

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.23

福建武夷山风景区红色砂砾岩单轴受压声发射实验

雷能忠^{1,2}, 张向波², 钟瑜隆², 柯荣利², 李世峰²

(1. 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002;

2. 武夷学院土木工程与建筑学院, 福建 武夷 354300)

摘要: 根据武夷山九曲溪风景区工程地质条件, 对取自一线天景点岩体的白垩系崇安组红色砂砾岩样品进行声发射实验, 得到样品在单轴压力加载过程中的应力-应变曲线, 声发射参数与应力、应变、时间之间的关系。红色砂砾岩的破坏过程分为压密变形、弹性变形、塑性变形、破裂四个阶段, 每个阶段声发射特征不同, 声发射能量和振铃计数变化很大, 岩石破裂时的声发射能量达到 $2 \times 10^6 \text{ mv} \times \mu\text{s}$ 以上, 振铃计数在 2×10^4 左右。实验发现, 在塑性阶段, 岩石的声发射累计能量和振铃次数相比较于弹性阶段中后期和破裂阶段更趋于平缓, 存在一个平静期。FFT 变换分析得出样品破裂时的主频为 25 KHz 和 50 KHz。实验成果为武夷山风景区岩体稳定性监测技术开发提供了基础数据。

关键词: 武夷山风景区; 红色砂砾岩; 声发射

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0135-06

Experimental investigation on acoustic emission of red sandstone in Wuyishan scenic area under uniaxial compression

LEI Nengzhong^{1,2}, ZHANG Xiangbo², ZHONG Yulong², KE Rongli², LI Shifeng²

(1. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources,

Fuzhou, Fujian 350002 China; 2. Department of Civil Engineering and Architecture,

Wuyi University, Wuyi, Fujian 354300, China)

Abstract: Three red sandstone samples of the cretaceous Chong-an group were taken according to the engineering geological conditions in Wuyishan scenic area. Experiments on acoustic emission (AE) characteristics of three red sandstone samples are carried out on electro-hydraulic servo universal testing machine (HUT) under uniaxial compression. The mechanical properties of rocks and AE characteristics including stress-strain curves, AE energy and ringing counts are obtained. The relations among AE parameters and stress-strain by time are analyzed in detail. On this basis, the failure process of red sandstone was divided into four stages: rock mass compaction stage, elastic deformation stage, plastic stage, rock fracture stage. AE energy and ringing counts have changed a lot in four stages. AE energy of rock burst are $2 \times 10^6 (\text{mv} \times \mu\text{s})$ above, and at this time of ringing counts are at around 2×10^4 . Compared with elastic deformation stage and rock fracture stage, the plastic stage's rock AE accumulated energy and ringing counts flatten out, which indicates there is a relatively tranquil period before the rock burst. The main frequency of rock failure is 25 and 50 KHz by fast Fourier transform analysis (FFT). The experimental results provide the basic data for monitoring technology design of rock stability based on AE in Wuyishan Scenic Area.

Keywords: Wuyishan scenic area; red sandstone; acoustic emission

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-23

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2014Y0040); 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室开放基金(FJKLGH2015K003)

第一作者: 雷能忠(1969-), 男, 福建建阳人, 博士, 教授, 主要从事工程地质灾害防治与国土资源勘查的教学与研究工作。E-mail:

nzhlei@126.com

0 引言

岩体失稳引起的地质灾害在国内山岳景区是一个重要的旅游安全问题。武夷山九曲溪景区是我国著名的丹霞地貌景区,由一线天、玉女峰、大王峰、天游峰等大量造型奇特的岩体构成。景区岩体以单斜岩层分布为特点,为白垩系崇安组红色砂砾岩^[1]。随着旅游开发程度提高,游客规模持续增大,景区一些主要景点岩体稳定性问题得到有关部门的重视。

我国声发射技术研究从 1973 年开始,最早进行金属和复合材料声发射研究,随后扩展到其他众多领域^[2]。岩石是一种天然材料,当受到外力作用时,内部晶体发生滑动,产生裂纹直至最终破坏,都有声发射产生。岩石声发射研究,最早起源于对地震活动的研究,随后被运用于矿山的监测^[3]。文献调查发现,一些学者从不同应用目的,对岩石进行声发射实验。已有资料表明,因实验岩石样品产地不一,岩石物理力学性质也相差很多,不同岩石的声发射参数和波形特征存在很大不同^[4-10]。这些声发射实验,为不同地区岩体失稳破坏的声发射监测技术设计提供了基础资料。声发射是研究岩石失稳破坏的一个良好工具,它是一种动态无损检测的方法,它能持续监测岩石在应力作用下内部裂纹的出现与扩展,成为岩体稳定性监测的一种有效方法^[11-16]。

为能够使用声发射技术监测武夷山九曲溪景区岩体的稳定性,在相关课题资助下,本研究对武夷山风景区主要景点岩体的构成岩石——白垩系崇安组红色砂砾岩,开展系列的岩石声发射室内实验研究,以期景区岩体稳定性的声发射监测技术开发提供基础资料。本文是单轴受压条件下红色砂砾岩声发射实验,通过声发射数据采集、参数和波形分析,探讨红色砂砾岩从开始受压到破坏全过程中应力、应变、时间与声发射参数、波形的关系。

1 红色砂砾岩单轴受压声发射实验

1.1 实验装置

本实验采用压力加载系统和声发射检测系统两套装置。压力加载系统是 HUT 微机控制电液伺服万能试验机。试验机由压力机主机、液压源、DTC 控制器及计算机数据处理系统等组成,采用了电液伺服控制,能满足负荷、变形、位移的三闭环控制要求,HUT 试验机软件能实现自动采集、处理数据,实时显示实验数据和力-位移、力-时间、位移-时间等多种实验曲线,实验

装置见图 1。



图 1 声发射实验装置

Fig. 1 Experimental installation of Acoustic emission

声发射检测系统采用北京声华双通道 SAEU2S 声发射系统,每一通道测量部件包括传感器、前置放大器和采集卡。声发射系统采用 USB 通讯方式实现数据传输,采集卡是安装在专用的独立主机箱中,再连接到计算机 USB 接口上,能够实时采集和显示声发射信号波形和参数,可以记录全部的声发射原始波形数据,实现 30MB/S 连续波形数据传输速率。

1.2 实验样品

代表性实验样品共 3 个,全部从武夷山九曲溪风景区的一线天景点出露岩体采集得到。一线天景点岩体呈层状产出,厚层状,倾向北西,倾角在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间。岩体中不稳定结构面主要有两组,一组是层面,另一组为近垂直的节理面。岩性为砂砾岩,岩体在空间分布上较均一,未见明显岩性变化。岩石颜色淡红到紫红,少量灰白,砂砾成分复杂多样,有石英、长石等矿物,也含有大量的火山岩、变质岩岩石碎屑。胶结物为钙铁质,岩石较坚硬,表层岩石风化作用强,样品详细情况见表 1。

采用在声发射探头两侧断铅方法测定岩石的横波及纵波波速,通过实验测得两探头接收声发射信号时间差以及测量两探头中心点平面位置,计算出横波和纵波波速,结果见表 1。

1.3 实验测试方法

实验开始前,首先测试探头灵敏度,其方法为断铅试验。实验时,保持声发射监测系统与加载系统同步进行。对加载系统采用轴向等速率负荷控制加载,加载速率为 2 kN/S。对声发射监测系统,SAEU2 采集卡是每卡有 2 个独立通道,每个通道前端接一个探头,探

头为 SR40M 型,其频域为 20 ~ 400 kHz,前置放大器类型为 PA1 宽带前置放大器,其增益为 40dB,此声发射系统可以对岩石单轴受压直至破坏全过程所发生的声发射信号进行记录。

表 1 实验样品一览表

Table 1 List of experimental samples

样品编号	尺寸/mm (L × W × H)	波速/(km·s ⁻¹)		干单轴抗压 强度/MPa	干密度/(g·cm ⁻³)	样品描述
		横波	纵波			
JQ-1	145 × 60 × 50	2.70	3.63	60.76	2.58	采样深度地表以下 0.7 m,为未风化新鲜岩石,颜色淡红,中粒-粗粒碎屑结构,块状构造,手标本未见层理构造,铁质胶结。
JQ-2	145 × 96 × 73	2.59	3.87	53.06	2.32	采样深度地表以下 0.8 m,为未风化新鲜岩石,颜色淡红-紫红,粗粒碎屑结构,块状构造,手标本未见层理构造,钙铁质胶结。
JQ-3	165 × 82 × 52	2.50	3.25	68.74	2.61	采样深度为地表以下 1.2 m,为未风化新鲜岩石,颜色淡红,粗粒碎屑结构,块状构造,手标本未见层理构造,铁质胶结。

2 试验结果分析

2.1 岩石的应力应变图分析

压力机以恒定的速率加载,从受力变形到开始产生裂纹直到最终破坏过程中,分别记录压力、时间和位移,得出每一时间的应力、应变值,绘制相应的应力-应变曲线(图 2)。

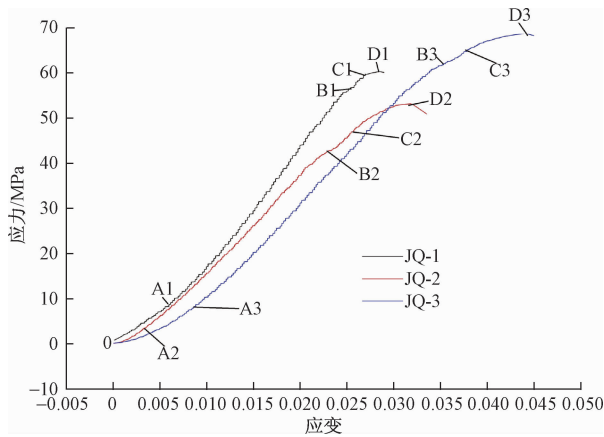


图 2 3 个实验样品的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of three experimental samples

文献[7]将岩石的受力变形破坏特征分为两类,第一类为有明显的塑性阶段,第二类为无明显的塑性阶段。本研究 3 个实验样品的受力变形均与第一类岩石的受力变形特征相类似,均有明显的塑性阶段。图 2 中标注了岩石变形破坏的四个阶段,分别是岩石压密阶段(OA),弹性变形阶段(AB),塑性变形阶段(BC),岩石破裂阶段(CD)。初始阶段以样品压实为主,弹性阶段以样品裂缝扩展为主,塑性阶段以裂缝压实为主,一直到最后随着压力的继续增加样品发生破坏。

由表 1 和图 2 可以得出,岩石的干密度越大,岩石的单轴抗压强度越大。还可以发现,岩石密度越大,前

期压密阶段(OA)所经历的时间也就越长,后期造成不可恢复的变形也就越大。以样品 JQ-3 为例,其干密度最大,前期压密阶段经历的时间最长,后期不可恢复的变形也是最大的。

2.2 岩石的应力-应变与声发射能量、振铃计数之间的关系

通过对数据的处理,绘制出岩石加载过程中声发射能量、振铃计数与应力-应变之间的关系图(图 3)。从应力-应变曲线与声发射参数图中可以看出,三个样品声发射参数在总体上都是随着压力的增大而增加,到后期岩石发生宏观破裂时,声发射能量和振铃计数均急剧增加。

可以根据岩石的应力-应变将声发射活动也分为四个阶段,即 OA 阶段:岩体压密阶段,岩石受压的初始阶段,岩体内部的原生裂纹开始被压缩,此阶段基本上无振铃计数,能量也很小;AB 阶段:弹性变形阶段,随着加载的逐步进行,在弹性变形阶段中后期声发射开始进入活跃期,振铃计数和能量均开始出现波动;BC 阶段:塑性阶段,试件内部弹性阶段产生的裂纹被压密,没有出现新的裂纹,振铃次数和能量均趋于平缓;CD 阶段,岩石破裂阶段,加压到最后,试件内部和表面产生新的裂纹,并连接到了一起,声发射能量和振铃次数迅速增长,特别是声发射能量会出现一个突变,这时试件破坏,失去承载能力。

样品的初始压密阶段应力大约为最大应力的 0 ~ 20% 之间,此阶段声发射能量和振铃计数都是很小的;弹性阶段应力大约持续到最大应力的 85%,此阶段的中后期会产生一些裂纹,引起声发射能量和振铃的变化,但此时声发射能量波动范围比较小。塑性阶段为最大应力的 90% ~ 95% 附近,声发射能量和振铃次数均趋于平缓;在岩石破裂阶段,破裂时的声发射能量均达到 $2 \times 10^6 \text{ mv} \times \mu\text{s}$ 以上,振铃计数均在 20000 左右。

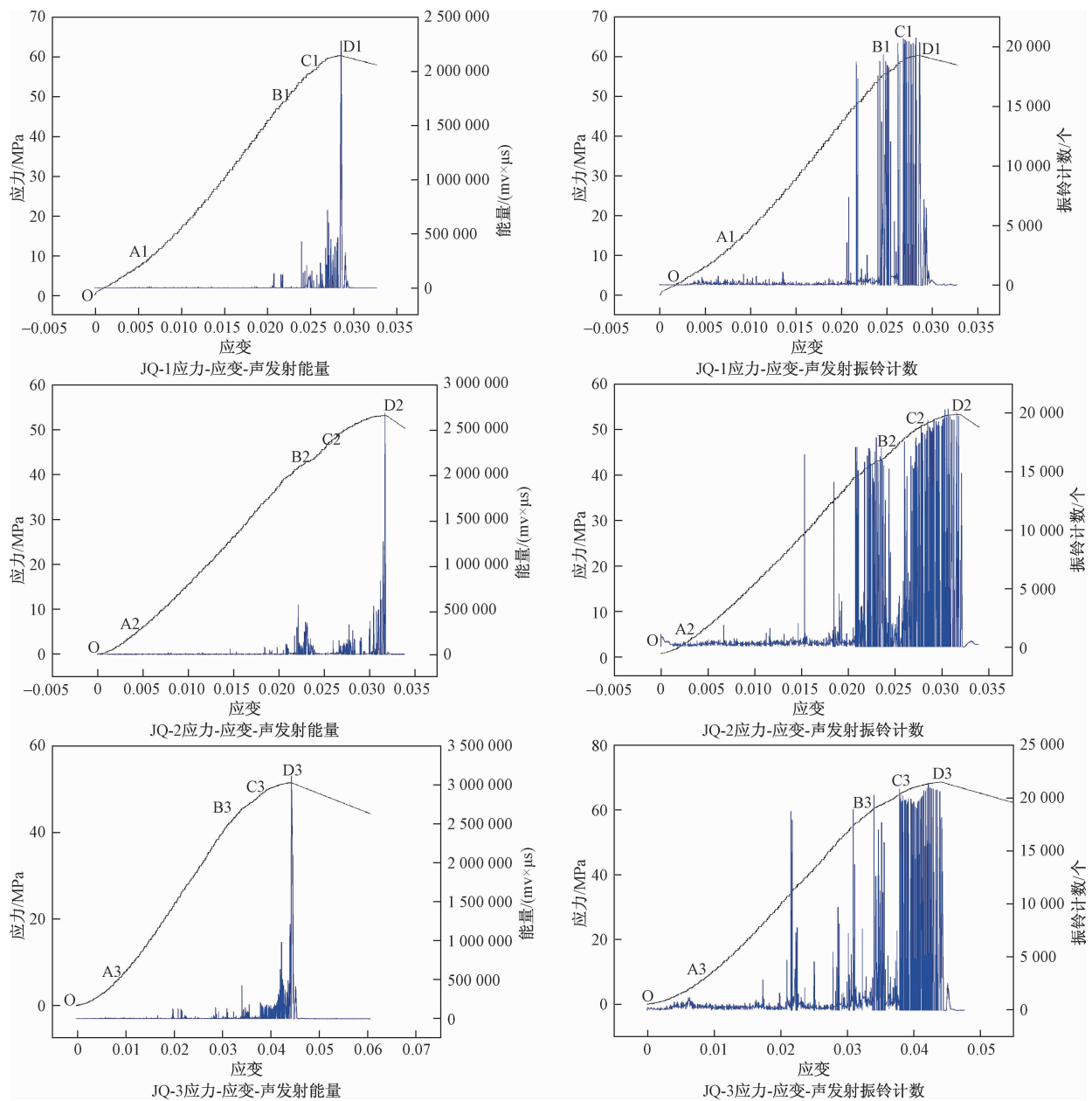


图 3 样品应力-应变与声发射能量、振铃计数间的关系图

Fig. 3 Relations between strain-stress and AE energy and ringing counts of experimental samples

对比相关文献^[3-6],其实验结果也表明在岩样产生裂纹及裂纹扩展时所释放的能量比较大,特别是在岩石破坏时释放的能量是最大的。

2.3 应变与声发射累计能量和振铃计数的关系

由于岩石弹性阶段中后期的振铃次数与岩石破裂阶段的振铃次数较为相近,为了更直观地发现岩石破裂前的声发射特征,需要设计一个方法来进一步揭示声发射特征。根据前述,塑性阶段声发射能量和振铃计数均趋于平缓,为证实该现象,做出样品 JQ-1 应变-时间-累计能量与应变-时间-累计振铃计数图(图 4)。

从图中比较清晰看出,在塑性阶段(BC 段),岩石的声发射累计能量和振铃计数相比较于弹性阶段中后期和破裂阶段均趋于平缓,样品 JQ-2、JQ-3 与 JQ-1 类似。这一现象具有重要的现实意义,这是岩石宏观破裂前的一个声发射参数特征,是岩石破裂的一个预警前兆,称之为破裂前的“平静期”。

2.4 声发射参数信号的频谱分析

为了进一步挖掘样品的声发射特征,利用傅里叶变换(FFT)对岩石样品的声发射原始信号进行频谱分析。采用窗函数进行快速傅里叶变换,得出样品的振

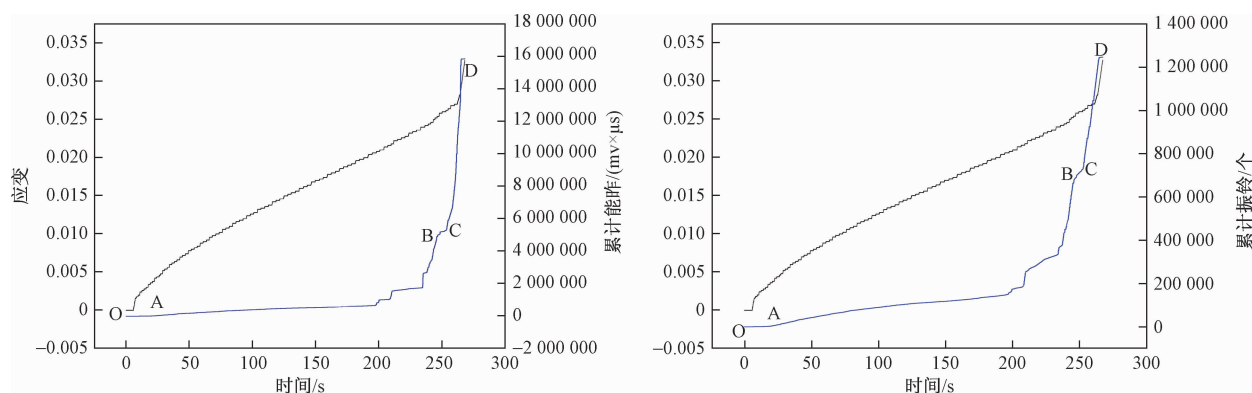


图4 样品JQ-1应变-时间-声发射累计能量和振铃计数关系图

Fig. 4 Relations between strain-time-cumulative AE energy and ringing counts of sample JQ-1

幅谱。图5展示了JQ-1样品的FFT振幅谱,JQ-2、JQ-3与此类似。从图看出,在频率为25 KHz和50 KHz处振幅有较大的波动,说明25 kHz和50 kHz应为岩石破裂时的声发射主频^[8]。

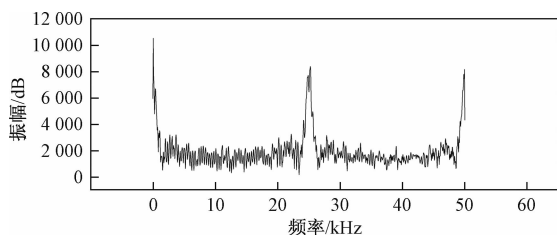


图5 JQ-1样品的傅里叶变换振幅谱

Fig. 5 Amplitude spectra of sample JQ-1 by FFT

3 应用与讨论

本实验是福建省科技计划重点项目“基于声发射技术的武夷山风景区岩体稳定性监测系统开发”的部分内容,目的是获得景区红色砂砾岩在各种应力-应变模式下的声发射参数与波形特征。为建立武夷山风景区岩体稳定性监测的声发射系统提供基础实验资料。

上述实验获得了红色砂砾岩破裂时的声发射能量、振铃计数,累计能量和振铃计数,以及傅里叶变换频谱特征,这些声发射参数与波形特征是建立岩体稳定性预测模型的重要资料。特别需要指出的是,实验发现红色砂砾岩在塑性变形阶段,岩石的声发射累计能量和振铃计数相比较于弹性阶段中后期和破裂阶段均趋于平缓。实际上,当初始裂纹形成后,进入裂纹压密阶段,即裂纹形成后,裂纹并不是随着压力的增大而继续扩展,而是集聚一定的能量再进一步扩展,即岩石需要寻求一个新的平衡,等到新的平衡形成后再继续发展,这个过程声发射活动是不强的。实验中,由于加压速率比现实中岩体实际受力的速率快,这个寻求新

平衡过程耗时较短。这个声发射活动的相对平静期,构成了岩石破裂的一个预警前兆,对岩体失稳破坏具有重要的指示意义,是声发射岩体稳定性预测模型的重要前提。此阶段时间长短是决定岩体失稳预报是否有效的关键,平静期延续时间越长,为预警预报提供更多的数据处理、信息发布和紧急避险的时间。很明显,该阶段时间变化受多种因素的影响,要成为具有实际意义的岩石破裂预警前兆特征,还需要很多深入研究。

4 结论

(1)在单轴压力作用下,武夷山风景区一线天景点岩体红色砂砾岩受压过程分为四个阶段,即压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、破裂阶段。

(2)各阶段声发射特征不同,声发射能量和振铃计数变化很大。压密阶段,基本上无振铃计数,能量也很小。弹性阶段,振铃计数和能量均开始出现波动;塑性阶段,振铃次数和能量均趋于平缓;破裂阶段,声发射能量和振铃计数迅速增长,出现突变。岩石最终破裂失稳时声发射能量均在 $2 \times 10^6 \text{ mv} \times \mu\text{s}$ 以上,振铃计数均在 2×10^4 左右。

(3)红色砂砾岩的声发射信号频率分布在20~60 kHz之间,破裂时的声发射主频为25 kHz和50 kHz。

参考文献:

- [1] 黄进. 武夷山丹霞地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-12.
Huang Jin. An introduction to Danxia landform in Wuyimountain[M]. Beijing: Science Press, 2010: 8-12.
- [2] 李梦源, 尚振东, 蔡海潮, 等. 声发射监测及信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-10.
LI Menyuan, SHANG Zhengdong, CAI Haichao, et al.

- Acoustic emission monitoring and signal processing [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-10.
- [3] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论 [M]. 成都: 西南交通大学出版, 1993: 1-5.
- QIN Siqing, LI Zaoding, ZHANG Zuoyuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rock [M]. Chendu: Southwest Jiaotong University Press, 1993: 1-5.
- [4] Sheng Qi Yang, Hong Wen Jing, Shan Yong Wang. Experimental investigation on the strength, deformability, failure behavior and acoustic emission locations of red sandstone under triaxial compression [J]. Rock Mech Rock Eng, 2012, 45(2): 583-606.
- [5] 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, YIN 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.
- [6] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 3673-3678.
- ZHAO Xingdong, TANG Chun'an, LI Yuanhui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 3673-3678.
- [7] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(supp2): 3383-3390.
- YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(supp2): 3383-3390.
- [8] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于声发射信号主频和嫡值的岩石破裂前兆试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(supp1): 2959-2967.
- ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(supp1): 2959-2967.
- [9] 刘小莲, 费文平, 李倩, 等. 花岗岩卸荷破坏全过程声发射特征试验 [J]. 武汉大学学报, 2013, 46(4): 480-483.
- LIU Xiaolian, FEI Wenping, LI Qian, et al. Experiment of acoustic emission characteristics on granite during unloading process [J]. Engineering journal of Wuhan University, 2013, 46(4): 480-483.
- [10] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 17-21.
- FU Xiaomin. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(1): 17-21.
- [11] L. Girard, J. Beutel, S. Gruber, et al. A custom acoustic emission monitoring system for harsh environments: application to freezing-induced damage in alpine rock walls [J]. Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2012, 10(2): 267-300.
- [12] Wuwei Cheng, Wenyong Wang, Shiqiang Huang et al. Acoustic emission monitoring of rockbursts during TBM-excavated headrace tunneling at Jinping II hydropower station [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 486-494.
- [13] Daesung Cheon, Yongbok Jung, Euseob Park et al. Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with waveguides [J]. Engineering Geology, 2011, 121(2): 75-88.
- [14] A. Lisjak, Q. Liu, Q. Zhao et al. Numerical simulation of acoustic emission in brittle rocks by two-dimensional finite-discrete element analysis [J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(1): 423-443.
- [15] Fengju En, Wu Chao. Practice of monitoring country rock failure status during excavation in metal mine by acoustic emission [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1518-1525.
- [16] 庆光蔚, 岳林, 冯月贵, 等. 声发射信号特征分析中的小波变换应用方法 [J]. 无损检测, 2014, 34(11): 48-51.
- QING Guangwei, YUE Lin, FENG Yuegui, et al. Analysis of acoustic emission signal features based on wavelet transform [J]. Nondestructive Testing, 2014, 34(11): 48-51.