

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.021

露天矿山爆破质点峰值振速预测公式研究*

邵磊¹, 张梅², 邓丁¹, 郭连军¹, 高久庆³, 赵鑫³

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2. 宣化科技职业学院, 张家口 075100;

3. 中铁十九局集团 矿业投资有限公司, 北京 100161)

摘要: 为提高某露天矿山剥岩工程爆破振动预测的准确性, 本文提出了一种考虑地质高程与坡度影响因素的质点峰值振动速度预测公式。基于量纲分析原理, 对传统的萨道夫公式进行修正, 引入高程差 H 和坡度系数 γ , 形成新的预测公式(11)。当高差 $H=0$ 时, 此预测公式可转化为萨道夫公式, 表明此预测公式可靠性。在矿山现场进行了振动监测试验, 布置了5个监测点, 高程差为0.222 m、0.176 m、0.865 m、1.617 m、2.465 m, 使用TC-4850爆破测振仪记录振动数据。通过多元非线性拟合方法, 对包括原始萨道夫公式和新提出的公式(11)在内的多个预测公式进行了拟合计算。拟合结果显示: 新提出的公式(11)具有最高的相关性系数 $R^2=0.905$, 优于其他公式。预测精度对比表明, 公式(11)的相对误差最大值为20.85%, 平均误差为8.11%, 相较于原始萨道夫公式的24.89%和10.31%, 预测精度有显著提升。通过考虑高程与坡度影响因素, 新提出的预测公式在复杂地形条件下显著提高了露天矿山爆破振动速度预测的准确性, 为爆破振动控制和安全管理提供了科学依据。具体方案和数据的应用证明了该公式的有效性和实用性。

关键词: 露天矿山; 爆破振动; 量纲分析; 峰值振速; 萨道夫斯基公式

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0178-04

Study on Prediction Formula of Peak Particle Velocity Induced by Open-pit Mine Blasting

SHAO Lei¹, ZHANG Mei², DENG Ding¹, GUO Lian-jun¹, GAO Jiu-qing³, ZHAO Xin³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology,

Shenyang 110870, China; 2. Xuanhua Vocational College of Science & Technology,

Zhangjiakou 075100, China; 3. China Railway 19 Bureau Group Mining

Investment Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: To enhance the accuracy of blasting vibration predictions in an open-pit mine stripping project, a new peak particle velocity (PPV) prediction formula is proposed, incorporating geological elevation differences and slope effects. Based on the principles of dimensional analysis, the traditional Sadovsky formula was modified by introducing the elevation difference (H) and slope coefficient (γ), resulting in a new prediction model (Formula 11). Notably,

收稿日期 (Date of reception): 2024-10-31

网络首发日期 (Published online): 2025-01-12

作者简介: 邵磊 (2002-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事爆破理论相关方面的研究工作, (E-mail) 1753563708@qq.com。

通讯作者: 郭连军 (1963-), 男, 辽宁北票人, 博士、教授、博士生导师, 主要从事采矿工程及爆破理论技术相关方面的研究工作, (E-mail) guolj@sut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51974187) 基于微观特征的岩石冲击破碎能量耗散机理研究

About the author: SHAO Lei (2002-), male, born in Shangqiu city, Henan province, postgraduate student, mainly engaged in blasting theory, (E-mail) 1753563708@qq.com.

Corresponding author: GUO Lian-jun (1963-), male, born in Beipiao city, Liaoning province, professor, doctoral supervisor, Ph. D., mainly engaged in research on mining engineering and blasting theory technology, (E-mail) guolj@sut.edu.cn.

Fund Programs: Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51974187) Study on the Energy Dissipation Mechanism of Rock Breakage under Impact Based on Microscopic Features

when $H=0$, the new formula reverts to the traditional Sadovsky formula, ensuring its reliability. A field vibration monitoring test was conducted in the mine, with 5 monitoring points at elevation differences of 0.222 m, 0.176 m, 0.865 m, 1.617 m, and 2.465 m. Using the TC-4850 blasting vibration meter, vibration data were recorded, and multiple predictions, including the Sadovsky and the newly proposed formula, were fitted using multivariate nonlinear regression. Results show that the proposed formula achieves the highest correlation coefficient ($R^2=0.905$), surpassing other models. Furthermore, the new formula exhibits improved prediction accuracy, with a maximum relative error of 20.85% and an average error of 8.11%, compared to 24.89% and 10.31% for the original Sadovsky formula. By considering the factors of elevation and slope, the proposed prediction formula significantly improves the precision of PPV predictions under complex terrain conditions, providing a scientific basis for blasting vibration control and safety management. Applying the specific scheme and data proves the effectiveness and practicality of the formula.

Key words: open pit mine; blasting vibration; dimensional analysis; peak vibration velocity; Sadovsky formula

在采矿工程行业中,爆破技术的广泛应用带来了良好地社会与经济效益,但在爆破作业中也存在诸多不确定性因素。炸药爆炸后产生应力扰动在介质中传播,随着距离增加强度逐渐减弱,在远处虽不再引起岩质破裂,但可以引起质点产生弹性振动^[1]。在爆破安全规程(GB6722—2014)中常采用萨氏公式对质点振动速度进行预测计算^[2],但由于现场地质条件的复杂性,经验公式计算结果与实测值有较大差距,经验公式不再适用^[3]。付俊等结合现场2次爆破振动试验^[4],将未修正的萨道夫公式与基于高程效应修正后的萨道夫公式分别拟合计算,得出修正后的公式拟合效果更好。陈明等^[5]、贾晓敏^[6]、孙鹏昌等均通过数值模拟分析及现场试验等方式验证了爆破振动速度衰减规律及高程放大效应^[7]。诸多学者结合爆破振动作用机理及量纲分析理论^[8-13],提出了相应的爆破振动速度预测公式。

综上所述,由于不同爆破地质条件的复杂性与差异性,矿山爆破质点峰值振动速度预测值与实测值存在较大差异。本文针对某露天矿山剥岩工程,基于量纲分析原理,考虑地质高程与坡度影响因素,提出质点峰值振动速度预测公式,为矿山爆破振动预测和控制提供一定的指导作用。

1 爆破振动速度预测公式

目前多采用萨道夫公式对爆破振动速度进行预测计算,公式如下

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 为监测点峰值振动速度,cm/s; Q 为最大单段装药量,kg; R 为监测点与爆源直线距离,m; K 为介质系数; α 为衰减系数。

在平整无高低起伏地形上运用萨道夫公式可以较好地预测爆破振动速度,精度较高,但在复杂地形条件下预测结果误差较大。基于此,大量学者结合

爆破振动作用机理及量纲分析理论,得出如下预测公式。见表1。

表1 爆破振动速度预测公式

Table 1 Prediction formula for blasting vibration velocity

学者	预测公式	公式编号
朱传统等 ^[8]	$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta$	(2)
贺高威等 ^[9]	$v = K_1 K_2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{H}{R} \right)^\beta$	(3)
周同岭等 ^[10]	$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha H^\beta$	(4)
何理等 ^[11]	$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\beta \left(\frac{H}{D} \right)^\gamma$	(5)
叶海旺等 ^[12]	$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{H}{R} \right)^\beta \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma$	(6)
包松等 ^[13]	$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^\alpha \left(\frac{H}{R} \right)^\beta \left(\frac{H}{D} \right)^\gamma$	(7)

式中: H 为监测点与爆源间高差,m; D 为监测点与爆源水平距离,m; β 为高差系数, γ 为坡度系数, K_1 为与地形高差有关系数, K_2 为与地质有关系数,其余符号意义同前。

2 量纲分析

爆破振动波在岩体中传播过程中受炸药爆炸所释放能量、介质性质、爆心距、高程差等因素影响^[14,15],爆破振动质点峰值振速主要与如下物理参数有关。

基于量纲分析 II 定理^[16],爆破质点峰值振速与各物理量关系式如下

$$\varphi(v, \rho, D, H, c, Q, f, R, E, \mu, a, t, u) = 0 \quad (8)$$

上式中总变量数共13个,选取其中 Q 、 R 、 c 为独立量纲,建立10个无量纲变量如下

$$\pi_1 = \frac{v}{c}, \pi_2 = \frac{ER^3}{Qc^2}, \pi_3 = \frac{fR}{c}, \pi_4 = \frac{u}{R}, \pi_5 = \frac{\rho}{QR^{-3}}$$

$$\pi_6 = \frac{H}{R}, \pi_7 = \frac{H}{D}, \pi_8 = \frac{t}{Rc^{-1}}, \pi_9 = \frac{a}{R^{-1}c^2}, \pi_{10} = \mu$$

表2 爆破振动相关物理参数

Table 2 Physical parameters related to blasting vibration

物理量	量纲	物理量	量纲
介质密度 ρ	ML^{-3}	测点与爆源直线距离 R	L
测点与爆源水平距离 D	L	介质弹性模量 E	$ML^{-1}T^{-2}$
测点与爆源间高差 H	L	介质泊松比 μ	1
振动波速 c	LT^{-1}	质点加速度 a	LT^{-2}
最大单段装药量 Q	M	爆炸持续时间 t	T
振动频率 f	T^{-1}	质点位移 u	L

量纲分析中,上述各项无量纲变量的幂次积仍为无量纲变量,从中选取 π_5, π_6, π_7 组合成 π_{11}

$$\pi_{11} = \pi_5^{-1/3} \pi_6 \pi_7 = \left(\frac{\rho^{-1/3} Q^{1/3}}{R} \right) \left(\frac{H}{R} \right) \left(\frac{H}{D} \right) \quad (9)$$

结合 π_1 与 π_{11} 综合分析,两者均为无量纲数,其中 c, ρ 可看作常数, v 为与 $Q^{1/3}/R, H/R, H/D$ 有关函数。在萨道夫公式基础上考虑高程及坡度影响系数,爆破振速 v 的对数函数表达式可取为

$$\ln v = \ln K + \alpha \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) + \left(\frac{H}{R} \right) \ln \beta + \left(\frac{H}{D} \right) \ln \gamma \quad (10)$$

则有

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

若爆破场地地形平坦,此时 $H=0, D=R$,公式(11)可转化为原始萨道夫公式,表明此预测公式的可靠性。

3 现场振动监测试验

3.1 工程概况

矿体呈层状、似层状,倾角 $50^\circ \sim 85^\circ$,上缓下陡,下部近于直立,上盘为灰色千枚岩整合接触,下盘为灰绿色千枚岩、或混合岩及花岗岩。试验场地位于该矿区 -38 m 西环,台阶主体压渣爆破共布置炮孔 26 个,方形布孔,孔距 7 m、排距 7 m、孔径 250 mm、孔深 15 m、超深 3 m、堵塞 7.8 m、最大单孔药量 460 kg,采区布孔示意图如图 1。

3.2 仪器选型与布置

现场试验仪器采用 TC-4850 爆破测振仪,具有重量轻、耐抗击、可靠易用等优点。其记录方式为连续触发记录,记录精度 0.01 cm/s,读数精度 1%,通过专用信号线与传感器连接。传感器类型为 TCS-B3 型,频响范围 5 ~ 300 Hz,灵敏度 $26 \pm 10\% V/m/s$,可同时采集 X, Y, Z 轴三向振动速度。



图1 采区布孔示意图

Fig. 1 Blasting hole arrangement

受限于矿山现场地形条件,本次试验各监测点沿路边径向布置,监测点到爆源水平距离和高差通过 ZT15R PRO 全站仪测定。在监测点布置过程中应注意:将布点位置用毛刷清理干净,用清水加入石膏粉调制成粘稠状均匀涂抹于地表,确定水平位置后用手掌平压传感器使之与地面刚性连接,从而提高监测数据的可靠性。

3.3 现场数据监测与精度分析

现场试验获取了各监测点 X, Y, Z 轴振动速度分量,如表 3 所示。

表3 爆破振动监测数据

Table 3 Monitored data of blasting vibration

监测点	H/m	R/m	$v/(cm \cdot s^{-1})$		
			X	Y	Z
1#	0.222	98.283	4.55	5.50	10.18
2#	0.176	108.514	2.70	4.06	9.79
3#	0.865	118.314	3.09	4.29	8.03
4#	1.617	128.102	3.23	4.82	7.38
5#	2.465	137.908	1.70	2.81	4.70

基于表 3 中爆破振动监测数据,结合式(1)~式(7)及式(11)进行多元非线性拟合计算,质点振动速度取三个分量中最大值^[2],计算 Z 轴方向所对应的 K, α, β, γ 值, R^2 为相关性系数,并同时计算比较各经验公式中爆破振动速度预测精度,结果如表 4、

表5所示。

表4 爆破振动拟合结果

Table 4 Fitted results of blasting vibration

公式	K	α	β	γ	R^2
(1)	1073.428	1.807			0.851
(2)	99.114	1.024	0.102		0.882
(3)	99.242	1.126	-0.102		0.882
(4)	121.745	1.023	-0.102		0.882
(5)	98.650	1.408	-0.283	-0.102	0.882
(6)	99.222	1.126	-0.102	0.537	0.882
(7)	98.143	1.124	0.193	-0.296	0.882
(11)	270.577	1.263	0.002	0.002	0.905

由表4可知,传统萨道夫公式拟合相关性系数

最小,值为0.851,表明在特殊地形条件下爆破振动速度预测不够精准。其余各式相关性系数均大于0.880,其中公式(11)相关性系数 R^2 值最大为0.905,表明在公式(1)基础上考虑高程及坡度的影响因素可提高其预测精度。

由表5可知,公式(1)相对误差最大值及平均误差值均最大,分别为24.89%、10.31%,误差较大;公式(2)~(4)在考虑高程影响因素下相对误差最大值及平均误差值均有所降低,其中公式(3)平均误差为8.90%;公式(5)~(7)及公式(11)在此基础上引入坡度影响系数 γ 后,相对误差最大值与平均误差值最终降至20.85%、8.11%,提升了爆破振动速度预测精度。

表5 预测精度对比

Table 5 Comparison of prediction accuracy

式(1)			式(2)			式(3)			式(4)		
预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%
10.82	6.29		10.52	3.34		10.54	3.54		10.52	3.34	
9.05	7.56		9.73	0.61		9.75	0.41		9.73	0.61	
7.74	3.61	10.31	7.57	5.73	8.95	7.58	5.60	8.90	7.57	5.73	8.95
6.70	9.21		6.55	11.25		6.56	11.11		6.55	11.25	
5.87	24.89		5.82	23.83		5.82	23.83		5.82	23.83	
式(5)			式(6)			式(7)			式(11)		
预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%	预测 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%	平均 误差/%
10.46	2.75		10.52	3.34		10.51	3.24		10.58	3.93	
9.71	0.82		9.74	0.51		9.73	0.61		9.41	3.88	
7.56	5.85	8.88	7.58	5.60	8.88	7.57	5.73	8.93	7.86	2.12	8.11
6.54	11.38		6.56	11.11		6.55	11.25		6.66	9.76	
5.81	23.62		5.82	23.83		5.82	23.83		5.68	20.85	

4 结论

(1)在三向爆破振动中垂向振动速度最大,随着爆心距增加,三向振速整体上呈下降趋势,其中垂向衰减最快。

(2)基于量纲分析原理,推导出露天矿山爆破振动速度预测公式,当高差 $H=0$ 时,此预测公式可转化为萨道夫公式,表明此预测公式可靠性。

(3)在特殊地形条件下,传统萨道夫公式对于爆破振动速度预测不够精准,其相对误差最大值与平均误差为24.89%、10.31%,考虑高程与坡度影响因素后,预测公式计算相对误差最大值与平均误差最低降至20.85%、8.11%,提升了预测精度,为矿山爆破振动预测和控制提供一定的指导作用。

参考文献 (References)

- [1] 戴俊. 爆破工程[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2015.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [3] 张云鹏,武旭,郭奇峰. 振动频率对台阶地形岩体内振动波地形效应影响的研究[J]. 矿业研究与开发, 2018,38(7):71-76.
- [3] ZHANG Yun-peng, WU Xu, GUO Qi-feng. Study on the influence of vibration frequency on terrain effect of seismic wave in the rock mass with step topography[J]. Mining Research and Development, 2018,38(7):71-76. (in Chinese)