DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0966-10

基于等效路径的爆破地震波衰减规律*

胡学龙[1],璩世杰[1],蒋文利[2],李 华[2],杨 威[2],黄汉波[2],胡光球[1]
(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;
2.河北钢铁集团矿业公司,河北 唐山 063000)

摘要:针对露天矿山台阶爆破地形和地质条件的复杂性,分析了地形对爆破地震波传播路径的影响,提出了等效路径及等效距离两个概念。同时考虑岩石波阻抗和岩体的完整性系数及最大一段装药量与炸药的定容爆热等因素的影响,构建了露天台阶爆破地震波地表质点振速峰值随等效距离衰减的表达式。通过矿山爆破震动监测检验,发现用该公式预测地表质点振速峰值,能够适应实际地形和地质条件的变化,预测结果的准确性显著高于萨氏公式,表明该公式较好地反映了质点振速峰值沿等效路径衰减的基本规律,为台阶爆破地震波质点振速峰值预测提供了一种新方法。

关键词:爆破;地震动;振速峰值;地形;等效路径
中图分类号:O389; TD235.14 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

爆破引起的地震动是各种岩土爆破工程都会产生的一种有害效应,可对矿山边坡的稳定、一定范围内建构筑物的安全等造成不利影响。因此,在实施爆破工程之前对爆破震动效应进行准确预测,对控制或避免爆破震动危害具有重要意义。

目前的研究普遍将质点振动速度作为表述爆破地震波衰减规律的一个主要指标,其影响因素主要包括药量、埋深、爆破方式等爆源因素以及爆心距、传播途径、岩土条件等。在预测爆破振动效应时,全面和准确地考虑这些因素的影响是非常困难的,因此通常采用萨氏公式 $v=K(Q^nR^{-1})^{-\alpha}$[1] 或比例距离公式 $v=K(SD)^{-\beta}$[2] 等经验公式来反映爆破地震波随距离的衰减规律,并用以预测质点振速峰值。其中 Q 为爆破最大一段起爆炸药量,R 同为爆心距,即测点至爆区药包中心的距离,系数 K、α、β 是与爆破场地条件、地质条件有关的系数,SD 为比例距离($SD=RQ^{-n}$),n 为与装药条件有关的系数。但是,实践中自爆源至不同方向不同距离上各测点的地形及地质条件在绝大多数情况下都存在着较大差异。研究表明:通过现场爆破震动测试获取或按岩石坚硬程度选取的 K、α 值预测质点振速峰值,远距离的预测误差可达 50%以上,近距离爆破振动预测的误差则更大[3-7]。

本文中针对台阶爆破工程环境中地形和地质条件的多变性与复杂性,提出并运用等效路径和等效距离两个概念,尝试探索爆破地震波地表质点振速峰值随等效距离衰减的一般规律,从而建立一种对地形和地质条件具有一定普适性的爆破地震波质点振速峰值预测方法。

1 研究现状及问题

爆破产生的地震波是在地表以下的岩土体这样一种半无限介质体中逐渐向外传播的。在如图 1 所示的露天矿山和大多数的自然地形环境中,爆源与测点之间的地形往往呈凹凸起伏状,爆破地震波不一定能在岩石中沿一条直线传播至测点位置。根据惠更斯-菲涅耳原理[8],可认为任意地形条件下测点位置上的震动是整个地震波波前各子波向测点位置直线传播并在测点位置叠加的结果。然而,尽管这种定性的理论描述能够反映爆破地震波传播的某些本质,但迄今尚无法在严格的科学意义上对该问题给出数学上的解析解,即还不能通过波动理论给出一个能够反映复杂地形条件下质点振速峰值与爆破地

* **收稿日期**:2016-04-12; **修回日期**:2016-08-07
基金项目:国家自然科学基金项目(51274020)
第一作者:胡学龙(1989—),男,博士研究生; **通信作者**:璩世杰,qushijie@ustb.edu.cn。

震波传播距离之间关系的数学表达式。

目前仍普遍采用基于工程类比的经验公式来预测爆破震动效应。表 1 为比较常用的爆破振动速度预测的经验公式。



图 1 某露天矿山地形概貌

Fig. 1 Photo of topographic environment of a surface mine

表 1 爆破地表质点振速峰值预测经验公式[9]

Table 1 Empirical equations for prediction of blast induced peak particle velocity

中国	美国	瑞典	英国	日本	印度
$v=K\left(\frac{Q^n}{R}\right)^{\alpha}$	$v=K(RQ^{-n})^{\alpha}$	$v=K\frac{Q^{1/2}}{R^{1/3}}$	$v=K\frac{Q^{1/2}}{R}$	$v=K\frac{Q^{3/4}}{R^2}$	$v=K\left(\frac{Q}{R^{2/3)}}\right)^{\alpha}$

采用表 1 中各公式及比例距离公式预测质点振速峰值，具有两个共同的重要特点：一是用若干个系数（如 K 和 α）的值反映地质地形条件对地表质点振速峰值的影响，二是用爆心距 R 作为确定测点位置上质点振速峰值的一个重要因素。在我国的爆破工程实践中，通常是通过现场爆破震动测试获取或按岩石坚硬程度从相关的规程中选取 K 和 α 的值。显然，采用这种做法预测质点振速峰值，自爆源/爆区至预测点之间的地质地形条件须与选定的 K 和 α 值具有足够高的一致性，才有可能保证预测结果的准确性。但在矿山乃至其周围，爆源至不同方向不同距离上各测点的地质地形条件往往存在着各种各样或大或小的差异。在沿台阶走向方向，近距离范围内的地形一般都较为平坦，而在垂直或斜交台阶走向方向上的凹凸起伏却往往比较大（见图 2）。与之同时，不同区域不同方向上的岩石种类一般也存在着不可忽略的差异。因此，尽管是在同一个矿山，任何一组选定的 K、α 值都无法同时有效地反映不同区域不同方向上不同地形和地质条件的影响。

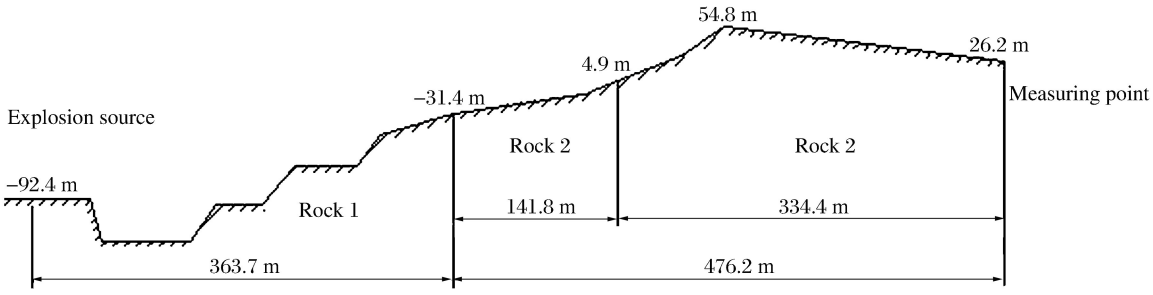

图 2 某露天矿山局部地形轮廓线

Fig. 2 Part of ground surface profile of a surface mine

另外，在露天矿山台阶爆破工程环境下，应用以上所述的经验公式时，除地形平坦的情况外，如何确定爆心距 R 也是一个无法回避的重要问题。在图 2 中，如果取爆心距 R 为爆源与测点之间的直线距离，就无法反映爆源与测点之间可能存在的凹陷地形对爆破地震波传播的影响。然而，如何定义类似的凹凸起伏地形条件下的爆心距，在业界尚未形成共识。

关于地形对爆破地震波传播影响的研究很多,且取得了不少积极的进展。谭文辉等[10]基于爆破振动监测,发现高程差和岩石性质对萨氏公式的 K、α 值都具有重要影响。张华等[11]发现应用传统的萨氏公式确定深凹露天爆破振动速度衰减规律时具有很大的误差,并提出了一个考虑高程效应等因素的修正公式。为反映高程差对爆破振动效应的影响,刘美山等[12]对萨氏公式进行了改进,提出用公式 $v=K(Q^{1/3}R^{-1})^{\alpha}\mathrm{e}^{\beta H}$ 预测质点振速峰值,式中 H 为从测点到爆破中心的垂直距离,β 是与地质条件有关的系数,其他参数的含义同前。朱传统等[5]认为振动速度沿高程有放大效应,因而振动速度的计算公式应为 $v=K(Q^{1/3}R^{-1})^{\alpha}(Q^{1/3}H^{-1})$,之后裴来政[13]用该公式对金堆城露天矿高边坡爆破振动效应进行了分析,认为爆破振动速度随着高程的增加存在一定的放大效应。宋光明等[7]则提出用公式 $v=K(Q^{1/3}R^{-1})^{\alpha}(RS^{-1})$ 来确定边坡上爆破地震波的衰减,其中 R、S 分别为爆心至测点的斜距和水平距离。但是,如何反映爆源与测点之间地形的变化对质点振速峰值的影响及其规律,尚需进一步的研究。

2 爆破地震波传播的等效路径

爆破地震波的传播过程即是其在地表以下的岩土体中随距离衰减的过程。对这一距离给出准确的定义,是研究爆破地震波传播距离与地表质点振速峰值之间关系以确定爆破地震波衰减规律的前提。

在其他因素都不变的前提下,可假定测点位置上的质点振速峰值取决于爆破地震波自爆源向测点传播过程中行走的最短距离。如果这一假定成立,则可以该假定作为确定任意地形条件下爆破地震波的传播路径与距离的基本准则。爆破地震波沿此路径传播的距离在形式上等效于平坦地形条件下爆源至测点的直线距离。从这个意义上讲,可将该路径称为等效路径,并将该路径的长度称为等效距离。

2.1 台阶地形下等效路径与等效距离的确定

在如图 3 所示的台阶地形条件下,从爆源 O 画一直线段至测点位置,若该直线段内有与地表面相交的现象,则地震波不能沿此直线传播到测点位置。此时爆破地震波传播的路径即等效路径的确定方法与步骤为:

(1)以最大一段装药量 Q 的质心 O 为原点作一射线(记为 L_0),以 O 为轴在地表以下向测点 M 旋转 L_0,记 L_0 与地表或地表面上不同岩种交界线首先相交的第 1 个节点为 P_1,则用 OP_1 表示等效路径的第 1 段折线段,记其长度为 R_0;

(2)然后以点 P_1 为轴向测点 M 旋转 L_1(以 P_1 为起点的射线),L_1 与地表相交的第 1 个节点为 P_2,则 P_1P_2 为等效路径的第 2 段折线段,记其长度为 R_1,并记 OP_1 和 P_1P_2 的交角为 θ_1;以此类推,直至 L_i(以 P_i 为起点的射线,当 $i=0$ 时,则 P_0 即为 O 点)与地面相交的点为测点 M。

于是,台阶地形条件下爆破地震波传播的等效距离 R 可表示为:

$$R=\sum_{i=0}^{n}R_i \qquad i=0,1,2,\cdots \tag{1}$$

根据惠更斯-菲涅尔原理,假设波的传播方向与次波传播方向之间的夹角为 θ_i,则波的振幅将随夹角 θ_i 的增大而减小。应用古斯塔夫·基尔霍夫给出的倾斜因子[8]:

$$K(\theta_i)=(1+\cos\theta_i)/2 \qquad i=0,1,2,\cdots \tag{2}$$

式(1)可改写为:

$$R'=\sum_{i=0}^{n}[R_i/K(\theta_i)]=\sum_{i=0}^{n}[2R_i/(1+\cos\theta_i)] \qquad i=0,1,2,\cdots \tag{3}$$

式中:R_i 为节点 P_i 至节点 P_{i+1} 的直线距离,θ_i 为地震波传播至节点 P_i 处的倾斜角度。

综上所述,台阶地形条件下的等效路径即是以最大一段装药量 Q 的质心 O 为始点、以测点位置 M 为终点的折线,折线上的各个节点是地表面轮廓线上的拐点。

2.2 凹陷地形的等效路径与等效距离的确定

以如图 4 所示具有凹陷曲面的地形条件为例,以节点 P_1 为轴向测点 M 逆时针旋转垂线 l,其与凹陷段地表面轮廓线相切或相交的第 1 点即为节点 P_2,然后以测点 M 为轴向节点 P_2 顺时针旋转垂线 l,l

与凹陷段地表面轮廓线的切点或交点即为节点 P_3。

基于一般的应力波传播理论，爆破地震波自节点 P_2 传播至节点 P_3 的过程极为复杂，难以采用理论解析的方法表征其传播的规律。对于此种情况，可采用以下步骤近似确定节点 P_2 与节点 P_3 之间的等效距离：

(1)自测点 M 向节点 P_3 引直线并延长，同时延长自节点 P_1 至节点 P_2 的直线；

(2)设二延长线的交点至地表的最短距离为 B，将该距离的 1/2 处视为节点 C；

(3)将自节点 P_2 至节点 P_3 凹陷地形的等效路径分为两段，各段的等效距离依次为 R_2 和 R_2'。

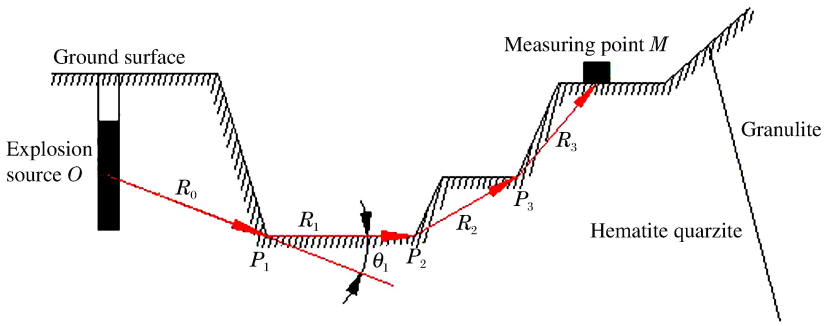

图 3　台阶地形条件下的等效路径

Fig. 3　Equivalent path in bench－like topography

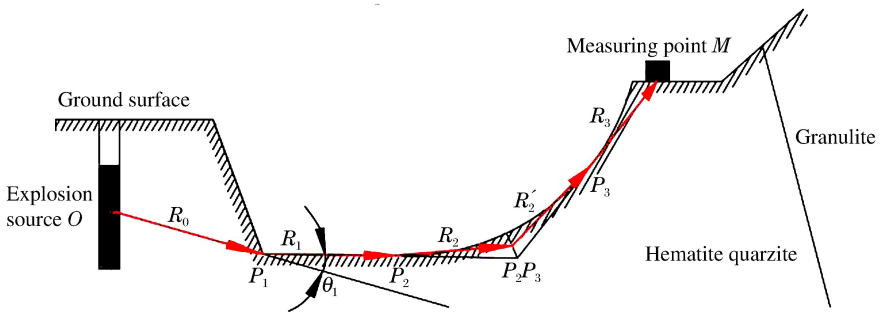

图 4　凹陷地形条件下的等效路径

Fig. 4　Equivalent path under concave topography conditions

3　基于等效路径的质点振速峰值

运用上述等效路径和等效距离的概念，同时综合考虑最大一段装药量、炸药的定容爆热、爆破地震波传播的等效距离及该距离上岩石的波阻抗和岩体完整性系数对地表质点振速峰值的影响，引入式(1)～(3)，台阶爆破地表质点振速峰值与地震波传播的等效距离之间的关系可表示为：

$$v=K\left[\frac{(QQ_V)^{\beta}(1+\cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^{n}(2R_i\rho_i c_{m_i}/\eta_i)}\right]^{\alpha}\qquad i=0,1,2,\cdots \tag{4}$$

式中：v 为质点振速峰值；Q 为最大一段装药量；Q_V 为炸药的定容爆热；R_i 为节点 P_i(等效路径上的拐点和岩石岩性变化的分界点)与节点 P_{i+1} 之间的等效距离；θ_i 为地震波传播路径上节点 P_i 处的方向角；ρ_i 为等效路径 P_iP_{i+1} 上所对应岩石的密度；c_{m_i} 为等效路径 P_iP_{i+1} 上所对应岩体的纵波传播速度；η_i 为等效路径 P_iP_{i+1} 上所对应岩体的完整性系数，$\eta_i=(c_m/c_r)^2$，其中 c_m 和 c_r 分别为岩体和岩石的纵波传播速度；K、α 为系统常数；β 为对远距离台阶炮孔爆破质点振速预测，可将最大一段装药量视为集中药包，取 $\beta=1/3$。

为叙述方便，以下将式(4)称为等效距离公式，应用该公式预测不同地形地质条件下不同距离上地表质点振速峰值，并检验其反映爆破地震波随距离衰减规律的有效性和可靠性。

需要说明的是，萨氏公式的 K 和 α 是用来反映地质地形条件影响的两个参数，而等效距离公式中的 K 和 α 则是该公式的两个常数项。

4 质点振速峰值计算公式的实验检验

在一大型露天矿山进行了一系列台阶爆破震动监测，并应用最小二乘法对监测数据进行回归拟合处理，得出了公式中系统常数 K 和 α 的值。将质点振速峰值的预测值与实测值进行对比，以检验该公式的有效性和可靠性。

4.1 爆破震动监测

测振仪器为 NUBOX-6016 智能振动监测仪，监测记录的数据主要包括地表质点振动速度时程曲线，且可读取测点处的质点振速峰值及主频。

各测线上各个爆破振动传感器将爆破地震动信号转换为电信号，然后再由爆破震动记录仪转化为数字信号，并以如图 5 所示的质点振速时程曲线的形式记录保存。测点位置的质点振速峰值可由爆破震动分析软件自动从质点振速时程曲线上读出。

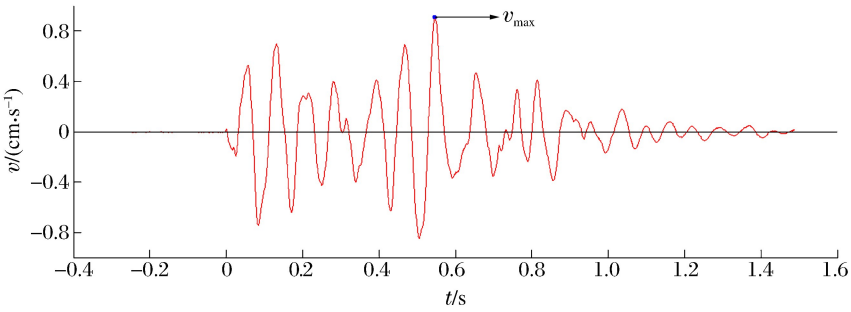

图 5 质点振速时程图示例

Fig. 5 An example of the monitored seismogram of blast induced ground vibrations

为保证爆破信号振动在收集阶段产生的误差尽可能减小，测点位置的岩石应较为完整且坚硬，传感器与地面间用石膏形成刚性粘结，且保证传感器水平放置，其 X 向指向爆心。在地表岩石破碎地段，测试时将传感器用长 20 cm 的铁桩固定于地面，以形成传感器与地面的刚性连接，避免测得的数据失真。使用多台仪器同时测试的时候，测点分布在一条指向爆区最大一段装药量位置的直线上(见图 6)。

在进行爆破震动监测的同时，系统统计爆破及最大一段起爆炸药量及其位置坐标、炮孔装药种类与爆炸性能参数、爆破振动监测传感器的位置坐标、地形与岩层数据及其他的相关爆破技术参数等。铵油炸药和乳化炸药的定容爆热 Q_V 分别为 3 840、3 200 kJ/kg，岩石与岩体的相关参数列于表 2。监测得到的地表质点振速峰值数据列于表 3。

表 2 岩石与岩体的相关参数

Table 2 Parameters of rock and rock mass

岩种		岩石密度 ρ/(g·cm^{-3})	岩石波速 c/(km·s^{-1})	岩体波速 c'/(km·s^{-1})	岩体完整性系数 η
Fe1	Fe11	3.526	5.33	3.35	0.395
	Fe12	3.526	5.33	4.13	0.600
	Fe13	3.526	5.33	4.62	0.750
Fe2	Fe21	3.461	5.13	2.29	0.200
	Fe22	3.461	5.13	3.15	0.376
SS	SS1	2.577	5.01	2.74	0.300
	SS2	2.577	5.01	3.71	0.550
	SS3	2.577	5.01	4.58	0.836
	SS4	2.577	5.01	4.75	0.900

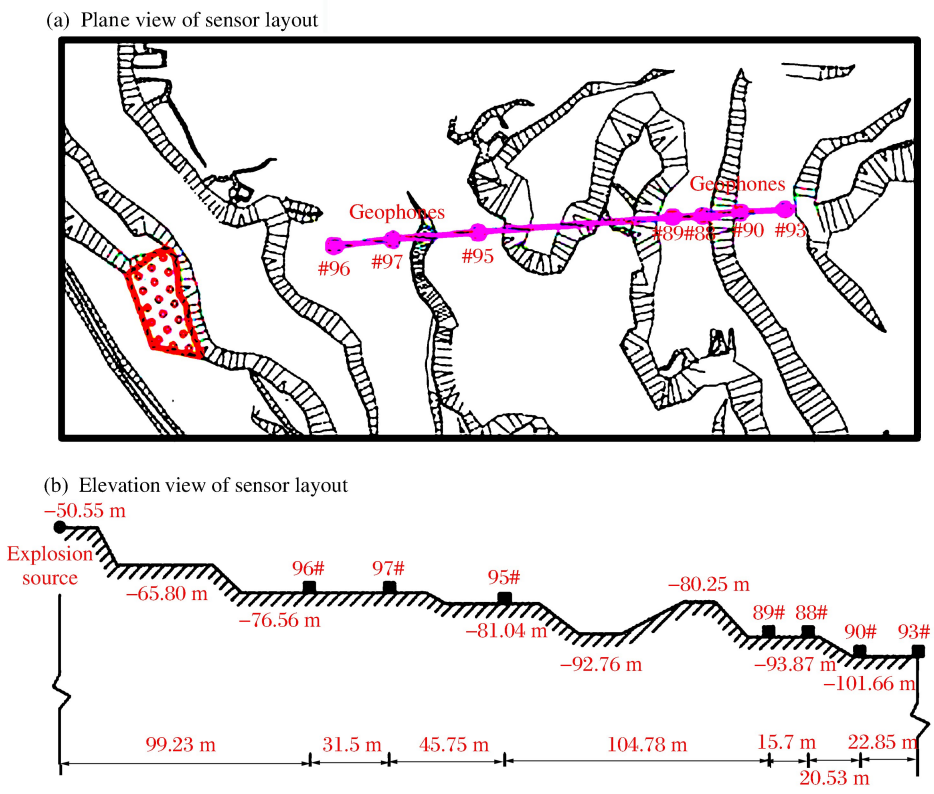

图 6　爆破震动监测振动传感器的布置示例

Fig. 6　An example of layout of geophones for monitoring of blast induced ground vibrations

表 3　质点振速峰值现场监测结果

Table 3　Recorded peak particle velocity (v_{max}) from field seismic monitoring

测点序号	最大单段装药量 Q/kg		分段等效距离 R_i/m			等效距离 $\sum R_i$/m	质点振速峰值 v/(cm·s^{-1})	主频 f/Hz
	乳化	铵油	Fe1	Fe2	SS			
1	540	360	135.99	0	153.25	289.24	1.09	4.88
3	540	360	156.58	0	478.00	634.58	0.29	11.72
4	0	750	0	0	149.86	149.86	2.74	40.04
5	0	750	0	0	220.59	220.59	1.61	18.55
6	0	750	129.00	67.61	452.24	648.85	0.13	12.70
7	450	0	0	258.92	98.2	357.12	0.60	26.37
8	450	0	0	261.76	27.71	289.47	0.97	10.74
9	450	0	34.29	140.71	123.45	298.45	0.8	4.88
10	270	450	0	0	553.66	553.66	0.43	33.20
11	270	450	0	0	553.66	553.66	0.49	33.20
12	270	450	0	0	741.59	741.59	0.25	12.70
13	0	450	70.71	0	45.16	115.87	3.15	34.18
14	0	450	70.71	0	45.16	115.87	3.15	34.18
15	0	450	72.04	232.42	148.95	453.41	0.20	16.60
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	0	420	7.68	89.09	120.22	216.99	1.92	35.16

4.2 系统常数 K、α 值的求解

应用最小二乘法对表 3 所列质点振速峰值实测结果数据进行等效距离公式(式(4))的回归拟合分析,以求得公式常数项 K、α 的值,同时考察该公式与实测数据的相关性及误差水平。对式(4)两边取对数,得

$$\ln v=\ln K+\alpha\ln\left[\frac{(QQ_V)^{1/3}(1+\cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^{n}(2R_i\rho_i c_{m_i}/\eta_i)}\right] \tag{5}$$

设 $x=\ln\left[\dfrac{(QQ_V)^{1/3}(1+\cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^{n}(2R_i\rho_i c_{m_i}/\eta_i)}\right]$,$y=\ln v$,$a=\ln K$,$b=\alpha$,得:

$$y=a+bx \tag{6}$$

按式(6)对表 3 所列数据进行线性回归拟合处理(图 7),可得式(4)中的系统常数 $K=1\ 528$,$\alpha=1.91$;在置信度为 95%时,其相关系数 $R=0.982\ 5$,剩余均方差 $\sigma_R=0.226\ 8$,质点振速峰值与式(4)等号右边的等效距离等各个参量的相关性强,且离散性较小。因此,式(4)可写为:

$$v=1\ 528\left[\frac{(QQ_V)^{1/3}(1+\cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^{n}(2R_i\rho_i c_{m_i}/\eta_i)}\right]^{1.91}\qquad i=0,1,2,\cdots \tag{7}$$

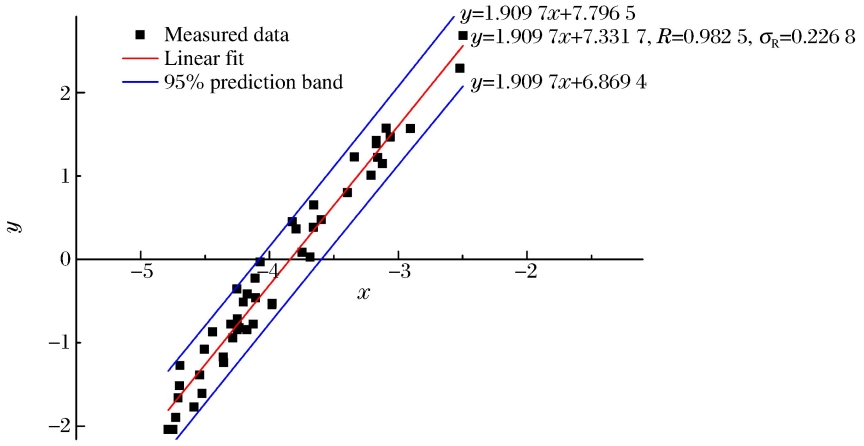

图 7 置信度为 95%时公式(6)的线性回归拟合结果

Fig. 7 Fitted results of linear regression of the equation (6) with a confidence level of 95%

4.3 误差检验及结果

应用等效距离公式(式(7))对表 3 所列各测点的质点振速峰值进行预测,然后将预测结果分别与实测结果及应用萨氏公式预测得到结果进行对比,可以检验采用等效距离公式预测台阶爆破地表质点振速峰值的准确性和可靠性。

4.3.1 萨氏公式 K、α 值的求算

采用萨氏公式对表 3 所列质点振速峰值和最大一段装药量数据进行如式(5)~(6)的回归拟合处理,分别得到取水平距离和空间直线距离时萨氏公式的 K 和 α 值(见表 4)。

由表 4 可见,用萨氏公式预测的质点振速峰值虽与最大一段装药量 Q 和距离 R 的相关性较强,但其剩余均方差都远高于等效距离公式,离散性偏大。

表 4 萨氏公式回归分析结果

Table 4 Calculated results of linear regression of peak particle velocity with Sardofsky's equation

参数	水平距离	空间距离
K	704.226 5	702.540 0
α	1.938 4	1.927 4
相关系数 R	0.953 6	0.951 5
剩余均方差 σ_R	0.366 4	0.374 3

4.3.2 预测误差计算与对比

分别应用等效距离公式和萨氏公式预测各实测位置上的爆破地震波质点振速峰值，其各自的误差分析结果如表 5 所示。在表 5 中，相对误差 ε 为质点振速峰值的预测值与实测值之差的绝对值与实测值之比，平均误差 ε' 为表 5 中各样本的相对误差之和与样本个数之比。

表 5 等效距离公式及萨氏公式的质点振速峰值预测值与实测值的比较

Table 5 Relative error ε and the average relative error of the equivalent distance equation and Sardovsky's equationto the recorded data

序号	实测值 /(cm·s^{-1})	萨氏公式(水平距离)		萨氏公式(空间距离)		等效距离公式	
		预测值 /(cm·s^{-1})	相对误差 ε/%	预测值 /(cm·s^{-1})	相对误差 ε/%	预测值 /(cm·s^{-1})	相对误差 ε/%
1	1.09	1.50	37.96	1.54	41.24	1.19	9.56
2	0.58	0.75	29.96	0.78	34.31	0.76	31.71
3	0.29	0.26	11.07	0.27	7.02	0.37	28.50
4	2.74	3.45	26.01	3.53	28.80	3.32	21.16
5	1.61	1.17	27.49	1.18	26.62	1.59	1.45
6	0.13	0.19	46.81	0.20	52.57	0.18	35.09
7	0.60	0.49	18.06	0.43	28.40	0.50	16.85
8	0.97	0.75	23.17	0.66	31.94	0.64	33.94
9	0.80	0.60	24.51	0.63	21.49	0.60	25.57
10	0.43	0.57	33.35	0.60	38.79	0.46	6.17
11	0.49	0.57	17.03	0.60	21.79	0.46	6.83
12	0.25	0.14	44.44	0.15	41.92	0.26	4.51
13	3.15	3.67	16.47	3.72	18.21	3.92	24.48
24	3.15	3.67	16.47	3.72	18.21	3.92	24.48
15	0.20	0.27	32.55	0.27	35.72	0.27	35.43
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	1.92	1.11	42.44	1.11	42.40	1.42	26.13
平均误差 ε'/%		32.0		32.69		19.14	

由表 5 可见：与实测值相比，采用等效距离公式预测质点振速峰值的平均误差为 19.14%。而采用萨氏公式，分别取水平距离和空间距离作为公式中的距离 R 时，质点振速峰值预测结果的平均误差分别为 32.00%和 32.69%，即采用水平距离和空间距离时萨氏公式的预测误差分别比等效距离公式高约 67%和 71%，说明采用本文中提出的等效距离公式预测台阶爆破地表质点振速峰值，能够更准确地反映爆破地震波随距离衰减的基本规律，预测更为准确可靠。

5 结　论

(1)提出了一种预测地表质点振速峰值的计算公式——等效距离公式，该预测方法同时考虑了最大一段装药量和炸药的定容爆热、等效距离、等效路径上岩体介质的波阻抗和完整性系数等因素的影响，

并且该预测公式中等效路径和等效距离概念的提出,有效反映了爆破地震波在传播路径中不同岩性和复杂地形对其衰减规律的影响。

(2)将应用该公式预测台阶爆破地震波地表质点振速峰值的结果与实测值进行对比,发现该公式能够基本准确地反映矿山环境中具体地形和地质条件对爆破地震波地表质点振速峰值的影响,预测结果的准确性显著高于国内外广泛采用的萨氏公式,表明该公式较为准确地反映了矿山复杂地形条件下爆破地震波随等效距离衰减的基本规律,为爆破震动预测提供了一种更为有效的新方法。

(3)该预测方法在台阶爆破工程中预测地表质点峰值速度的有效性和准确性已经得到验证,但在地下爆破工程预测质点峰值速度还有待进一步实践和验证。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准编写组. 爆破安全规程:GB 6722－2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[2] Reza N. Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011,48(6):899-908.

[3] 张继春. 三峡工程基岩爆破振动特性的试验研究[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2):131-137.
Zhang Jichun. Vibration characteristics of blasting in bed rock mass at Sanxia Project[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(2):131-137.

[4] 郭学彬,肖正学,张志呈. 爆破振动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1):83-87.
Guo Xuebin, Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng. Slope effect of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(1):83-87.

[5] 朱传统,刘宏根,梅锦煜. 地震波参数沿边坡坡面传播规律公式的选择[J]. 爆破,1988,10(2):30-31.
Zhu Chuantong, Liu Honggen, Mei Jinyu. Equation selection of the transmission rule of seismic wave parameters along slope surface[J]. Blasting, 1988,10(2):30-31.

[6] Nguyena K V, Gatmiri B. Evaluation of seismic ground motion inducedbytopographic irregularity[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007,27(2):183-188.

[7] 宋光明,陈寿如,史秀志,等. 露天矿边坡爆破振动监测与评价方法的研究[J]. 有色金属(矿山部分),2000(4):24-27.
Song Guangming, Chen Shouru, Shi Xiuzhi, et al. Research on the methods of measurement and evaluation of blasting vibration in open-pit mines[J]. Nonferrous Metal (Mining), 2000(4):24-27.

[8] Guillaume G, Picaut J, Dutilleux G, et al. Time-domain impedance equationtion for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011,330(26):6467-6481.

[9] 饶运章,汪弘. 爆破振动速度衰减规律的多元线性回归分析[J]. 金属矿山,2013,450(12):46-47;51.
Rao Yunzhang ,Wang Hong. Multiple regression linear analysis on attenuation equation of blasting vibration velocity[J]. Metal Mines, 2013,450(12):46-47;51.

[10] 谭文辉,璩世杰,毛市龙,等. 边坡爆破振动高程效应分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(4):619-623.
Tan Wenhui, Qu Shijie, Mao Shilong, et al. Analysis on altitude effect ofblasting vibration in slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(4):619-623.

[11] 张华,高富强,杨军,等. 深凹露天爆破震动速度衰减规律实验研究. 兵工学报,2010,31(增刊 1):275-278.
Zhang Hua, Gao Fuqiang, Yang Jun, et al. Experimental studies on blasting vibration velocity attenuation lawin deep openpit mining. Acta Armamentarii, 2010,31(suppl 1):275-278.

[12] 刘美山,吴从清,张正宇. 小湾水电站高边坡爆破震动安全判据试验研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(1):40-43.
Liu Meishan, Wu Congqing, Zhang Zhengyu. Experimentation on judging standard of blasting vibration safetyin high slope excavation of Xiaowan Hydropower Station[J]. Journal of Yangtze River Scientif ic Research Institute, 2007,24(1):40-43.

[13] 裴来政. 金堆城露天矿高边坡爆破震动监测与分析[J]. 爆破,2006,23(4):82-85.
Pei Laizheng. Observation and analysis of blasting vibration to the high slope of Jinduicheng open-pit mine[J]. Blasting, 2006,23(4):82-85.

Attenuation law of blasting induced ground vibrations based on equivalent path

Hu Xuelong[1], Qu Shijie[1], Jiang Wenli[2], Li Hua[2],
Yang Wei[2], Huang Hanbo[2], Hu Guangqiu[1]
(1. *Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Hebei Iron and Steel Group Mining Group Company, Tangshan* 063000, *Hebei*, *China*)

Abstract: In this work, in view of the widely understood idea that topography and geological conditions are usually complicated and have a critical influence on the level of blast induced ground vibrations, we analyzed the effect of topography on the path through which seismic waves travel, introduced two concepts, the equivalent path and the equivalent distance, and established an equation for determining the surface peak particle velocity, taking into account of the effects of the maximum explosive charge quantity of a single initiation period, the explosion heat of the explosive product used, the acoustic impedance of the rock, and the integrity coefficient of the rock mass. A series of field seismic monitoring tests were carried out to determine the reliability of the equation. The result show that this equation can be used to describe the relationship between the peak particle velocity and the equivalent distance, and be applied under actual field topographical and geological conditions with a much higher accuracy than that of the Sardovsky's equation, proving the reliability of the equivalent distance based equation describing the attenuation basic patterns of seismic waves and possibility for use in field practice.

Keywords: blasting; ground vibration; peak particle velocity; topography; equivalent distance

（责任编辑　曾月蓉）