

微地震信号的频率特征

李智敏¹, 苟先太², 金炜东², 秦娜², 刘景波², LUO Xun³

(1. 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都, 610031; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都, 610031;

3. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 勘探与采矿技术中心, 昆士兰 4069)

摘要: 为了研究微地震信号的频率特征, 用 DB5 小波对信号进行 5 层分解计算显著频率, 用窗口傅立叶变换计算瞬时频率, 发现频率有衰减趋势。微地震过程中, 先产生频率较高的振动, 由于岩体阻尼而非面波频散引起振动频率衰减。对微地震信号预分段, 用小波提取其频率谱中的频率特征, 得到了频率变化的四种趋势。用相邻零点和相邻峰值点法计算信号的半周期, 证实了频率存在衰减性, 同时发现频率与振幅有关, 振幅大(小), 频率低(高), 这可能是由于岩石的非线性蠕变造成的, 可用于研究岩石非线性特性。

关键词: 微地震; 振幅; 频率; 衰减; 小波; 窗口傅立叶变换

中图分类号: TU435; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0830-05

作者简介: 李智敏(1964-), 男, 四川岳池人, 工程师, 博士研究生, 主要从事智能信息处理、信号识别与仿真。E-mail: lizhimin@home.swjtu.edu.cn。

Frequency features of microseismic signals

LI Zhi-min¹, GOU Xian-tai², JIN Wei-dong², QIN Na², LIU Jing-bo², LUO Xun³

(1. School of Material Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Electrical

Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Exploration and Mining Technology Court, CSIRO, Kenmore
QLD Australia, 4069)

Abstract: For exploring the frequency features of microseismic signals, the frequency spectrum of the signals was obtained with DB5 in 5 levels, and the instantaneous frequency of the signals was achieved with the windowed Fourier transform. Tendency of frequency attenuation was found. High frequency vibrations did occur early in the microseism, and then the frequency was attenuated because of the damping of rock but not by the frequency dispersion of surface waves. The signals were divided into segments and the frequency spectra were got and the frequency features were achieved and 4 types of variation of frequency were found. Half-period of microseismic signals was gained through computing the intervals of adjacent zeros or adjacent peaks of microseismic signals and the tendency of frequency attenuation was found too. The frequency might correlated to the amplitude. Sometimes the larger (smaller) the amplitude, the lower (higher) the period. The relativity of frequency and amplitude might be caused by the nonlinear creep of the rock and it might be a method of studying nonlinear characteristics of rock.

Key words: microseism; amplitude; frequency; attenuation; wavelet; windowed Fourier transform

0 引言

已有的微地震研究, 着重于研究信号的能量谱^[1]、微地震的定位^[2]、微地震采场围岩空间破裂形态^[3]、微地震监测^[4]、Kaiser 效应在微地震研究中的应用^[5-7], 也有报导岩体微震频率谱分析^[8]、受载煤体声发射的频谱分析^[9]的文献。对不同信号(包括微地震)频率特性的研究也得到了一些结果: 低频声发射信号在传播过程中能量衰减小于高频声发射信号, 高频分量的振幅在传播途中衰减很大, 传播距离较小; 声发射传播速度越低, 衰减越大^[10]。柔性波的波速并不是恒定

的, 与波的频率有关, 频率高的波传播速度快, 频率低的波传播速度相对较慢^[2]。声发射活动弱时频率域靠近低频, 声发射活动强时频率域向中部区域集中^[1]。信号中高频分量由于远距离衰减而减少, 低频部分传播的距离比高频部分大^[11]。在围岩类别一定的前提下, 微地震信号的振幅与其频率有定量关系, 小振幅的微地震事件意味着其声发射的频率较高^[12]。本文尝

基金项目: 教育部“春晖计划”科研合作项目(Z2005-1-51001)

收稿日期: 2007-07-02

试研究微地震脉冲段的频率特征。采用小波变换和窗口傅立叶变换, 利用相邻零值点、峰值点法直接计算频率。

1 小波理论和窗口傅立叶变换

1.1 小波理论

多分辨率分析可以对信号进行有效的时频分析, 由于其尺度是按二进制变化的, 有 $\Delta t^j \propto 2^j$, $\Delta f^j \propto 2^{-j}$, 当尺度 j 较小时, 频率分辨率差, 当 j 较大时, 时间分辨率差, 这对于急剧变化的高频信号是不合适的。小波是提取信号时频特征的有效工具, 特别在低频部分, 小波具有很高的频率分辨率。

设 $\Psi(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间, 即能量有限的信号空间, 其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$ 。当 $\Psi(\omega)$ 满足允许条件

$$C_\Psi = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (\omega < \infty) \quad (1)$$

时, $\Psi(t)$ 称为一个基本小波或母小波。将母函数 $\Psi(t)$ 经伸缩和平移后得到

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0), \quad (2)$$

称为一个小波序列。其中, a 为伸缩因子, b 为平移因子。对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换为

$$W_F(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db, \quad (3)$$

其逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_R \int_R \frac{1}{a^2} W_F(a, b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db. \quad (4)$$

小波变换的时频窗口特性与 STFT 的时频窗口不一样。其窗口形状为两个矩形 $[b-a\Delta\Psi, b+a\Delta\Psi] \times [(\pm\omega_0+\Delta\Psi)/a, (\pm\omega_0+\Delta\Psi)/a]$, 窗口中心为 $(b, \pm\omega_0/a)$ 。其中 b 仅影响窗口在相平面时间轴上的位置, a 不仅影响窗口在频率轴上的位置, 也影响窗口的形状。小波变换对不同的频率在时域上的取样步长是调节性的: 低频段小波变换的时间分辨率较低, 频率分辨率较高; 高频段小波变换的时间分辨率较高, 频率分辨率较低。图 1 为小波分解树, 原始信号表示为

$$S = A_4 + D_4 + D_3 + D_2 + D_1. \quad (5)$$

1.2 窗口傅立叶变换^[13]

一般利用支集于 $[-1/2, 1/2]$ 的对称窗函数来计算窗口傅立叶变换。对固定的尺度 s , $g_s(t) = s^{-1/2} g(t/s)$ 的支集宽度为 s , 且有单位范数。相应地, 其窗口傅立叶原子是

$$g_{s,u,\xi}(t) = g_s(t-u) e^{i\xi t}, \quad (6)$$

其傅立叶变换定义为

$$Sf(u, \xi) = \langle f, g_{s,u,\xi} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g_s(t-u) e^{-i\xi t} dt. \quad (7)$$

通过下面的定理将 $Sf(u, \xi)$ 与瞬时频率 f 联系起来。

定理: 令 $f(t) = a(t) \cos \phi(t)$ 。若 $\xi \geq 0$, 则

$$\langle f, g_{s,u,\xi} \rangle = \frac{\sqrt{s}}{2} a(u) \exp(i[\phi(u) - \xi u]) (\hat{g}(s[\xi - \phi'(u)]) + \varepsilon(u, \xi)). \quad (8)$$

根据 Heisenberg 测不准原理, 信号的时频变差满足不等式

$$\sigma_t^2 \sigma_\omega^2 \geq 1/4, \quad (9)$$

式中, σ_t 为 Heisenberg 盒子的时间宽度, σ_ω 为 Heisenberg 盒子的频率宽度。

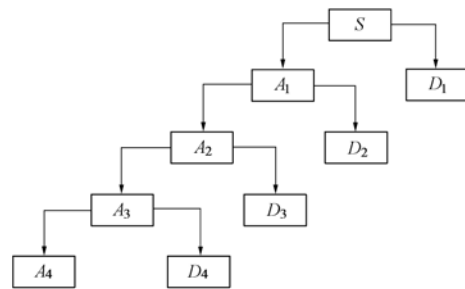


图 1 小波分解树

Fig. 1 The decomposition tree of wavelets

由式 (9) 可以知道, 当提取信号的时频特征时, 不可能在时域和频域同时得到好的分辨率, 提高时域的分辨率, 则降低频域的分辨率。加宽时窗, 则降低时域的分辨率, 增加频域的分辨率。

由计算频率的原理可以知道, 计算得到的频率与选取的窗口大小有关, 而不是某时间点的绝对频率, 只能用于表征微地震过程中频率变化的趋势。

2 微地震信号与地震波的异同

地震波的波长很长, 一般大于数百米乃至数千米, 局部介质的不均匀性对地震波传播基本没什么影响, 宏观上可以把地球介质视为均匀且连续的。地震波有体波、面波等类型。具体震相有 P 波、S 波、SV 波、SH 波、瑞利 (Rayleigh) 波、勒夫 (Love) 波等。其中瑞利波和勒夫波是最常见的两种面波。在单层地壳模型中, 近震且震源位于地壳中的情况下, 记录到的地震波主要有直达波 ($\bar{P}$, $\bar{S}$)、反射波 (P_{11} , S_{11}) 和绕射波 (P_n , S_n)。在双层地壳模型中, 地壳中存在一个叫做康拉德 (V. Conrad) 的速度间断面 (或叫 C 间断面), 把地壳分为上、下两层。当震源位于不同层时, 除传播路径变化外, 由于震源位置及地震波在不同地层的传播速度不同, 可能出现直达波 $\bar{P}$, $\bar{S}$, 康拉德界面上的反射波 P_c , S_c , 绕射波及莫霍界面上的反射波 P_{11} , S_{11} , 康拉德界面上的折射波 P^* , S^* 和绕射波 P_n , S_n 。在地震波中可观察到面波频散现象^[14]。

微地震信号震源浅、传播距离小,虽然波长较地震波更短,局部介质的不均匀性对微地震信号的影响比地震波的影响大,但其传播距离远远小于地震波,可以近似地看成是在相同层相结构的岩体中传播。微地震信号的频率为 50~200 Hz,假定微地震波速为 3500 m/s,则其波长大约在 17.5~70 m 左右,可以认为,当岩体的不均匀性小于 17.5 m,则对微地震信号的传播没有影响。微地震信号不会穿过康拉德界面、莫霍界面或者其他对波速有显著影响的界面,故只存在 P 波和 S 波及其叠加,因此可以认为微地震信号中不会存在面波频散。在研究中得到的频率特征是微地震固有的振动特性。信号的表现复杂性是由于 P 波、S 波(P 波比 S 波波速大)波速不同及两种波叠加、岩体非线性和各种噪声等因素造成的。

3 实例分析与讨论

实例分析程序用 Matlab 实现,用 Origin 处理数据,Matlab 版本为 2006a, Origin 版本为 7.5SR1。

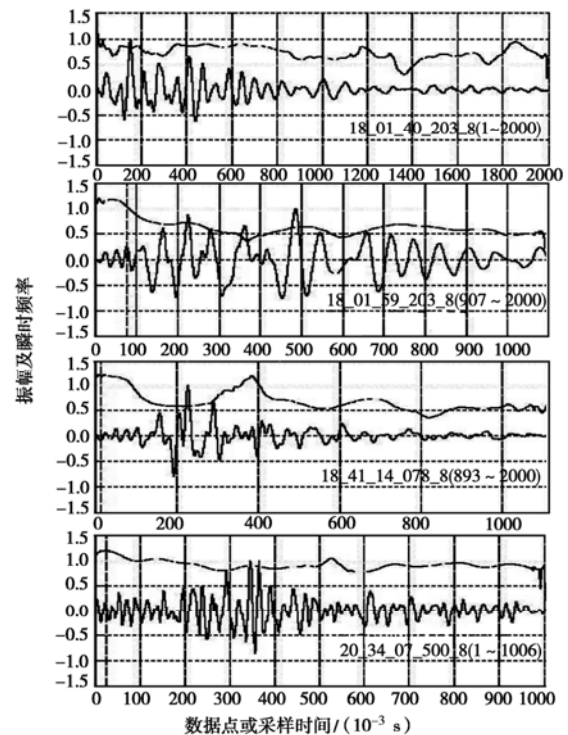
数据处理时,用 DB5 小波进行 5 层分解计算微地震信号的频率谱,用窗口傅立叶变换(窗口尺寸为 80)计算信号的瞬时频率。由于窗口尺寸直接影响频率趋势线,尺寸过大,得到的频率趋势线不明显,尺寸过小,得到的频率趋势线变复杂。为了得到较好的频率趋势线,选定窗口尺寸为 80。

为了得到微地震信号脉冲段的频率趋势线,共处理了 16 个微地震信号,图 2 给出了其中四个有代表性的结果,图 3 给出了信号(00_47_00_06)的脉冲段的波形及瞬时频率的变化趋势。所研究的微地震信号脉冲形状、持续时间差异较大,可以看出是由不同原因造成的微地震。在所处理的 16 个微地震信号中,只有一个信号存在频率增大趋势、一个微地震信号频率变化趋势不明,其余信号全部存在频率衰减现象。造成信号频率增加的原因是未能完整采集到完整信号、部分信号缺失及其他不明原因。

研究发现,在微地震信号脉冲内部,频率在由高到低衰减一段时间后再次升高,并再次表现出由高到低衰减的趋势,这可用 P 波的波速比 S 波的波速快来解释。第一次频率由高到低的衰减是由先到达探测器的 P 波引起的,这个衰减过程表征了微地震信号 P 波的频率衰减;微地震脉冲内部频率再次升高并由高到低衰减是稍后到达探测器的 S 波造成的,在这段信号中,叠加了 S 波和 P 波的余波,信号波形较复杂。

为了减小窗口尺寸对计算瞬时频率的影响,对原始数据预分段后再进行小波分析,得到信号的频率谱。在所处理的 16 个微地震信号中,除两个信号表现出频率先增大再减小的趋势外,其余信号均存在衰减—增大—衰减现象。图 4 给出了信号(00_47_00_06)对原

始数据预分段后再进行小波分析得到的频率谱和显著频率,两者都表明,微地震脉冲段的频率存在衰减趋势,最后一段(429~478)频率升高的原因是信号振幅小、噪声影响增大造成。



注:为了在一个图形中绘制不同的微地震信号,各信号的纵坐标绘制比例不同;微地震信号位于下方,频率趋势曲线位于上方;信号名后括号内的数值为计算的范。

图 2 微地震信号脉冲段频率变化趋势

Fig. 2 Variation of frequency of microseismic pulse segment

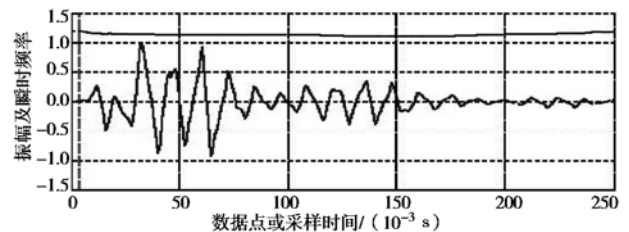


图 3 00_47_00_06 的脉冲段频率变化趋势

Fig. 3 Variation of frequency of 00_47_00_06

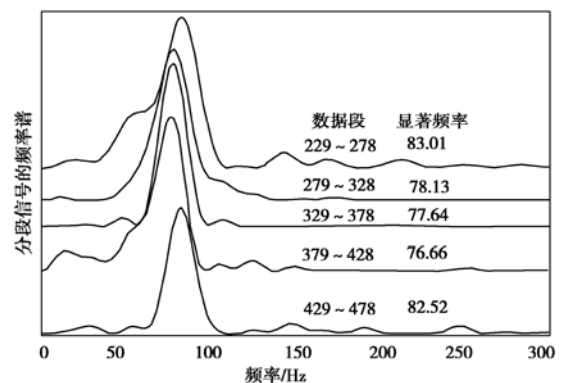


图 4 信号 00_47_00_06 的分段频率谱及其显著频率

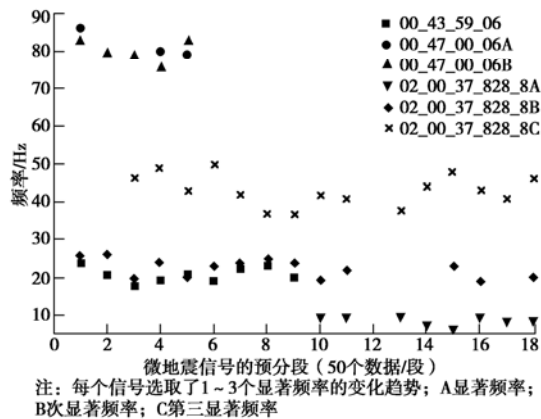
Fig. 4 FFT spectrum and its dominant frequency of microseismic segments of 00_47_00_06

表 1 微地震信号频率变化趋势类型

Table 1 Type of variation of frequency for microseismic signals

类型	原 因
衰减	震距小, P 波、S 波到达时间差小于数据分析的分辨率
衰减—增大	震距小, P 波、S 波到达时间差小于数据分析的分辨率, 岩石非线性蠕变造成的频率与振幅的相关性造成的, 振幅增大, 频率减小
衰减—增大—衰减	震距大, P 波、S 波到达时间差大于数据分析的分辨率, 第一次频率衰减由 P 波贡献, 频率增大并再次衰减由 S 波贡献
增大—衰减	数据不完整, 其它

表 1 给出了微地震信号频率变化趋势类型及其原因。提取频率谱中显著频率, 得到的结果见图 5。



注: 每个信号选取了 1~3 个显著频率的变化趋势; A 显著频率; B 次显著频率; C 第三显著频率

图 5 预分段微地震信号的频率变化趋势

Fig. 5 Variation of microseismic segments

纵波和横波的速度比

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}, \quad (10)$$

式中, ν 为岩石的泊松系数, $\nu = \lambda / 2(\lambda + \mu)$, λ 和 μ 是介质的弹性常数。

一般岩石的泊松系数 ν 近似于 0.25, 所以

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{3} \approx 1.73. \quad (11)$$

假定 P 波在岩体中传播速度为 3464 m/s, 则 S 波的传播速度为 2000 m/s。

当微地震震距小于 29 m 时, P 波比 S 波早到达探测器 $29/3464=0.008372$ s。在抽样时间为 1/1000 s 条件下, 分段长度应小于或等于 8 个数据点才能分辨出初至 P 波与 S 波。这样的数据长度太短, 用小波分解得不到正确的频率特征值。实际在预分段数据长度为 50 时, 能分辨 P 波与 S 波的临界距离为 173.20 m, 小于这个距离的微地震, 用频率谱不能分辨出 P 波与 S 波。

为了验证上述结果, 选取干扰较少的微地震脉冲段的局部信号段, 用相邻两个零点或相邻的正、负值峰值点的时间间隔作为信号的半周期, 计算结果见图 6 和图 7。

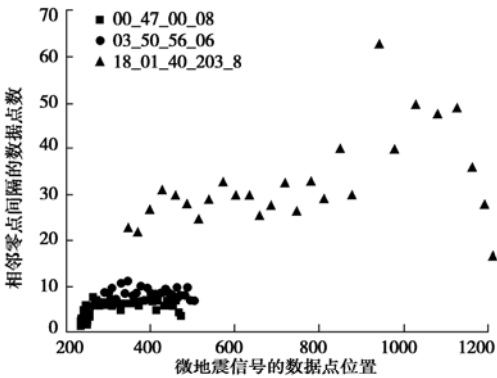


图 6 微地震信号中相邻零点的数据点间隔

Fig. 6 Interval of adjacent zeros in microseismic signals

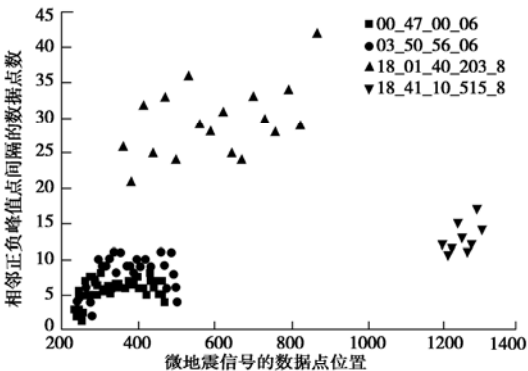


图 7 微地震中相邻峰值点的数据点间隔

Fig. 7 Interval of adjacent peaks in microseismic signals

在图 6 和图 7 中, 微地震信号相邻零点间和相邻峰值点间间隔的数据点数都有逐渐增大的趋势, 表明微地震的振动频率逐渐减少, 频率发生了衰减。信号 (00_47_00_05, 03_50_55_05, 18_01_40_203_8) 相邻零点与信号 (00_47_00_05, 03_50_55_05) 相邻峰值点间的数据点间隔在脉冲段末端有减小的趋势, 表现出频率有再次增大的趋势。由于岩石的蠕变造成频率与振幅存在相关性: 振幅增大, 非线性振动的频率减小; 振幅减小, 非线性振动的频率增大。在微地震脉冲段末端振幅减小, 表现出非线性振动的频率增大。

4 结 语

通过计算微地震脉冲段的频率变化趋势, 发现并

报导了微地震信号的频率衰减现象。采用预分段后再进行频率谱分析,用相邻两个零点或相邻的正、负值峰值点的时间间隔作为信号的半周期等方法进行了验证,结果都表明微地震信号存在频率衰减。

微地震过程中,先产生频率较高的振动,由于岩体阻尼等因素而非面波频散引起振动频率衰减。

岩石非线性蠕变会造成的频率与振幅的相关性,振幅增大,频率减小,振幅减小,频率增大。

致谢:感谢澳大利亚联邦工业研究院(CSIRO)勘探与采矿中心的合作与支持。

参考文献:

- [1] 逢焕东, 张兴民, 姜福兴. 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. (PANG Huan-dong, ZHANG Xing-min, JIANG Fu-xing. The spectrum analysis of acoustic emission signal in rock materials[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(5): 540 - 544. (in Chinese))
- [2] 李光海, 刘时风. 基于小波分析的声发射源定位技术[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(7): 136 - 140. (LI Guang-hai, LIU Shi-feng. Technique of acoustic emission source locating based on wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, **40**(7): 136 - 140. (in Chinese))
- [3] 姜福兴, LUO Xun, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采场应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **25**(1): 23 - 25. (JIANG Fu-xing, LUO Xun, YANG Shu-hua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **25**(1): 23 - 25. (in Chinese))
- [4] ROTHERT Elmar, SHAPIRO Serge A. Microseismic monitoring of borehole fluid injections: Data modeling and inversion for hydraulic properties of rocks[J]. Geophysics, 2003, **68**(2): 685 - 689.
- [5] 张山, 刘清林, 赵群, 等. 微地震监测技术在油田开发中的应用[J]. 石油物探, 2002, **41**(2): 226 - 231. (ZHANG Shan, LIU Qing-lin, ZHAO Qun, et al. Application of microseismic monitoring technology in development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, **41**(2): 226 - 231. (in Chinese))
- [6] 刘百红, 秦绪英, 郑四连, 等. 微地震监测技术及其在油田中的应用现状[J]. 勘探地球物理进展, 2005, **28**(5): 325 - 329. (LIU Bai-hong, QIN Xu-ying, ZHENG Si-lian, et al. Microseismic monitoring and its applications in oilfield operations[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, **28**(5): 325 - 329. (in Chinese))
- [7] 石林, 张旭东, 金衍, 等. 深层地应力测量新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(14): 2355 - 2358. (SHI Lin, ZHANG Xu-dong, JIN Yan, et al. New method for measurement of In-situ stresses at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(14): 2355 - 2358. (in Chinese))
- [8] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(7): 772 - 775. (LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Frequency spectrum analysis on microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(7): 772 - 775. (in Chinese))
- [9] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤体破裂声发射的频谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2004, **29**(3): 289 - 292. (WANG En-yuan, HE Xue-qiu, LIU Zhen-tang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(3): 289 - 292. (in Chinese))
- [10] 邹银辉, 文光才, 胡千庭, 等. 岩体声发射传播衰减理论分析与试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, **29**(6): 663 - 667. (ZOU Yin-hui, WEN Guang-cai, HU Qian-ting. Theory analysis and experimental study of the spread and attenuation of acoustic emission in rock body[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(6): 663 - 667. (in Chinese))
- [11] 聂伟荣, 朱继南, 夏虹. 地面运动目标分类的模式特征与评价[J]. 探测与控制学报, 2002, **24**(3): 25 - 29. (NIE Wei-rong, ZHU Ji-nan, XIA Hong. Feature and evaluation of the moving target on the ground[J]. Journal of Detection & Control, 2002, **24**(3): 25 - 29. (in Chinese))
- [12] OYE Volker, ROTH Michael. Automated seismic event location for hydrocarbon reservoirs[J]. Computers & Geosciences, 2003, **29**: 851 - 863.
- [13] MALLAT Stephane. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华, 戴道清, 黄文良, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2002: 23, 70. (MALLAT Stephane. A wavelet tour of signal processing[M]. YANG Li-hua, DAI Dao-qing, HUANG Wen-liang, et al, trans. Beijing: China Machine Press, 2002: 23, 70. (in Chinese))
- [14] 金旭, 傅维洲. 固体地球物理学基础[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003: 17 - 25. (JIN Xu, FU Wei-zhou. Basis of solid geophysics[M]. Changchun: Jilin University Press, 2003: 17 - 25. (in Chinese))