

文章编号: 1001-1455(2009)03-0300-06

# 基于小波包能量谱爆炸参量对 爆破振动信号能量分布的影响\*

中国生<sup>1,2</sup>, 敖丽萍<sup>1</sup>, 赵 奎<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 基于现场实测爆破振动数据, 根据爆破振动信号具有短时非平稳的特点, 采用小波包分析技术对不同爆炸参量(爆心距、最大段药量和微差雷管段数)下产生的爆破振动信号进行小波包能量谱分析, 获得了爆破振动信号不同频带的能量分布, 研究了不同爆炸参量下的爆破振动信号能量分布特征, 从爆破振动信号能量角度探讨了不同爆炸参量下爆破地震波的衰减规律, 为研究爆破地震效应提供了一种新的分析技术。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破振动; 小波包能量谱; 爆炸参量; 能量分布

中图分类号: O382; TD 235.1

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

## 1 引 言

受理论发展的限制, 长期以来, 传统的爆破振动特征分析都是建立在 Fourier 变换基础之上, 由于爆破振动是一个短时非平稳随机过程, 振动信号持时短、突变快, 属于典型的非平稳信号, 建立在平稳随机过程基础上的 Fourier 变换无法反映爆破振动的本质性特点<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着科学技术的发展和新的数学工具的出现, 信号时频分析法已广泛应用于工程技术领域, 人们用小波变换处理非平稳随机信号已取得了较好的成果, 但用小波变换处理爆破振动信号还处于探索阶段, 许多研究者<sup>[3-6]</sup>正对此做一些有益的尝试和探索。由爆破振动监测数据可知, 影响爆破地震效应的因素很多, 如爆破总药量、最大段药量、爆心距、微差雷管段数及其时间间隔和爆破场地条件等, 但在确定的爆破场地条件下, 最大段药量、爆心距、微差雷管段数等爆炸参量对爆破地震效应的影响最大<sup>[7]</sup>。本文中结合工程爆破振动实测数据, 采用小波包分析技术, 对不同爆炸参量(最大段药量、爆心距、微差雷管段数)下产生的爆破振动信号进行小波包能量谱分析, 研究不同爆炸参量下的爆破振动信号能量分布特征, 从爆破振动信号能量角度探讨不同爆炸参量下爆破地震波的衰减规律。

## 2 爆破振动小波包能量谱分析

### 2.1 小波包分析的特点

小波分析是把信号分解成低频和高频 2 个部分。在分解中, 低频部分失去的信息由高频部分获取, 在下一层分解中, 又将所分解出的低频部分分解成低频和高频 2 部分, 低频中失去的信息同样由高频部分获取, 如此类推, 可以完成更深层次的分解。从小波分解的结构可以看出, 小波变换的频率分辨率随频率升高而降低。小波包分解则不然, 它不仅对低频部分进行分解, 也对高频部分实施分解。小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配, 比小波分解更精细。小波包分解以严密的数学理论和数值计算方法为基础<sup>[8-10]</sup>, 相关数学原理不再赘述。

将爆破振动信号进行小波包分析时, 分解的层数视具体信号及采用的爆破振动分析仪的工作频带而定。本文中爆破振动测试采用成都中科动态仪器有限公司研制的 IDTS3850 爆破振动记录仪, 最小工作频率为 1 Hz。由于爆破振动信号的主振频率一般在 200 Hz 以下, 根据采样定理<sup>[11]</sup>, 信号的采样频率设为 2 kHz, 则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1 kHz。因此, 根据小波包分解算法, 采用二进尺度变换, 可以将分析信号分解到第 8 层, 对应的最低频带为 0~3.906 Hz, 爆破振动信号小波包分解后各层重构信号的频带范围如表 1 所示。

\* 收稿日期: 2007-12-26; 修回日期: 2008-04-10

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划基金项目(2008BAB32B03); 中国博士后科学基金项目(20080430836);

江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ09515)

作者简介: 中国生(1974—), 男, 博士后, 副教授。

表1 爆破振动信号小波包分解系数重构信号各层频带范围

Table 1 Frequency rangs band of reconstructed blasting vibration signals by wavelet packet analysis

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	...	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0~500					500~1 000
2	0~250	250~500	500~750			750~1 000
3	0~125	125~250	250~375	...	750~875	875~1 000
4	0~62.5	62.5~125	125~187.5	...	875~937.5	937.5~1 000
5	0~31.25	31.25~62.5	62.5~93.75	...	937.5~968.75	968.75~1 000
6	0~15.625	15.625~31.25	31.25~46.875	...	968.75~984.375	984.375~1 000
7	0~7.8125	7.8125~15.625	15.625~23.4375	...	984.375~992.1875	992.1875~1 000
8	0~3.90625	3.90625~7.8125	7.8125~11.71875	...	992.1875~996.09375	996.09375~1 000

注： $s_{i,j}$ 表示爆破振动信号第*i*层第*j*个小波包分解系数重构信号。 $i=1,2,\dots,8;j=0,1,2,\dots,2^i-1$ 。

### 2.2 爆破振动信号小波包能量谱分析原理

对爆破振动信号  $s(t)$  进行小波包分解后,在第*i*分解层可以得到  $2^i$  个子频带,则  $s(t)$  可以表示为

$$s(t) = \sum_{j=0}^{2^i-1} f_{i,j}(t_j) = f_{i,0}(t_0) + f_{i,1}(t_1) + \dots + f_{i,2^i-1}(t_{2^i-1}) \quad j = 0, 1, 2, \dots, 2^i - 1 \quad (1)$$

式中： $f_{i,j}(t_j)$ 为爆破振动信号小波包分解到第*i*层分解节点(*i,j*)上的重构信号。若  $s(t)$  的最低频率为 0,最高频率为  $\omega_m$ ,则在第*i*分解层每个频带的频率宽度分别为  $\omega_m/2^i$ 。

根据信号谱分析中的巴什瓦(Parseval)定理<sup>[12]</sup>,由式(1)可得爆破振动信号  $s(t)$  小波包分析的能量谱为

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

式中： $x_{j,k}(j=0,1,2,\dots,2^i-1;k=1,2,\dots,m;m$ 为爆破振动信号离散采样点数)为重构信号  $f_{i,j}(t_j)$  的离散点幅值。 $E_{i,j}(t_j)$ 即为爆破振动信号小波包分解到第*i*层第*j*节点的频带能量。

由式(2)可得爆破振动信号  $s(t)$  的总能量为

$$E = \sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j}(t_j) \quad (3)$$

爆破振动信号  $s(t)$  小波包分解到第*i*层时,各频带的能量占信号总能量的比例为

$$P_{i,j} = \frac{E_{i,j}(t_j)}{E} \quad (4)$$

## 3 爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响

### 3.1 爆破振动现场测试

为了研究不同爆炸参量(最大段药量、爆心距、微差雷管段数)对爆破振动信号能量分布的影响,需排除因爆破场地条件不同对测试信号的影响,特地选取了白银有色金属公司厂坝铅锌矿的主斜坡道1 082 m水平的掘进运输巷道为爆破振动试验的测试场地,测试时该段运输巷道已经直线水平掘进了超过120 m,巷道围岩均由黑云母石英片岩、方解石云母片岩和大理岩等组成,围岩硬度系数为8~10、岩性完全相同,选择该段巷道研究爆破地震波的传播规律,有利于排除测试场地地质状况差异的影响。巷道掘进的爆源采用微差起爆方式,选择垂直质点振动速度作为监测的物理量,测点拾振器均布置在基岩上。研究爆心距对爆破振动信号能量分布的影响时,必须排除最大段药量和微差雷管段数对爆破地震效应的影响,测试同一炮次不同爆心距处的爆破地震波信号;研究最大段药量和微差雷管段数对爆破振动信号能量分布的影响时,必须排除爆心距对爆破地震效应的影响,需测试爆心距相同、最大段药量和微差雷管段数都不同的爆破地震波信号。测试点的爆炸参量和监测参量如表2所示,表中*r*为爆心距,*Q*为最大段药量,*v<sub>p</sub>*为粒子速度,*f<sub>k</sub>*为主振频率。相应的爆破振动速度时程曲线如图1所示。

### 3.2 爆破振动信号小波包能量谱分析

采用小波包方法对爆破振动信号进行分析时,小波基的选择是一个十分重要的问题,因为不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果<sup>[13]</sup>。研究表明<sup>[7]</sup>,db7和sym8小波具有较好的紧支撑性、光滑性以及近似对称性,是分析爆破振动非平稳信号的最佳小波基。因此,在Matlab7.0的Wavelet Toolbox中用sym8将图1所示的爆破振动信号分别进行深度为8层的小波包分析。根据式(1)~(4)使用Matlab语言编制计算程序,可获得上述信号的小波包能量谱分布

图,见图2(由于爆破振动信号的能量主要集中于0~200 Hz间,图中横轴只取到200 Hz)。为便于比较,将各信号不同频带能量占该信号总能量的百分比统计于表3。

表2 爆破振动测试点的爆炸参量和监测参量

Table 2 Explosion parameters and monitoring parameters at measuring points for blasting vibration

测点编号	$r/m$	$Q/kg$	雷管段数(毫秒延期)	$v_p/(cm/s)$	$f_k/Hz$	$t/s$
1	30	30	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	4.252	93.75	9.505
2	50	30	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	1.807	83.98	9.318
3	75	30	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	1.189	62.50	9.084
4	105	30	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16	0.603	21.48	8.802
5	60	13	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20	0.872	80.08	10.321
6	60	32	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	1.424	63.49	7.736
7	60	46	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	1.716	47.85	5.919
8	60	60	2,3,4,5,6,7	2.295	30.27	5.673

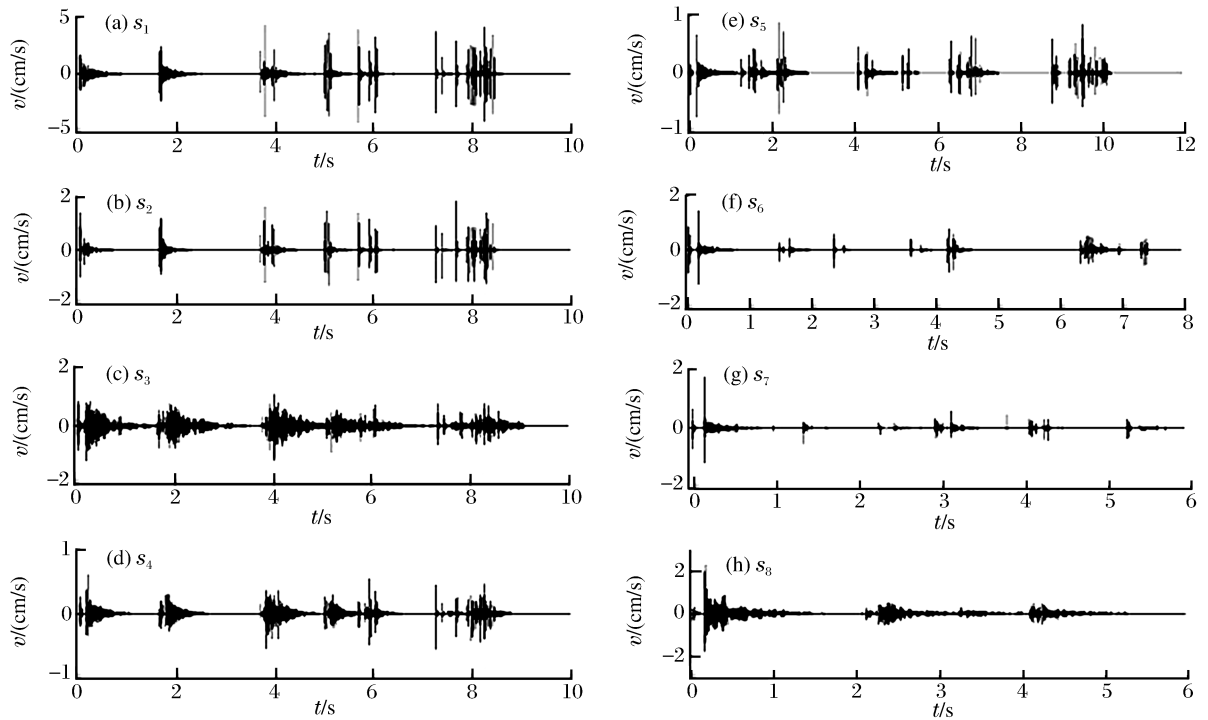


图1 实测爆破振动速度时程曲线

Fig. 1 The velocity histories of blasting vibration monitoring

### 3.3 爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响

(1) 从图2和表3中可以看出,8个信号在0~199.219 Hz间的能量分别占其总能量的95.010%、96.660%、95.941%、95.545%、95.170%、95.872%、96.718%和95.591%,表明微差爆破振动信号能量在频域上虽然分布比较广泛,但绝大部分能量集中于0~200 Hz之间。

(2) 根据表3的信号小波包频带能量分布,将各信号的主振频带占该信号总能量百分比统计于表4可知,爆破振动信号的优势能量主要分布在主振频带,且从图2中可以清楚地看到主振频带又可以分成多个分振频带,采用小波包分析技术可以获得原始信号的不同频率成分对爆破振动的作用影响。

(3) 由表3、4和图2中的 $s_1 \sim s_4$ 信号能量分布可知,当爆心距较小时,信号能量主要分布在中、高频带,且频带能量分布较宽;随着爆心距的增加,信号能量的分布越来越倾向低频带,即信号的主振频带有向低频发展的趋势。爆破地震波在传播过程中,虽然其振动的强度不断衰减,但破坏能力却有可能增大,由于周围建(构)筑物的固有频率一般都比较低,往往会出现爆源近处的结构体没有破坏,而远处的结构体反而破坏了。

表 3 爆破振动信号小波包频带能量分布

Table 3 The wavelet packet frequency band energy distribution for blasting vibration signal

频带/Hz	$E/(cm/s)^2$							
	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
0~3.906	$4.142 \times 10^{-3}$	$1.789 \times 10^{-3}$	0.264	1.815	0.129	0.579	0.195	1.272
3.906~7.813	$5.732 \times 10^{-3}$	$7.457 \times 10^{-4}$	1.091	3.092	0.521	1.722	0.416	1.118
7.813~11.719	0.024	$4.798 \times 10^{-3}$	0.553	3.114	1.035	0.980	4.052	5.614
11.719~15.625	$8.284 \times 10^{-3}$	$9.662 \times 10^{-4}$	0.093	7.938	0.720	0.706	3.089	0.789
15.625~19.531	0.053	0.024	2.180	1.278	0.341	2.550	3.121	2.305
19.531~23.438	0.029	$8.109 \times 10^{-3}$	5.473	10.807	0.488	3.793	12.637	2.363
23.438~27.344	0.012	$5.989 \times 10^{-3}$	2.348	4.185	0.774	2.556	3.309	15.641
27.344~31.250	0.048	$5.393 \times 10^{-3}$	3.298	9.609	0.123	3.306	9.526	20.671
31.250~35.156	0.330	0.249	2.066	2.065	0.841	1.627	1.667	2.045
35.156~39.063	0.212	0.098	6.909	1.600	0.927	6.128	0.612	2.067
39.063~42.969	0.159	0.380	4.083	9.291	0.430	1.195	11.799	1.267
42.969~46.875	0.257	0.107	8.065	3.404	1.016	4.444	2.376	3.971
46.875~50.781	0.101	2.465	2.944	8.455	1.513	0.986	13.676	3.635
50.781~54.688	0.149	0.405	7.736	6.380	3.392	2.497	5.064	6.623
54.688~58.594	0.147	0.918	6.632	0.324	2.226	9.726	6.353	5.393
58.594~62.500	0.178	0.647	8.998	5.474	1.852	8.038	6.400	8.374
62.500~66.406	0.767	4.141	4.197	0.053	1.093	10.464	0.061	0.543
66.406~70.313	0.244	1.577	1.995	0.448	1.270	6.265	0.391	0.496
70.313~74.219	6.539	4.229	7.248	0.415	4.528	7.103	0.246	0.282
74.219~78.125	0.860	0.866	3.219	0.515	2.891	7.983	0.236	0.531
78.125~82.031	7.397	20.705	2.353	0.658	12.618	3.230	0.926	0.275
82.031~85.938	13.594	14.519	2.220	0.825	2.483	0.258	0.532	0.408
85.938~89.844	11.476	18.177	2.054	0.979	2.803	0.504	0.705	0.072
89.844~93.750	11.316	15.559	1.143	0.273	1.835	0.174	0.681	0.430
93.750~97.656	0.970	0.253	0.429	2.792	9.396	0.527	0.668	0.425
97.656~101.563	1.965	0.165	0.265	0.758	2.322	0.342	1.280	0.683
101.563~105.469	3.420	0.682	0.828	1.335	4.183	0.304	0.385	2.110
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
199.219~1 000	4.990	3.340	4.059	4.456	4.830	4.128	3.283	4.409

(4) 由表 3、4 和图 2 中的  $s_5 \sim s_8$  信号能量分布可知，当最大段药量较小时，信号能量主要分布在中、高频带，且能量分布较宽；随着最大段药量的增加，信号能量的分布越来越倾向低频带，即信号的主振频带有向低频发展的趋势。在爆破工程中，由于建(构)筑物的固有频率一般都比较低，这显然不利于周围建(构)筑物的安全。

(5) 由表 3、4 和图 2 中的  $s_5 \sim s_8$  信号能量分布可知，微差雷管段数较少时，信号能量主要分布在中、低频带，且能量分布较集中；随着雷管段数的增加，信号能量的分布越来越倾向高频带，即信号的主振频带有向高频发展的趋势。在爆破工程中，由于工程结构体的固有频率往往比较低，有利于建(构)筑物的安全。以上表明，雷管段数的增加确实能起到减震效果，在爆破工程中应尽量实施多段微差爆破。

表 4 爆破振动信号主振频带的能量百分比

Table 4 The energy ratio of dominant vibration frequency band for blasting vibration signal

信号	$f_k/Hz$	主振频带/Hz	$P/\%$
$s_1$	93.75	70.313~125	81.911
$s_2$	83.98	46.875~93.75	84.203
$s_3$	62.5	15.625~93.75	85.160
$s_4$	21.48	0~62.50	78.828
$s_5$	80.08	42.969~125	78.717
$s_6$	63.49	15.625~82.031	81.889
$s_7$	47.85	7.813~62.5	83.681
$s_8$	30.27	0~62.5	83.150

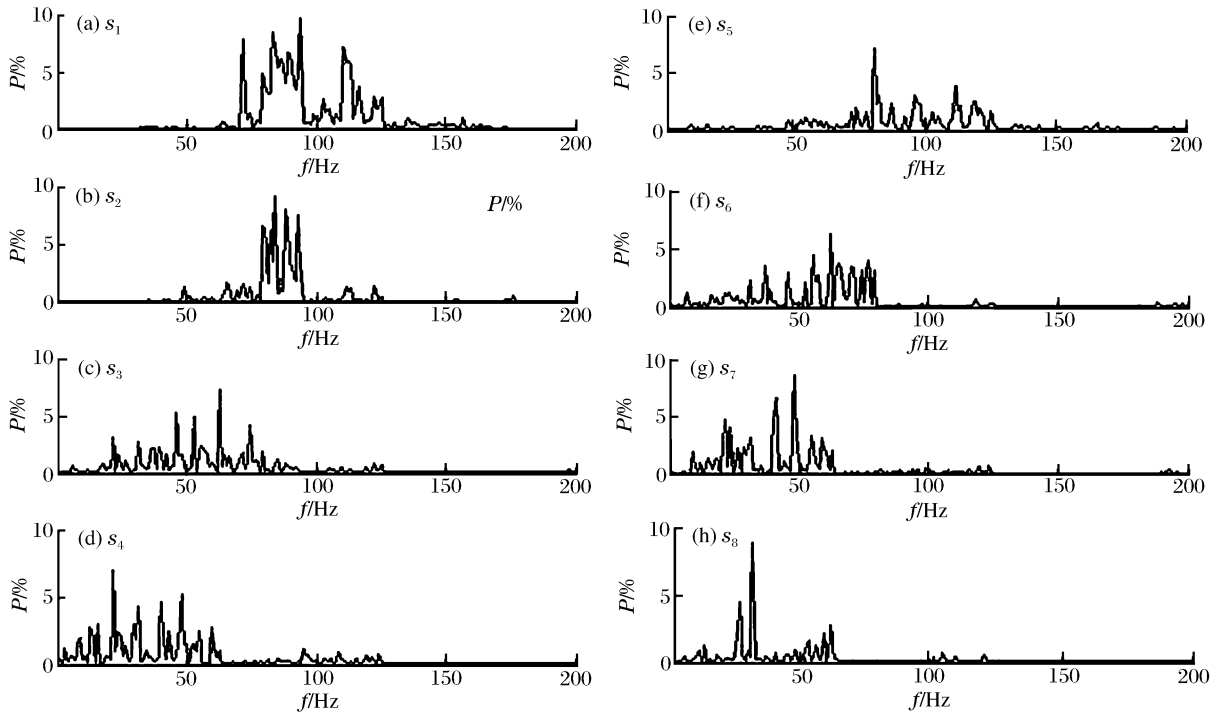


图2 爆破振动信号小波包能量谱分布

Fig. 2 The wavelet packet energy spectrum distribution for blasting vibration signal

## 4 结论

基于爆破振动信号小波包能量谱分析了不同爆炸参量(爆心距、最大段药量和微差雷管段数)对爆破振动信号能量分布的影响,得出主要结论如下:

(1) 对于同一炮次不同爆心距处的爆破地震波信号,当爆心距较小时,信号能量主要分布在中、高频带,且频带能量分布较宽;随着爆心距的增加,信号能量的分布越来越倾向低频带,即信号的主振频带有向低频发展的趋势;

(2) 对于同一测试地点的相同爆心距、不同最大段药量的爆破地震波信号,当最大段药量较小时,信号能量主要分布在中、高频带,且能量分布较宽;随着最大段药量的增加,信号能量的分布越来越倾向低频带,即信号的主振频带有向低频发展的趋势;

(3) 对于同一测试地点的相同爆心距、不同微差雷管段数的爆破地震波信号,微差雷管段数较少时,信号能量主要分布在中、低频带,且能量分布较集中;随着雷管段数的增加,信号能量的分布越来越倾向高频带,即信号的主振频带有向高频发展的趋势。

## 参考文献:

- [1] 林大超,施惠基,白春华,等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):31-35.  
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):31-35.
- [2] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [3] 何军,于亚伦,梁文基. 爆破振动信号的小波分析[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):47-50.  
HE Jun, YU Ya-lun, LIANG Wen-ji. Wavelet analysis for blasting seismic signals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(1):47-50.
- [4] 凌同华,李夕兵. 地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.  
LIN Tong-hua, LI Xi-bing. The feature of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.
- [5] 中国生,徐国元,赵建平. 基于小波变换的爆破地震信号阈值去噪的应用研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(9):1055-

1059.

ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, ZHAO Jian-ping. Study and application of threshold de-noising in seismic signals of blasting based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1055-1059.

[6] 中国生, 徐国元, 熊正明. 基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 222-227.

ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, XIONG Zheng-ming. Application research of the energy analysis method for blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 222-227.

[7] 中国生. 基于小波变换爆破振动的应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

[8] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. IEEE Transactions Pattern Anal Machine Intell, 1989, 11(7): 674-693.

[9] Daubechies I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961-1005.

[10] Charles K. An introduction to wavelets[M]. New York: Academic Press, 1992.

[11] 邹云屏, 李潇. 信号变换与处理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.

[12] 周德廉, 邵国友. 现代测试技术与信号分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.

[13] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

## Influence of explosion parameters on energy distribution of blasting vibration signal based on wavelet packet energy spectrum

ZHONG Guo-sheng<sup>1,2\*</sup>, AO Li-ping<sup>1</sup>, ZHAO Kui<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. School of Civil & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** According to the characteristics of short-time, non-stationary random signals, the wavelet packet energy spectra for the measured blasting vibration signals were investigated by using the wavelet packet analysis. These blasting vibration signals were produced in case of the different explosion parameters such as the distance of the measuring point from the blasting center, the maximum sectional explosive mass and the millisecond-delay detonator number. The energy distributions at the different frequency bands for the blasting vibration signals were obtained. The energy distribution characteristics of the blasting vibration signals measured under the different explosion parameters were analyzed. Considering the blasting vibration signal energy, the attenuation laws of the blasting seismic waves corresponding to the different explosion parameters were explored. Our results indicate that the wavelet packet analysis method is effective to study blasting seismic effects.

**Key words:** mechanics of explosion; blasting vibration; wavelet packet energy spectrum; explosion parameter; energy distribution

\* Corresponding author; ZHONG Guo-sheng

E-mail address: zgs1001@163.com

Telephone: 86-20-87114038