

基于小波分析的煤岩破坏声发射信号处理*

杨慧明,文光才,邹银辉

(煤炭科学研究总院重庆研究院,重庆 400037)

摘要 煤岩变形破坏过程中会以声发射的形式向外释放能量,利用声发射技术可以判断煤岩体的稳定性,声发射预测瓦斯动力灾害具有很好的应用前景。然而,现场采集到的声发射信号往往含有许多噪音,严重影响了有效信号的自动识别以及灾害预测的可靠性。针对这一问题,根据煤岩声发射信号的特点,对煤巷掘进过程中监测到的信号进行小波时频分析和滤噪处理。结果表明: Daubechies 小波族中的 db6 小波基能满足煤岩声发射信号处理的要求;小波时频分析可以有效地识别出信号中的 300Hz 左右的低频噪音和有效声发射信号,并且有效声发射信号的频率随时间逐渐由 1000Hz 逐步增大到 2000Hz,信号的频带宽度也逐步增大;小波滤噪效果显著,可以有效地滤除噪音,保留有效的 AE 信号,提高信号的信噪比。

关键词 岩石破坏;声发射;小波变换;滤噪;时频分析

我国是世界上煤与瓦斯突出灾害最严重的国家之一,煤与瓦斯突出预测是综合防治突出的一个重要环节。利用声发射技术预测煤与瓦斯突出的危险性,是被各国学者公认的一种最有发展前途的方法^[1]。然而,目前用声发射技术进行突出预测的准确程度与生产实际的需要还有很大差距。由于煤矿井下环境复杂,噪音源众多,实际采样到的声发射信号往往含有许多噪声。声发射数据的噪音严重干扰了数据的参数分析以及灾害判识准则的建立,进而影响了突出预测的可靠性。噪音成为制约声发射技术广泛应用于煤岩动力灾害预测的瓶颈。提高和改进声发射有效信号的识别分析能力一直都是研究的热点^[2],滤噪技术和有效信号的识别技术已成为声发射技术的一个重要的研究内容。

近年来,声发射信号模式识别技术从常规信号的参数鉴别,正逐步向波形鉴别、频谱鉴别、小波鉴别以及人工神经网络识别等新兴信号处理技术的方向发展^[3]。小波分析是 20 世纪 80 年代后期发展起来的应用数学分支,作为新兴的信号处理分析方法,具有强大的生命力。小波变换已成为国际上公认的信号信息获取与处理领域的高新技术,是目前信号处理领域的研究和应用的热点之一^[4-7]。与传统的时域和频域分析不同,小波分析具有同时在时域和频域表征信号局部特征的能力,既能够表示某个局部时间段信号的频谱信息,又可以描述某一频谱信息对应的时域信息,这对于分析具有瞬态特征的声发射信号是最合适的。小波分析在分析声发射信号的时频特性、特征提取、噪音滤除等方面具有传统的时域分析和频域分析所不具备的优越性。

本文采用小波分析的方法,对煤矿巷道掘进过程中产生的声发射信号进行滤噪处理,提高声发射数据的信噪比,为声发射预测煤岩动力灾害提供有效的信号数据;并对声发射信号进行时频分析,研究煤岩声发射有效信号的时频特征,为有效信号的自动识别奠定基础。

* 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB221505);国家自然科学基金重点资助项目(2005E041503)。

杨慧明(1981-),男,山西长治人,硕士。Tel:023-65239338,Email:hp6120@163.com。

1 小波分析理论

1.1 小波变换的定义

设 $\psi(t)$ 为一个平方可积函数, 即 $\psi(t) \in L^2(R)$, 若其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足

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

则称 $\psi(t)$ 为一个小波基函数, 式(1)为小波函数的容许性条件。通过对小波基函数 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移得到一组小波函数:

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

式中, a 为尺度因子, b 为平移因子。

对于函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \cdot \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其重构公式为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \cdot \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

若对(3)式中的尺度因子 a 和平移因子 b 进行离散化, 即取 $a = a_0^m (a_0 > 1)$, $b = nb_0 a_0^m (b_0 \in \mathbf{R}; m, n \in \mathbf{Z})$ 。可以得到函数的离散小波变换。

1.2 小波变换的时频特征

小波序列函数可以看作一系列窗函数。在 b 时间点 $f(t)$ 进行局部分析。设小波基函数 $\psi(t)$ 的中心为 t^* , 时窗宽为 $2\Delta t$, 则小波变换是在如下的时间窗内对 $f(t)$ 进行时域局部分析。

$$[at^* + b - a\Delta t, at^* + b + a\Delta t] \quad (5)$$

同样, 令小波基函数 $f(t)$ 的频谱函数 $\psi(\omega)$ 的中心频率为 ω^* , 频带宽 $2\Delta\omega$, 则根据傅里叶变换的性质, 与式(5)时间窗对应的频率窗为

$$\left[\frac{\omega^*}{a} - \frac{\Delta\omega}{a}, \frac{\omega^*}{a} + \frac{\Delta\omega}{a}\right] \quad (6)$$

对于较小的尺度 a , 对应的是高频窗口, 根据式(5)和式(6)可知, 小波变换对函数 $f(t)$ 的局部分析在时域采用较小的时窗, 而在频域采用较大的频窗; 对于较大的尺度 a 所对应的低频信号的分析则刚好相反。

所以, 小波 $\psi_{a,b}(t)$ 的时、频窗口中心以及窗口宽度都随尺度因子 a 的变化而伸缩。当 a 逐渐增大时, 小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 的时间窗口也逐渐变大, 而其对应的频域窗口相应减小, 中心频率逐渐变低。相反, 当 a 逐渐减小时, 时间窗口逐渐减小, 而其频域窗口相应增大, 中心频率逐渐升高。

声发射信号具有瞬态性和随机性, 属于非平稳的随机信号, 并且是由一系列频率和模式丰富的信号组成。正是因为小波函数具有可变的时间窗和频域窗, 使得小波变换在时域和频域同时具有良好的局部化特性, 所以小波分析对声发射信号具有很好的分析能力。

1.3 多分辨分析及阈值滤波原理

小波多分辨分析将信号分解为低频部分(CA)和高频部分(CD), 然后对分解后低频部分再重复分解。原始信号 S 经过3层分解的多分辨示意图1所示。如果原始信号 S 的频带宽度为 $[0, f]$, 那么分解后各频率分量分别为 $D1[f/2, f]$, $D2[f/4, f/2]$, $D3[f/8, f/4]$, $A3[0, f/8]$ 。

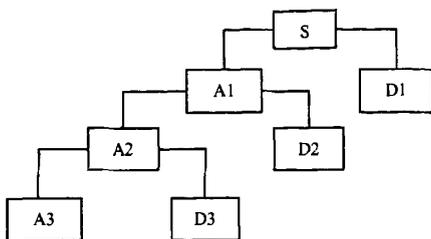


图1. 三层小波多分辨分解结构

假设含噪声的 AE 信号模型可以表示如下：

$$S(t) = f(t) + i \cdot e(t), \quad t = 0, 1, \dots, n$$

其中, $f(t)$ 为真实 AE 信号; $e(t)$ 为噪声信号, 噪声性质未知; $S(t)$ 为含噪声的 AE 信号系列。对 AE 信号去噪的目的就是要抑制信号中的噪声部分, 提高有效信号的信噪比, 为信号的有效分析作数据准备。阈值去噪方法认为有效信号对应的小波系数包含有信号的重要信息, 其幅值较大, 但数目较少; 而噪声对应得小波系数是平均分布的, 个数较多, 但幅值小。所以, 对系数进行阈值处理即可去噪。阈值法主要分为硬阈值和软阈值两种。

一般来讲, 对一维信号消噪过程可分为三个步骤:

- (1) 信号的小波分解: 选择一个小波基并确定分解的层次 N , 然后对信号进行 N 层小波分解。
- (2) 小波分解高频系数的阈值处理: 对第 1 层到第 N 层的每一层高频系数, 选择一个阈值进行量化处理。
- (3) 信号的重构: 对处理过的小波系数进行逆变换重构, 得到去噪后的信号数据。

2 声发射信号的小波处理

2.1 小波滤噪及频域分析

从噪声中提取或识别有效信号是声发射应用的核心技术。利用小波分析对信号进行滤噪处理, 是小波分析最基本的应用。

图 2 为东林煤矿巷道炮掘过程中由于岩体应力变化产生的一段 AE 信号。信号中有大约 5 个声发射脉冲波形, 夹杂有较多的噪音, 采用这样的原始数据进行参数分析, 可能会导致瓦斯突出预测的不可靠性。我们对信号进行小波消噪处理, 首先, 采用 Daubechies 小波族中的 db6 小波基, 对信号进行 6 层分解; 然后对每一层分解的小波系数进行阈值消噪处理; 最后重构各层小波系数, 得到滤噪后的信号数据, 如图 3 所示。

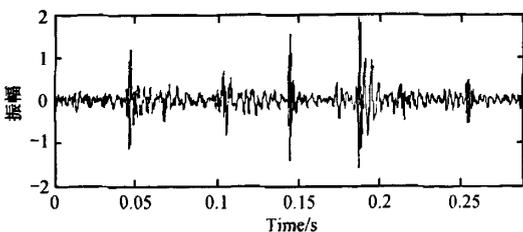


图2 原始声发射信号

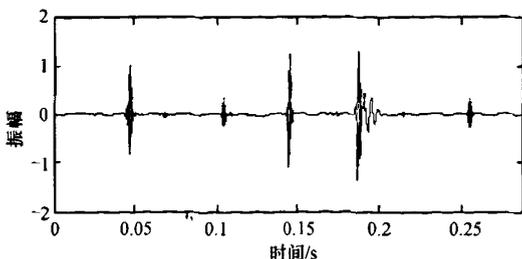


图3 滤噪后的声发射信号

通过小波滤噪处理后,声发射数据质量大大提高,去掉了信号中夹杂的噪音,保留了有效的 AE 信号,滤噪效果非常理想。

我们对数据中的第一个声发射信号进行频谱分析处理,滤噪前后的波形如图 4 所示。对信号进行 FFT 频谱分析,得到信号的频谱图,如图 5 所示。

可以看出,采集的声发射信号的频谱分布主要在 2000Hz 以下的范围内,原始信号内有频率在 300Hz 左右的主噪音以及分布在全频段段的白噪音。通过小波滤噪后,信号中低频的噪音已经大量去除,频段宽的白噪音也大幅减少。

小波滤噪不仅将不同频率段的噪音滤去,并且保留该频率段的有效信号,这是常规滤波器滤波方法——直接滤掉某一频段的所有信号,包括噪音和有效信号——不能比拟的。

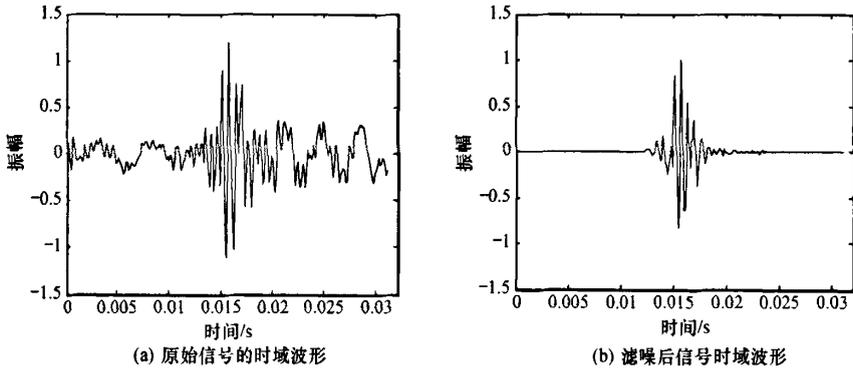


图 4 AE 信号时域图

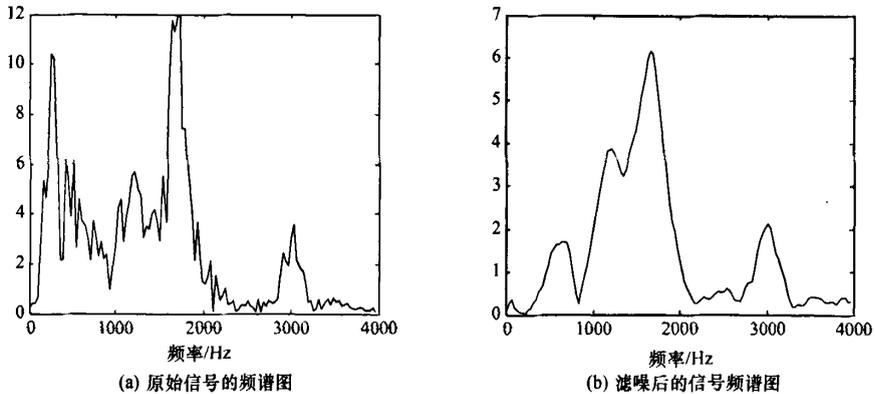


图 5 AE 信号频谱图

2.2 AE 信号时频分析

傅里叶分析可以将 AE 信号的时域特征和频域特征联系起来,但只能分别从信号的时域和频域进行观察,不能将二者结合起来。图 4 为 AE 信号的时域图,但信号波形中不包含任何频域信息。从图 5 FFT 频谱中,我们可以得到信号的频谱特征,了解 AE 信号的频率成分。但是,我们得不到信号频率随时间的局部变化,因为傅里叶频谱是信号的统计特征,不能提供信号在时间域的任何信息。

小波时频分析是一种自适应的时域和频域同时局部化的分析方法,可以同时了解信号的时域和频域

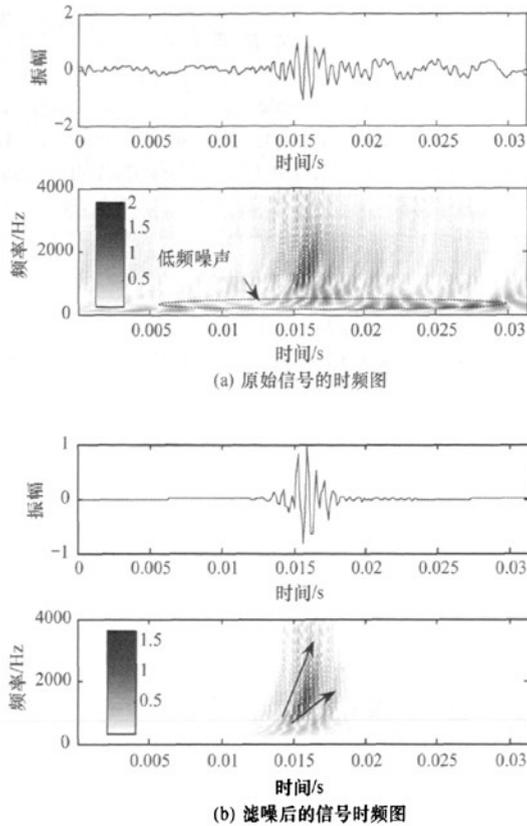


图6 信号的时频分析图

信息。

对信号进行连续小波变换(CWT),可以得到信号的时间频率分析结果,如图6所示。时频分析可以清楚地表明不同时间的AE信号的频谱特征。从原始信号的时频图中,可以看出,整个信号中存在300Hz频率左右的低频噪音,而仅从图5(a)的FFT频谱中,则无法判断哪些频率的信号是噪音,哪些是有效信号。滤噪后的信号的时频结果显示,小波滤噪将300Hz低频噪音全部滤去,保留了有效信号,充分说明小波滤噪的高度可靠性。还可以看出,这一声发射有效信号的频谱范围是逐渐变宽的。随信号时间的增加,信号的频率逐渐由1000Hz逐步增大到2000Hz左右,相应频带宽度也增大。

3 结论

(1) 采用Daubechies小波族中的db6小波基,对煤巷掘进过程中产生的声发射信号数据进行了小波时频分析,发现煤岩声发射的主频在1000~2000Hz,并且随时间的增加,有效信号的频率逐渐由1000Hz逐步增大到2000Hz左右,信号的频带宽度也逐步增大。

(2) 小波时频分析可以有效地识别出信号中300Hz的低频噪音和有效声发射信号,小波滤噪效果显著,可以将噪音干净地滤除,保留有效的AE信号,提高信号的信噪比。

参考文献

- [1] 吴自立. AE信号参数预测预报煤(岩)与瓦斯突出危险性的进展及展望[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(1): 27 ~ 29
- [2] 张平, 施克仁, 耿荣生等. 小波变换在声发射检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(10): 436 ~ 442
- [3] 王健, 金周庚, 刘哲军. C/E复合材料声发射信号小波分析及神经网络模式识别[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(1): 49 ~ 56
- [4] 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
- [5] Yang Li, Zhou Yichun. Wavelet analysis of acoustic emission signals from thermal barrier coatings[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2006, 16(B1): 270 ~ 275
- [6] Zhang Xinming, He Yongyong, Hao Rujiang, et al. Parameters optimization of continuous wavelet transform and its application in acoustic emission signal analysis of rolling bearing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 104 ~ 108
- [7] 黄振峰, 郝宇宁, 毛汉领等. 小波分析和相平面在声发射信号处理中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 506 ~ 509