

文章编号: 1000-4750(2015)09-0092-08

单轴多级循环加载岩石声发射分形特性试验研究

李庶林¹, 林朝阳¹, 毛建喜¹, 黄玉仁^{1,2}, 胡静云³

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005; 2. 中铁二十四局集团福建公司, 福州 350013; 3. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012)

摘 要:通过对三种岩石试样进行单轴循环加载试验, 获得岩石试样加载过程中声发射事件率、能量率和空间位置分布数据。运用相空间重构理论直接从时间序列上通过 G-P 算法求得事件率和能量率关联分维, 根据柱覆盖法求解得到声发射事件源空间分布关联分维。研究表明, 声发射事件率、能量率和空间分布都具有分形特性, 且声发射源空间分布分形特性最为显著。相空间的选取对关联维数有一定影响, 相空间取值为 4 时能够较好地计算关联维数。将不同加卸载循环声发射源空间分布的变化趋势和声发射源空间分布关联维数变化趋势进行对比发现, 声发射关联维数能够很好地反映岩石内部损伤破坏的发展。在等压加卸载条件下, 声发射源空间分布关联维数显著突增。随着加卸载循环应力的增加, 关联维数总体呈下降趋势, 在达到较高应力时, 关联维数则在较小区间内波动或下降趋势变得极其缓慢。该特点可以作为矿山地压微震监测预警的参考依据。

关键词: 岩石破坏; 声发射; 分形特征; 多级循环加载; 空间分布

中图分类号: TU458 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.01.0094

EXPERIMENTAL STUDY ON FRACTAL DIMENSION CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC EMISSION OF ROCK UNDER MULTILEVEL UNIAXIAL CYCLIC LOADING

LI Shu-lin¹, LIN Chao-yang¹, MAO Jian-xi¹, HUANG Yu-ren^{1,2}, HU Jing-yun³

(1. Architectural and Civil Engineering College of Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Fujian Construction of China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Fuzhou 350013, China;

3. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: Experiments on acoustic emission (AE) characteristics of fractal were carried out under uniaxial multilevel cyclic loading. AE rate, energy rate and spatial distribution of different rock specimens were obtained. Relevant fractal dimensions of AE rate and energy rate were figured out through G-P algorithm based on the theory of reconstruction of phase space. Relevant fractal dimensions of AE spatial distribution was figured out through column-covering method. The results show that AE rate, energy rate and AE spatial distribution are of fractal characteristics, and among them, AE spatial distribution has the most obvious fractal characteristics. Phase space has some effects on relevant fractal dimensions, and it is better to choose 4 as the basic dimension for correlation dimension calculation. The comparison of development trend of AE spatial distribution and relevant fractal dimensions under different cycles shows that fractal characteristics can reflect the statistical evolution of

收稿日期: 2014-01-25; 修改日期: 2014-07-14

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAB02B06); 国家科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2013EG215024)

通讯作者: 李庶林(1963), 男, 江西人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事声发射与微地震监测、岩石力学和地压等发面教学与研究工作 (E-mail: shulin.li@163.com).

作者简介: 林朝阳(1989), 男, 福建人, 硕士生, 从事声发射与微地震监测研究(E-mail: lcy12358@163.com);

毛建喜(1990), 男, 湖南人, 硕士生, 从事岩爆与微地震监测研究(E-mail: 804843634@qq.com);

黄玉仁(1966), 男, 福建人, 教授级高工, 硕士, 从事路桥、隧道工程施工研究(E-mail: hyr91819@163.com);

胡静云(1985), 男, 湖北人, 工程师, 硕士, 主要从事有关于微震地压监测的工作与研究(E-mail: 873872325@qq.com).

the micro-cracks in rock. Relevant fractal dimension increases under isobaric cyclic loading and decreases with the increasing of stress. Relevant fractal dimensions fluctuate in a small range or decrease slowly when the higher stress has been reached. The characteristics above can be used as the reference for micro-seismic monitoring warning on ground pressure in mining.

Key words: rock failure; acoustic emission; fractal dimension characteristics; multilevel cyclic loading; AE spatial distribution

声发射是材料在外荷载作用下,其内部存在的微小裂纹闭合,新的裂隙萌生、扩展及贯通时部分能量以弹性波的形式释放出来的一种现象^[1]。美国矿山局的 Obert 早在 20 世纪 30 年代就发现该现象并将声发射技术运用于矿山矿体稳定和岩爆监测预报中^[2]。经过七十多年的发展,声发射技术在岩石、岩土工程方面已广泛运用于隧道、边坡、水电等地下工程和矿山地压安全与监测。雷兴林等^[3]在三轴压缩下声发射三维分布分形特性的研究中发现声发射源空间分布具有明显的自相似结构,不同岩性分维值不同。Kusunose^[4]对花岗岩进行三轴压缩声发射特性研究发现纹理不同,声发射分维值也不相同。尹贤刚等^[5]对岩石声发射强度分形特性进行研究,发现声发射分维值在应力水平为 40% 达到最大,在平静期时降到最低,并指出可以利用分形维数的持续降低作为岩石失稳破坏的前兆。张茹等^[6]在单轴多级加载条件下研究岩石破坏声发射特性,并在物理过程上对岩石破坏前声发射平静期现象做了探讨。许江等^[7]研究了周期性循环载荷作用下岩石声发射规律,但并未对循环载荷作用下声发射分形特性进行探讨。Kiyoo Mogi^[8]对岩石进行了大量的循环加卸载试验,探讨了岩石单轴受压作用下的声发射特性。李庶林等^[9]对不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性做了深入研究,探讨了声发射影响因素和前兆特性等问题,但并未从空间上对声发射源的演化特性进行研究。张浪平等^[10]采用大尺度岩石试样开展了加卸载过程的声发射实验研究,并采用加卸载响应比参数来描述岩石的破裂过程,王利等^[11]在理论上采用岩石细观力学分析与声发射技术相结合,分析了岩石破裂过程的声发射特性。

本文针对柿竹园多金属矿和大红山铁矿这两个矿山开展的地压多通道微震监测预警研究,对取自柿竹园多金属矿的矽卡岩、大红山铁矿的磁铁矿和辉长辉绿岩等三种主要岩石试样进行循环加卸载试验,在理论上采用 G-P 算法和柱覆盖法探索研

究岩石加卸载及破坏过程的声发射事件率、能量率和声发射事件源空间分布与变化的分形维特性,为矿山地压微震监测预警提供参考依据。

1 试验设备与方法

1.1 岩石试样制备

大红山铁矿的磁铁矿和辉长辉绿岩属于火成岩,柿竹园多金属矿的矽卡岩为变质岩。该试验选用这两个矿山的三种岩石,按照试件加工标准和规程的要求,将这三种岩性岩石加工成规格为 50 mm×100 mm 圆柱体试样,制备后的岩石试样如图 1 所示。



图 1 岩石试样图

Fig.1 Rock specimens

1.2 试验设备

该试验采用加载和监测两套系统相协调工作,加载系统采用 WE-30 型液压式万能材料试验机。监测系统包括传感器、前置放大器、声发射仪和计算机。系统基本原理如图 2 所示。

声发射仪采用美国 PAC 公司第三代全数字化多通道 SAMOS 声发射监测系统,其核心是并行处理的 PCI 总线声发射功能卡 PCI-8 板,在一块板上具有 8 个通道的实时声发射特征提取、波形采集及

处理的能力。通过系统配置的 AEwin™ 软件,可以从图形界面轻松的读取撞击事件、空间定位事件和能量等参数的变化规律并自动存档。

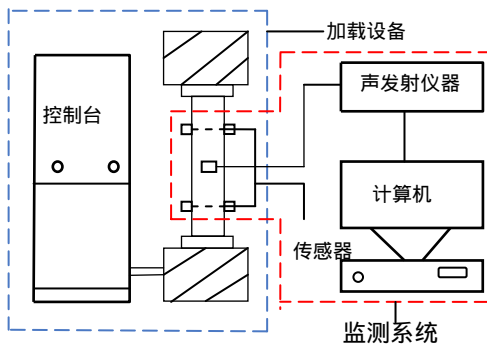


图2 室内声发射试验系统框图

Fig.2 Diagram of AE test system in laboratory

传感器采用 R6 型传感器,该传感器灵敏度为 78 V/(m/s),响应频率范围为 35 kHz~100 kHz。经验研究表明,岩石变形和破坏时产生的声发射源的信号频率范围在 100 kHz 内。本试验所采用的传感器响应频率满足试验要求。

试验过程中,要对声发射事件进行定位,至少需要有四个以上传感器接收到同一个声发射事件所发出的弹性波。为了得到更好的定位效果,本试验使用六个传感器。传感器采用对称布置形式,上下两端布置在左右两侧,中间布置在前后,其空间布置形式如图 3 所示。

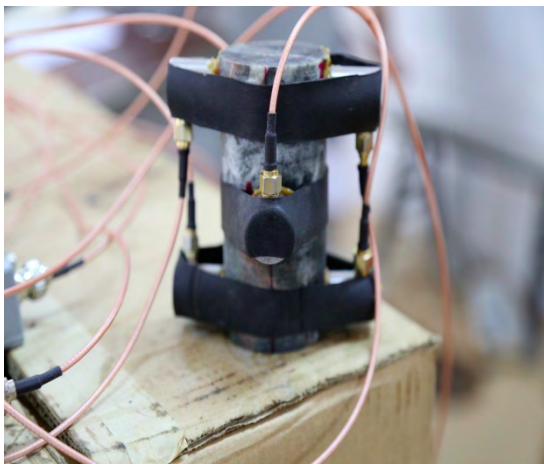


图3 传感器空间布置图

Fig.3 Layout of sensors

为加强传感器与试件的耦合效果,传感器与试件之间涂抹了适量黄油,并用橡胶带将探头牢牢固定在试件上。为消除上下端部摩擦和应力集中对声发射的影响,在试件端部垫上一层具有吸声作用的橡皮薄垫片,并将传感器安装在距离端部 15 mm

处。阈值设置为 45 dB,采用模拟滤波器(上限为 400 kHz,下限为 1 kHz)对噪声进行过滤。试件安放好之后,通过加载设备对试件施加荷载,监测系统实时监测、采集并储存岩石试件加载过程中的特征参数变化。在试验过程中时刻保持加载系统和监测系统的时间上同步。

1.3 试验方法

该试验采取的加卸载方式与传统的加卸载方式不同,传统的加卸载方式一般在试验开始前就已经确定不同加卸载循环需要加载到的应力水平,如按照 20 MPa、40 MPa、60 MPa、……的方式递增。由于该试验目的的特殊性,该试验不同加卸载循环所达到的应力是依据加载过程中声发射参数变化特性而确定,旨在不同加卸载循环阶段峰值荷载能较为接近破坏荷载。

2 分形维数计算

2.1 G-P 算法

1983 年,Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和重构相空间思想提出了从时间序列直接计算关联维数 D 的 G-P 算法^[12]。将声发射基本参数系列作为研究对象,则每一声发射参数系列对应于一个容量为 n 的系列集:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

由式(1)可以构成 m 维相空间($m < n$),先选取式(1)系列中前 m 个数作 m 维相空间向量:

$$X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (2)$$

然后向右平移一个数据构成第二个向量:

$$X_2 = (x_2, x_3, \dots, x_{m+1}) \quad (3)$$

依此类推,可以构成 $N = n - m + 1$ 个向量,相应关联函数为:

$$W(r) = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H[r - |X_i - X_j|] \quad (4)$$

式中 H 为 Heaviside 函数,其表达式为:

$$H(u) = \begin{cases} 0, & u < 0 \\ 1, & u \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

r 为给定的尺度,为避免分散性, r 的取值为:

$$r = kr_0 \quad (6)$$

式中:

$$r_0 = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |X_i - X_j| \quad (7)$$

对于给定的不同尺度 r ,对应着不同的关联函

数值 $W(r)$ 。将点 $(\lg r, \lg W(r))$ ，绘制于双对数坐标中并进行拟合。若拟合结果为一直线，则表明声发射系列在给定的尺度范围内具有分形特性，关联维数为直线的斜率。

$$D = \lg W(r) / \lg r \quad (8)$$

2.2 柱覆盖法

相关研究表明，岩石声发射事件源在空间上的分布具有分形特征^[13]。计算声发射事件源空间分布分形维数较常用的方法是球覆盖法和立方体覆盖法^[14]。对于圆柱体试样，这两种方法均存在不足之处。谢和平等在研究中表明，对于圆柱体试样，柱覆盖法可以真实地体现研究对象的实体形状，准确地反映声发射事件源空间分布情况，对声发射事件源空间分布分形维数进行计算时比较方便^[15]。

用柱覆盖法对声发射事件源进行覆盖如图4所示。对应于不同的半径 r ，柱子高度取 $h = 4r$ ，小圆柱所覆盖的声发射事件记为 $M(r)$ 。将这些点取对数 $(\lg r, \lg M(r))$ ，绘制在双对数坐标轴上并进行拟合，若结果为直线，说明声发射事件源空间分布在给定的尺度范围内具有分形特征，分维值为直线的斜率：

$$D = \lg M(r) / \lg r \quad (9)$$

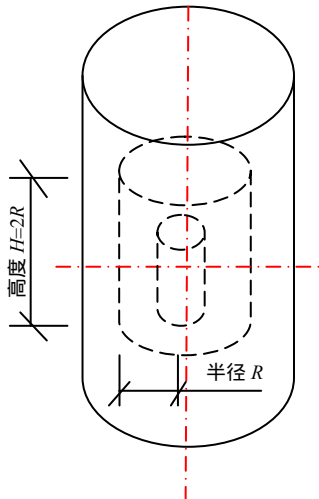


图4 柱覆盖法示意图

Fig.4 Schematic diagram of column-covering method

2.3 相空间确定

在运用 G-P 算法进行关联维数计算时，不同的相空间维数对关联维数有一定的影响，因此首先需要确定合适的相空间。图5为 X-2 第一个加卸载循环事件率系列的关联维数随 m 值变化图。从图中可以看出，在 m 为 2、3 和 4 时关联维数线性增加，当 m 大于 4 时，关联维数趋于稳定，因此本文选取

相空间 $m=4$ 进行声发射分形特性分析。

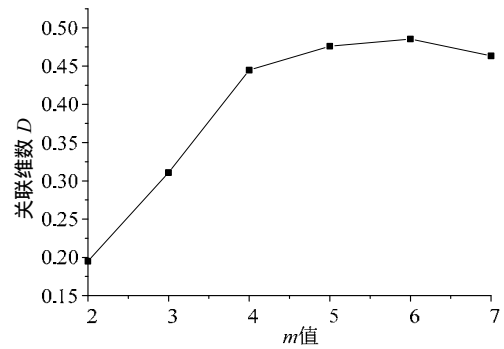


图5 相空间与关联维数关系图

Fig.5 Relationship between phase space and relevant dimensions

3 试验结果与分析

3.1 声发射参数变化特征分析

该试验对三组，每组 4 块，共 12 块岩石试样进行加卸载。由于在端部添加有橡胶薄垫层，试样破坏形式均为纵向劈裂破坏。本文选取其中数据较为完整，结果较为成功的岩石试样进行分析。表 1 为不同加卸载循环峰值荷载与破坏荷载百分比，图 6 和图 7 分别为岩石试样加卸载循环过程中声发射事件率和能量率变化图。图与表中符号 C、H 和 X 分别代表磁铁矿、辉长辉绿岩和矽卡岩，后面数字代表试件编号。

表 1 不同加卸载循环应力水平
Table 1 Stress level of various cyclic loading

岩石试样	循环阶段应力百分比/(%)						
	1	2	3	4	5	6	7
X-2	73.5	85.3	92.6	98.3	100	—	—
C-3	62.7	62.7	62.7	78.4	84.3	96.1	100
H-12	48.6	52.1	54.3	65.2	76.1	89.1	100

从图 6 可以看出，各循环阶段事件率最大值均发生在峰值点附近。将最后三次加卸载循环峰值点事件率对比发现，C-3 事件率呈上升趋势，H-12 事件率先下降后上升，X-2 事件率先上升后下降。在循环加卸载条件下，岩石破坏前声发射事件率并未出现明显的变化规律。图 7 是能量率随时间和应力变化图，能量率以(个/s)为单位，每个计数单位代表 9.31×10^{-22} J/s。从图 7 可以看出，C-3，H-12 能量率在第四次加卸载循环阶段突增且数值比破坏阶段能量率还高，X-2 能量率则是在岩石试样破坏前达到最高。岩石试样破坏前能量率也未出现明显的变化规律。从上面分析可知，岩石试

样在循环加卸载过程中，随着应力百分比的升高，事件率和能量率并没有明显的变化趋势，很难为岩石试样失稳破坏的到来提供有效的前兆预测。

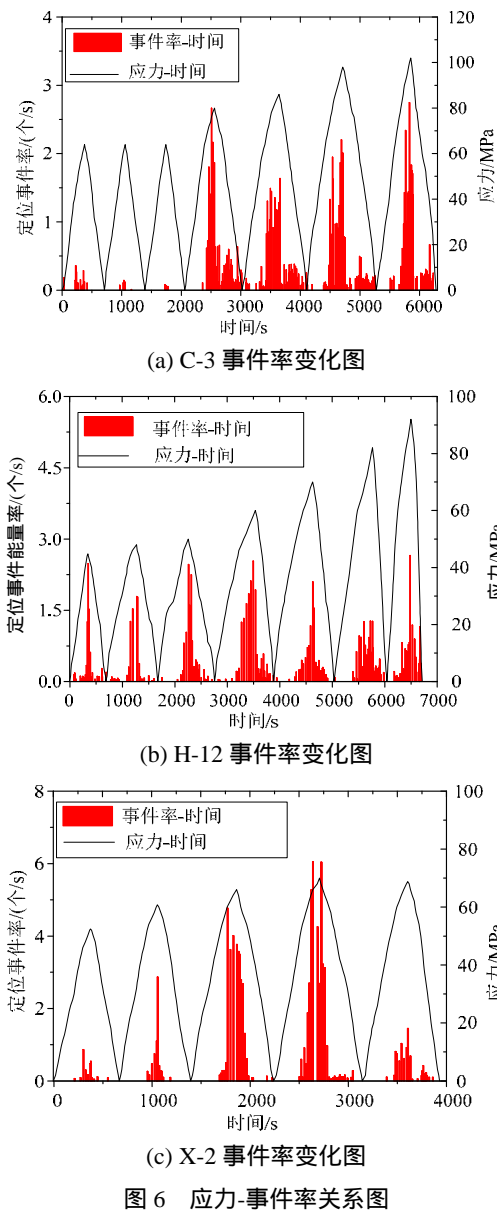


图6 应力-事件率关系图

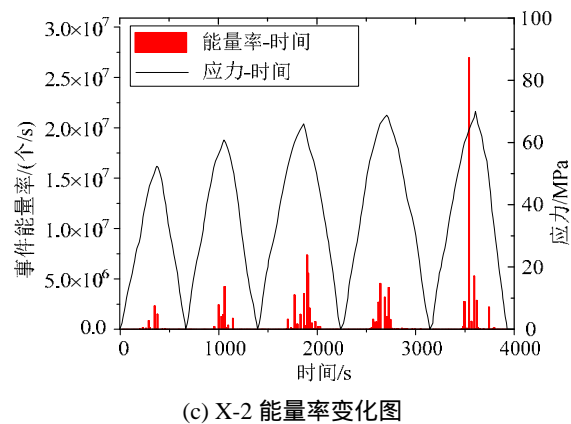
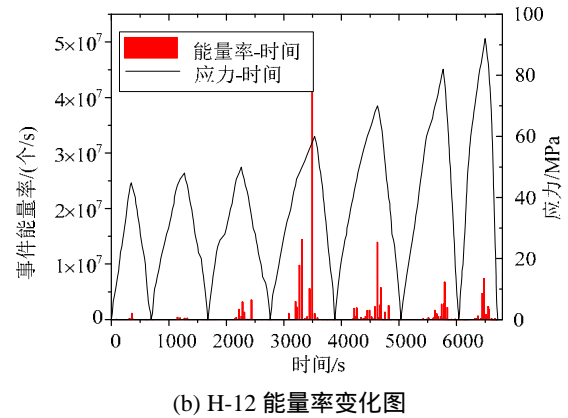
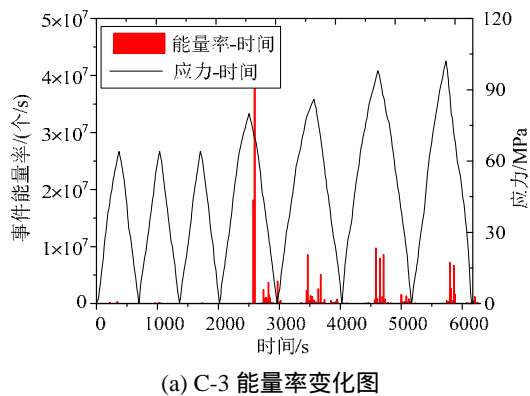


图7 应力-能量率关系图

Fig.7 Relationship between stress and energy rate

3.2 声发射参数分形特征分析

表2为三种岩石试样不同加卸载循环阶段根据柱覆盖法计算得出的关联维数 D 和相关系数 R^2 。表3和表4分别为事件率和能量率在不同加卸载循环阶段按 G-P 算法得到的关联维数和相关系数。图10、图11和图12分别为三种岩石试样事件率、能量率和声发射事件源空间分布关联维数发展趋势图。限于篇幅，文中仅罗列 C-3 不同加卸载阶段声发射源空间分布和关联维数线性拟合结果，分别如图8和图9所示。

表2 不同循环阶段定位事件空间分布关联维数与相关系数

Table 2 Relevant fractal dimensions and correlation coefficient of spatial distribution under different cycle

循环次数	X-2		C-3		H-12	
	D	R^2	D	R^2	D	R^2
1	2.9594	0.9592	3.5858	0.9695	3.4611	0.9867
2	2.9465	0.9892	4.1160	0.8682	2.9279	0.9822
3	2.7598	0.991	4.7830	0.9601	2.8813	0.9971
4	2.4399	0.9969	2.8188	0.9823	2.8512	0.9874
5	2.3367	0.9968	2.6405	0.9862	2.5954	0.9881
6	—	—	2.5791	0.9889	2.5529	0.9880
7	—	—	2.4793	0.9934	2.5327	0.9800

表 3 不同循环阶段事件率关联维数与相关系数
Table 3 Relevant fractal dimensions and correlation coefficient of AE rates under different cycle

循环次数	X-2		C-3		H-12	
	D	R ²	D	R ²	D	R ²
1	0.4447	0.9807	0.4489	0.9944	0.3501	0.9894
2	0.3862	0.9939	0.3094	0.9699	0.2909	0.9894
3	0.3502	0.9697	0.2975	0.9925	0.2765	0.8512
4	0.2771	0.9328	0.2571	0.9882	0.2715	0.8996
5	0.2835	0.9828	0.2234	0.9893	0.1619	0.9843
6	—	—	0.2068	0.9431	0.1174	0.9372
7	—	—	0.2036	0.9188	0.1252	0.9651

表 4 不同循环阶段能量率关联维数与相关系数
Table 4 Relevant fractal dimensions and correlation coefficient of energy rates under different cycle

循环次数	X-2		C-3		H-12	
	D	R ²	D	R ²	D	R ²
1	0.2661	0.8788	0.3306	0.9437	0.2626	0.8016
2	0.2273	0.8923	0.3739	0.7942	0.2481	0.9283
3	0.2038	0.9326	0.3219	0.8033	0.2344	0.8931
4	0.1926	0.9218	0.2320	0.9199	0.1757	0.8668
5	0.1958	0.9583	0.2017	0.9952	0.1651	0.9093
6	—	—	0.2052	0.9634	0.1521	0.9349
7	—	—	0.1979	0.9214	0.1512	0.9616

从声发射源空间分布关联维数线性拟合图(图 8)中可以看出, C-3 在第二、三次加卸载循环阶段关联维数较高, 且具有上升趋势, 这表明声发射源空间分布呈无序化发展。由表 1 中各加载循环阶段应力百分比表明, C-3 前三次加卸载循环为等压加卸载。由声发射定位事件发展图(图 9)可知, 第二、三加卸载阶段声发射事件较少, 且分布随机。这说明受到等压加卸载的影响, 重新加载至先前应力水平时声发射事件稀少且分布杂散, 关联维数值较高。

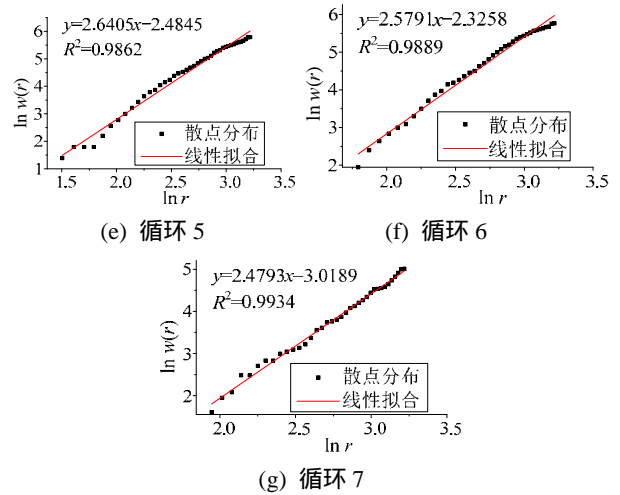
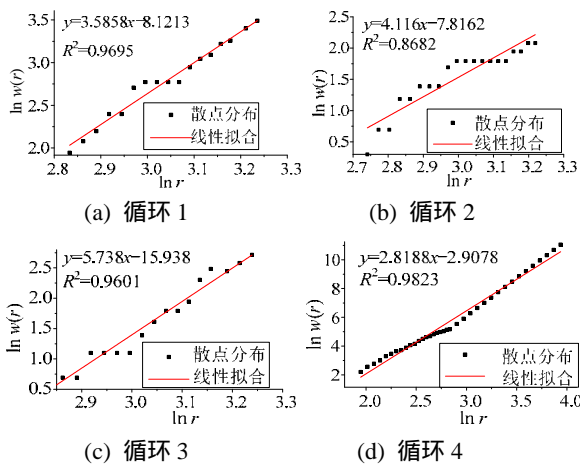


图 8 关联维数线性拟合图

Fig.8 Linear fitting of relevant dimensions

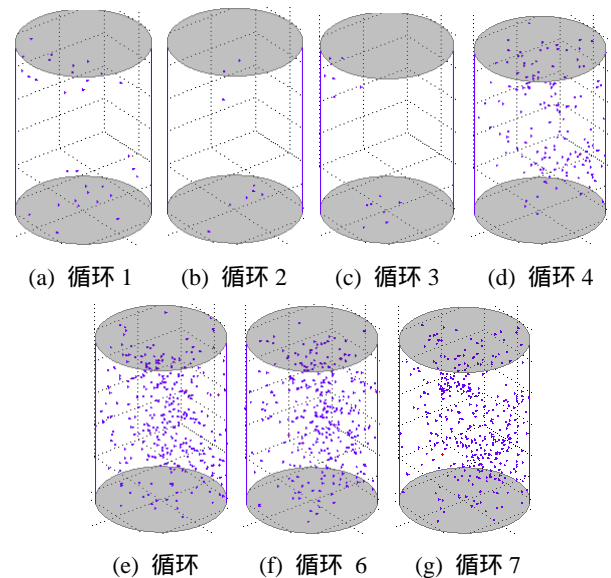


图 9 声发射源空间分布发展图

Fig.9 Development of AE source locating spatial distribution

岩石加载破坏过程中会经历压密阶段、线弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。声发射事件的发展则经历了初始裂隙的闭合, 萌生, 扩展成核和贯通破坏等过程。初始裂纹和原生缺陷的分布存在随机性, 而在较高应力条件下, 岩石试样内部的裂纹发展趋于局部化, 在空间分布上体现为集中化, 这实际是破裂损伤的有序化。通过对第一次加卸载循环中声发射源空间分布关联维数进行对比分析可知, X-2 关联维数较 H-12 和 C-3 低。从表 1 可知, H-12 和 C-3 第一次加卸载循环中应力百分比较低, 岩石试样处于线弹性阶段, 声发射事件源分布较为弥散。相比之下, X-2 应力水平较高, 试样处于弹塑性阶段, 内部出现局部性损伤破坏, 声发射定位事件空间分布较为规律、有序。结合图 9 其它加卸载

循环下声发射源空间分布和图 8 所示线性拟合斜率变化可知,随着应力百分比的增加,空间定位事件集中程度越来越高,关联维数不断降低,这表明声发射源空间分布关联维数能够很好地表征岩石试样内部损伤破坏的发展。

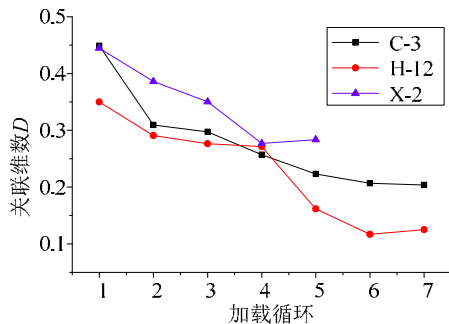


图 10 事件率关联维数变化曲线

Fig.10 Variation curve of relevant fractal dimensions of AE rate

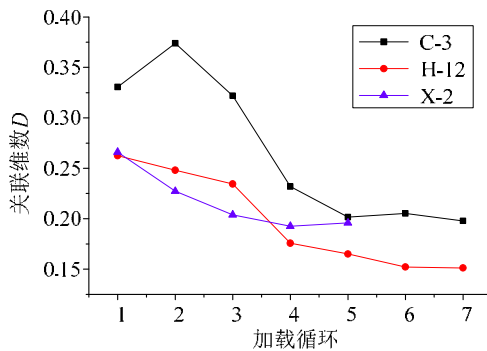


图 11 能量率关联维数变化曲线

Fig.11 Variation curve of relevant fractal dimensions of energy rate

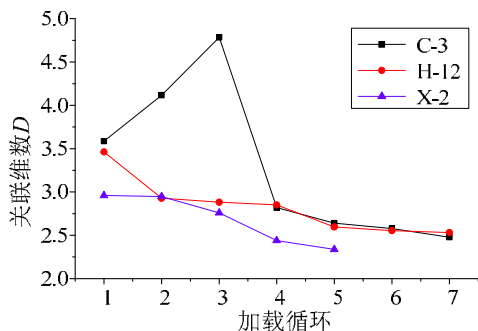


图 12 声发射空间分布关联维数变化曲线

Fig.12 Variation curve of relevant dimensions of spatial distribution

从总体发展趋势上分析,声发射事件空间分布,事件率和能量率关联维数变化均体现出同样特征,即随着加载循环应力百分比的增加,关联维数呈下降趋势并最终趋于稳定。岩石试样破坏前声发射事件空间分布关联维数介于 2.3~2.5,能量率关联维数分布也较为一致,介于 0.15~0.20,事件率分形

维数则比较分散,关联维数介于 0.1~0.30。

从上述分析中可知,岩石破坏过程中声发射事件空间分布,事件率和能量率均存在分形特征,分形维数能够很好地表征岩石内部损伤破坏的发展过程。随着加卸载循环应力百分比的增加,分形维数呈下降趋势并最终在一定范围内波动。谢和平^[16]在研究中表明岩石破坏过程是一个有序降维、耗能结构的形成过程,尹贤刚等^[5]在试验研究中进一步证实了该观点。本文通过循环加卸载试验研究表明,岩石在破坏前阶段,分维值在稳定范围内波动或保持缓慢下降,这能为工程实际监测中判定岩体失稳破坏提供参考依据。

4 结论

(1) 声发射事件空间分布、事件率和能量率均具有分维特性,分维值的变化能够很好的表征岩石内部损伤破裂的发展。

(2) 随着应力百分比的增加,分维值 D 开始时下降较快,当应力水平达到较高时,分维值在较小的区间内波动或下降得极其缓慢,可以作为岩石破坏失稳的前兆。

(3) 柿竹园和大红山三种岩石试样加载破坏时,能量率分形维数介于 0.15~0.20,事件空间分布分形维数介于 2.3~2.5,这可作为运用微震监测进行矿山岩体失稳破坏预测的参考依据。

参考文献:

- [1] 勝山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 3 7. Katsuyama K. Application of AE techniques [M]. Translated by Feng Xiating. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1996: 3 7. (in chinese)
- [2] Blake W. Microseismic applications for mining: a practical guide [M]. Bureau of Mines, US Department of the Interior, 1982: 52 83.
- [3] 雷兴林, 马瑾, 楠濂勤一郎, 等. 三轴压缩下粗晶花岗岩闪长岩声发射三维分布及其分形特征[J]. 地震地质, 1991, 13(2): 97 114. Lei Xinglin, Ma Jin, Kusunose K, et al. Spatial distribution and fractal structure of AE focuses of Inada granite under triaxial compression[J]. Seismology and Geology, 1991, 13(2): 97 114. (in Chinese)
- [4] Kusunose K, Lei X, Nishizawa O, et al. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1991, 67(1): 194 199.
- [5] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特

- 征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3512 3516.
- Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan. Study on strength fractal features of acoustic emission in process of rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3512 3516. (in Chinese)
- [6] 张茹, 谢和平, 刘建峰, 等. 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 Heping, Liu Jianfeng, et al. 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. (in Chinese)
- [7] 许江, 唐晓军, 李树春, 等. 周期性循环载荷作用下岩石声发射规律试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1241 1246.
- Xu Jiang, Tang Xiaojun, Li Shuchun, et al. Experimental research on acoustic emission rules of rock under cyclic loadig [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1241 1246. (in Chinese)
- [8] Kiyoo Mogi. Experimental rock mechanics [M]. London, UK: Taylor & Francis Group, 2007: 263 286.
- [9] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147 152.
- Li Shulin, Tang Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 147 152. (in Chinese)
- [10] 张浪平, 余怀忠, 尹祥础, 等. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 228 235.
- Zhang Langping, Yu Huaizhong, Yi Xiangchu, et al. Application of the load/unload response ratio method in catastrophic failure prediction of structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 228 235. (in Chinese)
- [11] 王利, 毛原春, 叶金生, 等. 基于微缺陷成核系列的岩石微裂纹生长和损伤演化模型[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 278 286.
- Wang Li, Mao Yuanchun, Ye jinsheng, et al. Models for microcracks extension and damage evolution based on number series of microdefects nucleation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 278 286. (in Chinese)
- [12] 梁忠雨, 高峰, 蔺金太, 等. 单轴下岩石声发射参数的分形特征[J]. 力学与实践, 2009, 31(1): 43 46.
- Liang Zhongyu, Gao Feng, Lin Jintai, et al. Fractal analysis of the process parameter of rock's acoustic emission under uniaxial compression [J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(1): 43 46. (in Chinese)
- [13] Hirata T, Satoh T, Ito K. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock [J]. Geophysical Journal International, 1987, 90(2): 369 374.
- [14] Xie H P, Liu J F, Ju Y, et al. Fractal property of spatial distribution of acoustic emissions during the failure process of bedded rock salt [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1344 1351.
- [15] 裴建良, 刘建峰, 张茹, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声发射事件空间分布的分维特征研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 51 55.
- Pei Jianliang, Liu Jianfeng, Zhang Ru, et al. Fractal study on spatial distribution of acoustic emission events of granite specimens under uniaxial compression [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(6): 51 55. (in Chinese)
- [16] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 198 206.
- Xie Heping. Introduction to fractal rock mechanics [M]. Beijing: Science press, 1996: 198 206. (in Chinese)