DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0907-08

# 自由面对爆破振动信号能量分布特征的影响*

吴从师[1],徐荣文[1,2],张庆彬[1]
(1.长沙理工大学土木与建筑学院,湖南 长沙 410114;
2.甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

**摘要**:基于爆破振动实测数据,通过小波分析方法,得到不同数量自由面爆破振动信号的总能量、各频带的峰值质点振动速度(PPV)及各频带能量,进而对不同数量自由面爆破振动信号的能量分布特性进行研究。结果表明:开(掏)槽爆破,由于受单一自由面限制,大部分炸药爆炸的能量都将作为地震能量消耗掉;自由面越多,爆破振动信号总能量越少;自由面的数量可影响各频带振动分量分布,随自由面数量的增加,爆破振动能量更趋向高频分布,中低频能量有减少趋势,振动速度降低;同一振动信号中的高频带 PPV 虽比低频带 PPV 高,但振动持续时间短,能量衰减较快。建议在工程爆破的减振设计中,优化起爆方案,尽量利用多个自由面,这将比仅仅减少单段起爆药量更有效。

**关键词**:开(掏)槽爆破;自由面;爆破振动;小波分析;频带能量;峰值质点振动速度(PPV)
**中图分类号**:O389;TD235 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

工程爆破中自由面是爆源设计的重要参数之一,自由面的数量不仅影响爆破效果,还特别影响爆破振动效应。关于自由面状态及类型对爆破效果的影响均有研究[1-3],许多学者利用小波分析等手段研究了关于单段爆破与多段微差爆破振动信号的能量分布特征[4-16],其中除池恩安等[9]利用小波分析方法对不同自由面数量下爆破地震波的时频特性进行了研究以外,大部分学者都集中于研究最大段药量、爆心距、微差雷管段位等因素对爆破振动信号能量特征的影响,专门研究自由面数量与爆破振动效应能量分布特征的文献尚少见。研究自由面与爆破振动能量特性的关系,对如何降低爆破振动具有重要意义。

本文中结合实际工程的实测数据,利用小波分析的方法,探索不同自由面数量对爆破振动效应的影响规律,为自由面的合理设计及爆破振动安全控制提供理论基础。

## 1 不同自由面数量的爆破振动现场实测

### 1.1 爆区与振动监测概况

所监测的爆破工程位于桂竹湾采石场的西南角,爆区岩石为板岩,岩石平均抗压强度 89.8 MPa,岩石容重 2.7 t/m$^3$。

第 1 次爆破爆区在矿区最低的平台,为开槽爆破,共布置 4 排炮孔(见图 1),采用秒差电雷管分 4 段起爆,第 1~4 排孔内分别放置 1~4 段秒差雷管。最先起爆的第 1 排炮孔只有顶部 1 个自由面,而后顺序起爆的第 2、3、4 排炮孔才逐渐有较充分的第 2 个侧向自由面。炮孔孔距 3.3 m,排距 2.3 m,炮孔孔深 6.5 m,共计 18 个炮孔,炮孔直径均为 90 mm。采用 2 号岩石乳化炸药,总装药量为 288 kg,最大段装药量为 82 kg,炸药单耗 0.142 kg/t。

第 2 次爆破为典型的台阶爆破,共计 23 个炮孔,以 5 孔或 6 孔为一组,分 2 排布置,孔距 2.4 m,排距 3.4 m,炮孔倾角 75°,孔深 12 m,孔径和炸药品种与第 1 次爆破同,总装药量为 840 kg,最大段装药量为 240 kg,炸药单耗 0.151 kg/t。2 排炮孔分为 4 段秒差起爆,炮孔平面布置如图 2 所示,其中标注的数字为秒差雷管的段别。从左至右两排孔同时起爆,第 1 组起爆时,只有顶部和台阶坡面 2 个自由

* **收稿日期**:2016-04-27;**修回日期**:2016-08-30
**基金项目**:国家自然科学基金项目(51274049,51508038)
**第一作者**:吴从师(1953— ),男,硕士,教授,wucosh@163.com。

面，虽然不是理想的台阶起爆方式，而第 1 组起爆后，对后续起爆组而言，便产生了 1 个侧向自由面，使后续起爆组形成了 3 自由面爆破。

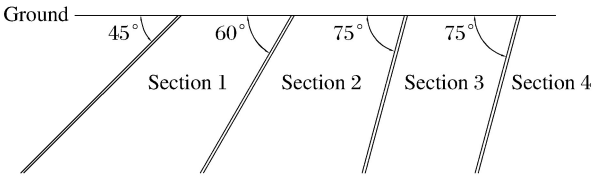


图 1 第 1 次爆破炮孔布置侧视图

Fig. 1 Profile of the first blasting holes

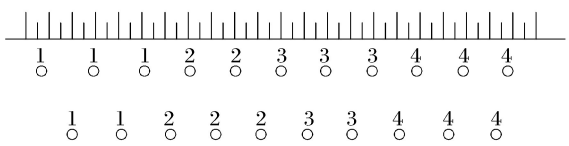


图 2 第 2 次爆破炮孔布置平面图

Fig. 2 Layout of the second blasting holes

爆破台阶坡面朝西南，在爆区的侧前方共布置 6 个测点。测点布置离爆区的水平距离为 220～650 m。采用加拿大 Instantel 公司 Minimate Pro 型测振仪监测，每个测点可测垂直向、水平纵向和水平横向的振动速度和振动频率。

### 1.2 实测爆破振动信号及 Fourier 分析

由于是秒差爆破，在爆破振动监测数据中，离爆破较近的几个测点可分辨出不同段别爆破的振动信号，而这些信号可反映出其爆破时的自由面数量和位置情况。信号监测点的爆破条件如表 1 所示。

其中，信号 1-1 和信号 1-2 分别是第 1 次爆破的第 1 段和第 2 段的爆破振动信号；信号 2-1 和信号 2-2 分别是第 2 次爆破的第 1 段和第 2 段爆破振动信号。信号 1-a、1-b、1-c 分别是第 1 次爆破 3 个不同测点的第 1 段的爆破振动信号；信号 2-a、2-b、2-c 分别是第 2 次爆破 3 个不同测点的第 1 段的爆破振动信号。

**表 1 不同数量自由面及不同测点爆破振动信号的条件**

**Table 1 Blasting vibration of different numbers of free surfaces and different test points**

| 信号 | 1-1 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 1-a | 1-b | 1-c | 2-a | 2-b | 2-c |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 爆心距/m | 248 | 248 | 239 | 239 | 248 | 445 | 612 | 239 | 434 | 603 |
| 各分段药量/kg | 82 | 69 | 200 | 200 | 82 | 82 | 82 | 200 | 200 | 200 |
| 自由面数 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |

图 3 是爆破振动信号 1-1～2-2 的垂直向速度-时程曲线。图 4 是对应的 Fourier 分析所得到的功率谱密度(PSD)图，由 PSD 图可知，爆破振动信号 1-1～2-2 的主频分别为 50.78、54.69、41.02、41.02 Hz。

## 2 爆破振动信号的小波分析

### 2.1 爆破振动信号的去噪及小波分解

小波变换可作为非平稳信号分析与处理的工具，适用于爆破振动信号特性的分析，小波变换对低频信号具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，对高频信号具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率[4]。

对实测爆破振动信号进行小波频谱分析前，选取软阈值(Rigorous SURE)对分解的高频系数进行消噪处理，以得到尽可能真实的爆破振动信号。

进行小波时频特性分析时，采用较优小波基[5] sym8 对实测爆破地震波进行 7 层分解，得到 8 个频带的小波分解系数。本次振动信号监测采样率为 2 000 Hz，根据香农(Shannon)采样定理其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1 000 Hz。由小波分解原理，得到 8 个频带的分解系数 (a7：0～7.812 5 Hz、d7：7.812 5～15.625 Hz、d6：15.625～31.25 Hz、d5：31.25～62.5 Hz、d4：62.5～125 Hz、d3：125～

250 Hz、d2：250～500 Hz、d1：500～1 000 Hz)。将各个频带的小波分解系数重构后，可得不同频带的爆破振动分量的时程曲线。

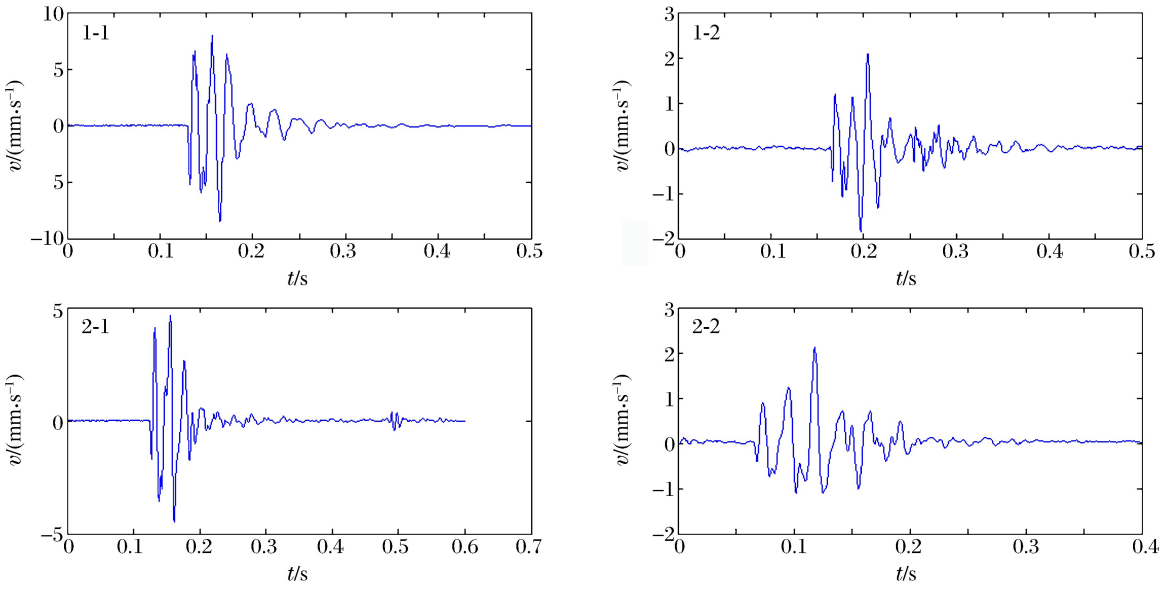


图 3 实测爆破振动信号(1-1～2-2)速度时程曲线

Fig. 3 Monitoring signal (1-1～2-2) velocity-time curves of blasting vibration

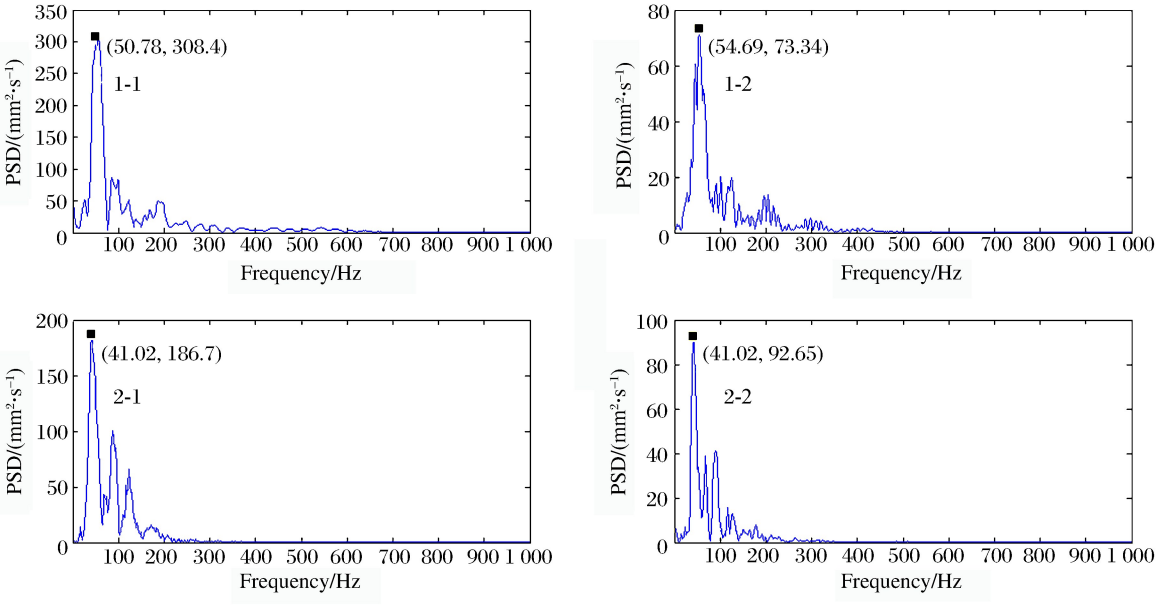


图 4 爆破振动信号 1-1～2-2 的功率谱密度图

Fig. 4 Power spectral density map of blasting vibration signal (1-1～2-2)

## 2.2 各频带的能量表征

将爆破振动信号 $s(t)$ 进行层次为 $N$ 的小波分解重构，对应信号的总能量 $E$ 为[5]：

$$E=\int_{-\infty}^{+\infty}s^2(t)\,\mathrm{d}t=\sum_{i=0}^{N}\int_{-\infty}^{+\infty}g_i^2(t)\,\mathrm{d}t+\sum_{m\neq n}\int_{-\infty}^{+\infty}g_m(t)\,g_n(t)\,\mathrm{d}t$$

由小波函数的正交性可知，上式等号右边第 2 部分为零，上式可以简化为：

$$E=\sum_{i=0}^{N}\int_{-\infty}^{+\infty}g_i^2(t)\,\mathrm{d}t=\sum_{i=0}^{N}E_i \tag{1}$$

式中：$E_i$ 为爆破振动分量的频带能量，$g$ 为爆破振动信号 $s(t)$ 分解的高频部分，下标对应分解的层次。

各频带爆破振动分量的小波频带能量为：

$$E_0 = \sum_{n=1}^{M} |a_n(n)|^2 \tag{2}$$

$$E_i = \sum_{n=1}^{M} |d_i(n)|^2 \qquad i = 1,2,\cdots,N \tag{3}$$

式中：$M$ 为采样点数，$a_N(n)$ 为爆破振动信号小波分解的逼近系数，$d_i(n)$ 为爆破振动信号小波分解的细节系数。

各频带的能量占总能量的比例为：

$$E_j = (E_i/E) \times 100\% \tag{4}$$

由式(1)～(4)可得信号经小波分解后不同频带的能量。

## 3 不同数量自由面爆破振动信号频带能量分布特征

根据式(1)～(4)使用 MATLAB 语言编制计算程序，可获得不同数量自由面爆破振动信号的总能量、小波频带能量及其分布和各频带爆破振动分量的 PPV。

### 3.1 自由面与爆破振动信号总能量的关系

总能量、小波频带能量及其分布见表 2～3。

**表 2 爆破振动信号 1-1～2-2 的能量分布**

**Table 2 Energy distribution of blasting vibration signal (1-1～2-2)**

| 频带数 | 频带/Hz | 小波频带能量/(mm·s$^{-1}$)$^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 信号 1-1 | 信号 1-2 | 信号 2-1 | 信号 2-2 |
| 1 | 0～7.812 5 | 8.346 7 | 0.042 3 | 0.063 7 | 1.001 4 |
| 2 | 7.812 5～15.625 | 0.060 8 | 0.058 8 | 0.264 8 | 0.042 0 |
| 3 | 15.625～31.25 | 15.662 8 | 0.068 0 | 32.258 6 | 1.603 5 |
| 4 | 31.25～62.5 | 1 935.475 0 | 86.858 2 | 498.663 8 | 78.855 8 |
| 5 | 62.5～125 | 254.442 1 | 15.230 0 | 156.725 0 | 27.077 5 |
| 6 | 125～250 | 78.738 2 | 5.010 9 | 23.780 6 | 3.863 1 |
| 7 | 250～500 | 21.978 5 | 1.543 2 | 0.337 7 | 0.148 6 |
| 8 | 500～100 0 | 2.879 2 | 0.025 4 | 0.018 0 | 0.009 6 |
| 总和 | | 2 317.538 | 108.836 8 | 712.112 2 | 112.601 5 |

**表 3 爆破振动信号 1-a～1-c 和 2-a～2-c 的能量分布**

**Table 3 Energy distribution of blasting vibration signal (1-a～1-c) and (2-a～2-c)**

| 频带数 | 频带/Hz | 小波频带能量/(mm·s$^{-1}$)$^2$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 信号 1-a | 信号 2-a | 信号 1-b | 信号 2-b | 信号 1-c | 信号 2-c |
| 1 | 0～7.812 5 | 8.346 7 | 0.063 7 | 0.045 8 | 0.152 6 | 0.071 8 | 0.290 1 |
| 2 | 7.812 5～15.625 | 0.060 8 | 0.264 8 | 0.331 7 | 0.182 6 | 0.063 5 | 0.339 6 |
| 3 | 15.625～31.25 | 15.662 8 | 32.258 6 | 6.387 8 | 1.975 1 | 4.746 5 | 1.235 7 |
| 4 | 31.25～62.5 | 1 935.475 0 | 498.663 8 | 5.201 0 | 1.205 0 | 33.687 2 | 14.729 6 |
| 5 | 62.5～125 | 254.442 1 | 156.725 0 | 45.034 0 | 5.292 8 | 5.801 9 | 2.264 4 |
| 6 | 125～250 | 78.738 2 | 23.780 6 | 70.436 7 | 12.685 3 | 4.169 1 | 0.593 8 |
| 7 | 250～500 | 21.978 5 | 0.337 7 | 4.837 9 | 0.202 2 | 0.351 3 | 0.030 7 |
| 8 | 500～1 000 | 2.879 2 | 0.018 0 | 0.016 4 | 0.011 3 | 0.014 1 | 0.013 3 |
| 总和 | | 2 317.538 | 712.112 2 | 132.291 3 | 21.706 9 | 48.905 4 | 19.497 |

分析表 2～3 可得到不同自由面爆破振动信号能量的如下特征：

(1)开槽爆破的振动能量比一般台阶爆破的振动能量大得多。虽然信号 1-1 的段药量只是信号 2-1 段药量的 41%，但是信号 1-1 的总能量是信号 2-1 总能量的 3.25 倍。说明无论是露天爆破还是地下掘进爆破，开(掏)槽炮孔，由于受单一自由面限制，大部分炸药爆炸的能量都将作为地震能量消耗掉。

(2)同一次爆破中，一个自由面爆破的振动能量要比两个自由面的振动能量高出很多。虽然信号 1-1 的段药量是信号 1-2 的段药量的 1.2 倍，但信号 1-1 的振动总能量是信号 1-2 总能量的约 21.3 倍。按照每千克炸药的振动能量比(即某段爆破产生的振动总能量/该段药量)来看，一个自由面爆破信号 1-1 的振动能量比是 28.26，而 2 个自由面爆破信号 1-2 的振动能量比是 1.58。这说明增加自由面比减少某段药量更有效。

(3)在段装药量相等的情况下，两个自由面爆破振动信号 2-1 的总能量约是三个自由面爆破振动信号 2-2 总能量的 6.3 倍。

### 3.2　自由面与爆破振动信号各频带能量分布的关系

由表 2～3 可得出爆破振动能量随距离衰减关系图和各频带能量分布关系图，如图 5～6 所示。

不同自由面爆破振动信号的各频带能量分布特征如下：

(1)图 5 说明爆破振动能量在近距离 2 个测点(即 a、b 测点)之间衰减较快，在远距离 2 个测点(即 b、c 测点)之间衰减较慢，这与爆破近区的振动高频能量多有关系，符合爆破振动的一般衰减规律。

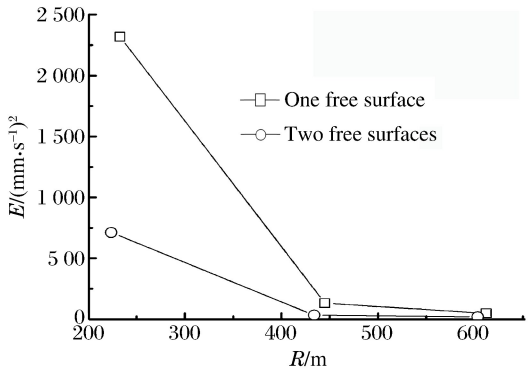


图 5　爆破振动能量随距离衰减关系图

Fig. 5　Line graph of energy decrement of blasting vibration with distance

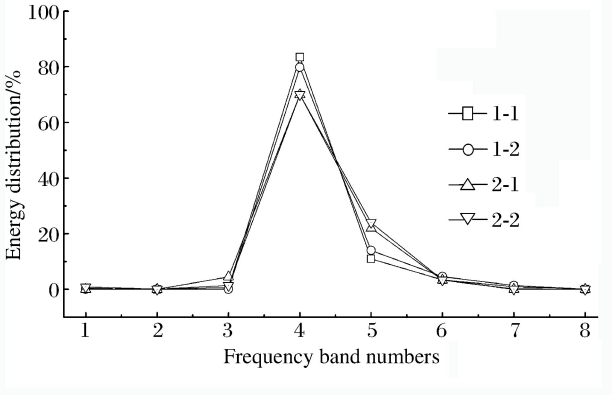


图 6　爆破振动信号 1-1～2-2 各频带能量分布折线图

Fig. 6　Line graph of each band energy of blasting vibration signal (1-1～2-2)

(2)能量主要集中在中高频(31.25～125 Hz)，低频成分占极少比例。当自由面由 1 个增加到 2 个，或由 2 个增加到 3 个，在 62.5～125 Hz 范围内能量分布百分比稍有增加，而频带 0～31.25 Hz 范围内的能量分布百分比有所降低，即说明自由面的增加能够使能量向高频移动。这种能量向高频移动有利于避开建(构)筑物的自振频率，因此，合理增加爆破自由面更有利于爆破振动安全。

### 3.3 不同自由面爆破振动信号频带能量与 PPV 分布特征

图 7 列举的是信号 1-1 利用小波分析取得的低中高频带振动分量的时程曲线，类似方法可得到不同自由面爆破振动信号的各频带振动分量的时程曲线以及频带 PPV 分布(见图 8)，有如下特征：

(1)低频带振动分量的振动持续时间较长，振动速度 PPV 较低；31.25～62.5 Hz 频带段的振动持续时间稍短，但振动速度 PPV 最高；高频带振动分量的 PPV 虽比低频段的 PPV 高，但振动持续时间最短，能量衰减较快。说明改变震源结构(如增加自由面)，可改变不同频带的振动分量，以达到降低振动效应的目的。

(2)从爆破振动信号各频带 PPV 的分布来看，高的振动速度基本集中于 31.25～62.5 Hz 频带，PPV 的分布规律与能量分布规律吻合，Fourier 谱分析的主频也在这一频带范围。爆破振动信号 1-1 的质点振动速度 PPV 要明显大于信号 1-2 的 PPV，振动信号 2-1 的质点振动速度 PPV 要明显大于信号

2-2 的 PPV，说明自由面数量多，则振动速度低。同时说明在不同自由面条件下，爆破振动强度可以通过小波频带能量来反映。

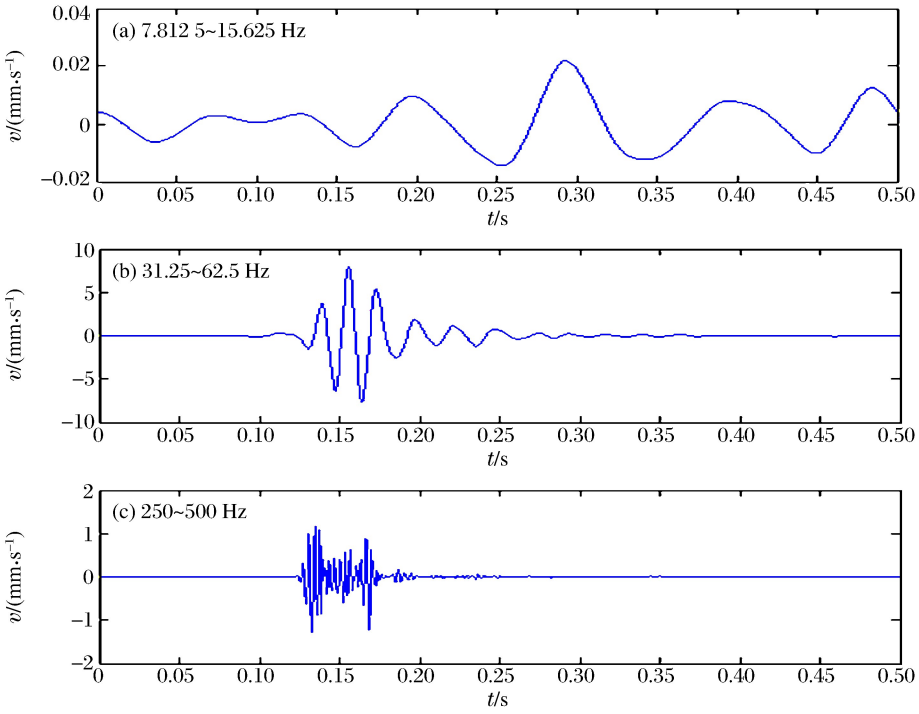


图 7 信号 1-1 在不同频带的爆破振动分量

Fig. 7 Blasting vibration component of singal 1-1 at different frequency bands

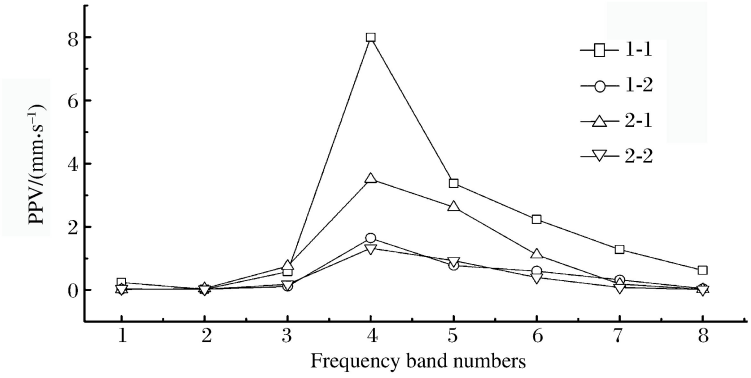


图 8 爆破振动信号(1-1～2-2)在不同频带 PPV 的分布

Fig. 8 Distribution of each band PPV of blasting vibration signal (1-1～2-2)

## 4 结 论

结合工程实例研究不同数量自由面条件下爆破地震的能量分布特征，通过计算和分析，得出主要结论如下：

(1)单一自由面爆破时，大部分炸药爆炸的能量都将作为地震能量消耗掉。随自由面数量增加，爆破的振动总能量也随之降低。与减少段药量相比，增加自由面可以更有效地降低爆破振动。

(2)能量主要集中在中高频带(31.25～125 Hz)，但随自由面数量的增加，爆破振动信号频带能量分布有向高频成分增加的趋势，中低频成分有降低趋势，振动速度也有所降低。这说明如果改变震源结构(如增加自由面)，可以改变不同频带的能量分布，减少低频带的能量有利于自振频率较低的建(构)筑

物安全。

(3)在不同自由面的条件下，爆破振动信号各频带 PPV 的分布规律与各频带振动能量分布规律吻合。高频带振动分量的 PPV 虽比低频带的 PPV 高，但振动持续时间短，能量衰减较快；自由面数量增多，振动速度 PPV 也随之降低。

## 参考文献：


[1] 王丹丹，池恩安，詹振锵，等. 自由面状态对爆破效果的影响及解决措施[J]. 金属矿山，2012，41(3)：52-55.
Wang Dandan，Chi En'an，Zhan Zhenqiang，et al. The Influence of free surface morphology on blasting effect and its solving measurement[J]. Metal Mine，2012，41(3)：52-55.

[2] 张志呈，张顺朝. 论工程爆破中自由面与爆破效果的关系[J]. 西南科技大学学报，2003，18(3)：30-33.
Zhang Zhicheng，Zhang Shunchao. On the relationship between the free surface and the blasting effect of engineering blasting[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology，2003，18(3)：30-33.

[3] 陈星明，肖正学，蒲传金. 自由面对爆破地震强度影响的试验研究[J]. 爆破，2009，26(4)：38-41.
Chen Xingming，Xiao Zhengxue，Pu Chuanjin. Experimental study on influence blasting earthquake strength to free faces[J]. Blasting，2009，26(4)：38-41.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 李洪涛，卢文波，舒大强. 爆破地震波的能量衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(增刊 1)：3364-3369.
Li Hongtao，Lu Wenbo，Shu Daqiang. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29(suppl 1)：3364-3369.

[7] 晏俊伟，龙源，方向. 基于小波变换的爆破振动信号能量分布特性分析[J]. 爆炸与冲击，2007，27(5)：405-410.
Yan Junwei，Long Yuan，Fang Xiang. Analysis on features of energy distribution for blasting seismic wave based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves，2007，27(5)：405-410.

[8] 费鸿禄，马诺诺. 坝基开挖爆破振动频带小波能量分析[J]. 爆破，2010，27(3)：99-104.
Fei Honglu，Ma Nuonuo. Wavelet energy analysis of blasting vibration frequency band on dam foundation excavation[J]. Blasting，2010，27(3)：99-104.

[9] 池恩安，赵明生，梁开水. 自由面数量对爆破地震波时频特性影响分析[J]. 爆破，2013，30(2)：16-20.
Chi En'an，Zhang Mingsheng，Liang Kaishui. Influence of number of free surface on time-frequency characteristics of blasting seismic wave[J]. Blasting，2013，30(2)：16-20.

[10] 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)：31-36.
Lin Dachao，Shi Huiji，Bai Chunhua，et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves，2003，23(1)：31-36.

[11] 中国生，房营光，徐国元. 基于小波变换的建(构)筑物爆破振动效应评估研究[J]. 振动与冲击，2008，27(8)：121-126.
Zhong Guosheng，Fang Yingguang，Xu Guoyuan. Study on blasting vibration effect assessment of structure based on wavelet transform[J]. Journal of Vibration and Shock，2008，27(8)：121-126.

[12] 李夕兵，张义平. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击，2005，25(6)：528-535.
Li Xibin，Zhang Yiping. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(6)：528-535.

[13] 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 Xibin. 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.

[14] 马瑞恒，时党勇. 爆破振动信号的时频分析[J]. 振动与冲击，2005，24(4)：92-96.

Ma Ruiheng, Shi Dangyong. Time-frequency analysis of blasting vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(4):92-96.

[15] 娄建武,龙源,徐全军. 基于小波包技术的爆破地震波特征提取及预报[J]. 爆炸与冲击,2004,24(3):261-267.
Lou Jianwu, Long Yuan, Xu Quanjun. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(3):261-267.

[16] 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,2009:23-186.

# Influence of free surface on energy distribution characteristics of blasting vibration

Wu Congshi[1], Xu Rongwen[1,2], Zhang Qingbin[1]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114, *Hunan, China*;
2. *Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd, Lanzhou* 730030, *Gansu, China*)

**Abstract**: In combination with the measured data of the blasting vibration, the total energy, the frequency band energy, and the PPV of each band of the blasting vibration signal with different numbers of free surfaces were obtained using the wavelet analysis. Then the energy distribution characteristics of the blasting vibration signal with different numbers of free surfaces were studied. The results show that the slotted blasting or cut blasting is restricted by a single free surface, thus most of the energy of the explosion will be consumed as seismic energy; the greater the number of free surfaces, the less the total energy of the blasting vibration signal; with the increase of the of free surfaces, the distribution of the vibration components of each frequency band can be affected, which makes the blasting vibration energy more tend to be the high frequency distribution, so that the energy in the middle and low frequency can be reduced, and the vibration velocity is reduced as well; the PPV of the high frequency band is higher than that of the low frequency band, but the duration of the vibration is shorter, and the energy attenuation is faster in the same vibration signal. It is suggested that, in the design of reducing the blasting vibration, it is more effective to optimize the initiation scheme by using as many free surfaces as possible than by merely reducing the single segment of detonating charge.

**Keywords**: slotted blasting; free surface; blasting vibration; wavelet analysis; energy of each band; peak particle velocity of blasting vibration(PPV)

(责任编辑 曾月蓉)