

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0436

自由面数量对水下钻孔爆破振动信号 能量分布及衰减规律的影响*

马晨阳^{1,2}, 吴立^{1,2}, 孙苗²

(1. 中国地质大学(武汉)岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074))

摘要: 针对自由面不仅影响爆破效果还影响爆破振动效应的问题, 提出从能量角度探索自由面对水下爆破振动衰减规律的影响。以三峡大坝至葛洲坝水利枢纽河段水下钻孔爆破地震波现场监测数据为基础, 结合 SPH-FEM 数值模拟技术和小波时频能量分析方法, 对不同自由面数量的爆破振动信号的总能量、各频带间的能量分布特征及振动衰减规律进行了研究。结果表明: 水下钻孔爆破具有低主频、短持时、快衰减的特点, 爆破主频带主要集中在 15.625~31.250 Hz; 受单一自由面限制的水下开槽爆破, 监测信号的爆炸能量主要以振动形式消耗, 单自由面比振动能能为 13.14 mm²/(kg·s²), 随着后续开挖爆破自由面数量的增加, 双自由面和三自由面的比振动能分别降低至 1.36 和 0.28 mm²/(kg·s²), 频带质点峰值振动速度分别降低 65% 和 37%, 能量更多用于破碎和抛掷岩体, 水下爆破振动主频由低频向高频带(31.25~62.50 Hz)发展。因此, 在水下控制爆破设计时, 需要考虑自由面数量对振动能量分布和衰减规律的影响, 并利用这个特征, 确定各段的控制药量, 减少对周边建构物的共振危害。

关键词: 水下钻孔爆破; 自由面; 时频分析; 振动衰减

中图分类号: O389; TD231

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

Influence of free surface numbers on the energy distribution and attenuation of vibration signals of underwater drilling blasting

MA Chenyang^{1,2}, WU Li^{1,2}, SUN Miao²

(1. *Engineering Research Center of Rock-Soil Drill & Excavation and Protection of the Ministry of Education,*

China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)*

Abstract: Aiming at the problem that the free surface not only affected the blasting effect but also the blasting vibration effect, an analytical method of exploring the influence of free surface on the vibration attenuation law of underwater drilling blasting was proposed from the energy point of view. Taking the field monitoring data of the underwater blasting seismic wave between the river reach of the Three Gorges Dam and Gezhouba Dam as the research object, the characteristic information on time and frequency scales of the monitored signals was analyzed by wavelet transform. Similarly, the total energy of the blasting vibration signals, the energy distribution characteristics in variety of frequency band on different free surface, and the main frequency range were extracted. Combined with the method of the SPH-FEM simulation technology, the vibration velocity attenuation law of different numbers of free surfaces was verified. The results indicate that underwater drilling blasting vibration has the characteristic of low frequency, the short duration and the fast attenuation. The main frequency band of the underwater drilling blasting is focused on the frequency band of 15.625–31.250 Hz. Most of the explosion energy will be

* 收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41672260)

第一作者: 马晨阳(1990—), 男, 博士研究生, 524035683@qq.com

通信作者: 吴立(1963—), 男, 博士, 教授, lwu@cug.edu.cn

consumed as seismic energy in the underwater slotted blasting due to the restricted of a single free surface. The specific vibrational energy λ_E of the single free surface signal is $13.14 \text{ mm}^2/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$. However, with the increase of the number of free surfaces in subsequent excavation blasting, the λ_E of the double free surfaces and the three free surfaces decrease to 1.36 and $0.28 \text{ mm}^2/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$, and the reduction rates of the peak particle velocity (PPV) of the frequency band are 65% and 37%. Besides, the energy of the subsequent explosion will be used more for breaking and throwing the rock mass, and the main frequency of it will also develop from low frequency to high frequency band (31.25–62.50 Hz). Therefore, the influence of the number of free surfaces on the vibration energy distribution and attenuation law should be considered in the design of underwater controlled blasting. Using this regularity and characteristic, it is possible to more accurately determine the controlled explosive charge of each segment and reduce the resonance hazard to surrounding structures.

Keywords: underwater drilling blasting; free surface; time-frequency analysis; vibration attenuation

近些年,随着我国“一带一路”合作倡议的推进和交通水运行业的蓬勃发展,水下爆破技术在增加水上通航里程、提高河流航道通航等级、扩展港口码头规模、实施桥梁桥墩工程等方面得到广泛应用。水下爆破作业带给工程建设极大便利,也对周围环境和建(构)筑物带来了一定的有害效应,尤其是爆破振动的危害。

实质上,水下爆破对周围建(构)筑物的影响是一种能量传递与转化的过程^[1],这种传递与转化的过程受到爆破地震波能量分布特征的影响,而自由面是控制引导和促进岩石破裂的重要因素。吴从师等^[2]探讨了不同爆源结构和地形条件下爆破自由面数量及面积对爆破振动地震波能量分布特征的影响;汪万红等^[3]运用光滑粒子流体动力学与有限元耦合的方法(SPH-FEM)揭示了临空面与峰值振动速度呈负相关性,这与杨建华等^[4]、陈星明等^[5]的自由面数量增多质点峰值振动速度降低的结论类似。因此,研究不同自由面数量的爆破地震波能量分布特征和衰减规律,对提高水下钻孔爆破施工效率和控制水下爆破振动危害效应,都具有重要的理论意义和工程指导价值。

水下爆破地震波具有瞬时复杂性和爆破介质多样耦合性的特点,产生的爆破振动信号是一种典型的短时、突变、非平稳随机信号^[6]。分析处理实测爆破振动信号^[7]、提取各种时频特征的规律,对解读不同爆破参量对爆破振动效应的影响具有重要意义。孙苗等^[8]基于改进的CEEMDAN时频分析方法,对水下爆破振动特征进行了识别;李夕兵等^[9]利用小波变换,分析爆心距、单段药量和多段微差爆破振动信号频带能量分布特征;张声辉等^[10]进一步结合反应谱法,认为地震波振速与能量存在一定的高程放大效应。

由于水下爆破作业的困难性、施工环境的复杂性和振动介质的耦合性,涉及水下钻孔爆破自由面对振动影响的研究还不够深入。本文中,结合三峡库区整治工程的实测数据,利用小波时频分析,对不同自由面数量的水下钻孔爆破振动信号各频带能量分布特征及振动衰减规律进行探讨,以期水下爆破优化设计及爆破振动风险预测提供参考。

1 水下爆破振动测试

三峡大坝至葛洲坝枢纽河段航道整治工程位于湖北省宜昌市境内乐天溪锚地和莲沱段航道,其水上航路的碍航礁石及浅区需采用水下钻孔爆破手段予以整治清除,河床基岩体为扬子期闪云斜长花岗岩,河床表层覆盖第四系冲(淤)积砂层及砂卵石层,多为葛洲坝蓄水后火成岩强全风化物沉积而成。为探究不同自由面数的水下钻孔爆破地震波能量分布及衰减规律,在LT7钻爆区进行了爆破实验,并采用TC4850爆破测振仪进行监测记录(见图1(a)~(b))。由于水平径向速度和水平切向速度均较小,因此重点测量和分析垂直振动速度,各测点布设位置及部分监测结果如图1(c)~(d)所示。

炮孔布置如图2所示。第1次为开槽爆破,共布置3排炮孔每排10孔,排间采用秒延期电雷管分3段起爆,第1~3排孔内分别放置1~3段半秒差雷管,最先起爆的第1段炮孔只有顶部1个自由面,而后顺序起爆的两段炮孔才逐渐有较充分的第2个前排自由面。第2次爆破为分段多孔爆破,以6孔为

1 组分为 5 段半秒差起爆, 第 1 段起爆前, 只有顶部和前排 2 个自由面, 第 1 段起爆后新增了 1 个侧向自由面, 使后续起爆组形成了 3 个自由面爆破。其中, 数字 2-1 含义为: 第 1 个数字为起爆次序, 第 2 个数字为段数。

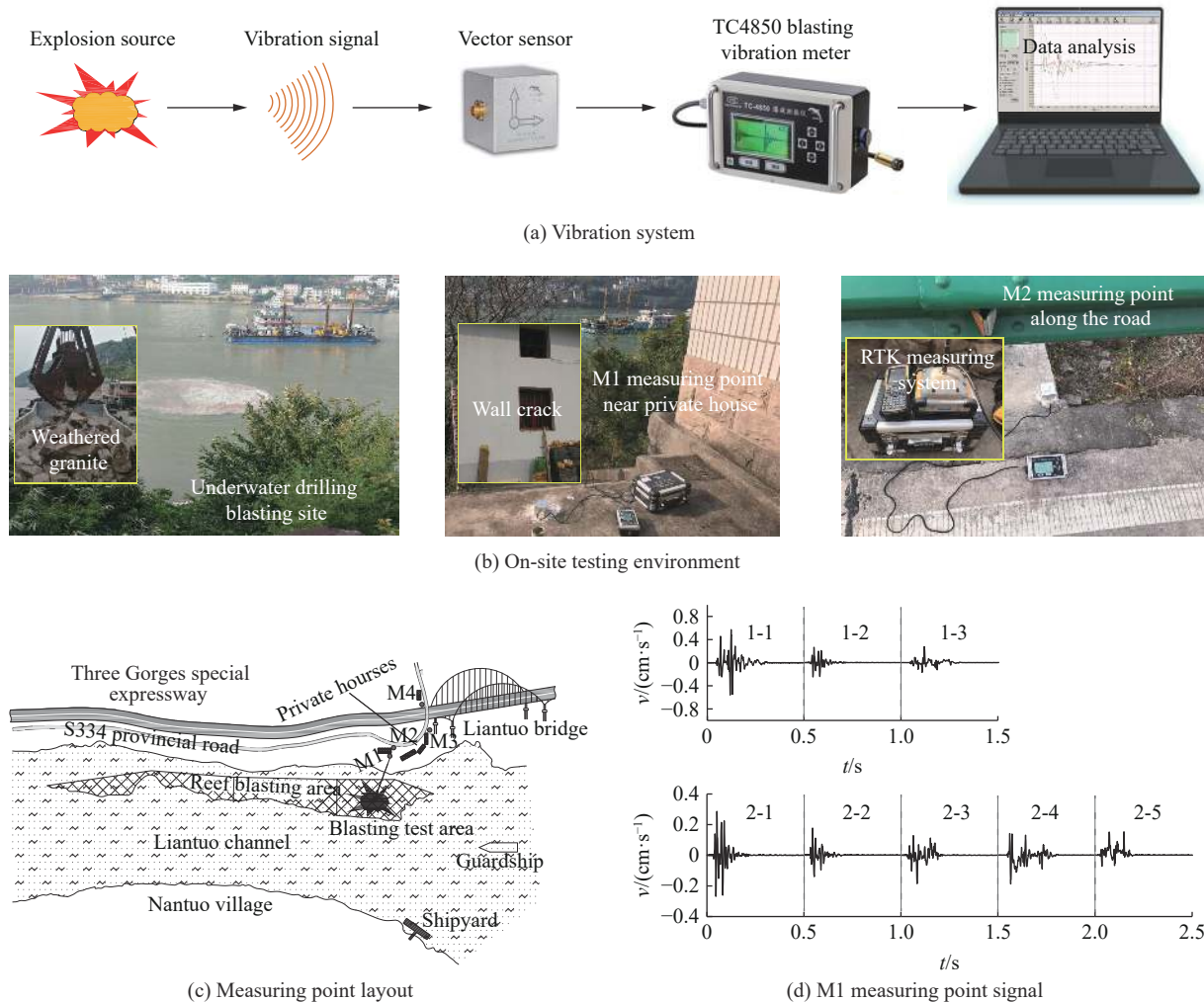


图 1 爆破测振系统及测点布设

Fig. 1 Diagrams of blasting vibration measuring system and measuring point layout

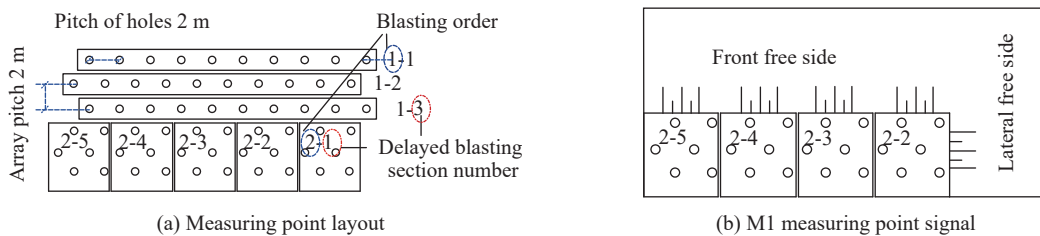


图 2 炮孔分布及自由面

Fig. 2 Schematic diagrams of blast hole distribution and free surface

两次起爆炮孔装药结构相同, 总装药量均为 600 kg, 孔距为 2 m, 排距为 2 m, 基岩钻孔深度为 7 m, 堵塞长度为 1 m, 钻孔直径为 90 mm; 选用 2 号岩石乳化炸药, 药柱直径为 70 mm, 线密度为 3.33 kg/m, 其中第 1 次起爆最大段药量为 200 kg, 第 2 次起爆最大段药量为 120 kg。

2 爆破振动信号的时频分析

对于水下爆破振动信号, 接近水中既有桥墩基础、灯塔设施及岸边的重要建(构)筑物固有频率 10~50 Hz 的低频信号所含有的地震波能量往往更受关注^[11]。采用小波变换的意义在于, 对爆破振动信号的低频信号和低频信号进行不同深度的分解: 对低频信号给予短时频宽度, 提高频域分辨率; 对于高频信号, 给予长时频宽度, 使它在时域分辨率上得以细化^[12]。正是因为小波分解的这个特性, 才能更精细地分析实测爆破振动信号的低频部分能量因子与频率因子的特征关系, 更清晰地认识爆破自由面数量对水下钻孔爆破效果及能量分布特征。

如图 1(c) 所示, 在爆破振动监测数据中, 因为半秒差爆破, 离爆源较近的测点可分辨不同段别爆破的振动信号, 而这些信号又可表征其爆破时的自由面数量。图 3 为 M1 监测点记录的垂直向振动速度分量曲线。第 1 次爆破爆心距为 142 m, 装药量为 200 kg, 分别具有 1 个自由面和 2 个自由面; 第 1 次爆破爆心距为 148 m, 装药量为 120 kg, 分别具有 2 个自由面和 3 个自由面。

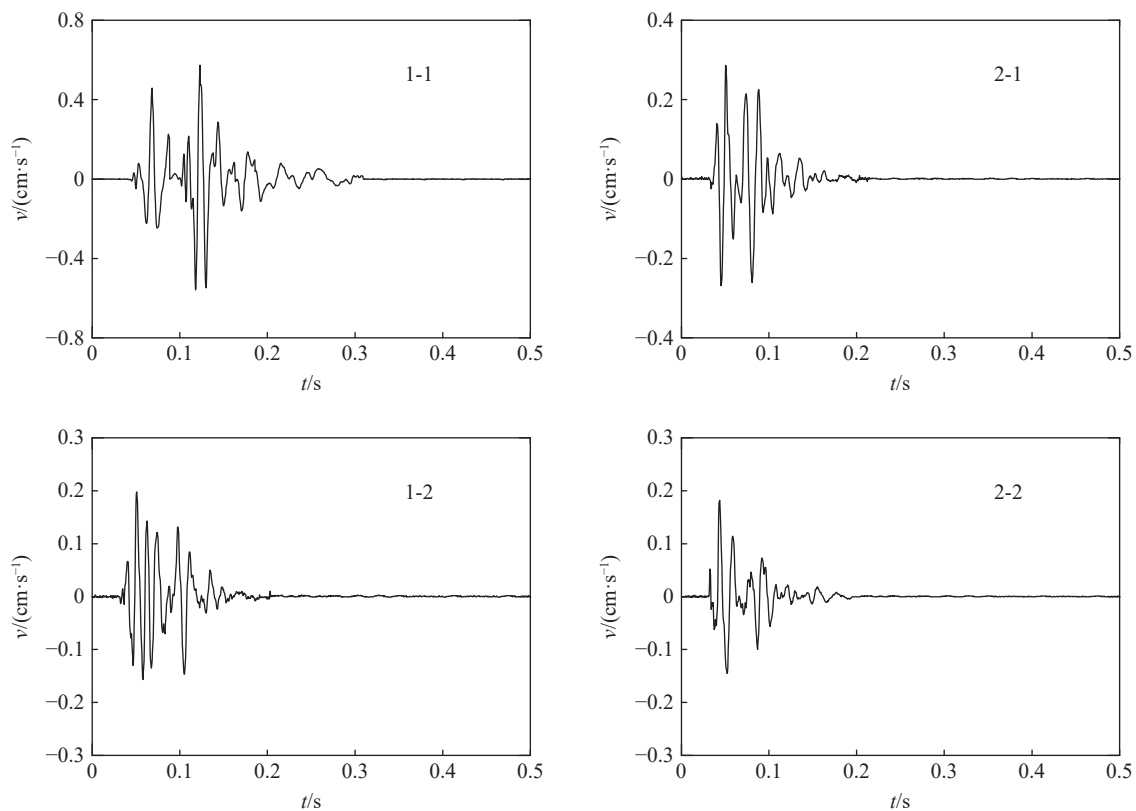


图 3 实测爆破振动信号的垂向速度曲线

Fig. 3 Vertical velocity curves of monitored blasting vibration signals

2.1 频带峰值质点振动速度分析

本次振动信号监测采样频率为 2 000 Hz, 根据 Shannon 采样定理, 其 Nyquist 频率为 1 000 Hz。进行小波时频特性分析时, 结合 Daubechies 小波系列较好的紧支撑性、光滑性以及近似对称性, 采用改进 db 函数的较优小波基 sym8^[13] 对实测爆破地震波进行 7 层小波分解, 分解频带见表 1。得到 8 个频带的小波分解系数后, 采用 wrcoef 函数进行分解信号的重构, 便可得到不同频带的爆破振动分量曲线, 图 4 为小波分析提取的爆破信号 1-1 振动分量曲线。类似地, 可得到不同自由面爆破振动信号各频带振动分量的质点峰值振动速度 PPV, 如图 5 所示。

由爆破振动信号各频带 PPV 分布可知: 不同爆破自由面的振动信号在 d6 频带 (15.625~31.25 Hz) 内, PPV 突变达到顶峰; 整体 PPV 随着频带由低到高呈先急剧增大、后缓慢减小的趋势, d8 和 d7 低频带内自由面数量增加对 PPV 的影响波动不大; 具体分析 d6 主频带的 PPV 时, 比较信号 1-1 和 1-2 发现, 自

由面数量由 1 增加到 2, 频带 PPV 由 0.57 cm/s 降低至 0.198 cm/s, 降低约 65%, 比较信号 2-1 和 2-2 发现, 自由面数量由 2 增加到 3, 频带 PPV 由 0.29 cm/s 降低至 0.182 cm/s, 降低约 37%, 显然, 自由面数量的增加会引起频带 PPV 降低。

表 1 爆破振动信号的能量分布

Table 1 Energy distribution of blasting vibration signals

频带	频率/Hz	频带能量/(mm ² ·s ⁻²)				能量占比/%			
		1-1	1-2	2-1	2-2	1-1	1-2	2-1	2-2
d8	0~7.8125	2.6287	0.1087	0.8633	0.3083	0.10	0.04	0.51	0.919
d7	7.8125~15.625	24.4471	0.1631	2.5392	0.4864	0.93	0.06	1.50	1.450
d6	15.625~31.25	2147.6642	194.0952	117.3110	17.4006	81.70	71.40	69.30	51.890
d5	31.25~62.5	312.8177	64.6168	37.8002	11.1425	11.90	23.77	22.33	33.228
d4	62.5~125	105.4117	8.9708	8.1254	4.1473	4.01	3.30	4.80	12.368
d3	125~250	26.2872	3.2621	2.6069	0.0377	1.00	1.20	1.54	0.112
d2	250~500	7.0975	0.5709	0.0288	0.0103	0.27	0.21	0.017	0.031
d1	500~1000	2.3658	0.0054	0.0005	0.0003	0.09	0.02	0.003	0.001
总和		2628.72	271.79	169.28	33.53				

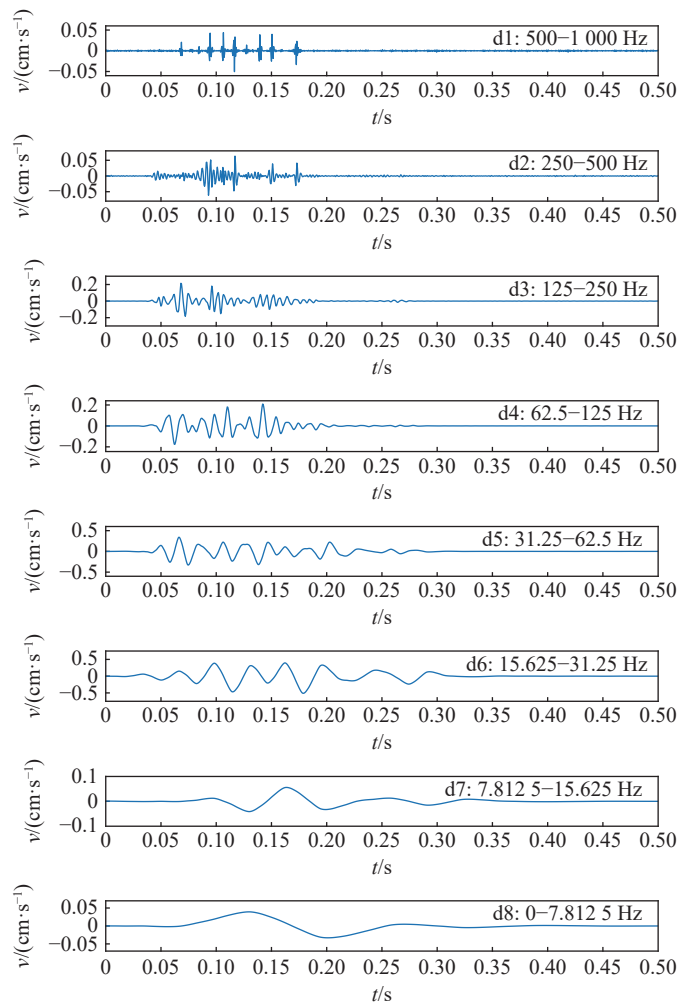


图 4 信号 1-1 在不同频带的爆破振动分量

Fig. 4 Blasting vibration components of signal 1-1 at different frequency bands

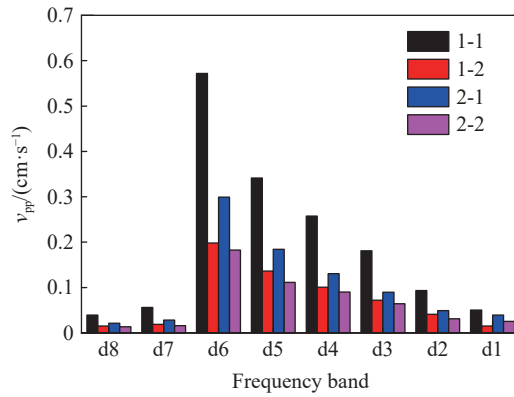


图 5 不同频带爆破振动信号的 PPV 分布

Fig. 5 PPV's distributions of blasting vibration signals at different frequency bands

2.2 频带能量分析

将爆破振动信号 $s(t)$ 进行层次为 N 的小波分解重构, 对应信号的总能量为^[14]:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t)dt = \sum_{i=0}^N \int_{-\infty}^{+\infty} g_i^2(t)dt + \sum_{m \neq n} \int_{-\infty}^{+\infty} g_m(t)g_n(t)dt \quad (1)$$

由小波函数的正交性可知, 式 (1) 等号右边第 2 项为零, 可以简化为:

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

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

N 层小波分解, 各频带爆破振动分量的小波频带能量为:

$$E_0 = \sum_{n=1}^M |a_N(n)|^2 \quad (3)$$

$$E_i = \sum_{n=1}^M |d_i(n)|^2 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: M 为采样点个数, $a_N(n)$ 为爆破振动信号小波分解的第 N 层逼近系数, $d_i(n)$ 为爆破振动信号小波分解的第 i 层细节系数。

各频带的能量占总能量的比例为:

$$\varepsilon_j = E_j / (E_0 + E_i) \quad (5)$$

根据式(1)~(5), 使用 Matlab 编程可获得不同数量自由面爆破振动信号的总能量和小波频带能量分布。

爆破振动信号 1-1 等频段能量及占比见表 1。

2.2.1 自由面与爆破振动信号总能量的关系

由表 1, 可得不同自由面个数爆破振动信号的能量特征如下。

(1) 比较两次不同爆破过程, 开槽爆破振动能量比后续分段爆破振动能量大得多。信号 1-1 段的装药量是信号 2-1 段的 1.6 倍, 而总能量是 15.53 倍。这是因为, 水下开槽爆破受单一自由面限制, 炸药爆破能量大部分以地震能量形式消耗了。而当自由面数量为 2 时, 信号的总能量与装药量呈正相关。

(2) 比较同一次爆破, 单自由面爆破振动能量比多自由面爆破振动的高许多。信号 1-1 段的装药量和信号 1-2 段的相同, 但前者振动总能量是后者的 9.7 倍。信号 2-1 的振动总能量是信号 2-2 的 5.05 倍。这里, 引入比振动能 λ_E , 即某段爆破振动总能量与段装药量的比。单自由面爆破振动信号 1-1 的

λ_E 为 $13.14 \text{ mm}^2/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$, 双自由面爆破振动信号 1-2 的 λ_E 为 $1.36 \text{ mm}^2/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$, 3 个自由面爆破振动信号 2-2 的 λ_E 为 $0.28 \text{ mm}^2/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$ 。可以明显看出, 自由面数量越多, λ_E 越小。

2.2.2 自由面与爆破振动信号各频带能量分布的关系

将表 1 的爆破振动信号各频带数据制成三维能量分布图, 如图 6 所示。可以发现, 各段信号能量主要集中在 d6 频带 ($15.625\sim 31.25 \text{ Hz}$) 内, 高频带所占比例较少。第 1 次爆破中, 随着自由面数量的增加, d6 频带能量比例由 81.70% 降低到 71.40%, d5 频带 ($31.25\sim 62.5 \text{ Hz}$) 内能量比例由 11.90% 增加到 23.77%; 类似地, 第 2 次爆破中, d6 频带能量比例由 69.30% 降低到 51.89%, d5 频带能量比例由 22.33% 增加到 33.23%。不难发现, 增加自由面数可使爆破振动能量向高频集中, 充分利用爆破自由面这种特性, 能够避开建(构)筑物的固有振动频率。

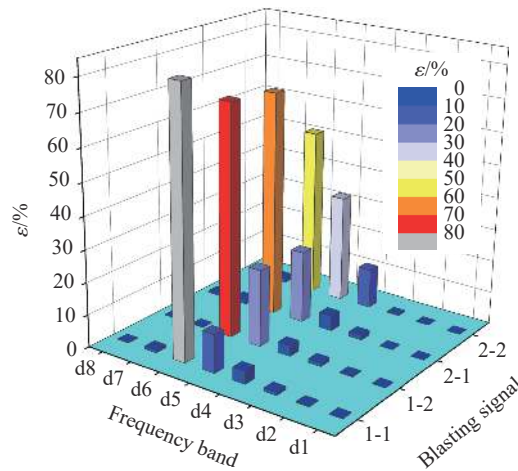


图 6 爆破振动信号各频带能量分布

Fig. 6 Energy distributions of blasting vibration signals at different frequency bands

3 自由面数量对爆破振动影响的数值分析

3.1 计算模型

爆破测振仪常需刚性连接在坚硬的基础上, 因此监测点多集中在 100 m 范围外河岸处, 且水下爆破振动数据的随机性和波动性较大。为进一步探究爆破近区自由面对爆破振动衰减的影响, 采用非线性显式动力学软件 LSDYNA 对上述实验中第 2 次起爆前两段进行数值模拟, 比较相同钻爆条件下 2 个临空面和 3 个临空面的爆破效果。

为了在空间上完整、准确地模拟爆破破岩过程, 在爆炸近区大变形和抛掷区域采用 SPH 算法, 而在爆破中远区采用 FEM 算法^[15]。图 7 为根据实际炮孔情况建立的三维水下爆破数值模型。炸药采用 2 号岩石乳化炸药连续耦合装药, 炮孔间距为 2 m, 孔深为 7 m, 上覆水深为 20 m。炮孔分两段起爆, 每次起爆 6 个炮孔。炮孔前排为开槽爆破后生成的既有爆破自由面, 每隔 10 m 布设一个爆破振动监测点。模型左侧和上部设置为自由边界, 其他边界设置为无反射边界, 以减小边界应力波反射影响。

3.2 模型材料

2 号岩石乳化炸药采用高能炸药模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 炸药爆炸过程中爆轰产物压力、能量和体积间的关系选用 JWL 状态方程:

$$p(V, E) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

式中: p 为爆轰产物的压力, V 为相对体积, E 为炸药初始比内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为 JWL 方程的独立

常数。装药密度 $\rho=1.3 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D=4000 \text{ m/s}$, 根据文献 [16], JWL 状态参数分别为: $A=214 \text{ GPa}$, $B=0.18 \text{ GPa}$, $R_1=4.2$, $R_2=0.9$, $w=0.15$, $E=4.2 \text{ MJ/m}^3$ 。

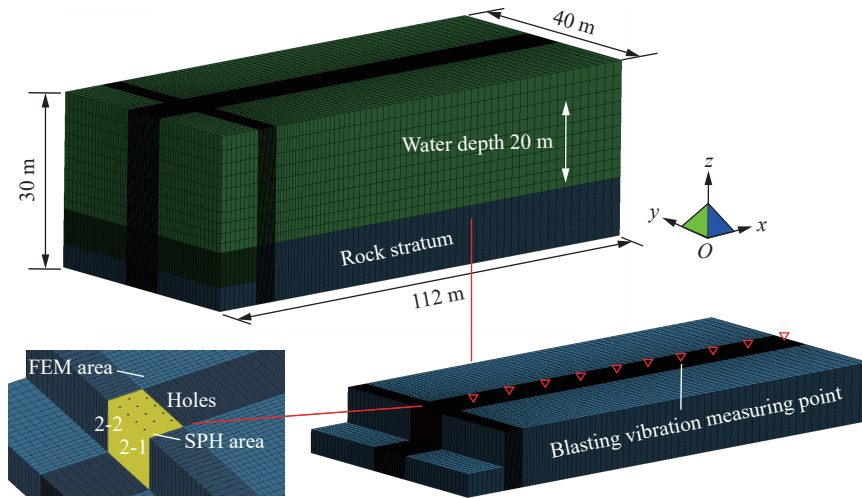


图 7 水下爆破的三维数值模型

Fig. 7 The three-dimensional numerical model for underwater blasting

空气及水介质材料采用 MAT_NULL 本构模型, 并结合线性多项式状态方程 EOS_Grüneisen 模拟水体压力:

$$p_w = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - \alpha \mu^2/2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2/(1 + \mu) - S_3 \mu^3/(1 + \mu)]} + (\gamma_0 + \alpha \mu)E \quad (7)$$

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1 \quad (8)$$

式中: p_w 为水压力, E 为比内能, ρ 为材料密度, ρ_0 为材料初始密度, c 为介质声速, γ_0 , S_1 , S_2 , S_3 均为状态方程常数, α 为 Grüneisen 系数修正项, 取 $\rho_0=1.0 \text{ g/cm}^3$, $c=1480 \text{ m/s}$, $S_1=2.56$, $S_2=0.986$, $S_3=1.2268$, $\gamma_0=0.5$, $E=0$ [17]。

岩石采用 HJC 模型, 该模型考虑了由等效塑形应变和塑形体积应变引起的损伤累积, 常被用来描述岩石变形、破坏及损伤特性 [18-19]。计算中, 具体参数见表 2。

表 2 岩石的 HJC 模型主要参数

Table 2 HJC model parameters of rock

密度 $\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	剪切模量 G/GPa	黏性常数 A	压力强化系数 B	应变率系数 C	硬化指数 N	静态单轴抗压 强度 f_c/MPa	最大拉应力 T/MPa	归一化最强值 $S_{t,max}$
2.6	7.42	0.3	2.01	0.0097	0.7	113	11.3	11
损伤常数 D_1	损伤常数 D_2	压力常数 K_1	压力常数 K_2	压力常数 K_3	压实应变 μ_{lock}	压碎体压力 p_{crush}/MPa	压实应力 p_{lock}/MPa	破碎体积应变 μ_{crush}
0.4	1	0.085	-0.171	0.208	0.1	38	800	0.004

3.3 结果分析

为了便利地观察炸药起爆后炮孔附近岩体的破碎和抛掷过程, 单独选取岩体单元进行分析。由炮孔附近岩石单元 SPH 粒子的运动轨迹(见图 8)可以看出: 左右两侧由于受到岩石的夹制, 炸药起爆后岩石的开裂和鼓包先从前排和上部两个自由面方向开始运动; 前段爆破产生的岩石破碎面为后段爆破提供了新的侧向爆生自由面, 后段爆破产生的能量在 3 个自由面方向迅速释放, 用于破碎和通过爆生气体逸散的能量增加, 岩体抛掷范围增大, 而作用于保留岩体并转化为振动能的能量减少。

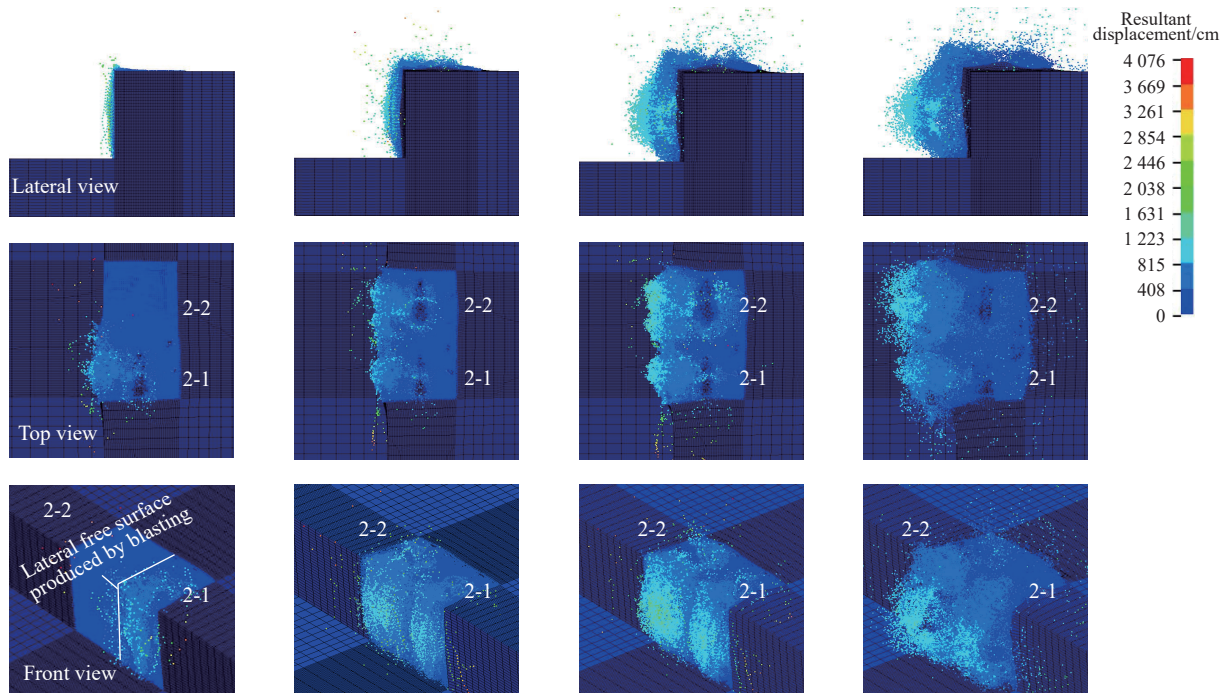


图 8 不同段爆破炮孔近区的破碎过程

Fig. 8 The crushing process near the hole of different blasting sections

为了定量评价自由面对爆破振动的影响, 后段爆破诱发的质点振动峰值速度 $v_{pp,i}$ 较前段 $v_{pp,i-1}$ 的降低率为:

$$\eta = 1 - \frac{v_{pp,i-1}}{v_{pp,i}} \quad (9)$$

平均降低率为:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta(R_i) \quad (10)$$

式中: $\eta(R_i)$ 为不同爆心距处的 PPV 降低率。

实际工程中, 采用传统萨道夫斯基公式对爆破数据进行回归分析, 预测某点的振动峰值速度:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (11)$$

式中: Q 为单段药量, R 为爆心距, K 、 α 为与介质和爆破条件有关的衰减系数。

根据传统爆破振动衰减公式可知, 当不同段炸药的装药量和爆心距相同时, 爆破产生的质点峰值振动速度应该相等, 这显然与现场爆破测试和数值计算结果不符。如图 9 所示, 统计数值模拟中两段爆破在不同爆心距处的 PPV 可知, $v_{pp,2-2}$ 均小于 $v_{pp,2-1}$, 后段爆破诱发的质点振动峰值速度降低率为 28%~39%, 平均降低率为 33.96%, 与时频分析中频带 PPV 衰减规律相似。

为了对比不同自由面数的爆破振动信号衰减规律, 对两段爆破质点峰值振动速度进行非线性回归。如图 10 所示, 具有 2 个自由面的前段爆破 K 、 α 分别为 1.375 和 3.92, 3 个自由面的后段爆破 K 、 α 分别为 0.976 和 3.73, 随着自由面数量增多, 衰减公式中 K 有明显降低, α 变化不显著。这表明, 后段爆破因新增了 1 个侧向自由面, 岩体夹制作用减小, 弱化了向侧向方面传播振动能量。因此, 在实际水下爆破工程中, 在相同爆破区域岩体处的自由面个数是随着爆破施工进度不断变化的, 用恒定的 K 、 α 来预测质点振动速度常会错误地估计各段的控制药量, 放大安全控制的风险并影响爆破施工效率。

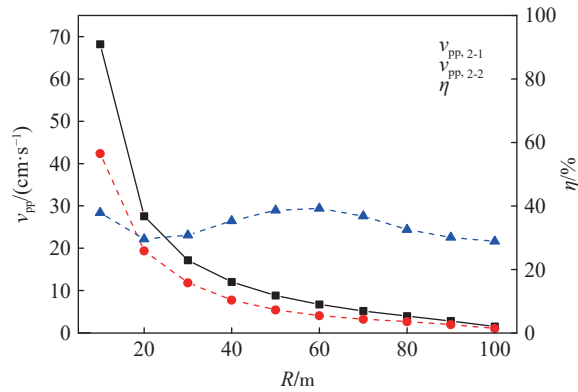


图 9 不同自由面 PPV 随爆心距的衰减

Fig. 9 PPV attenuation of different free surfaces with detonation center distances

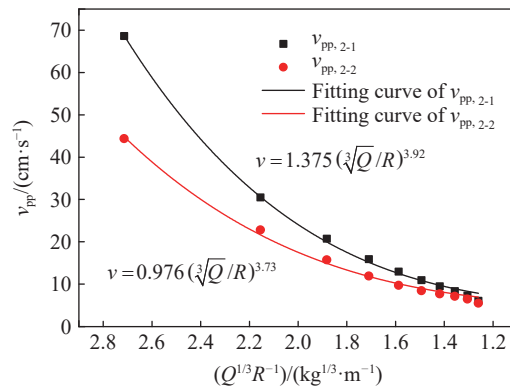


图 10 不同自由面爆破振动萨氏公式的非线性回归

Fig. 10 Non-linear regression of different free-surface blasting vibration formulas

4 结 论

基于小波时频分析,依据三峡大坝至葛洲坝枢纽河段水下钻孔爆破振动信号,分析其能量分布和振动衰减规律,得出以下主要结论。

(1)水下钻孔单一自由面爆破时,炸药产生的能量趋于自由面方向快速释放,且大部分转化为振动能量;装药结构和段装药量相同时,不同自由面数量的水下爆破地震波振动能量和衰减规律存在差异,随着自由面的增多,振动总能量减少,爆破能量更多用于岩体破碎和克服水阻力及抛掷作用。由此看来,增加自由面可以有效地减少爆破振动。

(2)水下钻孔爆破产生的能量主要集中在低频带(15.625~31.25 Hz),随着自由面增多,水下钻孔爆破振动信号主频向中高频发展。实际工程中,可以增加自由面,改变不同频带的能量分布,从而避开紧邻(构)筑物及其他水工设施较低的自振频率,减少共振产生的危害。

(3)水下钻孔爆破自由面显著影响 PPV 大小,不同频带的 PPV 由低到高,先急剧增大、后缓慢减小。通过数值模拟发现,自由面数量对振动峰值衰减规律也有影响,具体反映在衰减系数 K 上。因此,在水下爆破预测质点峰值振动速度时,必须考虑自由面数量的影响。

参考文献:

[1] 李洪涛,杨兴国,舒大强,等.不同爆源形式的爆破地震能量分布特征[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(1):30-34. DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.01.025.

LI H T, YANG X G, SHU D Q, et al. Study on energy distribution characteristics of seismic waves induced by different forms

- of blasting resource [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(1): 30–34. DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.01.025.
- [2] 吴从师, 徐荣文, 张庆彬. 自由面对爆破振动信号能量分布特征的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 907–914. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0907-08.
- WU C S, XU R W, ZHANG Q B. Influence of free surface on energy distribution characteristics of blasting vibration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 907–914. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0907-08.
- [3] 汪万红, 冷振东, 卢文波, 等. 临空面数量对爆破振动特征的影响研究 [J]. *矿冶工程*, 2018, 38(6): 17–22. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.06.004.
- WANG W H, LENG Z D, LU W B, et al. Effect of free face numbers on blasting vibration in rock blasting [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018, 38(6): 17–22. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.06.004.
- [4] 杨建华, 卢文波, 严鹏, 等. 全断面开挖爆破产生的自由面对振动频率的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(7): 193–197. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.07.029.
- YANG J H, LU W B, YAN P, et al. Influences of blast-created free surfaces on blasting vibration frequencies during full-face excavation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 193–197. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.07.029.
- [5] 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): 38–40, 56. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2009.04.010.
- CHEN X M, XIAO Z X, PU C J. Experimental study on influence blasting earthquake strength to free faces [J]. *Blasting*, 2009, 26(4): 38–40, 56. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2009.04.010.
- [6] 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): 92–95. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2005.04.026.
- MA R H, SHI D Y. Time-frequency analysis of blasting vibration signal [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(4): 92–95. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2005.04.026.
- [7] 孙苗, 吴立, 周玉纯, 等. 水下钻孔爆破地震波信号的最优降噪光滑模型 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(8): 31–37. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.180601.
- SUN M, WU L, ZHOU Y C, et al. Optimal denoising smooth model of underwater drilling blasting seismic wave signal [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(8): 31–37. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.180601.
- [8] 孙苗, 吴立, 袁青, 等. 基于 CEEMDAN 的爆破地震波信号时频分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 76–82. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190179.
- SUN M, WU L, YANG Q, et al. Time-Frequency analysis of blasting seismic signal based on CEEMDAN [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(3): 76–82. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190179.
- [9] 李夕兵, 凌同华. 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2409–2413. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2005.14.002.
- LI X B, LING T H. Response spectrum analysis of ground vibration induced by single deck and multi-deck blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2409–2413. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2005.14.002.
- [10] 张声辉, 刘连生, 钟清亮, 等. 露天边坡爆破地震波能量分布特征研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(7): 224–232. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.07.032.
- ZHANG S H, LIU L S, ZHONG Q L, et al. Energy distribution characteristics of blast seismic wave on open pit slope [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(7): 224–232. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.07.032.
- [11] 陈江海, 顾文彬, 王振雄, 等. 洋山港水下多孔爆破陆地和水底震动实地测试与分析 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(24): 207–212, 220. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.24.033.
- CHEN J H, GU W B, WANG Z X, et al. Field measurement and signal analysis of land and water bottom vibrations induced by underwater multi-hole blasting at Yangshan Port [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(24): 207–212, 220. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.24.033.
- [12] 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): 121–124, 129. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.08.038.
- ZHONG G S, FANG Y G, XU G Y. Study on blasting vibration effect assessment of structure based on wavelet transform [J].

- Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 121–124, 129. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.08.038.
- [13] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧, 等. 爆心距对爆破振动信号频带能量分布的影响 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(2): 53–55. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2007.02.013.
- LING T H, LI X B, WANG G Y, et al. Influence of distance from blasting center on frequency bands energy distribution of blasting vibration signals [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(2): 53–55. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2007.02.013.
- [14] 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: 92–94.
- [15] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. SPH-FEM 耦合爆破损伤分析方法的实现与验证 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2740–2748. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0104.
- HU Y G, LU W B, CHEN M, et al. Implementation and verification of SPH-FEM coupling blasting damage analytical method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2740–2748. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0104.
- [16] 冷振东, 卢文波, 胡浩然, 等. 爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1815–1822. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1499.
- LENG Z D, LU W B, HU H R, et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1815–1822. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1499.
- [17] 彭亚雄. 水下钻孔爆破地震波与水击波协同作用下桥墩动力响应特征研究 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2018: 83–84.
- [18] 李建阳, 李永池, 高光发. 混凝土水下径向不耦合爆破特性研究 [J]. *工程爆破*, 2010, 16(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2010.01.001.
- LI J Y, LI Y C, GAO G F. Study on blasting characteristics of underwater concrete with radial decoupling charge [J]. *Engineering Blasting*, 2010, 16(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2010.01.001.
- [19] 鞠杨, 环小丰, 宋振铎, 等. 损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(2): 136–142. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0136-07.
- JU Y, HUAN X F, SONG Z D, et al. Numerical analyses of blast wave stress propagation and damage evolution in rock masses [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 136–142. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0136-07.

(责任编辑 丁峰)