DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0077-07

隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析*

费鸿禄,曾翔宇,杨智广
(辽宁工程技术大学爆破技术研究院,辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于现场实测隧道掘进爆破振动信号数据,采用小波包分析技术对振动信号进行小波包能量谱分析,得到爆破振动信号能量在各频带上的分布。通过比较各点分析结果可以发现隧道掘进爆破地震波能量主要集中在切向与径向。在沿隧道掘进方向随着与掌子面之间距离的增大地震波的主频下降,能量主要集中频带也越来越窄,并且向低频带发展;而在垂向上地震波主频随着埋深的减小而减小,同时地震波的能量主要集中频带也越来越窄并且向低频带发展。最后从能量的角度探讨隧道掘进爆破地震波沿各个方向的衰减规律。

关键词: 爆炸力学;小波包分析;能量分布;地震波;爆破振动
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

隧道(公路、铁路、地铁、水工隧道等)掘进目前仍以爆破手段为主,尤其是浅埋隧道爆破施工产生的地震波对地表以及地表附近的建(构)筑物产生的危害已经成为施工过程中亟待解决的问题[1-2]。由于隧道掘进爆破振动波的主频一般较低,与隧道周边建筑和设施相近,有可能引起共振进而对周边建筑产生不良影响。爆破振动信号分析是研究爆破振动危害的基础,也是控制爆破振动危害的前提[3]。

近年来,小波变换以其良好的高分辨率和自适应性以及在时域和频域都具有表征信号局部特性的能力,被广泛应用于对爆破振动信号的分析和处理中[4],但是目前利用小波变换处理爆破振动信号的技术还处于起步阶段[5-7]。凌同华等[8-9]利用小波理论确定了微差爆破的实际延迟时间并研究不同爆破参数对爆破主频带和能量分布的影响;娄建武等[10]研究了小波分析在结构爆破振动响应能量分析法中的应用;中国生等[11]基于小波变换爆破地震信号能量分析法的应用进行了研究。但由于小波变换只能对信号的频段进行指数等间距划分,所以在高频段其频率分辨率较差[12]。小波包分析法对没有细分的高频部分进行进一步分解,能够根据被分析信号的特征自适应地选择相应频段,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,具有更广泛的应用价值[13-14]。

本文中基于现场实测隧道掘进爆破振动数据,采用小波包分解和重构的分析方法,从能量的角度探讨沿隧道掘进方向及波的垂向(x)、切向(y)、径向(z)地震波的传播、衰减规律以及能量在不同频带下的分布情况。

1 小波包能量谱分析

1.1 小波包分析法

小波分析原理是把信号分解成低频和高频 2 个部分,并且在下一轮分解中,仅对分解出的低频部分进行再次分解,以此类推至分解完成。从小波分析法中可以看出,在小波分解中低频波的分辨率要高于高频波,导致在波的高频部分分辨率较低。然而在小波包分解过程中,每一轮分解不仅依次对波的低频部分进行分解,对高频部分同样进行分解。由此可见小波包分析法提高了波在高频段的分辨率,比小波分析更加精细[15-17]。

爆破振动数据采集采用 TC-4850 爆破测振仪,信号的记录时长为 2 s,采集频率为 2 kHz,则其奈奎斯特频率为 1 kHz。采用小波包分解法可将数据分解 8 层,经第 1 层分解后被分成低频 S_{A0}(0,500 Hz)

* **收稿日期**: 2015-04-30; **修回日期**: 2015-08-25
第一作者: 费鸿禄(1963—),男,博士,教授,feihonglu@163.com。

和高频 S_{A1}(500 Hz,1 000 Hz)等 2 个部分;第 2 层小波分解则是对第 1 层分解后的 S_{A0} 段和 S_{A1} 段进行进一步分解,对 S_{A0} 分解得到低频段 S_{B0}(0,250 Hz)和高频段 S_{B1}(250 Hz,500 Hz),对 S_{A1} 分解得到低频段 S_{B2}(500 Hz,750 Hz)和高频段 S_{B3}(750 Hz,1 000 Hz);以此类推,当分解到第 8 层即可得到 S_{H0}(0,3.906 Hz)、S_{H1}(3.906 Hz,7.813 Hz)、S_{H2}(7.813 Hz,11.718 Hz)直至 S_{H255}(999.094 Hz,1 000 Hz)。

1.2 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,第 i 层可以得到 2^i 个子频带,则 $S(t)$可以表示为[18-19]:

$$S(t)=\sum_{j=0}^{2^i-1} f_{i,j}(t_j)=f_{i,0}(t_0)+f_{i,1}(t_1)+\cdots+f_{i,2^i-1}(t_{2^i-1}) \qquad j=0,1,2,\cdots,2^i-1 \tag{1}$$

式中 $f_{i,j}(t_j)$为爆破振动信号运用小波包分解到第 i 层节点(i,j)上的重构信号。若信号 $S(t)$的频率宽度为 ω,则在第 i 层每个子频带的频率宽度为 $\omega/2^i$。

若 $E_{i,j}(t_j)$为 $f_{i,j}(t_j)$所对应的能量,则有:

$$E_{i,j}(t_j)=\int_{-\infty}^{+\infty}|f_{i,j}(t_j)|^2\mathrm{d}t=\sum_{k=1}^{m}|x_{j,k}|^2 \tag{2}$$

式中:$x_{j,k}$($j=0,1,2,\cdots,2^i-1$; $k=1,2,\cdots,m$)为 $f_{i,j}(t_j)$离散点的幅值,m 为爆破振动信号采集点数。

由式(2)可得爆破振动信号 $S(t)$的总能量 E 为:

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

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

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

2 地震波在地表传播衰减性质

2.1 地震波信号现场监测

鹤大高速小沟岭隧道位于吉林省敦化市,该段围岩主要为碎石,强风化杏仁状玄武岩,中风化杏仁状玄武岩,岩体饱和抗压强度 R_c=6.2 MPa,岩石完整系数 K_v=0.11,围岩级别为Ⅴ级。该段岩性完全相同,未发现有断层、沟坎的现象,有利于排除因地质因素而对实验结果产生的差异。监测共进行 5 组,每组取点情况如图 1(a),每组监测现场共设置 5 个点(A~E),监测点的布置如图 1(b),其中 B 点位于掌子面正上方,相邻两点水平间隔为 10 m。现场共进行 5 次监测,各次监测的爆破参量如表 1 所示。表 1 中 h 为掌子面处地面高程,m;H 为掌子面处设计高程,m;Q 为总炸药量,kg;q 为单段最大药量,kg;n 表示雷管段数。

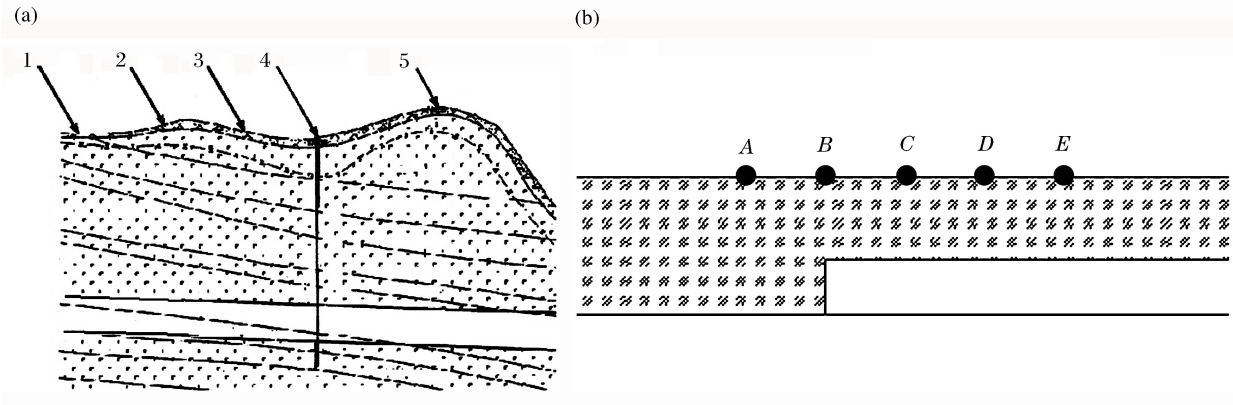


图 1 监测点的布置

Fig. 1 Layout of survey points

由于第 2 组监测地势较为平缓(此时掌子面正上方坡率约为 0.1)，可以排除由于高差而产生的影响，所以抽取第 2 组监测所得数据进行小波包分析，通过对比探讨地震波沿隧道纵向传播衰减规律。此外提取第 4 组中 B 点数据做同样分析，通过与第 2 组中 B 点数据进行比较，探讨地震波沿隧道垂向传播衰减规律，为与第 2 组中的 B 点区分开，第 4 组中的 B 点在下文中称为 F 点。

表 1 现场测试相关参数

Table 1 Site test related parameters

监测编号	h/m	H/m	Q/kg	q/kg	n
1	395.88	371.330	104.0	22.3	1,3,5,7,9,11
2	425.53	373.653	108.0	23.1	1,3,5,7,9,11,13
3	422.58	374.117	115.5	24.8	1,3,5,7,9,11,13
4	386.87	371.796	124.0	30.9	1,3,5,7,9,11,13
5	428.87	373.188	116.0	24.9	1,3,5,7,11,13

2.2 爆破振动信号的小波包能量谱分析

在利用小波包分析法对爆破振动进行分析的工程中，选择恰当的小波基至关重要。目前 db8 以其良好的紧支撑性、光滑性以及近似对称性，已成功地应用于分析爆破振动信号中[20]。本文中采用 db8 对爆破振动信号进行 8 层小波包分解。表 2 所示为各监测点爆破振动信号通过小波包能量谱分析所得数据，图 2 为经过小波包分析法处理后所得的爆破振动信号能量谱分布图。

表 2 爆破振动信号小波包分析结果

Table 2 Wavelet packet analysis results of blasting vibration signals

监测点	v/(cm·s^{-1})	f/Hz	ω/Hz	E/(cm^2·s^{-2})	P/%
A(x 方向)	1.07	71.4	23.438～144.532	70.217	60.337
A(y 方向)	1.02	43.5	0～121.094	92.451	69.230
A(z 方向)	0.89	47.0	7.813～105.469	93.696	61.968
B(x 方向)	1.64	56.9	0～117.188	112.989	61.884
B(y 方向)	1.29	80.0	7.813～121.094	120.756	63.740
B(z 方向)	1.30	88.3	7.813～125.000	117.492	67.396
C(x 方向)	1.28	83.3	0～121.094	60.818	79.265
C(y 方向)	1.14	67.6	0～58.594	71.264	68.374
C(z 方向)	1.30	66.7	15.625～121.094	74.969	70.953
D(x 方向)	0.55	65.5	15.625～121.094	24.121	81.937
D(y 方向)	0.66	56.7	0～125.000	41.828	88.419
D(z 方向)	0.39	57.6	7.813～125.000	40.958	71.735
E(x 方向)	0.49	60.0	0～121.094	32.180	89.206
E(y 方向)	0.40	56.3	3.906～121.094	28.431	90.759
E(z 方向)	0.42	58.0	15.625～121.094	31.370	86.939
F(x 方向)	1.72	40.6	7.813～117.188	142.572	72.473
F(y 方向)	1.41	46.4	3.906～125.000	137.659	81.569
F(z 方向)	1.37	52.7	15.625～121.094	145.762	69.132

2.3 地震波在地表传播衰减性质

从表 2 中可以看出，15 个信号的主频带都集中于 0～200 Hz，主频带能量在总能量中的比例普遍不低于 60%，并且从图 4 可知虽然爆破振动信号的能量在频域上的分布较广，但绝大多数能量主要集中在 0～200 Hz 之间。结合表 2 及图 3 中掌子面同侧监测点 B～E 各数据可以看出，随着监测点与掌子面之间距离的增大，爆破振动信号的主频会逐渐降低，并且其衰减速度随着距离的增大而逐渐减缓。

第 2 组的 5 个监测点中，B 点位于掌子面正上方，设其水平坐标为 0，以隧道掘进方向为正向，5 个点的水平坐标依次为 10、0、－10、－20、－30。各点处总能量和主频随距离的变化关系如图 3～4 所示。

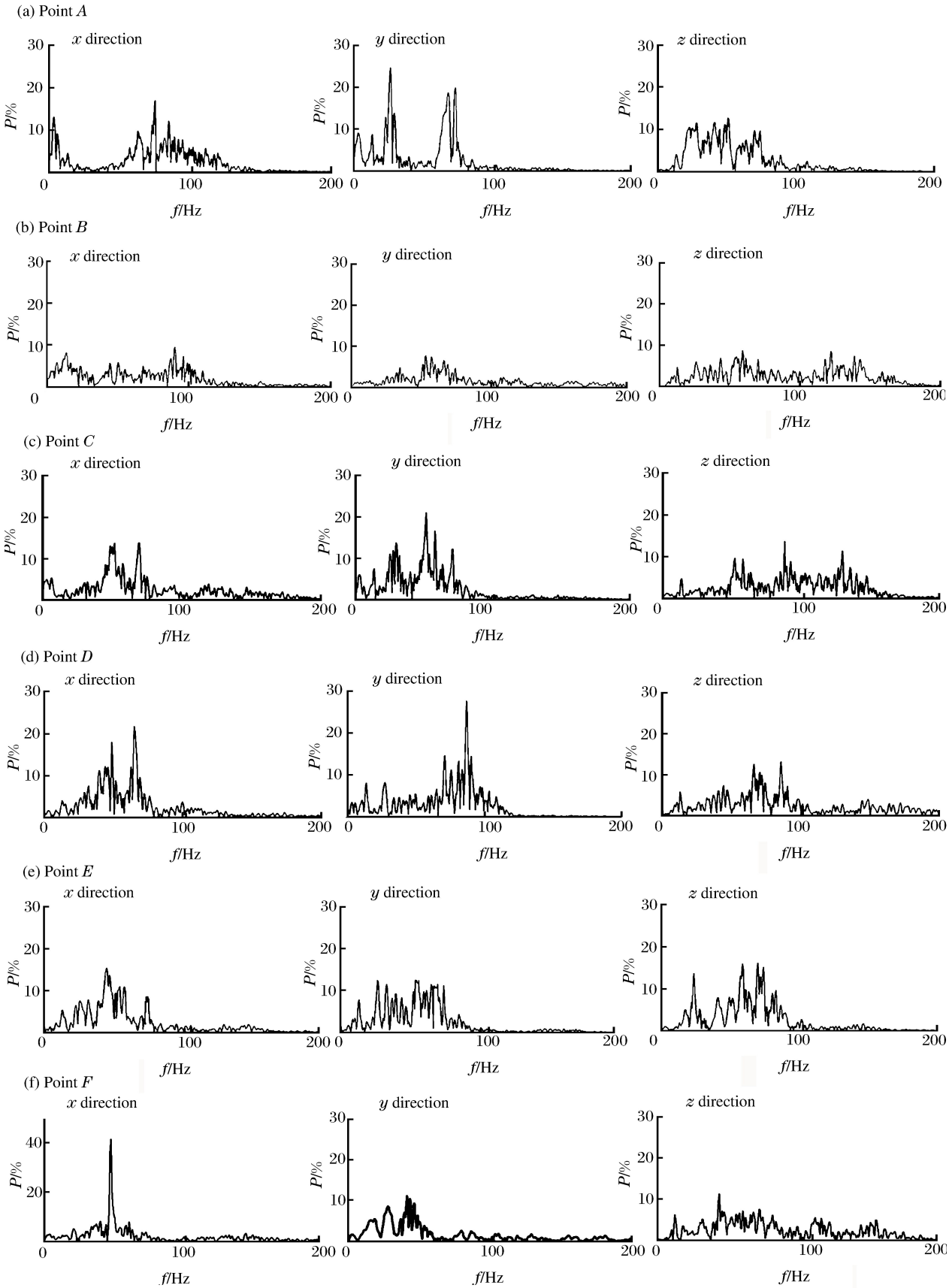


图 2 各测点爆破振动信号能量谱分布

Fig. 2 Energy distribution of blasting vibration signals at measuring points

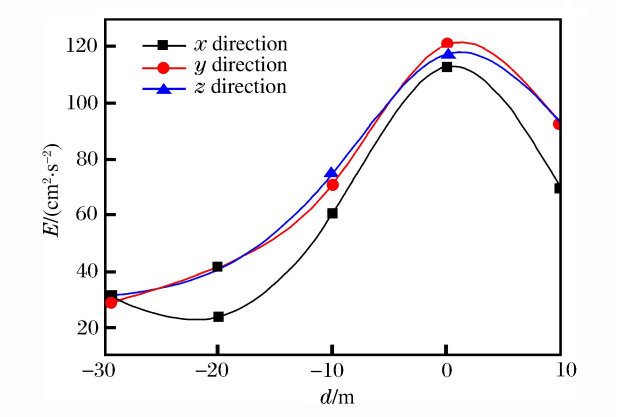


图 3　各监测点总能量与距离的关系

Fig. 3　Relationship between energy and distance at measuring points

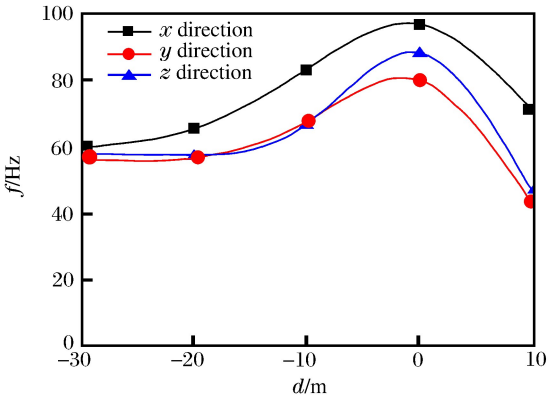


图 4　各监测点主频与距离关系

Fig. 4　Relationship between main frequency and distance at measuring points

比较图 4 中近掌子面点 B 以及距离掌子面最远点 E 的图像可以看出随着距离的增大，地震波的能量逐渐集中于低频带，由于建(构)筑物的固有频率普遍较低，所以当地震波的频率接近建(构)筑物的固有频率便产生危害。

比较表 2、图 2 及图 3 中掌子面正上方的 B 点及掌子面前后对应点 A 与 C 振动波的各参数可以看出，虽然在掌子面前后对应位置爆破振动信号的主频带并没有太大差别，但是在隧道未开挖一侧信号的 3 个分量主频均小于已开挖一侧，而总能量均大于已开挖一侧。由此可见在爆破近区隧道未开挖一侧地表建筑物安全性比已开挖一侧差。

通过表 2、图 2 及图 3 中 5 个监测点的数据不难看出，在同一个监测点波的 3 个分量中，垂向(x 方向)的主频均大于切向(y 方向)与径向(z 方向)的主频，而波在垂向中所含的能量均小于切向与径向波所含的能量。由此可见在爆破振动波的传播过程中波在切向与径向的频率低、衰减慢、携带较多能量，是造成振动破坏的主要原因。

B 点到 F 点，埋深从 51.877 m 下降到 15.074 m，在 2 次炸药用量相差不大的前提下，爆破地震波的主频从 50～90 Hz 下降到 40～55 Hz，并且随着埋深的下降，爆破地震波的主振频带逐渐变窄，且能量有向低频集中的趋势。

3　结　论

基于小波包能量谱分析技术对爆破地震波进行技术分析，得到的地震波能量在传播过程中一般衰减规律结论如下：

(1)爆破振动信号传播到地表的能量在频谱上分布较窄，主要分布在 0～200 Hz 之间，其中切向与径向相对于垂向主频较低，能量较高，对地表建(构)筑物影响相对较大。

(2)地震波总能量在爆破近区衰减较快、远区衰减较慢；且随着距离的增加高频波被过滤，低频波所含能量比例明显上升，这对于处在爆破远区、固有频度较低的建筑及设施来说是不利的。

(3)地震波在隧道未开挖一侧主频小于已开挖一侧，地震波所含能量大于已开挖一侧，说明在掌子面对应位置上，隧道未开挖一侧的建筑、设施相对于已开挖一侧受破坏可能性更大。

(4)当隧道埋深较浅时，地震波的主频也会相对较小，而且振动信号的主振频带越来越窄，能量主要集中在低频带。由此可见地震波在垂向传播、衰减规律与沿隧道掘进方向有所不同。

参考文献：

[1]　陈士海，魏海霞，张安康，等. 基于小波包技术的爆破地震效应计算模型及安全判据研究[J]. 爆炸与冲击，2010，30(4)：377-382.

Chen Shihai, Wei Haixia, Zhang Ankang, et al. Computational model and safety criterion of blasting vibration effect based on wavelet packet techniques[J]. Explosion and shock waves, 2010,30(4):377-382.

[2] 管晓明,傅洪贤,王梦恕.隧道近距下穿山坡楼房爆破振动测试研究[J].岩石力学,2014,35(7):1995-2003.
Guan Xiaoming, Fu Hongxian, Wang Mengshu. Blasting vibration characteristics monitoring of tunnel under-passing hillside buildings in short-distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(7):1995-2003.

[3] 闫鸿浩,刘智远,李晓杰.烟囱爆破拆除及其振动测试分析[J].爆破器材,2013,42(3):21-24.
Yan Honghao, Liu Zhiyuan, Li Xiaojie. Chimney blasting demolition and analysis of vibration measurement[J]. Explosive Materials, 2013,42(3):21-24.

[4] 路亮,龙源,谢全民,等.爆破振动信号的提升小波包分解及能量分布特征[J].爆炸与冲击,2013,33(2):140-147.
Lu Liang, Long Yuan, Xie Quanmin, et al. Decomposition and energy distribution of blasting vibration signal based on second generation wavelet packet[J]. Explosion and shock waves, 2013,33(2):140-147.

[5] 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 Yalun, Liang Wenji. Wavelet analysis for blasting seismic signals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(1):47-50.

[6] 黄文华,徐全军,沈蔚.小波变换在判断爆破地震危害中的应用[J].工程爆破,2001,7(1):24-27.
Huang Wenhua, Xu Quanjun, Shen Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. Engineering Blasting, 2001,7(1):24-27.

[7] 严鹏,卢文波,罗忆,等.基于小波变换时-能密度分析的爆破开挖过程中地应力动态卸载振动到达时刻识别[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2836-2845.
Yan Peng, Lu Wenbo, Luo Yi, et al. Identification of arriving time of vibration induced by geostress dynamic unloading during blasting-excavation employing method of time-energy analysis based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(suppl 1):2836-22844.

[8] 凌同华,李夕兵.基于小波变换的时-能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13):2266-2270.
Ling Tonghua, Li Xibing. Time-energy analysis based on wavelet transform for identifying real delay time in millisecond blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(13):2260-2270.

[9] 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.
Ling Tonghua, Li Xibing. The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.

[10] 娄建武,龙源,徐全军.小波分析在结构爆破振动响应能量分析法中的应用[J].世界地震工程,2001,17(1):64-68.
Lou Jianwu, Long Yuan, Xu Quanjun. Study on the wavelet analysis applied in structure response to blasting vibration[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001,17(1):64-68.

[11] 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 Guosheng, Xu Guoyuan, Xiong Zhengming. 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.

[12] 付晓强,张世平,张昌锁.露天开采爆破振动信号小波包分析[J].工程爆破,2013,19(1/2):24-27.
Fu Xiaoqiang, Zhang Shiping, Zhang Changsuo. Analysis of open-pit mining blasting vibration signals using wavelet packet method[J]. Engineering Blasting, 2013,19(1/2):24-27.

[13] Zhao M S, Zhang J H, Yi C P. Time-frequency characteristics of blasting vibration signals measured in milliseconds[J]. Mining Science and technology, 2011,21(3):349-352.

[14] Johansson D, Ouchterlony F. Shock wave interactions in rock blasting: The use of short delays to improve fragmentation in model-scale[J]. Rock mechanics and Rock Engineering, 2013:46(1):1-18.

[15] 凌同华,李夕兵.多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1117-1122.
Ling Tonghua, Li Xibing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(7):1117-1122.

[16] 王利，王海亮. 隧道爆破不同类型最大振速对建筑物的影响研究[J]. 爆破，2012，29(4)：6-9.
Wang Li，Wang Hailiang. Influence of different direction vibration peak velocity of tunnel blasting on building[J]. Blasting，2012，29(4)：6-9.

[17] 谢全民，龙源，钟明寿，等. 小波与分形组合分析技术在爆破振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击，2011，30(12)：120-124.
Xie Quanmin，Long Yuan，Zhong Mingshou，et al. Blasting vibration signal analysis with wavelet and fractal portfolio analysis technique[J]. Journal of Vibration and Shock，2011，30(12)：120-124.

[18] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[19] 中国生，敖丽萍，赵奎. 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[J]. 爆炸与冲击，2009，29(3)：300-305.
Zhong Guosheng，Ao Liping，Zhao Kui. Influence of explosion parameters on energy distribution of blasting vibration signal based on wavelet packet energy spectrum[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(3)：300-305.

[20] 闫鸿浩，李晓杰，曲艳东，等. 爆破振动速度测试精细分析[J]. 岩土力学，2007，28(10)：2091-2094.
Yan Honghao，Li Xiaojie，Qu Yandong，et al. Fine analysis of blasting vibration velocity testing[J]. Rock and Soil Mechanics，2007，28(10)：2091-2094.

Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's surface based on wavelet packet analysis

Fei Honglu，Zeng Xiangyu，Yang zhiguang
(*Institute of Blasting Technique，Liaoning Technical University，Fuxin* 123000，*Liaoning*，*China*)

Abstract：In this work，based on the blasting vibration live data collected，the energy distributions at different frequency bands for the blasting vibration signals were obtained by the wavelet packet analysis technology. By comparing the results of each point analysis it was found that the tunnel excavation blasting seismic wave energy mainly concentrated in the tangential and radial directions；along the direction of the tunnelling，with the increase of the distance between the tunnel faces，the main frequency of the seismic wave decreased and the energy concentration frequency band became narrower and developed to the low frequency band；however，along the vertical direction of the tunnel，the main frequency decreases with the decrease of the depth and，at the same time，the wave energy concentration frequency band became narrower and developed to the low frequency band. The results show that wavelet packet analysis is an effective approach to estimating the structure safety under blasting vibration conditions.

Keywords：mechanics of explosion；wavelet packet analysis；energy distribution；blasting seismic；blasting vibration

（责任编辑　王易难）