

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 05 - 0562 - 04

煤样压缩破坏过程的声发射试验

杨永杰, 陈绍杰, 韩国栋

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 对煤样进行了单轴压缩条件下的声发射试验, 通过对能量计数率的最大 Lyapunov 指数计算, 证明煤岩破裂过程并非呈现混沌, 而是可以通过声发射信息预测的. 对能量计数率进行小波系数分解, 进一步计算得到各尺度的 Lipschitz 指数. 结果表明, 可以用最先出现的负值所对应的时间作为煤样破裂预测时间.

关键词: 煤岩; 破坏; 声发射; 混沌; Lipschitz 指数; 预测

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

Experimental on acoustic emission during compression rupture procedure of coal sample

YANG Yong-jie, CHEN Shao-jie, HAN Guo-dong

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Acoustic emission experiment under uniaxial compression of coal samples was carried out. Calculation of the maximum Lyapunov exponent of energy counting frequency proved that there is no chaos in rupture process of coal, and the process of compression rupture can be predicted through acoustic emission information. Through wavelet coefficient decomposition of energy count rate and further calculation obtaining various Lipschitz index. The results show that the time when first become negative can be used as the prediction time of rupture of coal sample.

Key words: coal; rupture; acoustic emission; chaos; Lipschitz index; prediction

当应力达到材料所受的最大先期应力时, 其内部将产生局部弹塑性能量集中, 会有声发射 (acoustic emission, AE) 现象发生^[1,2]. 所谓声发射现象^[3], 是指材料在外界应力作用下, 其内部弹塑性能量积聚到某一临界值之后引起微裂隙的产生与扩展, 同时伴随有弹性波或应力波的传播, 其结果就是声发射. 一般情况下, 声发射信号的强度很弱, 人耳不能直接听到, 需要借助灵敏的电子仪器来检测^[4]. 研究声发射信息与煤样压缩破裂过程的内在关系对于采用声发射监测技术预测煤岩体破裂, 预防煤与瓦斯突出、冲击地压等煤矿井下灾害具有重要意义.

1 试验方法及结果

本次煤样单轴压缩条件下声发射试验的加载系统采用 MTS815.02 电液伺服岩石试验系统. 加载过程采用位移控制方式, 以 0.1 mm/s 的速度加载直到试件破坏且处于平稳的残余变形阶段停止试验.

收稿日期: 2005 - 11 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50474029)

作者简介: 杨永杰 (1965 -), 男, 山东泰安人, 硕士, 副教授. Tel: 0532 - 86057053, E-mail: yyj.6125@163.com

声发射仪型号为 AE-400B 型, 声发射探头采用单分量检波器, 中心谐振频率 120 kHz, 前置放大器增益为 40 dB, 主放大器增益为 40 dB, 调整阈值电压为 1.0 V, 设置声发射事件间隔为 3 ms。探头拾取的声发射信号经前置放大和主放后由声发射仪进一步处理成声发射参数 (事件累计、事件速率、振铃计数、振铃计数率、能量累计、能率等)。本次试验选择 2 个煤岩试件, 分别取自新河矿 3 煤和鲍店矿 3 煤, 按岩石力学实验规范将煤、岩试块加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱型标准试件。试验时将声发射传感器耦合在试件上, 为保证耦合效果, 在探头与试件接触部位涂上一层黄油, 再用胶布等把探头固定。另外, 为尽可能减少端面影响, 声发射检波器应尽可能远离试件上、下端面。

反映声发射特性的参数有多个^[4], 本文采用声发射计数率 (CNT) 和声发射能量计数率 (简称能率, ENE) 来分析煤样压缩过程中的声发射特性。声发射率为单位时间内所观测到的振铃计数, 也称振铃计数率, 声发射率反映了声发射发生的频度, 同时在一定程度上反映了声发射信号的幅度, 因而涉及声发射能量; 声发射能率是指单位时间内所观测的全部事件的发射能的总和, 与所观测到的事件所在波形的幅度值的平方成正比, 反映了声发射的强弱。煤样压缩破坏过程的声发射试验结果如图 1 所示。

煤体的受压变形破坏过程与其内部原生裂隙的压密、新裂隙的产生、扩展、贯通等演化过程密切相关。图 1 表明, 随着加载过程的进行, 声发射事件在经过短暂的平静时期后, 产生声发射事件越来越多, 越来越密集, 在强度值附近, 声发射计数率和能率达到最大值, 煤样的声发射特征较好地反映了其压缩变形和损伤演化过程。进一步分析证实, 能量计数率和振铃计数率的变化规律基本一致, 两种煤样能量计数率和振铃计数率的相关系数分别为 0.88, 0.83, 研究煤样破裂的声发射特征时, 选择其中之一即可。

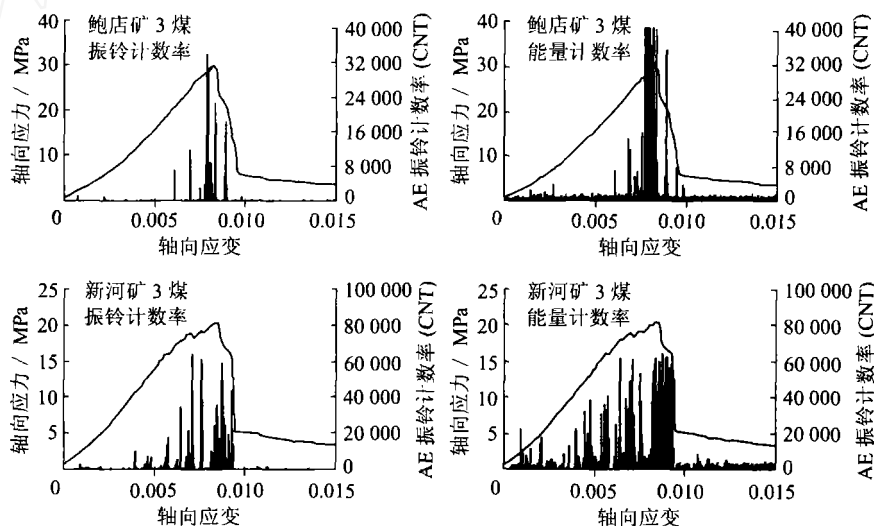


图 1 单轴压缩声发射试验结果

Fig. 1 Test results of acoustic emission under uniaxial compressive condition

2 煤样破裂过程的混沌性判别

试验结果表明, 随着时间 - 加载过程的推移, 声发射现象的时间序列呈现不平稳、不规则, 需要对煤样压缩破坏过程的混沌性加以判断。刻划系统的混沌性, 一个最重要的特征量就是李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 指数^[5]: 负李雅普诺夫指数对应周期窗口; 正李雅普诺夫指数对应混沌区。

从时间序列中提取 L_{Ei} 的意义在于, 判断系统的动力学行为是否为混沌, 指明系统的动力学行为在某方向上是指数发散还是收敛, 给出系统的最大可预报时间尺度。但在实际计算中, 需注重选择使序列分量相关性最小的时滞, 嵌入维数要足够大, 时间序列足够长^[6]。Lyapunov 指数与系统运动特性之间的对应关系为: $L_{Ei} < 0$ 时系统为定常运动; $L_{Ei} = 0$ 时系统为 (准) 周期运动; $L_{Ei} > 0$ 时系统为混沌运动; L_{Ei} 趋于无穷大时系统为随机运动。

选取声发射能率进行分析。每一能量计数率时间序列的 L_{Ei} 判定均选用固定的参数时滞 $\tau = 2$, 而惟一改变嵌入维数 m 进行相空间重构, 直至 $L_{Ei} - m$ 关系曲线形态随 m 的增大由起伏波动而趋于相对平稳, 即

L_{EI} 不再发生有意义的变化, 得到混沌动力学评价指标值饱和嵌入维数 m_c 和 L_{EI} .

系统的 Lyapunov 指数与重构相空间维数 m 的关系如图 2 所示, 其饱和嵌入维数 m_c 和最大 Lyapunov 指数 L_{EI} 鲍店矿 3 煤为 $m_c = 12$, $L_{EI} = -0.019 604$; 新河矿 3 煤为 $m_c = 6$, $L_{EI} = -0.009 318$.

Lyapunov 指数为系统未来趋势是否可以预测提供了重要信息, 在实践中具有重要意义. 最大 Lyapunov 指数大于 0 是判定系统存在混沌的充分条件, 其值也表明了系统混沌的程度. 如果 Lyapunov 指数小于 0, 则判定系统不属于混沌状态. 经过计算发现, Lyapunov 指数是小于 0 的负数, 说明对于加载过程中煤岩破裂声发射能量计数率的未来变化趋势不是完全呈现依赖于初值的混沌状态, 因为它没有表现出完全混沌的状态, 因此, 煤岩压缩破裂过程可以用声发射信息预测.

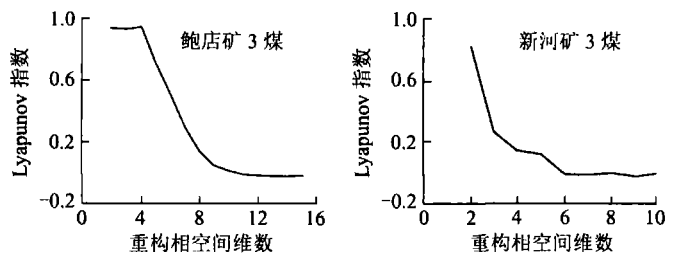


图 2 系统的 $L_{EI} - m$ 关系曲线

Fig. 2 Lyapunov exponent L_{EI} under different dimensions m

3 煤样压缩破裂的声发射预测

3.1 小波分析方法

已知小波函数族^[7] $a_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} [(t-b)/a]$, 其中 a, b 分别为伸缩因子和平移因子, 是连续变化的. 由于试验得到的是离散的数据序列, 为了应用方便, a, b 也应当取离散化形式, 令 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$ 进行离散抽样. 当 $a_0 = 2$ 时, 得到二进正交小波 $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} (2^{-j}t - k)$. 实际应用中采用 MATLAB 可以很方便地得到各尺度的离散系数, 该系数对岩体的破裂预测很有意义.

3.2 声发射参数的离散小波处理

选取声发射能率进行分析. 主要步骤: MATLAB 对数据序列进行一般检查与处理; 调用 MATLAB 小波分析工具箱; 参数分析; 显示离散系数.

图 3 是根据图 1 利用 MATLAB 小波工具箱进行的小波系数提取. 不同尺度下系数的最大值对应破裂. 而不同尺度下系数的突然变化可以揭示出岩体破裂的规律. 利用岩体破裂前的系数变化可预测岩体的破裂. 为安全起见, 采用不同尺度上最早发生系数突变对应的时间作为岩体即将破裂的预测时间.

3.3 煤样压缩破裂的声发射预报

利用函数的奇异性可以对函数的规律性予以判断^[8]. 若在某处有间断或某阶导数不连续, 则称该函数在此处有奇异性. 函数局部性变化用 Lipschitz 指数来度量^[9]. 设 $0 < \alpha < 1$, 在点 x_0 , 若存在常数 K , 对 x_0 的邻域 x 使得 $|f(x) - f(x_0)| \leq K|x - x_0|^\alpha$ 成立, 则称函数 $f(x)$ 在点 x_0 是 Lipschitz 指数 α ; 如果 $\alpha = 1$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 是可微的, 称函数 $f(x)$ 没有奇异性; 如果 $\alpha = 0$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 间断. Lipschitz 指数 α 越大, 函数越光滑; 并可以估计出这个突变点的突变程度. $0 < \alpha < 1$ 时表明该点的突变程度介于折线函数和阶梯函数表现之间; $\alpha = 0$ 对应阶跃突变点; $-1 < \alpha < 0$ 时表明该点突变程度介于函数和阶梯函数之间. 突变信号与正常信号的大小不一样. 利用奇异信号检测方法, 对图 3 中各尺度的图形进行奇异信号检测, 利用小波变换系数极大值随尺度变化而改变的规律性, 计算得到的不同尺度下的 α 值见表 1.

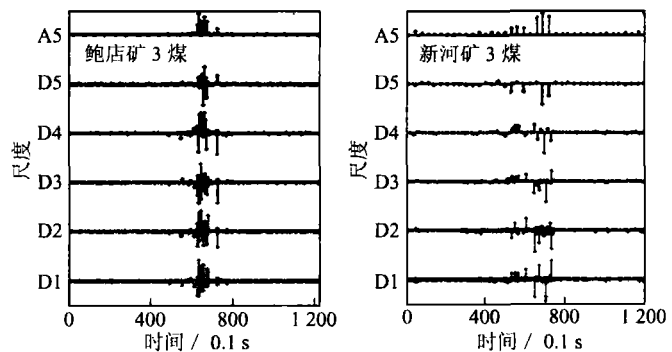


图 3 煤样能量计数率的离散小波系数

Fig. 3 Discrete wavelet coefficients of ENE of coal sample

1, 在点 x_0 , 若存在常数 K , 对 x_0 的邻域 x 使得 $|f(x) - f(x_0)| \leq K|x - x_0|^\alpha$ 成立, 则称函数 $f(x)$ 在点 x_0 是 Lipschitz 指数 α ; 如果 $\alpha = 1$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 是可微的, 称函数 $f(x)$ 没有奇异性; 如果 $\alpha = 0$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 间断. Lipschitz 指数 α 越大, 函数越光滑; 并可以估计出这个突变点的突变程度. $0 < \alpha < 1$ 时表明该点的突变程度介于折线函数和阶梯函数表现之间; $\alpha = 0$ 对应阶跃突变点; $-1 < \alpha < 0$ 时表明该点突变程度介于函数和阶梯函数之间. 突变信号与正常信号的大小不一样. 利用奇异信号检测方法, 对图 3 中各尺度的图形进行奇异信号检测, 利用小波变换系数极大值随尺度变化而改变的规律性, 计算得到的不同尺度下的 α 值见表 1.

表 1 不同尺度下第 1 个负值及其对应时间
Table 1 The first minus and its corresponding time under different scales

试样	尺度	时间 /0.1 s	最终预报破 裂时间 /0.1 s	试样	尺度	时间 /0.1 s	最终预报破 裂时间 /0.1 s	
鲍店 3煤	D1	- 0.22	624	新河 3煤	D1	- 0.22	572	
	D2	- 0.17	602		D2	- 0.18	580	
	D3	- 0.15	625		D3	- 0.17	552	552
	D4	- 0.38	655		D4	- 0.32	567	
	D5	- 0.12	631		D5	- 0.29	554	

因为岩石在破裂前会发生显著变化, 所以取第 1 个负值作为破裂的预测开始时间, 取不同尺度上最早的时间作为最终预测时间. 由表 1 可以看出, 最终预测破裂时间并非取决于某一个尺度系数, 而是不同尺度系数相互比较的结果. 为安全起见, 取最早的时间作为预测结果. 现场应用的意义在于, 提供尽量早的时间来防止灾害造成的生命财产损失. 这种方法对于煤岩体的破坏预报很有意义, 随着研究的深入将会有更广阔的应用前景.

4 结 论

煤样的声发射特征较好地反映了其压缩变形和损伤演化过程. 能量计数率和振铃计数率具有较高的相关性, 研究煤样破裂的声发射特征时选择其中之一即可. 煤样压缩破裂声发射能量计数率的最大 Lyapunov 指数是小于 0 的负数, 说明煤样破裂过程并非呈现混沌, 煤样破裂的声发射过程是可以预测的. 对能量计数率进行小波系数分解, 进一步计算得到各尺度的 Lipschitz 指数, 可以用最先出现的负值所对应的时间作为破裂预测时间, 这对于现场微震监测应用具有重要意义.

参考文献:

- [1] 樊运晓. 单轴压缩实验下裂纹闭合阶段岩石 KAISER 效应的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (6): 793 ~ 796
- [2] 钱书清, 郝锦琦, 邓明德. 混凝土样品受压破裂过程中的电磁信号 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (6): 797 ~ 800
- [3] 陈忠辉, 唐春安, 徐小荷, 等. 岩石声发射 KAISER 效应的理论和实验研究 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 37 (1): 9 ~ 12
- [4] 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (2): 82 ~ 85
- [5] 林振山. 非线性科学及其在地学中的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 113 ~ 116
- [6] 马军海, 陈予恕. 混沌时序相空间重构及其应用 [J]. 应用数学与力学, 2000, 21 (11): 1 117 ~ 1 124
- [7] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 岩石类材料声发射事件的波谱分析 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (5): 540 ~ 544
- [8] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 325
- [9] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 二进小波变换及信号的奇异性检测 [J]. 继电器, 1999, 27 (3): 65 ~ 68