

# 带裂纹花岗岩试件三点弯变形演化及破裂机制

许海亮,任合欢,宋义敏

(北方工业大学 土木工程学院,北京 100144)

**摘要:**为建立岩石工程灾害精准预测预报体系,开展含预制裂纹花岗岩试件的三点弯试验,研究岩石试样变形演化及破裂机制。以声发射技术和数字散斑相关方法作为试验观测手段,通过矩张量反演方法研究岩石破裂类型。通过对岩石预制裂纹扩展长度及声发射振铃计数、能量和体积参数进行分析,研究岩石试件变形演化特征和破裂机制。研究结果表明:(1)三点弯岩石试样裂纹扩展具有明显的阶段性和不连续性,其过程为某次裂纹扩展-微裂纹静默积累-裂纹再次扩展;(2)预制裂纹扩展与不同破裂类型裂纹的声发射指标具有相关性。预制裂纹扩展时,张拉裂纹体积参数、能量和振铃计数随之出现;预制裂纹扩展前后,3种类型裂纹体积参数、能量和振铃计数随机产生;在预制裂纹长度保持稳定不变时,没有声发射信号产生;(3)裂纹扩展后到下一次裂纹扩展前,先是在贯通裂纹尖端附近随机出现各种破裂类型的裂纹,随着微裂纹的积累,贯通裂纹所主导的裂纹类型占比开始增加,直至产生新的贯通裂纹。

**关键词:**花岗岩;矩张量反演;三点弯试验;破裂机制;时空演化特征;数字散斑相关方法

中图分类号:TU45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2022)04-1199-09

## Deformation Evolution and Failure Mechanism of Three-Point Bending Granite Specimen with Cracks

Xu Hailiang, Ren Hehuan, Song Yimin

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, P. R. China)

**Abstract:** This article focuses on the deformation evolution and fracture mechanism by conducting three-point bending tests on granite specimen with cracks. The purpose is to establish an accurate prediction system for rock engineering disasters. Experimental observation methods are acoustic emission technology and digital image correlation method. The rock fracture type is calculated by the moment tensor inversion method. The article analyzed the corresponding relationship between the opening displacement rate and the expansion rate of the rock prefabricated crack tip and the acoustic emission ringing count, energy and volume parameters of the seismic source. The results show that: (1) For the rock with prefabricated cracks, during the loading process, its crack propagation is a discontinuous process. When a crack propagates, the length of the crack remains unchanged for a certain period of time. As the loading progresses, when the deformation increases to a certain value, the crack continues to expand, and so on until the specimen is broken; (2) The pre-crack propagation is correlated with the acoustic emission indicators of different types of cracks. When the prefabricated crack propagates, the tension crack volume parameters, energy and ringing count appear; before and after the prefabricated crack propagates, the three types of crack volume parameters, energy and ringing count are randomly generated; when the prefabricated crack length remains stable, No acoustic emission signal is generated; (3) After the crack propagates and before the next crack

收稿日期:2021-02-11(修改稿)

作者简介:许海亮(1978—),男,河北易县人,博士,副教授,主要从事岩石力学实验研究工作。

E-mail:hailiang\_xu@126.com

通讯作者:宋义敏(1972—),男,辽宁丹东人,博士,教授,主要从事岩石力学实验及理论研究工作。

E-mail:ssyymmok@sina.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51774015,51474013)

propagates, the cracks of various crack types appear randomly near the tip of the penetrating crack. With the accumulation of microcracks, the proportion of crack types dominated by through cracks increases until new through cracks are generated.

**Keywords:** granite; moment tensor inversion; three point bending test rupture mechanism; spatiotemporal evolution characteristics; digital image correlation method

## 0 引言

岩石断裂是其内部的微裂隙萌生、扩展、贯通,直至出现宏观裂隙的过程,具有明显的时间特征<sup>[1-3]</sup>。此外,工程岩体大多含有节理、层理、裂隙和断层等,使得岩体断裂具有明显的空间特征。在岩石受力断裂过程中伴随有声发射现象,其中包含大量岩石破裂信息<sup>[4-5]</sup>。岩石断裂时空演化及破裂机制研究,是建立岩石工程灾害精准预测预报体系的基础。因此,采用声发射技术,开展岩石断裂震源时空演化特征试验研究具有重要理论和实践意义。

针对岩石断裂变形演化、声发射特征和破裂机制,国内外学者进行了大量的研究,得到了许多有价值的研究成果。在岩石变形演化方面,邓朝福等<sup>[6-7]</sup>对深部细粒英云闪长岩进行了三点弯试验,对岩样在三点弯各个阶段的 CMOD(切口张开位移)和振铃计数率演化规律进行了研究;王煜曦等<sup>[8]</sup>对不同断裂形式的砂岩进行蠕变分级剪切声发射试验,对不同断裂形式岩石在蠕变各个阶段的声发射能量和蠕变剪切位移演化规律进行研究;赵奎等<sup>[9]</sup>对 4 种粒径的类岩石材料试件,分别进行三点弯曲声发射试验,分析了 AE(声发射)累计事件数、累计撞击数及累计能量的比值  $r$  和荷载-位移曲线的演化规律;郝兵元等<sup>[10]</sup>基于声发射空间定位技术,开展石灰岩试样真三轴试验,对静态破碎过程中岩石样裂纹的起裂与扩展进行了研究;杨圣奇等<sup>[11]</sup>对预制裂隙红砂岩试样开展了单轴压缩试验,基于照相量测技术对试样裂纹演化进行研究,在此基础上分别对声发射特征与应力-时间曲线及岩石试样裂纹演化特征的对应关系进行了研究;张国凯等<sup>[12-13]</sup>通过裂隙花岗岩单轴压缩试验,根据应力-应变曲线、声发射多参量特征和摄像记录等多种手段,对花岗岩裂纹扩展特征及其相互变化进行了分析;孙雪等<sup>[14]</sup>对花岗岩试件进行了三轴压缩试验,对 AE 事件数量与岩石试件裂纹演化过程

的关系进行研究,并基于此建立了岩石损伤演化模型;熊飞等<sup>[15]</sup>开展了岩石单轴试验,分析了声发射事件数与试样裂纹演化的对应关系;周喻等<sup>[16]</sup>通过单侧限裂隙岩体试验研究,分析了其力学特性及板裂化过程中裂纹演化的细观机制;于利强等<sup>[17]</sup>通过单轴压缩声发射试验,研究了加载速率对裂隙砂岩力学性质的影响规律,认为声发射计数特征能够准确反映砂岩试样的破坏过程。在岩石断裂机制研究方面,纪洪广等<sup>[18-19]</sup>开展了混凝土三点弯曲试验,研究了声发射震源事件在空间上的演化规律与岩石断裂临界关系,认为声发射事件在空间分布上集中易造成结构失稳;Yang 等<sup>[20]</sup>对含两个不平行裂隙的红砂岩试件进行了单轴压缩试验,认为试样中的裂纹演化及声发射参数突增造成应力-时间曲线中的应力下降。虽然上述研究取得了许多成果,但对于声发射特征与岩石断裂演化过程中的裂纹破裂类型,还需要开展大量深入的试验研究工作。

本文采用花岗岩试件开展了岩石三点弯试验。通过 CCD(电荷耦合器件)相机采集岩石断裂过程中的图像,并通过数字散斑相关方法(DSCM)计算加载过程中岩石试件预制裂纹的扩展长度,研究岩石断裂时空演化特征;利用声发射技术构建岩石断裂过程中的物理信息监测系统,根据矩张量反演方法计算岩石变形破坏过程中的声发射指标,研究声发射指标的时空演化特征;在岩石断裂时空演化特征与声发射指标的时空演化特征基础上,对岩石断裂机制及前兆特征进行探讨。

## 1 矩张量反演分析方法

根据弹性波动力学理论,由于裂纹扩展,在  $x$  位置处  $t$  时刻产生的位移可表示为<sup>[21]</sup>:

$$u_i(x, t) = M_{jk} [G_{ij,k}(x, x_0, t)] * S(t) \quad (1)$$

式中:  $G_{ij,k}(x, x_0, t)$  为弹性动力学格林函数的空间导数;  $S(t)$  为震源时间函数并假设其是一个脉冲函数;  $M_{jk}$  为声发射源矩张量,是对声发射源力学性

质的描述。

Ohstu<sup>[22]</sup>引入脉冲函数而忽略时间函数  $S(t)$ , 得到半无限空间条件下 SiGMA 法简化的  $P$  波在声发射探头处的初到振幅  $A(x)$ :

$$A(x) = \frac{C_s Re(t, r)}{R} (r_1 \quad r_2 \quad r_3) \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $C_s$  为声发射传感器探头的校正系数;  $R$  为破裂点到检出点(探头)的距离;  $r_1, r_2, r_3$  表示破裂点到探头间的方向余弦;  $Re(t, r)$  为传感器反射系数, 可以表示为:

$$Re(t, r) = \frac{2k^2 a [k^2 - 2(1 - a^2)]}{[k^2 - 2(1 - a^2)]^2 + 4a(1 - a^2) \sqrt{k^2 - 1 + a^2}} \quad (3)$$

式中:  $k = v_p / v_s$ ,  $v_p$  为弹性纵波波速,  $v_s$  为横波波速;  $a = r \cdot t$ ;  $t$  为传感器方位矢量。特别地, 当信号波由垂直方向到达试样表面时,  $a = 1$ ,  $Re(t, r) = 2$ 。

矩张量为二阶张量, 矩张量反演需要至少 6 个有效  $P$  波初到振幅, 故本文选取了接收到 6 个及 6 个以上声发射信号的震源事件作为研究对象。

本文通过优势分类方法判断微裂纹类型:

$$\begin{aligned} m_1 / m_1 &= X + Y + Z \\ m_2 / m_1 &= 0 - 0.5Y + Z \\ m_3 / m_1 &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $X$  代表剪切部分占比,  $Y$  代表张拉偏量部分占比,  $Z$  代表静水拉应力部分占比。若  $X \leq 40\%$ , 判断为拉伸裂纹;  $X \geq 60\%$ , 判断为剪切型裂纹;  $40\% < X < 60\%$  则为混合型裂纹<sup>[23]</sup>。

Shigeishi 等<sup>[24]</sup>认为岩石损伤演化过程可以通过力矩张量的迹分量来估计, 并通过试验研究证明式(5)所得的岩石损伤可相对视为裂纹体积。

$$D_r = (m_1 + m_2 + m_3) / l_k n_k \quad (5)$$

式中:  $D_r$  为裂纹体积参数;  $m_1, m_2, m_3$  为矩张量的 3 个特征值;  $l_k$  为裂纹面的运动方向;  $n_k$  为裂纹面的法线方向。

声发射能量指标为声发射波形包络线下的面积。岩石不同破裂类型能量采用声发射能量指标, 结合震源的张拉、混合和剪切 3 种破裂类型, 计算得出张拉裂纹能量、混合裂纹能量和剪切裂纹能量。

## 2 试验

### 2.1 试验方法

采用三点弯加载方式开展预制裂纹岩石断裂时空演化特征试验研究。试验系统包括加载系统、图像采集系统和声发射系统 3 个部分。采用液压伺服试验机作为试验加载系统, 以位移控制方式进行加载, 加载速率为  $0.05 \text{ mm/min}$ 。试件散斑图像采集系统通过 CCD 相机搭建, 图像采集速率为 8 帧/s, 图像分辨率为  $1600 \text{ 像素} \times 1200 \text{ 像素}$ , 物面分辨率为  $0.079 \text{ mm/像素}$ 。采用美国物理声学公司生产的声发射系统采集加载全过程试件声发射信号。前置放大器增益设为  $40 \text{ dB}$ , 阈值值设为  $50 \text{ dB}$ , 采样率为  $3 \text{ MHz}$ , 试验系统示意图如图 1 所示。

采用尺寸为  $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的花岗岩作为带裂纹三点弯试验的试件。在岩石试件正中间部位置, 通过切割, 预制一条长  $\times$  宽为  $15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的裂缝。选取试件一侧为 CCD 相机图像采集面, 在预制裂纹左右  $30 \text{ mm}$  范围内, 采用喷射黑漆和白漆的方式制作表面人工散斑场。以散斑面所在的岩石面为前, 在前后左右 4 个面布设声发射探头, 试件与传感器之前通过凡士林进行耦合。试件尺寸、表面人工散斑场及声发射探头布置方式如图 2 所示, 声发射探头位置如表 1 所示。

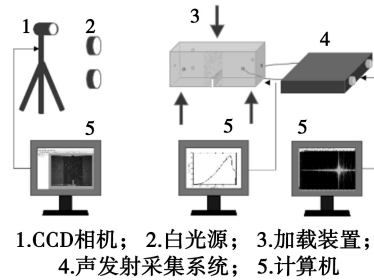


图 1 试验系统

Fig. 1 The test system

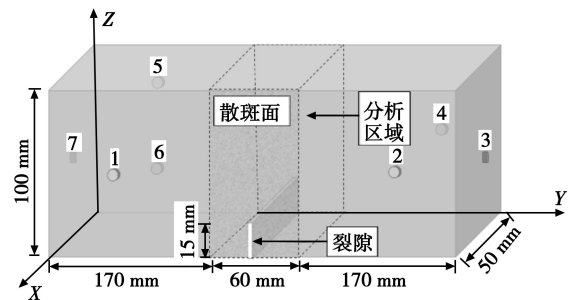


图 2 试件尺寸及探头布置

Fig. 2 Sample size and layout of sensors

表 1 声发射探头位置

Table 1 Acoustic emission probe position

序号	X 坐标/mm	Y 坐标/mm	Z 坐标/mm
1	50	50	50
2	50	350	50
3	25	400	50
4	0	350	50
5	0	50	75
6	0	50	25
7	25	0	50

2.2 试验过程及结果

首先,进行系统定时,使试验加载系统、数字散斑采集系统以及声发射采集系统的时间保持严格一致;然后,先启动 CCD 相机和声发射系统,CCD 相机采集试件表面散斑图像,声发射系统采集试件声发射信号,再开启加载系统,直到试件发生破坏,停止加载和数据采集;最后,将试验采集的数据进行分析。

试验过程加载应力-应变曲线如图 3 所示,根据变形场分析结果及加载曲线的特点,选取加载全过程中的 4 个典型时刻进行标识,各标识点对应的应

力值如图 3 所示,其中标识点 1~4 分别为 70 %峰值应变、80 %峰值应变、90 %峰值应变和峰值应变时刻。以试验开始时刻的散斑图像为参照图像计算 4 个标识点时刻的变形场(最大剪切应变场,下同);为与变形场对应,对声发射定位结果按标识点时刻进行结果显示。根据上述试验方法,共进行了 3 组试验,得到 89 364 张试件表面散斑图像,3 组声发射采集数据,图 4 为部分试验结果示意图。

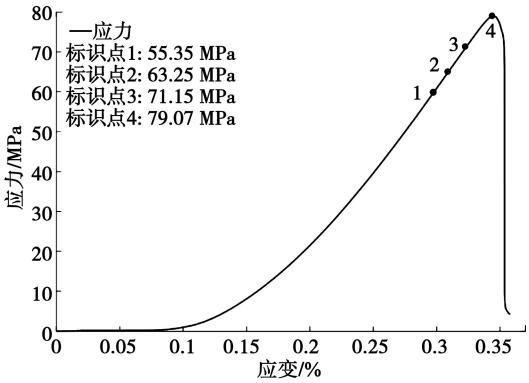


图 3 应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve

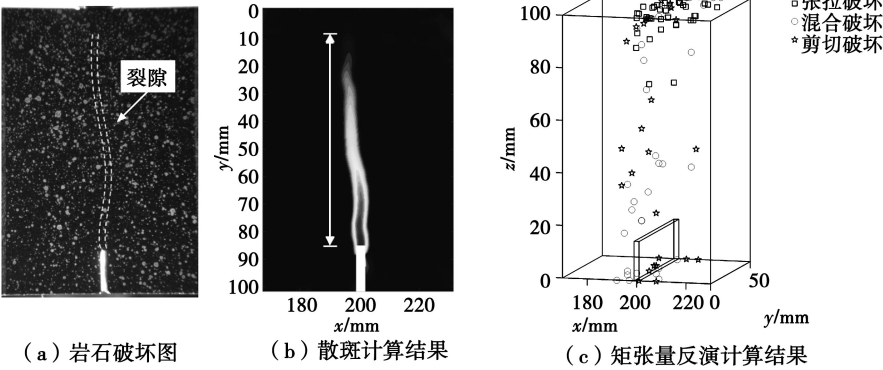


图 4 试验结果

Fig. 4 Experimental results

3 试验结果分析

3.1 岩石裂纹变形场演化特征分析

基于数字散斑相关方法,对预制裂纹扩展演化特征进行分析。以试验初始时刻采集到的数字散斑图像作为参考图像,计算试验加载全过程试件的剪切应变场,以变形局部化带长度表示裂纹扩展长度,如图 4(b)所示。

按照上述方法得到岩石试件裂纹扩展长度曲线图,如图 5 所示。在应变 0.280 时刻,处于应力曲线线性增长阶段,岩石试件预制裂纹首次发生裂

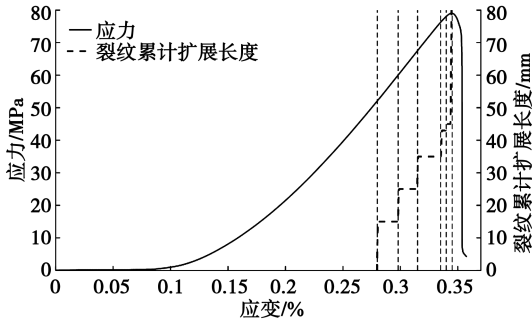


图 5 预制裂纹扩展长度曲线(标识点 4)

Fig. 5 Curves of crack growth length (point 4)



纹扩展,裂纹扩展长度为15 mm;随着应力的增加,先后在应变0.298、0.315、0.335、0.340时刻分别发生4次较为明显的裂纹扩展,裂纹扩展长度分别为25 mm、35 mm、43 mm、45 mm;在峰值时刻,裂纹扩展至岩石试件顶部,扩展长度为80 mm。裂纹扩展长度曲线表明,带裂纹岩石试件三点弯加载过程中,裂纹扩展具有明显的阶段性和不连续性,其过程为某次裂纹扩展-微裂纹静默积累-裂纹再次扩展,如此往复直至试件破坏。

### 3.2 岩石裂纹演化声发射特征演化分析

根据岩石加载过程中采集的声发射信息,采用矩张量反演计算方法,对岩石断裂声发射指标进行分析研究。

#### 3.2.1 岩石裂纹演化声发射振铃计数特征分析

图6为声发射振铃计数散点图。如图所示,在加载前期,试件应变快速增长,应力变化不大,没有接收到声发射振铃计数,试件处于均匀变形阶段;随着岩石试件加载,应力非线性增长,个别时刻出现声发射振铃计数,以张拉裂纹为主;在加载后期到峰值时刻,应力-应变曲线线性增长,声发射振铃计数逐渐密集,且有明显的不连续性,剪切裂纹出现,破裂类型仍以张拉裂纹为主;在峰值时刻,声发射振铃计数达到最大值,破裂类型为张拉裂纹;在峰后阶段,应力快速减小,声发射振铃计数依然密集,但数值逐渐减小。从声发射振铃计数来看,在加载前期,试件处于均匀变形阶段,没有产生声发射信号;随着试件的加载,试件产生少量声发射信号且以张拉裂纹为主;随着裂纹逐渐贯通扩展声发射振铃计数逐渐密集,呈现明显的阶段性特征,且在峰值时刻张拉裂纹振铃计数最大;峰后阶段裂纹继续扩展但发射振铃计数数值逐渐降低。

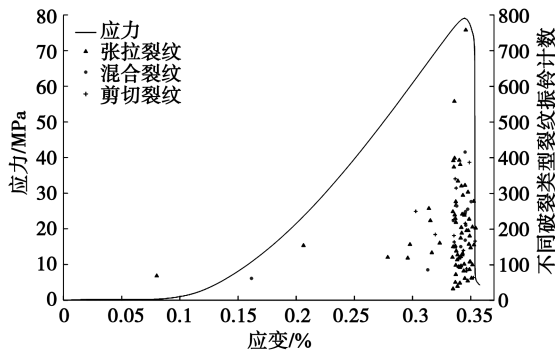


图6 声发射振铃计数散点图

Fig. 6 Scatter plot of acoustic emission count

#### 3.2.2 岩石裂纹断裂声发射能量特征分析

图7为声发射能量散点图。如图所示,在加载

前期,试件应变快速增长,应力变化不大,没有接收到声发射能量信号,试件处于均匀变形阶段;随着岩石试件加载,应力非线性增长,个别时刻产生声发射能量,以张拉裂纹为主;在加载后期到峰值时刻,应力-应变曲线线性增长,声发射能量产生密集,数值有所增大,且有明显的阶段性,剪切裂纹出现,但依旧以张拉裂纹为主;在峰后阶段,声发射能量密集,但数值逐渐减小。从声发射能量来看,在加载前期,由于试件处于均匀变形阶段,所以没有产生声发射信号;随着试件的加载,试件产生少量声发射信号且震源裂纹以张拉破裂为主;随着裂纹逐渐扩展贯通,声发射能量的出现逐渐密集,呈现明显的阶段性特征,且在峰值时刻张拉裂纹能量数值最大;在峰后裂纹继续扩展但声发射能量数值逐渐降低。

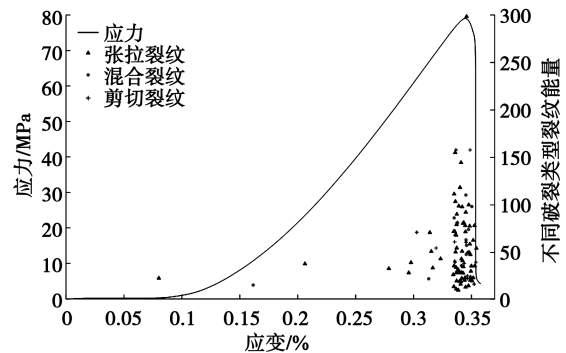


图7 声发射能量散点图

Fig. 7 Scatter plot of acoustic emission energy

#### 3.2.3 岩石裂纹断裂体积参数特征分析

图8为体积参数散点图。如图所示,在岩石试件加载前期,试件应变快速增长,应力变化不大,没有声发射事件产生;随着岩石试件加载,应力逐渐增加,个别时刻出现体积参数,且数值较小、间隔时间较长;在加载后期到峰值时刻,体积参数的产生

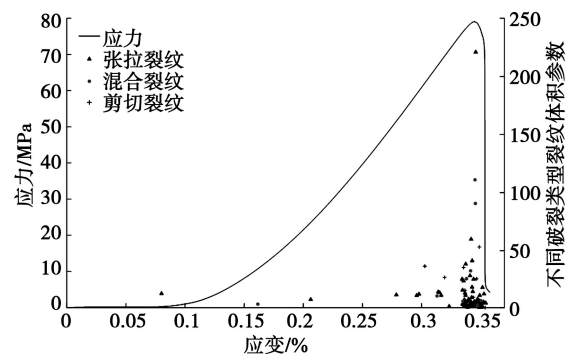


图8 体积参数散点图

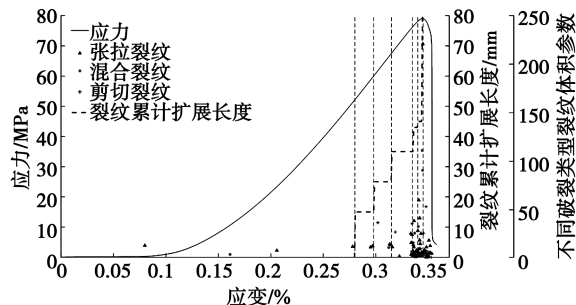
Fig. 8 Scatter plot of volume parameter

逐渐密集、数值增加,对比来看,剪切裂纹的体积参数更大,在峰值时刻出现最大值;在峰后阶段,裂纹体积参数继续频繁出现,但数值逐渐减小。从声发射裂纹体积来看,随着试件的加载,先产生少量体积较小的裂纹,后数量逐渐增多、体积逐渐增大,相同应变下剪切裂纹的体积参数更大,在峰值时刻裂纹体积最大,在峰后裂纹继续扩展但裂纹体积逐渐减小。

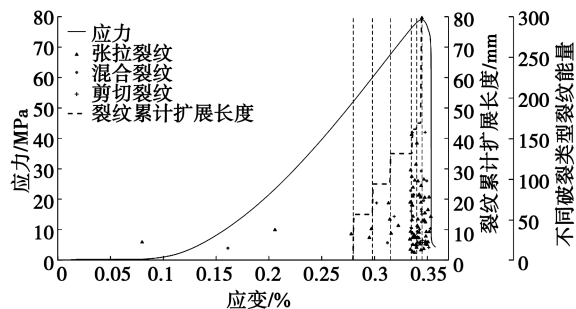
### 3.3 岩石断裂演化与声发射参数特征对应关系分析

在前述岩石试件断裂演化规律和声发射参数特征分析的基础上,研究岩石断裂演化与声发射参数特征对应关系。

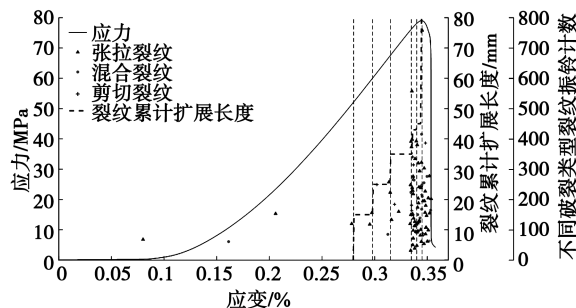
图 9 给出预制裂纹扩展长度与不同破裂类型裂纹体积参数、能量和振铃计数对应关系曲线。加



(a) 变形场演化与裂纹体积参数对应关系



(b) 变形局部化带与不同类型裂纹能量对应关系



(c) 变形局部化带与不同类型裂纹振铃计数对应关系

图 9 变形局部化带与声发射特征对应关系

Fig. 9 Correspondence between deformation localization zone and acoustic emission characteristics

载前期,岩石试件处于压密阶段,应变不断增加,应力保持不变,没有声发射信号。随着加载的进行,岩石试件处于微裂纹随机发育阶段,个别时刻产生声发射不同破裂类型的裂纹体积参数、能量和振铃计数,裂纹破裂类型以张拉和混和破裂为主。在加载后期阶段,随应变增加,应力线性增加,岩石试件处于微裂纹发育、贯通及预制裂纹扩展阶段,随着预制裂纹突然扩展,对应的产生声发射裂纹体积参数、能量和振铃计数,且破裂类型以张拉裂纹为主;在预制裂纹扩展前后的一小段时间内,声发射裂纹体积参数、能量和振铃计数曲线仍在密集产生,但 3 种裂纹破裂类型均有;在预制裂纹保持稳定不变时,没有声发射信号。在加载峰值,预制裂纹扩展长度达到 80 mm,裂纹体积参数、能量和振铃计数随之出现最大值;在峰后阶段,预制裂纹继续扩展至岩石试件顶部,裂纹体积参数、能量和振铃计数随之密集产生。

从预制裂纹扩展长度与声发射指标对比分析表明:预制裂纹扩展对声发射体积参数、不同破裂类型裂纹能量和振铃计数影响较大。预制裂纹扩展时,张拉裂纹体积参数、能量和振铃计数随之出现;预制裂纹扩展前后,3 种类型裂纹体积参数、能量和振铃计数随机出现;在预制裂纹保持稳定不变时,没有声发射信号产生。

### 3.4 岩石试件裂纹破裂机制研究

基于数字散斑相关方法、双差定位和矩张量反演计算方法,对比变形场和震源定位及破裂类型演化过程,研究裂纹破裂机制。

采用数字散斑相关方法得到不同加载阶段试件剪切应变场,采用双差定位和矩张量反演计算方法得到震源位置及其破坏类型,计算结果如图 10 和 11 所示。在图 11 中, $xz$  平面为震源事件分布的正视图, $yz$  平面为震源事件的侧视图。

加载初期(0~70 %峰值应变),从岩石试件剪切应变场可见,在预制裂纹上方 15 mm 处出现变形集中。从震源位置及其破坏类型图可见,345 s 内共有 4 个震源事件发生,以张拉破裂为主,在  $xz$  平面上震源事件大部分分布于预制裂纹尖端及上方 15 mm 处;在  $y$  方向上震源事件分布于试件前半部分。

加载至 80 %峰值应变,从岩石试件剪切应变场可见,变形局部化带逐渐向上方发育至约 25 mm。从震源位置及其破坏类型图可见,20 s 内新增 3 个震源事件发生,以张拉裂纹为主,在  $xz$  平

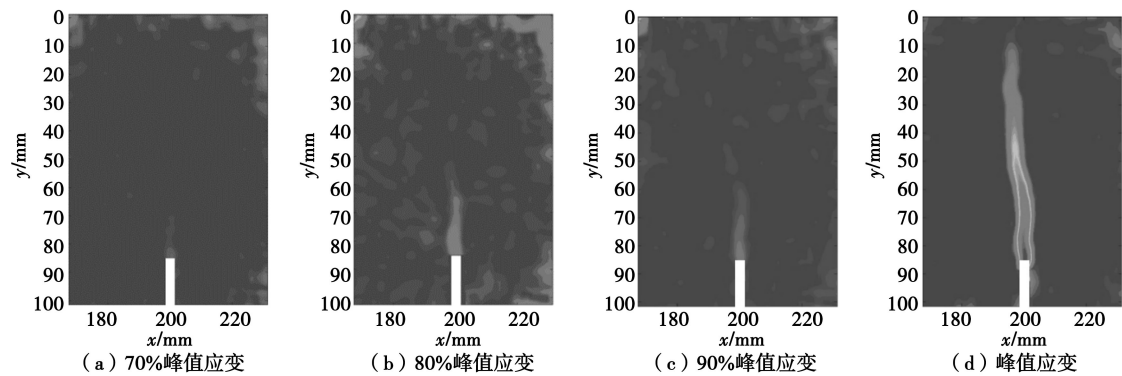


图 10 加载不同时刻变形场演化

Fig. 10 Evolution of deformation fields at different time

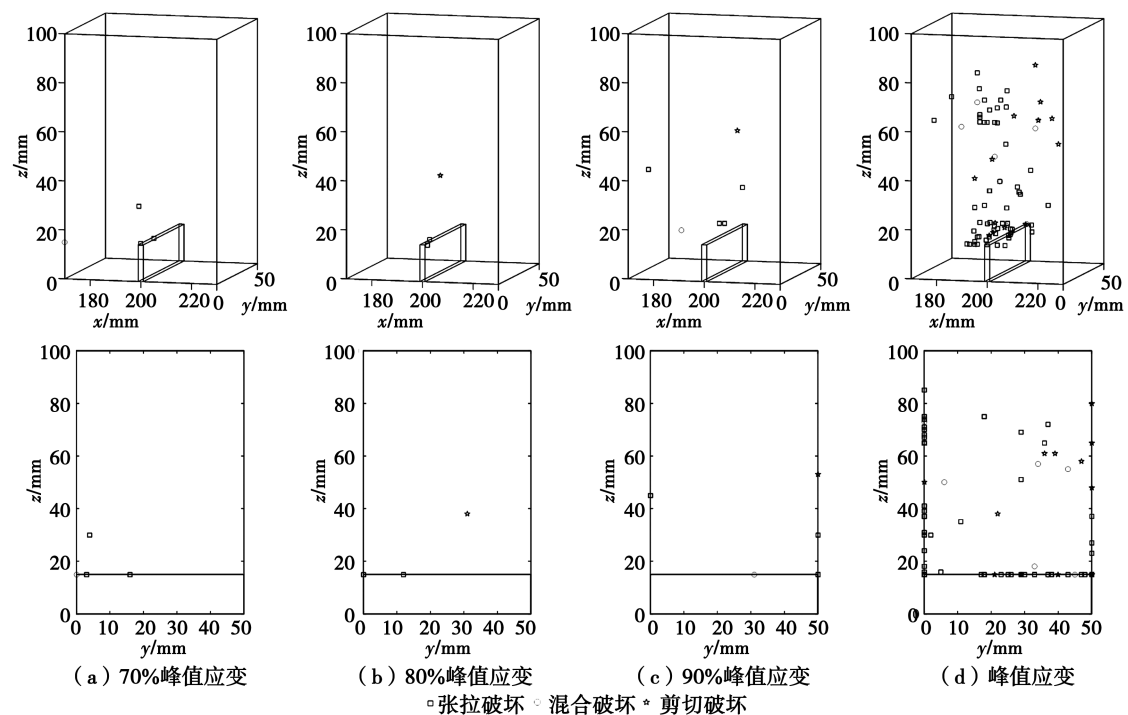


图 11 岩石震源定位及破裂类型

Fig. 11 Rock source location and fracture type

面上震源事件分布于预制裂纹上方,发展至预制裂纹上方 25 mm 处,且此处裂纹为剪切裂纹;在  $y$  方向上震源事件向试件后半部分发展。

加载至 90 % 峰值应变,从岩石试件剪切应变场可见,变形局部化带逐渐向上方发育至约 35 mm;从震源位置及其破坏类型图可见,20 s 内共有 6 个震源事件发生,在  $xz$  平面上震源事件大部分分布于预制裂纹上方,以张拉裂纹为主,发展至预制裂纹上方 35 mm 处,且此处裂纹为剪切裂纹,少部分分布于试件其他位置,裂纹类型为张拉裂纹和混合裂纹;在  $y$  方向上震源事件继续向试件后半部分发展,在试件后表面出现震源事件。

加载至峰值应变,从岩石试件剪切应变场可见,在预制裂纹上方,变形局部化带发育至试件顶部;从震源位置及其破坏类型图可见,26 s 内共有 86 个震源事件发生,在  $xz$  平面上,震源事件主要集中在裂纹尖端上方,裂纹类型以张拉裂纹为主,少量震源事件分布在试件其他位置,3 种破裂类型均存在;在  $y$  方向上震源事件布满试件整个侧面。

根据岩石震源定位及破裂类型可见,试件预制裂纹尖端出现的微裂纹类型为张拉裂纹,随后单个微裂纹在预制裂纹上方及其他位置出现,裂纹类型不定,之后裂纹上方和裂纹尖端之间微裂纹发育,裂纹类型以张拉裂纹为主。



为进一步研究裂纹扩展过程中的微裂纹类型演化,绘制了裂纹扩展长度与不同破裂类型裂纹占比曲线图。如图12所示,在岩石加载过程中,不同破裂类型裂纹占比曲线呈现周期性变化。试验开始加载及预制裂纹发生扩展后,处于主导地位的张拉裂纹占比先减小后增加,剪切和混合裂纹则反

之。结合上述岩石震源定位及破裂类型研究,表明:裂纹扩展后到下一次裂纹扩展前,先是在贯通裂纹尖端附近随机出现各种破裂类型的裂纹,随着微裂纹的积累,贯通裂纹所主导的裂纹类型占比开始增加,直至产生新的贯通裂纹。

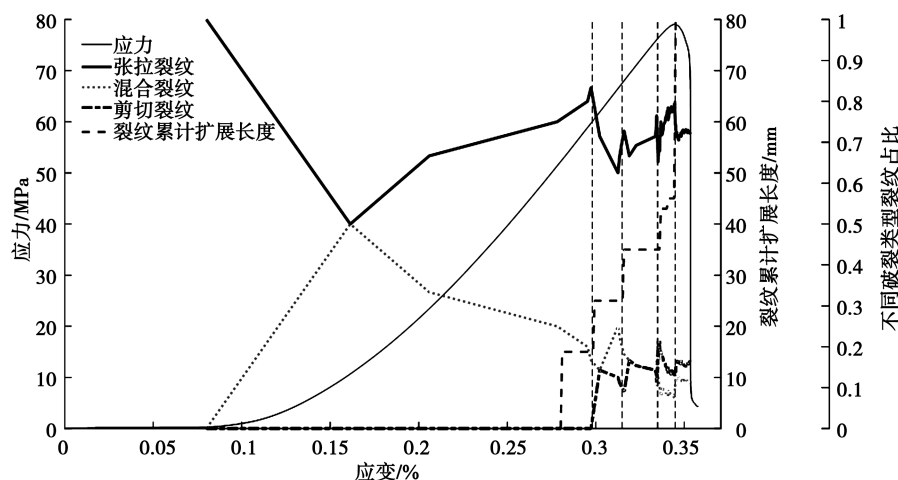


图12 裂纹扩展长度与不同破裂类型裂纹占比曲线

Fig. 12 Crack growth length and the percentage curves of different types of cracks

## 4 结论

(1)从预制裂纹扩展长度曲线和声发射振铃计数、能量、体积参数散点图可见,裂纹扩展具有明显的阶段性和不连续性,其过程为某次裂纹扩展—微裂纹静默积累—裂纹再次扩展;

(2)预制裂纹扩展长度曲线与不同破裂类型声发射指标对比分析表明:预制裂纹扩展对不同破裂类型声发射体积参数、能量和振铃计数影响较大。预制裂纹扩展时,张拉裂纹体积参数、能量和振铃计数随之产生;预制裂纹扩展前后,3种类型裂纹体积参数、能量和振铃计数随机产生。在预制裂纹长度保持稳定不变时,没有声发射信号产生;

(3)从岩石剪切应变场、震源定位和破裂类型占比分析表明:裂纹扩展后到下一次裂纹扩展前,先是在贯通裂纹尖端附近随机出现各种破裂类型的裂纹,随着微裂纹的积累,贯通裂纹所主导的裂纹类型占比开始增加,直至产生新的贯通裂纹。

## 参考文献 (References)

[1] 陈军涛,郭惟嘉,尹立明,等.深部开采底板裂隙扩展演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2298-2306. (Chen Juntao, Guo Weijia, Yin Liming, et al. Experimental study of floor cracking under deep mining[J]. Chinese Journal

of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2298-2306. (in Chinese))

- [2] 申建军,刘伟韬,张勤,等.含双裂纹试件破坏特性力学试验及数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(12):1397-1401. (Shen Jianjun, Liu Weitao, Zhang Qin, et al. Numerical simulation and mechanical experiment on failure behaviour of specimens containing pre-existing two flaws [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2016, 35(12): 1397-1401. (in Chinese))
- [3] 朱振飞,陈国庆,肖宏跃,等.基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):909-918. (Zhu Zhenfei, Chen Guoqing, Xiao Hongyue, et al. Study on crack propagation of rock bridge based on multi parameters analysis of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 909-918. (in Chinese))
- [4] 杨永杰,王德超,李博,等.煤岩三轴压缩损伤破坏声发射特征[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(1):127-135. (Yang Yongjie, Wang Dechao, Li Bo, et al. Acoustic emission characteristics of coal damage failure under triaxial compression [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 127-135. (in Chinese))
- [5] 裴建良,刘建锋,左建平,等.基于声发射定位的自然裂隙动态演化过程研究[J].岩石力学与工程学



- 报, 2013, 32(4): 696-704. (Pei Jianliang, Liu Jianfeng, Zuo Jianping, et al. Investigation on dynamic evolution process of natural fractures based on acoustic emission position [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 696-704. (in Chinese))
- [6] 邓朝福, 刘建锋, 陈亮, 等. 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1538-1544. (Deng Chaofu, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture of granite under different moisture conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1538-1544. (in Chinese))
- [7] 邓朝福, 刘建锋, 陈亮, 等. 不同粒径花岗岩断裂力学行为及声发射特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2313-2320. (Deng Chaofu, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Fracture mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of Beishan granites with different particle sizes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2313-2320. (in Chinese))
- [8] 王煜曦, 王金安, 唐君. 断裂岩石在蠕剪过程中的声发射特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增1): 2948-2958. (Wang Yuxi, Wang Jinan, Tang Jun. Acoustic emission characteristics of fractured rocks during creep shear [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp. 1): 2948-2958. (in Chinese))
- [9] 赵奎, 周永涛, 曾鹏, 等. 三点弯曲作用下不同粒径组成的类岩石材料声发射特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3107-3114. (Zhao Kui, Zhou Yongtao, Zeng Peng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock-like materials with different particle sizes under three-point bending [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3107-3114. (in Chinese))
- [10] 郝兵元, 黄辉, 冯子军, 等. 单轴应力状态下石灰岩体静态破碎裂纹演化规律及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2397-2404. (Hao Bingyuan, Huang Hui, Feng Zijun, et al. Crack evolution of limestone induced by static demolition at axial stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2397-2404. (in Chinese))
- [11] 杨圣奇, 黄彦华, 温森. 高温后非共面双裂隙红砂岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 440-451. (Yang Shengqi, Huang Yanhua, Wen Sen. Experimental study of mechanical behavior of red sandstone with two non-coplanar fissures after high temperature heating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 440-451. (in Chinese))
- [12] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1133-1144. (Zhang Guokai, Li Haibo, Xia Xiang, et al. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1133-1144. (in Chinese))
- [13] 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1): 2760-2771. (Zhang Guokai, Li Haibo, Wang Mingyang, et al. Study on characteristics of failure strength and crack propagation of granite rocks containing a single fissure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp. 1): 2760-2771. (in Chinese))
- [14] 孙雪, 李二兵, 段建立, 等. 北山花岗岩三轴压缩下声发射特征及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增2): 4234-4244. (Sun Xue, Li Erbing, Duan Jianli, et al. Study on acoustic emission characteristics and damage evolution law of Beishan granite under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp. 2): 4234-4244. (in Chinese))
- [15] 熊飞, 靖洪文, 苏海健, 等. 尖端相交裂隙砂岩强度与破裂演化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 886-895. (Xiong Fei, Jing Hongwen, Su Haijian, et al. Strength and fracture behaviors of sandstone samples containing intersect fissures under uniaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 886-895. (in Chinese))
- [16] 周喻, 孙铮, 王莉, 等. 单侧限压缩下预制裂隙试样力学特性及板裂化机制细观研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4385-4394. (Zhou Yu, Sun Zheng, Wang Li, et al. Meso research on mechanical properties and slab failure mechanism of pre-fractured rock mass under the condition of one side restriction loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4385-4394. (in Chinese))
- [17] 于利强, 邓亮, 回新冬, 等. 加载速率影响下裂隙细砂岩力学特性试验研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(7): 103-112. (Yu Liqiang, Deng Liang, Hui Xindong, et al. Experimental study on mechanical properties of fractured fine sandstone under the influence of loading rate [J]. China Coal, 2020, 46(7): 103-112. (in Chinese))