

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.04.010

露天矿爆破时砖混结构房屋振动响应的模态参数识别与爆破减振方法^{*}

张国胜^① 郭 斌^① 刘永亮^② 张云鹏^② 杨 曦^②

①河北钢铁集团矿业有限公司(河北唐山,063000)

②华北理工大学河北省矿业开发与安全技术重点实验室(河北唐山,063000)

[摘 要] 为确保矿区周围房屋安全,采集矿区周围单层砖混结构房屋的爆破振动信号,根据运筹模态分析(operational modal analysis,OMA)相关理论,运用希尔伯特黄变换(Hilbert Huang transform,HHT)和小波包分解的方法对爆破地震波信号进行了分析。确定了单层砖混结构房屋地基与墙壁爆破振动信号的各阶固有频率,得到了不同振动方向各阶的固有模态函数(intrinsic mode function,IMF)贡献率。结果表明:地基与墙壁的IMF贡献率存在明显差异;地基高频序列IMF贡献率较高,墙壁的低频序列IMF贡献率较高。对墙壁测点数据进行分析可知:随着墙壁高度的增加,低频段,低频能量逐渐减小;高频段,高频能量逐渐增加。改变装药结构与间隔起爆时间,可使爆破地震波出现峰谷叠加现象,从而减小爆破振动效应,降低质点的振速。

[关键词] 单层砖混结构房屋;爆破振动信号;模态参数识别;小波包分解;爆破减振

[分类号] TD235

Modal Parameter Identification of Vibration Response of Brick-Concrete Building and Blasting Vibration Reduction during Blasting in Open Pit Mine

ZHANG Guosheng^①, GUO Bin^①, LIU Yongliang^②, ZHANG Yunpeng^②, YANG Xi^②

① Hebei Iron and Steel Group Mining Co., Ltd. (Heibei Tangshan, 063000)

② Key Laboratory of Mine Development and Safety Technology, Hebei Province, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063000)

[ABSTRACT] In order to ensure the safety of buildings around the mining area, blasting vibration signals of single-layer brick-concrete houses around the mining area were collected, and according to the relevant theory of OMA (operational modal analysis), the collected blasting seismic wave signals were analyzed by HHT (Hilbert Huang transform) and wavelet packet decomposition methods. Natural frequencies of the blasting vibration signals of the ground foundation and wall of the single-layer brick-concrete house were analyzed, and IMF contribution rates of the various stages in different vibration directions were determined. Results show that IMF contribution rates of the ground foundation and that of the wall are significantly different. IMF contribution rate of the high-frequency sequence of blasting seismic waves on the ground foundation is high, but IMF contribution rate of the low-frequency sequence of blasting seismic waves on the wall is high. Data of the measurement points on the wall show that, as the height of the wall increases, the low frequency energy gradually decreases in the low frequency band, while the high frequency energy gradually increases in the high frequency band. By changing the charge structure and interval initiation time, peak-valley superposition effect of the blasting seismic waves could appear, the blasting vibration effect can be reduced, and particle vibration velocity could also be reduced.

[KEYWORDS] single-layer brick-concrete building; blasting vibration signal; modal parameter identification; wavelet packet decomposition; blasting vibration reduction

^{*} 收稿日期:2020-10-13
基金项目:河北省自然科学基金(E2016209388)
第一作者:张国胜(1965-),男,高级工程师,主要从事爆破振动传播规律的研究。E-mail:1637798965@qq.com
通信作者:郭斌(1984-),男,高级工程师,主要从事爆破振动传播规律的研究。E-mail:zimoyangxi@163.com

引言

近些年来,随着矿山行业的发展,矿石开采过程中的爆破振动对周围环境的影响也逐渐被社会关注。尤其是爆破过程中产生的爆破地震波,会引起矿山周围建筑物的振动,如果其强度超过一定阈值,就会造成矿山周围建筑物不同程度的破坏^[1-3]。对爆破地震波产生的振动效应进行系统研究的工作一直在进行,研究对象众多^[4-8]。但是,矿区周围村镇较多,建筑主体多以单层砖混结构房屋为主,而目前针对单层砖混结构房屋地基与墙壁振动响应的研究还相对较少,急需开展相应的研究。

爆破振动信号为非常典型的非平稳信号^[9]。朱权洁等^[10]充分利用小波包技术,分析了矿山生产产生的爆破信号,并与岩石破裂产生的信号进行了对比,确定了其各自的能量频带分布特征。龚敏等^[11]对隧道开采过程中的爆破振动信号进行了采集,运用希尔伯特黄变换(Hilbert Huang transform, HHT)和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对不同雷管延期时间的瞬时能量进行了分析。赵国彦等^[12]采用频率切片小波变换(frequency slice wavelet transform, FSWT)对岩体微振和爆破振动信号在不同频域的能量比例进行了研究。Triviño 等^[13]对不同爆破条件下的爆破地震波进行分析,确定了其能量和频率的变化规律。

针对矿区周边的单层砖混结构房屋的地基与墙壁,根据运筹模态分析(operational modal analysis, OMA)理论,对采集到的爆破地震波信号,运用 HHT 和小波包分解的方法,获取其模态参数,分析爆破地震波不同频段的贡献率,并确定其频域能量特征。提出了爆破减振方法,并进行了数值模拟验证。

1 工程概况与监测方法

某矿露天生产爆破时,对采场附近单层砖混结构房屋进行监测,获取振动响应信号数据。监测点距离爆点 820 m。

露天生产爆破采用逐孔起爆技术。台阶高度 14.0 ~ 15.5 m;炮孔直径 310 mm;孔深 16.0 ~ 17.5 m(超深 2.0 m,填塞长度 7.0 ~ 7.5 m);矿石孔网参数(7 ~ 8) m × (6 ~ 7) m;岩石孔网参数(5 ~ 9) m × (4 ~ 8) m;使用的炸药为铵油、乳化炸药;矿石炸药单耗为 0.45 ~ 1.00 kg/m³;岩石炸药单耗为 0.40 ~

0.45 kg/m³。

使用中科院 TC-4850 型爆破测振仪,主要监测单层砖混结构房屋的墙壁与地基的爆破振动情况。地基测点为 B6。墙壁各测点分别为 B2、B3 和 B4,各个测点之间的距离为 80 cm,如图 1 所示。



图 1 墙壁测点(单位:cm)
Fig. 1 Measuring points on the wall (unit: cm)

2 爆破振动信号分析

2.1 爆破振动影响下地基模态参数计算

根据现场爆破振动监测结果,得到房屋地基 X、Y、Z 3 个方向的振速时程信号。分别对这 3 个方向的振速时程信号进行 EMD 处理,就可以得到不同的数据序列,每个序列称为固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),然后分别对 IMF 进行 HHT 处理,得到相应信号在 11 阶固有模态下的分解信号。以地基在 Y 方向的爆破振动信号为例,结果见图 2。

然后,进行方差贡献率分析,得到房屋地基 X、Y、Z 3 个方向的 IMF 贡献率,如图 3 所示。观察可知:3 个方向的信号在 5、6 阶的 IMF 贡献率均较高;其中,第 5 阶的 IMF 贡献率略高;7、8、9 阶次之;其他序列 IMF 贡献率过低,可忽略不计。

对 Y 方向各个序列的振速时程信号分别进行 10 层小波包分解,得到其归一化能量谱图,分析后可得其各阶固有频率,如图 4 所示。由此可知,3 个方向的信号在 54.67 Hz 的 IMF 贡献率较高。

2.2 爆破振动影响下墙壁模态参数计算

在开展地基爆破振动信号监测的同时,在墙壁进行钻孔,安装膨胀螺栓,再用固定架套住探头,并将其固定在膨胀螺栓上,对墙壁各个测点也开展相应的监测工作。得到单层砖混结构房屋墙壁各个测点 X、Y、Z 3 个方向的振速时程信号。分别对 3 个方向的振速时程信号进行 EMD 处理,就可以得到相应信号在 10 阶固有模态下的分解信号。B2 测点在 Y 方向的爆破振动信号处理结果如图 5 所示。

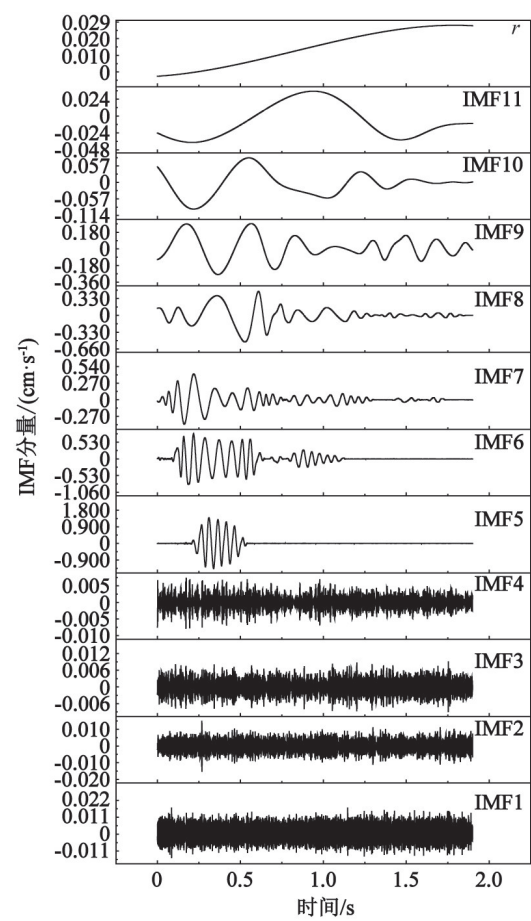


图 2 地基测点 Y 方向爆破振动信号的 IMF 分量和剩余分量 r

Fig. 2 IMF component and residual component r of blasting vibration signal in Y direction of measuring point on ground foundation

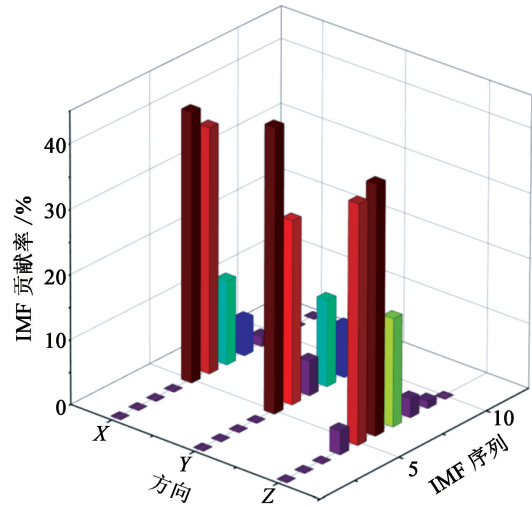


图 3 地基测点 IMF 分量的贡献率

Fig. 3 Contribution rate of IMF component of measuring point on ground foundation

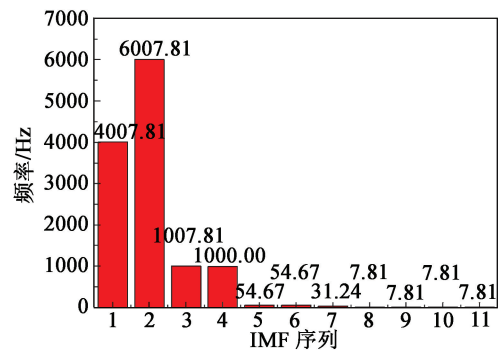


图 4 IMF1 ~ IMF11 各阶的固有频率

Fig. 4 Natural frequencies of IMF1-IMF11

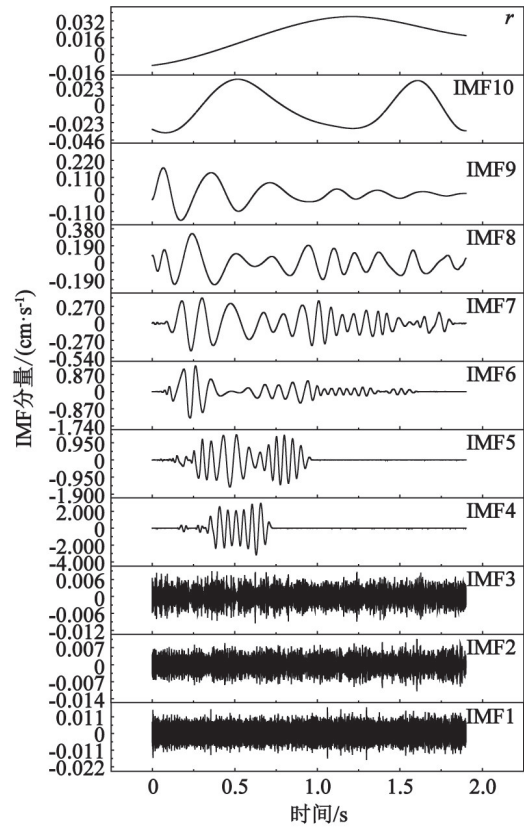


图 5 墙壁 B2 测点 Y 方向的爆破振动信号的 IMF 分量和剩余分量 r

Fig. 5 IMF component and residual component r of blasting vibration signal in Y direction of Measuring Point B2 on the wall

根据现场爆破振动监测与上述计算结果,进行方差贡献率分析,得到单层砖混结构房屋墙壁 B2 测点 X、Y、Z 3 个方向的 IMF 贡献率,如图 6 所示。观察可知,3 个方向信号的主导 IMF 贡献率并不相同。X 方向,6 阶 IMF 贡献率最高;Y 方向,4 阶 IMF 贡献率最高;Z 方向,5 阶 IMF 贡献率最高。与地基各阶 IMF 贡献率相比,存在明显差异。这说明单层砖混结构房屋墙壁的动力响应与地基的动力响应相

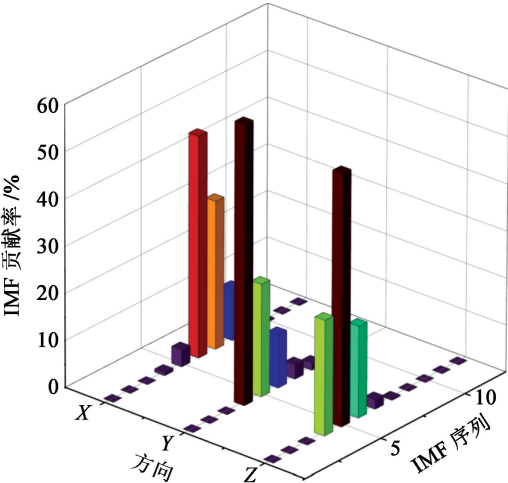


图 6 墙壁 B2 测点 IMF 分量的贡献率
Fig. 6 Contribution rate of IMF component
of Measuring Point B2 on the wall

比,其起主导作用的振动频率并不相同。

对单层砖混结构房屋墙壁 B2 测点 Y 方向各个序列的振速时程信号分别进行 10 层小波包分解,得到其归一化能量谱图,分析后可得其各阶固有频率,如图 7 所示。X 方向,在 23.43 Hz 的 IMF 贡献率最高;Y 方向,在 54.67 Hz 的 IMF 贡献率最高;Z 方向,在 23.43 Hz 的 IMF 贡献率最高。

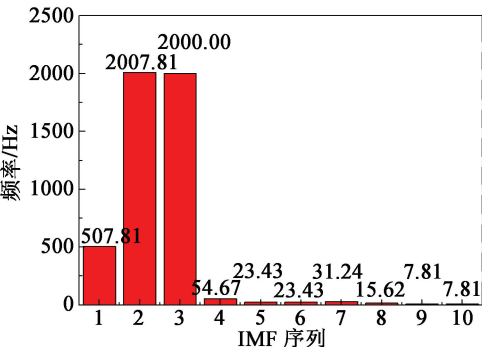


图 7 IMF1~IMF10 各阶的固有频率
Fig. 7 Natural frequencies of IMF1-IMF10

2.3 爆破振动作用下频域能量分析

为进一步分析不同位置的频域能量变化规律,对各个测点 Y 方向的爆破振动信号进行降噪处理后,进行 db8 小波包分解,得到其归一化能量分布图,如图 8 所示。每个频段的大小为 7.81 Hz。

观察图 8 可知,各个测点的能量分布主要集中在 7.81~31.24 Hz(低)、46.86~62.48 Hz(高)两个频段范围内,其中,各个测点受高频成分影响较大。其中,低频段以 15.62~23.43 Hz 为主;高频段以 54.67~62.48 Hz 为主。观察 B2、B3、B4 测点可知:随着墙壁高度的增加,在低频段,低频能量逐渐减

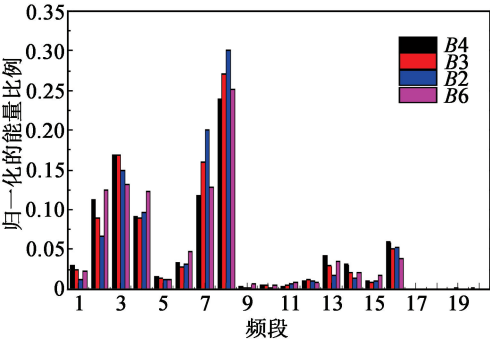


图 8 地基与墙壁各测点在不同频段的归一化能量分布
Fig. 8 Normalized energy distribution of
measuring points on foundation and wall

小;在高频段,高频能量逐渐增加。

目前,国内多以 GB6722—2014《爆破安全规程》为依据,对爆破地震波是否对房屋安全产生不利影响进行判定。其中,采用保护对象所在地质点峰值振动速度和主振频率为主要依据。但是,从上述分析结果中可以看出:随着高度的增加,墙壁上测点高频段能量逐渐增大,并超过地基高频段的能量;低频段的能量逐渐减小。当墙壁测点高、低频段能量均高于地基在高、低频段的能量,或其总和高于地基在高、低频段的能量的总和,那么,只以所在地质点的振速和主频为依据,判别房屋的稳定性,可能会产生一定的误差。同时,房屋是由不同结构组成的,由于其固有频率的影响,对爆破地震波中的不同频率成分的敏感性也不相同。故不同结构对爆破地震波会产生不同的响应,并带来不同的损伤,这还需要作进一步的研究。

3 爆破减振技术

应用数码电子雷管可以利用合理的延期起爆时间和装药结构,使不同的爆破地震波波形峰谷叠加,进而达到减小爆破振动效应的目的。

应用 Ls-DYNA 建立数值模型,如图 9 所示。模

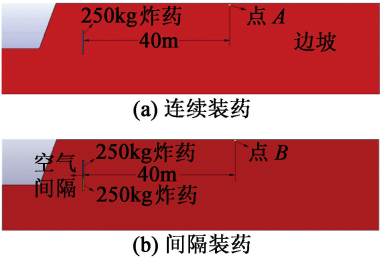


图 9 装药模型
Fig. 9 Charge model

型长 100 m、高 24 m。模拟时间 50 000 μs 。炸药与岩石采用的材料模型分别为 Mat_High_Explosive_Burn 和 Mat_Plastic_Kinematic。采用 JWL 状态方程。根据矿山实际,并参考前人经验,确定状态方程参数如表 1 所示;岩石材料的力学参数见表 2。

表 1 状态方程参数

Tab. 1 State equation parameters

| 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | A / GPa | B / GPa | R_1 | R_2 | ω |
|--|---|--------------|--------------|-------|-------|----------|
| 1.0 | 5 000 | 214 | 0.18 | 4.2 | 0.8 | 0.15 |

表 2 岩石材料参数

Tab. 2 Rock material parameters

| 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 弹性模量/ GPa | 泊松 比 | 屈服应力/切线模量/ MPa | 硬化 系数 |
|--|--------------|---------|-------------------|----------|
| 2.54 | 57 | 0.27 | 106 | 5.5 |

提取 A 点的爆破振速(图 10),最大值达到 100 cm/s 。但是,如果采用如图 9(b)所示的间隔装药方式,通过合理控制延期起爆时间,使两个药包间隔半个周期(400 μs)起爆,就可以使两个药包附近位置的波形产生峰谷叠加效应(图 11),进而达到减小爆破振动效应的目的。同时,起爆的总药量没有改变,

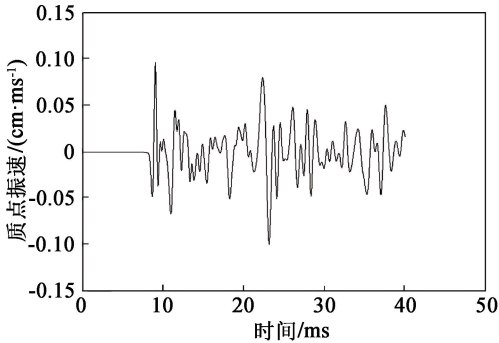


图 10 连续装药 A 点的质点振速

Fig. 10 Particle vibration velocity of Point A in continuous charge

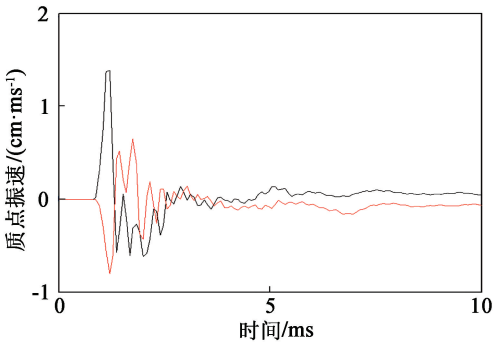


图 11 峰谷叠加效应

Fig. 11 Peak-valley superposition effect

但在相同距离上,B 点的质点振速峰值为 90 cm/s (图 12),较原来减小了 10%。

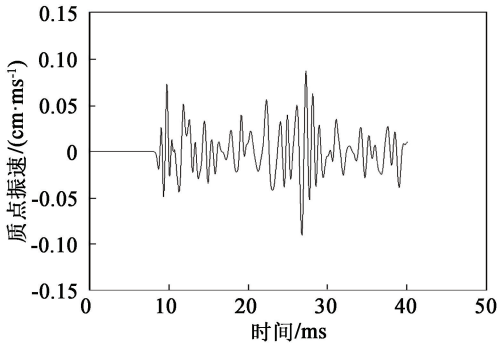


图 12 叠加后 B 点的质点振速

Fig. 12 Particle vibration velocity of Point B after superposition

为进一步验证方法的可行性,建立单层砖混结构房屋数值模型(图 13)。首先,将采集到的地震波施加于模型底面,并采集房屋地表与墙壁振动数据。然后,在模型底面分区域间隔半个周期,分别施加地震波,并采集房屋地表与墙壁振动数据。结果如表 3 所示。叠加后振速明显小于叠加前振速,进一步确定了模拟的准确性。

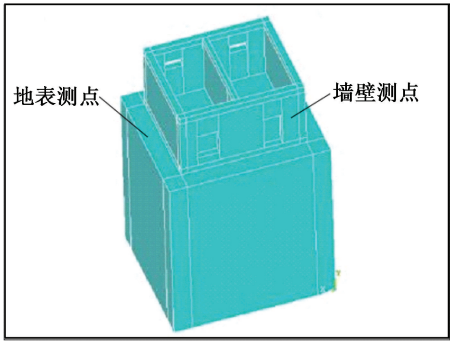


图 13 单层砖混结构房屋数值模型

Fig. 13 Numerical model of the single-layer brick-concrete building

表 3 叠加前、后不同位置的振速

Tab. 3 Vibration velocity of different points before and after superposition

| 位置 | 振速 | |
|------|------|------|
| | 叠加前 | 叠加后 |
| 地表测点 | 0.41 | 0.37 |
| 墙壁测点 | 0.52 | 0.48 |

4 结论

通过对矿区周围单层砖混结构房屋爆破振动信

号的采集,根据 OMA 方法相关理论,对采集到的爆破地震波信号,运用 HHT 和小波包分解的方法对其进行分析,得出以下结论:

1)确定了单层砖混结构房屋地基与墙壁爆破振动信号的各阶固有频率和不同振动方向各阶的 IMF 贡献率,地基与墙壁的 IMF 贡献率存在明显差异,地基高频序列(54.67 Hz)的 IMF 贡献率较高,墙壁低频序列(23.43 Hz)的 IMF 贡献率较高。

2)墙壁各个测点的能量分布主要集中在 7.81 ~ 31.24 Hz(低)、46.86 ~ 62.48 Hz(高)两个频段范围内,各个测点受高频成分影响较大。其中,低频段以 15.62 ~ 23.43 Hz 为主,高频段以 54.67 ~ 62.48 Hz 为主。随着墙壁高度的增加,在低频段,低频能量逐渐减小;在高频段,高频能量逐渐增加。不同位置处的能量并不相同。

3)通过分段装药与半周期延时起爆,使爆破地震波出现峰谷叠加现象,可以减小爆破振动效应,降低质点振速。

参 考 文 献

[1] 谢全民,黄小武,赵东华,等. 地铁隧道爆破振动测试及时频特征分析[J]. 爆破器材,2020,49(6):48-53.
XIE Q M, HUANG X W, ZHAO D H, et al. Analysis of time-frequency characteristics in blasting vibration test of subway tunnel [J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 48-53.

[2] SOLTYS A, PYRA J, WINZER J. Analysis of the blast-induced vibration structure in open-cast mines [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(1):409-418.

[3] 田园,董英健. 地下巷道在爆破振动作用下的动态响应特征研究[J]. 爆破器材,2019,48(6):60-64.
TIAN Y, DONG Y J. Dynamic response characteristics of underground roadway under blasting vibration [J]. Explosive Materials, 2019, 48(6):60-64.

[4] 苏莹,吴立,彭亚雄,等. 紧邻建(构)筑物水下爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破器材,2016,45(3):55-61.
SU Y, WU L, PENG Y X, et al. Research review on safety criterion of underwater blasting nearby constructions [J]. Explosive Materials, 2016, 45(3):55-61.

[5] HASANIPANAH M, MONJEZI M, SHAHNAZAR A, et al. Feasibility of indirect determination of blast induced ground vibration based on support vector machine [J]. Measurement, 2015, 75:289-297.

[6] 张南,方向,范磊,等. 海工挤淤爆破对周围民房的振动影响分析[J]. 爆破器材,2012,41(3):35-37,40.

ZHANG N, FANG X, FAN L, et al. Analysis on vibration effect induced by embankment blasting toe-shooting on buildings around the monitoring area [J]. Explosive Materials, 2012, 41(3):35-37,40.

[7] 负永峰,张方. 爆破模拟地震动下框架抗震性能试验分析[J]. 工程爆破,2014,20(2):21-24.
YUN Y F, ZHANG F. Study on seismic performance of frame structures under blasting vibration simulating earthquake [J]. Engineering Blasting, 2014, 20(2):21-24.

[8] 陈作彬,李兴华,范磊,等. 基于小波包变换的爆破地震反应谱分析[J]. 爆破器材,2018,47(5):59-64.
CHEN Z B, LI X H, FAN L, et al. Analysis of blasting seismic response spectrum based on wavelet packet transform [J]. Explosive Materials, 2018, 47(5):59-64.

[9] 郭涛,方向,谢全民,等. 频率切片小波变换在爆破振动信号时频特征精确提取中应用[J]. 振动与冲击, 2013,32(22):73-78.
GUO T, FANG X, XIE Q M, et al. Application of FSWT in accurate extraction of time-frequency features for blasting vibration signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22):73-78.

[10] 朱权洁,姜福兴,于正兴,等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(4):723-730.
ZHU Q J, JIANG F X, YU Z X, et al. Study on energy distribution characteristics about blasting vibration and rock fracture microseismic signal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 723-730.

[11] 龚敏,邱焱可可,孟祥栋,等. 基于 HHT 的雷管实际延时识别法在城市环境微差爆破中的应用[J]. 振动与冲击,2015,34(10):206-212.
GONG M, QIU Y K K, MENG X D, et al. Identification method of detonator's actual firing time delay based on HHT and its application in millisecond blasting under urban environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(10):206-212.

[12] 赵国彦,邓青林,马举. 基于 FSWT 时频分析的矿山微震信号分析与识别[J]. 岩土工程学报,2015,37(2):306-312.
ZHAO G Y, DENG Q L, MA J. Recognition of mine microseismic signals based on FSWT time-frequency analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2):306-312.

[13] TRIVIÑO L F, MOHANTY B, MILKEREIT B. Seismic waveforms from explosive sources located in boreholes and initiated in different directions [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012,87:81-93.