

文章编号: 1000-7598(2009)05-1241-06

周期性循环载荷作用下岩石声发射规律试验研究

许江¹, 唐晓军^{1,2}, 李树春¹, 杨红伟¹, 陶云奇¹

(1. 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; 2. 重庆工业职业技术学院 建筑工程系, 重庆 400050)

摘要: 声发射是岩石等脆性材料内部损伤的伴生现象。在周期性循环载荷作用下通过改变不同应力幅度和不同加载速率对细粒砂岩进行声发射试验研究, 探讨了声发射在周期性载荷作用下的声发射规律。研究表明, 改变上限应力对声发射现象的影响显著, 而改变下限应力的影响主要在循环末期, 提早了每个循环声发射产生时间; 加载速率的增加提高了声发射率, 特别是循环过程中主裂纹的形成和扩展阶段, 加快了岩石破坏进程; 不同应力幅度和加载速率下声发射表现出不同的发展模式, 不同模式预示着不同的岩石变形破坏速率。

关键词: 循环加载; 声发射; 细砂岩; 试验研究

中图分类号: TU 459⁺.3

文献标识码: A

Experimental research on acoustic emission rules of rock under cyclic loading

XU Jiang¹, TANG Xiao-jun^{1,2}, LI Shu-chun¹, YANG Hong-wei¹, TAO Yun-qi¹

(1. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Department of Building Engineering, Chong Qing Industry Polytechnic College, Chongqing 400050, China)

Abstract: The damage process is accompanied by the acoustic emission (AE) for brittle materials such as rocks. AE rule of fine sandstone was investigated under cyclic loading at different loading rates and different stress ranges. The research shows that changing upper limit stress has strong effect on AE rules, and changing lower limit stress advances the time of AE at the end of cyclic loading. Increasing loading rate makes the AE rate bigger, and accelerates the process of rock failure, especially, when the main crack is forming and expending. AE has the different changing mode at different stress ranges and different loading rates, which indicate the different deformations and failures rates of rock.

Key words: cyclic loading; acoustic emission; sandstone; experimental research

1 引言

岩石是由多种矿物组成的结合体, 含有许多裂缝和空洞等不连续面, 是一种非均匀的非线性体, 其受载特性和其他材料有很大的不同。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, 而声发射作为一种研究岩石受载变形、损伤、破坏演化规律的有效技术, 已经广泛应用于实际工程中。

关于岩石在循环载荷作用下的声发射研究, 前人已做了一些相关的试验^[1-3], 得出了一些规律性

的认识。文献[1-2]研究了等幅循环载荷作用下岩石和混凝土疲劳破坏过程中的变形规律和声发射特征; 文献[3]进行了不等幅循环试验, 研究了凯瑟效应和费利西蒂效应规律; 文献[4-5]研究了加载速率对声发射的影响。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, 而声发射信息是岩石内部受损情况的外在体现, 可以通过观测声发射信号强弱变化来判断岩石内部每个阶段裂纹的萌生、扩展、贯通等演化规律。由于加载速率和应力水平是影响岩石声发射的重要因素, 因此本文拟利用 MTS815.01 岩石力学试验系统和 12 CHs PCI-2 声发射测试分析系统检测不同循环载荷试验

收稿日期: 2007-10-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.50534080); 国家自然科学基金项目 (No.50574108)。

第一作者简介: 许江, 男, 1960年生, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

通讯作者: 唐晓军, 男, 1979年生, 硕士, 主要从事安全技术及工程方面的研究。E-mail: greatang@163.com

条件（不同应力比和不同加载速率）下的声发射规律。通过对比不同试验条件下的声发射特性，探讨岩石在循环载荷作用下的损伤演化规律。

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 3 个自然位置临近的试件分为 1 组进行试验。将所采集的岩样采用湿式加工法加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件，端面平行度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内，加工成型后试件保持自然干燥状态。

2.2 试验设备及试验方案

本试验以 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，绘制相应参数关系图。

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不同循环载荷试验条件（不同应力比和不同加载速率）下的声发射特征。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，探头谐振频率为 20~400 kHz，采样频率为 10^6 次/s。采用双通道采集数据，探头放置于砂岩试件长度方向上的中心，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，在试件两端加垫层材料隔绝噪声，减小摩擦，同时声发射探头的检测面抹上一层黄油并紧贴在试件中部，排净空气，耦合剂要薄，试件、耦合剂、探头三者阻抗特性在数量上应相匹配^[7]。

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试验，取各材料参数试验值的平均值作为其参数值，表 1 具体给出了通过试验测取的细粒砂岩基本物理力学参数值，再进行循环加载试验。为了保持恒定的加载速率，采用力控制方式，加载波形为三角波，选取不同的加载速率（21.54、33.60 kN/min）和不同的应力比范围（0.45~0.80、0.30~0.90、0.45~0.90）进行加载，这里上限应力比为循环上限应力 $\sigma_{\max}$ 与单轴抗压强度的比值，下限应力比为循环下限应力 $\sigma_{\min}$ 与单轴抗压强度的比值，如图 1 所示，其中 $\sigma_{\max}$ 表示循环上限应力， $\sigma_{\min}$ 表示循环下限应力；另外，在整个试验过程中，为保证加载系统与声发射系统采集数据同步，加载系统和声发射系统应同时进行记录。

表 1 砂岩基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of sandstone

密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗压强度 /MPa
2.442	16.46	0.30	83.21

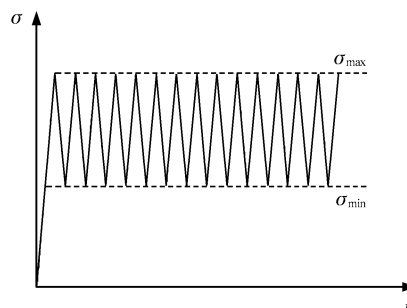


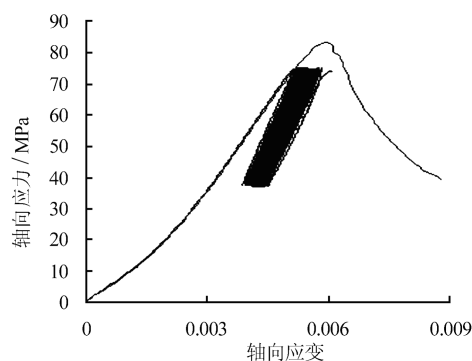
图 1 加载波形示意图

Fig.1 Sketch of wave shape of loading

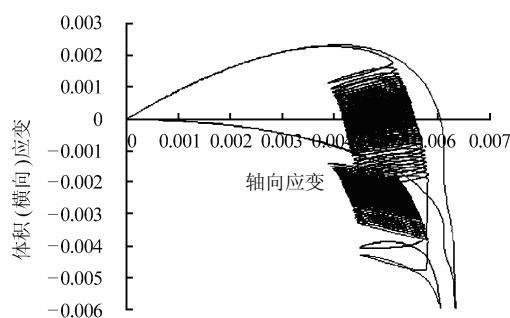
3 试验结果及分析

3.1 试验结果初步分析

由于岩石是天然材料，其试验结果的离散性远大于金属材料，若严格控制岩石试件的采集、加工和筛选，则可以较为明显地减少这种离散性。图 2 具体给出了本次循环加载过程与强度试验曲线的对比图。



(a)



(b)

图 2 强度试验曲线与循环试验曲线对应图

Fig.2 The curve for intensity and cyclic experimentation

从图2中可以看出, 细粒砂岩在循环载荷作用下的应力-应变曲线和强度试验曲线较为吻合, 说明通过对取样和加工的严格把关, 可较好地控制岩石试验结果的离散性, 且为后续的试验研究奠定了良好的基础; 还可以看出, 循环破坏峰值处的轴向应变值和单轴压缩峰值处的应变值基本相同, 说明加载路径、方式的不同并不改变岩石的变形特性, 其破坏仍受其极限应变的控制, 当轴向变形发展到一定程度之后, 由变形引起的累计损伤会导致岩石的最终破坏。而在循环过程中, 随着循环数的增加, 横向应变、体积应变所形成的塑性滞回环沿着其相应应变变量增大的方向演化发展的趋势。图3为声发射、应力-时间对应图, 可以看出, AE与循环载荷下的应力变化有很好的对应关系, 其声发射规律明显。

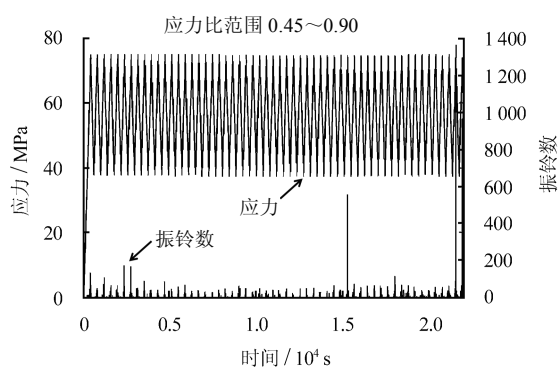


图3 声发射振铃数、应力-时间曲线对应图

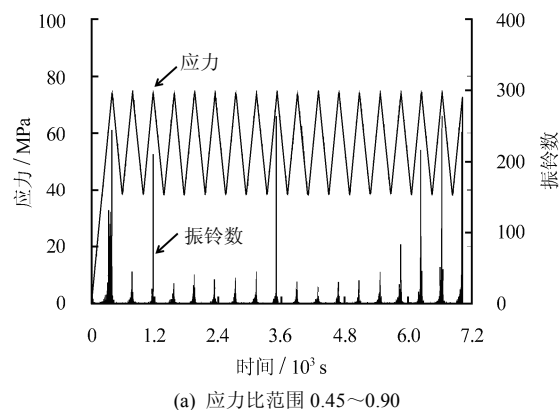
Fig.3 The curve for AE counts, stress and time

3.2 应力幅值及加载速率对 AE 的影响

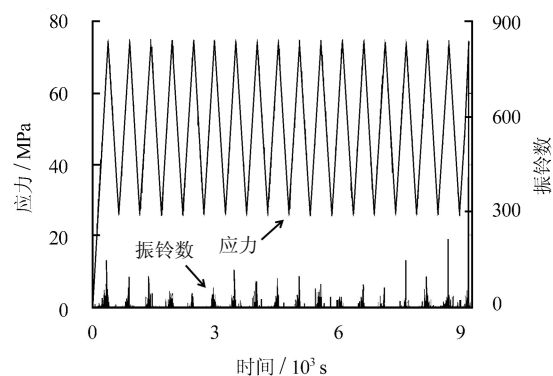
图4显示加载速率为21.54 kN/min时不同应力比下的应力-声发射-时间对应图。图5为加载速率为33.60 kN/min时不同应力比下的应力-声发射-时间对应图, 分别显示了不同试件的声发射试验结果。

当上限应力比为0.90时, 声发射规律基本相同, 每个循环都产生了声发射信号, 说明在上限应力比为0.90时每循环都对岩石有明显的损伤, 并最终在破坏时达到最大值, 而较上限应力比为0.80循环试验, 除了在加载初期有明显信号外, 后面循环过程则不明显, 说明上限应力在循环加载过程中对岩石声发射信号敏感。在试验过程中观测结果也是如此, 上限应力比为0.90时明显, 声发射信号都集中出现在每个循环过程中接近上限应力附近。而对于0.80时则不明显, 在后面的循环过程中偶尔有少量声发射产生, 即每循环产生很少的损伤。但由于上限应力比0.80仍然在循环破坏门槛值^[6]以上, 在这种应力比下只要有更多的循环次数仍能累积更多的损伤

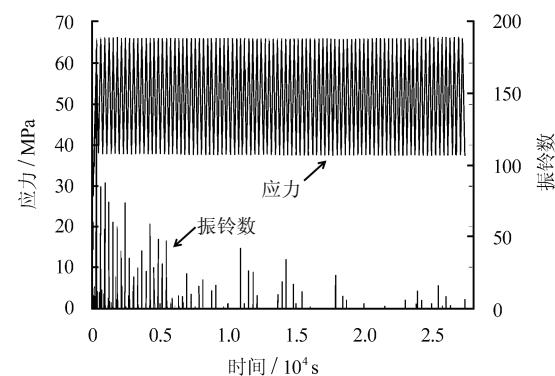
使试件破裂。由于条件限制未进行更多循环试验, 因而未观测到全过程变化规律。同时, 在整个循环加载过程中卸载阶段除了在循环中后期产生声发射外, 循环前期很少产生。



(a) 应力比范围 0.45~0.90



(b) 应力比范围 0.30~0.90



(c) 应力比范围 0.45~0.80

图4 循环载荷作用下应力、振铃数-时间对应图

(速率为21.54 kN/min)

Fig.4 The curve for counts and time under cyclic loading
Rate: 21.54 kN/min

当上限应力相同, 而下限应力不同时, 声发射整体规律基本相同。但在循环加载过程末期, 裂纹进入了非稳定发展阶段, 由于累积损伤区的增大, 导致有效承载面积降低使有效应力的相对提高, 因而下限应力降低同样会使裂纹持续扩展, 声发射在每个循环产生的时间提前, 产生更多的声发射。图

4、5 中的(a)、(b)显示了上限应力比为 0.90 时的声发射结果,图 5(c)显示了上限应力比为 0.80 时声发射结果。比较可知,在高应力阶段上限应力相差 10%,显现出明显的声发射差异,说明上限应力是循环加载过程中影响声发射的关键,同时根据损伤与应力之间的关系可知,应力越大,损伤越多,外在显现明显。

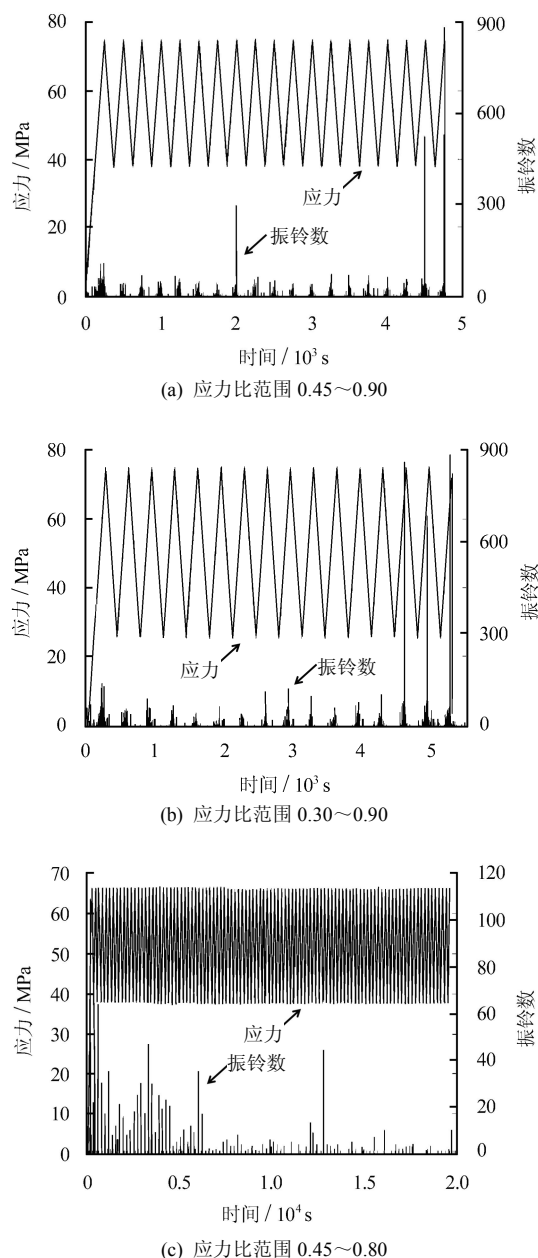


图 5 循环载荷作用下应力、振铃数-时间对应图
(速率为 33.60 kN/min)

Fig.5 The curve for counts and time under cyclic loading
Rate: 33.60 kN/min

对于不同加载速率条件下的声发射规律,由图 4、5 可知,不同加载速率下相同应力幅度的声发射规律基本一致,整个循环加载过程的声发射现象没

有多大的差别,但速率的变化对声发射影响主要体现在声发射率的变化上,加载速率的变化影响了声发射率的变化,速率的提高实际加快了岩石损伤进程,增大了岩石内部裂纹形成扩展的速率,从而增大了声发射率。由于循环载荷作用下岩石裂纹发展是持续闭合、张开的过程,加载速率的提高,裂纹还来不及闭合就有新的能量注入,这样大大降低了张开过程中需要的阻力,从而使裂纹扩展加速,释放更多的能量,外在显现出声发射率的增加。在相同应力比下,不同加载速率的声发射率有较大差别,特别是在主裂纹形成和扩展的循环阶段,其声发射率显著的增加,加快了岩石变形破坏进程。如图 4(a)、(b)的循环破坏时间明显多于图 5(a)、(b)的循环破坏时间。

3.3 循环加载过程 AE 变化模式分析

声发射是岩石内部裂纹演化发展的外在显现,与损伤具有一致性^[8],体现了岩石因外力受损情况。声发射率是单位时间内声发射参数的数量,表明了岩石由于内部裂纹形成、扩展所释放出的能量,声发射率高,说明内部损伤严重。将每循环上限应力处对应的轴向应变提取出来,作出轴向应变与声发射总数(率)关系图。从图 6 中可以看出,轴向应变的变化区间和声发射数的波动区间有很好的对应关系,呈明显的 3 个阶段的规律^[1]。应变速率变化快,则声发射波动明显;应变变化缓慢,声发射平稳。循环初期变形速率变化比较快,相应的声发射数变化也快;当轴向应变变化处于一个比较稳定阶段时,声发射发展较平稳,声发射数变化不大;到末期由于变形速率的提高,声发射数明显增加,这种循环作用下的岩石变形破坏进程缓慢,可以称其为稳定发展型。

图 7、8 分别显示了在不同循环应力比和加载速率下其他试件的试验结果。其中图 7(a)与图 8(a)为应力幅值为 0.30~0.90 应变与声发射率关系图。可以看出,两者都在循环中后期声发射率变化明显,前期变化不大;图 7(b)与图 8(b)为应力幅值为 0.45~0.90 应变与声发射率关系图,可以看出,声发射率除了开始和末期变化比较明显外,中间有平稳期,也有波动期。这和裂纹的发展有关,平稳期表现出裂纹发展比较平稳,裂纹扩展速率慢,且裂纹不大,而波动期则表明在循环载荷作用下由于其累计的能量释放,小裂纹容汇贯通,开始形成大的裂纹,释放出比较多的应变能。图中整个循环过程中大都在应变曲线拐点,即应变速率变化快处出现声发射率的突变点,说明因应变速率的变化引起的岩石内部

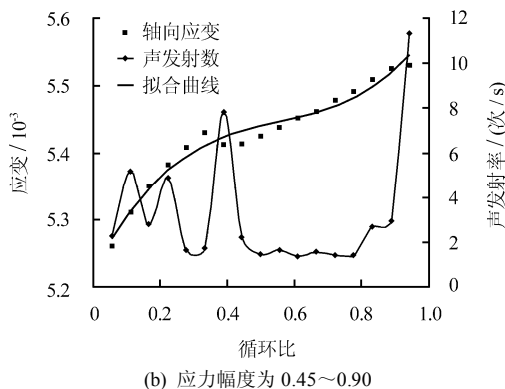
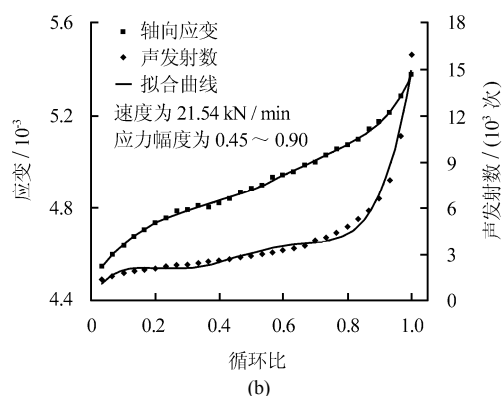
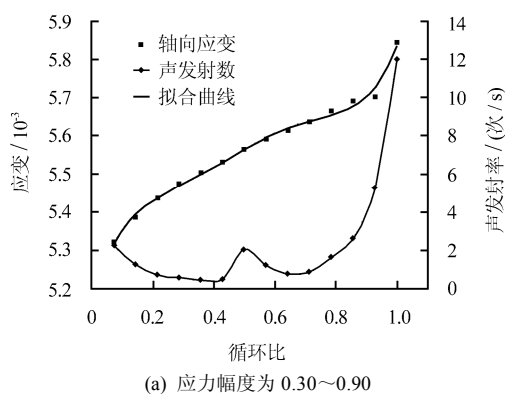
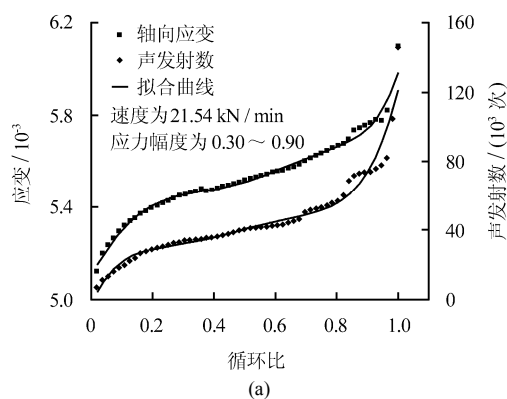


图6 应变与声发射数对应图

Fig.6 The curve for strain and AE counts under cyclic loading

图8 不同应力幅度下应变与声发射率对应图

(速率为 33.60 kN/min)

Fig.8 The curve for strain and AE rate at different stress range rates: 33.60 kN/min

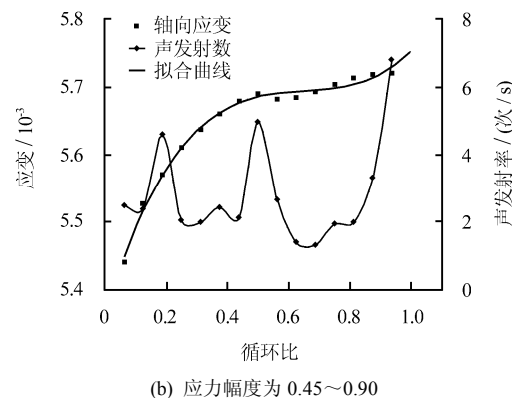
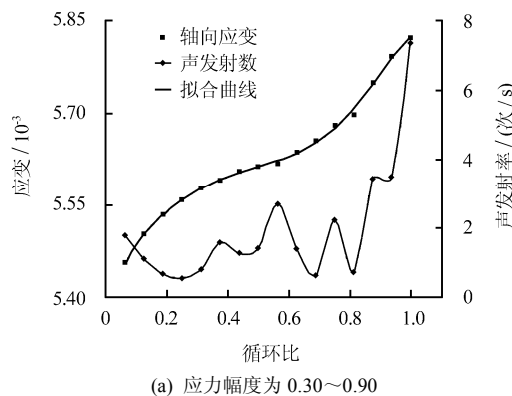
图7 不同应力幅度下应变与声发射率对应图
(速率为 21.54 kN/min)

Fig.7 The curve for strain and AE rate at different stress range rates: 21.54 kN/min

快速损伤通过声发射率的变化显现出来, 而由于加载速率的不同, 导致裂纹扩展速率的不同, 特别在循环加载末期, 使速率为 33.60 kN/min 的声发射率高于速率为 21.54 kN/min 的声发射率。

声发射率突变点的出现, 预示着岩石破裂的局部主裂纹已经形成。在试验过程中也观测到, 在突变明显的循环中形成了肉眼可见的初始裂纹。主裂纹的形成预示着岩石变形破坏在局部开始加剧, 裂纹的发展由分散转为集中。在后面的循环过程中能量的吸收主要聚集在局部较大的裂纹周围, 只要能量再一次累计到某个程度, 岩石就可能随时失稳破坏, 这种模式可称其为突变型。因此, 可以通过声发射率的变化来观测岩石在循环载荷作用下的损伤演化规律。

4 结 论

(1) 等幅循环载荷作用下改变上限应力对声发射影响最大, 而下限应力的影响主要在循环末期。

(2) 加载速率对声发射的影响主要在声发射率上, 特别是主裂纹形成扩展阶段, 速率加大使循环过程中的主裂纹形成、扩展速率增加, 加快了岩石破坏的速率, 从而增大了声发射率。

(3) 不同加载速率和应力幅度下的循环试验, 声发射规律体现出不同的发展模式。不同的模式预示着岩石不同的破坏速率, 稳定型表明岩石在循环载荷过程中破坏进程缓慢, 需要更长的时间。而突变型表明, 循环过程中破坏进程快速, 岩石变形破坏的速率加快。

参 考 文 献

- [1] 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, 11(23): 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, 11(23): 1810—1814.
- [2] 杜云, 张春敏. 混凝土疲劳试验的 AE 特性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 1(20): 46—49.
DU Yun, ZHANG Chun-min. Research on fatigue and acoustic emission of cement[J]. **Jouranal of Liaoning Technical University**, 2001, 1(20): 46—19.
- [3] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射试验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 21(23): 60—67.
ZHANG Hui-hui, YAN Yu-ding, YU Huai-zhong. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load—Fracture precursor of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 21(23): 60—67.
- [4] 席道瑛. 加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响[C]//第四届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1994.
- [5] 万志军, 李学华, 刘长友. 加载速率对岩石声发射活动的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 87—89.
WAN Zhi-jun, LI Xue-hua, LIU Chang-you. Infulence of loading velocity on the rock's acoustic emission activity[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2001, 20(4): 87—89.
- [6] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11—19.
GE Xiu-run. Characteristic study on fatigue deformation and intensity of large-scale rock under triaxial compression with cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1987, 8(2): 11—19.
- [7] 姜永东, 鲜学福, 许江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. 岩土力学, 2006, 26(6): 946—950.
JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, XU Jiang. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial tress in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 26(6): 946—950.
- [8] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. **Journal of Seismological Research**, 1990, 13(2): 203—213.
- [8] SALIM W, INDRARATNA B. A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(4): 657—671.
- [9] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 641—644.
SUN Ji-zhu, WANG Ren. Influence of confining pressure on particle breakage and shear expansion of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 641—644.
- [10] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562—566.
LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-feng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 562—566.
- [11] 张家铭, 汪稔, 石祥锋. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327—3331.
ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3327—3331.
- [12] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21—28.
SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 21—28.
- [13] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的耦合变形机制与本构关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1263—1266.
SUN Ji-zhu, WAN Ren. Study on coupling deformation mechanism and constitutive relation for calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1263—1266.
- [14] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE**, 1967, 93(SM2): 27—43.

上接第 1240 页