

文章编号: 0253-9993(2009)02-0224-04

不同尺度电磁辐射时间序列的混沌特征初步分析

刘贞堂¹, 赵恩来¹, 王恩元¹, 王 静²

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 图书馆, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 基于混沌理论, 研究了不同尺度煤岩电磁辐射时间序列的混沌特征. 研究表明: 小尺度煤岩电磁辐射脉冲数序列和现场煤岩电磁辐射时间序列的关联维数均收敛于稳定的饱和值, 具有混沌特性; 有冲击危险时, 电磁辐射时序的饱和关联维 D_2 数值较大, 变化剧烈; 无冲击危险时, 电磁辐射时序的饱和关联维数 D_2 数值较小, 变化平缓. 电磁辐射时序饱和关联维数的变化, 可用于监测预报煤岩动力灾害.

关键词: 煤岩; 电磁辐射; 时间序列; 混沌特征

中图分类号: TD713.2 文献标识码: A

Chaotic characteristic of electromagnetic radiation time series of coal or rock under different scales

LIU Zhen-tang¹, ZHAO En-lai¹, WANG En-yuan¹, WANG Jing²

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Library, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on chaos theory, the chaotic characteristic of electromagnetic radiation time series of coal or rock under different scales was studied. The results show that the correlation dimension of electromagnetic radiation time series of small-scale coal or rock and coal mine converges to stable saturation value, which shows that these electromagnetic radiation time series have chaos characteristics. When there is danger of coal seam burst, the value of saturation correlation dimension D_2 of electromagnetic radiation time series is bigger and it changes greatly, on the contrary, its value is smaller and changes smoothly. The change of saturation correlation dimension of electromagnetic radiation time series can be used to forecast coal or rock dynamic disasters.

Key words: coal or rock; electromagnetic radiation; time series; chaos characteristic

混沌^[1-2]是非线性系统所独有且广泛存在的一种非周期运动形式, 其覆盖面几乎涉及到自然科学和社会科学的每一个分支. 混沌理论认为, 对于任何一个时间序列都可被看成是一个由非线性机制确定的输入输出系统. 通过监测煤岩破裂过程中产生的电磁辐射信号, 可用来监测预警煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害现象^[3-5]. 煤岩电磁辐射作为煤岩系统演化的物理-力学响应^[6], 受采动、煤层地质构造影响, 电磁辐射处于动态变化过程中, 必然蕴含系统动态演化过程的特征信息. 因此, 煤岩动力系统作为一

收稿日期: 2008-05-06 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB221505); 国家863计划资助项目(2006AA06Z119); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAK03B02-04, 2007BAK29B01); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0477); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(07KF12); 中国矿业大学青年科研基金资助项目(OY080234)

作者简介: 刘贞堂(1962—), 男, 辽宁建平人, 副教授, 硕士生导师. Tel: 0516-83884695, E-mail: lztsafety@126.com

高度非线性的动力学系统,对其电磁辐射响应信号可采用非线性理论分析.前人对煤岩电磁辐射非线性特征的研究取得了大量成果^[7].王恩元^[8]统计分析煤岩单轴压缩过程的电磁辐射具有R/S统计和分形特征;邹喜正等^[9]对现场采集的煤岩电磁辐射进行分形特征分析,在冲击地压发生前电磁辐射分形维数变化较大,可用于矿井冲击地压的预测;魏建平^[6]利用煤岩电磁辐射多重分形指标和尖点突变特征对矿井煤岩动力灾害危险性进行评价.本文通过对不同尺度煤岩电磁辐射时间序列进行分析,从相空间重构、饱和关联维数等方面探讨电磁辐射时间序列的混沌特征,为混沌理论进一步应用于电磁辐射时间序列的分析及寻求煤岩动力灾害危险性的电磁辐射非线性判据奠定基础.

1 混沌理论

常用表征系统混沌特征的量有:连续功率谱、饱和分维数、Lyapunov指数和Kolmogorov熵,相应的对应混沌时间序列的判别的基本方法有:功率谱法、PAC法、Lyapunov指数法、C-C方法等.

1.1 C-C方法

1999年H. S. Kim, R. Eykholt和J. D. Salas提出C-C方法,按照嵌入原理,基于关联积分的统计

$$C(m, N, r, t) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq M} H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (r > 0). \quad (1)$$

式中, $M = N - (m - 1)$ 为 m 维相空间的嵌入点数; $H(x)$ 为 Heaviside 阶跃函数; $\|X_i - X_j\|$ 为相空间中任意两点之间的距离; r 为相空间中给定的临界距离.

1.2 饱和关联维法^[10]

任意给定 r , 在嵌入相空间中对 N 个点检查有多少“点对” (X_i, X_j) 之间的“距离”小于 r , “距离”小于 r 的“点对”占总“点对” $M(M-1)/2$ 的比例为

$$C_m(r) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq M} H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (r > 0). \quad (2)$$

当 r 在适当范围内, $C(r) = r^D$, 其中 D 为该 m 维相空间中状态流型的维数, 即系统的关联维数 $D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \ln C(r) / \ln r$. D_2 为 $\ln C(r) - \ln r$ 图上直线的斜率, 当 m 取值增加到一定时, 曲线中直线部分的斜率趋于稳定, 即达到饱和, 饱和的斜率就是关联维 D_2 , 此时 m 的取值即为最小嵌入维.

2 煤岩电磁辐射时间序列分析

2.1 小尺度煤岩电磁辐射时间序列混沌分析

对取自河南焦作的原煤试样 ($\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 和型煤试样 ($\phi 50 \text{ mm} \times 99.86 \text{ mm}$) 进行了单轴压缩过程电磁辐射测试, 实验结果如图1所示. 从图1可以看出, 电磁辐射与应力基本呈正相关性, 随应力的增加而增加, 破坏后随应力降低而减小. 对焦作原煤和型煤试样的电磁辐射脉冲时间序列进行相空间重构, 将一维电磁辐射脉冲时间序列转化为 m 维相空间, 分析结果如图2所示. 从图2中可以看出, 原煤试样电磁辐射脉冲数时间序列在

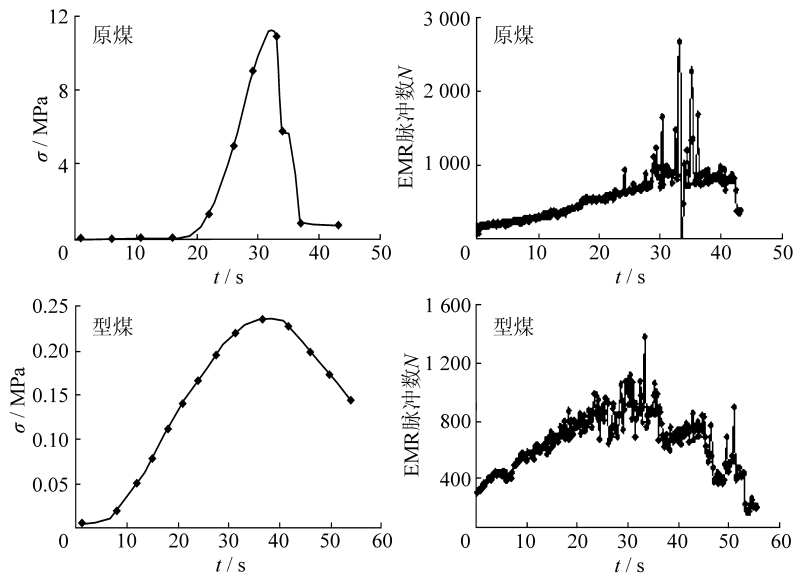


图1 焦作原煤和型煤单轴压缩电磁辐射实验结果

Fig. 1 Test results of Jiaozuo raw coal and briquette under uniaxial compression

图2中可以看出, 原煤试样电磁辐射脉冲数时间序列在

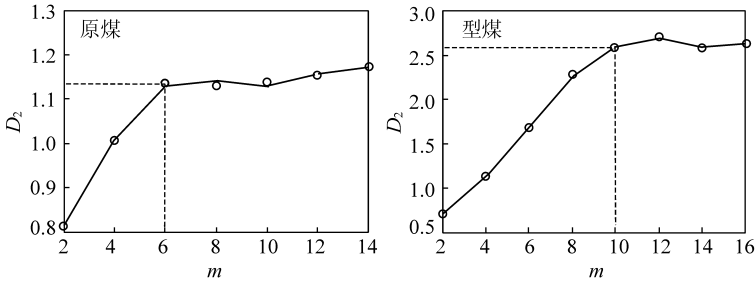


图 2 焦作煤样电磁辐射时间序列相空间重构分析^[11]

Fig. 2 Phase space reconstruction of EMR time series of Jiaozuo coal sample

$m = 6$ 以后关联维数 D_2 基本达到饱和, 最小嵌入维数为 6, 关联维数为 1.136 2; 型煤试样电磁辐射脉冲时间序列在 $m = 10$ 以后关联维数 D_2 基本达到饱和, 最小嵌入维数为 10, 关联维数为 2.582 1. 焦作原煤和型煤的电磁辐射脉冲信号的关维维数 D_2 收敛于一个稳定的非整数饱和值, 表明小尺度煤岩破

裂产生的电磁辐射脉冲时间序列具有混沌特征.

2.2 大尺度煤岩电磁辐射时间序列混沌分析

根据煤炭科学研究总院北京开采所《新汶矿务局华丰矿煤层冲击倾向鉴定及物理力学性质研究报告》可知, 煤层具有强烈冲击倾向, 直接顶具有中等冲击倾向.

通过在线式电磁辐射监测仪实时监测华丰矿 1409 工作面推进过程电磁辐射信号, 以 2004 年 2—3 月间的监测数据为研究对象, 在数据分析过程中, 将每天测试的电磁辐射数据分为 3 段, 即 0: 00—8: 00, 8: 00—16: 00, 16: 00—24: 00.

图 3 为 2 月 24 日 8: 00—16: 00 电磁辐射能量时间序列相空间重构分析结果, 可以看出, 煤岩电磁辐射能量时间序列在 $m = 18$ 以后关联维数 D_2 基本达到饱和, 此时的关联维数为 5.801 1. 现场煤岩电磁辐射能量时间序列的关联维数 D_2 收敛于一个稳定的非整数饱和值, 表明其具有混沌特征.

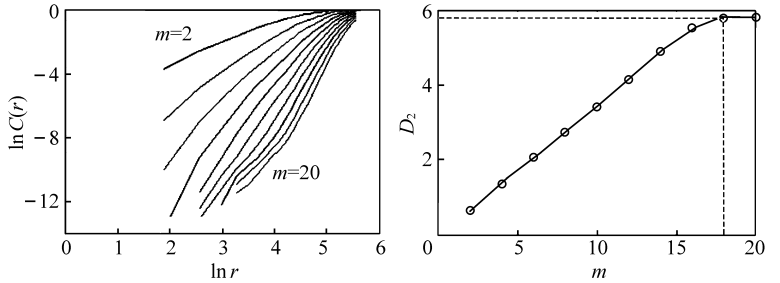


图 3 2 月 24 日电磁辐射时间序列相空间重构分析^[11]

Fig. 3 Phase space reconstruction of EMR time series in February 24

3 分析与讨论

通过对比不同尺度煤岩电磁辐射时间序列的相空间重构过程, 发现实验研究煤岩电磁辐射时间序列的最小嵌入维数要小于现场煤岩电磁辐射时间序列的最小嵌入维数, 这说明现场煤岩电磁辐射是一个复杂多变的系统, 这与电磁辐射的产生过程有关. 对于实验研究煤岩电磁辐射, 其产生主要是在轴向压力作用下, 内部煤岩颗粒产生位错、滑移摩擦及微裂纹不稳定扩展产生自由电荷; 现场煤岩电磁辐射的产生受其内部微孔隙、裂纹等缺陷及赋存瓦斯的影响, 产生电磁辐射的过程复杂, 影响因素较多.

鉴于现场电磁辐射时间序列具有混沌特征, 不是随机系统, 因而是可预测的. 统计分析现场冲击地压危险记录和电磁辐射时间序列的最小嵌入维数、关联维数与冲击危险的关系 (图 4). 从图 4 中可看出现场煤岩电磁辐射时序最

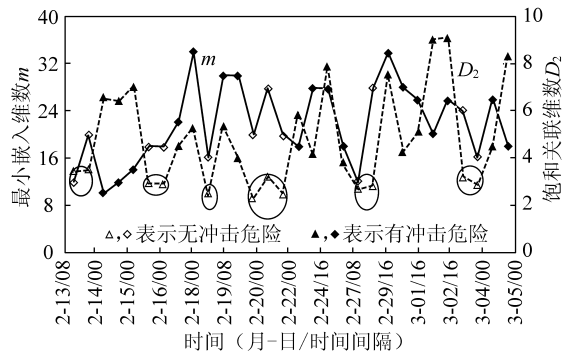


图 4 电磁辐射时序最小嵌入维、关联维与冲击危险关系
Fig. 4 Relationship of danger of rock burst and min-embedding dimension correlation, dimension of EMR time series

小嵌入维数和饱和关联维数的变化趋势基本一致,无冲击危险时段,电磁辐射时序的饱和关联维数较小,波动幅度平稳;有冲击危险时,饱和关联维数整体较大,变化较剧烈,最小嵌入维数整体呈相同的变化趋势,在个别区域存在变化不一致的现象.因此,可以利用现场电磁辐射时序的饱和关联维数的变化及电磁辐射变化来综合监测预报冲击地压灾害.

4 结 论

通过对小尺度煤岩电磁辐射脉冲数时间序列进行分析,表明受载原煤及型煤电磁辐射时间序列具有混沌特征.通过对华丰矿1409工作面电磁辐射时间序列进行相空间重构,电磁辐射时间序列的饱和关联维数 D_2 多数收敛于一个非整数值,表明现场煤岩电磁辐射系统是混沌系统,具有可预测性.1409工作面存在冲击危险时,电磁辐射时序的饱和关联维数较大,变化明显,无冲击危险时,其数值较小,变化趋势平缓,因此可结合电磁辐射时序的饱和关联维数的变化趋势和电磁辐射综合预测冲击地压.

参考文献:

- [1] 刘秉正. 非线性动力学与混沌基础 [M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1994.
Liu Bingzheng. Basis of nonlinear dynamics and chaos [M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1994.
- [2] 陈予恕. 非线性振动系统的分叉和混沌理论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
Chen Yushu. Bifurcation and chaos theory of nonlinear vibration systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993.
- [3] 王恩元, 何学秋, 聂百胜, 等. 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 225-229.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Nie Baisheng, et al. Principle of predicting coal and gas outburst using electromagnetic emission [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 225-229.
- [4] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用 [J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366-369.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang, et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366-369.
- [5] 王恩元, 贾慧霖, 李忠辉, 等. 用电磁辐射法监测预报矿山采空区顶板稳定性 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 16-19.
Wang Enyuan, Jia Huilin, Li Zhonghui, et al. Monitoring and forecasting roof stability of goaf by electromagnetic emission [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 16-19.
- [6] 魏建平. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警机理及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
Wei Jianping. Study on forecasting mechanism and its applications of electromagnetic emission for minecoal or rock dynamic disaster [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2004.
- [7] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
He Xueqiu. Rheological dynamics of coal or rock containing gas [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995.
- [8] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 煤岩变形及破裂电磁辐射信号的R/S统计规律 [J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 349-351.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang. R/S statistic rule of EME during deformation and fracture of coal and rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(4): 349-351.
- [9] 邹喜正, 窦林名, 徐方军. 分维在电磁辐射技术预测冲击矿压中的应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(4): 452-455.
Zou Xizheng, Dou Linming, Xu Fangjun. Study and practice of fractal dimension in prediction of rock burst by technology of EME [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 452-455.
- [10] Grassberger P, Procaccia L. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. Physica D, 1983(9): 189-208.
- [11] 王 静. 煤岩动力灾害过程中电磁辐射信号非线性特征分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
Wang Jing. Nonlinear characteristic analysis of EME signal during dynamical disaster course of coal or rock [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2006.