

# 预制裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射特征试验研究

赵扬锋<sup>1,2</sup>, 张超<sup>1</sup>, 刘力强<sup>2</sup>, 朱小景<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**为有效提取含有宏观构造岩体失稳破坏的前兆信息, 对不同倾角预制裂纹的花岗岩进行了单轴压缩全过程声发射变化特征试验。结果表明: 预制裂纹对岩样峰值强度的影响是显著的, 随着预制裂纹倾角的增大, 花岗岩试样的峰值强度降低。随着预制裂纹倾角的增大, 花岗岩变形破裂过程中声发射事件数和声发射震级都增加, 出现声发射前兆信息时试样的应力大幅降低, 完整试样的应力为峰值应力的 88.5%, 裂纹倾角 30° 时为 84.5%, 裂纹倾角 45° 时为 56.2%, 裂纹倾角 60° 时为 46.3%, 声发射前兆信号出现的时间也更为提前。花岗岩变形破裂过程中声发射事件主要集中在预制裂纹区域。声发射监测数据能较好地反映岩石的微小破裂情况, 因此对含有宏观构造的岩体应加强宏观构造处的监测。

**关键词:**花岗岩; 预制裂纹; 失稳破坏; 声发射

中图分类号: TD315 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)07-0044-06

## Experiment study of acoustic emission during fracture process of pre-crack granite under uniaxial compression

Zhao Yangfeng<sup>1,2</sup>, Zhang Chao<sup>1</sup>, Liu Liqiang<sup>2</sup>, Zhu Xiaojing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to effectively extract the precursor information of rock mass unstable failure with macroscopic structure, granite with different angles of pre-crack were used for experiment study of acoustic emission (AE) during fracture process of pre-crack granite under uniaxial compression. The results showed that, the influence of pre-crack on the rock peak strength was significant, as the angle of pre-crack increased, the peak strength of the granite was reduced. As the angle of pre-crack increased, acoustic emission events and acoustic emission magnitude of the granite deformation and fracture process would increase, the stress in AE precursor information was greatly reduced. The stress of the intact sample reached 88.5% of the peak stress, the stress of the sample for 30° crack angle was 84.5%, and 45° crack angle was 56.2%, 60° crack angle was 46.3%. The AE precursor signal was more advance. The acoustic emission events during the granite deformation and failure were mainly concentrated in the pre-crack area. Acoustic emission monitoring data can better reflect the micro rupture of the rock, and the macro structure monitoring of the rock mass should be strengthened.

**Key words:** granite; pre-crack; instability destruction; acoustic emission

## 0 引 言

岩石变形破裂过程研究是岩石力学的核心内容, 对于井巷工程稳定性、边坡失稳和地震等岩

体动力灾害的预测具有重要意义<sup>[1]</sup>。岩石是一种脆性材料, 受力时会发生变形或破裂, 其以弹性波形式释放应变能的现象称为声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE)。现场实际中很多岩体含有断层、层

收稿日期: 2016-12-28; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.07.009

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51274114, 51604141); 中国博士后基金特别资助项目 (2014T70103); 辽宁省自然科学基金面上资助项目 (2015020617)

作者简介: 赵扬锋 (1979—), 男, 河南三门峡人, 副教授, 博士。Tel: 13841866976, E-mail: zhyf\_20010284@sina.com

引用格式: 赵扬锋, 张超, 刘力强, 等. 预制裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射特征试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 44-49, 138.

Zhao Yangfeng, Zhang Chao, Liu Liqiang, et al. Experiment study of acoustic emission during fracture process of pre-crack granite under uniaxial compression [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 44-49, 138.

理、节理以及裂隙等宏观构造,岩石类材料变形破坏过程中伴随有声发射现象<sup>[2]</sup>,因此研究预制裂纹岩石变形破裂过程中声发射信号的变化规律可为岩体动力灾害的预测建立试验理论基础。

目前为止,国内外学者基于室内试验,对岩石变形破裂过程的声发射信号变化规律进行了大量的基础研究。李庶林等<sup>[3]</sup>研究了单轴压缩条件下岩石的声发射特征;陈忠辉等<sup>[4]</sup>研究了岩石声发射的围压效应;许江等<sup>[5]</sup>开展了砂岩在不同剪切速率条件下声发射特性试验,探讨岩石在剪切破坏过程中的破坏形式与声发射之间的关系;李银平等<sup>[6]</sup>采用含预制裂隙大理岩块试件,对压剪应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究;杨永杰等<sup>[7]</sup>研究了三轴压缩条件下声发射试验的岩石损伤特征;张朝鹏等<sup>[8]</sup>对单轴受压煤岩声发射特征的层理效应进行试验,探究了不同层理方向煤岩体的损伤演化规律及变形破坏中的声发射特征;段东等<sup>[9]</sup>研究了泥岩实时细观破坏过程及其声发射事件的产生机制,得出了泥岩在破坏过程中裂纹、孔隙等变化规律及与声发射之间的关系;刘建坡等<sup>[10]</sup>应用声发射技术对循环载荷下岩石损伤过程进行了试验研究,建立了循环载荷下岩石破坏过程的内部损伤和声发射关系的数学模型;纪洪广等<sup>[11]</sup>研究了二长花岗岩三轴压缩下声发射特征的围压效应;李浩然等<sup>[12]</sup>采用声波、声发射一体化监测装置,研究了单轴加载及循环载荷作用下花岗岩破裂过程中声波与声发射的变化特征;贾炳等<sup>[13]</sup>探究了不同裂隙发育程度和分布非均匀程度的煤样,在加载过程中的声发射响应规律;唐珺等<sup>[14]</sup>对2种不同性质的岩石和水泥砂浆进行了单轴压缩试验,探究了峰后岩石类材料的声发射特性;纪洪广等<sup>[15]</sup>进行了不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前特征信息试验研究;张茹等<sup>[16]</sup>研究了花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆。

综上所述,虽然国内外许多学者对岩石变形破裂过程的声发射变化规律进行了大量的试验研究,但大多只能记录振铃计数、声发射事件持续时间、声发射能量、上升时间等数据,而无法获得全频段全部的信号波形,无法传递波形,丧失了更多的有效信息,且没有对预制裂纹岩石变形破裂过程中声发射变化规律进行研究。因此笔者选取花岗岩预制不同角度裂纹进行单轴压缩试验,采用16通道全波形声发射监测系统观测花岗岩岩样变形破坏过程的声发

射信号变化规律。

## 1 岩石试验过程

### 1.1 试验对象

试验所用花岗岩试件取自北京房山区,岩样完整性好,将岩样加工成高150 mm,直径75 mm的试样,两端磨平,试样如图1所示。选取12个岩样,分为4组,每组3个岩样。对岩样做以下加工:第1组岩样不做任何改变,保持原岩试样;第2组岩样预制裂纹倾角(预制裂纹的倾角为裂纹与水平线的夹角)30°;第3组岩样预制裂纹倾角45°;第4组岩样预制裂纹倾角60°。制成的裂纹宽度约1 mm,深度约25 mm。制作好的试样用1:1的石膏和水搅匀后充入裂缝中,放置24 h等凝固后用于试验。



图1 预制裂纹花岗岩试样

Fig. 1 Pre-crack granite specimens

### 1.2 声发射监测

声发射数据采集系统为中国地震局地质研究所实验室用的声发射系统,试验参数:16通道16位同步触发方式,前置放大器40 dB,采样频率为3 MHz,采样长度为4 096个样点。试验时该试验系统可同步全波形采集16通道声发射信号。预制倾角30°和60°裂纹试样声发射传感器布置如图2所示,其他类似。16个声发射传感器分每列4个共4列,用耦合剂均匀的粘贴于样品表面。待耦合剂固化后将试样放置在压力机的底座上,将压力机压头调整到与试样接触。

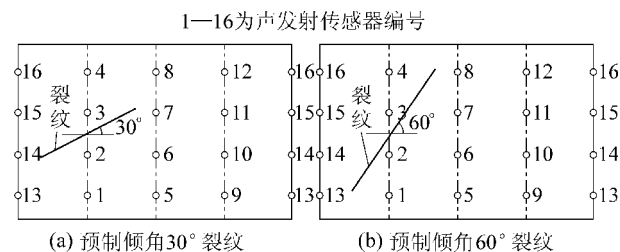


图2 预制裂纹试样声发射传感器布置

Fig. 2 Layout of acoustic emission sensor of pre-crack samples  
试验时,试验机加载速度为0.5 kN/s。声发射

监测系统在正式采集数据前先在试样上进行断铅试验,以确保探头和岩样的耦合质量。

该试验主要观测不同预制裂纹岩样变形破坏过程的声发射变化规律,试验系统通过网络与试验机保持时间同步确保试验参数所对应的时间一致,以便后期处理数据时可找到相对应的时间点。影响声发射信号强弱的因素很多,传感器、放大器及黏结剂都对观测结果有很大影响,但高频的声发射系统难于标定,笔者采用相对矩张量反演的方法,首先尽量保证各采集通道一致,然后使用相对位移来反演相对矩张量,忽略其绝对大小,侧重张量场的形状、方位及相对大小<sup>[17]</sup>。

## 2 试验结果分析

### 2.1 力学特性

不同预制裂纹花岗岩单轴压缩应力-应变曲线如图3所示。结果表明,不同预制裂纹的岩样,在单轴压缩条件下的应力-应变关系可以分为4个阶段,对应于岩石渐进破坏的4个过程,即裂纹闭合阶段、弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹非稳定扩展阶段。无预制裂纹,预制倾角:30°、45°、60°,裂纹花岗岩岩样的峰值强度分别为143.21、119.87、105.29和91.02 MPa,预制裂纹对岩样的峰值强度影响显著,有预制裂纹的花岗岩试样峰值强度大幅降低,预制倾角60°裂纹花岗岩的峰值强度仅为完整试样的64%;随着预制裂纹倾角的增大,花岗岩试样的峰值强度降低,破坏时的应变也明显降低。这表明预制裂纹的存在引起裂尖局部应力集中,导致翼形裂纹的产生和扩展进而导致较早形成宏观裂纹<sup>[18]</sup>。

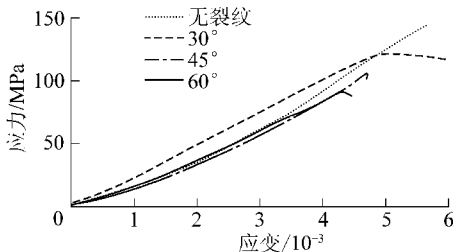


图3 预制裂纹花岗岩单轴压缩应力-应变曲线  
Fig. 3 Stress-strain curves of pre-crack granite under uniaxial compression

### 2.2 预制裂纹花岗岩声发射参数时序特征

无预制裂纹、预制倾角为30°、45°、60°裂纹花岗岩试样在加载速率为0.5 kN/s下单轴压缩变形破裂过程声发射参数、应力变化曲线如图4—图7所示。选择矩震级的计算方法来计算震级, Otmoller

等<sup>[19]</sup>的矩震级计算公式提供了利用拐角频率计算矩震级的方法,利用该计算公式拟合出声发射事件的矩震级,拟合出的矩震级是一相对量。

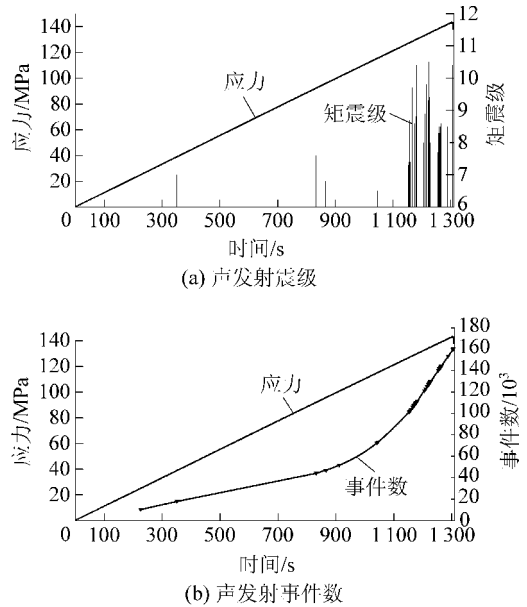


图4 无预制裂纹花岗岩声发射参数、应力与时间关系曲线  
Fig. 4 Relationship curves among AE parameters, stress and time for granite under uniaxial compression

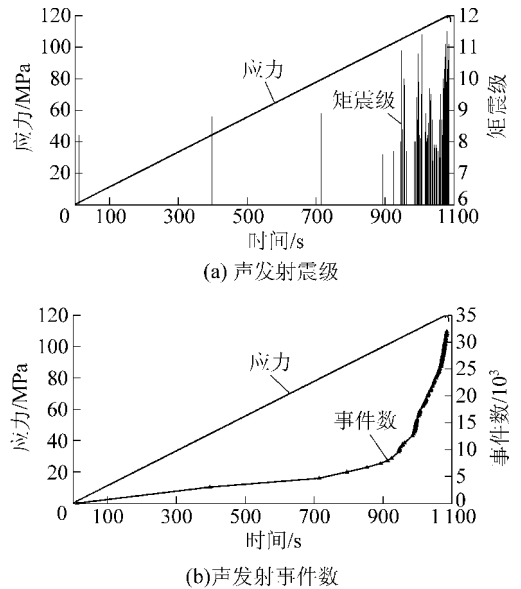


图5 预制倾角30°裂纹花岗岩声发射参数、应力与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship curves among AE parameters, stress and time for pre-crack 30° granite under uniaxial compression

由图4—图7对比分析发现,在全部岩样试验中,花岗岩变形破坏过程中均有声发射信号产生,花岗岩单轴压缩全过程声发射参数变化可分为3个阶段:上升期、平静期和波动期,声发射震级最大值出

现在应力峰值附近的极短时间内,声发射事件数和声发射震级在应力峰值前快速增加。但是,不同预制裂纹花岗岩试样的试验结果也存在许多不同之处。无预制裂纹时,声发射事件数和声发射震级在 1 160.8 s(此时岩石应力为试样应力峰值的 88.5%)时快速增加,进入波动期;声发射震级最大值为 10.5 级,全过程有 160 508 个声发射事件。预制倾角 30° 裂纹时,声发射事件数和声发射震级在 930.5 s(此时岩石应力为试样应力峰值的 84.5%)时快速增加,进入波动期;声发射震级最大值为 11.7 级,全过程声发射有 31 989 个事件。

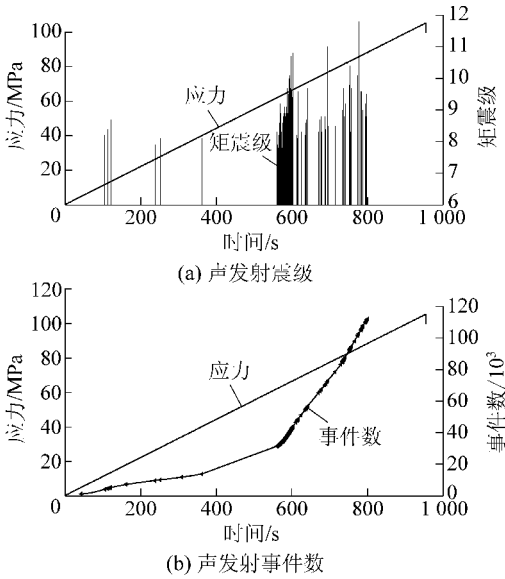


图 6 预制 45° 裂纹花岗岩声发射参数、应力与时间关系曲线

Fig. 6 Relationship curves among AE parameters, stress and time for pre-crack 45° granite under uniaxial compression

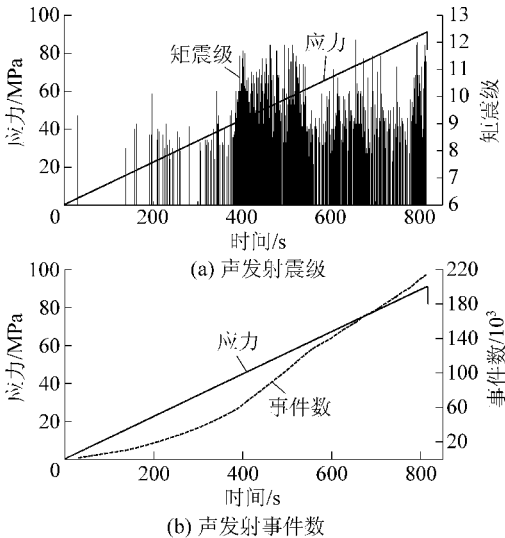


图 7 预制 60° 裂纹花岗岩声发射参数、应力与时间关系曲线

Fig. 7 Relationship curves among AE parameters, stress and time for pre-crack 60° granite under uniaxial compression

预制 45° 裂纹时,声发射事件数和声发射震级在 550.4 s(此时岩石应力为试样应力峰值的 56.2%)时快速增加,进入波动期;声发射矩震级最大值为 11.8 级,全过程声发射有 112 082 个事件。预制倾角 60° 裂纹时,声发射事件数和声发射震级在 380.7 s(此时岩石应力为试样应力峰值的 46.3%)时快速增加,进入波动期;声发射矩震级最大值为 12.2 级,全过程有 214 661 个声发射事件。由此可见,声发射事件数和声发射矩震级进入波动期可作为岩体失稳破坏预报的前兆信息。随着预制裂纹倾角的增大,预制裂纹花岗岩变形破裂过程中声发射事件数和声发射震级都增加,出现声发射前兆信息时试样的应力大大降低(无预制裂纹时试样的应力为峰值应力的 88.5%,预制倾角 30° 裂纹时为 84.5%,预制 45° 裂纹时为 56.2%,预制倾角 60° 裂纹时为 46.3%)。这是由于在单轴压缩作用下试件裂纹扩展受单裂纹倾斜角的影响,裂纹倾斜角较小时,裂纹不易起裂;裂纹倾斜角较大时,裂纹起裂比较容易。

为预制 30° 和 60° 裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射信号监测结果如图 8、图 9 所示,预制 60° 裂纹花岗岩声发射事件波形如图 10 所示。

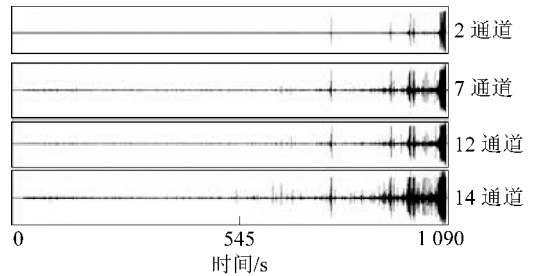


图 8 预制倾角 30° 裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射信号  
Fig. 8 AE signals of pre-crack 30° granite under uniaxial compression

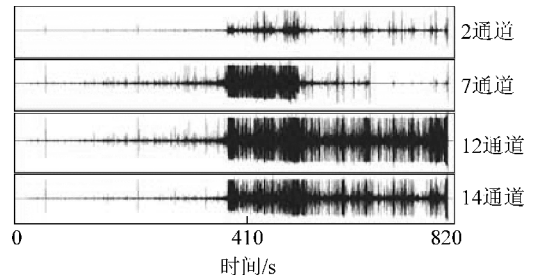
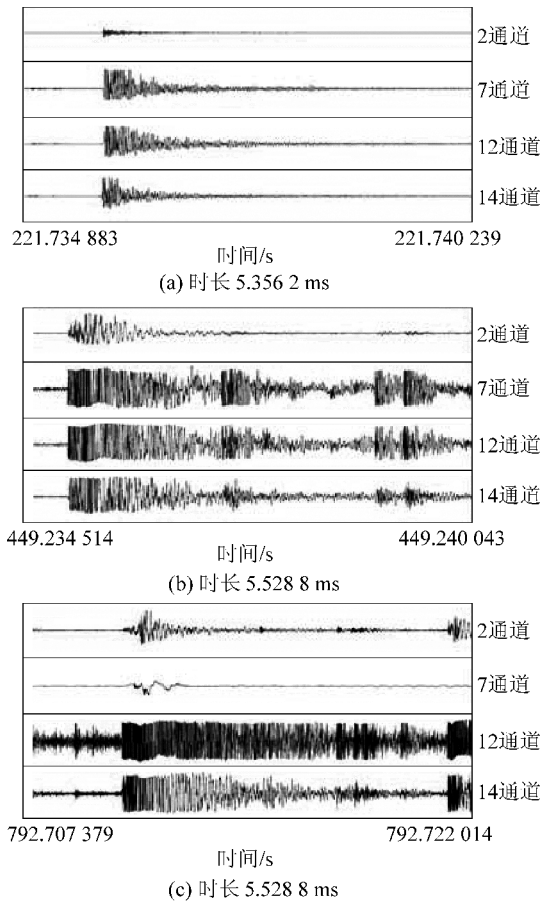


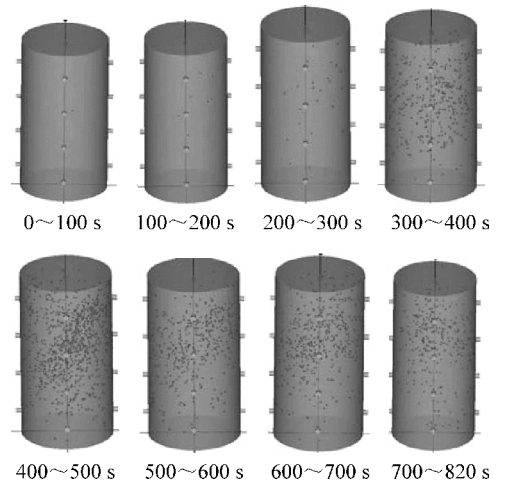
图 9 预制倾角 60° 裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射信号  
Fig. 9 AE signals of pre-crack 60° granite under uniaxial compression

由图 8—图 10 可知:预制裂纹花岗岩变形破裂

图10 预制倾角 $60^\circ$ 裂纹花岗岩声发射事件波形Fig. 10 AE signals of pre-crack  $60^\circ$  granite under uniaxial compression

过程中有大量的声发射事件产生,各声发射传感器接收到的信号幅值大小不一,声发射事件到达时间也各不相同,其中传感器12和14接收到的声发射事件更多,幅值也更大,这与声发射传感器距声发射震源的距离有关,对比花岗岩试样破坏结果发现这2个传感器距试样的主破裂区较近。在221 s时声发射持续时间为3.1 s,在449 s时声发射持续时间为5.1 s,而在792 s时声发射持续时间达到了11.3 s,随着试样应力的增大,声发射事件持续时间增加。随着预制裂纹倾角的增大,花岗岩变形破裂过程声发射事件数和声发射能量大幅增加。随着预制裂纹倾角的增大,声发射前兆信号更为提前,声发射事件数也增多。

声发射空间定位结果直观反映了岩石内部声发射源位置、裂纹初始位置、岩石损伤状况和不同加载阶段裂纹的发展程度。预制倾角 $60^\circ$ 裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射空间定位结果图11所示,岩样在初始加载阶段在预制裂纹附近监测到少量的空间

图11 预制倾角 $60^\circ$ 裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射空间定位演化Fig. 11 Orientation evolution of AE events of pre-crack  $60^\circ$  granite under uniaxial compression

定位点,随着应力增大,岩样内部的裂纹增加,声发射空间定位点小幅度增加,在达到峰值应力45%~55%时,声发射空间定位点显著增多。声发射密集区沿着预制裂纹倾角方向,在达到峰值应力前,声发射空间定位点较多,但相应的声发射震级增大,此阶段大量微裂纹成核、扩展,并贯通为宏观裂纹,最终试样完全破坏大部分能量得到释放,声发射信号大幅度减小甚至消失。花岗岩变形破裂过程声发射事件主要集中在预制裂纹区域,其他区域出现的声发射事件较少,且分布较为分散,这是由于在加载过程中预制裂纹的作用。预制裂纹区域会产生较为明显的应力集中,微裂纹主要集中产生在预制裂纹区域,在贯通为宏观裂纹直至破坏也是沿着预制裂纹方向。

### 3 结 论

1) 预制裂纹对岩样的峰值强度影响是显著的,有预制裂纹的花岗岩试样峰值强度大大降低;随着预制裂纹倾角的增大,花岗岩试样的峰值强度降低,破坏时的应变也明显降低。

2) 花岗岩单轴压缩全过程声发射参数变化可分为3个阶段:上升期、平静期和波动期,声发射震级最大值出现在应力峰值附近的极短时间内,声发射事件数在应力峰值前快速增加。

3) 随着预制裂纹倾角的增大,花岗岩变形破裂过程声发射事件数和声发射震级都增加,出现声发射前兆信息时试样的应力大大降低,声发射前兆信

号更为提前。花岗岩变形破裂过程声发射事件主要集中在预制裂纹区域,其他区域出现的声发射事件较少,且分布较为分散。

4) 岩石失稳破坏预测问题非常复杂,应采用多种信息和手段进行综合分析,对含有断层、层理、节理以及裂隙等宏观构造的岩体应加强宏观构造处的监测。

#### 参考文献(References):

- [1] 王士民,刘丰军,叶飞,等.含预制裂纹脆性岩石破坏数值模拟研究[J].岩土力学,2006,27(S1):235-238.  
Wang Shimin, Liu Fengjun, Ye Fei, *et al.* The numerical simulation to model failure of brittle rock with prefab crack[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(S1): 235-238.
- [2] 郑治真.我国前兆地声的观测与研究[J].地球物理学报,1994,37(S1):251-260.  
Zheng Zhizhen. Geo-sound observation study in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(S1): 251-260.
- [3] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等.单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503.  
Li Shulin, Yi Xiangang, Wang Yongjia, *et al.* Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [4] 陈忠辉,傅宇方,唐春安.岩石破裂声发射过程的围压效应[J].岩石力学与工程学报,1997,16(1):65-70.  
Chen Zhonghui, Fu Yufang, Tang Chun'an. Confining pressure effect on acoustic emissions during rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(1): 65-70.
- [5] 许江,刘义鑫,吴慧等.剪切荷载条件下岩石细观破坏及声发射特性研究[J].矿业安全与环保,2013,40(1):12-16.  
Xu Jiang, Liu Yixin, Wu Hui, *et al.* Research on microscopic failure and acoustic emission characteristics of rock under shear load[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2013, 40(1): 12-16.
- [6] 李银平,曾静,陈龙珠,等.含预制裂隙大理岩破坏过程声发射特征研究[J].地下空间,2004,24(3):290-293.  
Li Yiping, Zeng Jing, Chen Longzhu, *et al.* Acoustic emission characters of pre-cracked marble under compression[J]. *Underground Space*, 2004, 24(3): 290-293.
- [7] 杨永杰,王德超,郭明福,等.基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104.  
Yang Yongjie, Wang Dechao, Guo Mingfu, *et al.* Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 98-104.
- [8] 张朝鹏,张茹,张泽天,等.单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):770-778.  
Zhang Zhaopeng, Zhang Ru, Zhang Zetian, *et al.* Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 770-778.
- [9] 段东,赵阳升,冯小静,等.泥岩实时细观破坏过程及其声发射事件产生机制研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(1):29-35.  
Duan Dong, Zhao Yangsheng, Feng Xiaojing, *et al.* Mudstone mesoscopic failure process and generation mechanism of acoustic emission events based on real-time loading CT Scan[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(1): 29-35.
- [10] 刘建坡,李元辉,杨宇江.基于声发射监测循环荷载下岩石损伤过程[J].东北大学学报:自然科学版,2011,32(10):1476-1479.  
Liu Jianpo, Li Yuanhui, Yang Yujiang. Rock damage process based on acoustic emission monitoring under cyclic loading[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2011, 32(10): 1476-1479.
- [11] 纪洪广,张月征,金延,等.二长花岗岩三轴压缩下声发射特征围压效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1162-1168.  
Ji Hongguang, Zhang Yuezheng, Jin Yan, *et al.* Experimental study of confining pressure effect on acoustic emission characteristics of monzonite granite under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1162-1168.
- [12] 李浩然,杨春和,刘玉刚,等.花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(10):1915-1923.  
Li Haoran, Yang Chunhe, Liu Yugang, *et al.* Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1915-1923.
- [13] 贾炳,倪小明,苏承东.煤样加载过程声发射响应特征试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):33-36.  
Jia Bing, Ni Xiaoming, Su Chengdong. Experimental study on response features of acoustic emission to coal samples during loading process[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(7): 33-36.
- [14] 唐珺,刘卫群,费晓东.峰后岩石类材料的声发射特性研究[J].煤炭科学技术,2011,39(5):21-24.  
Tang Jun, Liu Weiqun, Fei Xiaodong. Study on after peak acoustic emission features of rock type material[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(5): 21-24.
- [15] 曾鹏,纪洪广,孙利辉,等.不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前特征信息试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1333-1340.  
Zeng Peng, Ji Hongguang, Sun Lihui, *et al.* Experimental study of characteristics of irreversibility and fracture precursors of acoustic emission in rock under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1333-1340.

- styles and looking for coal resources in Muli coalfield, Northeastern Qinghai, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11): 1696-1703.
- [9] 文怀军, 邵龙义, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区构造轮廓和地层格架 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1823-1828.
- Wen Huaijun, Shao Longyi, Li Yonghong, *et al.* Structure and stratigraphy of the Juhugeng coal district at Muli, Tianjun County, Qinghai Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12): 1823-1828.
- [10] 杨德寿, 王青平, 童海奎. 青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系沉积相研究 [J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(12): 15-17.
- Yang Deshou, Wang Qingping, Tong Haikui. A Study on Jurassic Coal-bearing Rock Series Sedimentary Facies in Juhugeng Mine Area, Qinghai [J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(12): 15-17.
- [11] 戴金星, 戚厚发, 王少昌, 等. 我国煤系的气油地球化学特征、煤层气藏形成条件及资源评价 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [12] 李靖. 青海省两大赋煤区煤系非常规气形成条件及对比研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [13] 曹代勇, 王崇敬, 李靖, 等. 煤系页岩气的基本特点与聚集规律 [J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(4): 25-30.
- Cao Daiyong, Wang Chongjing, Li Jing, *et al.* Basic characteristics and accumulation rules of shale gas in coal measures [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(4): 25-30.
- [14] 曹代勇, 王丹, 李靖, 等. 青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(8): 1364-1368.
- Cao Daiyong, Wang Dan, Li Jing, *et al.* Gas source analysis of natural gas hydrate of Muli coalfield in Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(8): 1364-1368.
- [15] 李靖, 曹代勇, 豆旭谦, 等. 木里地区天然气水合物成藏模式 [J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2012, 31(4): 484-488.
- Li Jing, Cao Daiyong, Dou Xuqian, *et al.* Accumulation model of natural gas hydrate in Muli area [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2012, 31(4): 484-488.
- [16] 曹代勇, 刘天绩, 王丹, 等. 青海木里地区天然气水合物形成条件分析 [J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(9): 3-6.
- Cao Daiyong, Liu Tianji, Wang Dan, *et al.* Analysis of formation conditions of natural gas hydrate in Muli Coalfield, Qinghai Province [J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(9): 3-6.
- [17] 曹代勇, 王丹, 王桐, *et al.* Formation conditions and resource prospect of natural gas hydrate in Muli coalfield, Qinghai province, China [C]//2010 Conference on Energy Strategy and Technology London: Science Publishing Limited, 2010.
- [18] 郭秋麟, 李建忠, 陈宁生, 等. 四川合川—潼南地区须家河组致密砂岩气成藏模拟 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 409-417.
- Guo Qiulin, Li Jianzhong, Chen Ningsheng, *et al.* Modeling of the tight sandstone gas accumulation for the Xujiahe formation, Hechuan-Tongnan Area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 409-417.
- [19] Bohacs K M, Suter J R. Sequence stratigraphic distribution of coal-y rocks: fundamental controls and paralic examples [J]. *Aapg Bulletin*, 1997, 81(10): 1612-1639.
- [20] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式 [J]. *石油学报*, 2012, 32(S1): 37-52.
- Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, *et al.* Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 32(S1): 37-52.
- (上接第49页)
- [16] 李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(S2): 306-311.
- Li Anqiang, Zhang Ru, Ai Ting, *et al.* Acoustic emission space-time evolution rules and failure precursors of granite under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(S2): 306-311.
- [17] 刘培洵, 陈顺云, 郭彦双, 等. 声发射矩张量反演 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 858-866.
- Liu Peixun, Chen Shunyun, Guo Yanshuang, *et al.* Moment tensor inversion of acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 858-866.
- [18] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 120-124.
- Li Yinping, Wang Yuanhan, Chen Longzhu, *et al.* Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 120-124.
- [19] Ottemoller L, Havskov J. Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(1): 203-214.