

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.01.009

电子雷管和导爆管雷管起爆的振动 信号时频特性对比^{*}

孙 冰^① 宋良灵^① 曾 晟^② 罗志业^③ 王素创^④

①南华大学土木工程学院(湖南衡阳,421001)

②南华大学资源环境与安全工程学院(湖南衡阳,421001)

③广西有色勘察设计院(广西南宁,530031)

④湖南铁军工程建设有限公司(湖南长沙,410007)

[摘 要] 为了对比电子雷管和导爆管雷管两种起爆方式的爆破振动信号,开展了某露天采石矿两种雷管起爆的深孔爆破振动测试。基于小波分析方法和 Matlab 程序小波工具箱,对爆破振动信号按照频率划分为 10 个频带,分析各频带能量和峰值质点速度(peak particle velocity,PPV)的分布特征及随爆心距的变化。结果表明:采用电子雷管和导爆管雷管起爆时,90% 的爆破振动能量分布在 2~6 频带(9.77~312.50 Hz)和 2~7 频带(9.77~625.00 Hz),且 PPV 分布在 3~4 频带(19.53~78.13 Hz)和 4~5 频带(39.06~126.25 Hz),即电子雷管起爆的爆破地震波能量和 PPV 均向低频带分布,且信号的 PPV 更小;中、高频带能量大小与段药量成正比,与爆心距成反比;各频带能量占比和 PPV 大小是反映爆破振动强度的重要指标,采用电子雷管能有效地减少爆破振动。

[关键词] 爆破振动;电子雷管;小波分析;时频特性;峰值质点速度

[分类号] TD235

Comparison of Time-Frequency Characteristics of Vibration Signals Detonated by Electronic Detonators and Nonel Detonators

SUN Bing^①, SONG Liangling^①, ZENG Sheng^②, LUO Zhiye^③, WANG Suchuang^④

① School of Civil Engineering, University of South China (Hu'nan Hengyang, 421001)

② School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China (Hu'nan Hengyang, 421001)

③Guangxi Nonferrous Surver and Design Institute (Guangxi Nanning, 530031)

④ Hu'nan Tiejun Engineering Construction Co., Ltd. (Hu'nan Changsha, 410007)

[ABSTRACT] In order to compare the blasting vibration signals caused by electronic detonator initiation and nonel detonator initiation, deep-hole blasting vibration test of the two kinds of detonators was carried out in an open-pit quarry. Based on wavelet analysis method and Matlab program wavelet toolbox, the blasting vibration signal was divided into 10 frequency bands according to the frequency. Distribution characteristics of energy and peak particle velocity in each frequency band and their changes with distance from explosion source were analyzed. Results show that, when nonel detonator or electronic detonator is used for initiation, 90% energy is distributed in 2-6 frequency band (9.77-312.50 Hz) or 2-7 frequency band (9.77-625.00 Hz), and peak vibration velocity is in 3-4 frequency bands (19.53-78.13 Hz) or 4-5 frequency band (39.06-126.25 Hz). Energy and PPV of blasting seismic wave in electronic detonator initiation are both distributed to the low frequency band, and PPV of the signal is smaller. Energy in middle and high frequency bands is proportional to deck charge, and is inversely proportional to distance from explosion source. Energy ratio of each frequency band and PPV are important indicators reflecting the intensity of blasting vibration. The use of electronic detonators can effectively reduce blasting vibration.

[KEYWORDS] blasting vibration; electronic detonator; wavelet analysis; time-frequency characteristics; peak particle velocity

^{*} 收稿日期:2021-08-22

第一作者:孙冰(1979-),女,教授,主要从事土木工程的研究。E-mail:sunbingnh@126.com

通信作者:曾晟(1977-),男,教授,主要从事采矿工程的研究。E-mail:usczensg@126.com

引言

随着电子雷管技术的不断发展与完善,其优越性在工程爆破中得到了越来越广泛的认可;电子雷管技术的推广应用为精细爆破的发展提供了新的技术支持。作为工业爆破器材的新型高端产品,电子雷管与其他雷管相比,除了具备延时精度高、延期时间设置灵活、降低炸药单耗、改善爆破效果等优点外,关键能有效地降低爆破振动^[1-3],从而提高工程爆破的安全性。爆破振动信号时频特性分析是评价爆破振动危害程度的基础,也是定量确定爆破振动安全判据的有效途径^[4]。因此,对爆破振动信号特征的研究,特别是对目前积极推广的电子雷管起爆的爆破振动信号特征的分析,具有十分重要的工程应用价值。

自 2006 年首次在我国三峡工程中使用以来,电子雷管起爆技术在爆破工程中逐步得到应用^[5-7]。根据工业和信息化部安全生产司和公安部治安管理局的要求,到 2022 年,国内要基本实现电子雷管的全面使用^[8]。电子雷管的推广应用之所以引起各管理部门和生产部门的重视,是因为与电雷管、导爆管雷管相比,电子雷管具有延时范围广、精度高、可靠性好和安全性高等优点,在获得好的爆破效果的同时更能实现爆破减振效果。这些均得到了验证:孙崔源等^[9]利用普通导爆管雷管起爆和数码电子雷管起爆的对比试验证明,在隧道掏槽爆破时,数码电子雷管起爆产生的最大振动速度可以降低 43.78%;唐阿敏等^[10]在某近城镇露天矿爆破中使用了电子雷管起爆技术,使爆破振动幅度降低了 31.65%;Fu 等^[11]通过电子雷管和导爆管雷管钻爆开挖隧道产生的损伤区域对比发现,电子雷管起爆使开挖损伤区缩小,证明了电子雷管的减振效果;Guan 等^[12]提出了在隧道爆破开挖中电子雷管起爆的延迟时间计算方法,通过采用最佳的爆破延期时间,电子雷管起爆的振动速度比非电雷管降低了 69.70%。

爆破振动安全是爆破技术人员在爆破作业时首先考虑的问题。目前,对于这个问题的定量描述最佳方法是对爆破振动信号特征进行分析与评判。爆破振动信号主要包括振动峰值特征、频谱特征和能量特征等。许多学者对爆破振动信号开展了大量的研究。笔者采用小波分析方法^[13],基于某露天采石矿爆破振动实测数据,对比分析了电子雷管起爆和导爆管雷管起爆中爆破振动信号的时频特性,为电

子雷管起爆技术爆破减振提供理论依据,并为促进电子雷管的全面应用提供理论基础。

1 基本原理

1.1 小波变换

设 $\psi(t) \in L_2(R)$, $L_2(R)$ 指在 R 上平方可积函数构成的函数空间。当傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足

$$C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \tag{1}$$

则定义 $\psi(\omega)$ 为一个基本小波或母小波函数。将其平移和伸缩变换后得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|b|}} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right). \tag{2}$$

式中: a 为平移因子; b 为伸缩因子; $a, b \in R$, 且 $b \neq 0$ 。

式(2)为连续条件下的小波序列,所以任意函数 $f(t) \in L_2(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |b|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)} dt. \tag{3}$$

则逆变换(重构公式)为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{b^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) da db. \tag{4}$$

式中: $\langle f, \psi_{a,b} \rangle$ 是指二者之间的内积; $\overline{\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)}$ 和 $\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)$ 是共轭函数。

为了得到爆破振动信号小波变换的时间分辨率和频率分辨率,需对平移参数 a 和伸缩参数 b 进行调整。取 $a = 2^j k, b = 2^j (j, k \in Z)$, 得二进小波函数为

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \pi. \tag{5}$$

由式(5)变换后得到

$$W_{2^j} f(k) = \langle f(t), \psi_{2^j}(k) \rangle = \frac{1}{2^j} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi(2^{-j} t - k)} dt. \tag{6}$$

式(6)重构公式可表示为

$$f(t) = \sum_{j \in Z} W_{2^j} f(k) \psi_{2^j}(t) = \sum_{j \in Z} \int_{\mathbb{R}} W_{2^j} f(k) \psi_{2^j}(2^{-j} t - k) dk. \tag{7}$$

1.2 Mallat 算法

在小波变换多分辨分析的基础上, Mallat 和 Meyer 提出了小波变换分解和重构的快速算法,即 Mallat 算法。该算法的基本思想是^[14]:信号 $f(t)$ 的小波分解是将 $f(t)$ 以尺度 j 变换到空间 $L_2(R)$ 的两

个正交子空间 V_i 和 W_i 上,由 V_i 通过一个滤波器 h 得到离散逼近值 $A_i f$,由 W_i 通过一个滤波器 g 得到离散逼近值 $D_i f$;下一层分解中是以尺度 $j+1$ 再将 $A_i f$ 分解到子空间 V_{j+1} 和 W_{j+1} 中;层层分解,完成对信号多分辨率的分解。分层分解如图 1 所示。

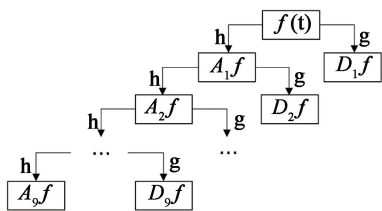


图 1 小波分解结构图

Fig. 1 Structure diagram of wavelet decomposition

故信号 $f(t)$ 的小波分层分解数学关系为

$$\begin{aligned} f(t) &= A_1 f + D_1 f = A_2 f + D_2 f + D_1 f = \\ &A_3 f + D_3 f + D_2 f + D_1 f = \cdots = \\ &A_n f + D_n f + D_{n-1} f + \cdots + D_2 f + D_1 f. \end{aligned} \tag{8}$$

设 $f_k = c_{0,k}$ 为待分析信号 $f(t)$ 的离散采样数据,则信号 $f(t)$ 的正交小波变换为

$$\begin{cases} c_{n,k} = \sum_m c_{n-1,m} h_{m-2k}; \\ d_{n,k} = \sum_m d_{n-1,m} g_{m-2k}; \\ k = 0, 1, 2, \cdots, m-1. \end{cases} \tag{9}$$

式中: $c_{n,k}$ 为尺度系数; $d_{n,k}$ 为小波系数; n 为小波分解层数; m 为待分解信号的离散采样点数。

由于重构与分解是互为逆运算的关系,因此重构关系式为

$$c_{n-1,m} = \sum_m c_{n,m} h_{k-2m} + \sum_m d_{n,m} g_{k-2m} \circ \tag{10}$$

在上述算法原理中,信号的低频部分是尺度系数,高频部分是小波系数。

1.3 小波分解及能量表征

在小波多分辨率分析的基础上,利用 Mallat 算法得到爆破振动信号 $s(t)$ 应满足

$$\begin{aligned} s(t) &= f_1(t) + g_1(t) = \\ &f_2(t) + g_2(t) + g_1(t) = \cdots = \\ &f_N(t) + g_N(t) + g_{N-1}(t) + \cdots + g_1(t) = \\ &\cdots = f_N(t) + \sum_{i=1}^N g_i(t). \end{aligned} \tag{11}$$

式中: f 表示 $s(t)$ 的低频部分信号; g 表示 $s(t)$ 的高频部分信号; f, g 的下标表示小波变换的分解层数。

令 $g_0(t) = f_N(t)$, 得

$$s(t) = \sum_{i=0}^N g_i(t). \tag{12}$$

为获得爆破振动信号频带能量分布特征,将爆破振动信号 $s(t)$ 进行 N 层的小波分解和重构,由式 (12) 和小波函数的正交性,整理得到信号的总能量

$$E = \sum_{i=0}^N \int_{-\infty}^{+\infty} g_i^2(t) dt + \sum_{i=0}^N E_i. \tag{13}$$

式中: E_i 为爆破振动分量位于小波频带 i 上的能量。

小波分解后,爆破振动信号各个频带能量为

$$E_i = \sum_{n=1}^M |d_i(n)|^2 (i=0, 1, 2, 3, \cdots, N). \tag{14}$$

式中: M 为采样点数;当 $i=0$ 时, $d_i(n)$ 为 $s(t)$ 小波分解的逼近系数;当 $i \geq 1$ 时, $d_i(n)$ 为 $s(t)$ 小波分解的细节系数。

小波分解后,爆破振动信号各频带能量占总能量的比例为

$$E_j = \frac{E_i}{E} \times 100\%. \tag{15}$$

2 爆破振动测试

2.1 爆破方案

某露天建筑石材开采矿山的地表层主要由残坡积物组成,为灰岩风化形成的砂质黏土和亚黏土,厚 1.0~3.0 m,覆盖于基岩之上。该矿山大部分覆盖土已经剥离,岩体中岩溶及节理裂隙较发育,岩溶表现为溶沟、溶槽和溶蚀裂隙,多为泥质充填,未发现断裂构造现象。矿石为屑泥晶灰岩和泥晶灰岩,以块状构造为主,局部见条带状及缝合线构造。该矿区生产采用深孔台阶爆破技术,爆破试验在台阶高度分别为 10 m 和 15 m 条件下进行。选用具有良好抗水性能的 2# 岩石乳化炸药,药卷直径 70 mm,卷长 450 mm,质量 2.0 kg,密度 950~1 250 kg/m³,爆速大于 3 200 m/s,猛度大于 12 mm,殉爆距离大于 30 mm。试验时,采用单排逐孔起爆方式,炮孔直径 90 mm,连续耦合装药,双发雷管起爆。导爆管雷管采用孔内延期起爆,段别为 MS2、MS4、MS5、MS6、MS7、MS8。电子雷管起爆时,考虑到自由面形成和岩石脱落,延期时间根据文献[15]公式计算确定为 75 ms。

爆破参数见表 1。

表 1 爆破参数

Tab. 1 Blasting parameters

台阶高度/ m	段药量/ kg	单耗/ (kg · m ⁻³)	孔距/ m	装药 系数
10	42	0.43	3.0	0.727
15	82	0.48	3.5	0.781

2.2 爆破振动测试

采用两种起爆方式在 2 个台阶分别进行,共计 4 组 16 次试验,得到 16 个振动信号,爆破振动测试

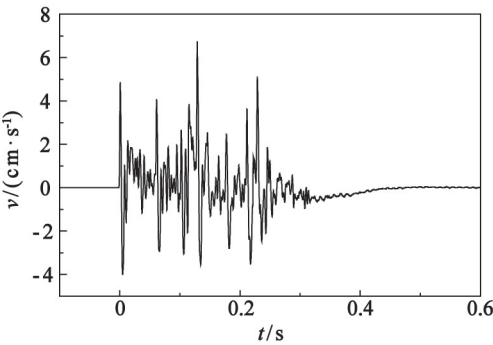
表 2 爆破振动测试条件和对应的测试信号

Tab.2 Blasting vibration test conditions and corresponding test signals

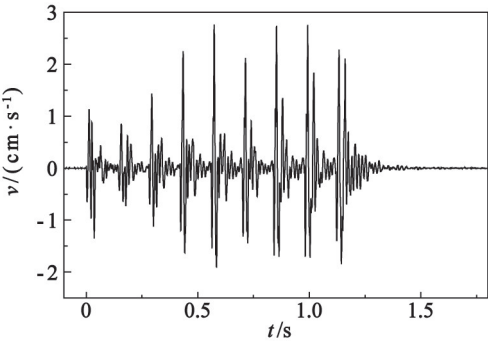
参数	导爆管雷管								电子雷管							
爆心距/m	100	140	165	300	100	140	165	300	100	140	165	300	100	140	165	300
段药量/kg	82	82	82	82	42	42	42	42	82	82	82	82	42	42	42	42
信号编号	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	1-a	1-b	1-c	1-d	2-a	2-b	2-c	2-d

条件和信号编号见表 2。

以 1-1 和 1-a 两个信号为例,爆破振动波形如图 2 所示。



(a) 信号 1-1



(b) 信号 1-a

图 2 实测爆破振动信号的时程曲线

Fig.2 Time history curve of measured blasting vibration signal

3 爆破振动信号时频分析

3.1 信号的频带参数

为了准确获得爆破振动信号时频特性,采用小波基“db8”分解导爆管雷管和电子雷管起爆的爆破振动信号。由于爆破测振仪的采样频率为 10 000 Hz,根据香农采样定理,则其奈奎斯特频率为 5 000 Hz。为了获得频带更低的小波信号,对原始信号进行层数为 9 的小波分解,相应得到 10 个小波分解系数,即 10 个频带,依次表示为:

A9(0 ~ 9.77 Hz)、D9(9.77 ~ 19.53 Hz)、D8(19.53 ~ 39.06 Hz)、D7(39.06 ~ 78.13 Hz)、D6

(78.13 ~ 126.25 Hz)、D5(126.25 ~ 312.50 Hz)、D4(312.50 ~ 625.00 Hz)、D3(625.00 ~ 1 250.00 Hz)、D2(1 250.00 ~ 2 500.00 Hz)和 D1(2 500.00 ~ 5 000.00 Hz)。

根据式(11)和式(12),以信号 1-a 为例,运用 Matlab 小波工具箱得到爆破振动信号的小波分解系数图 and 不同频带的小波信号图,分别如图 3(无量纲)和图 4 所示。由图 4 可知,各频带爆破振动信号的峰值质点速度(peck paitide velocity, PPV)和持续时间不同:中、低频带的爆破振动信号的 PPV 较大,持续时间长;而高频带的则恰好相反。根据爆破振动信号的小波分解系数和各频带的爆破振动信号可

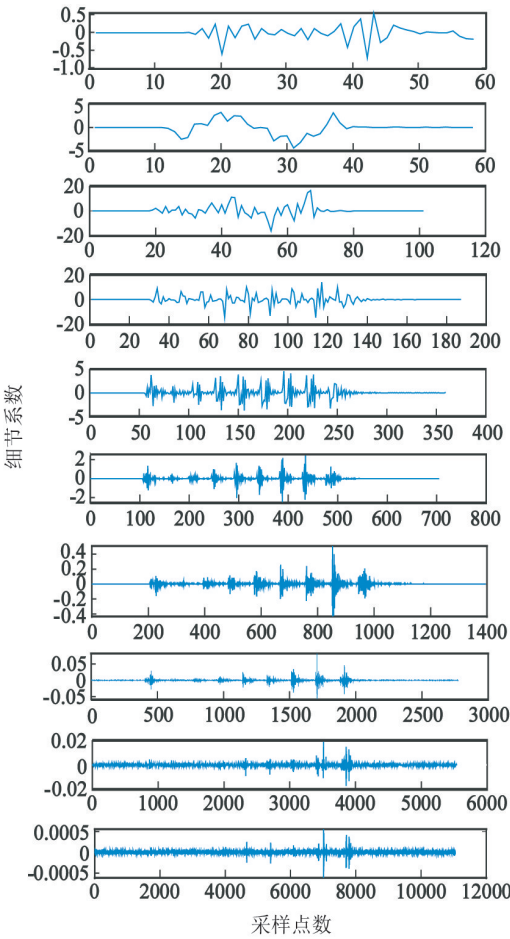


图 3 信号 1-a 的小波分解系数图

Fig.3 Wavelet decomposition coefficient diagram of Signal 1-a

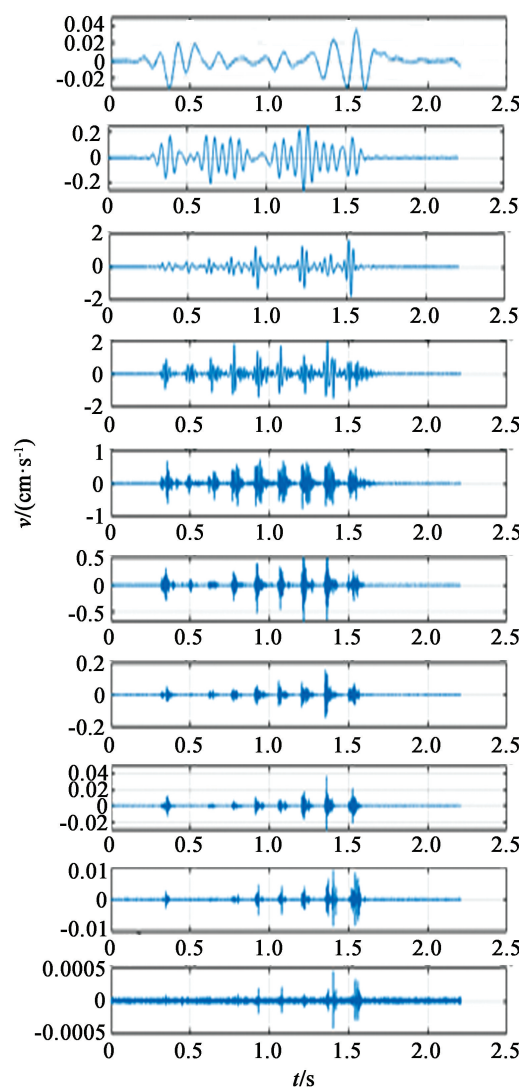


图 4 信号 1-a 的小波分解图

Fig. 4 Wavelet decomposition diagram of Signal 1-a

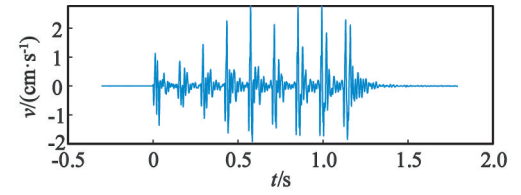


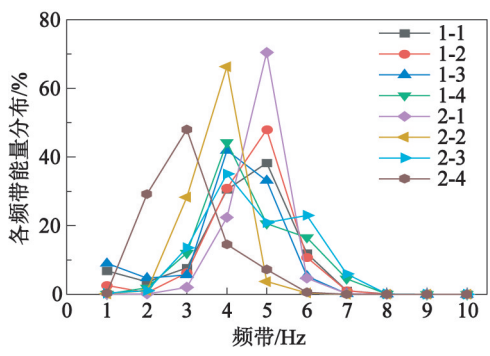
图 5 信号 1-a 重构后的时程曲线

Fig. 5 Time history curve of reconstructed Signal 1-a

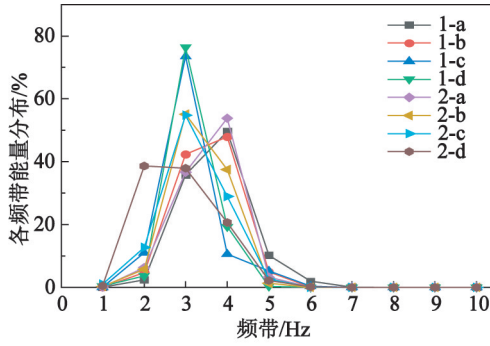
以得到爆破振动的重构信号(图 5),重构信号与图 2(b)的原始信号基本吻合,两者的相对误差小于 10^{-9} ,能够满足分析要求。

3.2 各频带能量分布特征

通过对导爆管雷管和电子雷管起爆的爆破振动信号进行小波分解,得到的各频带能量分布如图 6 所示。在同一起爆方式和爆心距条件下,段药量大时爆破振动信号能量分布频带更聚集且更趋向高频带分布。例如,段药量 82 kg 条件下,能量主要分布



(a) 导爆管雷管



(b) 电子雷管

图 6 两种起爆方式下爆破振动能量分布
Fig. 6 Energy distribution of blasting vibration in two detonation modes

在 4~5 频带,即 39.06~126.25 Hz;而段药量 42 kg 条件下,能量主要分布在 3~5 频带,即 19.53~126.25 Hz。电子雷管和导爆管雷管起爆的爆破振动能量峰值主要分布在 3~4 频带(19.53~78.13 Hz)和 4~5 频带(39.06~126.25 Hz);同时,采用电子雷管和导爆管雷管起爆时,90% 的爆破振动能量分别在 2~6 频带(9.77~312.50 Hz)和 2~7 频带(9.77~625.00 Hz),表明电子雷管起爆的爆破振动信号能量峰值分布频带比导爆管雷管起爆的更低且更窄,即电子雷管起爆时,减振效果明显。

爆破振动信号能量主要分布在 2~6 频带,其中 2,3 频带和 4,5,6 频带分别属于低频带和中、高频带。将不同起爆方式下爆破振动信号的低频带和中、高频带能量进行拟合,得到低频带和中、高频带爆破振动能量随爆心距的变化趋势,如图 7 所示。两种起爆方式的爆破振动信号中,低频带能量随着爆心距的增加而增加;而中、高频带能量随着爆心距的增加而减少。这是由于传播介质具有高频滤波作用,使得爆破振动信号能量随爆心距增大而趋向低频带分布。

3.3 各频带 PPV 分布特征

为了研究爆破振动信号在各频带的 PPV 分布

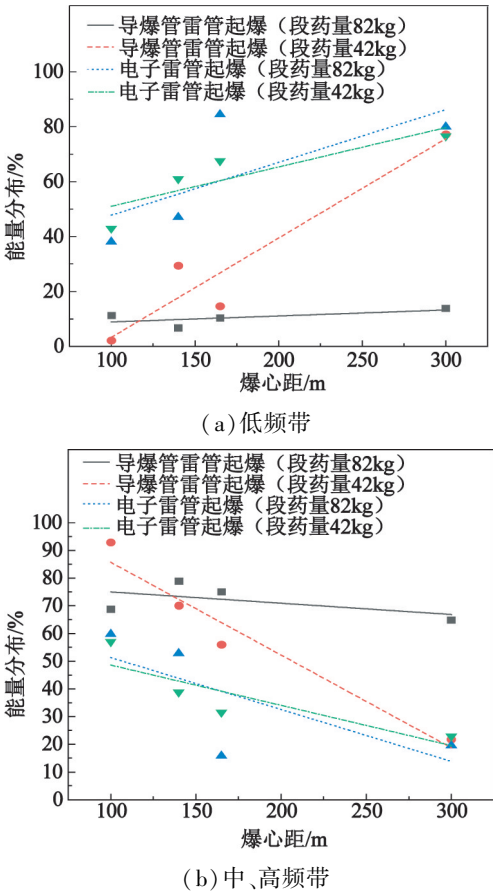


图7 两种起爆方式下频带能量随爆心距的变化
Fig. 7 Variation of frequency band energy with distance from explosion source in two initiation modes

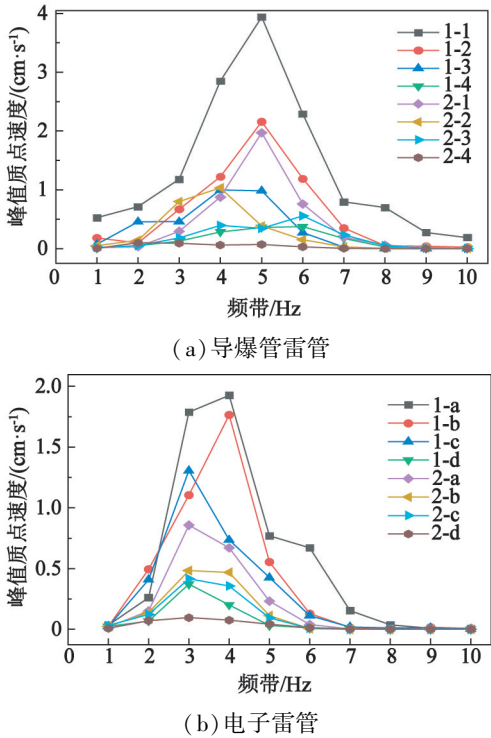


图8 不同起爆方式时各频带信号的PPV分布
Fig. 8 PPV distribution of signals in each frequency band in different initiation methods

特征,提取电子雷管和导爆管雷管起爆的各频带信号的PPV,得到其分布特征如图8所示。可以看出,电子雷管和导爆管雷管起爆的小波分解信号PPV分别主要分布在3~4频带(19.53~78.13 Hz)和4~5频带(39.06~126.25 Hz),表明电子雷管起爆时的爆破振动信号各频带PPV趋向低频带分布。爆破振动小波分解信号PPV分布和能量峰值分布显现出相似的特征,说明爆破振动信号各频带能量与PPV存在一定的相关性。

为了分析原始信号PPV和小波分解信号中最大PPV之间的内在关系,绘制两种雷管起爆的原始信号PPV和小波分解信号中最大PPV与爆心距关系,如图9。爆破振动小波分解信号中最大PPV与原始信号的PPV表现出一定的自相似特征,它们都随着爆心距的增大而减小,且变化趋势和两种起爆方式的大小关系都大致相同,说明小波分解信号的主振频带PPV可以决定原始信号的PPV,同时也说明爆破振动信号各频带能量占比可以反映出爆破振动的强度及破坏效应。

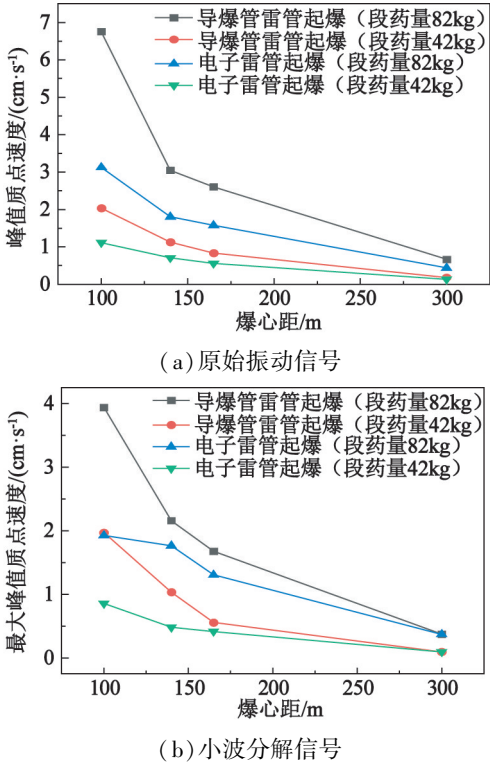


图9 PPV与爆心距的关系
Fig. 9 Relationship between PPV and distance from explosion source

4 结论

1)在相同条件下,与导爆管雷管起爆相比,采用电子雷管精细延时起爆,可使爆破振动能量峰值

和 PPV 相对趋向低频分布,表明电子雷管更能有效地控制爆破振动。

2)随着段药量增大,信号在中、高频带的能量相应增加;随着爆心距增大,信号在中、高频带的能量相应减少。

3)小波分解信号最大 PPV 与原始信号的 PPV 表现出一定的自相似特征,表明主振频带 PPV 可以决定原始信号的 PPV。

4)爆破振动信号各频带能量占比和 PPV 能反映爆破振动强度及破坏效应,采用电子雷管起爆能有效地减小爆破振动。

参 考 文 献

- [1] 陈宏涛,程贵海. 临近燃气管道的爆破质点峰值振速预测[J]. 工程爆破,2020,26(2):80-86.
CHEN H T, CHENG G H. Prediction of peak particle velocity of blasting vibration adjacent to gas pipeline[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 80-86.
- [2] 刘庆,陈文基,陈姗姗,等. 新型数码电子雷管及其起爆系统的开发与应用[J]. 爆破器材,2017,46(6):43-47.
LIU Q, CHEN W J, CHEN S S, et al. Development and application of a new type of digital electronic detonator and its initiating system[J]. Explosive Materials, 2017, 46(6): 43-47.
- [3] 陈义东,王金国,陈度军,等. 地铁隧道电子雷管爆破降振技术及爆破参数优化[J]. 科学技术与工程,2017,17(27):298-302.
CHEN Y D, WANG J G, CHEN D J, et al. Study of decreasing blasting vibration technology with digital detonator and parameters optimization in metro tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27): 298-302.
- [4] 张胜,王智德,黎永索,等. 基于模式自适应连续小波能量谱的爆破振动信号特征分析[J]. 爆破,2019,36(2):105-110,125.
ZHANG S, WANG Z D, LI Y S, et al. Characteristics analysis of blast vibration signals based on pattern adapted continuous wavelet energy spectrum[J]. Blasting, 2019, 36(2): 105-110,125.
- [5] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用[J]. 中国工程科学,2015,17(1):36-41.
YAN J L. Technology and application of Chinese electronic detonator[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(1): 36-41.
- [6] 张万斌,李玉景,张华,等. PHED-1 型电子雷管在露天深孔爆破中的应用[J]. 爆破器材,2019,48(2):47-50,64.
ZHANG W B, LI Y J, ZHANG H, et al. Application of PHED-1 electronic detonator in open-pit deep hole blasting[J]. Explosive Materials, 2019, 48(2): 47-50,64.
- [7] 周慈亮,汤有富,郑琪,等. 某型电子雷管在隧道控制爆破中的应用[J]. 爆破器材,2021,50(3):51-54.
ZHOU C L, TANG Y F, ZHENG Q, et al. Application of an electronic detonator in tunnel controlled blasting[J]. Explosive Materials, 2021, 50(3): 51-54.
- [8] 邓重阳,张海艳,莫颖. 数码电子雷管及其推广应用[J]. 采矿技术,2020,20(3):146-148.
- [9] 孙崔源,张民庆,郭云龙,等. 小间距并行隧道施工爆破振动控制技术试验研究[J]. 铁道建筑,2019,59(1):51-54.
SUN C Y, ZHANG M Q, GUO Y L, et al. Experimental study on control technology of blasting vibration in parallel tunnels with small spacing apart[J]. Railway Engineering, 2019, 59(1): 51-54.
- [10] 唐阿敏,杨剑,陈能革,等. 数码电子雷管在某近城镇矿山的降振应用研究[J]. 现代矿业,2021,37(4):172-175.
TANG A M, YANG J, CHEN N G, et al. Research on application of digital electronic detonator in vibration reduction of a near-urban mine[J]. Modern Mining, 2021, 37(4): 172-175.
- [11] FU H X, WONG L N Y, ZHAO Y, et al. Comparison of excavation damage zones resulting from blasting with nonel detonators and blasting with electronic detonators[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 809-816.
- [12] GUAN X M, GUO C X, MOU B, et al. Tunnel millisecond-delay controlled blasting based on the delay time calculation method and digital electronic detonators to reduce structure vibration effects[J]. PLoS ONE, 2019, 14(3): e0212745.
- [13] 徐荣文,梁虎,吴从师. 不同炮孔直径爆破振动频带能量特征小波分析[J]. 采矿技术,2016,16(6):62-66.
- [14] 中国生. 基于小波变换爆破振动分析的应用基础研究[D]. 长沙:中南大学,2006.
ZHONG G S. Applied fundamental research of blasting vibration analysis based on wavelet transform[D]. Changsha:Central South University, 2006.
- [15] 相志斌,杨仕教,蒲成志,等. 基于爆破振动对孔间微差时间的确定[J]. 中国矿业,2019,28(11):123-127.
XIANG Z B, YANG S J, PU C Z, et al. The determination of between-holes millisecond time based on blasting vibration[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 123-127.