

文章编号:1000-582X(2008)06-0672-05

循环载荷作用下岩石声发射时空演化规律

许江,唐晓军,李树春,陶云奇,姜永东

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:利用先进的声发射测试分析系统对细粒砂岩进行了声发射定位试验。通过对循环载荷作用下细粒砂岩声发射定位试验研究,分析循环载荷作用下岩石变形破坏全过程的声发射时空演化特征及其损伤演化规律。试验结果表明:静态加载阶段的声发射信息很好地反映了岩石在压密阶段、弹塑性变形阶段的损伤演化规律;循环阶段初期声发射都由小裂纹产生的小事件组成,持续时间及能量值都比较小,空间定位结果显示了事件大都在静态加载阶段形成的成核区产生,且空间事件点变化不快;循环中期声发射能量在时间上变化不大,偶有起伏,空间上事件点变化缓慢,每循环只有少量增加,在时空上都处于一个稳定发展阶段;循环末期每循环的声发射事件数、能量值都急剧增加,特别是破坏阶段达到最大值,事件点由能量高、持续时间长的大事件组成,空间演化迅速,事件点在成核区不断聚集并快速连接,不断向顶部扩散,最后容汇贯通形成宏观破裂面;峰后由于破裂面相互滑动摩擦带动附近的弱结构单元形成新损伤,继续产生声发射,且在完全停止加载后因岩石内部寻求新应力场平衡仍有少量声发射。

关键词:循环载荷;细粒砂岩;声发射;定位;损伤演化

中图分类号:TU459.3

文献标志码:A

Space-time evolution rules study of acoustic emission locations in rock under cyclic loading

XU jiang, TANG Xiao-jun, LI Shu-chun, TAO Yun-qi, JIANG Yong-dong

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: An acoustic emission (AE) location experiment was performed on sandstone using an advanced AE test system. The space-time evolution rule regarding damage was analyzed under cyclic loading as well as AE. The results show that: AE on static loading process is consistent with the damage evolution rule of compression and the elastic-plastic deformation phase; At the beginning of cyclic loading with low duration time and energy, AE events came from a small crack. The location result showed that most events occurred in the core zone forming at the static loading process and the location points changed slowly. AE energy changed little during the metaphase of the cyclic process. There was a modest increase of location points in every cycle. The tendency of steady development could be predicted from the AE location events. At the end of each cyclic loading, the quantity of AE events and energy increased rapidly, reaching a maximum at the last cycle. AE events had high energy and duration time. Location events changed quite rapidly, and assembled and linked continuously in the core zone. At the same time, they expanded to the top of specimen. A macroscopic crack finally formed. In the post-failure process, some AE events still existed due to fracturing of gliding friction. Owing to the inner stress balance of rock even after loading stopped, minor AE events still occurred.

Key words: cyclic loading; sandstone; acoustic emission; location; damage evolution

收稿日期:2008-04-27

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50534080);国家自然科学基金资助项目(50574108);教育部博士点基金资助项目(20060611006)

作者简介:许江(1960-),男,重庆大学博士生导师,教授,主要从事岩石力学与工程方向研究,(E-mail)jiangxu@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

声发射是岩石等脆性材料破坏过程中经常伴随的现象^[1],是脆性材料因外力受损在其内部以弹性波快速释放出来的应变能,因而可以通过声发射检测仪器连续实时地监测岩石内部的损伤演化情况。由于岩土工程在施工和运营阶段,经常会遇到循环载荷的作用,岩体在循环载荷作用下的力学性能是影响岩土工程长期稳定性的重要因素之一。而声发射技术作为一种研究岩石受载变形、损伤、破坏演化规律的有效方法已经广泛应用于实际工程中。

岩石单轴受压破坏主要分为4个阶段,而每个阶段所体现出的特点是不一样的,通过对其全过程的声发射特点进行分析,可以了解全程演化规律。文献[1]在刚性试验机上对单轴受压岩石破坏全过程进行声发射试验的基础上,分析了岩石破坏全过程力学特征和声发射特征;文献[2]在单轴多级加载条件下,进行了花岗岩破坏全过程的声发射试验研究,得到了应力-应变、声发射参数与应力和时间的关系。而声发射三维定位技术可以直观地反映出岩石裂纹初始形成位置、扩展方向的空间位置关系,以体现出岩石裂纹空间演化关系。关于岩石声发射定位方面的研究,前人已做了一些相关的试验^[3-15]。如文献[3]通过单纯形法对花岗岩声发射事件定位,分析了岩石破裂过程中内部裂纹开裂、扩展过程的空间演化模式,提出了在岩石初始破裂之后由于要寻求新的应力平衡而形成了所谓的“平静区”。文献[4]应用盖格尔定位算法,对不同预制裂纹的花岗岩进行了三维空间演化模式分析,并在完整岩样的定位研究中发现声发射事件的空白区,宏观裂纹的贯通恰在声发射事件的空白区内。文献[5]采用含张开型表面裂隙辉长岩试样,在单轴压缩作用下预制裂隙的破裂模式进行了一系列试验研究,通过空间定位表明反翼裂隙是张开型表面裂隙三维破坏模式的主要特征。文献[6]利用声发射定位技术对花岗岩在保载、旋转和延时加载情况下对 Kaiser 效应的影响。而对循环载荷下岩石损伤的时空演化规律还未见文献报道。由于损伤是岩石在循环载荷作用下体现其内部结构变化的一个重要指标,而声发射信息则是岩石内部受损情况的外在体现,所以,通过观测声发射信号时空变化特点来判断岩石内部裂纹的开裂、扩展、贯通等演化规律非常重要。因此,拟利用 MTS815.01 岩石力学试验系统和 PCI-2 声发射测试分析系统探讨在循环载荷试验条件下岩石变形破坏全过程的声发射时空演化规律,以此来研究岩石在循环载荷作用下破坏全过程的损伤演化规律。

1 声发射定位原理

声发射定位的原理就是利用布置在不同部位的

声发射传感器所接收到的声发射源信号的时间差来计算声发射事件的位置。一个事件的一个 hit 到达时间 t 可与声速 v 计算出由传感器到声源的距离 d

$$d = v \cdot t. \quad (1)$$

在三维空间坐标中,通过声发射源与不同传感器的时间差和位置差可以计算出声源的位置

$$t_i - t_1 = [\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2}] / v, \quad (2)$$

式中: t_1 表示声源到达第 1 个声发射传感器所需要的时间; x_1, y_1 和 z_1 分别为第 1 个声发射传感器的坐标位置; t_i 为声源到达第 i 个声发射传感器的时间; x_i, y_i 和 z_i 分别为第 i 个声发射传感器的坐标位置; x_s, y_s 和 z_s 分别为声发射源的坐标位置。这样联立多个方程就可以求出声源的坐标位置。

2 试验方法及内容

2.1 试件的采取与加工

试件选用细粒砂岩,为尽可能降低因天然岩石试件个体差异造成的试验结果的离散性,在大块完整无节理的砂岩体上采取密钻取样提取岩芯,且以每三个自然位置临近的试件分为一组进行试验。将所采集的岩样采用湿式加工法加工成 $50 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$ 的长方体试件,端面平行度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内,加工成形后对试件进行 24 h 烘干。

2.2 试验设备及试验方案

实验以 MTS815.01 岩石力学试验系统作为动力设备,根据试验需要采集轴向荷载、轴向变形、横向变形和时间数据,并绘制相应参数关系图。

声发射测试分析系统采用美国声学物理公司 PAC(physical acoustic corporation)生产的 12 CHs PCI-2 声发射测试分析系统检测岩石在循环载荷试验条件下变形破坏全过程中声发射的时空特征。本试验中设定声发射测试分析系统的主放为 40 dB,门槛值为 45 dB,传感器谐振频率为 20~400 kHz,采样频率为 1×10^6 次/s。采用 8 通道采集数据,声发射传感器放置方式见图 1,并用胶带固定。为了消除试件端部与压力盘之间因摩擦而产生的噪声及应力集中,根据文献[10]在试件两端加了一层薄薄的由硬脂酸与凡士林的混合物(重量比 1:1)做成的润滑剂以减小端部摩擦,同时声发射传感器的检测面抹上一层黄油紧贴试件,并排净空气,偶合剂要薄,试件、偶合剂、传感器三者阻抗特性在数量上相匹配。

为了确定相关各循环载荷试验参数,首先选取数个细粒砂岩试件进行单轴压缩载荷试验,取各材料参数试验值之平均值作为其参数值,表 1 则具体给出了通过试验测取的细粒砂岩基本物理力学参数

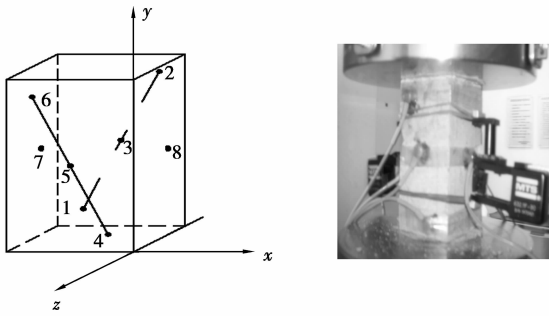


图 1 声发射传感器安装图

值,然后再进行循环加载试验。为了保持恒定的加载速率,采用力控制,加载波形为三角波,选取应力比范围为 0.45~0.90 进行加载,这里上限应力比为上限应力与单轴抗压强度的比值,下限应力比为下限应力与单轴抗压强度的比值。另外,在整个实验过程中,为保证加载系统和声发射系统采集数据同步,加载系统和声发射系统同时开始记录。

表 1 砂岩基本物理力学参数

密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗压强度 /MPa	横波波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
2 367	12.43	0.37	149.9	2 948

3 试验结果及分析

3.1 静态加载及峰后过程声发射时空演化规律分析

图 2 给出的是循环全过程曲线中静态加载部分及峰后过程应力-应变、声发射时序图。由图中可以看出加载初期(压密阶段)只有极少数的声发射产生。过了压密点之后,声发射能量开始小范围增加。随着应力的增加,进入弹性阶段中后期,声发射开始逐渐增多,能量越来越密集,幅值不断增加。在 224 s 时能量值突然增加,此时对应的为应力-应变曲线屈服点附近,表明岩石变形方式开始从以弹性为主向塑性为主转变。到静态加载后期,声发射能量值开始明显增强,开始产生明显塑性损伤。

图 3(a、b、c)显示了静态加载过程声发射空间定位结果。由于在试件的两端加了由硬脂酸和凡士林合成的润滑剂^[10],可以看出明显减小了由于摩擦在试件端部产生的应力集中。图 2(a)为 204 s 时的定位结果,此时为应力-应变曲线弹性阶段后期,事件数为 20,零星散乱地分布于试件中,表明岩石因外力已经开始形成初步损伤。当过了屈服点以后,声发射事件点明显增多,初始裂纹开始逐渐形成,并聚集于试件的中上部,图 2(b)显示了在 240 s 时的定

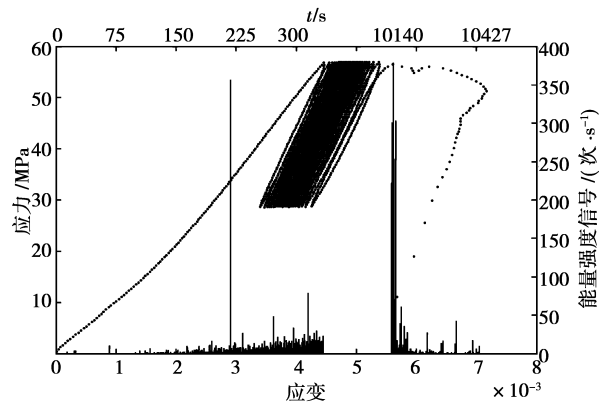


图 2 循环加载应力、应变全过程中静态加载及峰后曲线声发射时序对应图

位结果,此时事件数为 57。随着应力的增加,进入塑性变形阶段,事件数急速变化,损伤不断加剧,裂纹开始稳定发展。当到循环加载开始时已经形成事件的主聚集区,在 330 s 时事件数已达 556,如图 2(c),此时裂纹发展已经进入了初步成核状态。

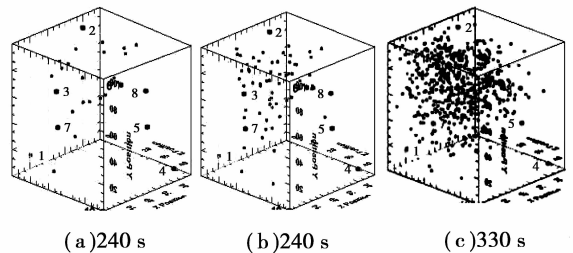


图 3 静态加载过程声发射在不同时刻定位结果

峰后阶段虽然应力在不断减小,但仍有明显声发射发生。因为有效承载面积的减小也会使有效应力相对升高,再加上岩石在峰后的裂纹已经融汇贯通,形成宏观断裂面,破裂沿已有裂纹面开始摩擦滑动,由于破裂面的相互滑动摩擦,带动附近的弱结构单元(或已受损单元)继续产生新裂纹,从而仍有低能量量的声发射产生。同时在试验过程中观测到即使完全停止加载仍有少量声发射事件产生,这应该是岩石内部应力场变化为寻求新的平衡而产生的结果。虽然因为破裂之后形成了密集的聚集区而无法清楚观测峰后事件点的演化情况,但是空间定位结果仍可以看见这些少量的事件点零星出现在主聚集区周围。

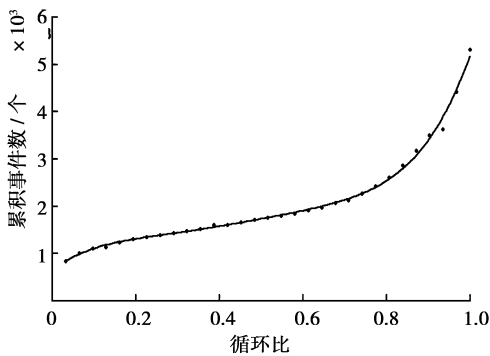
3.2 循环加载过程声发射时空演化规律分析

图 4(a)为本次试验 8 个传感器采集到的声发射事件数与循环比绘成的变化趋势图,从中可以看出其变化呈明显三阶段^[7]。图 3(b)显示了循环阶段应力、声发射能量和时间的对应图。从图中可以看出在最后几个循环以前,声发射能量值无多大变化,

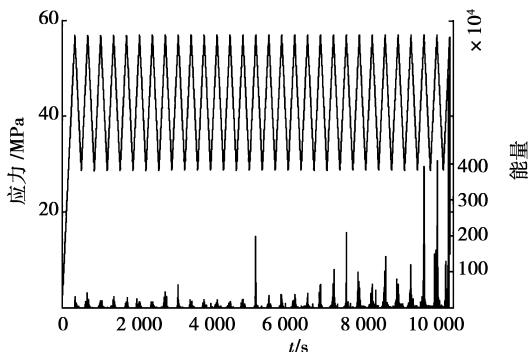
且每个循环产生的事件数基本相当,说明岩石裂纹扩展处于一个比较稳定的发展阶段。到了循环末期,声发射能量开始突然增大,有数量级的变化,特别是到了破坏阶段,声发射能量值达到6万多,事件数也快速地增加。这是由于岩石内部损伤不断累积,能量聚集,到循环末期通过裂纹非稳定快速扩展表现出来,释放出更多的应变能。

图5(a、b、c、d、e)为所选循环阶段各时刻的定位结果。其中a、b、c为循环加载前期的声发射定位结果。该阶段声发射能量值都比较小,持续时间短,事件点的空间演化较慢,每循环之间的定位结果图区别不是很明显。说明在循环载荷作用下每阶段生成的只是一些局部的小裂纹,是小事件产生的结果,且每次产生的事件点都零星散乱分布于先期形成的成核范围之内。在循环中期,声发射事件大部分都出现在接近上限应力附近,相对应的空间事件点也都分布于先期形成的损伤区域,因为这些区域受外力作用,强度已经破坏,在以后的循环加载过程中就主要从这些受损区域开始逐渐向周围扩散发展,随后形成的事件点逐渐与先期形成的事件点连接。同时随着循环加载的进行,慢慢开始向试件顶部演化。

果显示了在试件底部没有检测到更多的事件点,图5(f)显示的试件最终破坏状态,中上部破坏严重,而底部由于裂纹向下扩展形成辟裂。在试件底部未产生更多的事件点和在试件端部加润滑剂消除了端部约束有关,对比试验证明了这一点。循环末期声发射事件已由中前期的低能量、小裂纹事件向高振幅、高能量的大事件转化,这些事件持续时间长,发展连续,因而由先期形成的小裂纹相互容汇贯通形成大裂纹,直至最后的宏观破裂。循环末期的声发射事件空间演化规律充分体现了岩石裂纹在非稳定扩展阶段所表现出来的变化特点。由于岩石结构非均匀性特征决定了其受力破坏损伤产生的随机性,试验使用的8个传感器采事件数达5304个,事件点除了分布于成核区外,还零星的分布其周围。在主破坏区域聚集高能量事件点,其周围大量分散地聚集了低能事件点。



(a) 声发射参数与循环比的对应关系



(b) 应力、声发射参数与时间对应关系

图4 循环加载过程应力、声发射与时间对应图

图5(d、e)为循环末期的声发射定位结果。从试验过程也可以直观的看出每循环声发射事件点在空间演化迅速,数量急剧增加,除了聚集在成核区的核心地带外,还不断地向试件顶部扩散。而在其它空间区域只是有很少的事件点产生。空间定位的结果

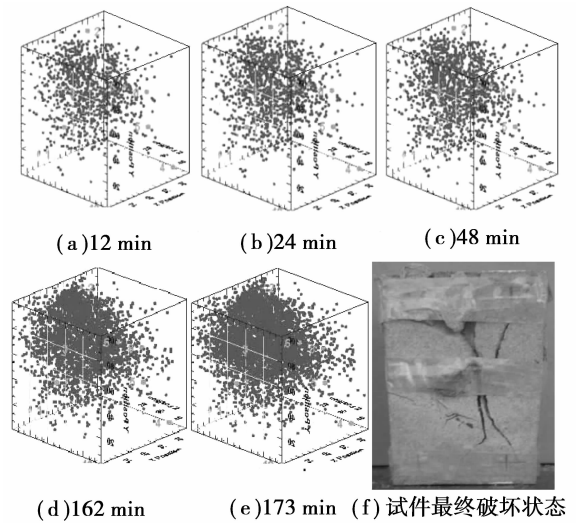


图5 循环阶段声发射定位结果

声发射定位很好的体现了岩石裂纹的发展与声发射的时空演化对应关系,随着循环加载的进行,损伤点在破坏区域逐一的被刻画出来。

4 结论

1) 声发射的事件数、能量值变化体现了岩石在不同阶段变化特征及内部受损严重程度。

2) 循环载荷作用下声发射空间定位结果直观地反映了循环全过程的试件损伤在空间位置演化情况;静态加载阶段形成初始损伤,到裂纹的初步成核;循环初期从成核区稳定逐步地向周围扩散,循环末期非稳定快速发展直至最后的宏观破裂。

3) 声发射定位技术能很好的反映岩石受损时空演化情况,对在循环载荷作用下研究岩石的失稳破坏十分有意义。

同时也要看到,由于声发射定位技术误差受各

方面因素的影响,有试验仪器设备、信号的筛选、试验方法及手段、试件形状及构造、传感器安装和算法的选择等等,这些都会影响其定位精度。声发射定位的精确度还需要从这些方面来改进提高。

参考文献:

- [1] 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 SHU-LIN, YIN XIAN-GANG, WANG YONG-JIA, et al. Studies on acoustic emission characters of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.
- [2] 张茹,谢和平,刘建峰. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2584-2588.
ZHANG RU, XIE HE-PING, LIU JIAN-FENG. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2584-2588.
- [3] 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, S2: 3673-3678.
ZHAO XING-DONG, TANG CHUN-AN, LI YUAN-HUI, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, S2:3673-3678.
- [4] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5):944-950.
ZHAO XING-DONG, LI YUAN-HUI, YUAN RUI-PU, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):944-950.
- [5] 郭彦双,黄凯珠,朱维中,等. 辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 525-531.
GUO YAN-SHUANG, HUANG KAI-ZHU, ZHU WEI-ZHONG, et al. Study on fracture pattern of open surface-flaw in gabbro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 525-531.
- [6] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等. 花岗岩 Kaiser 效应的实验验证与分析[J]. 东北大学学报, 2007, 28(2): 254-257.
ZHAO XING-DONG, LI YUAN-HUI, YUAN RUI-PU, et al. Experimental verification/analysis of kaiser effect in granite [J]. Journal of North Aestern University, 2007, 28(2):254-257.
- [7] 蒋宇,葛修润,任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11):1810-1814.
JIANG YU, GE XIU-RUN, REN JIAN-XI. Deformation rules and acoustics of rocks in process in process fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11):1810-1814.
- [8] 胡新亮,马胜利,高景春,等. 相对定位法在完整岩体声发射定位中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):277-283.
HU XIN-LIANG, MA SHENG-LI, GAO JING-CHUN, et al. Location of acoustic emissions in non-integral rock using relative locating method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):277-283.
- [9] 巴晶,刘力强,马胜利. 岩石力学试验中的声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2004, 26(7):342-348.
BA JING, LIU LI-QIANG, MA SHENG-LI. A summary on acountic emission source location methods in rock mechanics experiment [J]. Nondestructive Testin, 2004, 26(7):342-348.
- [10] LABUZ J F, BRIDELL J M. Reducing frictional constrain in compression testing through lubrication [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993(30):451-455.
- [11] CAI M, MORIOKA H, KAISER P K, et al. Back-analysis of mass stress parameters using using AE monitoring data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4):538-549.
- [12] KUSUNOSE K. Failure zone development in andesite as observed from acoustic emission locations and velocity changes [J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 1995, 88(2):131-143.
- [13] CARABELLI E, FEDERICI P, GRAZIANO F, RONDENA E, ZANINETTI A. Location of ae sources in the rock foundation of the passante dam [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(3):28-36.
- [14] NELSON P P, GLASER S D. Acoustic emissions produced by discrete fracture in rock Part 1-Source location and orientation effects [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3):237-251.
- [15] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7):883-899.

(编辑 侯 湘)