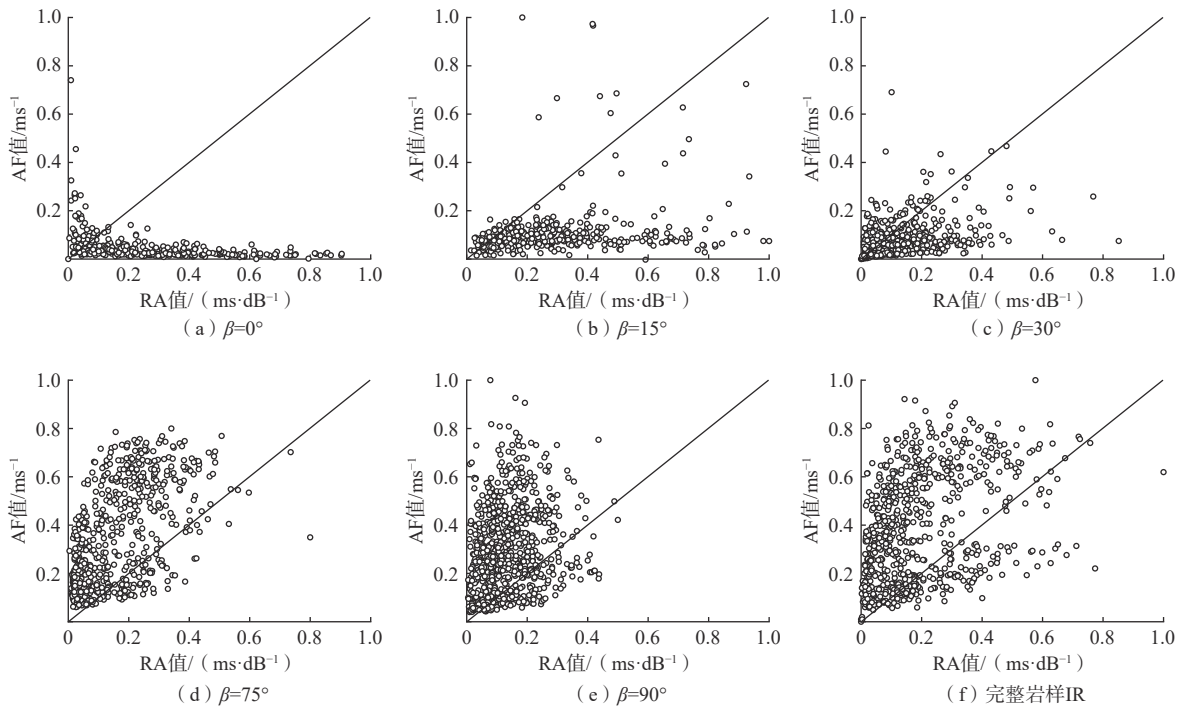


图 13 归一化后 RA 值与 AF 值的关系

Fig. 13 Relationship between normalized RA value and AF value

根据图 13 统计张拉裂纹和剪切裂纹分别占总裂纹数的比例,进而判断预制裂隙倾角对岩石破裂模式的影响。经统计可知,对于 β 分别为 0° 、 15° 和 30° 的岩样,裂纹分布点主要位于 RA 半区,剪切裂纹所占的比例分别为 89.7%、82.0% 和 65.7%,说明这 3 种岩样主要以剪切断裂为主;对 β 为 45° 和 60° 的岩样,裂纹分布

点在 AF 半区和 RA 半区的分布大致相当,剪切裂纹(张拉裂纹)占比分别为 49.8%(50.2%)和 44.1%(55.9%),说明这 2 种岩样以拉-剪复合型断裂为主;对于完整岩样 IR 和 β 为 75° 、 90° 的岩样,裂纹分布点主要集中在 AF 半区,分别占到了 79.9%、81.4% 和 86.6%,表明荷载作用下这 3 种岩样主要张拉断裂为主;由此可知,

随着预制裂隙倾角的增大,岩石的破裂模式由剪切断裂逐渐过渡到张拉断裂。

另外,从 AF 值和 RA 值的大小,可判断岩石破裂过程中的剧烈程度,对于 β 分别为 30° 、 45° 和 60° 岩样,AF 值和 RA 值大于 0.4 的裂纹分布点很少,说明荷载作用下这 3 种岩石内部以微小裂纹的产生及渐进式扩展为主,断裂的剧烈程度较小。

3 岩石起裂应力的确定

目前,通常利用轴向应变-体积应变-轴向应力之间的关系来确定岩石的起裂应力^[31],但该方法对弹性模量 E 和泊松比 μ 取值的敏感程度较高,主观因素较大。本文将结合岩石的应力-应变关系曲线和声发射信号响应,结合裂纹萌生时起裂应力的确定方法。声发射撞击(AE-hit)是指超过触发阈值被记录下的声发射信号。岩石的累计 AE 撞击数随着轴向荷载的增加逐渐增大,两者的关系曲线近似呈倒“S”形状,如图 14 所示。

由图 14 可知,第 1 阶段曲线呈上凸形状,累计 AE 撞击数随荷载应力有明显增加,主要是由于初始微孔隙和微裂纹闭合触发的声发射撞击信号;第 2 阶段曲线随荷载应力缓慢平稳增加,对应着岩石的线弹性变形阶段;第 3 阶段曲线有显著翘起,累计声发射撞击数陡增,表明裂纹进入快速扩展阶段直至岩样完全破裂。

求解起裂应力,首先要确定其范围^[32]。由图 15 可知,起裂应力不会超过第 3 阶段翘起段,同时也不会低于第 1 阶段的末端。因此,便可先确定出起裂应力的上限和下限,再通过逼近的方法求解起裂应力。以预制裂隙倾角为 30° 的岩样为例,确定起裂应力的步骤具体如下:

1) 确定起裂应力上限。过轴向应力(σ_a)-累计 AE 撞击数(N_{ch})曲线原点作蓝色直线,使蓝色直线的斜率由 0 逐渐增大,直到与曲线相切为止,切点即为起裂应力的上限点,见图 15(a)。

2) 确定起裂应力下限。过上限点作红色直线,同样使红色直线的斜率由 0 逐渐增大,直到在上限点的左侧与 σ_a - N_{ch} 曲线相切,该切点即为起裂应力的下限点,见图 15(b)。

3) 计算累计撞击数差值。过上限点和下限点作直线作为红色参考线,求解参考线方程,计算轴向应力相同的时参考线与 σ_a - N_{ch} 曲线的差值,即为累计撞击数差值 ΔN_{ch} ,见图 15(c)。

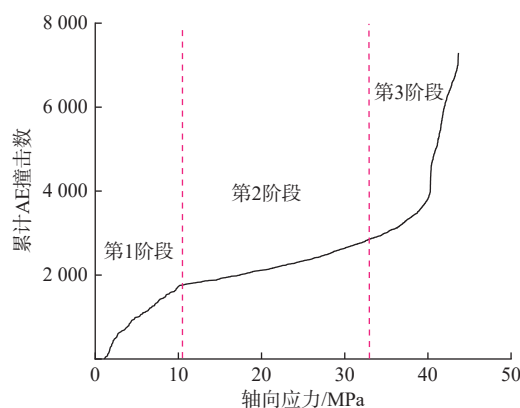


图 14 累计 AE 撞击数随轴向应力的变化关系

Fig. 14 Variation of cumulative AE impact number with axial stress

4) 确定起裂应力。绘制轴向应力 σ_a 与累计撞击数差值 ΔN_{ch} 之间的关系曲线,峰值对应的应力即为起裂应力,见图 15(d)。

根据上述确定起裂应力的方法,得到了不同裂隙岩石的起裂应力,见图 16。通过高清摄像可以观察到荷载作用下岩石试样的整个破坏过程,从试样外观能够清晰捕捉试样裂隙尖端裂纹起裂的初始时刻,进而方便确定裂纹起裂应力。由图 16 可知,通过计算得到的起裂应力略大于摄像观测值,说明岩样表面先于内部出现裂纹萌生;两者之间的差值为 $0.3 \sim 1.70$ MPa,误差范围介于 $2.2\% \sim 6.7\%$ 。由此说明,上述确定岩石起裂应力的方法是可信的。

4 结论

(1) 随着预制裂隙倾角的增大,花岗岩试样裂隙尖端裂纹的起裂角度逐渐减小;岩石的峰值强度、峰值应变和起裂应力均呈逐渐增大的趋势,而起裂应力比的变化幅值很小;岩石弹性模量呈现出先增大后减小的变化趋势。裂隙倾角对峰值强度、弹性模量和峰值应变的影响依次减小。完整岩石的峰值强度、弹性模量、峰值应变和起裂应力均大于裂隙岩石。

(2) 声发射信号能够很好地响应岩石的损伤演化过程,岩石初始压密段和线弹性段对应声发射平静期;应力超过起裂应力后,声发射进入发展期;应力接近峰值强度前期,声发射处于高峰期。裂隙倾角越大,声发射高峰期越长,岩石的累计振铃计数越多,岩石强度与累计振铃计数之间存在良好的线性关系,量化了裂隙形态对岩石强度损伤的影响规律。

(3) 依据声发射特征参数 AF 和 RA,分析了不同裂隙岩石的破裂模式。对于完整岩石和裂隙倾角小

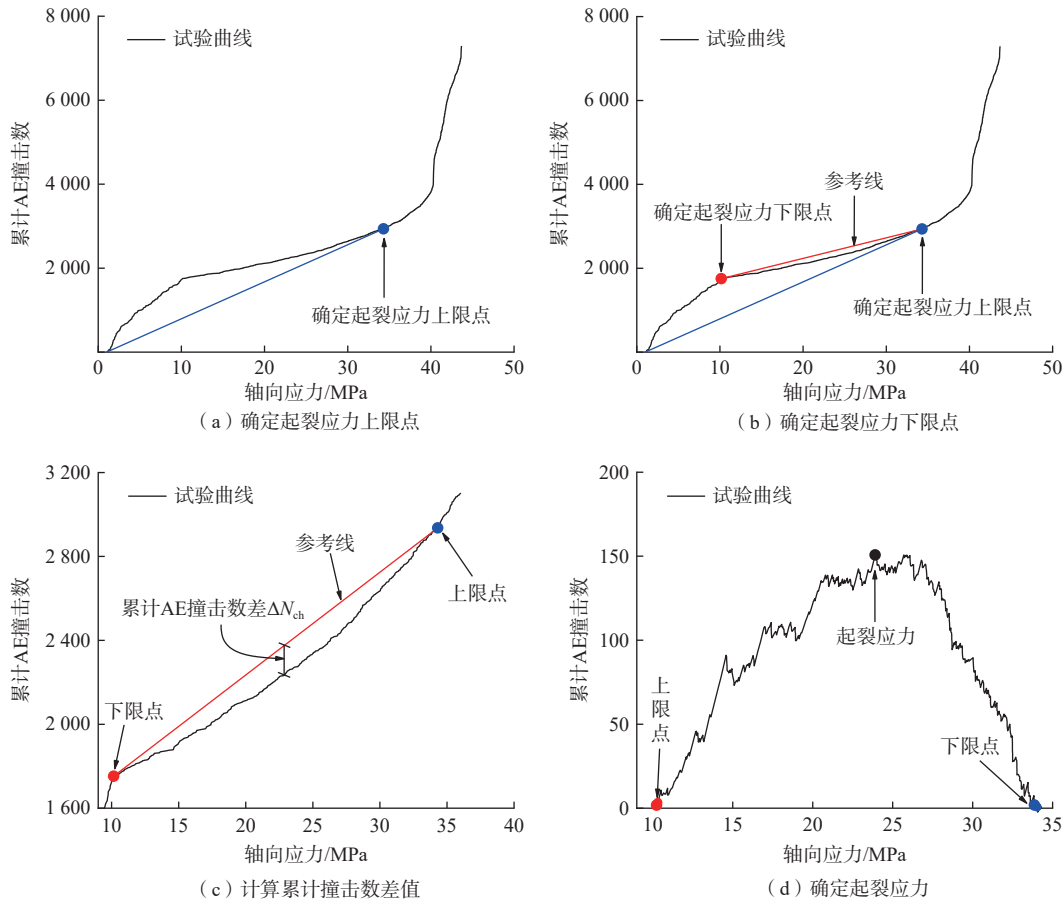


图 15 确定起裂应力的步骤

Fig. 15 Steps for determining crack initiation stress

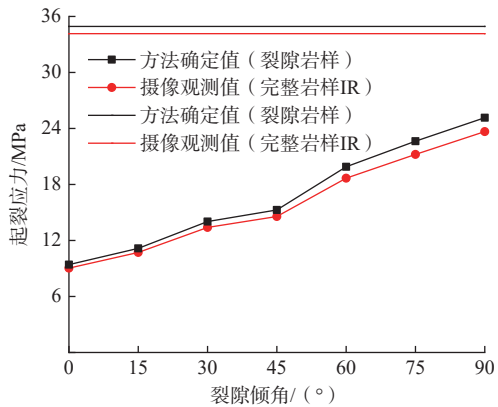


图 16 起裂应力声发射确定值与摄像观测值的比较

Fig. 16 Comparison between the determined value of acoustic emission and the observed value of camera for crack initiation stress

于 30° 的岩石, 主要是剪切断裂; 裂隙倾角介于 30° ~ 60° 的岩石以拉-剪复合断裂为主; 裂隙倾角大于 60° 的岩石主要是张拉断裂。也就是说, 随着裂隙倾角的增大, 岩石破裂模式由剪切断裂逐渐向张拉断裂过渡。

(4) 根据轴向应力-累计 AE 撞击数的关系曲线,

并结合岩石起裂应力的确定方法, 计算值略大于摄像观测值, 表明荷载作用下岩石表面先于内部出现裂纹萌生; 计算值与摄像观测值之间的误差小于 7.0%, 说明起裂应力的确定方法是可行的。

参考文献 (References) :

[1] 陈欣, 周小涵, 许彬, 等. 裂隙岩体宏观剪切损伤力学行为研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2509 - 2521. [CHEN Xin, ZHOU Xiaohan, XU Bin, et al. Investigation on the macro-meso shear damage mechanical behaviors of fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2509 - 2521. (in Chinese with English abstract)]

[2] 曹平, 曹日红, 赵延林, 等. 岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1737 - 1762. [CAO Ping, CAO Rihong, ZHAO Yanlin, et al. Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock cracks[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1737 - 1762. (in Chinese with English abstract)]

- [3] XU Bin, LIU Xinrong, ZHOU Xiaohan, et al. Investigation on the macro-meso fatigue damage mechanism of rock joints with multiscale asperities under pre-peak cyclic shear loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151: 106958.
- [4] ZHOU Xiaoping, ZHANG Jianzhi, QIAN Qihu, et al. Experimental investigation of progressive cracking processes in granite under uniaxial loading using digital imaging and AE techniques[J]. *Journal of Structural Geology*, 2019, 126: 129 – 145.
- [5] 张科, 潘哲, 刘享华. 含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 103 – 111. [ZHANG Ke, PAN Zhe, LIU Xianghua. Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 103 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 等. 预制裂隙岩样宏观力学行为颗粒流数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 86 – 92. [WANG Xingchen, WANG Zhiliang, HUANG Youpeng, et al. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 86 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵延林, 王文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破坏试验与翼形断裂数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2097 – 2109. [ZHAO Yanlin, WAN Wen, WANG Weijun, et al. Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(11): 2097 – 2109. (in Chinese with English abstract)]
- [8] PRUDENCIO M, VAN SINT JAN M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 890 – 902.
- [9] 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.
- [10] 肖桃李, 李新平, 贾善坡. 含 2 条断续贯通预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2455 – 2462. [XIAO Taoli, LI Xinping, JIA Shanpo. Failure characteristics of rock with two pre-existing transfixion cracks under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2455 – 2462. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵彦琳, 范勇, 朱哲明, 等. T 应力对闭合裂纹断裂行为的理论和实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1340 – 1349. [ZHAO Yanlin, FAN Yong, ZHU Zheming, et al. Analytical and experimental study on the effect of T-stress on behavior of closed cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1340 – 1349. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(6): 979 – 999.
- [13] 张睿, 赵程, 幸金权, 等. 基于平节理模型的花岗岩固有微裂纹对裂纹演化影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1857 – 1867. [ZHANG Rui, ZHAO Cheng, XING Jinquan, et al. Influence of granite inherent microcracks on crack evolution based on the flat-joint contact model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1857 – 1867. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 649 – 657. [FENG Xiating, WU Shiyong, LI Shaojun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory (CJPL-II) in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 649 – 657. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王亚超, 窦斌, 喻勇, 等. 不同冷却方式下高温花岗岩巴西劈裂及声发射特性试验研究 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 200 – 207. [WANG Yachao, DOU Bin, YU Yong, et al. Experimental study on Brazilian split test and acoustic emission characteristics of high temperature granite under different cooling methods[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 200 – 207. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 曾晋. 温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤及声发射特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 69 – 74. [ZENG Jin. A study of the rock damage and AE characteristics under the coupling of temperature, seepage and stress[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 69 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩演化声发射特性与裂纹形态研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1976 – 1989.

- [WANG Yu, GAO Shaohua, MENG Huajun, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and fracture network patterns of pre-flawed granite subjected to increasing- amplitude fatigue loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1976 – 1989. (in Chinese with English abstract)]
- [18] DONG Longjun, CHEN Yongchao, SUN Daoyuan, et al. Implications for rock instability precursors and principal stress direction from rock acoustic experiments[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 789 – 798.
- [19] 付小凤. 渗流-应力耦合作用下砂岩声发射及分形损伤特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 83 – 88. [FU Xiaofeng. A study of the acoustic emission and fractal damage of sandstone under the coupling of seepage and stress[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 83 – 88.(in Chinese with English abstract)]
- [20] RODRÍGUEZ P, CELESTINO T B. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 210: 54 – 69.
- [21] 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.
- [22] LIU Xiling, LIU Zhou, LI Xibing, et al. Experimental study on the effect of strain rate on rock acoustic emission characteristics[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104420.
- [23] 董陇军, 张义涵, 孙道元, 等. 花岗岩破裂的声发射阶段特征及裂纹不稳定扩展状态识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 120 – 131. [DONG Longjun, ZHANG Yihan, SUN Daoyuan, et al. Stage characteristics of acoustic emission and identification of unstable crack state for granite fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 120 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张国凯, 李海波, 王明洋, 等. 基于声学测试和摄像技术的单裂隙岩石裂纹扩展特征研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 63 – 72. [ZHANG Guokai, LI Haibo, WANG Mingyang, et al. Crack propagation characteristics in rocks containing single fissure based on acoustic testing and camera technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(Sup 1): 63 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [25] YANG Shengqi, JING Hongwen. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2011, 168(2): 227 – 250.
- [26] 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2248 – 2258. [ZHANG Yanbo, LIANG Peng, TIAN Baozhu, et al. Multi parameter coupling analysis of acoustic emission signals of granite disaster and the precursor characteristics of the main rupture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2248 – 2258. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张科, 李娜. 基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 150 – 156. [ZHANG Ke, LI Na. Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 150 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [28] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part I. macroscopic observations and interpretation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(3): 475 – 511.
- [29] ZHAO Kui, YANG Daoxue, GONG Cong, et al. Evaluation of internal microcrack evolution in red sandstone based on time–frequency domain characteristics of acoustic emission signals[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 120435.
- [30] SHIOTANI T, OHTSU M, IKEDA K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation[J]. *Construction and Building Materials*, 2001, 15(5/6): 235 – 246.
- [31] 王宇, 李晓, 贲雨星, 等. 脆性岩石扩容起始应力预测——以花岗岩和闪长岩为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 737 – 746. [WANG Yu, LI Xiao, BEN Yuxing, et al. Prediction of initiation stress of dilation of brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 737 – 746. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 李鹏飞, 赵星光, 蔡美峰. 压缩条件下岩石启裂应力的识别方法探讨——以新疆天湖花岗岩闪长岩为例 [J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2323 – 2331. [LI Pengfei, ZHAO Xingguang, CAI Meifeng. Discussion on approaches to identifying cracking initiation stress of rocks under compression condition: A case study of Tianhu granodiorite in Xinjiang Autonomous Region[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2323 – 2331. (in Chinese with English abstract)]