

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0255

下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析*

何理^{1,2,3}, 钟东望², 李鹏¹, 宋琨³, 司剑峰²

- (1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;
2. 武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430065;
3. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为解决边坡与下穿近接隧道协同爆破施工安全难题, 结合某石油储备基地扩建项目, 运用量纲推导、现场实验与信号分析相结合的方法, 构建考虑高程影响的振动峰值速度公式, 研究隧道爆破振动能量沿坡面的衰减机制。结果显示, 边坡同台阶边沿处质点振速峰值大于坡脚处, 坡面局部存在振动速度高程放大效应; 引入相对坡度 H/D 的爆破振动模型对坡面质点振速预测精度高, 可反映边坡角对高程放大效应的影响; 振动速度及能量沿坡面均呈现出近区衰减快、远区衰减慢的传播特性, 同时隧道爆破振动能量集中分布在 $0\sim 300$ Hz 范围的多个子振频带, 且高频能量沿坡面衰减更快, 能量卓越频带中值以指数形式衰减, 能量最终向低频带集中。

关键词: 边坡; 隧道爆破; 量纲分析; 峰值速度; 振动能量; 高程放大效应; 相对坡度

中图分类号: O389; O383.2 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel

HE Li^{1,2,3}, ZHONG Dongwang², LI Peng¹, SONG Kun³, SI Jianfeng²

- (1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China;
2. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China;
3. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: In order to solve the safety problem in the construction of slope and underpass adjacent tunnel by cooperative blasting, based on the expansion project of a domestic petroleum reserve base, the formula of peak vibration velocity considering elevation effect was established, and the vibration energy attenuation mechanism of tunnel blasting along the slope surface was systematically studied by using method combining dimension derivation, field test and signal analysis. The results show that the peak value of particle velocity at the edge of the same step is larger than that at the foot of the inner slope, and there is an elevation amplification effect of vibration velocity on the local slope surface. The blasting vibration formula with relative slope H/D has high accuracy in predicting the particle vibration velocity on the slope, and can reflect the influence of slope angle on the elevation amplification effect of vibration velocity. The vibration velocity and energy decay faster in the

* 收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574184, 51904210); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20181109); 水利部岩土力学与工程重点实验室开放基金(CKWV2018473/KY); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(2017KDZ02); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放基金(Y201717)

第一作者: 何理(1986—), 男, 博士, 副教授, emp-heli@hotmail.com

通信作者: 钟东望(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 1057831589@qq.com

near region and slower in the far region with the increase of propagation distance. The energy of tunnel blasting vibration is concentrated in several Sub-vibration frequency bands in the range of 0-300 Hz, and the high frequency energy decays faster along slope surface. The median of dominant frequency band decays exponentially, and the energy concentrates in the low frequency band eventually.

Keywords: slope; tunnel blasting; dimensional analysis; peak velocity; vibration energy; elevation amplification effect; relative slope

基于高效、安全、经济的原则,边坡与近接隧道通常采用协同爆破施工方案,即在隧道工作面向边坡面方向推进至最小安全距离时,暂停隧道爆破,爆破工作全部转移至边坡开挖,待隧道出口部位的坡面开挖并加固完毕,再由坡面向坡体内(或由掌子面向坡面)开挖隧道,即隧道保留部分的开挖,直至隧道贯通。协同爆破施工方案避免了边坡与隧道同时爆破,极大降低了彼此之间的不良影响。然而,由于爆破危害大,且工程质量要求高,在邻近部分各自实施爆破时,依然存在较大风险^[1]。

目前对爆破振动下边坡稳定的相关研究都集中在对边坡开挖的研究上,爆破振动源处于边坡之中,针对下穿隧道爆破施工对边坡的动力响应与稳定性影响研究较为少见。在隧道开挖过程中,爆破位于掌子面前方,距隧道结构之上的边坡有一定距离,而边坡一般位于爆破直接破坏区以外,处于振动扰动区,这与边坡开挖的爆破振动影响具有本质区别。黄志强等^[2]利用弹簧和阻尼约束替代顺层岩体层间作用,建立了隧道洞口顺层边坡振动激励下的动力响应模型,提出了用于顺层边坡在爆破振动作用下安全判定的计算方法。宋杰^[3]、金华东等^[4]、黄诗渊^[5]均通过数值模拟揭示了隧道爆破振动沿坡面的传播规律及各向振速分布特征,同时徐金贵等^[6]针对不同影响因素采用试验研究方法揭示了傍山隧道爆破振动沿不同类型坡面的传播规律,并得到了边坡形态、最终边坡角和台阶坡面角对振动传播的影响机制。贾党育^[7]利用FLAC^{3D}模拟研究得到隧道爆破施工产生的振动效应对邻近边坡稳定性的影响规律。兰明雄等^[8]基于小净距隧道开挖爆破振动监测,通过对振动信号的小波包分析揭示了地震波沿既有隧道传播过程的频谱及能量变化规律。蒋丽丽等^[9]应用小波包理论分析了岩石边坡开挖爆破振动沿坡面传播的能量演化机制,得到了爆破地震波沿边坡传播过程中主频与总能量变化规律及不同频带振速峰值和能量的变化规律。张声辉等^[10]利用小波变换与反应谱分析方法,对露天台阶爆破不同高程的振动信号在各频带间的能量分布特征进行了研究。周建敏^[11]综合利用小波包分析与数值模拟研究得到边坡结构面对爆破地震波峰值及信号能量的衰减规律。

然而,由于爆破振动响应及传播规律随工程地质、地形及结构形式特征等因素不同,现有的研究成果对下穿隧道爆破施工对上部边坡的振动响应特性认识并不一致,对于隧道开挖爆破条件下边坡振动能量演化机制的研究成果并不多,有待进一步研究;而露天边坡爆破开挖对下穿隧道稳定性影响的研究更是少见。本文结合国内某石油储备基地露天高陡边坡与下穿隧道协同爆破工程实践,针对下穿隧道掘进爆破荷载激励下上部边坡振动响应及其能量传递进行深入研究,通过理论分析、现场测试和信号分析相结合的方法,分析隧道爆破振动沿坡面传播衰减规律,揭示坡面振动的高程放大效应,构建爆破振动预测模型,并结合小波包分析技术研究振动信号能量沿坡面的衰减耗散机制,以期对露天边坡与下穿近接隧道协同爆破施工设计与优化提供理论依据。

1 工程概况

1.1 露天边坡与下穿隧道协同爆破施工环境

该石油储备基地扩建项目涉及山体爆破开挖与输油管线隧道开挖等爆破工程。山体开采区地形整体呈二脊一沟特征,原状山体高处坡度较陡,坡角 $35\sim 45^\circ$,低处坡角较缓,为 $20\sim 30^\circ$,最高开采标高为+130 m,最低标高为+4.0 m,边坡设计共分9级放坡,各级平台宽度为3 m;山体表面多为黏土或粉质黏

土, 厚度不等, 往下分别为全风化、强风化、中风化、微风化晶屑玻屑凝灰岩, 大部岩体中等硬度, 可燃性和可钻性都较好。

为确保隧道围岩稳定, 下穿隧道开挖掌子面距离设计洞口一定距离时停止向前掘进, 转而进行上部露天边坡开挖爆破。当上部坡体爆破开挖区域移至隧道进洞口 15 m 范围内时, 为确保隧道围岩稳定与安全, 采用台阶分层、分块的爆破开挖方案, 即台阶高度不大于 8 m、单次爆破开挖宽度不大于 10 m; 待爆破施工区域移至隧道进洞口 15 m 范围外时, 可恢复正常台阶爆破施工方案(台阶爆破参数为: 孔径 115 mm, 孔深 14.3~16.9 m, 孔距 6 m, 排距 4 m), 待隧道出口部位的坡面开挖并加固完毕, 再由坡面向坡体内(或由掌子面向坡面)开挖隧道, 即隧道保留部分的开挖, 直至隧道贯通。

下穿隧道在距离进洞口分别为 94 m 与 294 m 处扩挖有长度均为 14 m 的隧道扩大段^[12]。本文针对隧道掘进爆破至距离坡面进口处 17m 时, 上部边坡的爆破振动响应特性及能量衰减耗散机制进行深入分析研究。边坡与隧道的空间布局见图 1 所示。

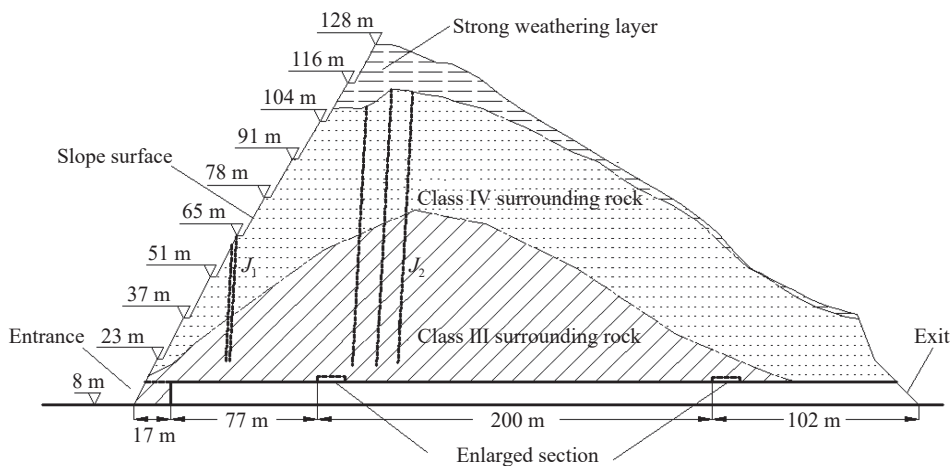


图 1 边坡与隧道的空间布局
Fig. 1 Spatial Distribution of slope and tunnel

1.2 隧道爆破参数

隧道断面分布炮孔共 86 个, 其中周边孔深 3.0 m, 孔距 0.45 m, 掏槽孔深 3.2 m, 孔距 2.0 m, 辅助孔深 3.0 m, 孔距 0.6 m, 最大单响药量 19.8 kg, 每个循环炸药量共计 105 kg。雷管段别 1~15 段, 共计 86 发。孔内微差, 联网采用“一把抓”方式, 每簇雷管不超过 20 发。周边孔用导爆索连线进行光面爆破, 分拱顶和两帮两组连接起爆。下穿隧道炮孔布置及爆破网路如图 2 所示。

1.3 现场实验方案

在坡面各级台阶测点处清除表面碎石, 使用水泥砂浆抹平, 水平楔入预制有螺纹孔的钢板, 振动速度传感器通过螺丝与钢板连接, 从而实现传感器与坡面刚性联接。在边坡各级台阶边沿及内侧坡脚处布置监测点, 振动传感器安装基座如图 3 所示。

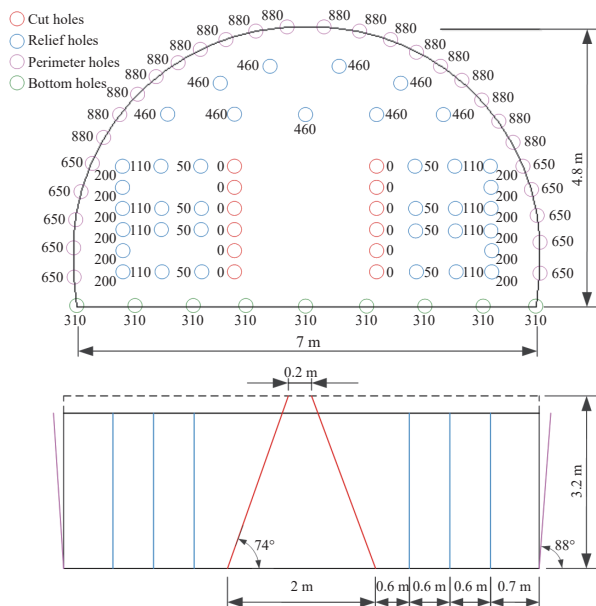


图 2 隧道炮孔布置及爆破网路
Fig. 2 Blasthole layout and blasting network of tunnel

1.4 爆破振动监测数据

实测得到坡面各台阶处垂直向质点振动速度峰值见表1。

2 爆破振动速度预测及其能量的小波包分析理论

2.1 爆破振动速度的量纲分析

爆破振动波是一种高度复杂的瞬态、非平稳随机信号,在正高差地形中的传播衰减规律受爆破方式、传播介质特性、传播距离及高程差等因素的影响。爆破振动是岩石介质弹性和惯性综合作用的结果,其弹性可通过泊松比 μ 和弹性模量 E 表征,惯性用密度 ρ 表征^[12]。由此,选取最大单响药量 Q 、水平爆心距 D 、岩体纵波速度 c_p 、高程差(垂直爆心距) H 、岩体弹模 E 、泊松比 μ 、密度 ρ 及振动频率 f 作为影响速度 v 的主要因素^[13],各变量量纲见表2。

表2中各变量的关系为:

$$v = F(Q, D, c_p, H, E, \mu, \rho, f) \quad (1)$$

式中:共9个变量,3个基本量纲(M、L、T),根据 Π 定理选取 D 、 c_p 、 Q 为独立变量,由此可建立6个无量纲变量 $\pi_1 = \frac{v}{c_p}$, $\pi_2 = \frac{fD}{c_p}$, $\pi_3 = \frac{D^3 E}{Q c_p^2}$, $\pi_4 = \frac{\rho}{Q D^{-3}}$, $\pi_5 = \frac{H}{D}$, $\pi_6 = 1$ 。

通过式(1)可得出:

$$\frac{v}{c_p} = F\left(\frac{fD}{c_p}, \frac{D^3 E}{Q c_p^2}, \frac{\rho}{Q D^{-3}}, \frac{H}{D}\right) \quad (2)$$

针对特定工况,岩体介质 E 、 μ 、 ρ 及 c_p 为常量,由此可推导出速度的相似准数方程:

$$V = K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D}\right)^\alpha (fD)^\beta \left(\frac{H}{D}\right)^\gamma \quad (3)$$

式中: K_1 为系数,与地质条件相关。



图3 振动传感器安装基座

Fig. 3 Mounting base of sensor

表1 坡面质点振动速度

Table 1 Particle vibration velocity on slope surface

振动信号	D/m	H/m	$v_{max}/(cm \cdot s^{-1})$
1-1	5.6	12.5	10.81
1-2	2.6		9.78
2-1	7.9	26.5	3.41
2-2	10.9		2.02
3-1	21.4	40.5	1.59
3-2	24.4		0.96
4-1	34.9	54.5	0.94
4-2	37.9		0.79
5-1	48.9	67.5	0.67
5-2	51.9		0.64
6-1	63.0	80.5	0.68
6-2	66.0		0.63
7-1	77.0	93.5	0.35
7-2	80.0		0.28
8-1	92.1	105.5	0.20
8-2	95.1		0.16
9	146.2	117.5	0.07

注: D 为水平爆心距; H 为垂直爆心距; v_{max} 为质点振动速度峰值;信号编号 $m-n$, m 表示台阶级数, $m=1, 2, 3, \dots, 9$; $n=1$ 表示台阶边沿处监测点, $n=2$ 表示内侧坡脚处监测点。

表2 各变量量纲

Table 2 Dimension of variables

量纲	Q	D	C_p	H	E	μ	ρ	f	V
M	1	0	0	0	1	0	1	0	0
L	0	1	1	1	-1	0	-3	0	1
T	0	0	-1	0	-2	0	0	-1	-1

注:表2中 M 为质量量纲, L 为长度量纲, T 为时间量纲。

由于爆破振动频率主要受爆破规模、岩体性质及爆心距等因素影响, 爆破规模及岩体性质确定情况下, 距爆区一定距离处质点振动频率 f 为^[14-15]:

$$f = \frac{k_f c_s^{7/5}}{Q^{1/3}} \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{2/5} \quad (4)$$

式中: k_f 为频率系数, $k_f=0.01\sim 0.03$; c_s 为横波速度, $m\cdot s^{-1}$; R 为振动监测点距爆源直线距离, m 。

将式(4)代入式(3), 可得:

$$v = K' \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{\alpha'} \left(\frac{R}{D} \right)^{\beta'} \left(\frac{H}{D} \right)^{\gamma'} \quad (5)$$

式中: K' 为与地质条件相关的系数, α' 为衰减系数, β' 为高程差系数, H/D 为相对坡度(振动监测点与爆源之间相对坡度), γ' 为相对坡度影响因子。

2.2 爆破振动能量的小波包分析理论

将爆破振动信号进行小波包分解时, 分解的层数应视具体信号的爆破参数及振动测试仪的采样率而定^[14]。工程爆破振动信号频率通常为 $5\sim 300$ Hz, 振动测试仪采样率现场设为 $1\ 000$ Hz, 由采样定理可得奈奎斯特频率为 500 Hz。结合岩石边坡结构动力响应特性^[16,17], 将实测爆破振动信号分解至 8 层, 进行 8 层分解后第 j 个频带重构信号 $S_{8,j}$ 对应的频率范围为 $[j\sim(j+1)]\times f_a/2^8$, 其中 $j=0, 1, 2, \dots, 2^8-1$, f_a 为分析频率, $f_a=1\ 000$ Hz, 则计算得到小波包分解最低频带为 $0\sim 1.95$ Hz。设 $S_{8,j}$ 对应的能量为 $E_{8,j}$, 则有:

$$E_{8,j} = \int |s_{8,j}|^2 dt = \sum_{i=1}^k |x_{j,i}|^2 \quad (6)$$

式中: $X_{j,i}$ 为重构信号 $S_{8,j}$ 各离散点幅值, 其中, $j=0, 1, \dots, 2^8-1$; $i=1, 2, \dots, k$, k 为信号采样点数。

则信号总能量为 E_0 为:

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^8-1} E_{8,j} \quad (7)$$

因此信号各频带能量分布为:

$$P_j = \frac{E_{8,j}}{E_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $j=0, 1, \dots, 2^8-1$ 。

3 数据分析与讨论

3.1 坡面振动速度传播衰减规律

将下穿隧道爆破开挖荷载激励下上部边坡坡面的振动速度分布示于图 4, 其中 T_x 表示第 x 级台阶。

由图 4 可以看出, 边坡同台阶边缘处质点振动速度峰值要高于台阶内侧坡脚处质点振动速度峰值, 存在显著的爆破振动速度放大效应, 且在边坡 T_2 、 T_3 台阶处该效应异常明显, 其局部放大系数达到 $1.66\sim 1.69$, 在边坡其他台阶局部放大系数仅为 $1.04\sim 1.25$ 。爆破地震波沿坡面传播至 T_5 台阶以前, 质点速度峰值 v_{max} 随传播距离(台阶高程)的增加不断减小, 但是传播到 T_6 台

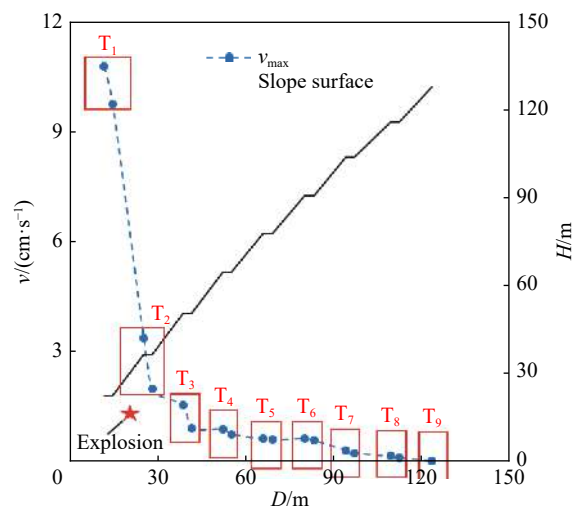


图 4 坡面不同高程振动速度分布
Fig. 4 Vibration velocity distribution at different elevations on slope

阶时,出现了 v_{\max} 不降反增的情况,此时 T_6 台阶边沿处质点振动速度峰值 0.68 cm/s,要高于 T_5 台阶边沿处的 0.67 cm/s 和坡脚处的 0.64 cm/s,而后又逐渐减小,说明在边坡局部范围出现了爆破振动速度的高程放大效应^[18]。总体上,边坡面上质点速度峰值 v_{\max} 随着传播距离的增加,其衰减趋势逐渐变缓、衰减速度逐渐变慢。

3.2 爆破振动速度预测模型

研究与实践表明,在平整地形条件下运用传统萨道夫斯基公式对质点速度峰值 v_{\max} 进行预报具有较高精度。但对于地形起伏较大的情况下,地形地貌对爆破振动波的影响机制极为复杂,此时需要考虑高程因素影响^[12,18-22]中提出了一系列能反应高程放大效应的爆破振动公式:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \tag{9}$$

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{R}{D} \right)^\beta \tag{10}$$

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

本文分别采用传统萨道夫斯基公式、式(5)、(9)~(11)对爆破振动实测数据进行多元线性回归分析,为了评价所建立预测模型的合理性和准确性,将各拟合曲线的拟合系数列于表3。

本文给出的爆破振动速度预测模型的拟合相关系数最高为 0.958,表明式(5)对坡面振动速度预测精度高,通过在模型中引入相对坡度 H/D 可真实反映爆破振动沿边坡面的传播衰减规律,而此相对坡度与高边坡坡度存在密切的关系。因此,在研究边坡爆破振动速度高程放大效应时需要考虑边坡坡度角这一重要影响因素。

3.3 爆破振动能量衰减耗散机制

在对振动信号进行小波包分析时,所选小波基的匹配程度直接影响到最终的分析结果。Daubechies 小波系列凭借其良好的紧支撑性、光滑性以及近似对称性,近年被广泛的应用于爆破振动信号分析中。Daubechies 小波系列按正整数 N 具有不同系列(dbN),目前 db5 和 db8 小波系列运用最为广泛,本文采用 db8 对振动信号进行小波包分析^[10,15]。基于式(6)~(8),利用 MATLAB 编制计算程序,分析计算得到各监测点爆破振动能量,见表4所示。

表3 振动速度预测模型及拟合系数

Table 3 Prediction model and correlation coefficient of vibration velocity

公式形式	振动速度预测模型	相关系数
$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha$	$v = 139.7 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.62}$	0.939
$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta$	$v = 62.2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^{0.51} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^{1.02}$	0.927
$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{R}{D} \right)^\beta$	$v = 208.5 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.69} \left(\frac{R}{D} \right)^{-0.21}$	0.941
$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta$	$v = 70.1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{4.61} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^{-3.49}$	0.954
$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{R}{D} \right)^\beta \left(\frac{H}{D} \right)^\gamma$	$v = 204.4 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^{1.34} \left(\frac{R}{D} \right)^{-6.16} \left(\frac{H}{D} \right)^{4.17}$	0.958

表4 各振动信号总能量

Table 4 Total energy of vibration signals

信号编号	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	5-2	6-1	6-2	7-1	7-2	8-1	8-2	9
总能量/mJ	1518.2	1770.9	262.3	122.9	33.3	15.8	11.2	7.6	5.0	3.8	3.8	4.9	2.8	1.8	1.5	1.2	0.2

结合表1及表4对各信号峰值振速及能量分别进行归一化处理^[23],归一化峰值速度及能量随距离的变化关系见图5。

由图5可以看出,各监测点处爆破振动信号峰值振速及总能量随爆心距的增加呈现出明显的衰减耗散趋势;爆破近区衰减快速,当水平距离达到 60 m 以上时,振动速度峰值与信号能量衰减趋势均趋于平缓。对比图中的速度衰减曲线和能量衰减曲线可以得到,二者具有极强的相似性,尽管爆破振动能量

大小主要取决于爆破振动速度、振动频率及振动持续时间三个影响因素^[15], 但爆破振动速度峰值在三者中起主导作用。

典型爆破振动信号在不同频带的能量分布见图 6 所示。各信号的能量集中频带分布见表 5。

由图 6 及表 5 可以看出, 爆破振动信号的能量在频域内分布较为广泛, 大都集中在 0~300 Hz 频带范围内, 在此基础上, 一般又可分为多个子振带; 随着传播距离的增加, 爆破振动信号高频部分能量衰减耗散快, 低频能量衰减耗散慢, 最终信号能量卓越频带向低频集中。当爆破地震波传播至第 6 级台阶(垂直爆心距为 80.5 m、水平爆心距为 63 m)以后, 振动信号能量卓越频带均集中在 65 Hz 以下, 尽管此时振动信号峰值振速与总能量值均较小, 但其低频能量成分大, 与边坡等构筑物自振频率更加接近, 容易造成共振破坏^[24]。因此实际施工过程中应注意加强远离隧道掘进中心的上部坡体及坡顶的振动监测与安全防护。

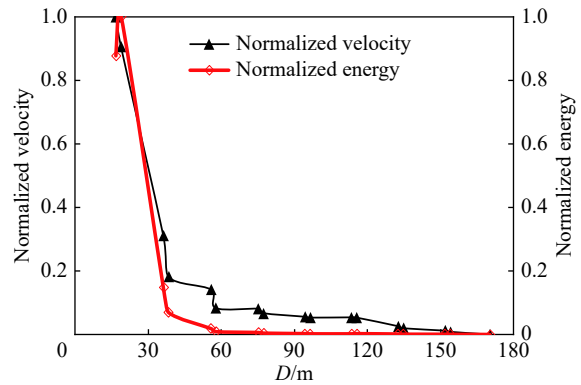


图 5 归一化速度和能量随距离的变化关系
Fig. 5 Relation of normalized velocity and energy with distance

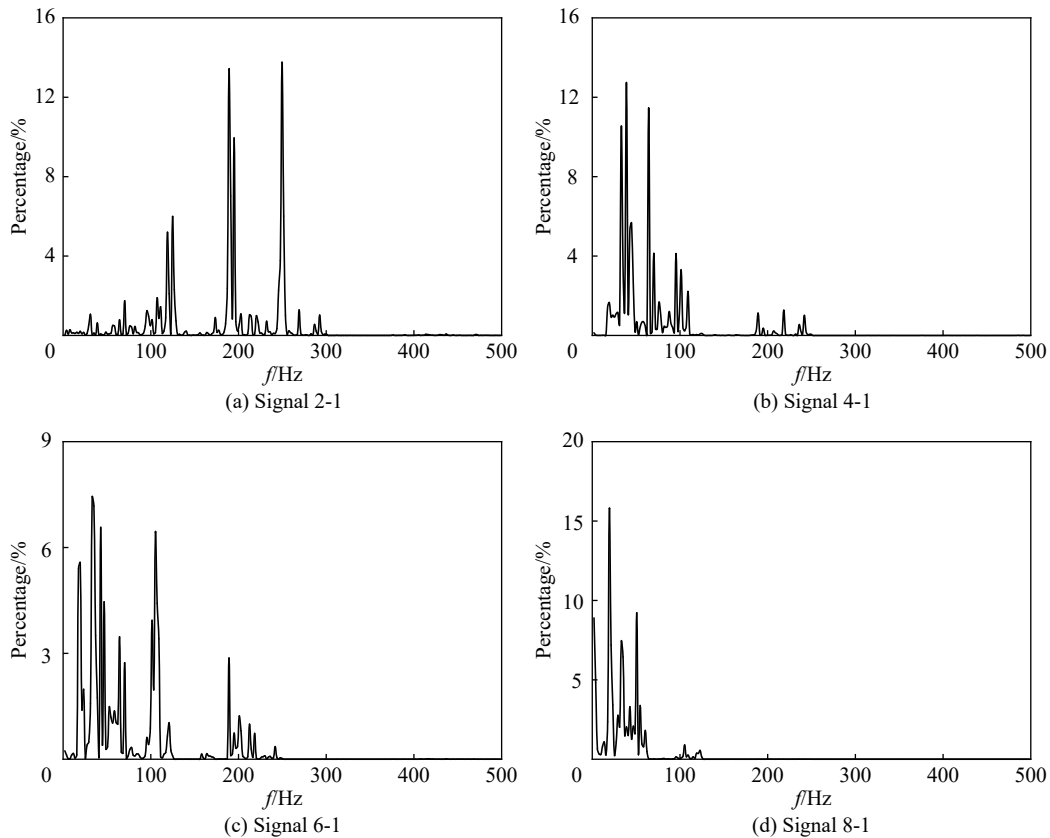


图 6 爆破振动信号各频带能量分布图

Fig. 6 Energy distribution of blasting vibration signals in each frequency band

在这里, 定义信号能量卓越频带中值 $F=(f_{sup}+f_{sub})/2$, 其中, f_{sup} 和 f_{sub} 分别为卓越频带的上、下限。对表 5 中各信号能量卓越频带中值 F 分别进行统计, 得到其与传播距离的变化关系见图 7。

由图 7 可以看出, 沿边坡面向上, 爆破地震波随着传播距离的增加, 信号能量卓越频带中值以近似指数形式逐渐减小, 趋势线方程为 $F=213.84e^{-0.018D}$ 。

表 5 信号能量集中频带的分布

Table 5 Energy distribution in energy concentrated bands

信号	能量集中频带1		能量集中频带2		能量集中频带3		能量集中频带4		卓越频带/Hz
	频率/Hz	能量占比/%	频率/Hz	能量占比/%	频率/Hz	能量占比/%	频率/Hz	能量占比/%	
1-1	54.6~64.35	17.1	115.05~126.75	24.6	179.40~202.80	20.7	232.05~251.55	17.4	115.05~126.75
1-2	39.00~62.40	24.9	118.95~126.75	44.6	187.20~196.95	18.2	-	-	118.95~126.75
2-1	107.25~126.75	20.4	187.20~202.80	36.1	243.75~251.55	26.2	-	-	187.20~202.80
2-2	62.40~78.00	11.1	189.15~202.80	21.9	235.95~249.60	18.7	-	-	189.15~202.80
3-1	31.20~48.75	17.3	62.40~81.90	22.9	93.60~105.30	9.1	189.15~202.80	10.8	62.40~81.90
3-2	21.45~50.70	21.4	62.40~81.90	26.9	93.60~109.20	28.7	-	-	93.60~109.20
4-1	33.15~109.20	81.7	187.20~241.80	5.9	-	-	-	-	33.15~109.20
4-2	17.55~46.80	31.1	60.45~78.00	11.3	95.55~111.15	35.7	-	-	95.55~111.15
5-1	29.25~64.35	34.7	93.6~117.00	42.4	189.15~202.80	8.6	-	-	93.60~117.00
5-2	29.25~54.60	22.6	93.6~109.20	43.4	189.15~195.00	10.4	-	-	93.60~109.20
6-1	17.55~23.40	14.3	33.15~64.35	42.6	101.40~109.20	20.2	-	-	33.15~64.35
6-2	17.55~23.40	11.3	31.2~58.50	72.3	93.60~101.40	5.2	-	-	31.20~58.50
7-1	29.25~54.60	71.9	93.6~105.30	9.4	-	-	-	-	29.25~54.60
7-2	17.55~46.80	69.8	95.55~101.4	11.4	-	-	-	-	17.55~46.80
8-1	0~3.90	13.7	19.50~50.70	68.9	-	-	-	-	19.5~50.70
8-2	0~3.90	19.9	17.55~23.40	22.9	29.25~35.10	17.7	42.90~54.60	21.7	17.55~23.40
9	17.55~33.15	62.1	48.75~62.40	26.2	-	-	-	-	17.55~33.15

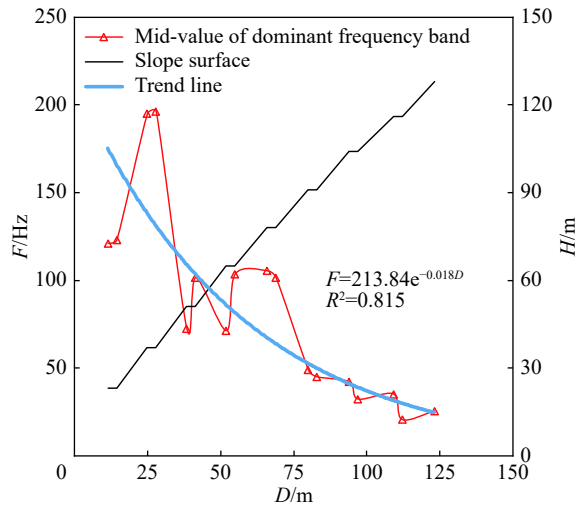


图 7 卓越频带中值与传播距离的变化关系

Fig. 7 The relation between mid-value of dominant frequency band and propagation distance

4 结 论

结合某石油储备基地露天高陡边坡与下穿隧道协同爆破工程实践,针对下穿隧道掘进爆破荷载激励下上部边坡振动响应及其能量传递进行深入分析,主要得到以下结论:

(1)随着传播距离(台阶高程)的增加,爆破地震波沿坡面的衰减速度逐渐变慢,边坡同台阶边沿处质点振速峰值大于台阶内侧坡脚处,在坡面局部范围存在振动速度的高程放大现象。

(2)基于量纲分析理论,建立含有边坡相对坡度 H/D 的爆破振动预测模型对坡面质点振速预测精度

高,可反映坡度角对边坡爆破振动速度高程放大效应的影响。

(3)爆破振动能量归一化值沿坡面的衰减曲线与速度归一化值衰减曲线具有极强的相似性,爆破近区衰减快、远区衰减慢,爆破振动信号能量受速度峰值影响最大。

(4)隧道爆破振动能量主要集中在0~300 Hz频带范围,在此基础上可分为多个子振频带;爆破振动能量沿坡面传播过程中,高频能量衰减更快,振动信号卓越频带中值以指数形式逐渐减小,能量最终向低频带集中,实际工程中不能忽视上部坡体(远离爆源)的振动监测与安全防护。

参考文献:

- [1] 吴亮,金沐,钟冬望,等.一种边坡与近接隧道协同爆破施工的爆破控制方法:CN201510023750.5[P].2015-05-27.
- [2] 黄志强,吴立.爆破振动对隧道洞口顺层岩质边坡稳定性影响研究[J].*爆破*,2012,29(1):110-114,118. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.01.029.
HUANG Z Q, WU L. Effects of blasting vibration on stability of bedding rock slope at tunnel entrance [J]. *Blasting*, 2012, 29(1): 110-114, 118. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.01.029.
- [3] 宋杰.傍山隧道施工爆破震动效应与测试技术研究[D].长沙:中南大学,2013.
SONG J. Research on Construction blasting vibration effects and testing technology of mountain-adjacent tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [4] 金华东,邓鹏飞,徐伟健.傍山隧道施工爆破方案研究[J].*中外公路*,2014,34(6):202-205. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2014.06.049.
JIN H D, DENG P F, XU W J. Study on blasting scheme for construction of mountain-adjacent tunnel [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2014, 34(6): 202-205. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2014.06.049.
- [5] 黄诗渊.水工隧洞爆破施工振动对邻近边坡的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
HUNAG S Y. The influence research of hydraulic tunnel blasting vibration on adjacent slope [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [6] 徐金贵,蒲传金,贺高威,等.傍山隧道爆破振动边坡传播规律试验研究[J].*有色金属(矿山部分)*,2018,70(3):51-58,112. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2018.03.012.
XU J G, PU C J, HE G W, et al. Experimental study on propagation of side slope of blasting vibration of mountain-adjacent tunnel [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2018, 70(3): 51-58, 112. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2018.03.012.
- [7] 贾克育.隧道爆破开挖对洞口段边坡稳定性影响的数值分析[J].*矿冶工程*,2017,37(1):25-28. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2017.01.007.
JIA D Y. Numerical analysis for effect of tunnel excavation by blasting on slope stability of portal section [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(1): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2017.01.007.
- [8] 兰明雄,林从谋.小净距隧道爆破振动传播规律小波包分析[J].*煤矿爆破*,2009(3):1-4.
LAN M X, LIN C M. Wavelet packet analysis of vibration caused by blasting high rock slope [J]. *Coal Mine Blasting*, 2009(3): 1-4.
- [9] 蒋丽丽,林从谋,陈泽观,等.岩石高边坡爆破振动传播规律小波包分析[J].*有色金属(矿山部分)*,2009,61(2):43-45,52. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2009.02.014.
JIANG L L, LIN C M, CHEN Z G, et al. Wavelet packet analysis of vibration caused by high rock slope blasting [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2009, 61(2): 43-45, 52. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2009.02.014.
- [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] 周建敏.爆破振动对含结构面边坡稳定性影响研究[D].重庆:重庆大学,2015.
ZHOU J M. Influence of blasting vibration on the stability of slope with structure planes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [12] 何理,钟冬望,陈晨,等.岩质高边坡开挖施工的爆破振动监测与分析[J].*金属矿山*,2017,46(1):6-10. DOI:

- 10.3969/j.issn.1001-1250.2017.01.002.
- HE L, ZHONG D W, CHEN C, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in high rocky slope excavation [J]. *Metal Mine*, 2017, 46(1): 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1250.2017.01.002.
- [13] 周文海, 梁瑞, 余建平, 等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 054201. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0373.
- ZHOU W H, LIANG R, YU J P, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 054201. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0373.
- [14] 韩亮, 辛崇伟, 梁书锋, 等. 深孔台阶爆破近远区振动特征的试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(8): 65–70. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.08.011.
- HAN L, XIN C W, LIANG S F, et al. Experimental study on vibration characteristics of deep hole bench blasting in both near and far field [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(8): 65–70. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.08.011.
- [15] 何理, 钟冬望, 刘建程, 等. 微差爆破试验及爆破振动能量的小波包分析 [J]. *金属矿山*, 2014, 43(6): 10–15.
- HE L, ZHONG D W, LIU J C, et al. Millisecond blasting tests and wavelet packet analysis of blasting vibration energy [J]. *Metal Mine*, 2014, 43(6): 10–15.
- [16] SINGH P K, ROY M P. Damage to surface structures due to blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(6): 949–961. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2010.06.010.
- [17] LU W B, LUO Y, CHEN M, et al. An introduction to Chinese safety regulations for blasting vibration [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(7): 1951–1959. DOI: 10.1007/s12665-012-1636-9.
- [18] 武旭, 张云鹏, 郭奇峰. 台阶地形爆破振动放大与衰减效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1017–1022. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1017-06.
- WU X, ZHANG Y P, GUO Q F. Amplification and attenuation effect of blasting vibration on step topography [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1017–1022. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1017-06.
- [19] 陈明, 卢文波, 李鹏, 等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(11): 2189–2195.
- CHEN M, LU W B, LI P, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2189–2195.
- [20] 叶海旺, 袁尔君, 雷涛, 等. 基于量纲分析的爆破振动质点峰值速度预测公式 [J]. *金属矿山*, 2019, 48(5): 56–61. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.201905010.
- YE H W, YUAN E J, LEI T, et al. Blasting vibration peak particle velocity prediction formula based on dimensional analysis method [J]. *Metal Mine*, 2019, 48(5): 56–61. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.201905010.
- [21] 胡刚, 吴云龙. 爆破地震振动控制的一种方法 [J]. *煤炭技术*, 2004, 23(4): 104–106. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8725.2004.04.065.
- HU G, WU Y L. A new method of the control of the earthquake vibration caused by explosive [J]. *Coal Technology*, 2004, 23(4): 104–106. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8725.2004.04.065.
- [22] 唐海, 李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 820–824. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.03.030.
- TANG H, LI H B. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 820–824. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.03.030.
- [23] 钟冬望, 何理, 操鹏, 等. 基于精确毫秒延时控制的爆破降振试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 107–11. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1447.
- ZHONG D W, HE L, CAO P, et al. Experimental study of reducing vibration intensity based on controlled blasting with precise time delay [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 107–11. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1447.
- [24] 杨巨文, 白润才, 于永江, 等. 含弱层岩质边坡自振周期反演试验及数值验证 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 69–75. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1249.
- YANG J W, BAI R C, YU Y J, et al. Inversion test and numerical verification on natural period of rock slope with weak layers [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 69–75. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1249.

(责任编辑 王小飞)