

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202301008



裂隙岩石应力松弛特性及声发射试验

张默涵, 俞缙, 常旭, 刘士雨, 涂兵雄

(华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 为探究裂隙岩石的应力松弛特性及失稳破坏特征对工程长期稳定和安全的影 响, 利用 TFD-2000/D 型岩石动态扰动伺服三轴试验系统和 DS5-16B 型全信息声发射仪, 对完整岩石和不同倾角裂隙岩石进行单轴逐级加载应力松弛声发射试验. 结果表明: 相同条件下, 裂隙岩石的峰值轴向应力比完整岩石的低, 且随着倾角的增大, 轴向峰值应力也随之增大; 完整岩石和裂隙岩石的应力松弛度和初始应力松弛速率均随着应变的增大呈现先增大后减小的趋势; 根据松弛速率的快慢, 把松弛过程分为快速松弛阶段和慢速松弛阶段; 在加载段和松弛过程中均存在着声发射信号, 声发射特征值可以作为一 种有效的信息判断岩石的破坏情况.

关键词: 裂隙岩石; 不同倾角; 应力松弛; 振铃计数; 破坏特征

中图分类号: TU 432

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)05-0574-08

Stress Relaxation Characteristics and Acoustic Emission Experiment of Fractured Rock

ZHANG Mohan, YU Jin, CHANG Xu,
LIU Shiyu, TU Bingxiong(Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering Technology,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to explore the effects of stress relaxation characteristics and instability failure characteristics of fractured rock on the long-term stability and safety of the project, using the TFD-2000/D type rock dynamic disturbance servo triaxial test system and DS5-16B type full information acoustic emission instrument, uniaxial step loading stress relaxation acoustic emission tests were carried out on intact rock and fractured rock with different inclination angles. The results show that: under the same conditions, the peak axial stress of fractured rock is lower than that of intact rock, and as the inclination angle increases, the peak axial stress also increases. The stress relaxation degree and the initial stress relaxation rate of intact rock and fractured rock firstly increase and then decrease with the increase of strain. According to the rate of relaxation, the relaxation process is divided into fast relaxation stage and slow relaxation stage. There are acoustic emission signals in loading stage and relaxation process. Acoustic emission characteristic values can be regarded as an effective information to judge the failure condition of rock.

Keywords: fractured rock; different inclination angle; stress relaxation; ringing count; failure characteristic

岩石的流变行为是工程领域中普遍存在的现象, 通常发生在地下洞室、巷道及隧道. 一般来说, 流变行为包括蠕变和应力松弛, 应力松弛对预测洞室围岩的长期强度、评估地下洞穴的安全性和稳定性, 以

收稿日期: 2023-01-08

通信作者: 俞缙(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土力学与地下工程的研究. E-mail: bugyu0717@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077254, 51874144); 福建省科技计划引导性项目(2020H0014, 2020Y0029)

及预防地下工程建设带来的灾害等方面均起着重要影响^[1-2], 因此, 开展岩石应力松弛力学特性研究具有重要的理论和实践意义。

目前, 国内外众多学者对岩石的应力松弛特性开展了大量的理论和试验研究, 唐礼忠等^[3]发现在峰值荷载变形条件下, 岩石的应力松弛是间断的、阵发式的; Tian 等^[4]发现与常规三轴试验相比, 松弛后砂岩的破坏强度降低; 熊良宵等^[5]发现应力松弛曲线的台阶数与岩石完整性有着显著的关系; Adoko 等^[6]将应力松弛分为部分松弛、切向松弛和完全松弛 3 种类型; 文献^[7-9]发现在较低应变或是应力条件下, 岩石松弛曲线表现出非完全衰减型松弛特征, 并提出了本构模型描述松弛过程; 刘志勇等^[10]发现平行片理组和垂直片理组岩样的应力松弛曲线均可分为快速松弛、减速松弛和稳定松弛 3 个阶段; Yang 等^[11]发现预裂花岗岩的松弛行为高度依赖于单轴压力值和围压; Zhu 等^[12]明确循环扰动后深部岩石的松弛特征; Yu 等^[13]发现循环微扰动松弛试验中应力松弛量随应变增大而增大。

上述研究主要针对完整岩石, 而自然界中存在着大量带有初始缺陷的裂隙岩石. 与完整岩石相比, 裂隙岩石的力学性质有着很大的差异, 而且裂隙岩石是在整个地质历史时期形成和存在的, 经受过各种复杂而不均衡的地质作用, 并最终赋存在一定的地质环境中. 因此, 裂隙岩石的变形和强度特征要比完整岩石复杂的多, 裂隙的存在可能会给地下洞室开挖、边坡稳定等工程带来潜在的威胁, 导致岩体工程的失稳和破坏^[14-18]. 目前, 对裂隙岩石研究少量集中在蠕变方面^[19-20], 而对裂隙岩石应力松弛特性的研究几乎没有, 鉴于此, 本文对裂隙岩石应力松弛特性及声发射试验进行研究。

1 岩样制备与试验方法

1.1 岩样加工

试验岩石取自广西省贺州市平桂区水井山矿区的白色大理岩石, 其主要矿物成分为方解石(99%)、白云石, 孔隙度约为 1%, 吸水率约为 0.2%. 通过取芯、切割、磨削等, 将大理岩加工成直径为 50 mm、高为 100 mm、上、下端面不平整度小于 0.05 mm 的圆柱体(岩样), 岩样的平均质量为 527.9 g. 为减小离散性, 对颜色均匀、表面无明显裂纹的岩样进行波速测试, 测得波速为 3 188.43~3 566.96 m·s⁻¹. 挑选出波速相近的岩样, 用线切割机对选取的岩样进行裂隙加工, 得到长为 20 mm、厚为 1.5 mm、深度完全贯通、倾角为 30°, 45°, 60°, 75°裂隙大理岩样. 加工后的裂隙大理岩样, 如图 1 所示。

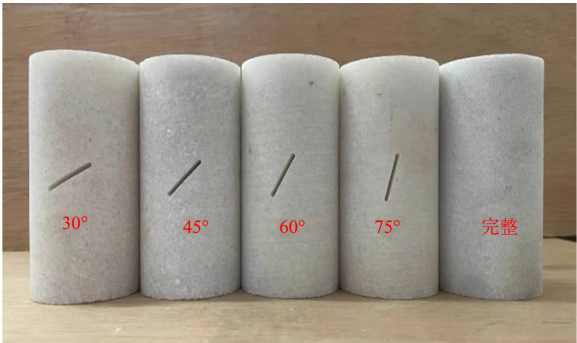


图 1 加工后的裂隙大理岩样

Fig. 1 Fractured marble samples after processing

1.2 试验设备

试验采用的三轴试验系统是由吉林省长春市科意试验仪器有限公司与华侨大学联合研发的 TFD-2000/D 型岩石动态扰动伺服三轴试验系统. 轴向压力负载由伺服油源控制, 负载值由电脑控制系统设定, 最大负载为 2 000 kN. 声发射系统采用 DS5-16B 型全信息声发射仪, 该系统可以自动读取、存储声发射信号, 对试样声发射进行全过程实时监测。

1.3 试验方案及步骤

对倾角为 30°, 45°, 60°, 75°的裂隙岩石进行单轴压缩试验, 岩石力学参数, 如表 1 所示. 表 1 中: α 为

表 1 岩石力学参数

Tab. 1 Rock mechanical parameters

$\alpha/(^{\circ})$	$\sigma_{1,max}/\text{MPa}$	$\epsilon_{1,max}$	E/MPa
30	37.00	0.065	92.0
45	39.75	0.059	97.6
60	46.95	0.079	103.5
75	52.30	0.074	107.1
完整	66.60	0.102	107.9

倾角; $\sigma_{1,max}$ 为轴向峰值应力; $\epsilon_{1,max}$ 为轴向峰值应变; E 为弹性模量.

采用 $0.05\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的轴向变形速率控制方式进行加载,直至破坏.轴向应力-应变曲线,如图 2 所示.图 2 中: σ_1 为轴向应力; ϵ_1 为轴向应变.

应变水平划分示意图,如图 3 所示.

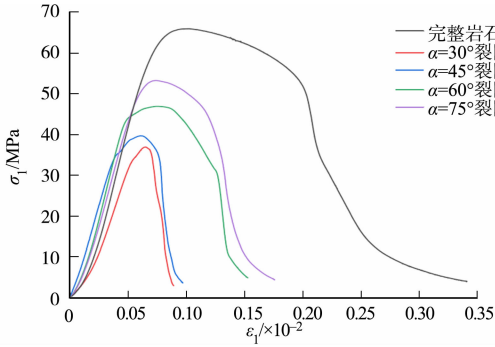


图 2 轴向应力-应变曲线
Fig. 2 Curves of axial stress-strain

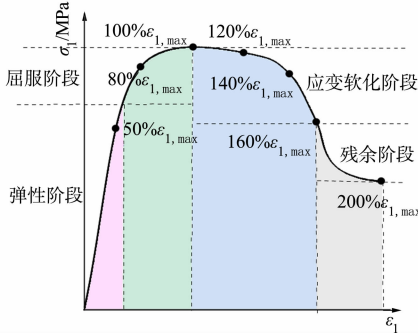


图 3 应变水平划分示意图
Fig. 3 Division of strain level

单轴逐级加载应力松弛声发射试验有 3 个步骤: 1) 采用 $0.05\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的轴向变形速率的控制方式使岩石试样的轴向应变达到预设值, 并进行应力松弛; 2) 当轴向变形速率小于 $0.001\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 即认为轴向应变所产生的应力松弛已基本趋于稳定, 可以停止应变加载; 3) 按同样加载模式, 使岩石进入下一级应变, 并进行应力松弛, 重复上述步骤, 直至岩石破坏. 松弛加载示意图, 如图 4 所示. 图 4 中: $\epsilon_{1,1}$, $\epsilon_{1,2}$, $\epsilon_{1,3}$ 分别为 3 个不同的应变水平; Δt 为松弛持续时间.

在上述试验过程中, 同步进行声发射监测, 分别在上、下端每隔 90° 布置 1 个声发射通道, 共 8 个. 声发射通道示意图, 如图 5 所示. 图 5 中: 声发射阈值设置为 40 dB; 采样频率为 2 MHz.

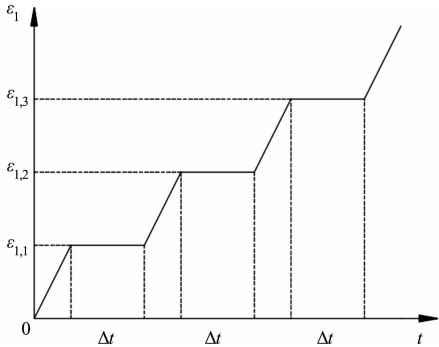


图 4 松弛加载示意图
Fig. 4 Relaxation loading

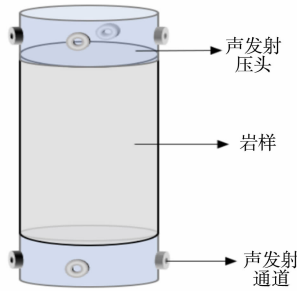


图 5 声发射通道示意图
Fig. 5 Acoustic emission channel

2 试验结果与分析

2.1 轴向应力-应变

分别对倾角为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石和完整岩石进行逐级加载应力松弛试验, 逐级加载下轴向应力-应变曲线, 如图 6 所示. 由图 6 可知: 裂隙岩石峰值轴向应力明显小于完整岩石, 且随着倾角的增大, 峰值轴向应力也随之增大. 经过应力松弛后, 完整岩石和裂隙岩石的重新加载段曲线并没有沿着原来的路径上升, 而是与应力松弛曲线有一定角度的偏离.

由于逐级加载, 前期的加载历史会对岩石试样的力学性质造成影响, 因此, 采用 Boltzmann 叠加原理将逐级加载应力松弛试验曲线转化为不同应变下的单

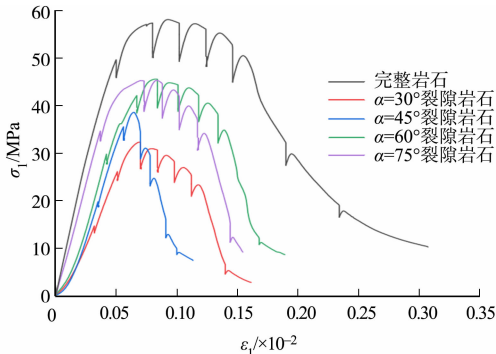
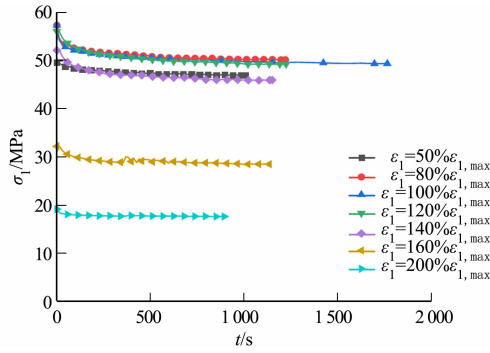


图 6 逐级加载下轴向应力-应变曲线
Fig. 6 Curves of axial stress-strain under step loading

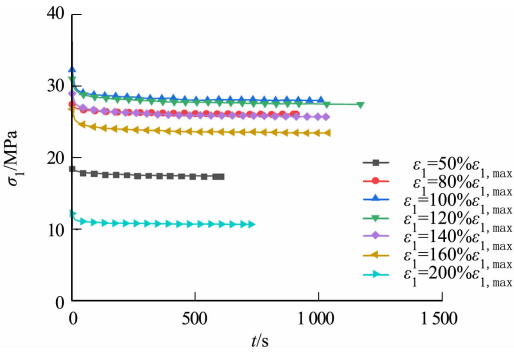
级加载应力松弛曲线. 单级加载下的轴向应力松弛曲线, 如图 7 所示.

由图 7 可知: 完整岩石、裂隙岩石轴向应力松弛曲线有着相似的形态, 即使处于峰前、峰后阶段的不同应变水平之下, 应力松弛曲线的形态基本保持一致, 即岩石进入松弛阶段后, 轴向应力随着时间的增加先迅速减小, 随后轴向应力跌落平缓, 最终逐渐趋于稳定.

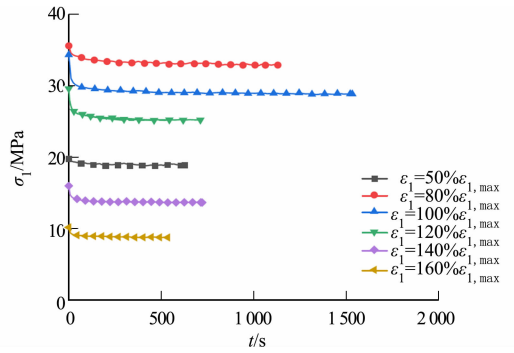
由此, 将轴向应力松弛曲线分为两个阶段, 即快速松弛阶段和慢速松弛阶段. 快速松弛阶段的持续时间较短, 轴向应力快速跌落, 应力松弛量具有显著的时间效应. 慢速松弛阶段持续时间较长, 轴向应力缓慢减小, 轴向应力与时间的关联性较小, 轴向应力最终趋于某一恒定值.



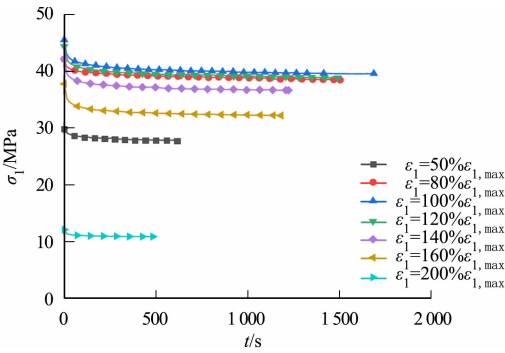
(a) 完整岩石



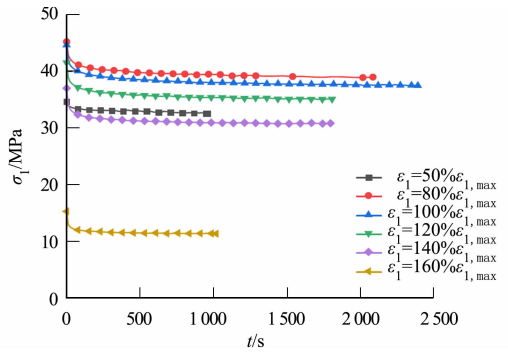
(b) $\alpha=30^\circ$ 裂隙岩石



(c) $\alpha=45^\circ$ 裂隙岩石



(d) $\alpha=60^\circ$ 裂隙岩石



(e) $\alpha=75^\circ$ 裂隙岩石

图 7 单级加载下的轴向应力松弛曲线

Fig. 7 Curves of axial stress relaxation under single step loading

2.2 应力松弛度

为了表示应力松弛状态的轴向应力衰减损失的程

$$\lambda = \sigma_i / \sigma_0 = (\sigma_0 - \sigma_{r,i}) / \sigma_0.$$

度, 定义应力松弛度 $\lambda^{[9]}$ 为

式中: σ_0 为应力松弛开始时的初始轴向应力; $\sigma_{r,i}$ 为应力松弛开始第 i 时刻的轴向应力.

由定义可知, 应力松弛度越大, 松弛稳定后, 轴向应力衰减损失的程度也就越大.

应力松弛度与应变水平关系图, 如图 8 所示. 由图 8 可知以下 3 点结论.

1) 除倾角为 $30^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石应力松弛度分别在 $200\% \epsilon_{1,max}, 160\% \epsilon_{1,max}$ 处发生突增外, 完整岩石和裂隙岩石的应力松弛度总体上均随着轴向应变水平的增大, 先增大后减小, 且均在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 处, 应力松弛度出现最大值.

2) 与在 $80\% \epsilon_{1,max}$ 处相比, 倾角为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石及完整岩石在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 处, 应力松弛度分别增加了 1.10, 1.03, 0.50, 0.15, 0.09 倍. 在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 处, 裂隙岩石应力松弛度均比完整岩石的

大,表明裂隙的存在降低了岩石的完整性和稳定性,从而使岩样更容易发生变形;在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 前,不同倾角的应力松弛度并无明显规律,而在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 后,倾角为 $45^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石的应力松弛度较倾角为 $30^\circ, 60^\circ$ 裂隙岩石的大。

3) 倾角为 $30^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石的应力松弛度均在 $200\% \epsilon_{1,max}, 160\% \epsilon_{1,max}$ 发生突增,与其他裂隙岩石整体变化趋势不相符。这可能是因为倾角为 $30^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石 $200\% \epsilon_{1,max}$ 处于峰后残余阶段,此应变下的初始应力相对于峰前较小,在松弛过程中岩石内部的多条裂隙发生扩展、贯通形成宏观破裂面,岩石宏观结构的完整性遭到破坏,导致应力损失程度高,应力松弛度出现增大,这点还有待进一步研究,从而也体现裂隙对岩石松弛产生更加不利影响,可能会造成事故突发,难以预测,安全隐患巨大。因此,在工程中要高度重视裂隙所导致岩石应力松弛破坏的问题。

2.3 应力松弛速率

定义应力松弛速率 $v_i^{[12]}$ 为

$$v_i = \Delta \sigma_i / \Delta t.$$

式中: v_i 表示应力松弛量随时间变化的快慢, v_i 越大,说明应力松弛过程中应力跌落越剧烈; $\Delta \sigma_i$ 为第 i 时刻的应力松弛量。

不同应变水平的初始应力松弛速率,如图 9 所示。图 9 中: v_0 为初始松弛速率。由图 9 可知:完整岩石和裂隙岩石初始松弛速率均随着应变的增大呈先增大后减小,最大初始应力松弛速率出现在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 处;在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 时,裂隙岩石初始应力松弛速率均比完整岩石的大,最大初始应力松弛速率出现在倾角为 45° 裂隙岩石,其次是倾角为 $75^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 裂隙岩石,这 4 种裂隙岩石初始应力松弛速率分别是完整岩石的 1.4, 1.3, 1.2, 1.1 倍;倾角为 $30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石在破坏前倒数第 2 级应变的初始应力松弛速率较其上一级应变的初始松弛速率出现增大现象,且均在峰后残余强度段出现失稳破坏。

由节 2.1, 2.2 可知:完整岩石与裂隙岩石在 $100\% \epsilon_{1,max}$ 前、后的应力松弛特性存在着明显差异,这主要是因为 $100\% \epsilon_{1,max}$ 前,岩石应力松弛主要是由于岩石内部微裂隙的产生、扩展等原因而引起的,而 $100\% \epsilon_{1,max}$ 后,岩石应力松弛过程主要是由于岩石中宏观裂纹的产生、扩展以及贯通等。因此,在工程实践中要避免使岩石处于峰值阶段、峰后应变软化阶段和峰后残余强度段,特别是对于裂隙岩石而言,应尽可能地提前采取相应的支护加固措施来确保工程的安全与稳定。

3 声发射试验及破坏特征

3.1 声发射特征

振铃计数变化图,如图 10 所示。图 10 中: n 为振铃计数。由图 10 可知:完整岩石和裂隙岩石的声发射事件均呈簇状分布;在每一级加载段都存在着声发射信号,且呈连续分布状态;在应力松弛段的声发射信号主要集

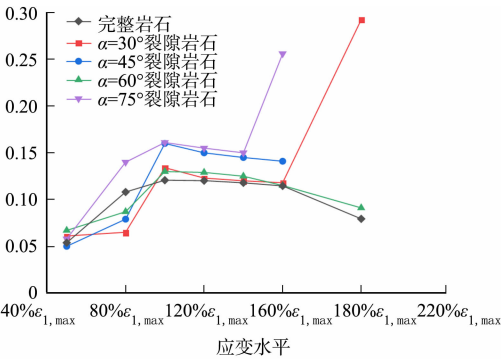


图 8 应力松弛度与应变水平关系图
Fig. 8 Relationship between stress relaxation degree and strain levels

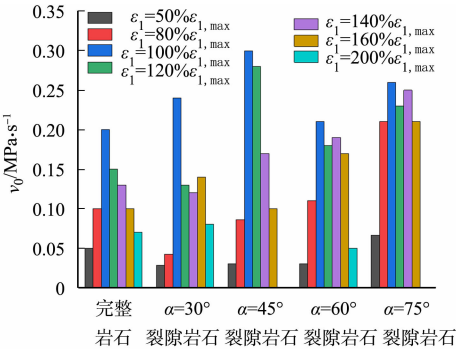
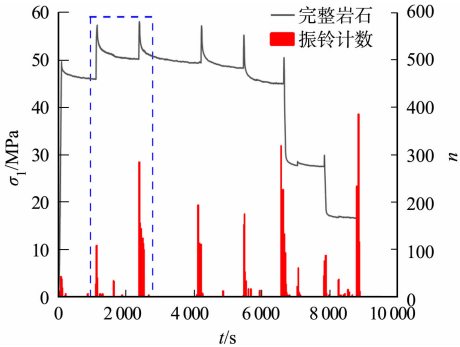


图 9 不同应变水平的初始应力松弛速率
Fig. 9 Initial stress relaxation rates of different strain levels



(a) 完整岩石

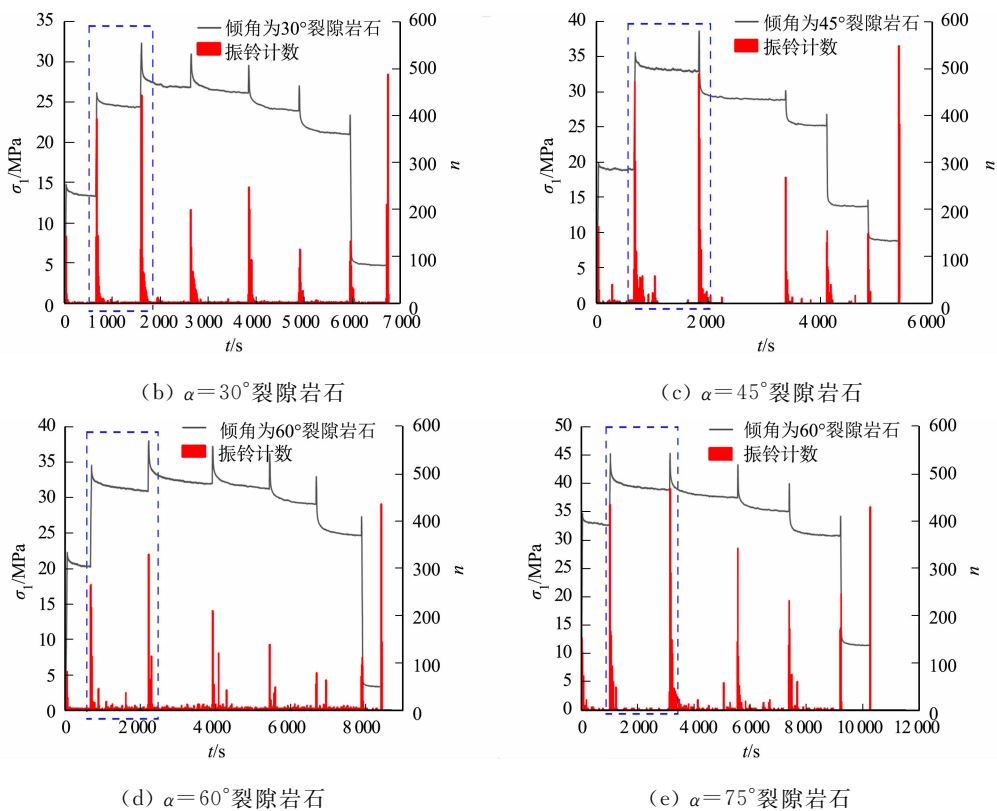


图 10 振铃计数变化图
Fig. 10 Variation of ringing count

中在快速松弛阶段,另外在慢速松弛阶段声发射信号零星出现。

由图 10 还可知:振铃计数最大值均发生在最后一级加载破坏段,其次是轴向峰值应力处;完整岩石在第 2 级(屈服阶段)的振铃计数最大值与第 3 级(峰值阶段)的有显著差别,而裂隙岩石第 2 级振铃计数最大值与第 3 级相差较小。由于振铃计数反映岩石内部裂隙的发育、扩展、贯通和扩展演化规律,在加载阶段和快速松弛阶段,内部裂隙的发育、扩展、贯通更加剧烈,裂隙岩石在屈服阶段和轴向峰值应力处的内部损伤也更大。

累计振铃计数,如图 11 所示。图 11 中: m 为累计振铃计数。由图 11 可知:裂隙岩石在各级应变等级下的累计振铃计数均显著高于完整岩石;完整岩石在前 5 级应变等级下累计振铃计数增长缓慢,曲线近似呈线性关系,在第 6 级应变等级时,累计振铃计数开始出现明显增大;裂隙岩石累计振铃计数在各级应变等级下呈现出明显的上升,从第 2 级应变等级后,不同裂隙岩石的累计振铃计数开始存在明显的差异,特别是第 2 级至第 3 级应变等级之间,曲线斜率变化显著,其中,倾角 45° 裂隙岩石的斜率比其他裂隙倾角岩石的大,这是因为在屈服阶段,倾角 45° 裂隙岩石内部晶粒错动和裂隙尖端的应力集中,导致微裂纹沿着裂隙尖端发育、扩展、贯通更为剧烈,因此,累计振铃计数的突增较大;裂隙岩石的累计振铃计数总数与完整岩石相比也有显著的差别,累计振铃计数总数随着裂隙岩石倾角的增大分别是完整岩石累计振铃计数总数的 3.2,3.8,1.7,2.3 倍,表明裂隙的存在导致试样内部微小裂隙发育活动更加剧烈。

3.2 岩石破坏特征

单轴逐级加载应力松弛破坏图,如图 12 所示。

由图 12 可知:完整岩石和裂隙岩石的破坏模式存在着较大的差异;完整岩石的破坏模式为剪切破坏,岩石出现明显的宏观剪切滑移面,主裂隙从岩石上端一直延伸到下端;裂隙岩石的破坏模式为张拉

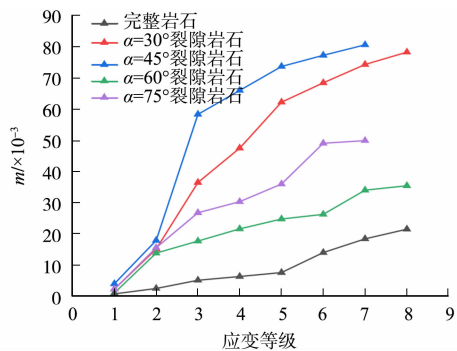
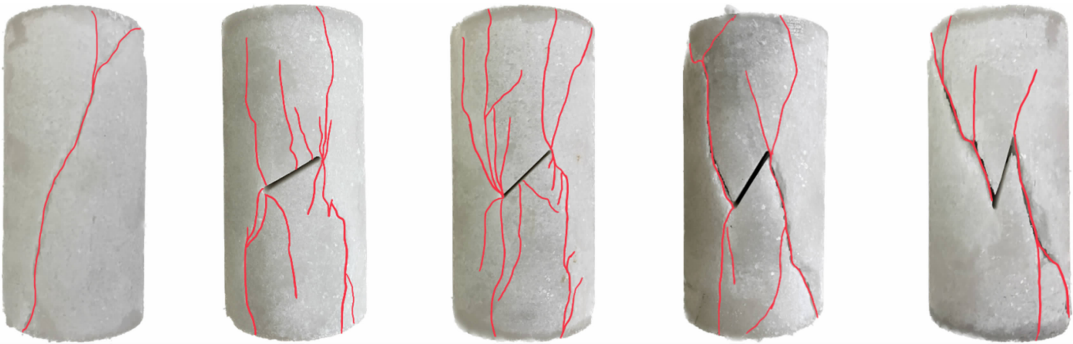


图 11 累计振铃计数
Fig. 11 Cumulative ringing count



(a) 完整岩石 (b) $\alpha=30^\circ$ 裂隙岩石 (c) $\alpha=45^\circ$ 裂隙岩石 (d) $\alpha=60^\circ$ 裂隙岩石 (e) $\alpha=75^\circ$ 裂隙岩石

图 12 单轴逐级加载应力松弛破坏图

Fig. 12 Failure of uniaxial step loading of stress relaxation

剪切型复合破坏,起裂位置主要出现在裂隙尖端处,在裂隙尖端处有分叉裂隙生成,且少量分叉裂隙穿过裂隙尖端沿着加载方向向上、下端部扩展,最终生成宏观主破裂面,造成岩石的失稳破坏;不同裂隙岩石在裂隙尖端处分叉出的裂隙数量存在着差异,其中倾角为 $30^\circ, 45^\circ$ 裂隙岩石尖端处分叉裂隙数量较倾角为 $60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石的多;倾角为 $60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石在宏观主裂隙端部有着少量的碎片剥落。

造成上述现象的原因是裂隙岩石本身存在着一定的初始损伤,且在裂隙尖端会产生应力集中现象,长时间的应力松弛使得裂隙岩石的裂隙尖端处有充足的时间发育,并产生大量分叉裂隙,这些分叉裂隙在岩石中沿放射状方向发展并逐渐互相贯通,造成岩石内部结构严重弱化,使宏观主控破裂面的矿物粒子间的粘结、咬合能力降低及破裂面的摩擦力下降,进而造成宏观主控破裂面断口处出现破碎小块体,并从破裂面间隙剥落。

结合声发射特征可知:倾角为 $30^\circ, 45^\circ$ 裂隙岩石的累计振铃计数整体上升趋势较倾角为 $60^\circ, 75^\circ$ 裂隙岩石大,岩石破坏时,产生裂隙的数目和贯通程度也较大,加剧了岩石的劣化,降低了岩石的强度.通过比较累计振铃计数第 2 级至第 3 级的斜率可知:通过裂隙尖端处裂隙的发育扩展剧烈程度推测岩石的破坏类型,进一步说明了声发射特征值在一定程度上可以反映出岩石的破坏情况.应力松弛过程中有活跃着声发射信号(图 10),即应力松弛过程中存在着裂隙的发育、扩展甚至贯通过程,而岩石失稳破坏的本质就是裂隙贯通导致,因此,应力松弛过程产生的裂隙贯通对岩石最终的失稳破坏有一定的影响。

综上可知:随着裂隙倾角的增大,岩石的破坏特征越来越接近完整岩石,但整体上裂隙均从裂隙尖端发育,沿着力的加载方向扩展、贯通至岩石端部,形成穿过裂隙两端的主裂隙,这是造成试样的失稳破坏的主要原因.声发射特征值可以作为一种有效的信息判断岩石的破坏情况,且应力松弛过程对岩石的失稳破坏也有着一定的影响。

4 结论

1) 裂隙岩石的峰值轴向应力比完整岩石的低,且随着倾角的增大,峰值轴向应力也随之增大.应力松弛过程可分为快速松弛阶段,应力快速跌落;慢速松弛阶段,应力随时间增加而缓慢减小,最终趋于某一恒定值。

2) 完整岩石和裂隙岩石的应力松弛度和初始应力松弛速率均随着应变的增大总体呈先增大后减小的趋势,且均在 $100\% \epsilon_{1, \max}$ 处出现最大值;在此处,裂隙岩石的初始应力松弛速率均大于完整岩石,且峰后初始应力松弛速率均大于峰前.此外,裂隙岩石在屈服阶段至峰值处,裂隙发育较为剧烈。

3) 完整岩石和裂隙岩石的声发射事件均呈簇状分布,且主要集中在加载段和应力快速松弛阶段.裂隙岩石在各级应变等级下的累计振铃计数均显著高于完整岩石,不同裂隙倾角岩石的累计振铃计数从第 2 级之后开始存在差异,特别是第 2 级至第 3 级应变等级之间,曲线斜率变化显著。

4) 裂隙岩石的破坏模式为张拉剪切型复合破坏,完整岩石的破坏模式为剪切破坏.随着裂隙倾角的增大,裂隙岩石的破坏特征越来越接近完整岩石.声发射特征值可以作为一种有效的信息判断岩石的破坏情况,应力松弛过程对岩石的失稳破坏也有着一定的影响。

参考文献:

- [1] 郑欣平. 金川二矿区深部岩石蠕变与松弛特性研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [2] 王襄禹,柏建彪,陈勇,等. 深井巷道围岩应力松弛效应与控制技术[J]. 煤炭学报,2010,35(7):1072-1077. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2010.07.007.
- [3] 唐礼忠,潘长良. 岩石在峰值荷载变形条件下的松弛试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(6):940-942. DOI:10.16285/j.rsm.2003.06.015.
- [4] TIAN Hongming, CHEN Weizhong, YANG Diansen, *et al.* Relaxation behavior of argillaceous sandstone under high confining pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88: 151-156. DOI:10.1016/j.ijrmms.2016.07.016.
- [5] 熊良宵,杨林德,张尧. 绿片岩多轴受压应力松弛试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(8):1158-1165.
- [6] ADOKO A C, VALLEJOS J, TRUEMAN R. Stability assessment of underground mine stopes subjected to stress relaxation[J]. Mining Technology, 2020, 129(1): 30-39. DOI:10.1080/25726668.2020.1721995.
- [7] 于怀昌,李亚丽,刘汉东. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛本构模型研究[J]. 煤炭学报,2011,36(8):1258-1263. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.08.016.
- [8] 于怀昌,李亚丽,刘汉东. 粉砂质泥岩常规力学、蠕变以及应力松弛特性的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):60-70. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.01.008.
- [9] 于怀昌,董金玉,刘汉东,等. 粉砂质泥岩峰前、峰后应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):2663-2672. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.1538.
- [10] 刘志勇,肖明砾,谢红强,等. 基于损伤演化的片岩应力松弛特性[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):101-107. DOI:10.16285/j.rsm.2016.S1.013.
- [11] YANG Haiqing, LIU Junfeng, ZHOU Xiaoping. Effects of the loading and unloading conditions on the stress relaxation behavior of pre-cracked granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1157-1169. DOI:10.1007/s00603-016-1161-3.
- [12] ZHU Yaoliang, YU Jin, ZHOU Xiaoqi, *et al.* Uniaxial stress relaxation behavior of marble after cyclic disturbance loads [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2021, 25(4): 513-537. DOI:10.1007/s11043-020-09458-w.
- [13] YU Jin, ZHU Yaoliang, YAO Wei, *et al.* Stress relaxation behavior of marble under cyclic weak disturbance and confining pressures[J]. Measurement, 2021, 182: 109777. DOI:10.1016/j.measurement.2021.109777.
- [14] 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. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.12.003.
- [15] 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.
- [16] 易婷,唐建新,王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. 地下空间与工程报,2021,17(1):98-106,134.
- [17] 陈宇龙,魏作安,许江,等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(增刊2):237-240. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2011.s2.005.
- [18] WANG Guiling, ZHANG Liang, WANG Zhen, *et al.* Acoustic-mechanical responses of intact and flaw-contained rock deformation under uniaxial compression: A comparison[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-12. DOI:10.1155/2019/7940923.
- [19] 杨淑碧,徐进,董孝璧. 红层地区砂泥岩互层状斜坡岩体流变特性研究[J]. 地质灾害与环境保护,1996(2):12-24.
- [20] 王宇,李建林,左亚,等. 不同卸荷路径下贯通裂隙岩体流变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2900-2908. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.0542.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)