

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0179-06

# 基于 HHT 的粉砂岩破裂声发射信号频率特性研究

张艳博, 梁鹏, 孙林, 刘祥鑫

(华北理工大学矿业工程学院, 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063009)

**摘要** 通过对粉砂岩进行单轴加载声发射实验, 基于 HHT 分析方法, 研究岩石破裂过程的声发射信号频率特性。研究表明: HHT 是一种基于主成分分析的信号时频分析方法, 可以确定信号的主次成分, 用瞬时频率来精确描述信号的时频特性; 粉砂岩破裂过程中声发射信号的时频分布有 3 个阶段, 即初始区、波动区、沉寂区; 粉砂岩破裂过程中声发射信号的主频与所处的应力水平有关, 在岩石破裂前, 随着应力水平的提高, 主频逐渐降低; 粉砂岩破裂过程中, 从裂纹稳定扩展到不稳定扩展, 直到岩石破裂, 高能量声发射信号由高频向低频转移, 且持续的时间增加; 粉砂岩破裂过程中声发射信号适宜监测频段为 20~120 kHz。

**关键词** 粉砂岩; 单轴压缩; 声发射; 频率; HHT

**中图分类号** TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.028

## Frequency characteristics of acoustic emission signal during rupture process of siltstone based on HHT

ZHANG Yanbo, LIANG Peng, SUN Lin, LIU Xiangxin

(School of Mining Engineering, Key Laboratory of Mining and Safety Technology of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China)

**Abstract** By the uniaxial compression tests of siltstone samples, frequency characteristics of acoustic emission (AE) signals in the failure process of siltstone rock were investigated based on HHT analysis. The results show that HHT is a kind of signal time-frequency analysis method based on principal component analysis, which can determine the major and minor components of the signals, and precisely describe the time-frequency characteristics of the signal with instantaneous frequency. The time-frequency distribution of AE signal of siltstone can be divided into three stages during rupture process: initial zone, wave zone, and quiet zone. Main frequencies of AE signals during rupture process of siltstone samples are associated with stress levels, that is, main frequency decreases with the increase of stress level before siltstone failure. From the stable extension of crack to unstable extension, until the rock failure, high energy AE signals transfer from high frequency to low frequency, and its duration increases. Appropriate monitoring bands of AE signals during siltstone rupture process is 20-120 kHz.

**Key words** siltstone; uniaxial compression; acoustic emission; frequency; HHT

岩石在外载荷的作用下产生微破裂时, 一部分应变能以弹性波的形式释放出来, 称为岩石的声

发射(acoustic emission, 简称 AE)<sup>[1]</sup>。声发射波形特征包含了岩石损伤、破裂等行为的信息, 通过分析

收稿日期: 2014-04-01

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174071, 51374088); 河北省自然科学基金项目(E2012209047)

作者简介: 张艳博(1973—), 男, 河北省保定市人, 博士, 教授, 从事采矿工程与岩土工程方面的研究。

E-mail: fzd44444@163.com

Tel: 0315-2592059

声发射信号,可以推断岩石内部性态变化,反演岩石的破坏机制<sup>[2]</sup>。随着声发射技术在岩土工程领域的应用越来越广泛,对岩石声发射信号的处理和分析就成为声发射研究热点之一。

声发射信号是由多模式波组成,而每种模式又是由宽带频率成分波组成,声发射信号具有非平稳、随机性质<sup>[3]</sup>。如何才能挖掘出声发射波形信号中蕴含着的大量信息,必须对声发射信号进行波形分析。希尔伯特-黄变换 HHT (Hilbert-Huang Transform)分析方法是近年提出的适合处理非平稳信号的有效方法,相对小波(包)、Gabor 变换等方法,HHT 是一种更具适应性的时频局部化分析方法,它没有固定的基函数,是自适应的<sup>[4-6]</sup>。Huang 等<sup>[4]</sup>将 HHT 法应用于非线性系统分析、潮汐和海啸分析、水波分析、风速分析、地震信号分析、海洋环流分析、经济数据分析等。Peng 等<sup>[7]</sup>应用 HHT 方法分析旋转机械振动信号。Nines 等<sup>[8]</sup>用 HHT 法对图像进行分析与处理。张义平<sup>[9]</sup>用 HHT 法对爆破振动信号进行分析与处理,表明 EMD 法分解后的 IMF 分量能反映信号本身所固有的特性。刘红光等<sup>[10]</sup>将 HHT 应用于混凝土声发射信号处理中,并与小波比较得出 HHT 法能很好地处理声发射信号,且信号 Hilbert 谱能反映预应力混凝土梁在整个破坏过程中声发射累计能量随时间变化的相互关系。凌同华等<sup>[11]</sup>利用 EMD 方法研究冲击荷载作用下岩石声发射信号的能量和频率,发现岩石声发射信号的优势频率随着岩石的密度、弹性模量的降低而变得越来越集中。

本文对粉砂岩进行单轴加载破坏全过程声发射实验,基于 HHT 分析方法,在对声发射信号进行主成分分析的基础上,对声发射信号的频率特性进行研究,以期扩展对岩石破裂声发射信号前兆特征的认识。

## 1 实验系统

实验中采用的加载系统是型号为 TAW-3000 伺服岩石力学试验系统,声发射采用美国物理声学公司 PAC 生产的 PCI-2 型多通道声发射监测系统。实验观测系统如图 1 所示。本文以粉砂岩为研究对象,粉砂岩岩样取自开滦集团赵各庄矿,其煤层顶板以粉砂岩为主。将岩块制成 50 mm×50 mm×100 mm 的标准长方体岩样,实验选用 7 个试样。试样两端面不平整度误差小于 0.05 mm,沿试样高度两对边长度误差小于 0.3 mm。实验时试样安装 2 个声

发射传感器,直接固定在试样表面。图 2 为粉砂岩试件外形及声发射传感器安装示意图。

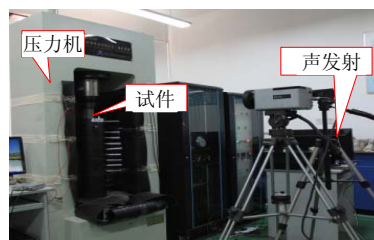


图 1 实验现场

Fig.1 The experimental field



图 2 粉砂岩试件及声发射传感器安装

Fig.2 Siltstone specimen and position of AE transducers

实验方案:本文单轴压缩实验采用轴向等位移控制方式加载,先预加载至 1.5 kN,随后以 0.2 mm/min 的速率加载至破坏,采用声发射系统监测试样的破裂过程。为消除环境噪声对声发射实验的影响,实验时前置放大器阈值(增益)为 40 dB,声发射采样阈值为 45 dB。声发射波形采样率为 1 Msps (Million Samples per Second, 简称 Msps,表示每秒采样百万次),预触发为 256 K(触发事件来到之前,所采集的数据量为 256 点),长度为 2 K。声发射传感器为 R6 $\alpha$  型谐振式高灵敏度传感器,其工作频率为 35~100 kHz,实验时在传感器和煤样之间涂上凡士林,增强二者耦合性,减少声发射信号的衰减。

## 2 HHT 分析方法基本思想

HHT 由经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换(HT)两部分组成。首先利用 EMD 将复杂信号分解成有限个固有模态函数(IMF),然后对分解得到的 IMF 分量进行希尔伯特变换,从而得到时频平面上的能量分布谱图(Hilbert 谱),在 Hilbert 谱的基础上,通过积分就可以得到边际谱。如图 3 所示。

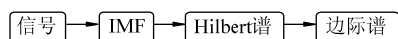


图 3 HHT 分析流程图

Fig.3 HHT analysis flowchart

## 2.1 EMD 分解方法

Huang 等人提出基于本征模态函数(IMF)的信号分解方法——经验模态分解(EMD)方法<sup>[4]</sup>。先根据信号  $x(t)$  的极大点和极小点求出其上包络  $v_1(t)$  与下包络  $v_2(t)$  的平均值  $m(t)$ ，然后考察  $x(t)$  与  $m(t)$  的差即为  $h_1(t)$ ：

$$x(t) - m(t) = h_1(t) \quad (1)$$

将  $h_1(t)$  视为新的  $x(t)$ ，重复以上操作，直到进行  $k$  次循环得到  $h_k(t)$  满足 Huang 定义的一个标准差则第 1 层分解结束。定义  $c_1 = h_1(t)$ ，此时  $c_1$  即为所求的第 1 个固有模态函数 IMF1。将剩余部分  $x(t) - c_1 = r$  进行同样的分解过程，依次得到第 2 个 IMF  $c_2$ ，第 3 个 IMF  $c_3$ ，直到  $r(t)$  基本呈单调趋势或  $|r(t)|$  很小，可视为测量误差时即可停止。至此，原始信号  $x(t)$  可由  $n$  阶 IMF 分量及残差  $r_n(t)$  表示：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

式中： $r_n(t)$  为残余项，代表信号的平均趋势；各 IMF 分量  $c_1, c_2, \dots, c_n$  分别包含了信号从高到低不同频率段的成分。

## 2.2 Hilbert 变换

将 EMD 分解得到的每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换，就可以得到每一个 IMF 分量随时间变化的瞬时频率和振幅，综合所有 IMF 分量的瞬时频谱就可得到一种新的时频描述方式，即 Hilbert 谱。

对信号  $x(t)$  的 IMF 分量的  $c_i(t)$  作 Hilbert 变换<sup>[12-13]</sup>，忽略残余项  $r_n(t)$ ，原信号  $x(t)$  可表示为

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (3)$$

式中  $a_i(t)$  和  $\omega_i(t)$  是时间  $t$  的变量。

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (4)$$

展开式(4)称为 Hilbert 谱。

如果再对时间进行积分，就可以求出相应的边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (5)$$

式中  $T$  为信号总长度。

## 3 实验结果分析

本文在考虑所有实验结果的基础上，特选择代表性岩样的结果进行说明。粉砂岩单轴压缩实验的应力-时间曲线如图 4 所示。可以分为以下阶段：

1)  $OA$  段：压密阶段， $A$  点应力值为  $0.43\sigma_c$ ，1 点为压密阶段的应力水平。2)  $AB$  段：弹性变形阶段， $B$

点应力值为  $0.72\sigma_c$ ，2 点和 3 点分别为弹性阶段的应力水平。3)  $BC$  段：屈服阶段，点  $C$  称为峰值应力( $\sigma_c = 34.36$  MPa)。在点  $C$  岩样破坏。可进一步分为：① 裂纹稳定扩展阶段( $BB_0$ )， $B_0$  点应力值为  $0.92\sigma_c$ ，在此阶段裂纹开始稳定发展，4 点和 5 点分别为裂纹稳定扩展阶段的应力水平值。② 裂纹不稳定扩展到破坏阶段( $B_0C$ )，进入本阶段，微破裂的发展出现了质的变化，破裂不断发展，直至岩石破裂。6 点和 7 点分别为裂纹不稳定扩展阶段的应力水平值。4)  $CD$  段：失稳破坏阶段，本阶段裂隙快速发展，交叉且相互联合形成宏观破坏。

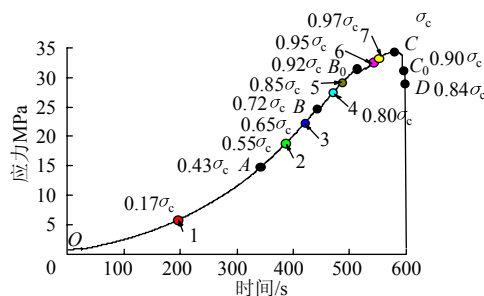


图 4 粉砂岩应力-时间曲线

Fig.4 Stress-time curve of siltstone in the complete process of failure

## 3.1 粉砂岩声发射信号主成分分析

通过计算方差贡献率和相关系数，对信号进行主成分分析，确定声发射信号的主要成分。图 5 为 4 个阶段不同应力水平下岩石声发射信号各 IMF 分量方差贡献率与相关系数变化曲线。

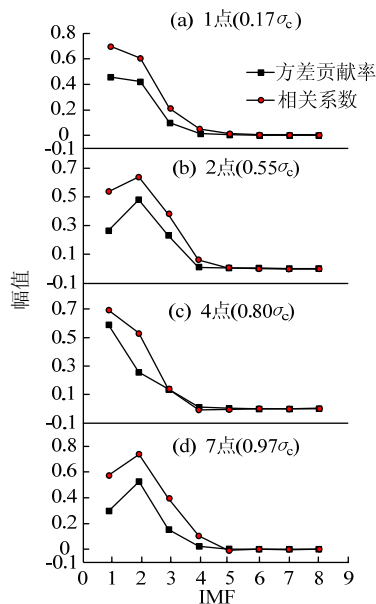


图 5 声发射信号 IMF 分量方差贡献率和相关系数

Fig.5 Variance contribution rate and the correlation coefficient of IMF component of acoustic emission signals

从图 5 可以看出: 粉砂岩声发射信号经 EMD 分解出的 IMF 分量方差贡献率和相关系数的变化趋势十分接近, 存在很大相关性。前 4 个 IMF 分量方差贡献率的和达到 0.98~0.99, 相关系数比较大。后 4 个 IMF 分量方差贡献率和相关系数都接近 0。说明粉砂岩声发射信号在频域上分布比较广泛, 但绝大部分集中在前 4 个 IMF 分量内, IMF1, IMF2, IMF3, IMF4 这 4 个分量是对声发射源进行研究的主要部分。

### 3.2 粉砂岩声发射信号的 Hilbert 时频谱分析

研究表明, 声发射信号的频率分量与破裂尺度成反比, 即高频对应于小尺度的裂纹, 低频对应于大尺度的裂纹<sup>[14]</sup>。图 6 为 IMF1, IMF2, IMF3, IMF4 这 4 个分量的中心频率在不同应力水平下的值及拟合直线。从图 6 中可看出: 随着应力水平的提高, IMF1 的中心频率有上升的趋势, 这是由于岩石破裂过程中微裂纹不断萌生, 微破裂产生高频声发射信号, 有较高频率值出现, 到岩石破裂前微破裂大量萌生, 出现较多高频率值, 致使 IMF1 分量中心频率增加。IMF2, IMF3, IMF4 的中心频率呈下降的趋势, 这是由于岩石破裂是一个微裂纹不断扩展、闭合产生大尺度破坏的过程, 大尺度破坏对应低频声发射信号, 致使 IMF2, IMF3, IMF4 分量中心频率降低, 有向低频转移的趋势。综合以上分析可知, 粉砂岩破裂过程中声发射信号的不同分量对应不同尺度的破裂, 通过对声发射信号的分析可以获得不同尺度破裂的发展演化过程。

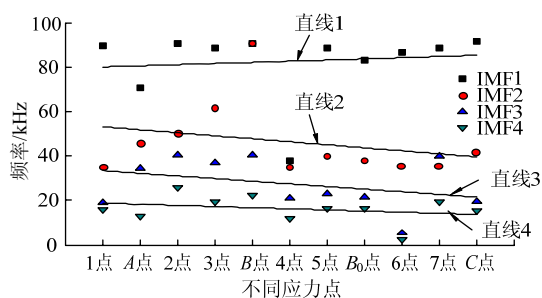


图 6 粉砂岩破裂过程中前 4 个分量的中心频率拟合图

Fig.6 Fitting figure of center frequency for the first four components in the complete process of failure of siltstone

图 7 给出了关键点 1—C 的前 4 个 IMF 分量的 Hilbert 时频谱。Hilbert 谱清晰地刻画出了瞬时频率与瞬时振幅(能量)的变化情况, 反映信号能量随频率和时间的分布状况(颜色越深, 说明能量越大; 反之, 能量越小)。从不同应力水平下 Hilbert 时频谱可以看出: 各 IMF 分量的频率不是一个常数, 而是

围绕中心频率波动, 但相互间也少有交叉重叠现象, 分布很清晰。能量较大的前 4 阶 IMF1—IMF4(信号的主要成分)易于识别。岩石声发射信号时频分布有 3 个阶段: 开始阶段频率为 1~5 kHz, 持续时间为 0.2 ms; 中间阶段频率较大, 围绕中心频率波动, 此阶段持续的时间与岩石应力状态有关, 总体上随着应力的增大, 持续时间增加; 后一阶段频率为 1~5 kHz, 持续时间为 0.2~0.4 ms。

图 7a 给出了对应于应力水平(0.17 $\sigma_c$ )的 Hilbert 时频谱图。从图中可看出: 4 个分量同时存在, 与 IMF1, IMF3, IMF4 相比, IMF2 持续的时间相对较长, 但到后期能量越来越低, 说明岩石在加载初期表现为高频和低频共存的特征, 但声发射信号频率成分比较单一。说明在加载初期压密阶段, 岩石声发射主要是单个微裂纹的随机破裂事件。

图 7b, c 为弹性阶段应力水平为(0.55 $\sigma_c$ , 0.65 $\sigma_c$ )时的 Hilbert 时频谱图。在这个阶段, 从持续时间上看, 高频分量 IMF1 持续时间为 1.2 ms, IMF2, IMF3, IMF4 持续的时间为 0.8 ms, 4 个分量到后期出现空白区, 说明在此应力水平下产生低强度的声发射信号。高频分量 IMF1 的波动幅度增大, 出现一些较高频率的点, 说明在此阶段岩石内部有少量的微小裂纹的产生。从能量方面看, IMF1 和 IMF2 这 2 个分量前期均有一些零散的高能量的频率出现。由此可以说明: 在弹性阶段, 岩石内部主要的力学行为是微裂纹的产生, 伴随有一些高频率、低强度的声发射信号产生。

图 7d, e 为裂纹稳定扩展阶段应力水平为(0.80 $\sigma_c$ , 0.85 $\sigma_c$ )时的 Hilbert 时频谱图。从持续时间上看, IMF1, IMF2, IMF3 持续时间分别为 1.4, 1.2, 0.8 ms, 可以看出中低频率 IMF2, IMF3 的持续时间比前一阶段明显增加。说明在此阶段不仅有很多微裂纹的出现, 更有微裂纹的汇合产生破裂, 同时分量波动的幅度增强, 频率的成分变得丰富, 这是裂纹扩展的主要特征。在这个阶段, 高能量信号主要出现在 IMF1, IMF2 分量上, 且持续时间为 0.1 ms 左右, 这可以看作岩石早期破坏前兆。

图 7f, g, h 为裂纹不稳定扩展阶段应力水平为(0.95 $\sigma_c$ , 0.97 $\sigma_c$ ,  $\sigma_c$ )时的 Hilbert 时频谱图。在这个阶段, 声发射信号 4 个分量先以较高能量、低频率出现, 而后频率突然增加, 围绕中心频率波动, 持续时间都在 1.4 ms 左右。结合图 6 知, IMF1 中心频率增加, IMF2, IMF3 和 IMF4 的中心频率减小。说明



在这个阶段微裂纹在加速扩展,同时裂纹汇合成较大尺度的裂隙,裂隙扩展接交形成滑动面。4个频率分量中,高能量持续的时间比上一阶段有所增加,可达到 0.3 ms,如图 7f 的 IMF2 分量、图 7g 的 IMF2 和 IMF3 分量。高能量开始出现在 IMF3 这个较低

频段的分量上(图 7f, g 的 IMF3 分量),到岩石破裂时,更是集中在 IMF3 和 IMF4 这 2 个分量上(图 7h 中 IMF3 和 IMF4 分量)。由此可说明,岩石破裂前,高能量的信号有逐渐往低频转移的趋势,且持续的时间增加,可作为岩石破裂的前兆特征。

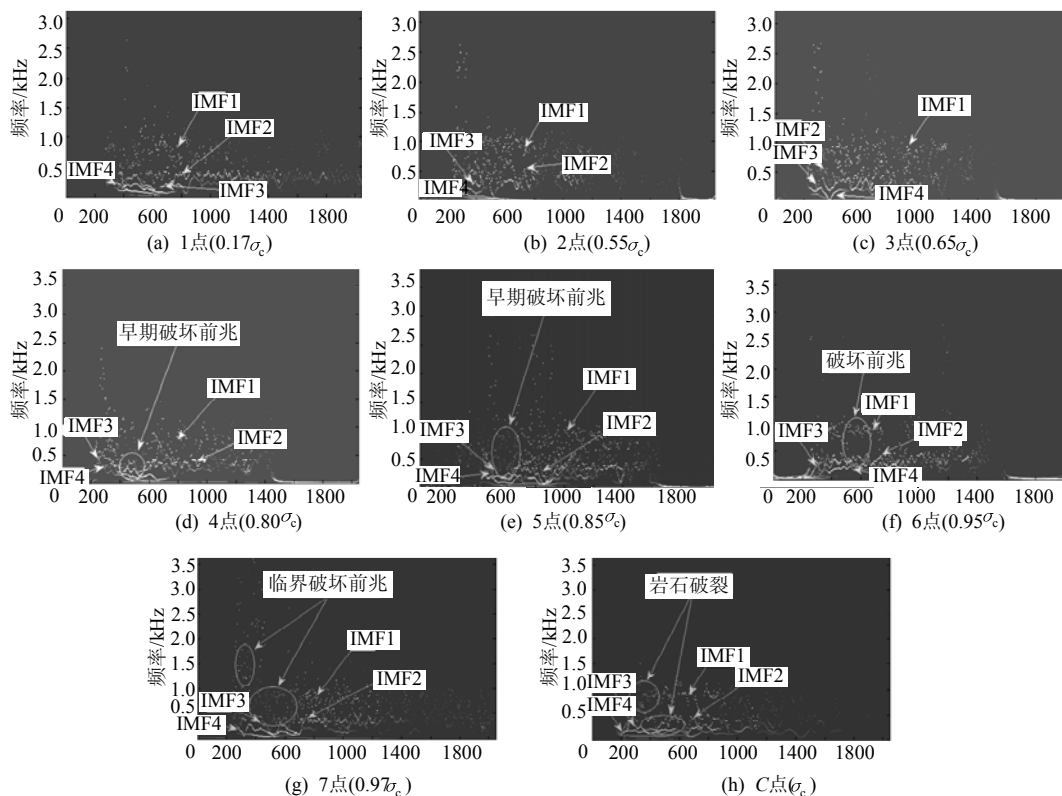


图 7 不同应力水平下粉砂岩声发射信号的 Hilbert 时频谱

Fig.7 Hilbert diagrams of acoustic emission signals of siltstone under different stress level

粉砂岩破裂过程中声发射信号频率随应力的变化趋势:加载初期,声发射信号频率成分比较单一;线性阶段,声发射信号表现为低强度,持续时间短的特点;裂纹稳定扩展到岩石破裂,声发射高能量信号先出现在较高频率上,随着应力水平的提高,会向较低的频率转移,且高能量信号持续时间增加。

### 3.3 粉砂岩声发射信号的边际谱分析

边际谱统计了信号各个频率在概率意义上的累积幅值,幅值越大,代表该频率出现的可能性越大,可以呈现出岩石声发射信号的主要频率段。图 8 为关键点 1—C 的边际谱图,由图可看出粉砂岩在单轴加载过程中声发射信号频率范围为 0~120 kHz。

根据频率峰值出现的位置,可把频率范围分为 3 个频率段:

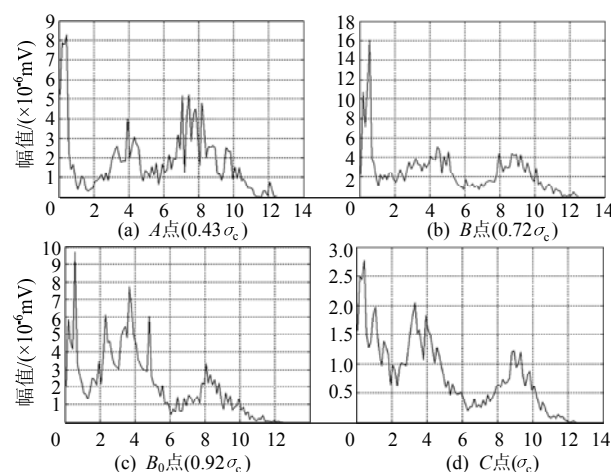


图 8 不同应力水平下粉砂岩声发射信号的边际谱

Fig.8 Marginal spectrum of acoustic emission signals of siltstone under different stress level

第 1 频带(0~20 kHz),对应于 IMF5, IMF6, IMF7, IMF8 分量,相关性较小;第 2 频带(20~60

kHz), 对应于 IMF2, IMF3, IMF4 分量, 为声发射信号中低频部分; 第 3 频带(60~120 kHz), 对应于 IMF1, 为声发射信号高频部分。根据前文分析, 前 4 个分量 IMF1, IMF2, IMF3 和 IMF4 占主要成分, 因此, 粉砂岩声发射信号有效频率为 20~120 kHz, 对于选出相应工作频率的声发射传感器具有重要意义。

## 4 结 论

1) HHT 分析中的 EMD 分解方法是一种基于主成分分析的自适应的分解方法。确定信号的主次成分, 获得信号精确地时频分布, 对识别声发射信号的物理含义非常有利。

2) 粉砂岩破裂过程中的声发射信号时频分布有 3 个阶段: 初始区、波动区、沉寂区。初始区频率低(1~5 kHz), 持续时间较短(0.2 ms); 波动区围绕中心频率波动, 持续时间与所处的应力水平有关, 总体上随着应力水平的提高, 持续时间增加; 沉寂区频率低(1~5 kHz), 持续时间较短(0.2~0.4 ms)。

3) 粉砂岩破裂过程中的声发射信号的主频与所处的应力水平有关, 在岩石破裂前, 随着应力水平的提高, 主频逐渐降低。

4) 在加载初期压密阶段, 声发射信号频率成分单一; 在弹性阶段, 声发射信号强度比较低, 有一些较高的频率出现; 在裂纹稳定扩展阶段, 高能量的信号主要集中在较高频率上, 持续时间为 0.1 ms 左右, 这可以作为岩石破裂早期的频率前兆特征; 从裂纹不稳定扩展阶段到岩石最终破裂, 高能量的信号逐渐向低频率转移, 且持续的时间增加, 达到 0.3 ms 左右, 这可以作为岩石破裂前兆特征。

5) 粉砂岩破裂过程中的声发射信号适宜监测频段为 20~120 kHz, 为选出相应工作频率的声发射传感器提供依据, 将对声发射信号的去噪滤波、声发射源信号的定位具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 46-49.
- [2] 何满潮, 钱七虎. 深部岩土力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 21-32.
- [3] 宫宇新, 何满潮, 汪政红, 等. 岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究[J]. 岩石力学与工程学

报, 2013, 32(4): 787-799.

- GONG Yuxin, HE Manchao, WANG Zhenghong, et al. Research on time-frequency analysis algorithm and instantaneous frequency precursors for acoustic emission data from rock failure experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 787-799.
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [6] MA S, ZHANG R. Empirical mode decomposition of the 1994 Northridge earthquake and its interpretation for seismic source mechanism[C]//The 10th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Philadelphia: [s.n.], 2001: 7-10.
- [7] PENG Z K, TSE P W, CHU F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286: 187-205.
- [8] NINES J C, BOUAOUNE Y, DELEHELLE E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition[J]. Image Vision Comput, 2003, 21: 1019-1026.
- [9] 张义平. 爆破震动信号的 HHT 分析与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [10] 刘红光, 骆英. 基于 HHT 的预应力钢筋混凝土梁 AE 信号分析[J]. 无损检测, 2009, 31(4): 264-268.  
LIU Hongguang, LUO Ying. AE signal analysis of the cracking process in pre-stressed concrete beams based on HHT[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(4): 264-268.
- [11] 凌同华, 张胜, 易志强, 等. 岩石声发射信号能量分布特征的 EMD 分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 26-31.  
LING Tonghua, ZHANG Sheng, YI Zhiqiang, et al. Energy distribution characteristics of rock acoustic emission signals with EMD analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11): 26-31.
- [12] 曾峰. 基于经验模式分解的信号处理方法研究[D]. 郑州: 河南大学, 2007.
- [13] 张义平, 李夕兵, 左宇军. 爆破振动信号的 HHT 分析与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 33-36.
- [14] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 550-564.