

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0815-06

岩石声发射混沌特征分析

周小平, 刘庆义

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 岩石等脆性材料在加载过程中, 随着荷载的增加, 材料内部的微裂纹产生、扩展并伴随着声发射现象的发生。声发射是研究脆性材料破坏的良好工具。对砂岩、细砂岩和高丽山砂岩 3 类岩石进行了声发射试验, 记录了加载及破坏过程中产生的声发射信号, 并且采用混沌动力学理论研究了 3 类岩石的声发射活动规律, 计算了岩石的关联维数和最大 Lyapunov 指数。研究结果表明, 岩石加载及破坏过程具有混沌特征, 用相空间重构法可以较好地揭示岩石破坏过程的动力学特征, 这为混沌理论在岩石、岩体声发射其他领域的研究及应用奠定了基础。

关 键 词: 岩石声发射; 混沌; 关联维数; 最大 Lyapunov 指数

中图分类号: TU 459⁺.3

文献标识码: A

Research on chaotic characteristics of rock acoustic emission

ZHOU Xiao-ping, LIU Qing-yi

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Acoustic emission (AE), which is produced with the load increasing, is a ubiquitous phenomenon associated with brittle fracture in many brittle materials such as rock. AE technique is better than other methods in researching failure of brittle materials. AE is tested in rock specimen under loading and breakage, and the signal of AE is recorded. Action laws of AE in rocks are studied by using chaotic kinetics. According to the recorded experimental data, the correlation dimension and the maximum Lyapunov exponents are calculated. It is shown from numerical results that the loading and failure process of rock possesses chaotic characteristics. Based on the theory of phase space reconstruction, it is well revealed their kinetic characteristics during the failure process. It is a basis for applying chaos theory to research rock acoustic emission.

Key words: rock acoustic emission; chaos; correlation dimension; maximum Lyapunov exponent

1 引 言

岩石受力变形时, 原来存在的或新产生的裂隙的周围区域产生应力集中, 应变能较高, 当外力增加到一定大小时, 在有缺陷的部位发生了微观屈服或变形, 裂缝扩展, 从而使得应力弛缓, 贮藏能量的一部分将以弹性波(声波)的形式释放出来, 这就是声发射现象^[1]。岩石声发射是岩石内部被破坏的表现, 反映了岩石破坏的能量耗散, 它对于工程岩体稳定性预测预报有重要意义^[2]。

在对声发射监测数据的处理中, 人们主要分析声发射事件发生的频度, 其次分析其能量释放率。所以声发射参数的变化被广泛用作预测岩体破坏的

前兆因素。部分观测结果表明: 岩体破坏之前出现声发射反常现象, 但反常并不一定表征岩体发生破坏; 一些岩体破坏发生在声发射活跃期, 而另一些则不然^[3]。所以研究工程岩体声发射的关键是寻找岩体失稳的前兆特征。虽然已有的研究成果证实岩体变形过程中声发射活动是预报工程岩体失稳最有用的前兆信息, 但由于以往对声发射活动的时空分布规律及活动模式缺乏系统的研究, 因而不能正确有效地利用所监测的信息进行工程岩体稳定性辨识^[4]。

混沌(chaos)是研究非线性动力系统中出现的内在随机性, 具有初始值敏感性、内在随机性及遍历性等特性^[5]。大量的有关混沌的研究表明, 单向压缩下岩石微裂纹的演化^[6]、瓦斯解析指标^[7]、岩

收稿日期: 2008-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 50778184); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-07-0911); 重庆市杰出青年科学基金 (No.CSTC,2009BA4046)。

第一作者简介: 周小平, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程教学与科研工作。

质边坡位移的发展^[8]、岩层运动过程^[9]等都具有混沌特征。

本文对岩石试件加载及破坏过程的声发射进行了试验,对采集到的声发射数据进行了动力学研究,并应用关联维数法和最大 Lyapunov 指数法对声发射时间序列进行了基础性判定,为混沌理论在岩体声发射领域的研究及应用奠定了基础。

2 岩石声发射混沌原理的研究

2.1 岩石声发射时间序列相空间重构

为了从时间序列中提取更多有用信息, Packard 等人提出用时间序列重构相空间的方法,相空间重构中普遍采用坐标延迟的相空间重构法^[10]。坐标延迟法的本质是通过一维时间序列 $\{x(n)\}$ 的不同时间延迟来构造 m 维相空间矢量:

$$x(i) = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)\} \quad (1)$$

Takens 等提出嵌入定理:对于无限长、无噪声的 d 维混沌吸引子的标量时间序列 $\{x(n)\}$,总可以在拓扑不变的意义上找到一个 m 维的嵌入空间,只要维数 $m \geq 2d+1$ ^[11]。该定理保证可以从一维混沌时间序列中重构一个和原动力系统拓扑意义下等价的相空间^[10]。

2.2 互信息量法确定延迟时间

互信息方法是估计重构相空间延迟的一种有效方法,它在相空间重构中有广泛的应用。Shaw 首先提出以互信息第 1 次达到极小值的滞时作为相空间重构的时间延迟。对于时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 互信息函数的计算步骤如下:

将数据归一化, $x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$, $x'_i \in [0, 1]$, 设

置划分盒子的数目为参数 b , 令 x'_i 乘以参数 b 并取整数部分得 $\tilde{x}_i$, 则 $\tilde{x}_i$ 为 $0, 1, 2, \dots, b-1$, 即 $\tilde{x}_i$ 为 b 个整数中的一个,从而将数据序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 划分到 b 个盒子中。选取最大延迟时间为参数 t , 则延迟时间 τ 可以为 $1, 2, \dots, t$ 的逐渐增加的值。则对于不同的 τ 计算其互信息量为

$$I(\tau) = I(x_i) + I(x_{i-\tau}) - I(x_i, x_{i-\tau}) = -\sum_{i=\tau}^n P(x_i) \lg P(x_i) - \sum_{i=\tau}^n P(x_{i-\tau}) \lg P(x_{i-\tau}) + \sum_{i=\tau}^n P(x_i, x_{i-\tau}) \lg P(x_i, x_{i-\tau}) \quad (2)$$

其中: $P(x_i, x_{i-\tau}) = \frac{N(x_i, x_{i-\tau})}{N} = \frac{N(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-\tau})}{n-\tau}$;

$$P(x_i) = \frac{N(x_i)}{N} = \frac{N(\tilde{x}_i)}{n-\tau}; P(x_{i-\tau}) = \frac{N(x_{i-\tau})}{N} = \frac{N(\tilde{x}_{i-\tau})}{n-\tau}。$$

式中: N 为总的相点数; $N(x_i)$ 为 x_i 所在盒子 $\tilde{x}_i$ 中的数据个数, 即 $N(\tilde{x}_i)$; $N(x_i, x_{i-\tau})$ 为 $x_i, x_{i-\tau}$ 所在的盒子 $\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-\tau}$ 中的数据个数对, 即 $N(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-\tau})$ 。绘出 $I(\tau)$ 关于延迟时间 τ 的曲线图, 根据互信息量第 1 次降低到极小值时对应的时间 $\tau_{\min}$ 作为相空间重构的时间延迟 τ 。

2.3 关联维数方法确定嵌入维数

从理论上讲, 由于关联维数具有吸引子的几何性质, 当嵌入维数 m 大于最小嵌入维数时, 几何结构被完全打开, 此时关联维数与嵌入维数无关, 于是选择关联维数停止变化时的嵌入维 m 为重构的相空间维数^[12]。Grassberger 和 Procaccia 提出的从时间序列计算吸引子关联维的 G-P 算法, 或者 G-P 关联积分法。这种算法不仅可以得出吸引子的关联维数, 并且可以得出重构相空间的嵌入维数。

关联积分 $C_n(r)$ 在 $r \rightarrow 0$ 时与 r 存在以下关系^[5]:

$$\lim_{r \rightarrow 0} C_n(r) \propto r^{D_2} \quad (3)$$

式中: D_2 为关联维数, 选取适当的 r 值, 使得 D_2 能够描述混沌吸引子的自相似结构。由式(3)的近似数值求得关联维数为

$$D_2 = \frac{\ln C_n(r)}{\ln r} \quad (4)$$

计算中, 通常给定 r 值范围 $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$, 按一定增长幅度使 r 值变化。嵌入维数 m 的值也是选定一个范围, 逐渐变化。一般地给出 m 的最大可能值 $m_{\max}$, 然后从 1 开始, 每次增加 1, 逐渐增加到 $m_{\max}$ 。如果序列 $\{y_i\}$ 中有混沌吸引子存在, 那么随着 m 的增加, D_2 趋于饱和值 D , 即双对数关系 $\ln C(r) - \ln r$ 中的直线段斜率。用最小二乘法拟合该直线段, 此直线的斜率 k 即为时间序列 $\{y_i\}$ 的关联维数 D 。而重构相空间的延迟时间 τ 按照前面计算结果取值。

2.4 岩石声发射时间序列的最大 Lyapunov 指数法

最大 Lyapunov 指数是判断和描述非线性时间序列是否为混沌系统的重要参数, 因此, 是一个重要的混沌不变量。在 Lyapunov 指数 $\lambda < 0$ 的方向, 相体积收缩, 运动稳定, 且对初始条件不敏感; 在 $\lambda > 0$ 的方向, 轨道迅速分离, 长时间行为对初始条件敏感, 运动呈现混沌状态; $\lambda = 0$ 对应稳定边界, 属于一种临界状况。若系统最大 Lyapunov 指数 $\lambda > 0$, 则系统一定是混沌的^[11]。由于岩石声发射时间序列的样本量有限, 本文采用小数据量方法^[11] (分离因子图法) 计算最大 Lyapunov 指数。小数据量法计算最大 Lyapunov 指数, 具有计算量小, 对小

数据量可靠, 可用于有噪声的情况等优点^[11]。根据文献[13], 采用普遍应用的相空间重构法(Wolf法)计算的最大 Lyapunov 指数值要大于小数据量方法计算的最大 Lyapunov 指数值, 并且 Wolf 法计算的最大 Lyapunov 指数的偏差较大。因此, 本文采用小数据量方法计算最大 Lyapunov 指数。

对于重构的相空间 Y_i , 以参考相点 y_i 及其在相空间内的最邻近相点 y_{ir} 作为相邻轨道的起始点, 考察相邻轨道的指数分离情况。在时间下标为 i 的时刻, 轨道的距离为初始距离(采用欧几里德距离):

$$\delta_0^i = \|y_i - y_{ir}\| = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{i-(k-1)r} - x_{ir-(k-1)r})^2} \quad (5)$$

两个轨道随着时间的演化, 相点的时间下标增大 s 个采样时间步长, 则初始距离改变为距离

$$\delta_s^i = \|y_{i+s}, y_{ir+s}\| = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{i+s-(k-1)r} - x_{ir+s-(k-1)r})^2} \quad (6)$$

由于混沌系统的轨道分离具有指数分离特点, 即 $\delta_s = \delta_0 e^{\lambda s}$, 则最大 Lyapunov 指数 λ 表示为

$$\lambda = \frac{\ln(\delta_s / \delta_0)}{s} = \frac{\ln \delta_s}{s} - \frac{\ln \delta_0}{s} \quad (7)$$

如果对 N 个相点及其邻近点经过 s 步演化后的分离距离取整平均值^[14]

$$\bar{\delta}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\delta_s^i}{\delta_0^i} \right) \quad (8)$$

然后取其自然对数, 绘出 $\ln \bar{\delta}_s - s$ 的曲线图, 选取曲线图中的线性部分进行直线拟合, 所得的斜率是全局最大 Lyapunov 指数。

3 岩石声发射时间序列混沌特征

3.1 实验方法与条件

岩石加载系统采用 AG-I 材料试验机液伺控制加载, 采用位移控制加载速率 0.05 mm/min。声发射监测系统采用美国 PCA 公司生产的 PCI-2 声发射仪进行监测, 监测采样的时间间隔为 50 μ s, 为了减少噪声干扰, 选择高声信号触发电平为 3.6~4.0 mV, 前置放大器增益为 40 dB, 整个试验过程保持加载系统与声发射监测系统同步。

本试验所采用的岩石试样为砂岩、细砂岩和高丽山砂岩, 将试件加工成圆柱体形, 直径为 63 mm, 高为 126 mm, 并在柱面上磨出两个对称的平面以放置声发射探头, 平面尺寸为 15 mm $\times$ 100 mm, 平面上涂抹凡士林, 以保证声发射信号的正常接受,

并在压头与试件接触的部分采用橡胶皮垫进行隔离, 以防止压力机压头对声发射信号的影响。

3.2 测试结果及分析

对岩样进行了单轴压缩试验, 同时测定了声发射信号, 岩样声发射时间曲线如图 1~3 示。在试验的初始阶段, 声发射信号较少, 不适宜进行混沌分析, 因此, 在声发射信号开始出现时起, 对信号进行了提取。岩石声发射信号采集过程中, 因为噪声影响, 难免使采集的数据不够准确, 本文在分析前运用小波变换方法对数据进行了去噪处理。

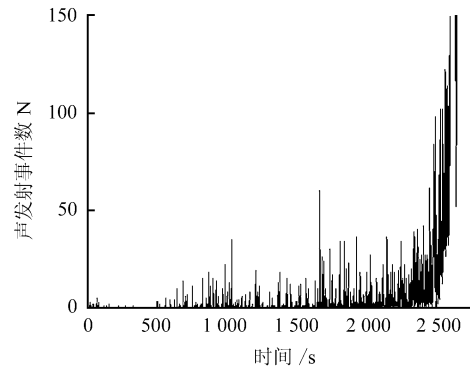


图1 砂岩声发射时间序列图

Fig.1 Acoustic emission time series of sandstone

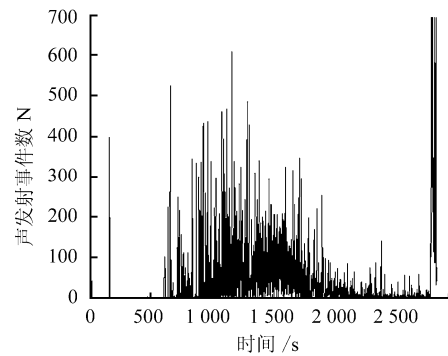


图2 细砂岩声发射时间序列图

Fig.2 Acoustic emission time series of fine sandstone

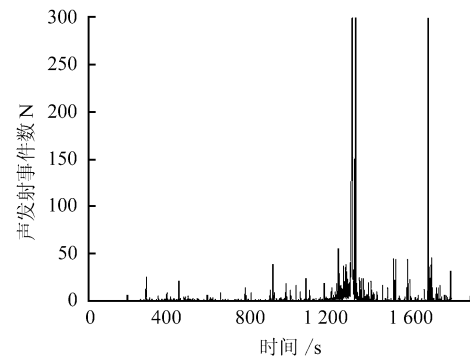


图3 高丽山砂岩声发射时间序列图

Fig.3 Acoustic emission time series of Gaolishan sandstone

下面主要以砂岩为例来说明岩石声发射混沌特性的分析过程。首先利用平均互信息量达到最小值时的延迟作为 τ 的选择, 然后对砂岩声发射时间序列进行分析, 从而得到该序列平均互信息量随延迟时间的变化 (图 4)。从图 4 可以看出, 该序列的平均互信息量达到极小值时的时间为 $\tau = 6$ 。

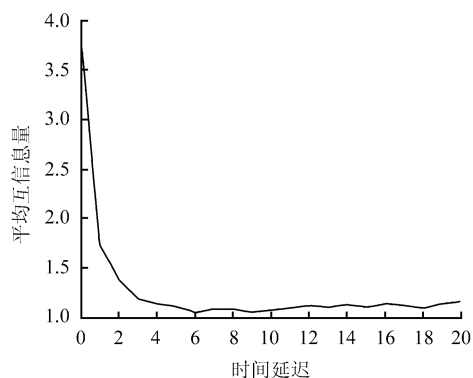


图 4 岩石声发射时间序列的互信息量曲线
Fig.4 Mutual information of AE time series

利用砂岩声发射时间序列, 计算并绘制延迟时间 $\tau = 6$ 、 $m = 1, 2, \dots, 9$ 时的 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线图, 如图 5 所示。

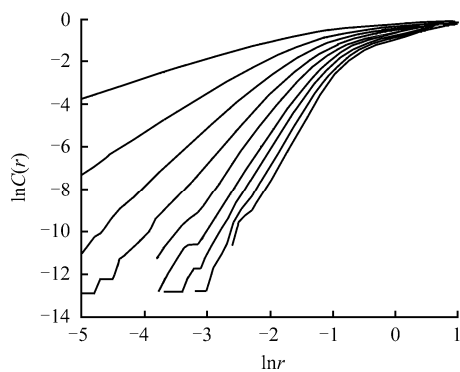


图 5 关联积分法的 $\ln C(r) - \ln r$ 曲线
Fig.5 $\ln C(r) - \ln r$ curves of correlation integral method

图 5 中曲线从上到下分别对应 $m = 1, 2, \dots, 9$ 的 $\ln C(r) - \ln r$ 关系曲线。从图 5 中曲线可以看出, $\ln C(r)$ 在 $\ln r$ 的区间上总有一段线性很好的标度区, 当 m 较小时, 直线部分斜率较小, 彼此之间的间隔较大, 随着 m 的增加, 直线部分的斜率逐渐增大, 间隔变小, 且逐渐靠拢。计算每条曲线相应标度区, 计算其斜率, 即为关联维数。

由图 6~8 可以发现, 随着嵌入维数 m 的增加, 关联维数很快就不再有明显的变化, 即砂岩声发射信号的关联维数是收敛的。当 $m \geq 9$ 时, 直线间趋

于平行, 这时曲线的直线部分趋于稳定值, 即饱和关联维数 D 趋于稳定值。因饱和关联维数 D 是较小的分维数, 这表明砂岩、细砂岩和高丽山砂岩声发射时间序列存在混沌特性。

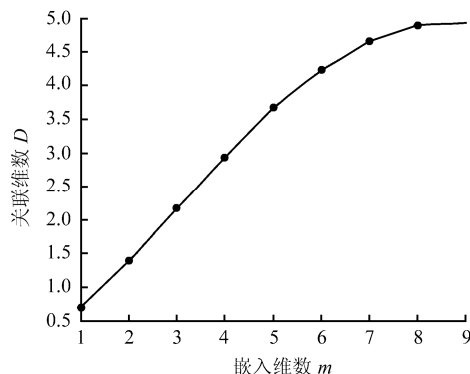


图 6 砂岩不同嵌入维数关联维数图
Fig.6 Correlation dimension of different embedding dimensions of sandstone

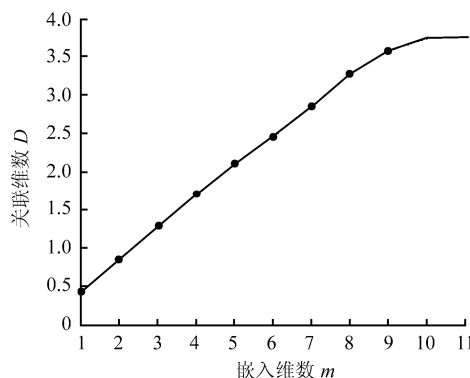


图 7 高丽山砂岩不同嵌入维数关联维数图
Fig.7 Correlation dimension of different embedding dimensions of Gaolishan sandstone

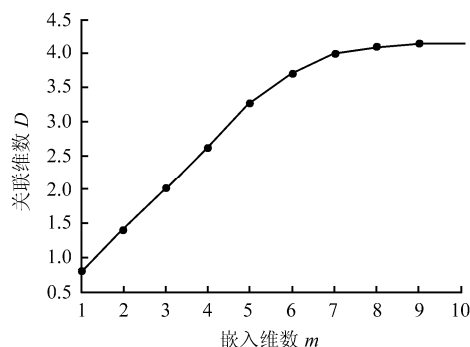


图 8 细砂岩不同嵌入维数关联维数图
Fig.8 Correlation dimension of different embedding dimensions of fine sandstone

采用前面计算的结果, 计算砂岩的最大 Lyapunov 指数。取嵌入维数 $m = 9$, 时间延迟 $\tau = 6$ 来重构相空间, 确定 $\ln \bar{\delta}_s - s$ 即分离因子与时间关系的曲线, 图中时间单位为秒 (图 9)。

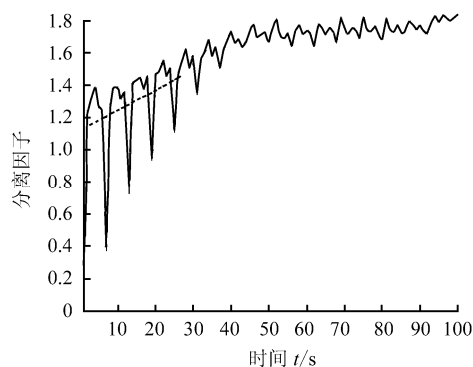


图9 砂岩声发射时间序列 Lyapunov 指数
Fig.9 Maximum Lyapunov exponents of
AE time series of sandstone

从图9中可以看出,在初始阶段曲线上出现多个波峰跳跃,但其跳跃阶段的顶点明显位于同一直线上,具有线性规律。对曲线的波峰部分作直线拟合,拟合直线如图9中虚线所示,斜率明显大于0。其拟合直线斜率即为最大 Lyapunov 指数值,结果为 $0.0124 > 0$,表明砂岩声发射时间序列存在混沌现象。

同时对细砂岩和高丽山砂岩进行了声发射序列的混沌分析,如图10、11示,图中时间单位为秒。拟合直线分别如图10和11中虚线所示,拟合直线斜率分别为0.0161和0.0425,都大于0,表明细砂岩和高丽山砂岩声发射时间序列均存在混沌现象。从图9~11可以看出,砂岩的最大 Lyapunov 指数值最小,细砂岩的次之,高丽山砂岩的最大,这说明高丽山砂岩的声发射时间序列的混沌特性最明显,其次是细砂岩,最后是砂岩。

3.3 岩石破坏声发射前兆特征

根据分维的概念,仅由声发射时间序列本身确定维数是有很大的局限的。一方面,由于它是许多点的集合,因而其维数大于0;另一方面,这些点又散落在一数轴上,并非布满全轴,自然其维数是

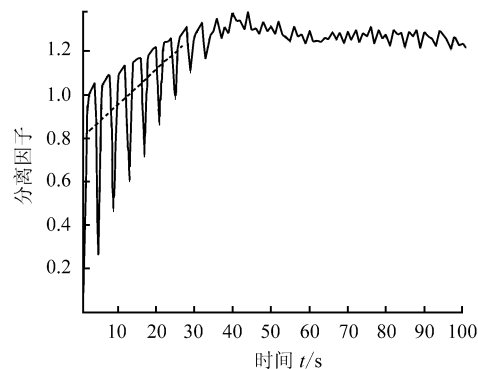


图10 细砂岩声发射时间序列 Lyapunov 指数
Fig.10 Maximum Lyapunov exponents of
AE time series of fine sandstone

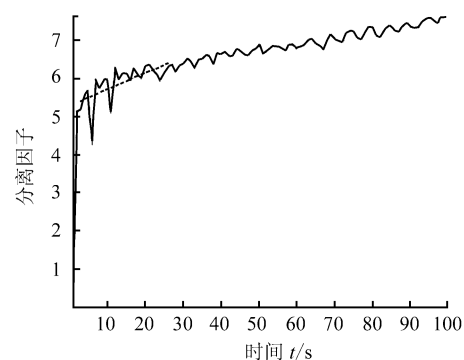


图11 高丽山砂岩声发射时间序列 Lyapunov 指数
Fig.11 Maximum Lyapunov exponents of
AE time series of Gaolishan sandstone

小于1的。所以,从这样的数据序列出发,研究维数大的动力系统的演化及动力特性,就必须对原数据序列进行拓展处理。目前最常用的就是延迟时间法,用此方法对岩石声发射时间序列进行相空间重构。

根据单轴加载情况下岩石声发射时间序列具有混沌分形特征,利用声发射时间序列关联维数计算公式,绘出各岩样随时间变化的关联维数曲线,如图12所示。

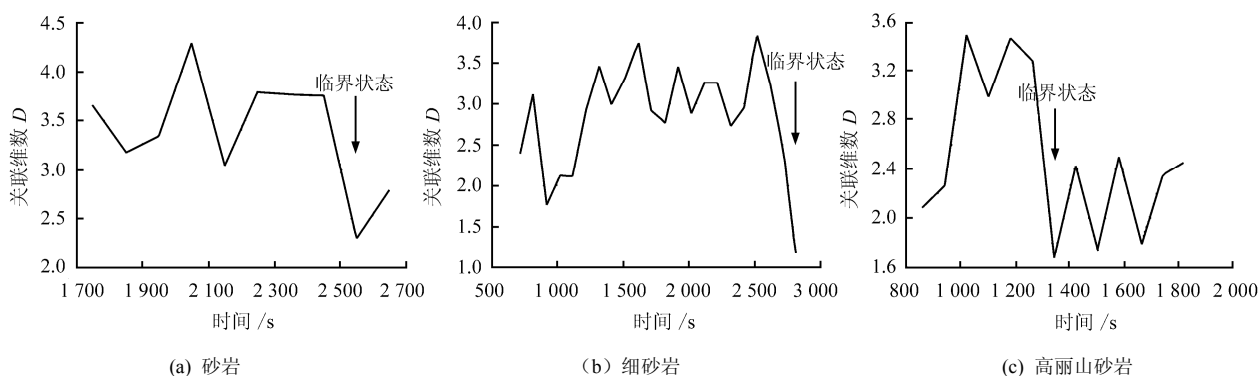


图12 岩石加载过程中声发射关联维数变化曲线
Fig.12 Correlation dimension of rock AE in loading

由图 12 可知,在岩石试件加载至破坏过程中,声发射过程的关联维数会发生一系列变化,在临界断裂状态下,声发射参数的关联维数所表现出的识别特征为“最大-最小”模式,或称为“突降”模式。而在临界状态下关联维数的降低则标志着声发射过程有序度的提高。因此,分形维数可以作为岩石材料出现临界断裂的识别特征。在进行岩层断裂、岩石试样的破坏预测时,综合应用声发射时间序列的 Lyapunov 指数等基本参数和混沌分形理论中的分形模型,可望实现对岩石(体)破坏进行预测。

4 结 论

(1) 通过相空间重构理论,分别对砂岩、细砂岩和高丽山砂岩进行了混沌动力学研究,并应用关联维数法和最大 Lyapunov 指数法对声发射时间序列进行了基础性判定。结果表明,岩石声发射时间序列的复杂变化是其内在动力学机制演化的结果,岩石声发射序列存在混沌特征。

(2) 混沌理论具有初始值敏感性、内在随机性及遍历性等特性,本文的研究为混沌理论在岩石、岩体声发射其他领域的研究及应用奠定了基础。

(3) 在进行岩层断裂、岩石试样的破坏预测时,综合应用声发射时间序列的 Lyapunov 指数等基本参数和混沌分形理论中的分形模型,可望实现对岩石(体)破坏进行预测。

参 考 文 献

- [1] 陈颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312—322.
CHEN Yong. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1977, 20(4): 312—322.
- [2] 唐春安. 岩石声发射规律数值模拟初探[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 368—374.
TANG Chun-an. Numerical simulation of AE in rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 368—374.
- [3] 唐绍辉, 吴壮军. 岩石声发射活动规律的理论与试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(1): 16—18.
TANG Shao-hui, WU Zhuang-jun. The theory of sonic emission activity rule of rock mass and relevant experiments[J]. **Mining Research and Development**, 2000, 20(1): 16—18.
- [4] 李夕兵, 刘志祥. 岩体声发射混沌与智能辨识研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1296—1300.
LI Xi-bing, LIU Zhi-xiang. Research on chaos and intelligent identification of acoustic emission in rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(8): 1296—1300.
- [5] 陈士华, 陆君安. 混沌动力学初步[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998.
- [6] 尹光志, 鲜学福, 许江, 等. 岩石细观断裂过程的分叉与混沌特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(2): 56—59.
YIN Guang-zhi, XIAN Xue-fu, XU Jiang, et al. Research on bifurcation and chaos characteristics of meso-scope fracture process of rock[J]. **Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)**, 2000, 23(2): 56—59.
- [7] 高雷阜. 煤与瓦斯突出的混沌动力系统演化规律研究[博士学位论文 D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [8] 苏付安, 盛松涛, 陈红萍. 边坡位移预测的混沌时间序列分析方法应用研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(6): 5—7.
SU Cun-an, SHENG Song-tao, CHEN Hong-ping. The application research of slope displacement forecasting by chaos time series[J]. **Central South Highway Engineering**, 2006, 31(6): 5—7.
- [9] 谭云亮, 孙中辉. 矿区岩层运动非线性动力学特征及预测研究的基本框架[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 51—54.
TAN Yun-liang, SUN Zhong-hui. Research skeleton of nonlinear dynamical features and prediction for strata motion in mine[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2000, 11(2): 51—54.
- [10] 陈铿, 韩伯棠. 混沌时间序列分析中的相空间重构技术综述[J]. 计算机科学, 2005, 32(4): 67—70.
CHEN Keng, HAN Bo-tang. A survey of state space reconstruction of chaotic time series analysis[J]. **Computer Science**, 2005, 32(4): 67—70.
- [11] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [12] 张雨, 任成龙. 确定重构相空间维数的方法[J]. 国防工业大学学报, 2005, 27(6): 101—105.
ZHANG Yu, REN Cheng-long. The methods to confirm the dimension of reconstructed phase space[J]. **Journal of National University of Defense Technology**, 2005, 27(6): 101—105.
- [13] 卢宇, 陈宇红, 贺国光. 应用改进型小数据量法计算交通流的 Lyapunov 指数[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 28(1): 85—90.
LU Yu, CHEN Yu-hong, HE Guo-guang. The computing of maximum Lyapunov exponent in traffic flow applying the improved small-data method[J]. **Systems Engineering-Theory & Practice**, 2007, 28(1): 85—90.
- [14] PARLITZ U. Nonlinear time-series analysis[M]. Nonlinear Modeling: Advanced Black-Box Techniques, New York: John Wiley, 1998: 209—239.