

文章编号:0253-9993(2013)09-1616-05

煤样破裂表面电位多重分形特征

刘 杰^{1,2},王恩元^{1,2},李忠辉^{1,2},马衍坤³

(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 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221008;3. 安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001)

摘要:为深入分析煤样受载破裂机制,试验研究了煤样单轴压缩下表面电位变化规律,应用多重分形统计理论分析表面电位信号,计算其多重分形谱,并分析多重分形谱特征参数随加载过程的变化规律。研究表明:煤样表面电位信号存在多重分形特征,在较大尺度内满足标度不变性;不同尺寸的试样,表面电位信号多重分形谱呈右钩状;多重分形谱特征参数 $\Delta\alpha$ 和 Δf 的变化规律与试样受载变形破裂过程具有良好的对应关系, $\Delta\alpha$ 和 Δf 经过较长时间平稳升高后迅速下降的趋势改变可以作为破裂的前兆信息,对试样失稳进行提前预警。

关键词:表面电位;时间序列;多重分形谱;特征参数

中图分类号:P631.3 **文献标志码:**A

Multi-fractal characteristics of surface potential of coal during the fracture

LIU Jie^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, LI Zhong-hui^{1,2}, MA Yan-kun³

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Xuzhou 221008, China; 3. College of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to analyze the failure mechanism of coal under the load, multi-fractal characteristics of surface potential of coal sample under uniaxial compression was studied. The surface potential was analyzed using multi-fractal theory to calculate the multi-fractal spectrum. The change rules of characteristic parameters of multi-fractal spectrum with the loading process were studied. The results show that the surface potential represents multi-fractal feature, and keeps scale invariance in the wide range. The shape of the multi-fractal spectrum of different size specimens shows right hook. The characteristic parameters of multi-fractal spectrum, $\Delta\alpha$ and Δf , vary with the process of deformation and fracture of coal sample with load. The changes of trend that $\Delta\alpha$ and Δf increase in a long time, then decrease rapidly can be used as a precursory factor of coal-rock failure to forecast the instability of the samples. The results are helpful to understand the inherent law in the coal specimen failure process and forecast the dynamic disaster using the potential.

Key words: surface potential; time series; multi-fractal spectrum; characteristic parameter

在煤岩动力过程及动力灾害的发生过程中,伴随着能量的释放,这些能量的形式包括表面能、弹性变形能、热能、电磁辐射能等物理力学响应。上述物理力学响应反映了煤岩体的受载程度及变形破裂过程,因此对其进行研究可为揭示煤岩动力灾害发生过程,并为煤岩体失稳破裂进行预测预报提供帮助^[1]。电

磁辐射是煤岩体等材料在受载变形破裂过程中以电磁波形式放散能量的一种现象,已经应用于煤岩动力灾害的预测和预报^[1-5]。

试验表明,电磁辐射信号存在分形特征。王恩元等研究了煤岩变形破裂过程中的电磁辐射统计分形特征^[6]。魏建平等对煤与瓦斯突出过程中的电磁辐

收稿日期:2012-10-25 责任编辑:张晓宁

基金项目:十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B07-2);国家自然科学基金青年基金资助项目(40904028);全国博士学位论文作者专项资金资助项目(201055)

作者简介:刘 杰(1986—),男,山东邹平人,博士研究生。Tel:0516-83884695, E-mail:liujie0805@163.com

射信号多重分形特征进行了研究,结果表明电磁辐射多重分形 D_q-q 曲线的陡峭程度反映了其数据的波动程度,并用分形维数 ΔD_q 指标来表示这种波动规律,多重分形维数指标与煤与瓦斯突出灾害危险程度有较好的一致性^[7]。邹喜正等对分维在电磁辐射预测冲击地压中的应用进行了研究,表明在正常情况下,电磁辐射值分维维数变化小;在冲击矿压发生前,电磁辐射值的分维维数变化大^[8]。姚精明等研究了单轴压缩条件煤体电磁辐射分形特征,结果表明煤岩体受载过程中产生的电磁辐射脉冲数在时间上具有明显的分形特征,分形维数与煤样的冲击能指数呈正幂指数关系,不同应力水平分形维数存在差异^[9]。

表面电位与电磁辐射属于同源电现象,近年来引起了众多学者的注意,吴小平等研究了花岗岩在单轴压缩下表面带电现象,认为在加载过程中岩石表面有正电荷产生^[10]。郝锦琦等对双轴压力下岩样自电位变化进行实验,利用伺服控制双轴加载系统,采用阵列式布局的应变、自电位测量方法,对岩石样品弹性变形阶段和破坏过程中的应变和自电位进行了实验研究^[11]。王恩元、李忠辉等对煤体及含缺陷煤体破裂过程中表面电位现象进行研究,表明煤体破裂过程中会产生表面电位,并对自由电荷产生机理进行分析^[12-14]。李忠辉等对表面电位信号的 R/S 规律进行了分析,证明表面电位时间序列赫斯特指数大于 0.5,表面电位呈逐渐升高的趋势^[1,12]。试验和现场采集得到的表面电位信号内部包含着大量的信息,但是其特征规律有时并不明显,在现场实际中该现象更加突出,因此对实验室小尺度的表面电位信号进行分析,掌握其波动变化特征,了解内部不同强度信号分布规律非常必要,同时也为现场表面电位信号特征分析提供参考。

本文应用多重分形理论对表面电位信号统计分形规律进行分析,并进一步分析多重分形谱特征值 $\Delta\alpha$ 和 Δf 随加载过程的变化规律,以期为表面电位应用于实际监测煤岩失稳破坏提供理论参考。

1 多重分形理论

采用盒维数法计算表面电位时间序列的多重分形谱。设一时间序列记为 $\{x_i\}$, 将 $\{x_i\}$ 划分为长度为 ε 的 N 个子集, 计算每个子集的概率分布 $\{P_i(\varepsilon)\}$ 。如果时间序列满足多重分形特征, 则概率分布函数 $\{P_i(\varepsilon)\}$ 与划分尺度 ε 在 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时满足

$$\{P_i(\varepsilon)\} \propto \varepsilon^\alpha \quad (1)$$

其中, α 为常数, 称为奇异性指数, 控制着 $\{P_i(\varepsilon)\}$ 的奇异性, 反映了 $\{x_i\}$ 各个尺寸 ε 下, 概率分布随 ε 变

化的各个子集的性质, 即概率子集的不均匀程度。

若以 α 标记的子集具有相同概率的单元数目记为 $N_\alpha(\varepsilon)$, 一般情况下, 划分尺度 ε 越小, 得到的子集数目越多, 因此 $N_\alpha(\varepsilon)$ 随 ε 的减小而增大, 且

$$N_\alpha(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (2)$$

式中, $f(\alpha)$ 为 α 所代表的子集在整个子集集合中出现的频率, 也是 α 子集的分维数。

在实际计算过程中, 应用定义法计算较难实现。目前计算多重分形谱多应用统计物理的方法^[15-17]。首先, 定义一个配分函数, 即统计矩

$$X_q(\varepsilon) \equiv \sum P_i(\varepsilon)^q \sim \varepsilon^{\tau(q)} \quad (3)$$

其中, $\tau(q)$ 为质量指数, $-\infty < q < +\infty$, 在实际计算中当 $|q|$ 达到一定值时, 最终的计算结果是多重分形谱趋于稳定, 再大的 q 值也不会对多重分形谱产生影响, 因此在实际计算时, 可以将 q 的取值限制在一定的范围内。

在式(3)的等式成立时, 即定义的配分函数与划分尺度 ε 存在幂指数关系时, 可以通过双对数曲线 $\ln X_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 的斜率计算 $\tau(q)$ 值, 即

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln X_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (4)$$

理想的规则多重分形 $\ln X_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 曲线满足严格的线性关系, 实际计算中存在多重分形特征的序列也应该满足较好的线性关系, 否则在 q 的变化过程中会出现异常。

由 $\tau(q) - q$ 经过勒让德变换可得

$$\alpha = \frac{d(\tau(q))}{dq} = \frac{d \left(\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln X_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \right)}{dq} \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau(q) \quad (6)$$

α 与 $f(\alpha)$ 构成的 $\alpha - f(\alpha)$ 曲线即为所计算序列的多重分形谱, 可以反映时间序列 $\{x_i\}$ 内部不均匀分布的性质。

2 煤样破裂表面电位实验

2.1 试验系统

煤岩表面电位测试系统由加载系统和煤岩破裂表面电位数据采集系统组成, 整个实验系统置于高效电磁屏蔽系统内, 如图1所示。

加载系统由 YAW 伺服压力机以及 DCS-300 控制系统组成, 该系统可以实现不同方式加载, 能够通过微机控制加载过程, 并同步记录加载过程中的载荷、位移等数据。煤岩表面电位数据采集系统采用 LB-IV 多通道数据采集仪。

2.2 试样样品制备及试验方案

从井下取大块煤样, 加工成两种尺寸试样, 编号

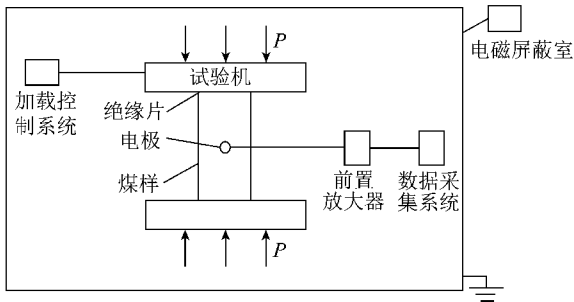


图1 煤岩表面电位测试系统

Fig. 1 Test system of coal or rock surface potential

为I,II,每组5个,分别为:I号试样选取5 cm×5 cm的原煤,II号试样选取10 cm×10 cm的原煤。

试验采用铜片电极感应试样的表面电位,所选电极片大小为15 mm×15 mm,粘贴于煤体表面,经过一段时间后达到电位平衡。在加载前,先对表面电位测试系统进行调试,确保测试前表面电位平稳,待调试平稳后,开始进行单轴加载直至试样破坏。

3 试验结果与分析

3.1 煤体表面电位试验结果

对试样进行单轴压缩试验,选择典型试验结果进行分析,如图2所示。

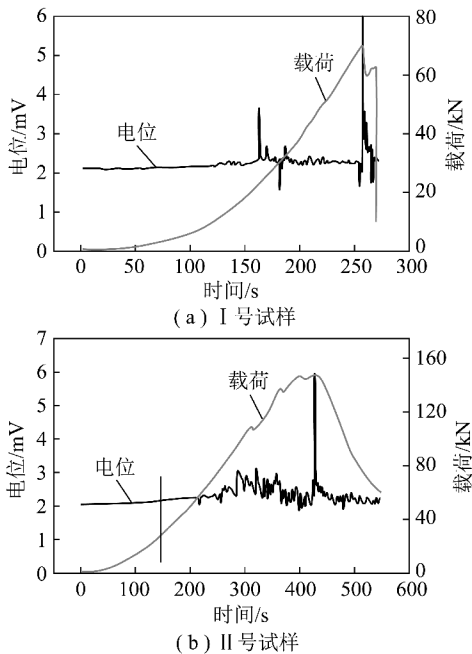


图2 试样表面电位试验结果

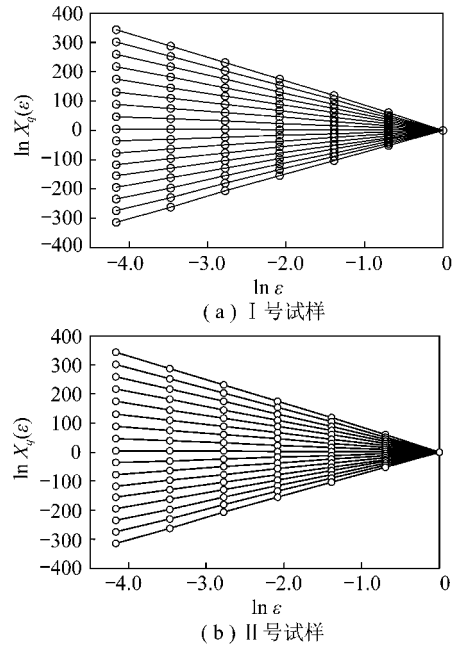
Fig. 2 Surface potential experimental results of coal samples

由图2可以看出,煤样在加载破裂过程中会产生表面电位,并且随加载过程的进行,表面电位呈现缓慢升高的趋势,表现出良好的同步性。当载荷出现突然变化时,煤体内部出现破裂,监测到的表面电位往往会出现突然升高。煤体在载荷达到最大值时,表面

电位会出现最大值,试样完全破裂失去承载能力时,表面电位也会出现较大变化。

3.2 表面电位多重分形计算结果

将表面电位时间序列划分为许多尺寸为 ε 的子集,计算每个子集的概率,得到整个表面电位时间序列的概率分布,求解其配分函数 $X_q(\varepsilon)$,绘出配分函数与划分尺度之间的双对数曲线,如图3所示,所取 q 值为-80~80,以10为步距。由计算结果可以看出, $\ln X_q(\varepsilon)$ 与 $\ln \varepsilon$ 呈现很好的直线关系,两者满足较大尺度的标度不变性。

图3 $\ln X_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ 拟合曲线Fig. 3 $\ln X_q(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ fitting curves

根据多重分形理论可得到两组试样的多重分形谱曲线,计算结果如图4所示。由图4可以看出,两组试样表面电位时间序列的多重分形谱为右钩状,说明表面电位信号时间序列中,小信号出现频率大于大信号。由前人研究成果^[1,11]及表面电位试验结果可知,表面电位可以很好地反映试样受力状态,因此,奇异性指数 α 由大到小的过程可以看作试样受压逐渐破裂的过程,由图4可以看出,煤样受载破裂过程中的分形维数先升高后降低。

由多重分形理论可知,多重分形谱的特性参数可以很好地反映出分析对象内部存在的差异性。 α 代表不同的表面电位信号子集, α_{\min} 所代表的子集对应表面电位信号序列中的大信号, α_{\max} 所代表的子集对应表面电位信号序列中的小信号,因此多重分形谱宽度 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$,能够反映表面电位大信号与小信号之间的差异, $\Delta\alpha$ 越大,说明两者相差越多,表面电位变化越剧烈,反之,亦然。 $f(\alpha)$ 大小表示奇异性为 α

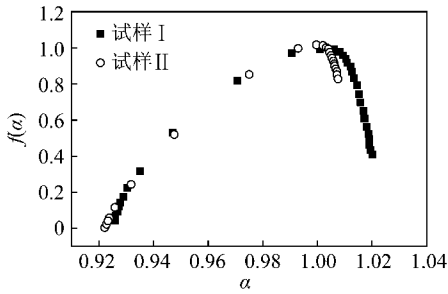


图4 试样表面电位多重分形特征曲线

Fig. 4 Multi-fractal spectrum of surface potential of samples

的表面电位信号子集在整个加载过程中出现的频率,令 $\Delta f = f(\alpha_{\max}) - f(\alpha_{\min})$, 则 Δf 反映了表面电位时间序列中小信号与大信号之间出现频率的关系。

为更好地分析表面电位信号多重分形特征与试样破裂之间的关系,现分析不同应力水平表面电位时间序列的特征参数 $\Delta\alpha$ 和 Δf 的变化规律(图5)。

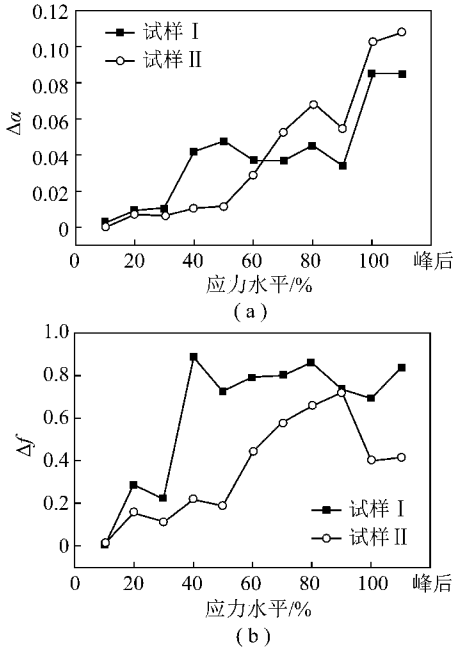


图5 $\Delta\alpha$ 和 Δf 随加载的变化规律

Fig. 5 The variation of $\Delta\alpha$ and Δf with the load

煤体内部存在大量缺陷,受压时内部应力随机分布,变形破裂也随机发生。原煤试样加载时,内部裂隙首先发生闭合,之后裂纹稳定扩展,

由图5可知,随加载过程的进行, $\Delta\alpha$ 整体呈现不断升高的趋势, Δf 呈现先升高后降低的趋势。应力水平加载小于30%时, $\Delta\alpha$ 基本维持在较低水平,这是因为在该加载阶段试样主要发生内部原生裂隙受压变形闭合,试样内部几乎所有原生裂隙都参与这一过程,因此此时产生表面电位小信号较丰富,基本没有大信号产生,所以 $\Delta\alpha$ 维持在较低水平;此时 Δf 较小,但是呈现出先增高后降低的趋势,这主要是由

受载前期产生表面电位信号较丰富导致,试样受压内部原生裂隙开始闭合时,几乎所有的微裂纹参与,因此产生的电位信号较丰富,当试样内部原生裂隙完全闭合而未开始发生扩展时,产生表面电位信号较少,因此 Δf 呈现先升高后降低的趋势。之后随载荷水平的不断升高,在30%~80%,试样II的 $\Delta\alpha$ 不断升高;而在30%~50%应力水平,试样I的 $\Delta\alpha$ 升高,在50%~80%应力水平,则处于较高的水平波动,可以将30%~80%应力范围内 $\Delta\alpha$ 整体看作升高的趋势,两试样 $\Delta\alpha$ 出现该变化规律是因为应力水平进入30%~80%后,试样进入均匀变形阶段,此时试样主要是积聚弹性能,内部微裂纹稳定扩展,应力和表面电位值缓慢升高,有时试样内部会出现局部微裂纹的贯通,产生较大规模的破裂,导致表面电位信号突然升高,发生脉冲式变化,因此在该应力水平范围 $\Delta\alpha$ 整体呈现升高的趋势;与 $\Delta\alpha$ 变化趋势相似,两试样的 Δf 整体呈现不断升高的趋势,这是因为在加载过程中信号不断升高,但是产生的大信号数量始终较少,而诱发产生大信号数量更少,导致 Δf 不断升高。载荷加载至80%~90%时,两试样 $\Delta\alpha$ 出现较大幅度的降低,这是因为在该阶段载荷逐渐接近峰值载荷,试样内部积累了足够的能量,变形开始加速,煤体中大量裂纹逐渐汇合贯通,产生的较大规模的破裂诱发产生表面电位大信号,每次破裂之后,微裂纹继续积聚能量再次汇合,因此产生的表面电位大信号并不是连续的,中间存在一定的时间间隔(图4)。观察该阶段表面电位信号规律可以看出,小信号仍然占据主要位置,但是大信号出现频率增加,而大信号与小信号的交替出现造成了 $\Delta\alpha$ 的降低;试样I的 Δf 降低,试样II的 Δf 升高,从图4可以看出,试样I在该应力水平产生表面电位较前一阶段较为平稳,波动较小,使得 Δf 降低,而试样II表面电位信号较前一阶段波动较为剧烈,产生大信号非常丰富,因此 Δf 升高。之后加载继续进行,当达到峰值应力时,两试样 $\Delta\alpha$ 迅速升高,这是因为表面电位信号出现最大值,此时最大值远远超过前期的表面电位值,导致 $\Delta\alpha$ 迅速升高;同时两试样的 Δf 降低,这是因为在该阶段内产生的表面电位信号多以大信号为主,使得大信号出现频率升高,导致 Δf 降低。峰值应力过后,试样进入残余变形阶段,产生表面电位信号较平稳, $\Delta\alpha$ 变化较小,产生表面电位小信号数量增多,使得 Δf 升高。

观察 $\Delta\alpha$ 和 Δf 的变化趋势可以看出, $\Delta\alpha$ 和 Δf 随加载进行的变化趋势能够很好地反映试样受力破裂情况,特别是试样内部破裂加速,临近峰值应力时, $\Delta\alpha$ 和 Δf 迅速降低,因此可以将 $\Delta\alpha$ 和 Δf 经过长时

间平稳升高后迅速降低的趋势改变作为判断试样临界峰值应力并发生破坏的依据,提前对试样破坏进行预警。

4 结 论

(1)表面电位信号具有良好的多重分形特征,在较大尺度内满足标度不变性,多重分形谱为右钩状曲线,表面电位信号中小信号出现频率大于大信号,多重分形谱曲线能够很好地反映表面电位大信号与小信号存在的差异。

(2)多重分形谱特征参数 $\Delta\alpha$ 和 Δf 的变化与试样受载变形破裂过程具有较好的对应性。通过对加载至各个阶段的 $\Delta\alpha$ 和 Δf 变化趋势可以得出, $\Delta\alpha$ 和 Δf 经过长时间平稳升高后迅速下降的趋势改变可以作为试样破裂的前兆信息,对试样失稳破坏进行预警。

参考文献:

- [1] 王恩元,何学秋,李忠辉,等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Li Zhonghui, et al. EMR technology of coal or rock and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] Frid V I, Shabarov A N, Proskurya Kov V H, et al. Formation of electromagnetic radiation in coal stratum[J]. J. Mining Science, 1992, 28(2): 139-145.
- [3] 何学秋,刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995:22-38.
He Xueqiu, Liu Mingju. Fracture electro-magnetic dynamics of coal or rock containing gas[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995:22-38.
- [4] 王恩元. 含瓦斯煤破裂的电磁辐射和声发射效应及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,1997.
Wang Enyuan. The effect of EME & AE during the fracture of coal containing gas and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1997.
- [5] 王恩元,何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报,2000,43(1): 131-137.
Wang Enyuan, He Xueqiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131-137.
- [6] 王恩元,何学秋,刘贞堂. 煤岩变形及破裂电磁辐射信号的分形规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1998,17(4): 343-347.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhen tang. The fractal rule of eme during coal or rock deformation and fracture[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 1998, 17(4): 343-347.
- [7] 魏建平,何学秋,王恩元,等. 煤与瓦斯突出电磁辐射多重分形特征[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005,24(1):1-4.
Wei Jianping, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Electromagnetic emission multi-fractal characteristic of coal and gas outburst[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(1): 1-4.
- [8] 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 electromagnetic emission[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 452-455.
- [9] 姚精明,闫永业,税国洪,等. 煤岩体破裂电磁辐射分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S2):4102-4107.
Yao Jingming, Yan Yongye, Shui Guohong, et al. Study of fractal characteristics of electromagnetic emission during coal and rock mass fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4102-4107.
- [10] 吴小平,施行觉,郭自强. 花岗岩压缩带电的实验研究[J]. 地球物理学报,1990,33(2):208-211.
Wu Xiaoping, Shi Xingjue, Guo Ziqiang. Study on the electrification of granite samples under compression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(2): 208-211.
- [11] 郝锦琦,刘力强,龙海丽,等. 双轴压力下岩样自电位变化实验的新结果[J]. 地球物理学报,2004,47(3):475-482.
Hao Jinqi, Liu Liqiang, Long Haili, et al. New result of the experiment on self-potential change of rocks under biaxial compression[J]. Chinese J. Geo-phys., 2004, 47(3): 475-482.
- [12] 李忠辉. 受载煤体变形破裂表面电位效应及其机理的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.
Li Zhonghui. Study on surface potential effect and its mechanism of coal during deformation and fracture under load[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007.
- [13] 王恩元,李忠辉,刘贞堂,等. 受载煤体表面电位效应的实验研究[J]. 地球物理学报,2009,52(5):1318-1325.
Wang Enyuan, Li Zhonghui, Liu Zhen tang, et al. Experimental study on surface potential effect of coal under load[J]. Chinese J. Geophys., 2009, 52(5): 1318-1325.
- [14] 刘杰,王恩元,李忠辉,等. 预制裂纹煤样单轴压缩表面电位实验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(7):1135-1138.
Liu Jie, Wang Enyuan, Li Zhonghui, et al. Experiment study on surface potential of pre-cracked coal under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1135-1138.
- [15] Sun Xia, Fu Zhuxi, Wu Ziqin. Multifractal analysis and scaling range of ZnO AFM images[J]. Physica A, 2002, 311: 327-338.
- [16] 陈亦望,徐鑫,傅强. 基于多个无标度区的多重分形分析方法[J]. 计算物理,2010,27(26):905-911.
Chen Yiwang, Xu Xin, Fu Qiang. Multifractal analysis method based on several scale-free zones[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(26): 905-911.
- [17] 孙霞,吴自勤,黄韵. 分形原理及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003:68-74.
Sun Xia, Wu Ziqin, Huang Yun. Principle and apply of fractal[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003: 68-74.