DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0107-07

基于 HHT 能量谱的高精度雷管短微差爆破降振效果分析*

邱贤阳,史秀志,周 健,黄 丹,陈 新
(中南大学资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要: 为揭示高精度雷管短微差爆破干扰降振机理,选取紫金山金铜矿露天爆破实测的单段波形信号,利用 Matlab 分析了不同微差间隔下两段叠加信号的时频特征;综合考虑爆破振动三要素并结合 HHT(Hilbert-Huang transform)能量定义降能率,分析了段数、相邻振幅比 和最大段药量位置对短微差爆破叠加信号降振效果的影响。根据研究成果,爆破设计时应避免出现前后段数药量差距过大,并尽量将较大药量的段数靠后起爆。研究表明:相同微差间隔下随着段数的增加,叠加信号降能率逐渐增大,当段数达到一定数量后增加分段数,微差爆破的降振效果并不明显;微差爆破中相邻振幅比越接近 1,降振效果越明显;最大段药量靠后的叠加信号降能率大于其他顺序。

关键词: 爆炸力学;干扰降振;叠加信号;爆破振动;微差间隔;高精度雷管;HHT 能量
中图分类号: O381;TP028.8 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

微差爆破是降低爆破振动的有效手段,干扰降振的基本原理是:将整个爆破总药量分段起爆,并利用分段起爆的微差时间间隔使得各段爆破振动产生干扰叠加,从而降低爆破振动强度[1-2]。对于微差爆破干扰降振的效果,已做了大量的研究,如赵明生等[3-4]研究了不同微差间隔和段数对爆破振动信号时频特征的影响,陈士海等[5]分析了微差爆破降震效果的影响因素,李夕兵等[6]研究了单段与多段微差爆破中结构体对爆破震动的不同响应,李顺波等[7]通过爆破模型试验研究了不同微差间隔下爆破振动降振效果。总体而言,大多数学者采用降幅率来衡量微差爆破的降振效果,并没有考虑爆破振动三要素的综合影响。高精度数码电子雷管技术因其精度高、安全性好,特别是延期精度可达 1 ms,实践中可通过设置实现短至数毫秒的短微差爆破,逐渐在爆破工程中得到广泛应用[8-10]。而目前这种短微差情况下的微差爆破降振效果研究鲜见报道。鉴于此,本文中通过 Matlab 编程对实测单段爆破振动信号在不同微差间隔和不同段数下进行叠加,通过分析叠加信号的降能率,研究段数、相邻药量比和最大段药量位置对短微差爆破降振效果的影响。

1 爆破振动信号的 HHT 分析方法

爆破振动信号 HHT(Hilbert-Huang transform)分析方法由经验模态分解和 Hilbert 变换两部分组成。对信号进行经验模态分解,能有效地把各种频率成分以固有模态函数(intrinsic mode functions, IMF)的形式从中分离出来,之后对 IMF 分量进行 Hilbert 变换,得到每个分量的瞬时频谱,综合所有分量的瞬时频谱即得到 Hilbert 谱[11-14]。

Hilbert 谱是幅度在时间频率平面上的分布,可采用颜色编码图和三维空间图形等形式表示。Hilbert 谱的表达形式[15]为:

$$H(\omega,t)=R_{\mathrm{e}}\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\mathrm{e}^{\int\omega_i(t)\mathrm{d}t} \tag{1}$$

* **收稿日期**: 2015-07-01; **修回日期**: 2016-02-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(51104178);中南大学教师研究基金项目(20140004040001);
中南大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(2016zzts094)
第一作者: 邱贤阳(1987—),男,博士研究生; **通信作者**: 史秀志,csublasting@163.com。

式中：R_e 为实部；i 为 IMF 的个数，$i=1,2,\cdots,n$；$a_i(t)$为幅值函数，$\omega(t)$为频率函数。

对 Hilbert 幅值的平方对时间进行积分，可得到 Hilbert 能量谱 E_s，其表达形式为：

$$E_s(\omega)=\int_0^t H^2(\omega,t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

Hilbert 能量谱提供了每个频率的能量计算式，表达了每个频率在整个时间长度内所积累的能量[16-18]。

对 E_s 在频域内积分可得到信号的 Hilbert 能量，其表达式为：

$$E=\int_0^{\omega} E_s(\omega)\mathrm{d}\omega \tag{3}$$

2 单段爆破振动波形的 HHT 分析

2.1 单段波形的选取

单段爆破振动试验在福建紫金山金铜矿露天+628 m台阶进行，该台阶岩石以坚硬半坚硬块状岩类为主，局部夹薄层软弱岩石。试验孔孔径为 165 mm，孔深为 13.5 m，堵塞长度为 4.5 m，装药量为 175 kg，测点位于炮孔自由面正后方 120 m，测点垂直方向的爆破振动信号如图 1 所示。该振动信号的质点振动速度峰值为 0.632 cm/s，主频为 29.33 Hz，主振周期为 34 ms，振动持续 210 ms。

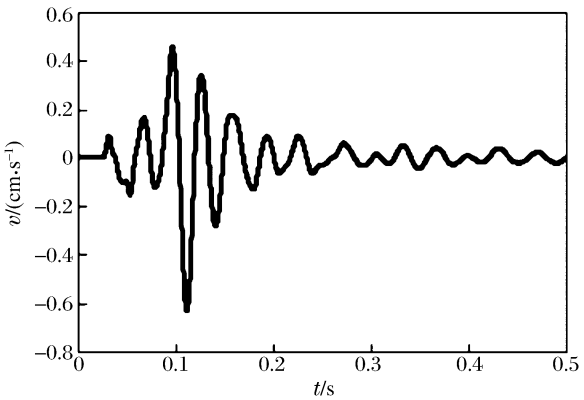


图 1 单段爆破质点振动速度-时间曲线

Fig. 1 Particle vibration velocity-time curve of single-stage blasting

2.2 单段波形的 HHT 分析

采用 HHT 方法对实测的单段爆破振动信号进行分析，得到单段信号的 HHT 时频谱，如图 2 所示。图 2 清晰地反映了单段爆破振动信号的质点振动速度和能量的时频分布情况。

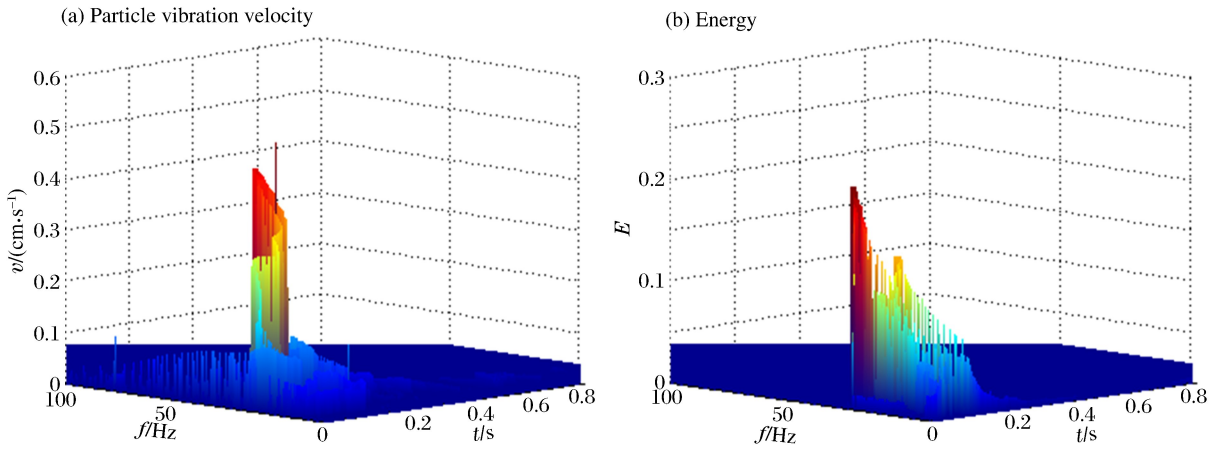


图 2 单段爆破振动信号的 HHT 时频谱

Fig. 2 HHT time-frequency spectra of single-stage blasting signal

3 不同微差间隔下两段叠加信号的时频特征分析

利用 Matlab7.0 软件编制程序，将实测的单段爆破振动信号在 0～100 ms 内每隔单位毫秒进行两段波形叠加，由此研究不同微差间隔下叠加信号的质点峰值振动速度(particle peak velocity，PPV)、主频和能量的变化情况。

3.1　不同微差间隔下叠加信号的 PPV 变化

不同微差间隔下叠加信号的 PPV 变化规律如图 3 所示。由图 3 可见，叠加信号的 PPV 均低于两段齐发爆破振动信号，说明齐发爆破的振动信号幅值大于任何微差爆破。叠加信号的 PPV 呈现一定的起伏变化，其中有多个时间区间叠加信号的 PPV 低于单段波形，且振幅极低值的微差时间并非出现在主振周期的 $(2n-1)/n$ 处，其原因在于爆破振动信号是典型的非平稳随机信号，没有明显的周期性。此外，不同微差间隔下叠加信号的 PPV 还呈现以下规律。当微差时间位于 0～$T/2$(17 ms)之间时，叠加信号的振幅随微差时间的增加迅速下降，在靠近 $T/2$(16 ms)处振幅最低，在 $T/2$ 附近的微差时间区间内，振幅降低效果明显。随着微差时间的增加，叠加信号的 PPV 变化幅度逐渐较小，并逐步向单段波形 PPV 靠拢，这是因为随着微差时间的增加，各段爆破振动信号的主振相逐渐分离，振动效应逐渐转变为各段爆破振动信号的独立作用。

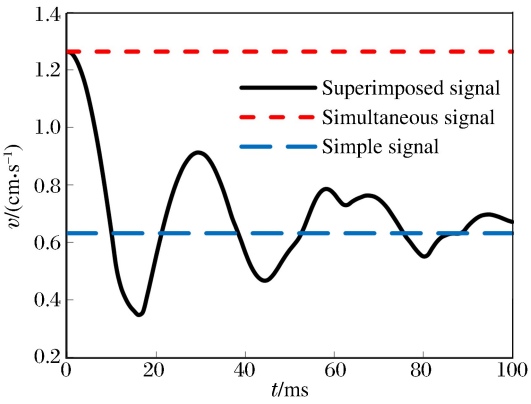


图 3　不同微差间隔下叠加信号的峰值质点振动速度的变化

Fig. 3　Peak particle velocity variations of superimposed signals at different millisecond delay intervals

3.2　不同微差间隔下叠加信号的主频变化

对叠加信号进行功率谱分析，可以得到叠加信号的主频随微差时间的变化特征，如图 4 所示。由图 4 可见，叠加信号主频随着微差间隔时间的变化规律呈现出一定的阶跃性。叠加信号振幅较低的微差间隔(14～17 ms)的主频为 28.67 Hz，远低于单段信号的主频。因此，微差时间的选取不仅要考虑振幅的变化，同时也要考虑主频的变化情况。

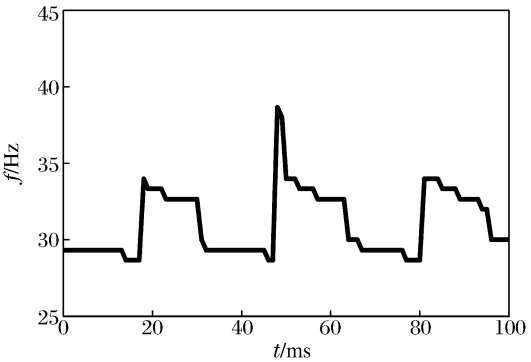


图 4　不同微差间隔下叠加信号的主频变化

Fig. 4　Main frequency variation of superimposed signal at different millisecond delay intervals

3.3　不同微差间隔下叠加信号的能量变化

目前，多采用降幅率来衡量微差爆破的降振效果，即齐发爆破(微差间隔为零)振动速度峰值与微差爆破振动速度峰值之差与齐发爆破振动速度峰值之比[19-20]。爆破振动的危害是由质点的振动速度、频率和持续时间三者共同作用引起的[21]，因此微差爆破干扰降振的效果应综合考虑爆破振动三要素的作用。HHT 能量能同时体现爆破振动信号的三要素[22]，因此定义降能率 r_{er} 的概念，即齐发爆破 HHT 能量 E_0 与微差爆破 HHT 能量 E 之差与 E_0 的比值来衡量不同微差间隔下叠加信号的降振效果，其数学表达式为：

$$r_{er}=(E_0-E)/E_0\times 100\% \tag{4}$$

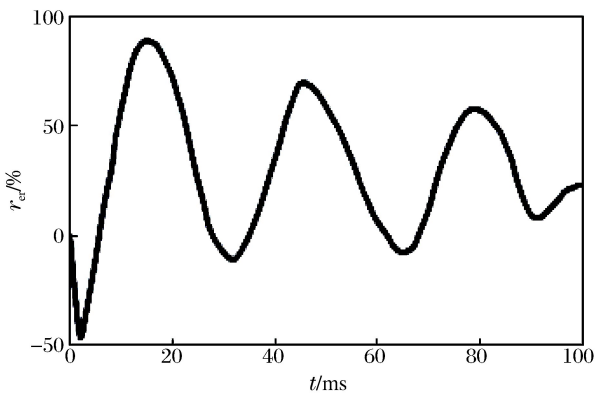


图 5　不同微差间隔下叠加信号的降能率

Fig. 5　Energy reduction ratios ofsuperimposed signal at different millisecond delay intervals

由式(4)可计算出叠加信号的降能率随微差时间的变化规律，如图 5 所示。由图 5 可见，随着微差时间的增加，叠加信号的 HHT 能量具有明显的规律性，与叠加信号 PPV 变化规律类似，降能率较高的微差时间出现在几个时间段内。降能率最大的微

差时间(15 ms)并不是振幅最小的微差时间(16 ms),说明叠加信号振幅最小的微差时间并非降振效果最好的时间点。在某些微差时间段内,叠加信号的降能率小于零,而齐发爆破的振幅大于任何微差间隔下叠加信号的振幅,表明某些微差间隔下叠加信号的 HHT 能量超过齐发爆破的能量。当微差时间位于 0～5 ms 的短微差间隔内,叠加信号的降能率小于零,微差时间为 2 ms 时 HHT 能量最大,此时降能率为－46.05%,之后迅速回升,并在 15 ms 附近达到最佳降振效果。

4 短微差间隔下叠加信号降振作用分析

4.1 段数对短微差爆破降振效果的影响

将实测的单段爆破振动信号在短微差间隔(0～16 ms)内进行多段波形叠加,由此研究段数对短微差爆破降振效果的影响。每隔 2 ms 进行 10 段以内的波形叠加,不同间隔下叠加信号的降能率见图 6。

由图 6 可见:(1)相同段数情况下,微差间隔越大,叠加信号的降能率越大,这与图 5 的规律一致。(2)相同微差间隔下随着段数的增加,叠加信号的降能率逐渐增大,且降能率的涨幅逐步减小,最终逐步接近 100% ,表明当段数达到一定量后增加分段数,微差爆破的降振效果并不明显。因此,微差爆破设计时应尽量将分段数控制在一定范围内,而不是无限分段。(3)微差间隔时间越小,叠加信号降能率收敛的段数越大,2 和 4 ms 的收敛段数远大于其他时间,表明短微差间隔爆破降振效果较差,爆破施工过程中可通过增加分段数来弥补。

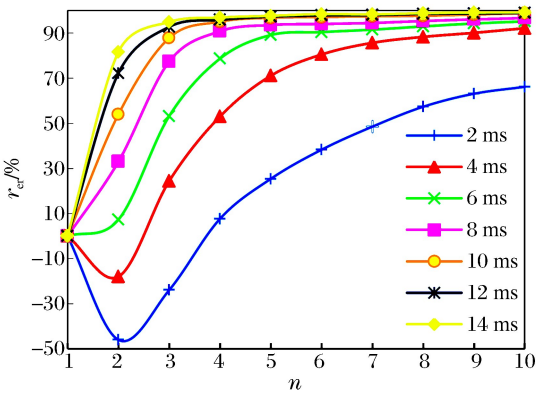


图 6 短微差间隔下降能率随段数的变化关系

Fig. 6 Change of energy reduction ratio with segments at short millisecond delay intervals

4.2 相邻振幅比对短微差爆破降振效果的影响

爆破设计时前后两段药量不一定相同,现场爆破施工中,将药量不同的单段爆破振动信号进行波形叠加,研究相邻两段药量不同对短微差爆破降振效果的影响。选取 7 个药量不同的单孔爆破振动信号,为排除其他因素的干扰,各次爆破时测点距离爆源的高差、水平距离一致,振动监测结果如表 1 所示,由表 1 可见,单段爆破药量越大,振动信号的质点振动速度峰值越大,且两段爆破振速峰值的比值较之药量比具有一定的放大作用,因此可用爆破振动的振幅比值表征不同药量的爆破振动效应。定义相邻振幅比(amplitude ratio)r_a 为两段叠加信号的第 1 段爆破振动速度峰值与第 2 段爆破振动速度峰值的比值,分析 2 个单段爆破叠加信号的降能率随振幅比的变化规律,如图 7 所示。

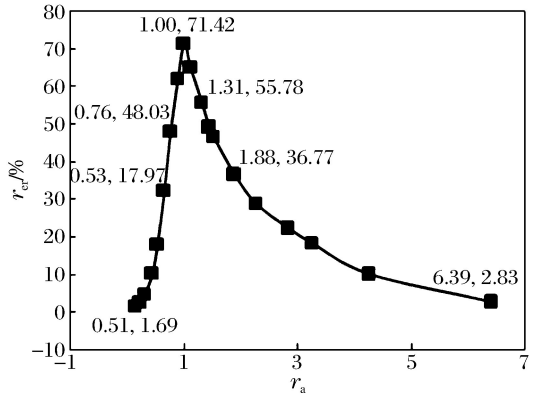


图 7 降能率随振幅比的变化

Fig. 7 Change of energy reduction ratio with amplitude ratio

由图 7 可见,振幅比对叠加信号的降能率影响较大,降能率随振幅比有先增大后减小的变化趋势。当振幅比为 1 时,叠加信号的降能率最大,表明相邻两段爆破药量越接近,降振效果越明显。当振幅比小于 1 时,随振幅比的增大,降能率的增加速度较快;当振幅比大于 1 时,随振幅比的增加,降能率的降低速度趋于缓慢。因此,微差爆破设计时应尽量保证前后段别起爆的药量相近,避免出现前后段别药量差距过大的现象。

表 1 爆破振动监测数据

Table 1 Blasting vibration monitoring data

编号	药量/kg	高差/m	水平距离/m	质点振动速度峰值/(cm·s^{-1})	主频/Hz	持续时间/s
1	86	12	120	0.229 1	19.61	0.221
2	117	12	120	0.343 9	40.82	0.180
3	156	12	120	0.450 4	15.63	0.269
4	184	12	120	0.648 4	13.67	0.224
5	210	12	120	0.722 9	24.92	0.283
6	283	12	120	0.962 2	16.74	0.309
7	320	12	120	1.464 1	11.96	0.285

4.3 最大段药量位置对短微差爆破降振效果的影响

由图 7 中标识点可以看出，振幅比互为倒数的两点（前后两段药量顺序颠倒）的降能率不同，振幅比小于 1 的叠加信号降能率高于相反顺序下的叠加信号的降能率。将表 1 中的信号 4 和 7 进行 3 段叠加，研究最大段药量位置对叠加信号降能率的影响。3 种叠加顺序为“7＋4＋4”、“4＋7＋4”和“4＋4＋7”，分别代表最大段药量位于靠前、居中、靠后等不同位置。3 种叠加顺序的信号降能率随时间的变化如图 8 所示。

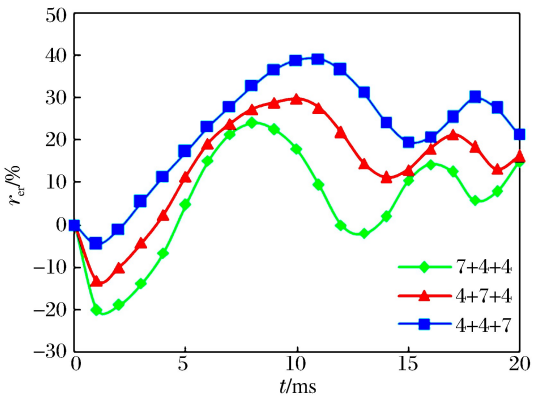


图 8 不同最大段药量位置情况下降能率随时间的变化

Fig. 8 Change of energy reduction ratio with time at different segment positions with the maximum charge

由图 8 可见，3 种叠加顺序的降振效果最佳的时间区段不同，最大段药量靠前、居中、靠后的叠加信号最佳降振时间分别为 7～9、8～11 和 9～12 ms，表明最大段药量位置越靠前，最佳降振时间越小。此外，最大段药量靠后的降能率大于其他 2 种叠加顺序，最大段药量靠前、居中、靠后的叠加信号最大降能率分别为 24.08%、29.89%、39.25%。因此，爆破设计时应考虑各段药量的起爆顺序对降振效果的影响，尽量将较大药量的段别靠后起爆。

5 结　论

（1）HHT 能量综合体现了爆破振动三要素的作用，基于 HHT 能量提出的降能率能很好地衡量微差爆破干扰降振的效果。

（2）相同微差间隔下随着段数的增加，叠加信号的降能率逐渐增大，且降能率的涨幅逐步减小，最终逐步接近 100%，表明当段数达到一定量后增加分段数，微差爆破的降振效果并不明显。因此，微差爆破设计时应尽量将分段数控制在一定范围内，而不是无限分段。

（3）微差爆破中相邻两段爆破药量越接近，降振效果越明显；最大段药量靠后的叠加信号降能率大于其他顺序。爆破设计时应考虑各段药量的起爆顺序对降振效果的影响，避免出现前后段别药量差距过大的现象，并尽量将较大药量的段别靠后起爆。

参考文献：

[1] 张雪亮，黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京：地震出版社，1981.

[2] 宋光明，曾新吾，陈寿如，等. 基于波形预测小波包分析模型的降振微差时间选择[J]. 爆炸与冲击，2003，23(2)：163-168.

Song Guangming, Zeng Xinwu, Chen Shouru, et al. The selection of millisecond delay interval of blasting for decreasing ground vibration based on the wavelet packets prediction model of waveforms[J]. Explosion and Shock

Waves, 2003,23(2):163-168.

[3] 赵明生,张建华,易长平.基于单段波形叠加的爆破振动信号时频分析[J].煤炭学报,2010,35(8):1279-1282.
Zhao Mingsheng, Zhang Jianhua, Yi Changping. Time-frequency analysis based on single-stage addition of waveforms of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(8):1279-1282.

[4] 赵明生,梁开水,余德运,等.段数对爆破振动信号的时频特征影响分析[J].煤炭学报,2012,37(1):55-61.
Zhao Mingsheng, Liang Kaishui, Yu Deyun, et al. Effect of segments on time-frequency characteristics of blasting vibration signal[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(1):55-61.

[5] 陈士海,燕永峰,戚桂峰,等.微差爆破降震效果影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(10):3003-3008.
Chen Shihai, Yan Yongfeng, Qi Guifeng, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10):3003-3008.

[6] 李夕兵,凌同华.单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2409-2413.
Li Xibing, Ling Tonghua. Response spectrum analysis of ground vibration induced by single deck and mlti-deck blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(14):2409-2413.

[7] 李顺波,杨军,陈浦,等.精确延时控制爆破振动的实验研究[J].爆炸与冲击,2013,33(5):513-518.
Li Shunbo, Yan Jun, Chen Pu, et al. Experimental study of blasting vibration with precisely-controlled delay time [J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(5):513-518.

[8] 王鹏.可编程电子延期雷管研究[D].武汉:武汉理工大学,2007:10-25.

[9] 徐振洋,杨军,陈占扬.高精度雷管逐孔起爆地震信号的精确时频分析[J].煤炭学报,2013,38(增 2):331-336.
Xu Zhenyang, Yang Jun, Chen Zhanyang. Precise time frequency analysis on seismic signal by hole initiation using high precision detonators[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(Suppl 2):331-336.

[10] 马晓明,王振宇,陈银鲁,等.精确微差爆破震动能量分布特征分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(4):449-454.
Ma Xiaoming, Wang Zhenyu, Chen Yinlu, et al. Analysis of energy distribution of accurate millisecond blasting vibration[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012,13(4):449-454.

[11] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破振动信号分析理论与技[M].北京:科学出版社,2009:99-100.

[12] 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,2009:32-42.

[13] 孙新建.基于 Hilbert 能量分析的岩体爆破震动损伤研究[D].天津:天津大学,2012:39-51.

[14] Battista B M, Knapp C, Mcgee T, et al. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data[J]. Geophysics, 2007,72(2):29-37.

[15] 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]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998,454(1971):903-995.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Yang J N, Lei Y, Lin S, et al. Hilbert-Huang based approach for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanic, 2004,130(1):85-95.

[19] 凌同华.爆破震动效应及其灾害的主动控制[D].长沙:中南大学,2004:34-52.

[20] 唐跃,曹跃,罗明荣,等.高精度数码雷管在爆破施工降振中的应用[J].爆破,2011,28(1):107-110.
Tan Yue, Cao Yue, Luo Mingrong, et al. Application of high-precision electronic detonator in decreasing blasting vibration[J]. Blasting, 2011,28(1):107-110.

[21] 赵明生，梁开水，曹跃，等. 爆破地震作用下建(构)筑物安全标准探讨[J]. 爆破，2008，25(4)：24-27.
Zhao Mingsheng, Liang Kaishui, Cao Yue, et al. Discussion on the security criteria of construction (structure) of building under blasting vibration[J]. Blasting, 2008, 25(4): 24-27.

[22] 李宝山，张义平. HHT 能量判别法在英坪矿爆破振动中的应用[J]. 工程爆破，2013，19(6)：13-17.
Li Baoshan, Zhang Yiping. The application of HHT energy discrimination in blasting vibration of Ying-ping mine [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(6): 13-17.

On vibration reduction effect of short millisecond blasting by high-precision detonator based on HHT energy spectrum

Qiu Xianyang, Shi Xiuzhi, Zhou Jian, Huang Dan, Chen Xin
(*School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: In order to reveal the mechanism of the interference vibration reduction of the short millisecond blasting of a high-precision detonator, on-site measured single-stage blasting vibration signals were selected to study the time frequency characteristics of the superposed signals in different millisecond intervals using the Matlab program. Comprehensively considering the three elements of the blasting vibration, energy reduction ratio and amplitude ratio were defined based on the HHT energy spectrum to study the influence of the segments, explosive charge ratio and vibration velocity proportion on the vibration reduction effect of the short millisecond blasting. The results show that an extremely big explosive charge ratio nearby should be avoided in the design of the millisecond blasting, and it would be better for a segment with a bigger explosive charge to have a posterior ignition. The research also shows that the energy reduction ratio increases with that of the segments in the same millisecond interval; the energy reduction ratio exhibits little obvious increases with that of the segments after the segments increase to a certain degree; the more similar the vibration characteristics of the two signals are to each other, the more evident the energy reduction effect; the energy reduction ratio of the superposed signals with a posterior vibration velocity proportion is more than the other orders.

Keywords: mechanics of explosion; interference vibration reduction; superimposed signal; blasting vibration; millisecond interval; high-precision detonator; HHT energy

(责任编辑　张凌云)