

文章编号: 1000-582X(2012)03-108-07

含瓦斯煤体破坏过程中 AE 序列关联维数演化分析

刘延保^{1a,2}, 曹树刚^{1a,1b}, 李 勇^{1a,3}, 郭 平^{1a,1b}, 张遵国^{1a,1b}

(1. 重庆大学 a. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400037; 3. DISTART Department, Faculty of Engineering, University of Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italy)

摘 要: 利用分形理论对无瓦斯和含瓦斯煤体失稳破坏中的声发射序列关联维数演化特征进行了分析。结果表明, 单轴载荷条件下煤体的声发射时间序列在各变形阶段具有明显的分形特征, 各变形阶段的声发射过程具有不同的自相似性, 其关联维数可描述煤样力学状态; 三轴加载过程中, 无瓦斯和含瓦斯煤样的声发射时间序列随应力水平的变化趋势和声发射关联维数变化趋势相似; 弹性阶段后, 煤样的声发射时间序列关联维数的突降, 可以作为破坏的“前兆”, 这一特征不随围压变化、瓦斯压力的存在与否而发生变化。

关键词: 含瓦斯煤体; 损伤; 声发射; 关联维数; 瓦斯吸附

中图分类号: TD713

文献标志码: A

Correlation dimension analysis of AE sequence under failure process of gas-filled coal

LIU Yan-bao^{1a,2}, CAO Shu-gang^{1a,1b}, LI Yong^{1a,3}, GUO Ping^{1a,1b}, ZHANG Zun-guo^{1a,1b}

(1a. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education; 1b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400037, P. R. China; 3. DISTART Department, Faculty of Engineering, University of Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italy)

Abstract: The correlation dimension evolution characteristics of acoustic emission(AE) time-series during the instability and failure of coal with and without gas are analyzed base on fractal theory. The results show the coal rock's AE time-series of deformation stages have obviously fractal characteristics under uniaxial loading. The processes of AE of deformation have different self-similarity, and the correlation dimension can describe the mechanical state of coal. During the triaxial loading process, the stress-varying trend of AE time-series of coal with and without gas is similar to the trend of AE correlation dimension. The sharp decrease of AE time-series' correlation dimension can be considered as a “precursor” for failure. This feature doesn't change with the change of confining pressure and gas pressure.

Key words: gas-filled coal; damage; acoustic emission; correlation dimension; gas adsorption

收稿日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074197, 51104087); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2010BB6118); 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访问学者基金资助项目

作者简介: 刘延保(1981-), 男, 博士, 重庆大学西南资源开发环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者, 主要从煤岩瓦斯动力灾害防治方面的科研工作, (E-mail) yanbao_liu@163.com。

载荷作用下,不同类型的煤岩体在变形、破坏过程中都有声发射信号产生。研究表明,将声发射现象视作一个过程,其在整体上所表现出的某些特征可以在一定程度上反映出材料内部结构的变化情况,即具有分形特征^[1-2]。因此,基于室内含瓦斯煤体力学试验的声发射监测结果,运用分形理论对煤体失稳破坏中的声发射序列关联维数演化特征进行总结和分析,将为更好地利用声发射手段进行煤岩瓦斯动力灾害预测预报提供理论依据、方法和手段。

针对岩石类材料的声发射分形特征,国内外学者已经开展了大量研究,如 Yanagidani、Kusimose 和 Hirata 等^[3-5]对细晶花岗岩、砂岩和安山岩等进行了三轴条件下声发射三维定位的实验研究,发现声发射源分布具有自相似结构性质,临近破裂前的分维值明显降低;安镇文等^[6]研究了大理岩、辉长岩和砂岩声发射的一阶信息维特征,表明岩石失稳破裂前有一个降维过程;雷兴林等^[7]于1991年发现粗晶花岗闪长岩的声发射空间分布具有明显的自相似结构,明显低于细晶花岗闪长岩在相似变形条件下的结果,同时指出粗晶花岗岩声发射分布还具有多重分形性质;冯夏庭等^[8-10]利用分形测量方法计算了单轴和三轴载荷下岩石微破裂过程的时间分形;高峰、李建军等^[11]利用G-P算法研究了声发射时间序列的关联维数;尹贤刚等^[12]指出岩样在加载初期分形维数随应力增加而逐步增加,在加载到峰值应力的40%左右时分形维数开始下降,接近峰值应力时分形维数降到最低,预示着岩石的破坏。黄滚^[13]、李树春^[14]利用G-P算法探讨了砂岩在不同受力条件下的关联维演化特征。

以上这些研究为进一步分析煤岩体的声发射非线性特征奠定了基础。然而,煤体本身是一种具有初始损伤的材料,其受载过程中的声发射特征与其他岩石材料有一定的差异^[15];另外,针对含瓦斯煤体声发射信号的非线性特征分析还少有涉及^[16-18]。因此,将围绕含瓦斯煤体破坏过程中AE序列关联维数演化特征展开分析。基于笔者的前期研究^[19-21],利用不同的受力条件下煤体的声发射特征同力学过程之间较好的对应关系,将声发射过程视为与材料内部结构演化相对统一的过程,分析含瓦斯煤体声发射过程中的分形特征。

1 AE 关联维的计算方法

计算声发射时间序列关联维数的步骤一般是:首先,对时间序列进行预处理,包括对原始测试数据的滤波、降噪处理,减少干扰噪声;去除数据中的趋

势项,使数据序列变得平稳;对数据进行归一化处理等。其次,选择适当的嵌入维数 m 和延迟时间 τ ,重构相空间。最后,利用G-P算法计算关联维。具体分析过程如下。

1.1 数据预处理

计算关联维的前提条件是时间序列无噪声污染和序列无限长。因此,要求声发射信号应具有足够的采样精度,合适的采样频率,数据无噪声污染及足够长的数据序列等。为了满足以上条件,采用差分方法对声发射信号进行了平稳化、归一化处理,对单轴压缩下声发射事件率时间序列预处理的结果见图1。

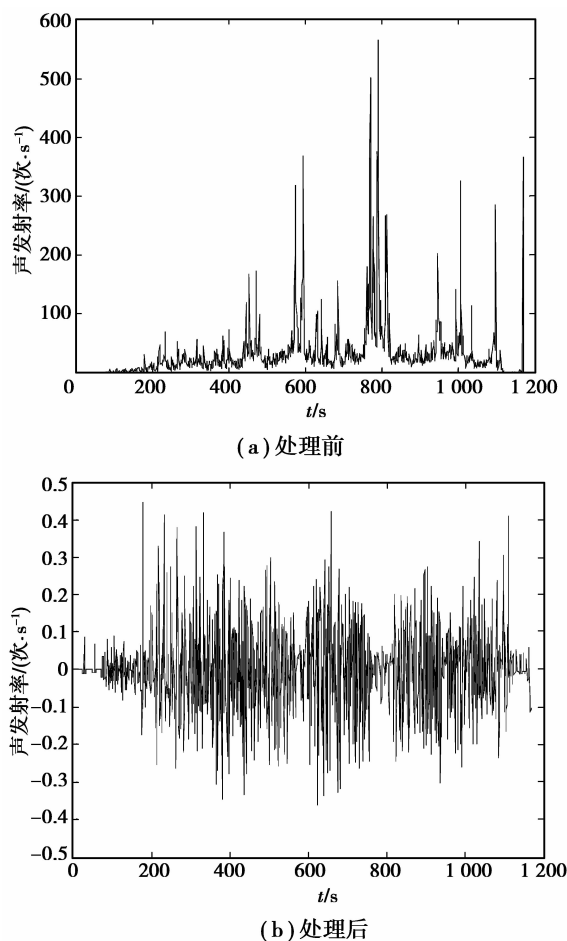


图1 声发射时间序列预处理

1.2 相空间重构

相空间重构^[22]是根据有限声发射数据来重构吸引子以研究系统的动力学行为,主要是考察系统的一个分量,将在某些固定的时间延迟点上的观测值作为新维数,重构出一个等价的相空间,使重构的相空间具有与实际的动力学系统相同的几何性质与信息特征。因此,利用这个等价的相空间可以确定

系统的真实相空间维数。

设观测到的声发射时间序列为 $\{x(t_i)\} (i=1, 2,$

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} x(t_1) & x(t_2) & \cdots & x(t_j) & \cdots & x(t_n - (m-1)\tau) \\ x(t_1 + \tau) & x(t_2 + \tau) & \cdots & x(t_j + \tau) & \cdots & x(t_n - (m-2)\tau) \\ x(t_1 + 2\tau) & x(t_2 + 2\tau) & \cdots & x(t_j + 2\tau) & \cdots & x(t_n - (m-3)\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(t_1 + (m-1)\tau) & x(t_2 + (m-1)\tau) & \cdots & x(t_j + (m-1)\tau) & \cdots & x(t_n) \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ X(t_1) & X(t_2) & \cdots & X(t_j) & \cdots & X(t_n - (m-1)\tau) \end{array} \right\}. \quad (1)$$

式中: $\tau = k\Delta t (k = (1, 2, \dots))$ 为延迟时间, Δt 为采样周期。排列中的每一列构成 m 维相空间中的一个相点, 任一相点有 m 个分量:

$$\{x(t_j), x(t_j + \tau), x(t_j + 2\tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau)\}. \quad (2)$$

这样的 $N_0 (= n - (m-1)\tau)$ 个相点在 m 维相空间构成了一个相型。为了保证该相空间能包含原状态空间吸引子的特征, 根据 Takens 定理, 嵌入维至少是吸引子维数的 2 倍, 即 $m \geq 2d + 1$, 其中 m 为嵌入维数, d 为原状态空间吸引子所处空间维数。

延迟时间 τ 的计算方法主要有自相关法、复自相关法、互信息量法等。互信息量法的互信息量较小, 折叠的开端能够比较清楚地区分, 因而在时间延迟的选取上要优于自相关法, 此外, 互信息量法包含了时间序列的非线性特征, 其计算结果明显优于自相关法^[14]。笔者采用互信息量法计算最佳时间延迟 τ , 计算的时间延迟 $\tau = 1$ 。

1.3 计算关联维

采用 G-P 算法从声发射时间序列直接计算关联维数。计算步骤如下^[13-14]:

1) 从上面的嵌入空间的 N_0 个向量中任选一个作为参考向量 \mathbf{A}_n , 进而计算其他 $N_0 - 1$ 个向量到它的距离:

$$r_m = d(\mathbf{A}_n, \mathbf{A}_i) = \left[\sum_l^{m-1} (a_{n+l} - a_{i+l})^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

2) 对所有的 $\mathbf{A}_n (n=1, 2, \dots, N_0)$ 重复这一过程, 即得到关联积分函数

$$C_m(r) = \frac{2}{N_0(N_0 - 1)} \sum_{n,j=1}^{N_0} H(r - r_m), \quad (4)$$

式中 H 为 Heaviside 函数。

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$$

$\dots, n)$, 根据“时间延迟方法”重构相空间。将时间序列拓展成 m 维相空间的相型分布:

对于一个足够小的 r , 关联积分可用式(5)逼近:

$$\ln C_m(r) = \ln C + D(m) \ln r. \quad (5)$$

式中 C 为常数。因此, R^m 中的子集 $J(m)$ 的关联维数可以表示为

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\partial \ln C_m(r)}{\partial \ln r} \right). \quad (6)$$

下面利用 Christian Merkwirth、Ulrich Parlitz、Immo Wedekind 等编写的 TSTOOL1.2 程序对含瓦斯煤体损伤破坏过程的声发射时间序列进行相应的预处理、相空间重构、时间延迟 τ 的计算和关联维的计算。该软件专门处理非线性时间序列的分析问题, 功能强大, 可方便地选择嵌入维、最佳延迟时间和计算关联维等。

2 单轴受载时的 AE 关联维数

单轴压缩试验在 MTS815 岩石力学试验机上进行。试验煤样取自重庆市松藻煤电集团打通一矿 7# 煤层回采工作面。采用轴向位移控制方式加载, 加载速率为 0.02 mm/min。声发射装置采用美国物理声学公司的 PCI-2 全数字化声发射监测系统, 设定声发射采样阈值为 45~500 kHz。传感器安装在煤样侧面, 并用黄油作为耦合剂。试验过程中尽量减小环境噪音的干扰。

图 2 表示了单轴载荷作用下典型煤样的应力-应变与声发射事件率、声发射累计振铃数、声发射能量的关系。根据全应力-应变曲线和声发射曲线变化规律, 可将煤样的破坏过程分为初始加载阶段(I)、弹性阶段(II)、弹塑性阶段(III)、峰后破坏阶段(IV)和残余塑性阶段(V)。为了将声发射视为一个与力学过程和材料内部结构演化过程相对统一的过程来研究, 分别提取各阶段声发射事件的时间序列进行分析, 结果见图 3。

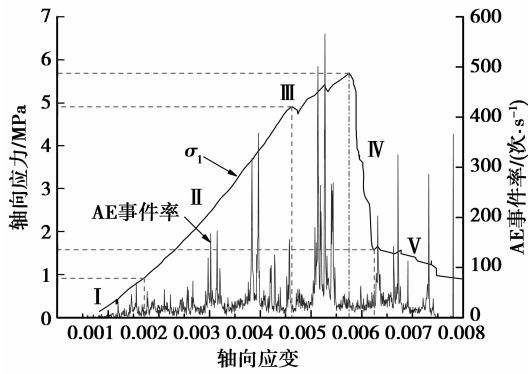
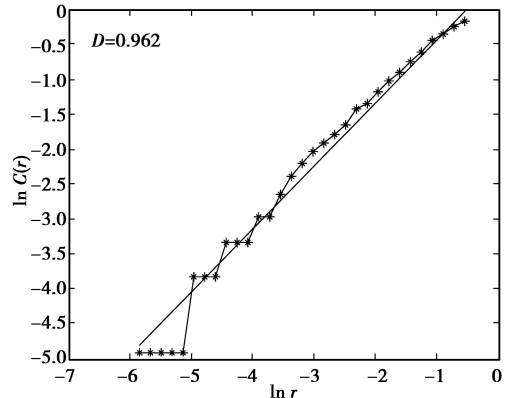
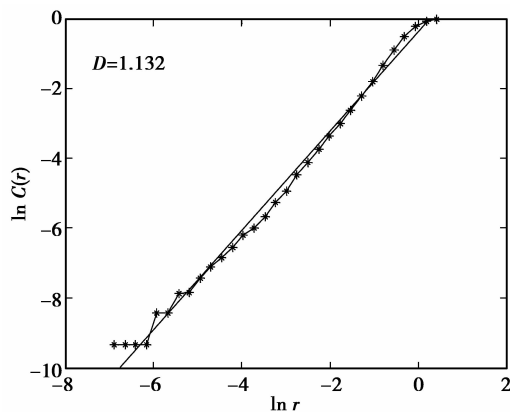


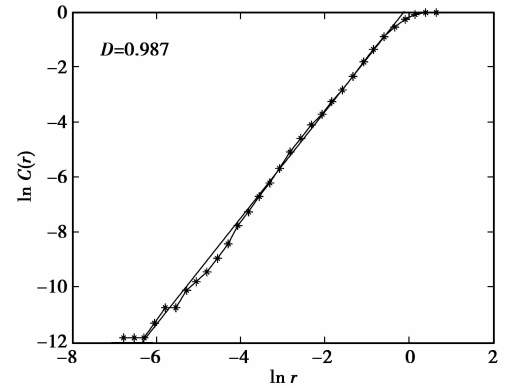
图 2 应力-应变与声发射特征参数的关系^[19]



(d)峰后破坏阶段(IV)

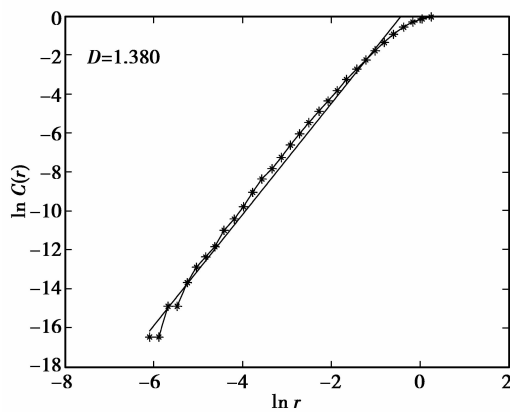


(a)初始加载阶段(I)

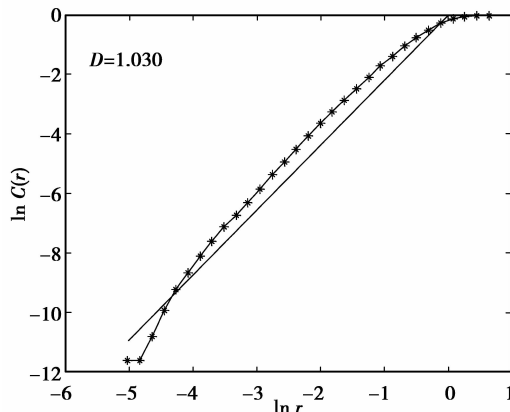


(e)残余塑性阶段(V)

图 3 单轴压缩情况下不同阶段的声发射关联维数



(b)弹性阶段(II)



(c)弹塑性阶段(III)

从图 3 中可以看出,各变形阶段的曲线均在一定范围内表现出线性特征,因此,声发射过程有着明显的分形特征。但是,声发射参数的分形特征具有一定的尺度范围,超出这个尺度范围后,分形特征便不明显。各变形阶段的关联维数不同,在初始加载阶段和弹性阶段,AE 关联维数呈上升的趋势;在弹塑性阶段,AE 关联维数开始出现明显的下降趋势;在峰后破坏阶段,AE 关联维数达到最低值;在随后的残余应力阶段 AE 关联维数较前一阶段稍有上升。AE 关联维数的变化趋势说明不同变形阶段下声发射过程有着不同的自相似程度。因此,可以将声发射过程的关联维数作为描述材料力学特征的特征参数。此外,试验分析表明,相空间嵌入维数 m 对关联维数有一定影响, m 值越大,分关联维数越小,因此,在考察含瓦斯煤体三轴载荷下 AE 关联维数变化规律时,也以同样的 m 值来计算关联维数。这里取 $m=3$ 。

3 含瓦斯煤体三轴载荷下 AE 关联维数演化分析

采用对比分析的方法,将三轴载荷作用下不含瓦斯和含瓦斯煤的声发射特征进行比较,分析声发

射时间序列的关联维数演化特征。不含瓦斯时的三轴试验在 MTS815 岩石力学试验机上进行,围压分为 3 个等级:2.0、4.0、6.0 MPa;含瓦斯三轴试验则采用重庆大学自行研发的三轴蠕变瓦斯渗流装置,围压分别为:2.0、3.0、4.0 MPa,瓦斯压力则都保持 1.0 MPa。轴向加载方式和速率与单轴试验相同。声发射传感器安装在油压缸的外表面,阈值值与单轴试验相同。

在计算过程中,为了能细致地表现出声发射关联维数的变化情况,在满足数据处理要求的前提下,尽可能地将煤样受力破坏的全过程划分为较小的时间区间,采用前述方法计算区间声发射时间序列的关联维数,最终得到不含瓦斯和含瓦斯煤样在三轴载荷作用下的声发射关联维数演化关系,见图 4、5。

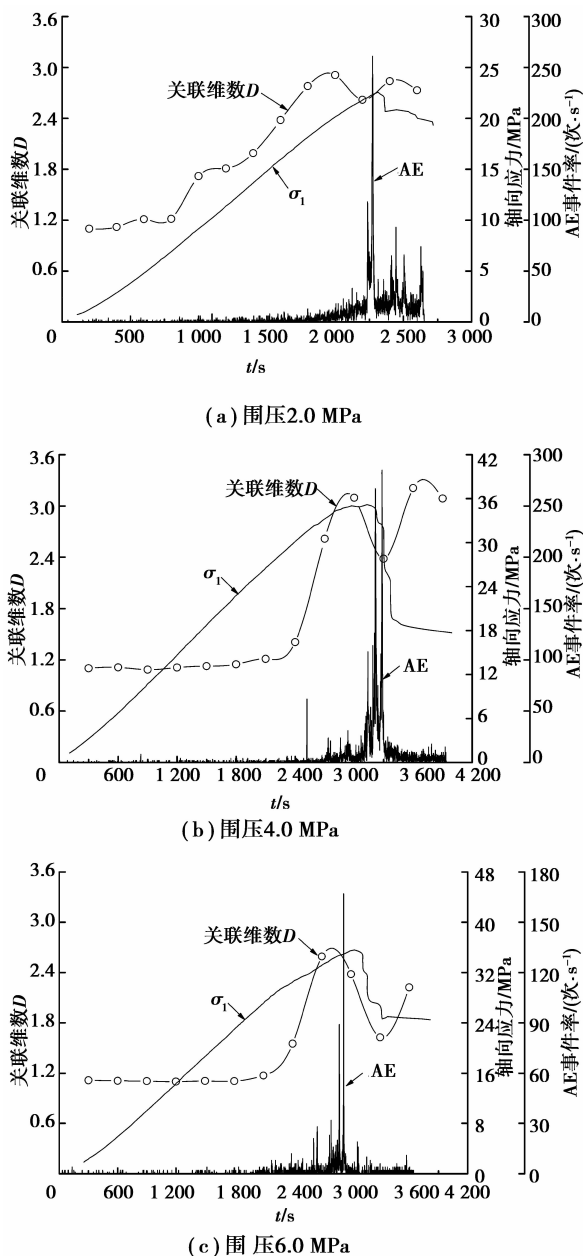


图 4 不含瓦斯煤体三轴载荷下的声发射关联维数演化^[17]

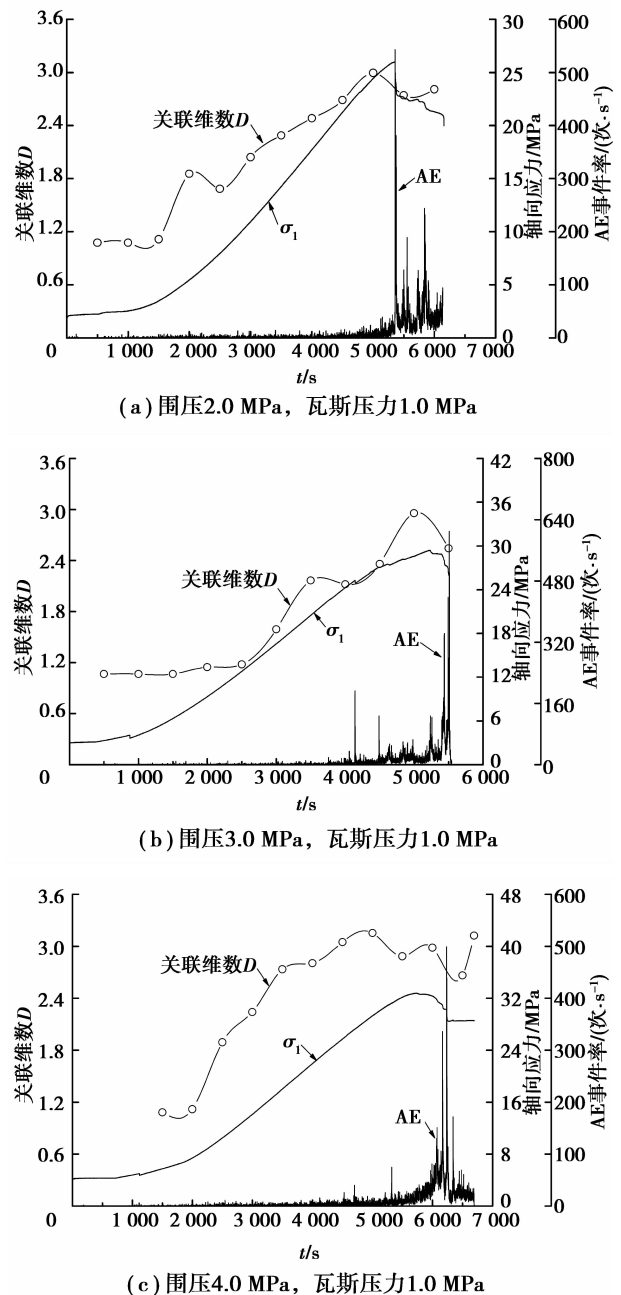


图 5 含瓦斯、三轴载荷下的声发射关联维数演化

从图 4、5 可以看出,由于煤样内一定瓦斯压力和围压的存在,改变了煤体骨架上的有效应力,在宏观上增加了煤样的塑性,使煤样的初始加载阶段更加明显,但是,有瓦斯作用和无瓦斯作用的煤样具有如下共同的声发射特征:弹性阶段的声发射事件率、声发射能量皆处于较低的水平;弹塑性阶段中煤样发生屈服,声发射事件率和能量随着轴向应变的增加呈递增的趋势;声发射信号的峰值与煤样应力的突然释放相对应;煤样的宏观破坏均为剪切破坏。另外,因为原煤试样的强度存在一定的离散性,强度

变化无规律。

声发射关联维数演化过程表明,2种试验环境下关联维数的变化趋势相同。弹性阶段以前,尽管各自增加的方式不同,关联维数整体呈增加的趋势;进入弹塑性阶段后,试件中微裂纹开始汇集、贯通,关联维数开始产生一个突降过程,由于突降产生的关联维数相对低值点往往在应力峰值的附近对应声发射参数的峰值;在峰值破坏阶段和残余应力阶段,之前已经发生突降的关联维数迅速增大,恢复到突降前的水平。以上的试验分析表明,煤样在弹性阶段后的声发射时间序列关联维数的突降,可以作为发生破坏的“前兆”。这一特征不随围压变化、瓦斯压力的存在与否而发生变化。此外,由于关联维数表示系统的复杂程度或有序度,维数的变化意味着有序度的变化,可以将其理解为损伤状况的变化或裂纹状态的发展。由此证明了煤样在载荷作用下裂纹状态的发展是一个从无序到有序,从分散到集中的过程。

4 结 论

通过对单轴、三轴无瓦斯以及三轴含瓦斯状态下的煤样力学试验过程中的声发射信号的非线性研究,得到以下结论:

1)单轴载荷条件下煤样的声发射时间序列在各变形阶段具有明显的分形特征;各变形阶段的声发射关联维数不同,表明不同应力状态下声发射过程有着不同的自相似程度。因此,可用关联维数描述煤体力学状态。

2)无瓦斯和含瓦斯煤样三轴加载过程中的声发射特征相似。虽然含瓦斯煤体在宏观上表现出塑性的增加,但无瓦斯和含瓦斯煤样的声发射事件率、声发射能量随应力水平的变化趋势相同。

3)三轴压缩过程中,无瓦斯和含瓦斯煤样的声发射关联维数演化过程的对比分析表明,两种试验环境下关联维数的变化趋势相同,煤样在弹性阶段后的声发射时间序列关联维数的突降,可以作为煤样破坏的“前兆”。这一特征不随围压变化、瓦斯压力的存在与否而发生变化。

4)笔者的研究结果可为进一步深入了解含瓦斯煤体的物理力学性质提供理论参考,同时也为完善基于声发射的煤岩瓦斯动力灾害的监控预测技术提供技术支持。今后,应进一步利用矿山现场监测的声发射数据进行关联维数演化分析,获得灾害发生前的综合判别标准,为本文结果的推广应用创造条件。

参考文献:

- [1] 滕山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [2] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [3] YANAGIDANI T, EHARA S, NISHIZAWA O, et al. Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress[J]. J Geophys Res, 1985, 90(B8): 6840-6858.
- [4] KUSUNOSE K, NISHIZAWA O. AE gap prior to local fracture of rock under uniaxial compression[J]. J Phy Earth, 1986, 34(suppl1): 45-56.
- [5] HIRATA T, SATOH T, ITO K. Fracture structure of spatial distribution of microfracturing in rock [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1987, 90(2): 368-374.
- [6] 安镇文, 姚栋华, 陈颀. 岩石声发射和地震活动的信息维特征[J]. 中国科学: B辑, 1992, 22(7): 736-742. AN ZHEN-WEN, YAO DONG -HUA, CHEN-YU. The information dimensional Characteristic of acoustic emission and seismic activities[J]. Science in China: Ser. B, 1992, 22(7): 736-742.
- [7] 雷兴林, 马瑾, 楠濂勤一郎, 等. 三轴压缩下粗晶花岗岩声发射三维分布及其分形特征[J]. 地震地质, 1991, 13(2): 92-106. LEI XING-LIN, MA JIN, KUSUNOSE KINICHIRO, et al. The three-dimensional distribution of acoustic emission and fractal characteristics of coarse-grained granite under triaxial compression[J]. Seismology and Geology, 1991, 13(2): 92-106.
- [8] FENG XIA-TING, SETO M. Fractal structure of the time distribution of microfracturing in rocks [J]. Geophysical Journal International, 1999, 136 (1): 275-285.
- [9] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性: 第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403-407. FENG XIA-TING, MASAHIRO SETO. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion: Part I: Experimental study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403-407.
- [10] 王泳嘉, 冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性: 第二部分: 时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 551-556. WANG YONG-JIA, FENG XIA-TING. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion: Part II: Temporal fractal analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 551-556.
- [11] 高峰, 李建军, 李肖音, 等. 岩石声发射特征的分形分

- 析[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7): 67-69.
- GAO FENG, LI JIAN-JUN, LI XIAO-YIN, et al. Fractal analysis of the characteristics of acoustic emission of rock[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(7): 67-69.
- [12] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3383-3390.
- YIN XIAN-GANG, LI SHU-LIN, TANG HAI-YAN, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(suppl2): 3383-3390.
- [13] 黄滚. 岩石断裂失稳破坏与冲击地压的分叉和混沌特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [14] 李树春. 周期荷载作用下岩石变形与损伤规律及其非线性特征[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [15] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(5): 458-464.
- [16] SHKURATNIK V L, KUCHURIN S V, FILIMONOV Y L. Regularities of acoustic emission and thermoemission memory effect in coal specimens under varying thermal conditions[J]. Journal of Mining Science, 2007, 43(4): 394-403.
- [17] KUCHURIN S V, SHKURATNIK V L, VINNIKOV V A. Regularities of influence of disturbances on thermal emission memory in coal specimens[J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(2): 131-137.
- [18] MEHIC M, RANJITH P G, CHOI S K, et al. The geomechanical behavior of Australian black coal under the effects of CO₂ injection: Uniaxial testing [C] // Proceedings of the GeoShanghai Conference, June 6-8, 2006, Shanghai, China. [S. 1]: American Society of Civil Engineers, 2006: 290-297.
- [19] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 2794-2799.
- CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, ZHANG LI-QIANG. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(suppl1): 2794-2799.
- [20] 曹树刚, 刘延保, 张立强, 等. 突出煤体单轴压缩和蠕变状态下的声发射对比试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1264-1268.
- CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, ZHANG LI-QIANG, et al. Experimental on acoustic emission of outburst-hazardous coal under uniaxial compression and creep [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1264-1268.
- [21] 曹树刚, 刘延保, 李勇, 等. 不同围压下煤岩声发射特征试验[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(11): 1321-1327.
- CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, LI YONG, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of coal rock at different confining pressure[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1321-1327.
- [22] 谭云亮, 刘传孝, 赵同彬. 岩石非线性动力学初论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008

(编辑 郑 洁)