

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0363

毫秒延时爆破等效单响药量计算及振速预测*

何理^{1,2}, 杨仁树¹, 钟东望², 李鹏³, 吴春平⁴, 陈江伟⁵

- (1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
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. 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;
4. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
5. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要: 毫秒延时爆破存在同段雷管离散及分段振波叠加效应, 对单响药量取值及质点峰值振速的预报带来极大困扰。设计开展毫秒延时爆破试验, 建立群孔齐发爆破振速的计算模型, 研究并构建炮孔数目对齐发爆破等效药量影响及其取值方法; 并基于单孔爆破回归分析结果, 提出修正的质点峰值振速与比例距离关系公式。结果表明, 群孔齐发爆破等效药量比名义单响药量小, 可利用缩比系数和折算炮孔数目进行计算, 缩比系数随炮孔数目增加呈指数形式衰减; 修正的质点峰值振速与比例距离公式引入的振波叠加因子可反映振波叠加对速度的影响, 依据该公式计算得到的质点峰值振速预测值与实测值间平均绝对误差、平均相对误差及均方根误差分别为 0.05 cm/s、9.52%、0.059 cm/s, 用于现场爆破振动预测切实可行。

关键词: 毫秒延时爆破; 振波叠加; 质点峰值振动速度; 等效药量; 回归分析; 比例距离公式

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Calculation of equivalent charge weight per delay and vibration velocity prediction for millisecond delay blasting

HE Li^{1,2}, YANG Renshu¹, ZHONG Dongwang², LI Peng³, WU Chunping⁴, CHEN Jiangwei⁵

- (1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, 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 Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China;
4. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China;
5. China Construction Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Zhengzhou 450004, Henan, China)

Abstract: Drilling and blasting is the most economical rock fracture technology in water conservancy, transportation, mining and tunnel engineering. And the application of nonel detonator network in rock blasting is still the most widely used initiation method in engineering blasting practice. Due to the detonator delay error, there is a deviation between the actual initiation time and designed initiation time in the Nonel detonation network, which will cause the change of blasting time sequence and the overlapping of blast-holes. There are detonator dispersion phenomenon with the same delay time and superposition effect for seismic waves with different delay time, which brings great trouble to the value of charge weight per delay and the prediction of particle peak vibration velocity. In order to the predict particle peak vibration velocity more accurately and efficiently, the

* 收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(51904210, 51934001); 湖北省重点研发计划(2020BCA084); 长江科学院开放研究基金(CKWV2018473/KY); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放研究基金(Z202001)

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

millisecond delay blasting test was conducted, and the calculation model of vibration velocity for group blast-hole simultaneous blasting with dispersed charge was established. The influence of the blast-hole number on the equivalent charge weight for simultaneous blasting and its value selection method were studied and constructed. The modified particle peak vibration velocity scaled distance formula and the particle peak vibration velocity prediction method were proposed based on the results of regression analysis of single-hole blasting. The results show that the equivalent charge weight of group blast-hole simultaneous blasting is smaller than the nominal charge weight per delay, and the equivalent charge weight of simultaneous blasting can be calculated by converting through the reduction coefficient, which decreases exponentially with the increase of the blast-hole number. The superposition effect of seismic waves with different delay time can be considered by introducing vibration wave superposition factor into the modified particle peak vibration velocity scaled distance formula. The average absolute error, average relative error and root mean square error between the actual and the predicted particle peak vibration velocity values are 0.05 cm/s, 9.52% and 0.059 cm/s, respectively. It is feasible to apply the modified particle peak vibration velocity proportional distance regression analysis method to the prediction and control of blasting vibration velocity in the field.

Keywords: millisecond delay blasting; vibration wave superposition; particle peak vibration velocity; equivalent charge; regression analysis; scaled distance formula

爆破工程实践中, 质点峰值振动速度 v_p 的预测最常用的方法是基于经验公式对振动实测数据进行回归统计分析^[1-5]。其中, 比例距离公式用于振动实测数据回归分析最为简单方便, 是国内外爆破从业人员进行 v_p 预测的首选^[6-9]。 v_p 回归分析预测的关键在于准确确定比例距离公式中各测点峰值振速对应的单响药量 Q 与爆心距 R 。然而, 大量理论与试验研究表明, 短毫秒延时爆破情况下, 相邻段别爆破地震波产生干扰叠加, 难以高效、准确确定实际单响药量^[10]。有学者提出了短毫秒延时爆破情况下等效单响药量的取值方法^[11-15], 然而借助萨道夫斯基公式利用现场爆破振动实测数据进行回归分析时, 回归分析的相关性并不高, 近距离的爆破振动峰值计算误差最高达 200%~300%, 远距离的计算误差也很大^[16]。因此, 考虑分段爆破地震波叠加因素对单响药量取值的影响, 提出可行的等效药量取值方法有待进行深入研究。鉴于此, 许多科研人员通过概率算法^[17]、遗传算法^[18-19]、BP 神经网络方法^[20]、分类回归树方法^[21]、粒子群算法^[22-23] 等数值方法对生产爆破实践中振动速度进行预测, 大大提高了预测精度。除此之外, 也有研究人员开展单孔化爆试验测得种子基波, 在考虑传播场地介质属性对地震波衰减耗散因素的基础上, 借助计算机技术通过线性^[24-26] 或非线性叠加^[27-28] 模拟群孔爆破地震波时程, 进而对 v_p 进行预测, 还可对群孔爆破地震波时频域信息进行准确解读。尽管这些先进的技术和方法能够提高 v_p 预测精度, 而且可获取更为丰富的地震波时频域信息, 然而这些方法的应用均是以复杂的计算机程序编制以及反复的程序试算为代价的, 时间与资源成本较高。并且均是基于复杂、严密的数学方法或理论, 对于从事生产爆破的工程技术人员而言, 应用起来不够便捷高效。因此, 建立简单、有效并适合工程师现场应用的 v_p 预测方法具有极大工程实际意义。

非电起爆网路中由于雷管延时误差原因, 一方面, 致使相同段号的雷管延时存在离散现象, 致使同排炮孔齐发爆破时各单孔并非在同时刻起爆; 另一方面, 可能会导致相邻段别地震波产生干扰叠加现象, 从而无法准确确定单响药量, 这些因素都给爆破振动速度回归分析及 v_p 预测带来较大困难。设计开展单孔爆破与多排孔毫秒延时爆破振动试验研究, 系统研究群孔分散装药齐发爆破时的等效药量取值方法, 在此基础上考虑毫秒延时爆破分段振波叠加效应, 通过引入振波叠加因子, 建立短毫秒延时爆破振动速度的预测方法, 为工程爆破一线技术人员快速、高效评估爆破振动效应及其危害提供借鉴。

1 爆破振动试验研究

1.1 场地概况

某石油储备基地扩建项目位于剥蚀低山丘陵地貌区, 设计规模为 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$, 布置 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 储油罐

30 个。项目涉及山体边坡开挖与下穿隧道掘进爆破, 设计边坡共分 9 级放坡, 每级平台宽度 3 m, 山体开采最高标高为+130 m, 最低标高为+4.0 m, 坡角范围为 20°~45°。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, 可爆性和可钻性都较好^[3]。爆破试验拟在坡体高程约+47 m 平台开展。

1.2 装药结构与爆破参数

试验分为 2 组, 第 1 组试验包括 2 次单孔爆破振动监测, 第 2 组试验利用塑料导爆管雷管设计非电起爆网路开展多排孔毫秒延时爆破振动监测, 采用连续柱状装药结构, 炮孔装药结构如图 1 所示。振动监测试验爆破参数如表 1 所示。

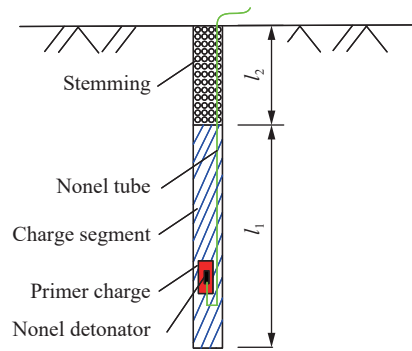


图 1 炮孔装药结构

Fig. 1 Charge structure of blast-hole

表 1 爆破参数

Table 1 Blasting parameters

爆破类型	孔径 Φ /mm	孔距 a /m	排距 b /m	孔深 l /m	装药长度 l_1 /m	堵塞长度 l_2 /m	单孔药量 Q_0 /kg
31#孔爆破	115			14.3	8.8	5.5	81
32#孔爆破	115			15.5	11.0	4.5	100
毫秒延时爆破	115	6	4	14.3~16.9	9.8~10.9	4.5~6	89~95

注: 现场爆破试验使用 2# 岩石乳化炸药, 参见文献[29]将炮孔装药量折算为 TNT 当量。

多排孔毫秒延时起爆网路设计见图 2, 图 2 中孔外传爆雷管选用 MS3 段, 孔内起爆雷管选用 MS11 段。图 2 所示毫秒延时起爆网路装药量统计见表 2。

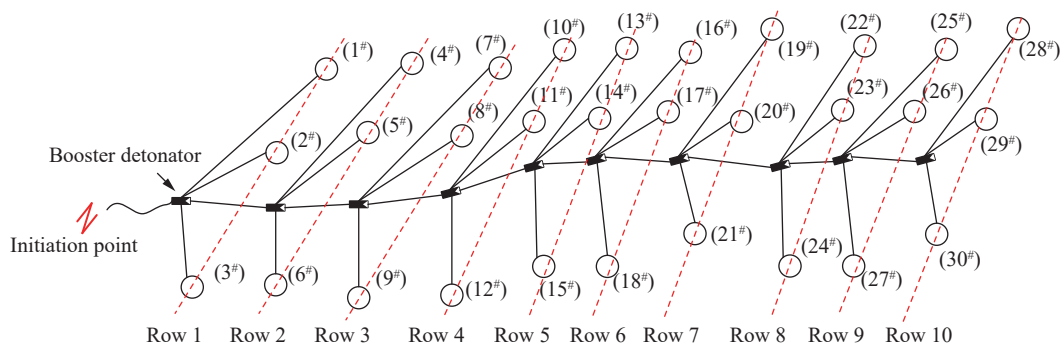


图 2 毫秒延时起爆网路

Fig. 2 Initiation network of millisecond delay blasting

表 2 毫秒延时爆破药量统计
Table 2 Charge statistics of millisecond delay blasting

炮孔排数 <i>i</i>	炮孔编号			炮孔总药量/kg	炮孔平均装药量/kg
	[(<i>i</i> -1)×3+1]	[(<i>i</i> -1)×3+2]	[(<i>i</i> -1)×3+3]		
1	91	95	93	279	93.0
2	89	94	94	277	92.3
3	90	92	93	275	91.7
4	92	91	92	275	91.7
5	91	92	93	276	92.0
6	92	91	92	275	91.7
7	92	92	92	276	92.0
8	91	92	92	275	91.7
9	92	92	92	276	92.0
10	92	92	93	277	92.3

注: 现场爆破试验使用2#岩石乳化炸药, 参见文献[29]将炮孔装药量折算为TNT当量

1.3 振动速度监测方案

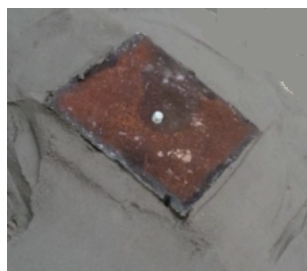
爆破振动测试选用 Mini-Blast I 型爆破振动速度测试系统, 测试量程为 0.001~35 cm/s, 频响范围为 1~500 Hz。为更好适应爆破试验现场环境, 设置采集仪为自动工作模式, 采样频率为 10 000 s⁻¹, 数据采集时长设为 8 s。

试验场地表面多为松散黏性土, 为测得准确的爆破地震波时程信号, 需确保振动速度传感器与地面刚性联接。因此, 在各测点处清除表面松石与黏土, 使用水泥砂浆抹平约 0.1 m², 在水泥砂浆固化前水平预制埋入钻有螺纹孔的 10 cm×10 cm×1.5 cm 钢板, 制作传感器固定基座, 振动监测前通过扭紧螺丝将传感器与基座刚性联接^[1]。

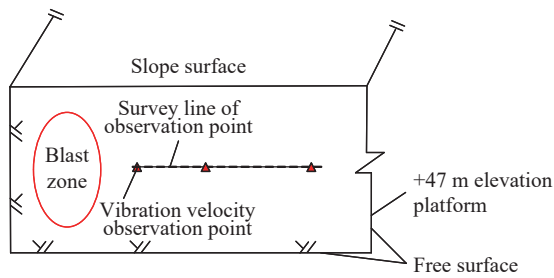
根据试验场地情况将测点尽可能布置在同一条测线方向上, 测点布置方案如表 3 所示。振动速度监测方案如图 3 所示。

表 3 测点布置方案
Table 3 Layout scheme of measuring points

爆破类型	测点爆心距R/m									
31#孔爆破	15		22		35		40		48	
32#孔爆破	15		22		35		40		48	
毫秒延时爆破	15	18	22	27	30	34	38	41	45	49



(a) Sensor fixed base



(b) Layout plan of measuring points

图 3 振动速度监测方案

Fig. 3 Monitoring scheme of vibration velocity

1.4 数据分析与讨论

为研究爆破振动传播衰减规律, 选取下述比例距离公式对振动实测数据进行回归分析^[8-9]:

$$v_p = k \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} = k D_s^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: v_p 为质点峰值振动速度, cm/s; k 、 α 为场地条件相关系数, 与爆破方式、装药结构、爆破点至监测点间的地形、地质条件密切相关^[4]; R 为爆心距, m; Q 为最大单响药量, kg; D_s 为比例距离^[7], $m \cdot kg^{-1/3}$ 。

本文中主要对各测点垂直向 v_p 进行回归分析研究, 爆破振动监测数据如表 4 所示。

表 4 爆破振动测试数据
Table 4 Blasting vibration test data

31#孔爆破			32#孔爆破			毫秒延时爆破		
R/m	$v_p/(cm \cdot s^{-1})$	$D_s/(m \cdot kg^{-1/3})$	R/m	$v_p/(cm \cdot s^{-1})$	$D_s/(m \cdot kg^{-1/3})$	R/m	$v_p/(cm \cdot s^{-1})$	$D_s/(m \cdot kg^{-1/3})$
15	10.85	3.52	15	12.21	3.28	15	16.06	2.82
						18	12.10	3.38
22	7.90	5.16	22	9.25	4.81	22	11.83	4.13
						27	10.20	5.07
						30	8.25	5.63
35	6.68	8.21	35	7.30	7.66	34	7.14	6.38
						38	7.88	7.13
40	4.81	9.38	40	5.42	8.75	41	7.57	7.69
						45	6.49	8.45
48	4.24	11.26	48	5.21	10.50	49	6.48	9.20

为避免非电起爆网路中相邻段别地震波干扰叠加对等效药量取值的影响, 从而影响回归分析结果导致 v_p 预测误差。选取表 4 中两次单孔爆破振动监测数据进行回归分析, 得到单孔爆破振速预测值 v_{ps} 随 D_s 的变化关系如图 4 所示。

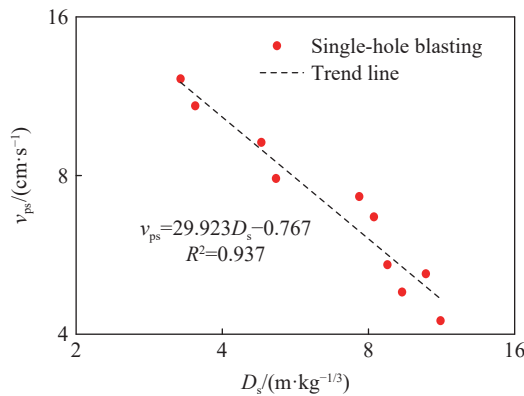


图 4 单孔爆破振速随比例距离的变化关系

Fig. 4 Relation between blast vibration velocity for single-hole blasting and scaled distance

由图 4 可以看出, 在对数坐标系情况下 v_{ps} 随 D_s 近似呈线性关系, 通过线性回归得到试验场地单孔爆破振速 v_{ps} 预测公式为:

$$v_{ps} = 29.923 D_s^{-0.767} \quad (2)$$

由于单孔爆破试验不存在分段地震波干扰叠加现象, 各数据点中的峰值振速、单响药量及爆心距均

严格一一对应, 确保了回归分析数据集的准确性。同时, 图 4 显示数据回归分析拟合度好, 相关性达到 0.937; 并且应用式(2)计算得到 v_{ps} 预测值与实测值间均方根误差为 0.55 cm/s, 平均相对误差为 7.39%, 表明速度预测公式中的场地条件相关系数 $k=29.923$, $\alpha=0.767$ 可以真实反映试验现场装药结构、地质条件及地形相关属性特征, v_{ps} 预测公式精度高, 用于现场振动速度预测切实可行, 具体数据可参见表 5。

表 5 单孔爆破振速的实测值与预测值对比

Table 5 Comparison of blast vibration velocity for single-hole blasting between measured and predicted values

实测值/(cm·s ⁻¹)	预测值/(cm·s ⁻¹)	绝对误差/(cm·s ⁻¹)	相对误差/%	实测值/(cm·s ⁻¹)	预测值/(cm·s ⁻¹)	绝对误差/(cm·s ⁻¹)	相对误差/%
10.85	11.40	-0.55	5.05	12.21	12.03	0.18	1.46
7.90	8.50	0.60	7.59	9.25	8.97	0.28	3.03
6.68	5.95	0.73	10.89	7.30	6.28	1.02	14.00
4.81	5.37	-0.56	11.73	5.42	5.67	-0.25	4.59
4.24	4.67	-0.43	10.18	5.21	4.93	0.28	5.39

2 群孔齐发爆破时等效装药量取值方法研究

炸药爆破引起岩土体高度非线性响应, 线性叠加模型被用来预测全尺寸群孔爆破振动速度的效果不甚理想。Blair^[28] 依据比例药量法则, 考虑单孔爆破时各装药单元对爆心距 R 处质点振动速度的非线性贡献特性, 提出了爆破振动速度的叠加方法。

图 5 炮孔中总装药量为 Q , 共计 M 个装药单元, 即 $Q=Mq$, 各装药单元距离振速监测点 O 处的距离为 R_M , 各装药单元爆炸在 O 处激发的振动速度可通过下述非线性函数计算:

$$v_{pn} = A\{(nq)^B - [(n-1)q]^B\} \tag{3}$$

式中: v_{pn} 为单孔爆破时第 n 个装药单元爆炸在 O 处激发的振动速度, cm/s; n 为装药单元编号, $n=1 \sim M$; A 、 B 为与现场地质条件相关的系数; q 为每个装药单元的 TNT 等效质量, kg。

因此, $v_{p1}=Aq^B$ 。当 $R \gg (l_1+l_2)$ 时, $R=R_M$, 则整个炮孔装药量爆炸在 O 处引发的爆破振动速度为

$$v_p = \sum_{n=1}^M v_{pn} = \sum_{n=1}^M A\{(nq)^B - [(n-1)q]^B\} = A(Mq)^B = AQ^B \tag{4}$$

非电起爆网路中, 假设将单孔药量 Q 平均分装到 M 个炮孔, 建立群孔分散装药齐发爆破振速的计算模型, 如图 6 所示。

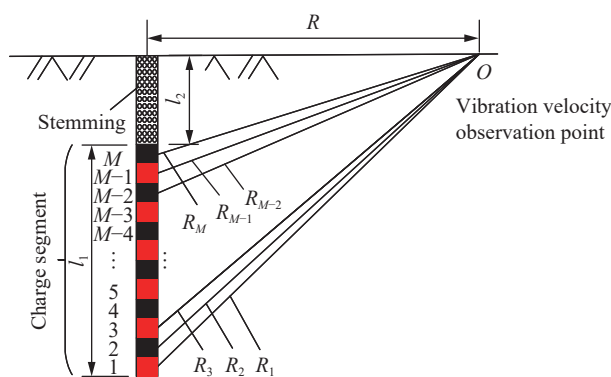


图 5 单孔爆破振速叠加方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of superposition method for vibration velocity in single-hole blasting

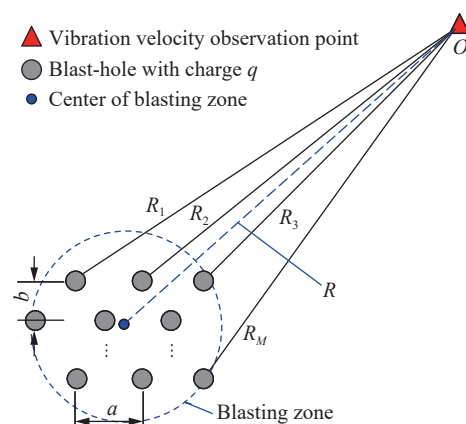


图 6 群孔分散装药齐发爆破振速计算模型

Fig. 6 Calculation model of vibration velocity for simultaneous blasting of multi-hole with dispersed charge

因此,可应用式(3)依次计算得到每个炮孔(单孔药量为 q)在振动观测点 O 处激发的振动速度。显而易见的是,由于炸药爆速极高,达到 5 000 m/s 以上^[30-31],图 5 单孔爆破时装药段完成爆轰所需时间非常短,炮孔内各装药单元可视为同时起爆。然而图 6 所示非电起爆网路群孔齐发爆破情况下,由于同段雷管延时误差的随机性及导爆管长度差异都可能导致各炮孔的起爆时刻存在时间差,并非严格意义上的同时起爆^[32]。并且,各炮孔爆心距差异及振动波传播路径差异因素也会造成各孔爆炸地震波传播到振速观测点的时间差异。

其中导爆管长度及爆心距差异因素可通过人为控制,即组网时尽可能截取相同长度的导爆管,并将振动观测点距离延长、适当减小孔距。然而,导爆管雷管实际延期时间与其名义延期时间之间往往存在偏差(负延时偏差和正延时偏差),同时这些偏差在其置信区间内又是随机分布的,致使微差起爆网路路段或重段现象时有发生^[33-34]。实践中多排孔毫秒延时爆破情况下,往往孔外传爆雷管使用低段别,孔内起爆雷管采用高段别。同排炮孔齐发爆破时,炮孔内部起爆雷管均为相同段号的高段别雷管,若将传爆雷管点火计为 0 时刻,则可根据雷管延时偏差统计数据,分别计算出各炮孔的名义起爆时刻 t_0 为孔内、外雷管名义延期时间之和,炮孔的最早起爆时刻 t_1 为孔内、外雷管名义延期时间之和减去孔内、外雷管负延时偏差之和,炮孔的最迟起爆时刻 t_2 为孔内、外雷管名义延期时间之和加上孔内、外雷管正延时偏差之和。

定义炮孔起爆时间窗 $T=[t_1, t_2]$,因此可应用上述方法计算得到图 6 群孔齐发爆破时各炮孔的起爆时间窗如图 7 所示。

由图 7 可直观看出,由于雷管延时误差这一客观因素,无法确保齐发爆破时各炮孔在相同时刻起爆。因此,依据式(4)计算图 6 群孔齐发爆破振动速度时,由于各炮孔爆炸地震波并非同一时刻到达振速观测点,势必会造成振速观测点处各单孔爆炸地震波产生错峰现象,致使观测点处振动速度峰值水平偏低。这表明,群孔分散装药齐发爆破时等效药量取这些炮孔装药量的算术和是不合理的。Singh 等^[35]通过试验研究得到,在总药量相同情况下,单孔集中装药爆破和多孔分散装药齐发爆破振动速度相差最高可达 55%,同一观测点处单孔爆破振动速度比齐发爆破振动速度高,印证了前述理论分析的正确性。同时, Singh 等^[35]提出在对齐发爆破等效药量进行取值时,可对炮孔数目取立方根到平方根进行折算,但并未明确何时取小值、何时取大值进行折算。

这里引入缩比系数 η 对炮孔数目 M 进行缩比处理,由数学概率理论可知,各炮孔在起爆时间窗长度范围内任一时刻起爆的概率均为 $P_0=(t_2-t_1)^{-1}$,则群孔在同一时刻同时起爆的概率 $P=(t_2-t_1)^{-M}$ 。很显然,齐发爆破炮孔数目 M 越大,理论上同时起爆的概率 P 也就越小,考虑地震波错峰因素观测点处振动合速度越小,齐发爆破等效药量值则越小,炮孔数目的缩比系数 η 应该越小。工程实践中,通常为确保起爆可靠性双发雷管绑扎不超过 20 根导爆管(20 个炮孔)进行齐发爆破,即齐发爆破炮孔数 $2 \leq M \leq 20$ 。因此,基于同时起爆概率 P 的函数特性及其对缩比系数 η 的影响规律,缩比系数 η 可通过下述指数函数进行计算:

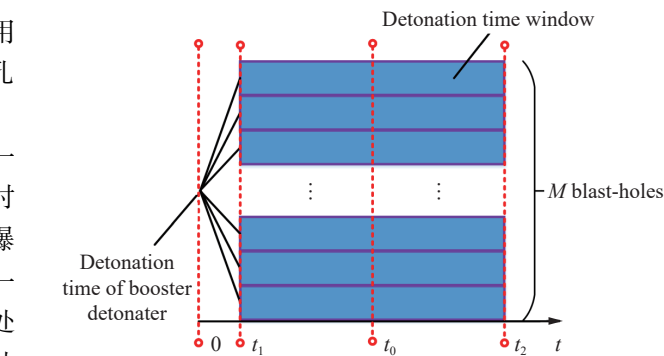


图 7 各炮孔起爆时间窗
Fig. 7 Detonation time window for each blast-hole

$$\eta = CD^M \tag{5}$$

式中: C 、 D 为待定系数。且式(5)具有下述边界条件:

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{2} & M = 2 \\ \frac{1}{3} & M = 20 \end{cases} \tag{6}$$

联合式(5)、(6)即可计算得到缩比系数 η 随炮孔数目 M 的变化关系如图8所示。

根据图8所示缩比系数 η 随炮孔数目 M 的变化关系,可计算出本文毫秒延时起爆网路同段别炮孔数目的缩比系数 $\eta=0.523 \times 0.978^3=0.489$ 。因此,图2毫秒延时起爆网路中的最大单响药量 $Q=93 \times 3^{0.489} \text{ kg}=159.15 \text{ kg}$,则不同爆心距处的比例距离计算值见表4。

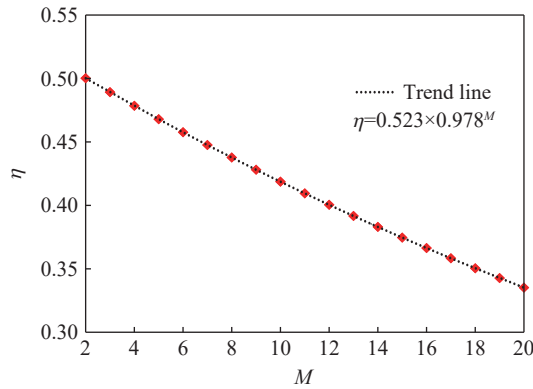


图 8 缩比系数随炮孔数目的变化关系

Fig. 8 Variation relationship between the scaling factor and the blast-hole number

3 考虑振波叠加效应的毫秒延时爆破振速预测方法

在多孔毫秒延时爆破情况下,由于装药的空间分布、时间延迟和分段振波叠加影响,每延迟的准确单响药量是未知的,测点 v_p 所对应的真实单响药量也不得而知。若仅仅依据起爆网路设计统计最大单响药量和爆破振动速度峰值,很难确保最大单响药量一定对应出现最大爆破振动速度,这样的简单统计方法会遗漏掉大量的振动分析信息,导致回归分析相关性差,甚至可能回归出奇异的 k 、 α 值^[10,16]。另外考虑到 v_p 预测方法应便捷、高效,从而便于爆破工程技术人员在现场选用。同时,从振动速度公式场地条件相关系数的物理意义出发,当施工现场地质、地形条件一定,且不改变装药结构和爆破方式的情况下,理论上场地条件相关系数(k 、 α)不应随起爆系统或爆破次数改变而发生变化^[36]。基于此,若能在爆破现场应用单孔爆破振动速度回归分析得到的场地条件相关系数对群孔爆破振动速度进行准确预测则极为便利。

应用式(2)可计算得到毫秒延时爆破不同测点处振速预测值 v_{ps} ,如图9所示。

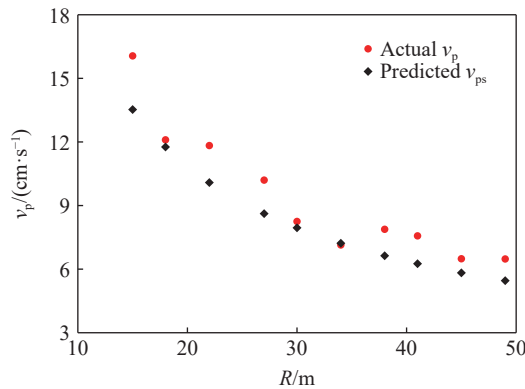


图 9 毫秒延时爆破各测点峰值振动速度的实测值与预测值

Fig. 9 Actual and predicted particle peak vibration velocities at each measuring point in millisecond delay blasting

由图 9 可以看出, 各监测点处 v_p 预测值普遍比实测值要小。分析其原因, 主要是由于毫秒延时爆破时, 由于导爆管雷管客观的延时误差因素, 导致分段振动波形间存在地震波主震相干扰叠加现象, 从而使得实际最大单响药量与测点 v_p 增大, 此时若仍然应用式(2)计算毫秒延时爆破 v_p , 则并未考虑分段振波的叠加影响, 因此导致 v_p 预测值普遍偏小。实测 v_p 与预测 v_{ps} 随比例距离的变化关系如图 10 所示。

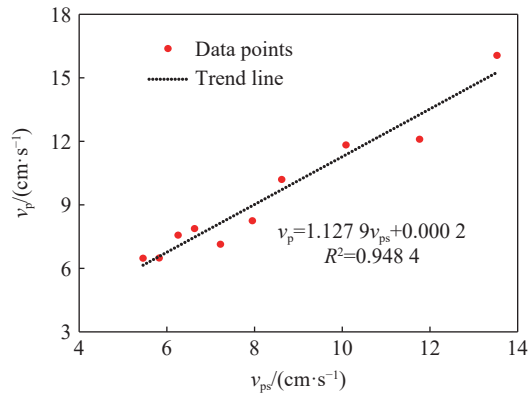


图 10 实测 v_p 与预测 v_{ps} 变化关系

Fig. 10 Relationship between actual v_p and predicted v_{ps}

通过图 10 中数据的拟合分析, 可得到 v_p 实测值与预测值间的线性关系, 拟合相关性达到 0.9484。因此, 在考虑毫秒延时爆破分段振波叠加因素的基础上, 修正的 v_p 比例距离公式为:

$$v_p = 1.1279v_{ps} + 0.0002 \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)可得到:

$$v_p = 33.75D_s^{-0.767} + 0.0002 \quad (8)$$

因此, 修正 v_p 比例距离公式可表达为:

$$v_p = kD_s^{-\alpha} + \phi \quad (9)$$

式中: ϕ 为振波叠加因子, cm/s ; 其余同前。

应用式(8)可计算得到现场试验不同测点处 v_p 预测值, 通过对比分析得到 v_p 预测值与实测值间的相对误差平均值为 6.42%, 均方根误差为 0.67 cm/s , 表明修正的 v_p 比例距离公式预测精度良好。

4 工程应用

某铅锌矿主要成矿元素为铅、锌和铁, 经多次改扩建, 实际采选生产能力达 5 000 t/d。矿体上下盘围岩稳固, 岩石普氏硬度系数 $f=8\sim 10$, 铅锌矿石 $f=8\sim 12$, 矿石密度为 3.6 t/m^3 , 岩石密度为 2.7 t/m^3 , 矿岩松散系数为 1.6。矿区范围内无大的地表水体, 水文地质条件简单。为解决现场爆破大块率偏高、根底偏多和爆破振动对周边办公楼影响等问题, 采用数码电子雷管进行毫秒延时爆破, 段间间隔时间设定为 25 ms。

设计开展现场单孔爆破振动监测试验, 并对矿区 4 次生产爆破振动数据进行测试及分析, 应用本文中提出的 v_p 回归分析方法, 爆破设计参数及 v_p 预测值见表 6。矿区实测 v_p 值与预测 v_{ps} 值随比例距离的变化关系如图 11 所示。

依据矿区单孔爆破振动监测试验回归分析结果, 得到了修正 v_p 比例距离公式:

$$v_p = 685.134D_s^{-1.946} + 0.1515 \quad (10)$$

不同观测点处 v_p 实测值与预测值的对比情况如图 12 所示。

由表 6 及图 12 可以得到, v_p 预测值与实测值间最大绝对误差为 0.1 cm/s , 平均绝对误差为 0.05 cm/s ,

平均相对误差为 9.52%, 均方根误差为 0.059 cm/s, 在工程允许范围内。表明修正的比例距离公式及其回归分析方法, 用于现场爆破振动速度预测与控制切实可行。

表 6 爆破设计参数及 v_p 值
Table 6 Blasting design parameters and v_p values

爆破次数	孔径/mm	炮孔数目	最大单响药量/kg	爆心距/m	比例距离/(m·kg ^{-1/3})	v_p /(cm·s ⁻¹)		绝对误差/(cm·s ⁻¹)	相对误差/%
						实测值	预测值		
1	90	32	486	224	28.55	1.15	1.16	0.01	0.77
	90	32	486	241	30.72	1.04	1.03	0.01	1.42
	90	32	486	268	34.16	0.91	0.86	0.05	5.27
	90	32	486	300	38.24	0.78	0.72	0.06	7.43
	90	32	486	347	44.23	0.68	0.58	0.10	14.51
	90	32	486	390	49.71	0.39	0.49	0.10	26.65
2	90	21	319	353	51.76	0.51	0.47	0.04	8.24
	90	21	319	252	36.95	0.80	0.76	0.04	4.84
	90	21	319	277	40.62	0.72	0.66	0.06	8.51
	90	21	319	309	45.31	0.52	0.56	0.04	7.99
	90	21	319	398	58.36	0.34	0.40	0.06	18.25
3	90	31	326	319	46.44	0.55	0.54	0.01	1.39
	90	31	326	332	48.33	0.46	0.51	0.05	11.55
	90	31	326	353	51.39	0.47	0.47	0.00	0.52
	90	31	326	381	55.47	0.35	0.43	0.08	22.32
	90	31	326	419	61.00	0.48	0.38	0.10	20.54
	90	31	326	457	66.53	0.39	0.35	0.04	11.37
4	90	28	525	262	32.55	0.94	0.93	0.01	0.83
	90	28	525	275	34.16	0.76	0.86	0.10	13.42
	90	28	525	297	36.89	0.73	0.76	0.03	4.54
	90	28	525	326	40.50	0.65	0.66	0.01	1.81
	90	28	525	366	45.46	0.48	0.56	0.08	16.43
	90	28	525	406	50.43	0.54	0.48	0.06	10.30

注: 由于生产爆破时使用数码电子雷管实现段间延期, 数码电子雷管可确保设计延期时间与实际延期时间高度一致^[37], 因此表6中最大单响药量取值为名义最大单响药量

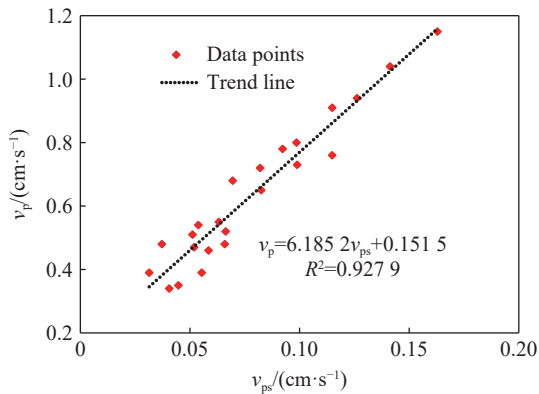


图 11 矿区实例中 v_p 实测值与预测值变化关系
Fig. 11 Relationship between actual and predicted v_p values in mining area

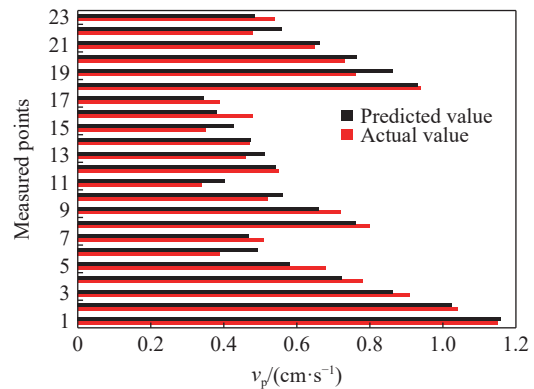


图 12 不同观测点处 v_p 实测值与预测值的对比情况
Fig. 12 Comparison of the actual and predicted v_p values at different observation points

5 结 论

毫秒延时爆破中分段爆破地震波存在干扰叠加现象,这对实际单响药量取值及振动速度准确预测造成了困难,本文中研究了群孔齐发爆破等效药量的取值方法,并考虑非电起爆网路分段振波叠加因素,对毫秒延时爆破振动速度回归分析方法进行了改进,主要得到以下结论。

(1)建立了群孔分散装药齐发爆破振速的计算模型,研究得到非电起爆网路在总药量相同情况下,群孔分散装药齐发爆破振动速度比单孔爆破振动速度小,齐发爆破等效药量比名义单响药量要小。

(2)提出了缩比系数 η 的计算方法 $\eta=0.523\times 0.978^M$,缩比系数 η 随炮孔数目 M 的增加呈指数形式衰减;通过缩比系数折算炮孔数目计算齐发爆破等效药量,可使得计算结果更趋近实际单响药量。

(3)在单孔爆破振动速度回归分析的基础上,考虑毫秒延时爆破分段振波叠加效应,通过引入振波叠加因子 ϕ ,建立了毫秒延时爆破峰值振速的修正比例距离预测公式 $v_p = kD_s^{-\alpha} + \phi$ 。试验条件下应用修正比例距离公式计算得到的 v_p 预测值与实测值间的相对误差平均值为6.42%,均方根误差为0.67 cm/s,表明公式预测精度高。

(4)工程实例应用表明,应用修正比例距离公式计算得到的 v_p 预测值与实测值间最大绝对误差为0.1 cm/s,平均绝对误差为0.05 cm/s,平均相对误差为9.52%,均方根误差为0.059 cm/s,用于现场爆破振动预测及控制切实可行。

参考文献:

- [1] 何理,钟冬望,李鹏,等.下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J].*爆炸与冲击*,2020,40(7):108-117. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0255.
HE L, ZHONG D W, LI P, et al. Vibration prediction and energy analysis of slope under blasting load in underpass tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 108-117. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0255.
- [2] 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.
- [3] 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(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(1): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1250.2017.01.002.
- [4] 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.
- [5] 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. DOI: 10.1007/s11629-011-1023-0.
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. DOI: 10.1007/s11629-011-1023-0.
- [6] 龚相超,钟冬望,司剑峰,等.高饱和黏性土中爆炸波作用下直埋钢管(空管)动态响应[J].*爆炸与冲击*,2020,40(2):13-25. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0443.
GONG X C, ZHONG D W, SI J F, et al. Dynamic responses of hollow steel pipes directly buried in high-saturated clay to blast waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 13-25. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0443.
- [7] QIU X Y, SHI X Z, GOU Y G, et al. Short-delay blasting with single free surface: results of experimental tests [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74: 119-130. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.014.
- [8] CARDU M, CORAGLIOTTO D, ORESTE P. Analysis of predictor equations for determining the blast-induced vibration in rock blasting [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(6): 905-915. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.

- 02.009.
- [9] DOWDING C H. Blast vibration monitoring and control [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1985: 167–171.
- [10] 杨年华. 爆破振动信号精细解读与振动控制 [C]// 爆破工程技术交流论文集. 北京: 中国铁道学会工程分会, 2018.
- [11] 顾毅成. 对毫秒延时爆破地震公式的讨论 [J]. *铁道建筑*, 2005(S1): 73–75. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2005.z1.027.
- GU Y C. Discussion on seismic formula concerning multistage millisecond explosion [J]. *Railway Engineering*, 2005(S1): 73–75. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2005.z1.027.
- [12] 刘殿中. 工程爆破实用手册 [M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- LIU Dianzhong. Practical manual of engineering blasting [M]. Beijing: Earthquake Press, 1981.
- [13] 吴绵拔. 土岩微差爆破的振动效应 [J]. *土工基础*, 2005(06): 75–76. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3152.2005.06.024.
- WU M B. The vibration effect of micro timelag in soil and rock [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2005(06): 75–76. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3152.2005.06.024.
- [14] 薛孔宽, 唐光荣, 曹恒安, 等. 分段微差爆破地震效应的叠加分析 [J]. *爆破*, 1991, 8(3): 67–71. DOI: CNKI:SUN:BOPO.0.1991-03-019.
- XUE K K, TANG G R, CAO H A, et al. Superposition analysis of seismic effect of segmented millisecond blasting [J]. *Blasting*, 1991, 8(3): 67–71. DOI: CNKI:SUN:BOPO.0.1991-03-019.
- [15] 龙源, 冯长根, 徐全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究 [J]. *工程爆破*, 2000(3): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2000.03.001.
- LONG Y, FENG C G, XU Q J, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation [J]. *Engineering Blasting*, 2000(3): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2000.03.001.
- [16] 杨年华. 基于经验格林函数方法的爆破振动预测 [J]. *工程爆破*, 2016, 22(5): 32–36. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2016.05.007.
- YANG N H. Prediction of blasting vibration based on empirical Green's function method [J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(5): 32–36. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2016.05.007.
- [17] 王林峰, 邓冰杰, 莫诒, 等. 基于概率论的爆破振动安全评估与控制 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14): 122–129. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.018.
- WANG L F, DENG B J, MO Q, et al. Safety assessment and control of blasting vibration based on the probability theory [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 122–129. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.018.
- [18] TUMENBAYAR B Y, 夏岸雄, 张建华, 等. 基于遗传算法的神经网络在爆破振动预测中的应用 [J]. *爆破*, 2014, 31(3): 140–144. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2014.03.29.
- TUMENBAYAR B Y, XIA A X, ZHANG J H, et al. Application of neural network based on genetic algorithm in prediction of blasting vibration [J]. *Blasting*, 2014, 31(3): 140–144. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2014.03.29.
- [19] SHI X Z, ZHOU J. Prediction residential house's damage effect near openpit against blasting vibration based on SVM with grid searching method/genetic algorithm [J]. *Advanced Science Letters*, 2012, 11(1): 238–243. DOI: 10.1166/asl.2012.2980.
- [20] 施建俊, 李庆亚, 张琪, 等. 基于 Matlab 和 BP 神经网络的爆破振动预测系统 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1087–1092. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1087-06.
- SHI J J, LI Q Y, ZHANG Q, et al. Forecast system for blasting vibration velocity peak based on Matlab and BP neural network [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1087–1092. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1087-06.
- [21] HASANIPANAH M, FARADONBEH R S, AMNIEH H B, et al. Forecasting blast-induced ground vibration developing a CART model [J]. *Engineering with Computers*, 2016, 33(2): 307–316. DOI: 10.1007/s00366-016-0475-9.
- [22] YUAN Q, ZHAI S H, WU L, et al. Blasting vibration velocity prediction based on least squares support vector machine with particle swarm optimization algorithm [J]. *Geosystem Engineering*, 2019, 22(5). DOI: 10.1080/12269328.2019.1607570.
- [23] HASANIPANAH M, NADERI R, KASHIR J, et al. Prediction of blast-produced ground vibration using particle swarm optimization [J]. *Engineering with Computers*, 2016, 33: 173–179. DOI: 10.1007/s00366-016-0462-1.
- [24] 杨年华, 张乐. 爆破振动波叠加数值预测方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 84–90. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0084-07.
- YANG N H, ZHANG L. Blasting vibration waveform prediction method based on superposition principle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 84–90. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0084-07.
- [25] 钟冬望, 何理, 操鹏, 等. 爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(5): 703–709. DOI: 10.

- 11883/1001-1455(2016)05-0703-07.
- ZHONG D W, HE L, CAO P, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(5): 703–709. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0703-07.
- [26] 凌同华, 李夕兵, 王桂尧. 爆破震动灾害主动控制方法研究 [J]. *岩土力学*, 2007(7): 1439–1442. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.07.029.
- LIN T H, LI X B, WANG G Y. A study on initiative control of blast vibration damages [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007(7): 1439–1442. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.07.029.
- [27] YANG R L, LOWNDS M. Modeling the effect of delay scatter on peak particle velocity of blast vibration using a multiple seed waveform vibration model [J]. *Blasting and Fragmentation*, 2011, 5: 31–46. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/311923105>.
- [28] BLAIR D P. Non-linear superposition models of blast vibration [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(2): 235–247. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.05.002.
- [29] 范俊余, 方 秦, 张亚栋, 等. 岩石乳化炸药 TNT 当量系数的试验研究 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(10): 1243–1249.
- FAN J Y, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Experimental investigation on the TNT equivalence coefficient of a rock emulsion explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1243–1249.
- [30] 孙永江, 江利民. 东非地区中低温敏化技术生产乳化炸药的组分与性能分析 [J]. *爆破器材*, 2020(5): 42–46.
- [31] 徐俊峰, 马宏昊, 沈兆武, 等. 近临界厚度乳化炸药在金属箔焊接中的应用 [J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 282–286, 292. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201907031.
- XU J F, MA H H, SHEN Z W, et al. Application of near critical thickness emulsion explosive in welding of metal foils [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(3): 282–286, 292. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201907031.
- [32] AGRAWAL H, MISHRA A K. Probabilistic analysis on scattering effect of initiation systems and concept of modified charge per delay for prediction of blast induced ground vibrations [J]. *Measurement*, 2018, 130: 306–317. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.032.
- [33] 杨月平. 非电起爆网路可靠性研究及其计算评价软件开发 [D]. 长沙: 中南大学, 2005: 34–35.
- YANG Y P. Study on the reliability of nonel detonation network and software development for reliability evaluation [D]. Changsha: Central South University, 2005: 34–35.
- [34] 杨志红. 微差起爆技术及其对爆破效应影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 50–52.
- YANG Z H. Study on millisecond delay blasting and its influence on blasting effect [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 50–52.
- [35] SINGH P K, SIRVEIYA A K, BABUK N, et al. Evolution of effective charge weight per delay for prediction of ground vibrations generated from blasting in a limestone mine [J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2006, 20(1): 4–19. DOI: 10.1080/13895260500286050.
- [36] AGRAWAL H, MISHRA A K. Evaluation of initiating system by measurement of seismic energy dissipation in surface blasting [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11: 345. DOI: 10.1007/s12517-018-3683-3.
- [37] 何理. 临近边坡精确延时控制爆破地震效应研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- HE L. The research of blasting seismic effect controlling with precise time delay technology nearby slope [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.

(责任编辑 王易难)