

水泥材料静爆过程中的微震信号特征^{*}

张 苏^{1,2}, 王金贵^{1,2}, 艾立昊²

(1. 福州大学环境与资源学院 福州, 350116) (2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院 北京, 100083)

摘要 为了研究水泥材料在胀裂破坏过程中的微震信号特征,利用无声破碎剂实现不同强度等级的水泥试件胀裂破坏,采用 ZDKT-1 型煤岩动力灾害实验模拟系统采集试件静爆过程中的微震信号,通过希尔伯特-黄变换变换(Hilbert-Huang transform,简称 HHT)对信号进行降噪及频谱分析。研究结果表明:a. 水泥试件的胀裂过程可分为前、中、后 3 个阶段,微震信号振幅及能量的变化并不呈现单调性,而是弱强相间的分布;b. 不同强度的水泥试件胀裂过程中微震信号规律相似,但强度大的试件微震信号出现时间更晚,持续时间更长,且幅值和频率较高;c. 试件的静爆破裂过程持续时间较长,但其微震信号是阵发性的,持续时间一般在 2s 以下,且微震信号幅值较小。破裂中期频域分布较前、后期宽,但三者优势频率均在 50Hz 以下。

关键词 静爆;微震信号;希尔伯特-黄变换;频率

中图分类号 TB535

引 言

材料损伤过程中伴随着微震,微震的本质是弹性波的释放,是材料内部因应力应变的变化而释放的弹性应变能。利用这一性质,可以通过监测材料破裂过程中的微震信号,确定破裂发生的位置^[1-2],进而实现冲击地压、滑坡、溃坝等灾害预测预报。围绕着微震信号的监测,国内外学者已开展了大量的研究,并取得了丰富的成果。但这些研究主要集中于材料在压裂过程中的微震信号特征及其应用^[1-6],而材料在胀裂过程中微震信号特征的研究很少。由于材料在压裂与胀裂两个过程中的所受力的性质有很大的不同,材料胀裂过程中的内部摩擦要小于压裂过程,因此两种破裂形式中裂纹扩展伴随的微震信号特征也不同。研究胀裂破坏过程中的微震信号特征对水库等工程的稳定性监测具有重要意义。材料破裂过程中的微震信号为非平稳信号,HHT 广泛应用于地震、机械振动及材料损伤等领域^[7-12]的非平稳信号处理,其中对材料受压缩、剪切、冲击等损伤时振动信号 HHT 方法的应用研究效果较好。

笔者通过使用无声破碎剂实现圆柱体水泥试件的静爆胀裂,并利用 HHT 方法对静爆过程中的微震信号进行降噪及频谱分析,研究水泥试件在静爆

破坏过程中的微震信号特征。根据研究成果,可利用微震信号来判断水泥工程的受力状态,提高工程内部损伤评估的确定性,对水库等工程的稳定性监测及预警具有重要意义。

1 实验简介

1.1 试件制作

采用强度等级分别为 42.5 和 52.5 硅酸盐水泥,制作纯水泥浆圆柱体试件,试件高为 18cm,直径为 10cm。在圆柱体中部预留炮孔,深为 15cm,直径为 3cm。每种强度的试件均含两组,试件强度见表 1。

表 1 水泥试件物理性能指标

Tab. 1 Physical properties of cement specimen

水泥强度等级	弯曲强度/MPa	抗压强度/MPa
42.5	6.6	32.2
52.5	8.2	43.6

1.2 静态破碎剂的选取

本实验在室内进行,室内温度约为 22℃,选用北京新中岩建材科技有限公司生产的 HSCA-II 型

* 国家自然科学基金资助项目(51404277)

收稿日期:2014-09-16;修回日期:2014-12-11

静态破碎剂。该型号破碎剂的适用温度为 20~30℃。将无声破碎剂与水按质量比 3:1 进行配比,搅拌成具有流动性的均匀浆体。浆体能在 24 h 内产生 45MPa 的膨胀应力,而水泥试件的抗拉强度在 10MPa 以下。将搅拌好的浆体在 3min 内装填至试件预留孔内。

1.3 实验设备

本实验采用中国矿业大学(北京)生产的 ZD-KT-1 型煤岩动力灾害实验模拟系统,主要由微震传感器、数据采集仪和采集软件三部分组成。微震传感器采用 SF15005 型振动传感器,其指标见表 2。

将各微震传感器连接至放大器和 INF-306DF 型智能信号采集处理分析仪上。其中:分析仪含有 16 个通道,AD 精度为 16 位,最大采样频率为 400 kHz,全并行,放大倍数为 16 倍。本次实验在试件上布置 2 个微震传感器,传感器与煤样之间用凡士林连接,具体位置见图 1。由于整个实验过程长达数小时,为了减小数据量,实验中设置采样频率为 2 560 Hz,信号放大倍数为 16,设置每 30s 存储为 1 个数据包。

表 2 微震传感器的主要指标

Tab. 2 Technical data of microseism sensor

指标/信号	参数
线性输出范围/g 峰值	±3
(差分)灵敏度/(V·g ⁻¹)	1.2
(全信号)频响/Hz	DC~1 500
(微信号)频响/Hz	DC~5 000
(100Hz BW)动态范围/dB	120
(10~1 000Hz)噪声/(ngrms·H ₂ ^{-1/2})	300~500
操作温度/℃	40~150
线性度误差/%	±0.1
输入电压/V	±6~±15
静态电流/mA	11.6

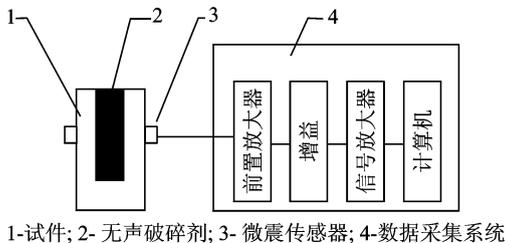


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 The schematic plot of test system

2 实验结果及微震信号分析

将搅拌好的无声破碎剂浆体装填至试件孔内,

开启数据采集系统,监测试件在静爆过程中的微震信号。经过近 2h 的实验,试件破裂。两种强度的试件破裂效果见图 2。限于篇幅,文中只列举一组不同强度的水泥试件。



(a) 42.5 试件 (a) 42.5 specimen
(b) 52.5 试件 (b) 52.5 specimen

图 2 破裂效果图

Fig. 2 The pictures of specimen fractures

2.1 静爆过程中微震信号的特点

静爆破裂与压裂、爆破震动微震信号均为非平稳信号,但它们在震源机制、振幅、震动频率、持续时间及能量上存在差异^[12-13]。从震源机理分析,静爆破裂与爆破震动相似,但能量释放的速度和强度不同;静爆破裂与压裂的震源机理不同。从振幅、震动频率、持续时间以及能量来看,三者之间均有区别:静爆破裂震动信号持续时间最长,振幅较小,震动频率低,能量主要集中在低频段;爆破震动信号持续时间最短,振幅较大,震动频率高,衰减快,能量主要集中在高频段;压裂震动信号总体介于静爆破裂和爆破之间。

2.2 微震信号降噪方法

分析发现,材料静爆过程中的微震信号为非平稳信号,且含有噪声。笔者采用 DataDemon 时频分析软件中的 HHT 法对微震信号进行处理,利用整体经验模式分解法(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)对信号进行分解重构,并分析其频域特征^[14-15],其主要作用是去除叠加波和使波形更加对称。

对于原始信号 $X(t)$,先找出全部极值点,再利用 3 次样条函数曲线对全部极大值点进行插值,从而得到原始信号 $X(t)$ 的上、下包络线 $X_{\max}(t)$ 和 $X_{\min}(t)$ 。按顺序连接两条包络线的均值,得到均值线 $m_1(t)$,用 $X(t)$ 减 $m_1(t)$ 得到 $h_1(t)$ 。根据信号的不同, $h_1(t)$ 可能是一种固有模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)分量,也可能不是。一般来说,它并不满足 IMF 所需的条件^[12],此时将 $h_1(t)$

当作原信号,重复上述步骤,得到 $h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t)$, $m_{11}(t)$ 为 $h_1(t)$ 的上、下包络线均值。若 $h_{11}(t)$ 不是 IMF 分量,则继续筛选。重复上述方法 k 次,得第 k 次筛选的数据 $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1(k-1)}(t)$ 。 $h_{1k}(t)$ 不是一个 IMF 分量,必须要有一个筛选过程终止的标准,它可利用 2 个连续结果之间的标准 SD 值作为判据^[12]

$$SD = \sum_{t=0}^T \left| \frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}(t)} \right|^2$$

经验表明,SD 取值以 0.2~0.3 为宜(本次数据处理中取值 0.25),既保证 IMF 的线性及稳定性,又使 IMF 含有相应的物理意义^[12]。

2.3 微震信号降噪

试样静爆过程中,测试系统采集到了明显的微震信号。由于实验时间较长,微震事件较多,且每个信号持续时间较短,在此截取 1 个典型的信号进行

降噪分析,原始信号见图 3。

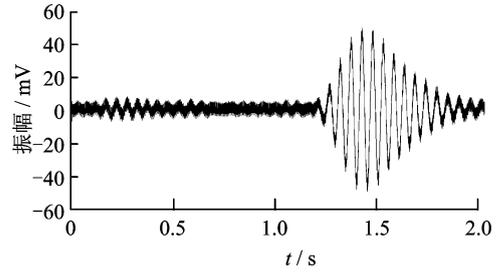


图 3 原始信号

Fig. 3 Original signal

由图 3 可知,微震信号中含有可能来自于环境或者仪器本身的噪声干扰。为了得到更真实的微震变化信号,便于分析静爆过程中微震信号变化特征,先对原信号进行 EEMD 分解,然后对去噪后信号进行重构。以下为选取的微震信号经 EEMD 分解后得到的 12 个 IMF 分量,见图 4。

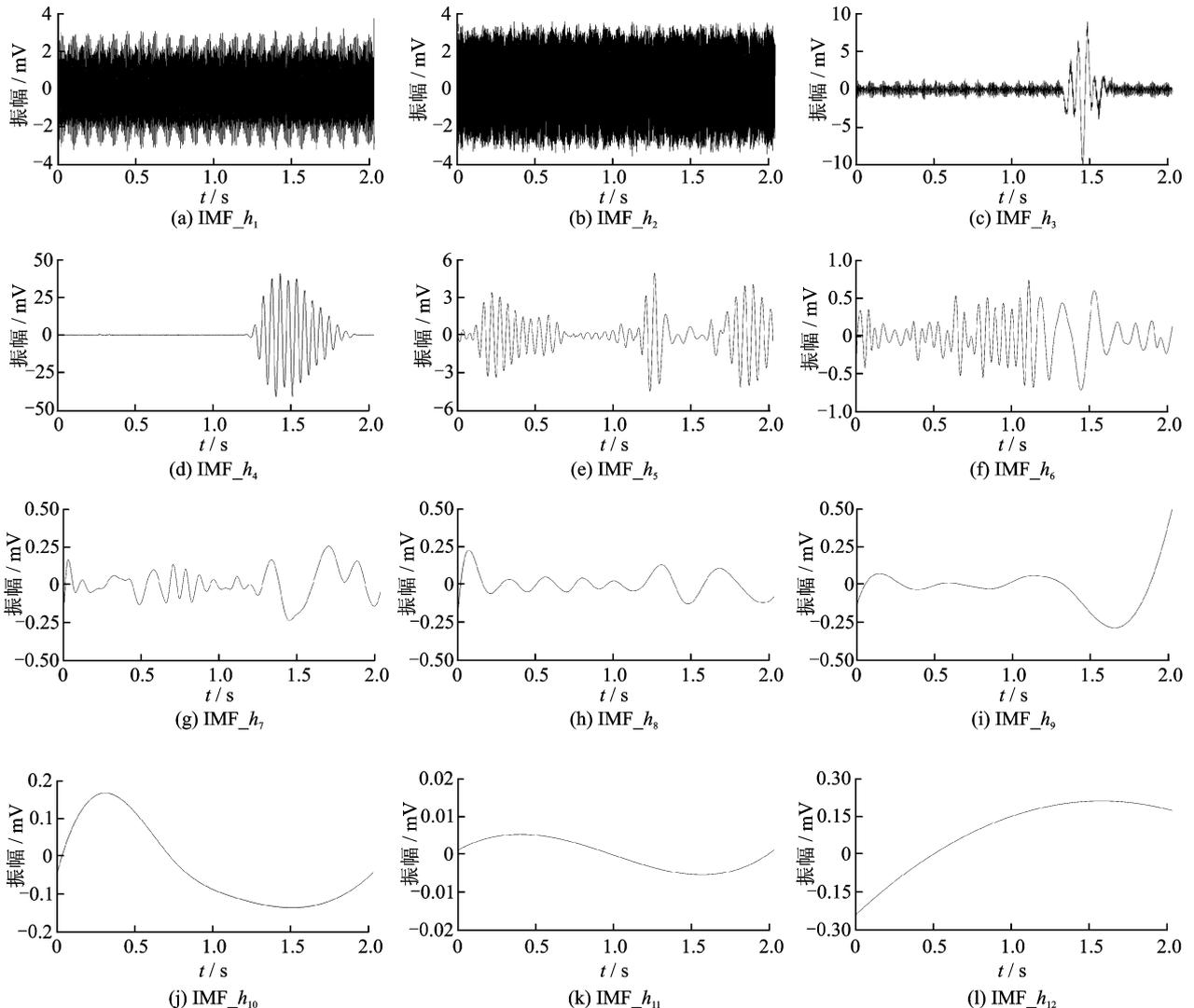


图 4 原始信号 EEMD 分解

Fig. 4 EEMD decomposition of original signal

由图 4 可见,微震信号经 EEMD 分解后得到 12 个 IMF 分量,其中 IMF_{h1}~IMF_{h2} 为信号中包含的噪声,IMF_{h3}~IMF_{h11}为优势频率分量,其中残余分量 IMF_{h12}为采集信号的整体变化趋势。将 IMF_{h3}~IMF_{h12}进行重构,得到重构信号,见图 5(a)。对重构信号进行快速傅里叶变换(fast fourier transform, 简称 FFT),得到重构信号的幅值频率图,见图 5(b)。由图 5(a)可以看出,该微震事件的振幅较小,最大振幅不超过 50mV,尾波较发育。由图 5(b)可以看出,该微震信号的优势频带较低,为 15~25Hz。

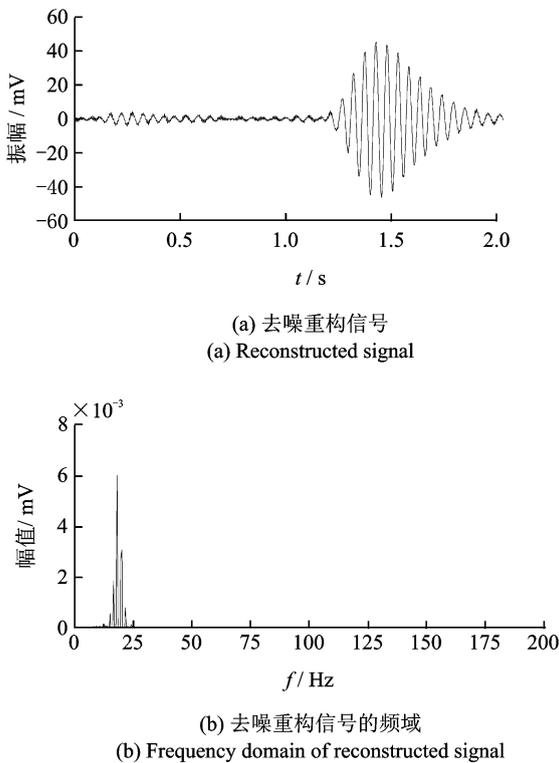


图 5 去噪重构信号及其频域
Fig. 5 Reconstructed signal and frequency domain analysis

采用相同的方法对试件静爆过程中的其他微震事件进行分析,文中列出 42.5 水泥试件破裂前、中、后期的 3 组数据。图 6 为不同时期的白噪声(即 IMF₁ 和 IMF₂ 分量的重构信号)典型时频图,从图中可以看出噪声均集中在 250Hz 和 600Hz 高频段。表 3 为破裂各时期微震信号分解得到的各 IMF 的能量分布百分比,结合表 3 和图 6 可以看出,分量 IMF₁ 和 IMF₂ 的频率最高,但所占的能量比较小,表示它是监测中的高频噪声,需将其剔除。图 7~图 9 分别为各破裂时期的原始信号、降噪后信号及其频率。

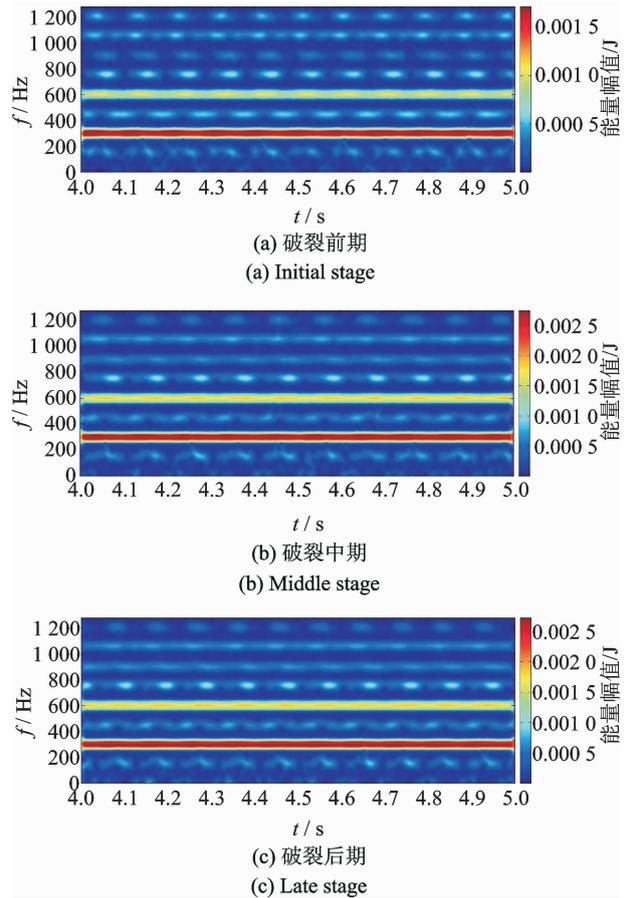


图 6 不同时期噪声时频分布图
Fig. 6 Time-frequency spectrum of cement fracture signals in different stages

表 3 水泥胀裂不同阶段微震信号在各分量内的能量分布百分比

Tab. 3 Energy distribution percentages of cement fracture signals in different IMFs %

IMF 分量	破裂前期	破裂中期	破裂后期
IMF ₁	9.38	10.8	4.39
IMF ₂	5.41	3.65	3.91
IMF ₃	42.2	52.4	57.3
IMF ₄	25.3	28.8	32.2
IMF ₅	15.2	3.79	1.81
IMF ₆	2.1	0.439	0.346
IMF ₇	0.269	0.060 6	0.044 6
IMF ₈	0.042 2	0.009 43	0.005 08
IMF ₉	0.028 9	0.005 76	0.003 65
IMF ₁₀	0.019 7	0.002 76	0.001 3
IMF ₁₁	0.008 1	0.001 76	0.001 52
IMF ₁₂	0.080 38	0.008 17	0.001 507

从图 7~图 9 可以看出,利用 HHT 法可很好地实现微震信号的降噪。水泥试件扩展破坏过程中,最大振幅整体呈上升趋势。破裂前、后期的频率

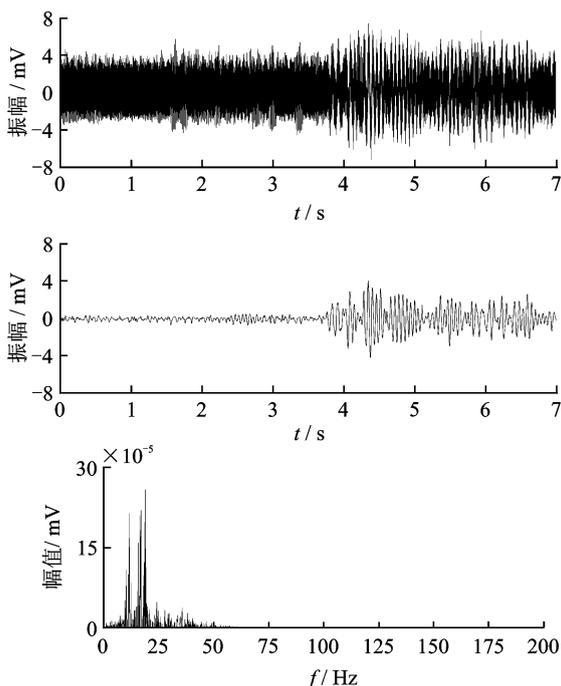


图 7 破裂前期原信号、重构信号及频率

Fig. 7 Original signal, reconstructed signal and frequency domain of initial stage

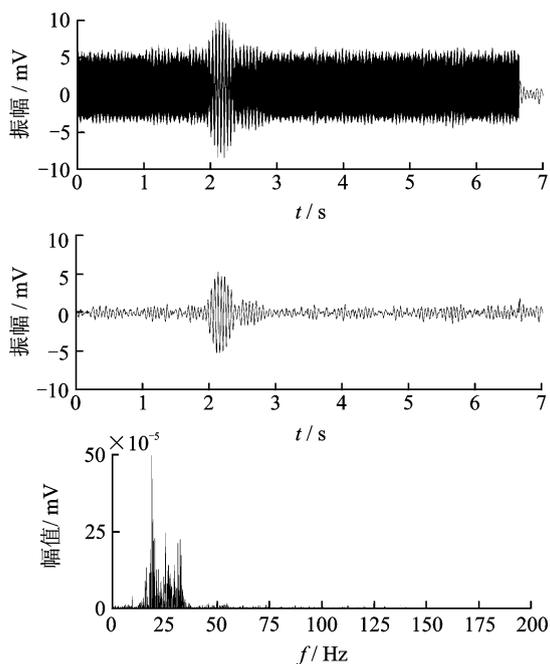


图 8 破裂中期原信号、重构信号及频率

Fig. 8 Original signal, reconstructed signal and frequency domain of middle stage

均集中在 50 Hz 以下,而破裂中期的频带较前、后期宽,频率分布在 10~100 Hz,但优势频率仍在 50 Hz 以下。这是由于破裂中期是试件微裂纹大量发育的阶段,导致该时期微震事件较密集。52.5 水泥试件的规律与 42.5 水泥试件相似,频率和幅值较 42.5

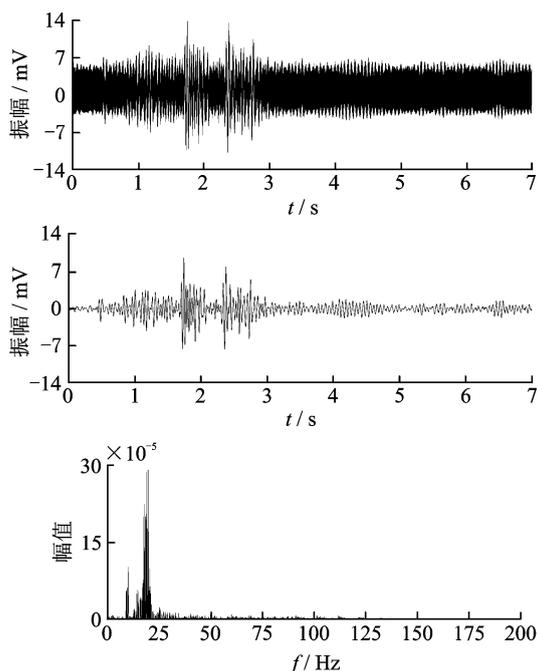


图 9 破裂后期原信号、重构信号及频率

Fig. 9 Original signal, reconstructed signal and frequency domain of late stage

水泥试件略高,但主要频段仍集中在 50 Hz 以下。

3 微震信号频带能量

3.1 微震信号频带能量的表达

微震信号能量特征的求取,先通过 EEMD 分解,将原始信号分解成许多固定模量 IMF,剔除噪声模量。根据巴什瓦(Parseval)定理可知,第 i 个信号模量的能量可定义为

$$E_{i,j}(t_j) = \int_T |f_{i,j}(t_j)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2$$

其中: i 为剔除噪声模量后剩余的模量数; m 为离散采样点数; $E_{i,j}(t_j)$ 为微震信号分解到第 i 个模量的第 j 个节点处的模量频带能量; $x_{j,k}$ 为微震信号的重构信号 $f_{i,j}(t_j)$ 离散采样点的幅值。

去噪后的微震信号的总能量为剩余各模量 i 的能量之和。

3.2 微震信号振幅及频带能量的变化趋势

笔者分析发现试件静爆过程中,每次微震事件的持续时间小于 2s。为了更加准确地分析试样在静爆过程中微震事件振幅及能量的变化趋势,将静爆过程中每一微震事件按 2s 截取,通过 HHT 法对信号进行降噪,提取每一微震事件中的最大振幅值,按微震事件的时间顺序作振幅变化趋势图,见

图 10。由图 10 可以看出,52.5 水泥试件在胀裂过程中微震信号出现和结束的时间均晚于 42.5 水泥试件,且采集到的微震信号振幅也比 42.5 水泥试件的大。这主要是因为两试件的强度差异,强度较低的试件开始损伤和完全破裂的时间均较早。但两者的规律是相似的,即微震信号整体呈弱强间隔几次后才出现最终破坏。

根据前述的频带能量的计算公式,求取每一微震事件的频带能量,按事件发生的时间顺序作频带能量变化趋势图,见图 11。由图 11 可知,微震信号的能量分布规律与振幅相似,微震作为材料破坏过程中能量耗散的一种形式,其大小与材料强度具有相关性。

水泥试件是含有孔隙和裂隙等微观、宏观缺陷,试件在膨胀应力作用下的破裂过程就是裂隙的产生、扩展及汇合贯通的结果,整个过程中微震信号的阵发性明显。由图 10、图 11 可以看出,试件静爆过程中微震信号的振幅及能量变化并不呈单调性,而是呈现弱强相间的分布。经过几轮的强破裂后,试件完全破裂,静爆实验结束。通过分析,可将试件的静爆过程分为前、中、后 3 个阶段。

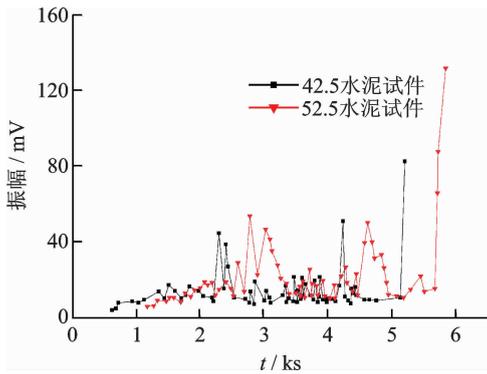


图 10 振幅变化趋势图

Fig. 10 The change trend chart of amplitude

1) 破裂前期。随着膨胀应力的增大,试件钻孔周围的微裂隙及孔隙被压密或压变形,在此过程中,试件产生振幅较小的微震信号,总体上相对平静。

2) 破裂中期。在试件钻孔周边原有裂隙和孔隙被压密后,随着膨胀应力的上升,在试件的薄弱处开始产生裂隙,此时的微震信号幅值仍较小,但较前期有所增强。随着试件裂隙的不断产生和扩展,裂隙汇合形成一些较大的裂纹,此时试件产生幅值较大的微震信号。随着较大裂纹的产生,试件钻孔直径变大,根据无声破碎剂特性,装药体积变大后会导致膨胀应力的减小,此时相当于一个卸载过程,所以较大裂纹产生后,振幅会随之下降,出现一段振幅较小的相对平静期。

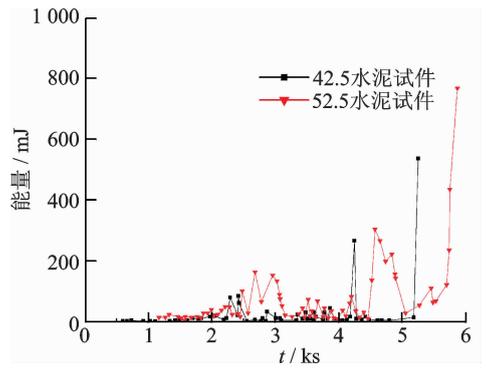


图 11 能量变化趋势图

Fig. 11 The change trend chart of energy

3) 破裂后期。当无声破碎剂膨胀应力进一步增大时,中期产生的一系列较大裂纹汇合成主裂纹,此时产生幅值很大的破裂微震信号。由于膨胀应力随之大幅降低,导致振幅降低,并出现一段振幅较低的平静区。随着膨胀应力的再次上升,将试件在原有主裂纹的基础上完全胀裂,随后微震信号逐渐消失,主裂纹成一条直线贯穿试件。

4 结 论

1) 通过 HHT 中的整体经验模式分解法可以对微震信号进行很好的降噪。

2) 不同强度的水泥试件在胀裂过程中,其微震信号规律相似,即振幅及能量的变化并不呈现单调性,而是呈现弱强相间的分布。强度大的试件在胀裂过程中微震信号出现时间更晚,持续时间更长,且幅值和频率略高。

3) 整个过程中微震信号具有较强的阵发性,持续时间一般在 2s 以下,试件破裂可分为 3 个阶段,依次为破裂前期、破裂中期和破裂后期。破裂前、后期信号频率集中在 10~50Hz。破裂中期的频带较前、后期宽,频率分布在 10~100 Hz,但三者优势频率均在 50Hz 以下。总体来说,与水泥材料单轴压缩破坏相比,胀裂破坏过程中的微震信号振幅及主频均较低。

参 考 文 献

[1] 杨仁树,高祥涛,车玉龙,等. 基于 HHT 方法的爆炸应力波时频分析[J]. 振动与冲击,2014,33(10):17-21.
 Yang Renshu, Gao Xiangtao, Che Yulong, et al. Joint time-frequency analysis of blast strain wave based on Hilbert Huang transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(10):17-21. (in Chinese)

- [2] 姜福兴,杨淑华,成云海,等.煤矿冲击地压的微地震监测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1512-1516.
Jiang Fuxing, Yang Shuhua, Cheng Yunhai, et al. A study on micro-seismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49(5): 1512-1516. (in Chinese)
- [3] 夏永学,潘俊锋,王元杰,等.基于高精度微震监测的煤岩破裂与应力分布特征研究[J].煤炭学报,2011,36(2):239-243.
Xia Yongxue, Pan Junfeng, Wang Yuanjie, et al. Study of rule of surrounding rock failure and stress distribution based on high-precision microseismic monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(2):239-243. (in Chinese)
- [4] 杨志国,于润沧,郭然,等.基于微震监测技术的矿山高应力区采动研究[J].岩土力学与工程学报,2009,28(2):3632-3637.
Yang Zhiguo, Yu Runcang, Guo Ran, et al. Research of mining based on micro-seismic monitoring technology in high-stress area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(2):3632-3637. (in Chinese)
- [5] 赖于树,熊燕,程龙飞. 受载混凝土破坏全过程声发射信号频带能量特征[J]. 振动与冲击, 2014, 33(10): 177-182.
Lai Yushu, Xiong Yan, Cheng Longfei. Frequency band energy characteristics of acoustic emission signals in damage process of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(10):177-182. (in Chinese)
- [6] 赵杨,武岳,曹曙阳,等.利用 HHT 方法对非平稳风力的时频分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 5-14.
Zhao Yang, Wu Yue, Cao Shuyang, et al. Time-frequency analysis of a non-stationary wind pressure with HHT method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(2):5-14. (in Chinese)
- [7] 瞿金秀,杨飞宇,张周锁,等.基于声音信号的结构损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 638-643.
Qu Jinxiu, Yang Feiyu, Zhang Zhouso, et al. Identification method for structural damage based on acoustic signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014,34(4):638-643. (in Chinese)
- [8] 王计生,喻俊馨,黄惟公.小波包分析和支持向量机在刀具故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(3): 273-276.
Wang Jisheng, Xu Junxin, Huang Weigong. The application wavelet packet analysis and support vector machine in tool fault diagnosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(3): 273-276. (in Chinese)
- [9] 胡灿阳,陈清军.基于 HHT 法的地震地面运动局部谱密度估计[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10): 126-131.
Hu Canyang, Chen Qingjun. Estimation of local spectral density of earthquake ground motion based on HHT method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007,26(10):126-131. (in Chinese)
- [10] 张帅,杨勇,韩清凯,等.基于 HHT 的转子系统定点摩擦实验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 121-125.
Zhang Shuai, Yang Yong, Han Qinkai, et al. Experimental study on a ractor system with rub-impact at fixed limiter based on HHT [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(7):121-125. (in Chinese)
- [11] 朱权洁,姜福兴,于正兴,等.爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(4): 724-730.
Zhu Quanjie, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing, et al. Study on energy on distribution characters about blasting vibration and rock fracture micro-seismic signal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(4):724-730. (in Chinese)
- [12] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破震动信号分析理论与技术[M].北京:科学出版社,2009:26-36,82-84.
- [13] 傅燕,赵荣椿,王刚.小波变换在地震信号噪声处理中的应用[J].西北工业大学学报,2004,22(6):774-777.
Fu Yan, Zhao Rongchun, Wang Gang. Seismic data de-noising based on wavelet transform [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004,22(6): 774-777. (in Chinese)
- [14] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. World Scientific, 2009, 1(1): 1-41.
- [15] 薛嫒.总体平均经验模式分解法的理论研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.



第一作者简介:张苏,女,1987年10月生,博士。主要研究方向为安全科学与工程。曾发表《基于行为安全的安全帽事故原因分析及预防》(《煤矿安全》2014年第4期)等论文。

E-mail: zhangsu88@126.com

通信作者简介:王金贵,男,1987年1月生,博士、讲师。主要研究方向为安全科学与工程。

E-mail: wjingu@126.com

