

文章编号:0253-9993(2013)S2-0331-06

高精度雷管逐孔起爆地震信号的精确时频分析

徐振洋,杨 军,陈占扬

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:靠近煤炭筒仓建筑等的重要设施进行台阶爆破时,必须严格控制爆破振动低频带上能量的大小。基于HHT(希尔伯特-黄变换)方法,结合别斯库都克露天煤矿台阶爆破逐孔起爆方案,研究爆破振动信号的时频及能量分布特征。结果表明:研究建(构)筑物受爆破振动响应,选用爆破振动信号水平分量更为合理;分析爆破振动信号时频特征需结合爆破参数、场地等多因素;高精度雷管逐孔起爆方案可以使爆破振动信号能量分布更均匀,减少能量在10 Hz以下低频带上的分布。

关键词:高精度雷管;逐孔起爆;HHT;爆破振动

中图分类号:TD235.22 文献标志码:A

Precise time-frequency analysis on seismic signal by hole initiation using high-precision detonators

XU Zhen-yang, YANG Jun, CHEN Zhan-yang

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Foundation excavation of deep hole controlled blasting around the blasting area close to the complex environment, must strictly control the size of the blasting vibration energy of low-frequency, to avoid the surrounding buildings(structures) to buildings and harm. Based on HHT method and combine with Biesikuduke opencast coal mine bench blasting by hole initiation, researching vibration signal time-frequencyenergy distribution characteristics. The results show that it is more reasonable that selecting horizontal component of blasting vibration signal when studying the response of buildings(structures) by blasting vibration; it to be combined with blasting parameters, the venue and other factors when analysing blasting vibration signal frequency characteristics; The program of high precision detonators by hole initiation makes the blasting vibration signal energy distribution more uniform and reduce the distribution of energy in the low frequency below 10 Hz.

Key words: electronic detonators; precision delay; HHT; blasting vibration

爆破地震效应是露天矿山爆破的主要危害^[1],高精度雷管具有延时精度高、安全性高等优点,研究高精度雷管逐孔起爆技术的爆破振动效应具有较强的理论和实际意义。高精度雷管逐孔起爆使得爆破振动能量更加均匀分布,主要能量分布频带避开对建筑物损伤较大的低频带^[2]。HHT(希尔伯特-黄变换)是针对非平稳信号的非线性非平稳处理方法^[3],在爆破振动信号处理领域已有较多应用。对信号进行EMD(经验模态分解),能有效地把各种频率成分

以IMF(固有模态函数)形式从中分离出来^[4-5],之后对IMF分量进行希尔伯特变换,可得到时间、频率、振幅的三维离散时频谱,提供了非常清晰的局部细节时频特征。

1 实验设计

1.1 工程概况

别斯库都克露天煤矿位于新疆哈密巴里坤县城北西方向约150 km处,行政区划属巴里坤县大红柳

峡乡管辖。煤矿生产系统建成于 2011 年 7 月,其中包括 5 个高度约为 70 m 的圆形筒仓结构及选矿厂等建筑,生产系统缓冲仓距离露天矿坑边缘较近,距离露天矿爆破剥离台阶最近处约为 540 m,为了研究爆破地震效应对煤矿生产系统安全性的影响,于生产系统建成时开始便对现场爆破振动信号进行长期监测。

1.2 爆破及监测布点方案

煤矿开采爆破方式为露天台阶爆破,选择 2012-09-21—09-24 在测点 5 处的爆 4 个破振动监测信号为文中分析数据,此 4 次爆破药量和 4 处爆区都较为

接近,且孔网参数与延时方案均相同,有利对爆破振动信号分析以找出规律。4 次爆破网路连接均采用精确延期控制的逐孔起爆方案,使用澳瑞凯高精度雷管,孔内延期与孔外延期相结合。控制排选用 17 ms 地表连接雷管,排间选用 65 ms 地表连接雷管,孔内选用 600 ms 孔内雷管,孔内雷管位于距孔底 2 m 处,雷管聚能穴朝向孔口。单孔最大药量约为 180 kg,孔距 6 m,排距 4 m,炸药为混装乳化炸药,装药方式为连续耦合装药,反向起爆。图 1 为 9 月 21 日高精度雷管延时方案。

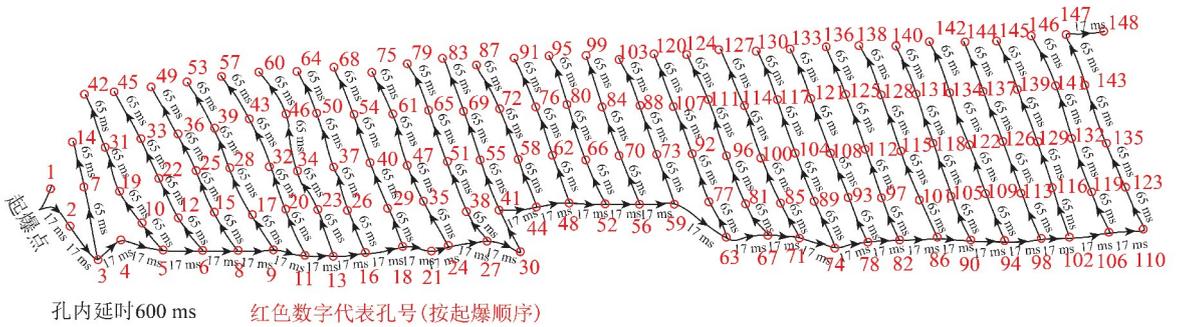
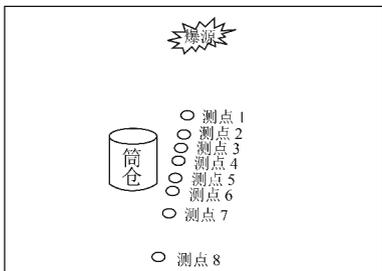


图 1 爆破延时方案

Fig. 1 Blasting delay program

根据现场地形具体情况,在距爆源最近的筒仓地面布置 8 个监测点进行爆破振动信号监测,使用三向传感器收集数据。各监测点与各个炮孔坐标均使用 GPS 测量获得,可得到更加准确的距离及高程差数据,便于找出逐孔起爆延期时间与爆破振动信号时频的对应关系。图 2 为爆破现场及测点布置。

建筑物受相同强度水平荷载的剪切破坏更为强烈,爆破时振动能量通过建(构)筑物基底传递至上部^[6],使得建(构)筑物高度对振动相应具有放大作用^[7]。选取 2012-09-21—24 在监测点 5 收集的爆破振动信号水平切向分量进行分析,按日期分别标记为信号 1、信号 2、信号 3、信号 4,表 1 为爆破振动监测数据。



(a) 测点布置



(b) 爆破现场

图 2 爆破现场及测点布置

Fig. 2 A diagrammatic arrangement of blasting the measuring point

1.3 爆破振动信号监测结果

建(构)筑物水平向抗震能力相对薄弱,建(构)

表 1 爆破振动监测成果

| Table 1 Table of blasting vibration monitoring results | | | | |
|--|------------------------------|-----------|---------|---------|
| 信号序号 | 水平切向振速/(cm·s ⁻¹) | 水平切向主频/Hz | 距爆心距离/m | 爆源高程差/m |
| 信号 1 | 1.12 | 22.37 | 921.35 | 13.5 |
| 信号 2 | 1.19 | 21.40 | 932.44 | 13.9 |
| 信号 3 | 1.49 | 21.15 | 955.29 | 14.2 |
| 信号 4 | 1.78 | 19.64 | 962.24 | 13.8 |

建筑物受相同强度水平荷载的剪切破坏更为强烈,爆破时振动能量通过建(构)筑物基底传递至上部^[6],使得建(构)筑物高度对振动相应具有放大作用^[7]。选取 2012-09-21—24 在监测点 5 收集的爆破振动信号水平切向分量进行分析,按日期分别标记为信号 1、信号 2、信号 3、信号 4,表 1 为爆破振动监测数据。爆破振动信号持续时间为 3.34 s,与高精度雷管延时时间相符。4 个信号的多个峰值较为均匀地分布在整个时间轴内,大小与距爆心距离成正比,且振动呈现多段分布,信号 1 的最大峰值并不是很明显,且振动持续衰减较为规律,信号 2 与信号 3 在 0.6 s 左右出现了最大峰值,信号 4 的最大峰值出现在信号的后半段,表现为突然增大,考虑可能为干扰造成。在信号 4 的初始出现一个细微的波动,也考虑为干扰造成。爆破参数及场地条件不同都会使爆破振动信号出现不同的时频特征^[8-9],图 3 为信号 1~4 的原始波形。

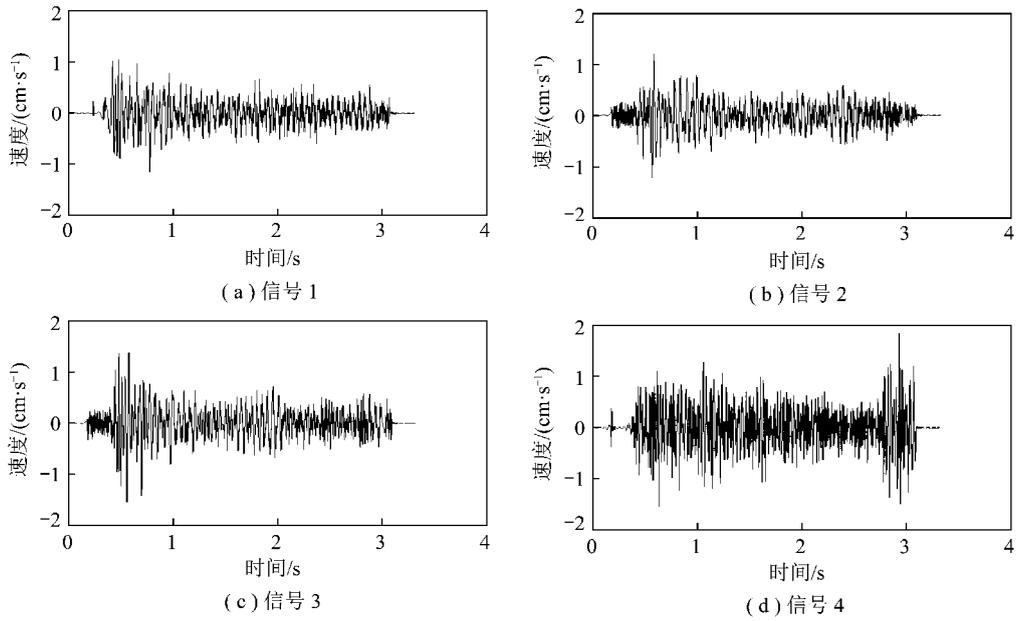


图3 爆破振动信号波形
Fig. 3 Blasting vibration signal waveform

2 信号的时频分布特征

2.1 EMD 计算方法

黄变换的方法就是对非平稳信号进行了平稳化处理^[10],逐层分解信号不同时间、频率范围的波动或趋势后,产生一组特征尺度不同的数据列,信号的能量在频率或时间尺度上的分布规律就可以真实地反

映出来^[11]。

2.2 高精度雷管精确逐孔起爆的三维时频特征

对所有 IMF 分量进行希尔伯特变换后将振幅显示在频率-时间平面上,就是原始信号的时间-频率-振幅三维分布,可以清晰表示出爆破振动持续时间、振动频率及振幅之间的关系,图 4 为信号的三维离散时频谱。

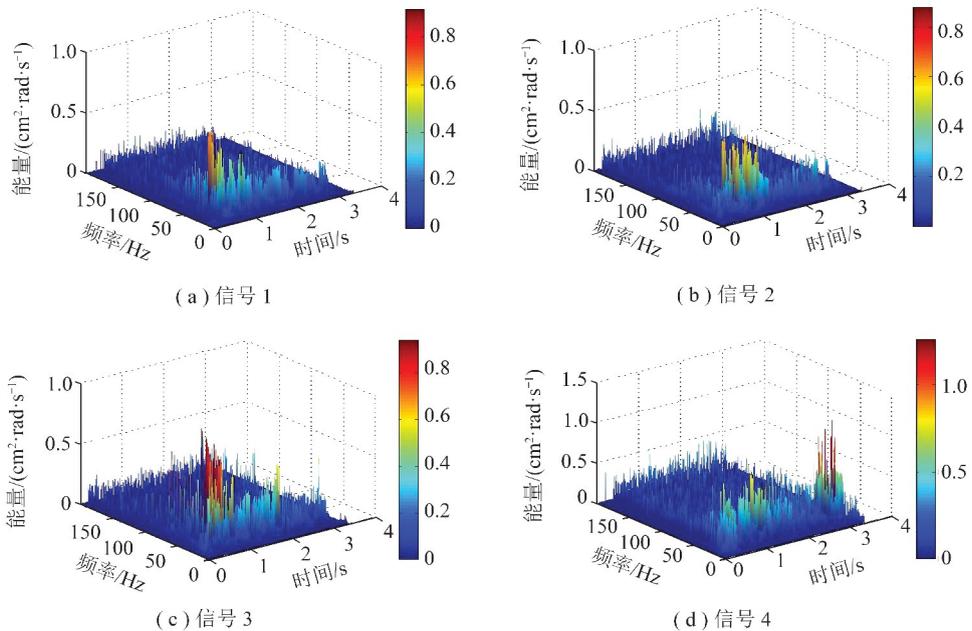
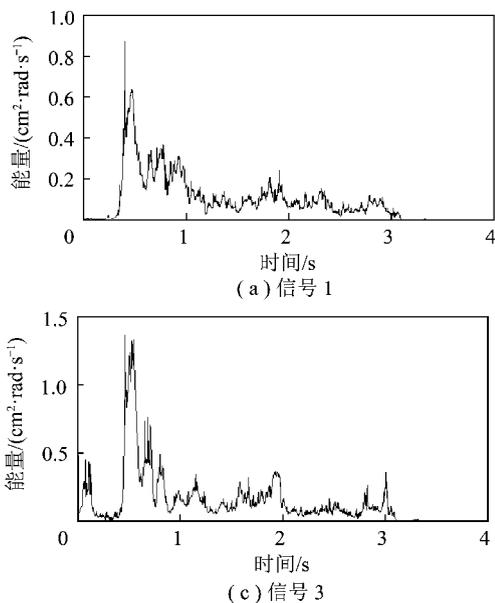


图4 三维离散时频谱
Fig. 4 Three-dimensional energy spectrum

对三维离散时频谱进行分析,图中不同的颜色代表能量大小的不同,这 4 个信号的能量在频域范围内

分布较为均匀地分散,并未在某个频带内过分集中,信号内低于 10 Hz 的低频部分比较少,能量较大的频

率范围主要集中在 10 ~ 60 Hz 范围,振幅仅在几个时间及频率上有较大幅度的突变。爆破的远区频带能量较为分散,信号 4 在时间轴尾部出现了数个较大峰值,与爆破振动信号特征符合,这几条突变线颜色不同代表了不同频率上的能量,是非常直观的。由于建(构)筑物的自振频率一般都比较低,在爆破工程中,在爆破中控制和建(构)筑物自振频率接近的低频信号是很重要的^[12]。这就很好地避免了某个频带能量



过于集中,特别是可以避免接近建筑物自振频率的频带。

3 振动信号的能量分布

3.1 信号的瞬时能量特征

瞬时能量谱反映的是信号输入能量与时间的对应关系^[13-15],精确延时使振动信号的叠加更加细致,图 5 为信号 1 ~ 4 的瞬时能量谱。

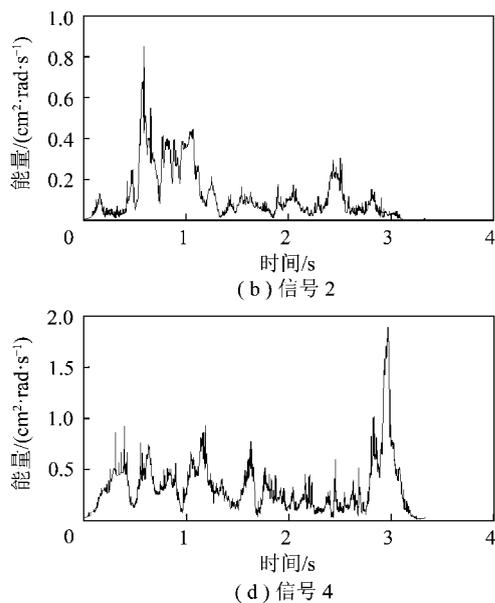


图 5 瞬时能量谱

Fig. 5 Instantaneous energy spectrum

瞬时能量谱反映信号能量随时间的变化,以信号 1 为例,在整个振动过程中,振速有多个大小接近的峰值,瞬时能量仅表现为一个最大的峰值,在其它时刻瞬时能量波动平稳,这符合高精度雷管逐孔起爆规律。精确延时逐孔起爆形成的地震波在时间上分散出现,减少了振动峰值的叠加,使振动能量在时间轴上出现均匀化分布趋势。

进一步观察,4 个信号出现瞬时能量峰值与振速峰值出现时间基本一致,但是变化规律大不相同,在波形图中振速表现较为均匀,但在瞬时能量谱中信号的峰值远大于其余时间能量值,峰值增长与衰减都较为迅速。信号 4 的头部与尾部可能为受到干扰的振动峰值造成了瞬时输入能量的突然增大。建(构)筑物对振动的响应实质上是爆破振动信号的一个脉冲过程,能量与振动累积时间密切关联。在分析时,不但需要计算最大瞬时能量,还需结合振动持续时间。

3.2 信号的边际能量分布特征

边际能量是在整个振动时间范围内,在某一频率上出现的振幅能量累加值,它表示在振动能量在振动

频域的分布关系,是能量的相对大小^[16-18]。通过计算可得出能量在 0 ~ 100 Hz 分布比例,图 6 为边际能量分布。

从边际能量分布图中可以看到,这 4 个信号能量在 10 Hz 以下分布的比例较小,信号主要能量都在 10 ~ 60 Hz 之间分布,呈现出中间最大两端衰减的特征,信号的能量分布较为均匀,能量出现了几个峰值,很好的减少信号能量的叠加。

对比分析可以看出,使用高精度雷管精确延时逐孔起爆的振动信号的能量主震频率主要集中在 20 Hz,主要能量集中在 10 ~ 60 Hz 的区域。由于建(构)筑物自振频率较低,一般在 10 Hz 以下,故爆破振动频率越高对保护建(构)筑物越有利^[19-21]。高精度雷管能量分布 in 高频所占比例与低频相当,有效分散了低频能量的破坏性。分析时也应考虑到干扰的影响,进行滤波后可更准确的识别信号特征。

4 结 论

(1) 爆破振动对建(构)筑物是多分量共同作用

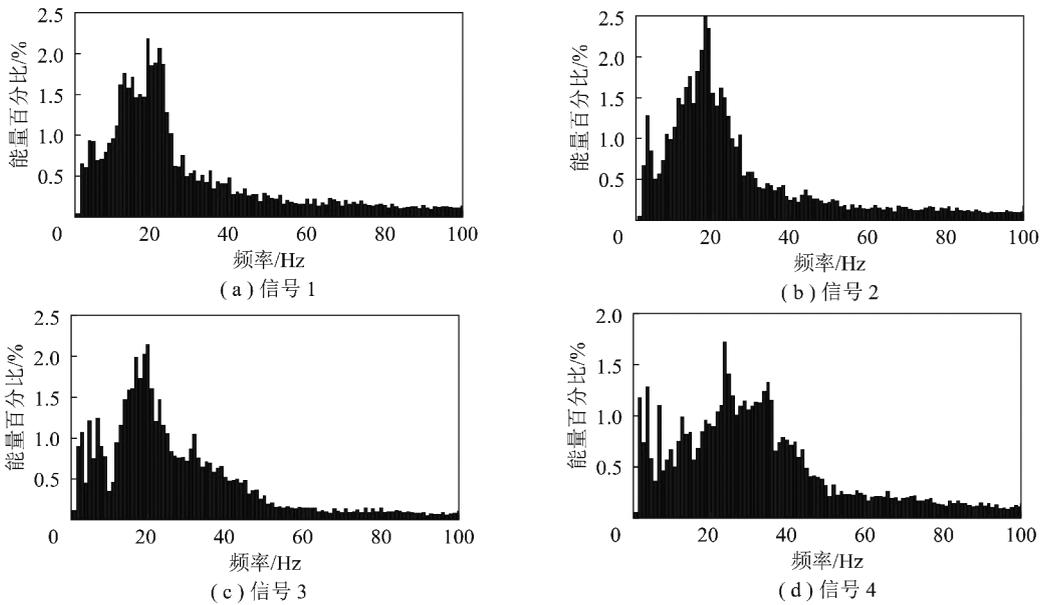


图6 边际能量分布

Fig. 6 Marginal energy spectrum

的,水平方向振动荷载作用的结构响应一般大于垂直方向,选用振动信号平分量进行分析是合理的。对于临近爆源的建(构)筑物对振动安全问题,选用爆破振动信号水平分量进行研究可以真实的反映爆破振动实质特征。

(2)单从质点振速极值不能完全对应其瞬时能量关系,爆破振动能量与振动持续的时间有关。能量在某一频率处高度集中,以主振频率为中心基本成正态分布,这与高精度雷管逐孔起爆有很大关系。在分析爆破地震效应是必须结合振动持续时间、频率与振幅这3个因素综合考虑。

(3)使用高精度雷管精确延时逐孔起爆,可以使爆破地震波主要能量分布向高频发展,避开信号的低频带,在10 Hz以上频带较为均匀分布,对于保护受爆破振动影响的建(构)筑物是有利的。

参考文献:

- [1] 言志信,彭宁波,江平,等.爆破振动安全标准探讨[J].煤炭学报,2011,36(8):1281-1284.
Yan Zhixin, Peng Ningbo, Jiang Ping, et al. Research about blasting vibration safety criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8):1281-1284.
- [2] 高文学,杨军,肖鹏飞,等.基于精确延期的深孔控制爆破技术[J].煤炭学报,2011,36(S2):386-389.
Gao Wenxue, Yang Jun, Xiao Pengfei, et al. Deep-hole controlled blasting technology based on precise time delay[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2):386-389.
- [3] 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. Roy. Soc. London (Ser. A), 1998, 454: 903-995.

- [4] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破振动信号分析理论与技术[M].北京:科学出版社,2009:99-100.
Li Xibing, Ling Tonghua, Zhang Yiping. Blasting vibration signal analysis theory and technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 99-100.
- [5] 公茂盛,谢礼立. HHT方法在地震工程中的应用之初步探讨[J].世界地震工程,2003,19(3):39-43.
Gong Maosheng, Xie Lili. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(3):39-43.
- [6] 邵良杉,白媛,邱云飞,等.露天采矿爆破振动对民房破坏的LS-SVM预测模型[J].煤炭学报,2012,37(10):1637-1642.
Shao Liangshan, Bai Yuan, Qiu Yunfei, et al. LS-SVM analysis model and its application for prediction residential house's damage against blasting vibration from open pit mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10):1637-1642.
- [7] 祝文化,明锋,李新平,等.爆破地震波作用下框架结构的高程响应分析[J].煤炭学报,2011,36(S2):411-415.
Zhu Wenhua, Ming Feng, Li Xinping, et al. Elevate effect analysis of frame structure response under blasting seismic wave[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2):411-415.
- [8] 史秀志,陈寿如.爆破振动时频特征的段药量及抵抗线效应[J].煤炭学报,2009,34(3):345-349.
Shi Xiuzhi, Chen Shouru. Explosive blasted per delay and burden effects on the time-frequency characteristic of vibration induced by blast[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3):345-349.
- [9] 李鹏,卢文波,乔新明,等.岩石高边坡开挖爆破振动信号处理与振动响应分析[J].煤炭学报,2011,36(S2):401-405.
Li Peng, Lu Wenbo, Qiao Xinming, et al. Signal processing and response analysis of blasting vibration induced by high rock slope excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2):401-

- 405.
- [10] Battista B M, Knapp C, McGee T. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): 29-37.
- [11] 钱七虎, 陈士海. 爆破地震效应[J]. *爆破*, 2004, 21(2): 21-26. Qian Qihu, Chen Shihai. Blasting vibration effect[J]. *Blasting*, 2004, 21(2): 21-26.
- [12] 郭学彬, 肖正学, 张继春, 等. 论爆破地震波在传播过程中的衰减特性[J]. *中国矿业*, 2006, 15(3): 51-57. Guo Xuebin, Xiao Zhengxue, Zhang Jichun, et al. On attenuating characteristic of blasting seismic waves in propagating process[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(3): 51-57.
- [13] 徐国元, 中国生, 熊正明. 基于小波变换的爆破地震安全能量分析法的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(1): 24-28. Xu Guoyuan, Zhong Guosheng, Xiong Zhengming. Study and application of energy analysis method for blasting seismic safety based on wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 24-28.
- [14] 王振宇, 梁旭, 陈银鲁, 等. 基于输入能量的爆破振动安全评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(12): 2492-2499. Wang Zhenyu, Liang Xu, Chen Yinlu, et al. Study of safety evaluation method of blasting vibration based on input energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(12): 2492-2499.
- [15] Yang J N, Lei Y. Hilbert-Huang based approach for structural damage detection[J]. *Eng. Mechanics*, 2004, 130(1): 85-95.
- [16] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧. 爆破振动灾害主动控制方法研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1440-1441. Ling Tonghua, Li Xibing, Wang Guiyao. A study on initiative control of blast vibration damages[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1440-1441.
- [17] 罗奇峰, 石春香. HHT变换理论及其计算分析中存在的问题[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(6): 637-640. Luo Qifeng, Shi Chunxiang. HHT several problems in its calculation method[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003, 31(6): 637-640.
- [18] 周攀, 山秀明, 张立, 等. 基于HHT提取昆明下关重力固体潮的地震前兆信息[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 836-844. Zhou Zhi, Shan Xiuming, Zhang Li, et al. The gravity tide of Kunming & Xiaguan based on the HHT[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 836-844.
- [19] Umit Ozer. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy-Kartal metro tunnel[J]. *Engineering Geology*, 2008, 100: 82-90.
- [20] 李宏男, 王炳乾, 林皋. 爆破地震效应若干问题的探讨[J]. *爆炸与冲击*, 1996, 1(1): 61-67. Li Hongnan, Wang Bingqian, Lin Gao. Studies on some problems on explosion earthquake responses[J]. *Explosion and Shockwaves*, 1996, 1(1): 61-67.
- [21] 毛静民. 高精度雷管爆破地震效应测试分析[J]. *长江科学院学报*, 1996, 13(S): 77-80. Mao Jingmin. Test and analysis of high-precision detonators blasting seismic effect[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1996, 13(S): 77-80.