

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.03.010

考虑岩体抗拉强度的爆破振动速度衰减多元非线性模型^{*}

万嗣鹏^{①④} 陶铁军^{②③} 陈二平^③ 刘永明^③ 杨志强^④

①贵州大学矿业学院(贵州贵阳,550025)

②贵州大学土木工程学院(贵州贵阳,550025)

③中铁(贵州)市政工程有限公司(贵州贵阳,550025)

④北京建工土木工程有限公司(北京,100015)

[摘 要] 为了准确地预测爆破振动速度峰值,减少爆破振动灾害事故的发生,分析了两种典型的爆破振动速度峰值预测公式的不足。在此基础上,探讨城市深孔爆破中振动速度衰减与岩体抗拉强度在群孔效应条件下的关系。通过分析爆破振动速度衰减的影响因素,提取8个主要因素的量纲,由量纲理论推导出考虑岩体抗拉强度的爆破振动速度衰减多元非线性数学模型,并结合具体工程监测数据,使用1stOpt软件进行了非线性回归分析。研究表明:推导出的改进萨道夫斯基(萨氏)公式在3个场地预测值的平均相对误差分别为2.81%、10.56%、4.42%,均低于传统预测公式的平均相对误差,验证了所推导数学模型的正确性。可为爆破振动灾害防治研究提供参考。

[关键词] 爆破振动;深孔爆破;量纲分析;岩体抗拉强度;非线性回归分析

[分类号] TD235.1

Multivariate Nonlinear Model of Blasting Vibration Velocity Attenuation Considering the Tensile Strength of Rock Mass

WAN Sipeng^{①④}, TAO Tiejun^{②③}, CHEN Erping^③, LIU Yongming^③, YANG Zhiqiang^④

① College of Mines, Guizhou University (Guizhou Guiyang, 550025)

② College of Civil Engineering, Guizhou University (Guizhou Guiyang, 550025)

③ China Railway (Guizhou) Municipal Engineering Co., Ltd. (Guizhou Guiyang, 550025)

④ Beijing Construction Engineering Civil Engineering Co., Ltd. (Beijing, 100015)

[ABSTRACT] The imperfection of two typical formulas for predicting the peak velocity of blasting vibration were analyzed and compared in order to get the accurate results to prevent the occurrence of blasting vibration disasters and accidents. Relationship between vibration velocity attenuation and rock tensile strength in urban blasting under the effect of group holes was discussed. The dimensions of 8 main influencing factors, extracted through blasting vibration velocity attenuation analysis, were used to derive the multivariate nonlinear mathematical model of blasting vibration velocity attenuation considering the tensile strength of rock mass. Combined with the monitoring data, nonlinear regression analysis was carried out using the software of 1stOpt. Results show that the average relative error of the predicted value by the improved formula are 2.81%, 10.56% and 4.42% respectively at three sites, which are lower than these by the traditional prediction formula. This verifys the correctness of the derived mathematical model and its reliability as a reference for the study of blasting vibration disaster prevention.

[KEYWORDS] blasting vibration; deep hole blasting; dimensional analysis; tensile strength of rock mass; nonlinear regression analysis

^{*} 收稿日期:2019-11-08

基金项目:贵州省科技计划项目优秀青年科技人才培养(黔科合平台人才[2017]5643)

第一作者:万嗣鹏(1994-),硕士研究生,研究方向为爆破振动灾害防治。E-mail:948529475@qq.com

通信作者:陶铁军(1984-),博士,教授,主要从事岩土爆破理论研究及工程实践。E-mail:1877845647@qq.com

引言

随着城镇化和基础设施建设的不断推进,爆破工程越来越临近已有建(构)筑物和城镇居民区。由爆破振动引发的边坡失稳、建(构)筑物损毁、人员伤亡等灾害事故时有发生,使得爆破振动已成为爆破施工中产生的重大灾害之一^[1-2]。在进行深孔爆破方案设计时,爆破从业者都在使用萨道夫斯基(萨氏)公式验算爆破振动速度,这就意味着验算出的振动速度如果低于《爆破安全规程》^[3]规定的临界值,就会使人们放松警惕,减少必要的降振措施,进而可能造成不必要的人员伤亡及财产损失。爆炸理论的发展及大量现场实测数据证明,萨氏公式对于深孔爆破的预测精度较低,严重影响了深孔爆破方案的设计与施工^[4-5]。因此,有必要研究深孔爆破振动速度的传播规律,合理改进萨氏公式,使用改进的振动速度计算公式验算爆破振动速度,保证爆区周围建(构)筑物和人员的安全。

目前,已有学者对萨氏公式做了大量的改进研究,提出了针对不同因素的萨氏改进公式。许海亮等^[6]针对萨氏公式不能反映钻孔爆破自由面尺寸影响的不足,提出了可体现自由面面积对爆破振动强度产生较大影响这一特点的钻孔爆破振动速度计算公式。梁书锋等^[7]基于爆破振动速度预测公式回归分析的基本原理,提出根据建筑物不同安全等级应选择一定的可靠性指标,并推导了预测爆破振动速度公式中所含安全保证系数的计算过程。唐海等^[8]通过分析与爆破振动有关的物理量,运用量纲分析法推导了反映高程放大效应的爆破振动公式。考虑到爆破作业的周期性及毫秒爆破技术的使用,还有研究者从岩体损伤的角度提高萨氏公式的预测精度^[9]。

分析发现,这些文献从不同角度开展了爆破振动速度衰减问题研究,但是很少有研究者考虑到深孔爆破所涉及到的群孔延长药包振动效应(群孔效应)问题。群孔效应会使整个现场装药区域成为一个规整的爆炸能量块,该规整能量块不能简单地被看成集中药包处理,而萨氏公式主要是基于大量的集中药包硐室爆破推导而来的,这就是萨氏公式对于深孔爆破预测精度低的主要原因。因此,必须寻找出合适的影响因子来修正萨氏公式,从而解决群孔效应所带来的误差问题。

笔者从岩体抗拉强度和群孔效应的联系出发,全面分析岩体抗拉强度对爆破振动速度衰减的影

响,由量纲理论推导出考虑岩体抗拉强度的爆破振动速度衰减多元非线性模型,并通过现场深孔爆破实例进行验证。

1 爆破振动速度衰减数学模型

萨氏公式是通过大量的实测振动数据回归得到的半经验公式,具体表示为:

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

式中: v 为爆破振动速度, m/s ; K 为场地系数; Q 为一次起爆的最大药量, kg ; R 为爆心距, m ; α 为衰减系数。

有研究者在对振动数据进行分析后发现,萨氏公式在平整地形情况下的预测精度远远高于起伏地形;因此,为更准确地预测爆破振动速度,大量的爆破研究人员考虑了高程差 H 、凹凸地貌等因素,基于量纲分析理论推导出了一系列改进公式^[10-12],最典型的考虑高程差、地貌因素的改进公式可表示为:

$$v = KK_2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha} \left(\frac{H}{R} \right)^{\beta} \tag{2}$$

式中: K_2 为凸形地貌系数; β 为高程差系数。

分析发现,影响爆破振动速度衰减的主要因素为一次起爆最大药量、爆心距、地形地质条件、高程差等,而通过一个固定值的场地系数明显不能准确反映地形、地质因素对振动速度的影响。笔者认为,萨氏公式对于深孔爆破预测精度低的原因除了群孔效应,还有一部分原因就在于没有很好地考虑随距离衰减的参量对振动速度的影响。因此,有必要重新分析影响爆破振动速度的主要因素,找寻出新的改进参量,提高萨氏公式的预测精度。

2 爆破振动速度峰值量纲分析

笔者经过大量的参考文献梳理,整理出 13 个影响爆破振动速度的主要因素,见表 1。表 1 中因素主要涉及到爆炸参数、地形地质、岩体力学参数等。考虑到这些因素之间的因果关系及获取难度,选取了前面 8 个因素进行量纲分析。

由表 1 可构建爆破振动速度的函数关系式:

$$v = \omega(Q, R, H, C, \sigma_t, \sigma_c, \sigma_\tau, t) \tag{3}$$

考虑到节理、裂隙等结构面的存在对岩体物理力学性质影响很大,兼顾节理 J_1 和裂隙 J_2 , 可得以下新的函数式:

表1 影响爆破振动速度的13个主要因素

Tab.1 13 main factors affecting blasting vibration velocity

因素	因素意义	量纲
Q	最大段装药量	M
R	爆心距	L
H	高程差	L
C	振动波传播速度	LT^{-1}
t	爆轰时间	T
σ_t	极限抗拉强度	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_c	极限抗压强度	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_τ	极限抗剪强度	$ML^{-1}T^{-2}$
R_L	岩体裂隙圈半径	L
ρ	岩体密度	ML^{-3}
μ	爆破质点振动位移	L
a	爆破质点振动加速度	LT^{-2}
f	爆破质点振动频率	T^{-1}

$$v = \omega(Q, R, H, C, \sigma_t, \sigma_c, \sigma_\tau, t, J_1, J_2)。(4)$$

众所周知,岩体强度是岩体物理学性质的重要反映,而爆破的主要破坏形式为拉伸破坏;因此,岩体抗拉强度自然就成为研究振动速度衰减的首要考虑问题。根据应力波反射原理,岩体及地表自由面的存在,导致药包爆炸后压缩应力波到达自由面时,产生的拉伸应力波会引起岩石的片落和径向裂隙的持续扩展^[13]。这就意味着在进行群孔爆破时,整个装药区域内都是爆破拉伸破坏的集中区域,该区域内岩石抗拉强度越小,所形成的径向裂隙越发育,对振动速度的衰减作用越强。实际爆破设计中,为了获取岩体抗拉强度而去做大量的岩体原位实验费时、费力;因此,结合文献[14]引入准岩体抗拉强度估算岩体抗拉强度。准岩体抗拉强度主要由取自岩体中的岩石试样的岩石抗拉强度和岩体完整系数的乘积表示,故将弹性波在岩石试样和岩体中传播速度比值定义为完整系数 k , k 的大小可用来反映岩体中裂隙的发育程度。准岩体抗拉强度可表述为

$$\sigma_{ml} = k\sigma_t。(5)$$

式中: σ_{ml} 为准岩体抗拉强度,MPa; k 为岩体完整系数; σ_t 为岩体抗拉强度。

由以上分析,将式(4)表示为

$$v = \omega(Q, R, H, C, \sigma_{ml}, t)。(6)$$

选取3个独立量纲:药量 Q 、爆心距 R 和振动波传播速度 C ,根据 π 定理,式(6)可转化为无量纲参数函数式:

$$\frac{v}{C} = \omega\left(\frac{H}{R}, \frac{\sigma_{ml}}{QR^{-3}C^2}, \frac{t}{RC^{-1}}\right)。(7)$$

无量纲数的相乘或乘方仍为无量纲数,取 H/R 和 $\sigma_{ml}/(QR^{-3}C^2)$ 进行组合,形成新的无量纲数。

$$\frac{H}{R}\left(\frac{\sigma_{ml}}{QR^{-3}C^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{H}{R} \cdot \frac{\sigma_{ml}^{\frac{1}{3}}}{Q^{\frac{1}{3}}R^{-1}C^{\frac{2}{3}}}。(8)$$

对于同一爆破区域而言,进行群孔爆破时,爆区内的岩石破碎程度会随着爆心距的增大而变小,而振动波传播速度 C 的大小又正好和岩石破碎程度有关,岩石越破碎,振动波传播速度越小,反之亦然。为了表征振动波传播速度和爆心距之间变化关系,通过观察分析发现,该变化可大致看成指数函数,变化变化函数可表示为 $C = a \cdot b^R$,其中, a 、 b 为待定系数。由式(8)可判断 v 与 $\frac{H}{R} \cdot \frac{\sigma_{ml}^{\frac{1}{3}}}{Q^{\frac{1}{3}}R^{-1}C^{\frac{2}{3}}}$ 具有一定的函数关系,为了突出 v 与 H/R 的衰减关系,该函数关系式可表示为

$$\ln v = \beta_1 + \alpha_1 \ln \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} + \alpha_1 \ln \frac{(ab^R)^{\frac{2}{3}}}{\sigma_{ml}^{\frac{1}{3}}} - \left(\beta_1' + \alpha_1' \ln \frac{H}{R}\right)。(9)$$

式中: β_1 为与场地相关的待定参数; α_1 为衰减系数; β_1' 为和地貌相关的待定参数; α_1' 为与高程差相关的待定参数。

此时,令 $\beta_1 + \alpha_1 \ln \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} = \ln v_0$,并展开可得:

$$\ln v_0 = \beta_1 + \frac{1}{3}\alpha_1 \ln Q - \alpha_1 \ln R。(10)$$

式中: $-\alpha_1 \ln R$ 为可反应振动速度随爆心距的衰减关系,而 $\beta_1 + (\alpha_1 \ln Q)/3$ 则反映了场地因素、一次起爆最大药量等因素对振动速度的影响。令 $\beta_1 = \ln K_1$,其中 K_1 为场地系数,则有:

$$v_0 = K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha_1}。(11)$$

式(11)即为萨氏公式,联立式(9)、式(10)、式(11)后可得:

$$\ln v = \ln v_0 + \alpha_1 \ln \frac{(ab^R)^{\frac{2}{3}}}{\sigma_{ml}^{\frac{1}{3}}} - \beta_1' - \alpha_1' \ln \frac{R}{H} = \ln K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha_1} + \ln \sigma_{ml}^{\frac{\alpha_1}{3K}} + \frac{2}{3}\alpha_1 \ln(ab) - \beta_1' - \alpha_1' \ln \frac{R}{H}。(12)$$

令 $\alpha_1/3 = \alpha_2$, $2[\alpha_1 \ln(ab)]/3 - \beta_1' = \ln K_2$, $-\alpha_1' = \beta$,由式(12)可简化得:

$$\ln v = \ln v_0 + (\ln \sigma_{ml}^{\frac{1}{R}})^{\alpha_2} + \ln K_2 + \beta \ln \frac{H}{R}。 \quad (13)$$

式中: K_2 为凸形地貌系数; α_2 为准岩体抗拉强度系数; β 为高程差系数。式(13)两边取对数后即为考虑准岩体抗拉强度的改进萨氏公式:

$$v = K_1 K_2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{H}{R} \right)^{\beta} (\sigma_{ml}^{\frac{1}{R}})^{\alpha_2}。 \quad (14)$$

3 工程实例验证

3.1 工程概况

为了验证推导出的改进萨氏公式的正确性,将贵州遵义某场坪爆破工程 1[#]、2[#]、3[#] 3 个场地的爆破振动实测数据作为样本进行分析。爆破现场的岩性主要为白云岩,普氏系数 8~10,现场岩石抗拉强度为 8.6 MPa。1[#]、2[#]、3[#] 场地一次最大起爆药量分别为 250、150 kg 和 70 kg。其中,1[#]、2[#] 场地地形起伏较大;而 3[#] 场地地形起伏较小,距离废弃房屋较近。

3.2 现场数据监测

现场振动数据全部由 TC-4850 测振仪测得,1[#]、2[#] 场地测振仪的布置见图 1(a);由于 3[#] 场地距离废弃房屋较近,所以有部分测点放置于房屋台阶上,具体见图 1(b)。监测完毕后,将测振仪数据导入 Matlab 软件中,得到 3 个场地的三向质点振动速度,3 个场地相关参数见表 2。振动速度峰值 v_p 为 3 个方向爆破振动速度的最大值。



(a)1[#]、2[#] (b)3[#]

图 1 测振仪布置图

Fig. 1 Layout of site vibrometers

3.3 不同公式非线性回归分析

为了验证推导出的改进萨氏公式的正确性,基于以上实测数据对萨氏公式(1)、考虑高程差公式(2)、考虑抗拉强度公式(14)进行非线性回归处理。测量出 1[#]、2[#]、3[#] 场地的完整系数 k 分别为 0.70、0.60、0.55;因此,根据式(5)可以计算出 3 个场地的准岩体抗拉强度分别为 6.02、5.16、4.73 MPa。通过 1stOpt 软件对 3 个公式进行非线性回归分析,回归分析得到的各个公式的预测值见表 3。同时可以得到不同公式的平均相对误差及相关系数平方和 R^2 ,具体见表 4。

由表 4 可以看出,在 1[#]、2[#]、3[#] 场地中,式(14)预测值的平均相对误差分别为 2.81%、10.56%、4.42%,均为 3 个公式中误差最小的;同时,式(14)预测值的相关系数平方和 R^2 为 0.9981、0.995 5、0.978 0,也都为 3 个公式中的最大值,说明了考虑岩体抗拉强度的振动速度衰减模型对于该 3 个场地的振动速度的预测精度都较高,证明了考虑岩体抗

表 2 不同场地振动速度峰值及相关参数

Tab. 2 PPV and related parameters in different sites

测点	场地	爆心距/m	高程差 H/m	$v_x/(cm \cdot s^{-1})$	$v_y/(cm \cdot s^{-1})$	$v_z/(cm \cdot s^{-1})$	$v_p/(cm \cdot s^{-1})$
1	1 [#]	56.50	18.66	5.32	5.53	9.28	9.28
2		70.10	20.23	4.49	4.02	6.88	6.88
3		85.40	25.31	1.88	1.82	3.29	3.29
4		99.50	30.19	1.35	1.24	2.69	2.69
5		121.20	40.95	0.82	0.96	1.56	1.56
6	2 [#]	40.50	8.37	3.49	6.28	6.38	6.38
7		57.10	10.74	2.95	4.69	2.50	4.69
8		68.60	13.93	1.88	2.20	1.42	2.20
9		88.70	17.25	1.41	0.88	1.15	1.41
10		109.50	18.84	0.60	0.45	0.58	0.60
11	3 [#]	39.82	5.27	1.60	0.94	2.41	2.41
12		46.89	5.62	1.47	1.14	1.71	1.71
13		50.67	4.94	0.90	0.65	1.27	1.27
14		58.81	5.50	1.40	0.76	0.87	1.40
15		65.42	4.97	0.87	0.92	1.60	1.60

表 3 不同公式预测与实测振动速度峰值对比
Tab. 3 Comparison of predicted value of different formulas and PPV cm/s

测点	场地	实测	v_p		
			式(1)	式(2)	式(14)
1	1 [#]	9.28	9.59	9.30	9.29
2		6.88	5.94	6.66	6.82
3		3.29	3.83	3.84	3.47
4		2.69	2.73	2.50	2.59
5		1.56	1.76	1.26	1.50
6	2 [#]	6.38	6.69	6.58	6.38
7		4.69	3.60	4.32	4.67
8		2.20	2.58	1.97	2.32
9		1.41	1.62	1.28	1.16
10		0.60	1.11	1.31	0.76
11	3 [#]	2.41	2.18	2.18	2.38
12		1.71	1.82	1.84	1.67
13		1.27	1.68	1.66	1.37
14		1.40	1.42	1.43	1.47
15		1.60	1.27	1.26	1.51

拉强度振动速度衰减数学模型的正确性。

同时发现,式(1)、式(2)对于 3 个场地预测值的平均相对误差比较接近,主要原因在于 1[#]、2[#]场地高程交替出现凹凸地貌情况,高程差对振动速度的

衰减影响会一定程度上随着高程的正负值交替出现相抵消;而 3[#]场地主要在于高程差相差较小,高程效应几乎可以忽略不计。从某种程度上讲,式(14)在排除高程差这个因素影响后,依然拥有较高的预测精度。

4 结论

城市工程爆破时,深孔爆破大部分为群孔分散条形药包爆破,装药区域内的岩体破碎程度会很大程度上加速爆破振动速度的衰减,而拉伸破坏又是爆破的主要破坏形式,因此岩石的破碎程度最直接的关联因素是岩体抗拉强度。最新《爆破安全规程》建议使用的爆破振动速度峰值验算公式(萨氏公式),并没有考虑群孔效应导致的误差问题。因此,考虑岩体抗拉强度并对萨氏公式进行改进,这是十分有必要的。对于同一爆破区域而言,进行群孔爆破时,指数函数变化可以很好地表征振动波传播速度和爆心距之间的变化关系,很好地解决一个固定值的场地系数明显不能准确反映地形地质因素对振动速度影响的问题。因此,寻找出合适的改进参量对于提高萨氏公式的预测精度至关重要。

对于工程实例而言,实际监测的3个场地振动数据很好地验证了考虑岩体抗拉强度的改进萨氏公

表 4 不同公式的平均相对误差及相关系数平方和 R^2
Tab. 4 Average relative error and R^2 of different formulas

测点	场地	式(1)			式(2)			式(14)		
		相对误差/%	平均误差/%	R^2	相对误差/%	平均误差/%	R^2	相对误差/%	平均误差/%	R^2
1	1 [#]	3.34			0.22			0.11		
2		13.66			3.20			0.87		
3		16.41	9.54	0.968 9	16.72	9.29	0.988 8	5.47	2.81	0.998 1
4		1.49			7.06			3.72		
5		12.82			19.23			3.85		
6	2 [#]	4.86			3.13			0		
7		23.24			7.89			0.43		
8		17.27	29.05	0.927 8	10.45	29.81	0.968 3	5.45	10.56	0.995 5
9		14.89			9.22			17.73		
10		85.00			118.34			26.67		
11	3 [#]	9.54			9.54			1.24		
12		6.43			7.60			2.34		
13		32.28	14.06	0.568 9	30.71	14.25	0.569 7	7.87	4.42	0.978 0
14		1.43			2.14			5.00		
15		20.63			21.25			5.63		

式的正确性,预测值的平均相对误差分别为2.81%、10.56%、4.42%,远低于作为对比组的两个公式。同时发现,在排除高程差效应的影响后,该公式依然有着较高的预测精度。

参 考 文 献

- [1] 谢承煜,罗周全,贾楠,等. 露天爆破振动对临近建筑的动力响应及降振措施研究[J]. 振动与冲击, 2013,32(13):187-193.
XIE C Y, LUO Z Q, JIA N, et al. Dynamic effects of open blasting vibration on adjacent buildings and measures for vibration reduction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(13):187-193.
- [2] 邵良杉,赵琳琳. 爆破振动对民房破坏的鱼骨图:SVM 预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2014,24(8):56-61.
SHAO L S, ZHAO L L. Model for predicting, blasting vibration caused damage to residential house[J]. China Safety Science Journal, 2014,24(8):56-61.
- [3] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程:GB 6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
State Administration of Work Safety. Safety regulation for blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [4] 罗学东,范新宇,代贞伟,等. BP 神经网络模型在露天矿爆破振动参数预测中的应用及修正[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(12):5019-5024.
LUO X D, FAN X W, DAI Z W, et al. BP neural network application and model modification in prediction of open-pit mine blasting vibration parameters[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013,44(12):5019-5024.
- [5] 陈思远,周传波,蒋楠,等. 露天转地下开采矿山边坡爆破振动速度预测[J]. 爆破, 2015,32(4):49-54.
CHEN S Y, ZHOU C B, JIANG N, et al. Blasting vibration velocity prediction of open-pit to underground mining slope[J]. Blasting, 2015,32(4):49-54.
- [6] 许海亮,张继春,杨红,等. 钻孔爆破振动速度计算公式及其简化的探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007,35(7):899-903,914.
XU H L, ZHANG J C, YANG H, et al. Investigation on calculating formula of vibration velocity in drilling blasting and its simplification[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007,35(7):899-903,914.
- [7] 梁书锋,王宇涛,刘殿书,等. 爆破振动速度预测安
- 全保证系数的确定[J]. 爆炸与冲击, 2015,35(5):741-746.
- LIANG S F, WANG Y T, LIU D S, et al. Determination of safety coefficient for predicting blasting vibration velocity[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(5):741-746.
- [8] 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.
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.
- [9] 张勤彬,程贵海,卢欣奇,等. 考虑岩体损伤的爆破振动速度衰减多元非线性模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,14(3):95-101.
ZAHNG Q B, CHENG G H, LU X Q, et al. Multivariate nonlinear model of blasting vibration velocity attenuation considering rock mass damage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018,14(3):95-101.
- [10] 蒋楠,周传波,平雯,等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(1):237-243.
JIANG N, ZHOU C B, PING W, et al. Altitude effect of blasting vibration velocity in rock slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014,45(1):237-243.
- [11] 周同岭,杨秀甫,翁家杰. 爆破地震高程效应的实验研究[J]. 建井技术, 1997,18(增刊1):31-35.
- [12] 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(5):56-61.
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(5):56-61.
- [13] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2007.
WANG Y J. Blasting engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007.
- [14] 万嗣鹏,张义平,陶铁军,等. 基于准岩体抗拉强度的爆破振动速度衰减公式改进[J]. 金属矿山, 2019,48(7):60-64.
WAN S P, ZHANG Y P, TAO T J, et al. Improvement of the attenuation formula of blasting vibration velocity based on quasi-rock mass tensile strength[J]. Metal Mine, 2019,48(7):60-64.