

## 综合技术

## 花岗斑岩破坏过程声发射及应力特性研究

Study of Acoustic Emission and Stress Characteristics in Granite-Porphry Failure Process

宫长亮<sup>1</sup>, 安晶<sup>2,3</sup>, 孙健<sup>1</sup>, 陈小伟<sup>2,3</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 张少杰<sup>2</sup>, 张建立<sup>1</sup>,  
谢盛青<sup>2</sup>, 巨有<sup>3</sup>

(1. 鞍钢集团矿业有限公司大孤山分公司, 辽宁 鞍山 114046; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 3. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:**采用声发射手段对某铁矿区花岗斑岩围岩的三轴压缩过程进行监测,获得岩样破坏过程的声发射特性。通过绘制花岗斑岩应力圆拟合摩尔包线,求得试样黏聚力为 18.68 MPa,内摩擦角为 54.268°。分析不同围压下花岗斑岩三轴压缩的应力-应变曲线以及相应声发射能量、事件数、累积事件数变化特征曲线,发现裂隙初始应力和裂隙贯通应力分别对应声发射能量和事件数变化特征的第一个与第二个峰值,峰值应力则对应着声发射信号变化特征最高峰。绘制特征应力强度拟合线,发现裂隙初始应力受围压影响小,裂隙贯通应力受围压影响大。研究得到力学特性和声发射参数与岩石破裂之间的关系,可以为矿山开采和以花岗岩为围岩的工程等研究提供参考。

**关键词:**花岗斑岩; 声发射; 三轴压缩**中图分类号:** TD167 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0062-07

**Abstract:** The acoustic emission (AE) technique was used to monitor the triaxial compression process of granite porphyry rock in an iron ore district, and the AE characteristics of the failure process of rock samples were obtained. The Mohr's envelope was fitted by drawing the stress circle of granite-porphry, and the cohesion of the sample was 18.68 MPa, and the internal friction angle was 54.268°. By analyzing the stress-strain curves of granite porphyry under triaxial compression under different confining pressures and the characteristic curves of acoustic emission energy, event number and cumulative event number, it was found that the initial stress and the fracture breakthrough stress correspond to the first and second peak values of acoustic emission energy and event number. And the peak stress corresponds to the highest peak value of acoustic emission signal. Drawing the fitting line of characteristic stress intensity, it was found that the initial stress of fracture was less affected by confining pressure, and the fracture transfixion stress was greatly affected by confining pressure. The relationship between mechanical properties and AE parameters and rock fracture was obtained, which can provide reference for mining and engineering research with granite as surrounding rock.

**Key words:** granite porphyry; acoustic emission (AE); triaxial compression

## 1 前言

花岗斑岩作为某露天铁矿的主要围岩之一,其强度特征对露天矿穿孔、爆破的开采工序、边坡治理以及露天转地下开采等均有着重要影响,研究其力学特性和破裂规律有助于提高凿岩效率,保障生产安全,为地下采场的设计和爆破参数优化等提供必要的参考资料。

花岗斑岩作为大陆的标志岩石,其形成与演化过

程通常伴随成矿元素的活化、迁移与富集,大规模岩浆活动必然导致巨量的金属成矿元素堆积<sup>[1]</sup>,在矿业工程相关领域有许多学者对花岗岩的物理力学性质进行了研究。乔趁<sup>[2]</sup>等对西北部某露天矿花岗岩预制裂隙后进行不同冻结温度下的冻胀力监测试验,为矿区裂隙岩体相关计算提供借鉴。杨小彬等<sup>[3]</sup>模拟矿山硐室开挖与支护过程中岩石反复加卸载的过程,对花岗岩开展单轴循环加卸载实验,探究声发射特征与非均匀变形的关系。张艳博等<sup>[4]</sup>通过室内试验与数值模拟手段,研究可见光图像、声发射、远红外三者与花岗岩巷道岩爆的联系,建立多长联合岩爆监测预警方法。

不止局限于矿业领域,花岗斑岩作为常见的脆

[作者简介] 宫长亮(1986—),男,高级工程师,主要从事露天矿山生产技术及管理方面的工作。

[引用格式] 宫长亮,安晶,孙健,等. 花岗斑岩破坏过程声发射及应力特性研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(3):62-68.

性较强的岩石,因具有强度高、抗变形能力强、渗透性低等特点,被世界各国广泛应用于各类高放射性废物处置工程防护<sup>[5]</sup>,许多学者针对放射性废物处置库的特点对花岗岩的性质进行研究。邓申缘<sup>[6]</sup>等结合 CT 扫描技术对高温热处理后的花岗岩开展了气体渗透率试验,探究高温对花岗岩结构及渗透性能的影响。田文玲<sup>[7]</sup>等使用颗粒流程序开展高温作用后花岗岩的三轴压缩模拟,探究其作为高温核废料库的围岩在高温高压下的损伤破裂机制。王传乐等<sup>[8]</sup>对甘肃北山深部花岗岩破裂过程中的强度参数演化和能量耗散规律进行研究,从能量耗散的角度分析了岩石破坏机制与过程。此外,花岗岩在边坡地质灾害、深部工程开挖扰动、脆性岩石劈裂机制、热储层建造等工程实践与理论研究中也占有重要地位<sup>[9-12]</sup>。可见,对花岗岩开展三轴压缩破坏过程的声发射特性研究,进一步加深对花岗岩破坏机制及相关规律的认识,可以为脆性岩石破坏的理论研究和许多工程实际起到一定的参考作用。

声发射技术能够定量地描述岩石在受荷变性过程中内部微裂纹扩展演化规律,其结果在一定程度上代表了岩石破裂过程中的能量释放和耗散程度<sup>[13]</sup>。国内外许多学者都对岩石压缩破坏过程中的声发射特征进行了研究。M. Nicsiar 等<sup>[14]</sup>研究了声发射技术确定岩石特征应力的方法,提出通过声发射特征可以确定岩石压缩过程中三个不同阶段。杨成祥等<sup>[15]</sup>对三种不同蚀变岩进行三轴加载试验与声发射监测试验,分析了各岩石的变形及微观破坏机制等的不同。张艳博等<sup>[16]</sup>对花岗岩的声发射特征进行研究,发现花岗岩破裂过程中高能量横、纵波声发射信号均表现出低频高幅值特征。刘俊岭等<sup>[17]</sup>利用横波、纵波两种传感器开展花岗岩剪切破坏的声发射监测试验,进一步完善岩石破裂的声发射信号特征认识。任恒等<sup>[18]</sup>对砂岩开展一系列力学特性试验,建立并验证了不同破坏模式下声发射幅值与应变的耦合关系。以上研究对于认识岩石损伤过程中应力、应变与声发射特征之间的关系具有重要意义,也充分证明了利用声发射特征来辅助分析岩石损伤情况具有一定的理论与实践意义。

在矿山深部开采或地下硐室的施工过程中,处于初始应力状态的花岗岩岩体均三向受力,其强度和变形对工程有非常大的影响<sup>[19]</sup>,因此,本文以取

自某铁矿的花岗斑岩作为研究对象,开展三轴压缩试验,对不同围压下花岗斑岩破坏过程的声发射特征及应力变化进行研究,掌握花岗斑岩在三轴压缩破坏过程中应力-应变特性以及其与声发射特征之间的规律。有助于更好地判断地下工程施工过程中花岗斑岩岩体的状态,并为工程的施工设计和数值模拟研究提供岩石力学特性的基础参数。

## 2 试验设备及试验过程

花岗斑岩试样由某铁矿现场钻孔取芯获得,现场取回的岩芯加工后制成直径 50 mm,高 100 mm 的标准试样,试样如图 1 所示,其平行度、平直度和垂直度均符合规范要求。



图1 花岗斑岩试样

声发射监测系统采用美国物理声学公司(PAC)的声发射装置以及配套的 AEwin 数据收集处理软件,配合 6 个声发射信号采集探头同时采集信号,具体如图 2 所示。为了降低环境噪声的干扰,根据现场测试结果,将声发射采样阈值设置为 40 dB,接收频率设置为 1 MHz。



图2 声发射设备及调试过程

试验加载系统采用北京科技大学所属的金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室拥有的 TAW-2000 型微机控制电液伺服岩石三轴试验机,具体如图 3 所示。结合矿区实测地应力结果,最大水平应力为 27 MPa,围压设置 10 MPa、20 MPa、30 MPa 三种,加载方式选用轴向变形控制,当预加载的预紧力已达到设置值 1 kN 后,控制油压以 1 MPa/s 施加围压至设定值后保持不变,再以 0.001 mm/s 的轴向变

形速度控制轴压进行加载。

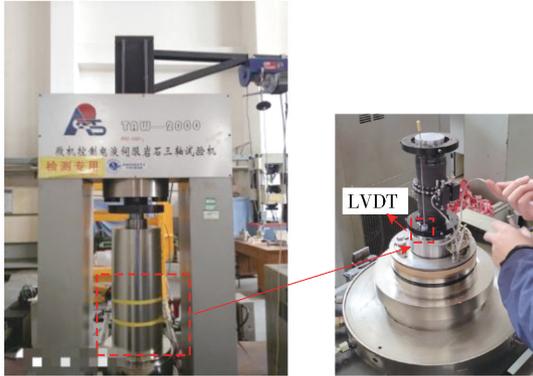


图3 TAW-2000型岩石三轴应力试验机

试验时,声发射探头涂抹专用耦合剂后用胶带固定到液压油缸的四周,确保传感器可以有效接收声发射信号,监测岩石受力变形破坏过程的声发射参数特征,并且保持加载过程与声发射监测过程在时间上的同步,以等时间间隔读取采集的声发射参数。对岩样进行三轴压缩,直至其破坏,过程中计算机实时记录应力、应变数据,并实时绘制试验曲线。

### 3 试验结果及数据分析

#### 3.1 花岗斑岩应力-应变曲线分析

试验中,轴向破坏应力计算公式为

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$ ——轴向破坏应力,MPa;

$P_{\max}$ ——岩石试件最大破坏载荷,kN;

$A$ ——试件受压面积, $\text{mm}^2$ 。

根据式(1)可以求得不同围压下花岗斑岩的抗压强度,整理数据见表1,花岗斑岩的三轴压缩应力-应变曲线如图4所示。

表1 花岗斑岩三轴压缩试验数据记录表

试件编号	直径 $D/\text{mm}$	高度 $H/\text{mm}$	围压 $\sigma_3/\text{MPa}$	破坏载荷 $P_{\max}/\text{kN}$	抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$
B-1	48.90	100.33	10	104.48	196.22
B-2	48.90	100.42	20	134.76	253.09
B-3	48.92	100.55	30	214.25	402.71

由图4可知该铁矿所取的花岗斑岩并非典型的脆性岩石。在三轴压缩应力-应变曲线中,岩样的压密阶段占比很小,弹性阶段明显且占比很大,几乎没有塑性阶段。当岩样达到峰值强度后体现出了一

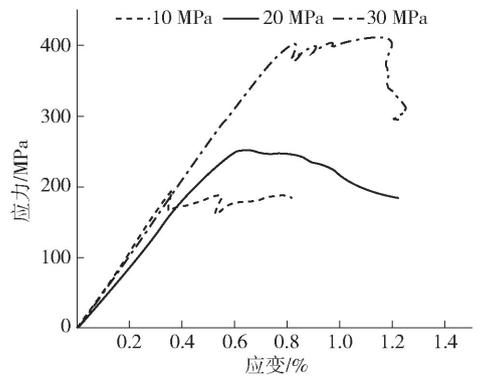


图4 花岗斑岩三轴压缩应力-应变曲线

定的流变性质,围压为10 MPa与30 MPa时,应力-应变曲线在峰后一段内呈小幅波动但大体趋于水平,说明岩样内部产生了蠕变。围压为20 MPa时峰后曲线却又与此不同,随着应变的增大应力水平缓慢降低,未出现明显曲折。由应力-应变曲线还可以发现不同的围压对岩样的抗压强度有较大影响,随着围压增大花岗斑岩的抗压强度也越大,相较于围压为10 MPa时的抗压强度,20 MPa有小幅提升,围压30 MPa时抗压强度则远高于其他围压条件下的强度。

结合花岗斑岩表面节理错综复杂,分析认为花岗斑岩中存在许多原生微裂隙,三轴压缩过程中,在围压的作用下部分微裂隙先被填充闭合,所以开始施加轴向荷载后,压密阶段过程较短。轴向压力不断增大,裂隙沿着原生节理与微裂隙发展,直至试样破坏后,径向荷载的限制导致试样不会迅速地彻底碎裂散开,岩石碎块相互交错使支撑试样仍然具有较为稳定的承载能力,但轴压作用使轴向应变不断增大,从而体现出一定的蠕变特性。

根据图4花岗斑岩不同围压条件下应力-应变曲线计算可得其弹性模量,不同围压条件下花岗斑岩弹性模量如图5所示。发现围压与弹性模量之间的关系并不呈简单的正相关,围压10 MPa时弹性模量达到峰值,然后随着围压的增大,弹性模量先减小,再增加,趋势与二次函数关系类似。

Mohr-Coulomb准则认为岩石破坏为正应力作用下的剪切破坏,它不仅与剪切面上的剪应力有关,还与该面上的正应力相关,岩石会沿着正应力与剪应力最不利组合的面上发生破坏,其表达式为

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: $\tau$ ——剪应力,MPa;

$\sigma$ ——正应力,MPa;

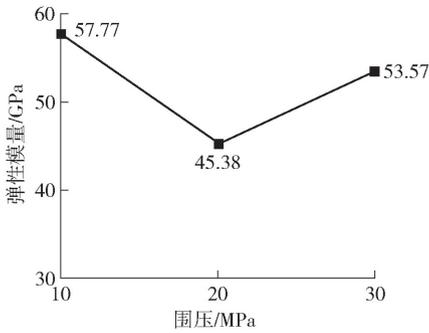


图5 花岗岩不同围压条件下弹性模量

$C$ ——黏聚力, MPa;  
 $\varphi$ ——内摩擦角, ( $^{\circ}$ )。

在三向应力状态下材料破坏时的应力圆称为极限应力圆, 根据最大主应力  $\sigma_1$  与最小主应力  $\sigma_3$  可以做出岩石在不同围压下破坏过程中的极限应力圆, 一系列极限应力圆的公切线为材料破坏的临界线, 即摩尔包络线, 通常认为硬岩破坏的摩尔包线呈直线。

绘制花岗岩在各围压条件下破坏的极限应力圆以及摩尔包络线如图6所示。

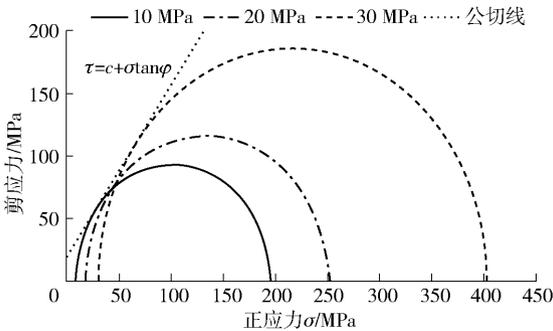


图6 花岗岩极限应力圆与摩尔包线

得到摩尔包线, 其在  $\tau$  轴上的截距为 18.68, 斜率为 1.39, 则黏聚力为 18.68 MPa,  $\tan \varphi$  值为 1.39, 内摩擦角为  $54.268^{\circ}$ 。

$$\tau = 18.68 + 1.39\sigma \quad (3)$$

### 3.2 花岗岩声发射特征

图7至图14给出不同围压下花岗岩的声发射能量、事件数以及累计事件数与应力-应变曲线变化规律图。在试样压缩破坏的过程中, 声发射特征参数包括能量与事件数等不断发生变化, 结合声发射特征参数以及其与应力、应变之间的关系可以判断<sup>[20]</sup>: 随岩石破坏过程可以准确判断岩石裂隙初始应力水平 ( $\sigma_{ci}$ ) 对应着声发射特征参数的第一个明显峰值点, 它也标志着标志着体积应变曲线偏离

线性; 随着应力不断增加, 声发射活动剧烈增加, 累积声发射事件数曲线斜率明显增大且发生突变的点即为裂隙损伤应力水平 ( $\sigma_{ed}$ ), 它也对应着声发射特征参数第二个明显峰值点。

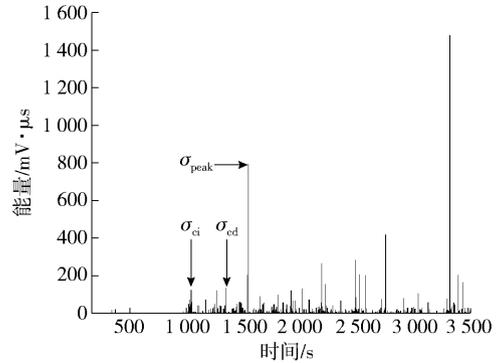


图7 花岗岩声发射能量变化特征 ( $\sigma_3 = 10$  MPa)

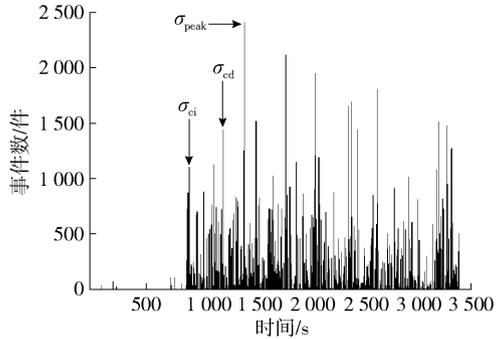


图8 花岗岩声发射事件数变化特征 ( $\sigma_3 = 10$  MPa)

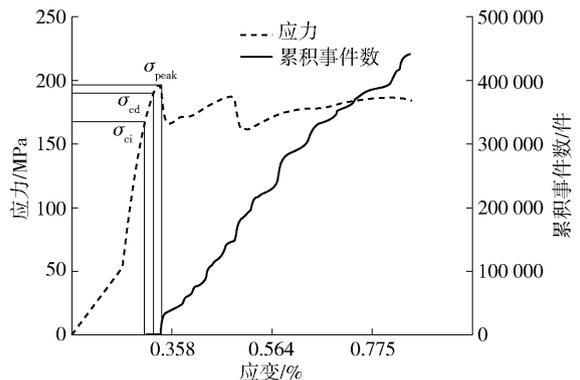


图9 花岗岩应力-应变曲线及累积声发射事件数变化规律 ( $\sigma_3 = 10$  MPa)

围压 10 MPa 时应力-应变曲线压密阶段与弹性阶段对应的声发射能量变化特征与事件数变化特征均无明显信号产生, 具体如图7、图8、图9所示。峰后曲线出现两次较大的波折, 但总体来看应力在一定水平内波动, 声发射能量变化特征信号较为密集, 累积事件数曲线呈稳定趋势上升的同时斜率不断变

化,说明岩样峰后内部剧烈活动持续进行,内部微裂纹不断发育两次汇聚成宏观裂隙,导致应力-应变曲线出现两次波动,裂隙被压紧后碎块相互交错,在摩擦力的作用下承载能力小幅度提升。

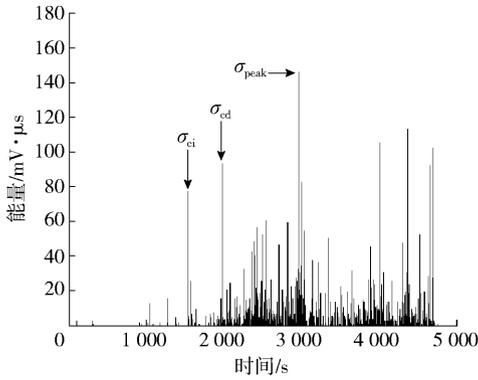


图 10 花岗斑岩声发射能量变化特征 ( $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ )

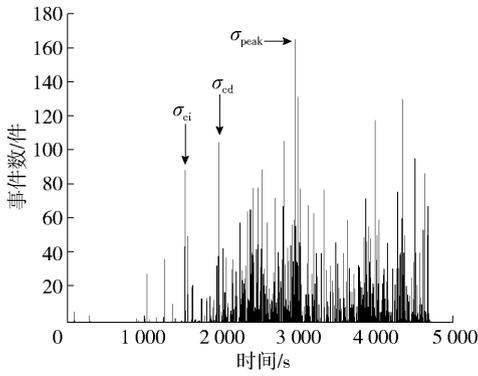


图 11 花岗斑岩声发射事件数变化特征 ( $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ )

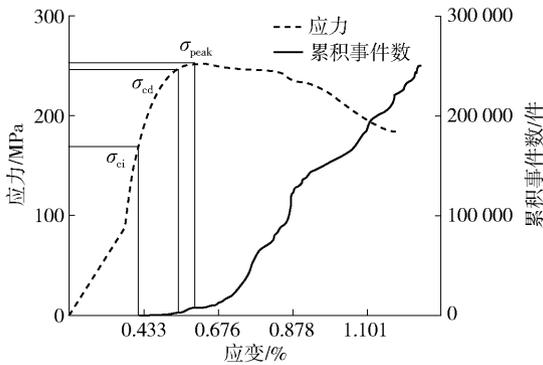


图 12 花岗斑岩应力-应变曲线及累积声发射事件数变化规律 ( $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ )

围压 20 MPa 的三轴加载过程中,裂隙初始应力水平之前声发射能量变化特征和事件数变化特征出现两次小信号,而应力-应变曲线与其他两组实验相比没有特殊变化,推测可能是机器噪声干扰。应力-应变曲线在峰后缓慢跌落,形成先快后慢的两

段,而声发射累计事件数曲线呈现出斜率先大后小的两段,能量变化特征也体现出先疏后密、峰值先低后高的特性。推测可能是在峰后的前半部分试样内部活动造成的损伤相较于后半部分更小,此阶段积蓄了大量能量,后半部分能量快速释放,试样承载能力下降速度增大,声发射能量变化特征也更明显,具体如图 10、图 11、图 12 所示。

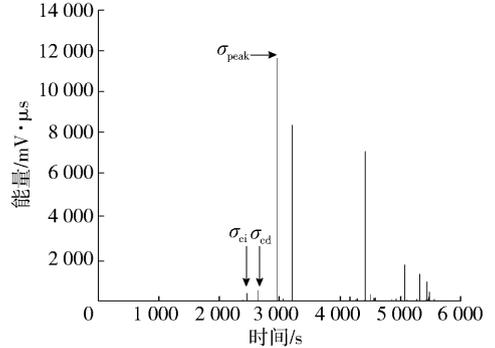


图 13 花岗斑岩声发射能量变化特征 ( $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$ )

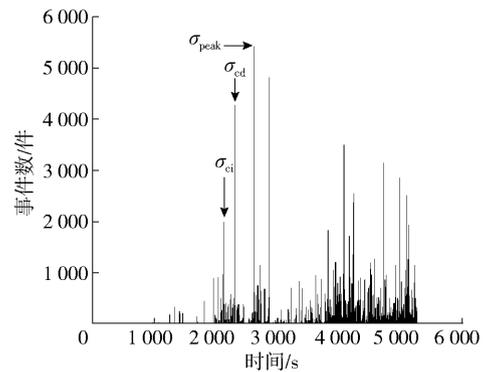


图 14 花岗斑岩声发射事件数变化特征 ( $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$ )

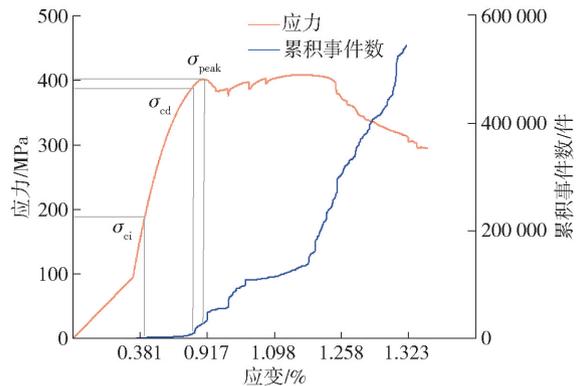


图 15 花岗斑岩应力-应变曲线及累积声发射事件数变化规律 ( $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$ )

围压 30 MPa 时,峰后曲线先出现小幅度的波折又变得平缓,整体呈现应力几乎不变应变增大的状

态,蠕变性质较为明显。相对应的累计声发射事件数曲线先呈现阶梯式上升,后以较小的斜率平缓上上,此阶段能量变化特征也十分微弱,说明在峰后蠕变阶段岩样内部裂隙发育先出现几次相对强烈活动,又以缓慢的速度持续进行。在此之后应力-应变曲线突然大幅跌落,累计声发射活动数曲线斜率剧增,声发射能量特征出现明显信号,说明岩样内部活动剧烈,被裂隙彻底贯穿破坏,具体如图 13、图 14、图 15 所示。

结合图 8、图 11、图 14 声发射事件数变化特征可以发现,  $\sigma_{ci}$  和  $\sigma_{cd}$  均对应着声发射事件数较多的瞬间,说明声发射事件数伴随着岩石内部裂隙的突然发展变化而出现高峰,在峰值应力  $\sigma_{peak}$  附近时岩体内部裂隙发展更为剧烈,宏观结构遭到破坏,此时声发射事件数也达到峰值,岩石内部积蓄的能量大量释放,声发射能量变化特征参数也会出现相应峰值。因此,利用声发射特征参数结合岩石试样压缩过程的应力-应变曲线可以较为准确的分析得到岩石破坏过程中的特征应力。

由岩石压缩过程中的应力-应变曲线及声发射测试获得的声发射特征参数图可知,试验所用花岗斑岩试样的压缩破坏特征虽然不完全与脆性硬岩相吻合,但基本符合岩石压缩破坏的几个经典阶段:

(1) 在压密阶段,应力-应变曲线斜率变化小,声发射信号稀疏,事件数与能量均几乎为 0,说明岩石内部活动十分微弱,压密程度小。

(2) 弹性变形阶段是轴向应力达到峰值前的主要阶段,应力与应变之间呈线性相关,曲线平滑,声发射信号出现两个对应特征应力  $\sigma_{ci}$  和  $\sigma_{cd}$  的峰值,其余部分信号不断波动,说明岩石内部裂隙逐渐发育。只有图 10、图 11 声发射特征信号在  $\sigma_{ci}$  应力水平之前出现部分异常峰值,推测可能是设备运行过程中的噪声导致。

(3) 塑性及破坏阶段,声发射信号事件数与能量的振幅波动强烈,累积事件数曲线斜率大幅增高,当应力水平达到破坏应力  $\sigma_{peak}$  时声发射信号也达到全程最高峰,岩石内部活动最为剧烈,宏观结构被破坏。

(4) 峰后阶段,应力-应变曲线出现了一些延性行为,应力变化较小的情况下应变不断增大,声发射信号呈现密集而强烈的特性。说明岩石宏观结构破坏后内部碎块相互挤压摩擦,仍然具有较高的承载能力,声发射信号也因为摩擦以及微小碎屑掉落

产生的噪声而变化特征密集。

### 3.3 花岗斑岩特征应力分析

根据花岗斑岩的声发射特征及应力-应变曲线分析取得的特征应力数据,具体见表 2。

表 2 花岗斑岩特征应力表

试件 编号	围压 $\sigma_3$ / MPa	抗压 强度 $\sigma_c$ /MPa	裂隙初始 应力 $\sigma_{ci}$ /MPa	$\sigma_{ci}/\sigma_c$ /%	裂隙贯通 应力 $\sigma_{cd}$ /MPa	$\sigma_{cd}/\sigma_c$ / %
B-1	10	196.22	162.87	83.00	189.70	96.68
B-2	20	253.09	176.90	69.90	245.92	97.17
B-3	30	402.71	198.66	49.33	390.37	96.94

绘制不同围压下花岗斑岩特征应力散点图并进行线性拟合如图 16 所示。

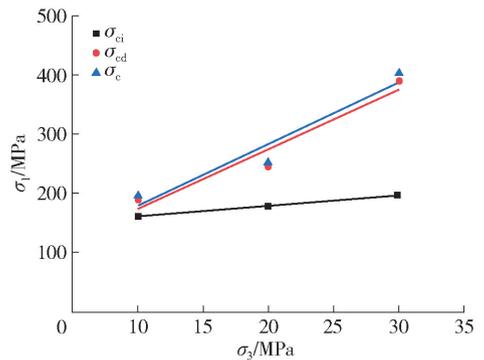


图 16 不同围压下花岗斑岩特征应力图

花岗斑岩初始应力水平的强度拟合线公式为

$$\sigma_{ci} = 143.68667 + 1.7895\sigma_3 \quad (4)$$

花岗斑岩裂隙贯通应力水平的强度拟合线公式为

$$\sigma_{cd} = 74.66 + 10.0335\sigma_3 \quad (5)$$

花岗斑岩压缩破坏应力水平的强度拟合线公式为

$$\sigma_c = 77.51667 + 10.3245\sigma_3 \quad (6)$$

结合图 16 与拟合式(4)、(5)、(6),对比不同围压下压缩过程中特征应力与抗压强度即峰值应力的比值可以发现,裂隙初始应力为峰值应力的 49.33% ~ 83%,随着围压的增大其与峰值应力的比值逐渐减小,拟合线的斜率较小,说明在压缩过程中围压越高抗压强度虽然增大,但是裂隙初始应力并不依赖于围压的变化。裂隙贯通应力为峰值应力的 96.44% ~ 97.17%,其较为接近峰值应力且与峰值应力的比值稳定,拟合线的斜率较大并且与破坏强度的拟合线趋势相近,说明裂隙贯通应力受围压影响很大,试样均在应力即将达到峰值前才会发生裂隙贯通,这为将来深部以花岗岩为围岩的矿体开采

提供参考。

## 4 结 论

通过上述研究分析,本文得出如下结论:

(1) 试验所取花岗斑岩试样破坏特性并非典型脆性硬岩,在三轴压缩过程中应力-应变曲线的压密阶段占比较小,峰后阶段具有一定的流变性质,10 MPa与30 MPa围压下峰后阶段呈现的蠕变特性相对更明显。

(2) 绘制花岗斑岩在各围压条件下破坏的极限应力圆,拟合出其摩尔包络线,求得岩样的黏聚力为18.68 MPa,内摩擦角为54.268°。

(3) 花岗斑岩压缩破坏过程的声发射特性以及应力-应变曲线基本符合岩石压缩的经典阶段,声发射信号变化明显的地方一般象征着岩石内部活动较为剧烈。裂隙初始应力水平对应着声发射能量与事件数变化特征第一个峰值,裂隙贯通应力水平对应着声发射能量与事件数变化特征第二个峰值,峰值应力附近声发射能量与事件数变化特征均达到最高峰,峰后阶段岩石内部活动持续不断进行,声发射信号变化特征明显。

(4) 花岗斑岩的裂隙初始应力为峰值应力的49.33%~83%,裂隙贯通应力为峰值应力的96.44%~97.17%,通过裂隙初始强度、贯通强度与破坏强度拟合线,发现裂隙初始应力受围压影响小,裂隙贯通应力受围压影响大。

### [参考文献]

- [1] 翟明国,张旗,陈国能,等. 大陆演化与花岗岩研究的变革[J]. 科学通报, 2016, 61(13): 1414-1420.
- [2] 乔趁,王宇,宋正阳,等. 饱水裂隙花岗岩周期冻胀力演化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2141-2150.
- [3] 杨小彬,韩心星,刘恩来,等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2732-2739.
- [4] 张艳博,刘祥鑫,梁正召,等. 基于多物理场参数变化的花岗岩巷道岩爆前兆模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1347-1357.
- [5] 王驹,陈伟明,苏锐,等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(4): 801-812.
- [6] 邓申缘,姜清辉,商开卫,等. 高温对花岗岩微结构及渗透性演化机制影响分析[J]. 岩土力学, 2021,

42(6): 1601-1611.

- [7] 田文岭,杨圣奇,黄彦华,等. 花岗岩高温高压损伤破裂微观机制模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1810-1819.
- [8] 王传乐,杜广印,李二兵,等. 北山深部花岗岩常规三轴压缩条件下的强度参数演化及能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2238-2248.
- [9] 周泽华,吕艳,苏生瑞,等. 花岗岩质边坡地震动力响应及破坏特征大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 918-931.
- [10] 张希巍,王刚,蔡明,等. 凌海花岗岩变形特点与脆性评价[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3515-3524.
- [11] 任义,高永涛,吴顺川,等. 花岗岩巴西劈裂试验的矩张量反演研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 235-245.
- [12] 贾蓬,杨其要,刘冬桥,等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1568-1578.
- [13] 乔兰,王旭,李远. 深部花岗闪长岩破坏过程声发射及特征应力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2773-2778.
- [14] Nicksiar M, Martin C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 607-617.
- [15] 杨成祥,陈祥艳,周建华. 三山岛金矿深埋蚀变硬岩真三轴压缩下的力学性质[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(11): 1599-1606.
- [16] 张艳博,张行,梁鹏,等. 花岗岩破裂过程声发射横、纵波时频特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3554-3564.
- [17] 刘俊岭,李佳其,梁鹏,等. 花岗岩剪切破坏过程声发射横、纵波特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 429-440.
- [18] 任恒,朱永建,廖洪波,等. 岩石三轴卸载-单轴再加载声发射特性及破坏模式[J]. 矿业工程研究, 2022, 37(3): 7-12.
- [19] 金爱兵,刘佳伟,赵怡晴,等. 卸荷条件下花岗岩力学特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 459-467.
- [20] Cai M, Kaiser P K, Tasaka Y. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004(5): 41.