

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.005

爆破地震波传播规律试验研究*

安胜杰¹, 易吉祥², 池恩安¹, 于海阔³, 欧阳天云^{3,4}

(1. 保利久联控股集团有限责任公司, 贵阳 550002; 2. 安顺新联爆破工程有限公司, 安顺 561000;
3. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002; 4. 保利民爆哈密有限公司, 哈密 839200)

摘要: 根据别斯库都克露天煤矿的现场情况, 分析爆破地震波在多台阶段边坡中的传播规律, 对矿区台阶边坡进行爆破振动测试, 选取爆破区域上部平台由近到远依次布置的四个振动测试点, 共进行爆破振动试验7次, 取得5组有效数据。通过对5组振动数据结果进行萨道夫斯基公式回归拟合分析, 轴向、径向和垂直方向的振动公式拟合结果的相关性系数 R 均大于0.8, 线性相关性较好, 振动传播公式对该地质条件下的边坡震动衰减规律有较好的适用性, 且随着爆心距的增大, 边坡质点振动速度不断衰减, 三个方向中水平径向峰值振速最大, 水平切向次之, 垂直方向最小, 爆心距对爆破振动速度的影响要远大于高程。利用该公式开发爆破振动预测软件, 通过给定的参数可实现测点位置的振动峰值预测、校核最大单段起爆药量、校核振动安全距离, 为解决非工作帮的边坡稳定提供数据基础。

关键词: 露天煤矿; 爆破地震波; 萨道夫斯基公式; 爆破振动预测软件

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0032-05

Experimental Research on Blasting Seismic Wave Propagation Law

AN Sheng-jie¹, YI Ji-xiang², CHI En-an¹, YU Hai-kuo³, OUYANG Tian-yun^{3,4}

(1. Poly Union Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Anshun Xinlian Blasting Engineering Co., Ltd., Anshun 561000, China;

3. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

4. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839200, China)

Abstract: According to the field situation of Biesikuduke open-pit coal mine, the propagation law of blasting seismic wave in multi-step slope was analyzed. The blasting vibration tests were carried out on the step slope of the mining area. Four vibration test points were selected from near to far on the upper platform of the blasting area, and seven times blasting vibration tests were carried. Finally, five sets of valid data were obtained, and the five groups of vibration data results were fitted by the Sadovski formula regression fitting. As a result, the correlation coefficient R of the fitting results in axial, radial and vertical directions are all greater than 0.8, which indicates that the linear correlation is good. Meanwhile, it also shows that the vibration propagation formula has a good applicability to the slope vibration attenuation law under this geological condition. Furthermore, with the increase of the distance from the blast center, the slope particle vibration velocity decreases continuously. Among the three directions, the peak vibration velocity of the horizontal radial direction, horizontal tangential direction and the vertical direction is largest, second and smallest, respectively. Therefore, The impact of the distance from the blast center on the blasting vibration velocity is much greater than that of the elevation. By using this formula to develop the blasting vibration prediction software, the vibration peak value of measuring point position can be predicted, the maximum single-stage detonating charge and the vibration safe distance can be checked through the given parameters, which provide the data basis for solving the non-working slope stability.

Key words: open-pit coal mine; blasting seismic wave; sadovski formula; blasting vibration prediction software

1 工程概况

新疆别斯库都克露天煤矿(以下简称“别矿”)年产煤 2×10^6 t、年石方剥离量 1.8×10^6 m³,平均每天爆破岩石 5×10^4 m³、消耗炸药20 t。其开采形式采用工作帮梯级放坡,开采现状见图1。非工作帮位于西帮和南帮,经过长年的风化,有小型崩塌的风险,为解决底部平台爆破产生的振动对非工作帮的动力稳定性影响问题,需对底部平台爆破产生的地震波的动力响应规律进行试验研究,进而在爆破振动预测的基础上对底部平台的爆破参数进行调整,降低爆破振动危害。



图1 露天煤矿开采现场示意图

Fig. 1 Diagram of mining site of open pit coal mine

2 爆破振动试验研究

2.1 爆破振动试验方案

本次爆破振动试验主要是研究爆破地震波在边坡岩体中的传播衰减规律^[1,2],进而分析别矿露天边坡爆破动力响应特征规律,并通过大量振动测试数据回归萨道夫斯基方程中的参数 K 、 α 。根据对矿山地质调查,本次试验的台阶边坡岩性主要为砂岩,质地较硬,属于中硬岩,台阶边坡保存完好,有利于试验进行,现场台阶边坡状况见图2。

试验方案如下:

(1) 现场振动监测点的布置

根据矿山实际生产情况和测点布置目的,选取岩体构造比较单一且地质条件相对较差的剖面进行爆破振动监测试验,在爆破区域的上部平台由近到远依次布置4个振动测试点:A、B、C、D,见图3。



图2 台阶边坡现状图

Fig. 2 Present situation map of step slope

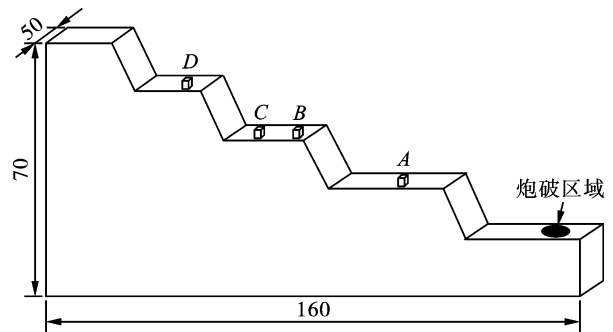


图3 测点布置示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point layout (unit: m)

(2) 现场传感器安装

在边坡岩体上找到合适的基岩,并将传感器用石膏固定在清理后的基岩上^[3]。传感器 X 轴方向指向爆源, Y 轴方向与爆源方向垂直, Z 轴方向竖直向上。现场仪器布置,见图4所示。



图4 现场仪器布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of field instrument layout

别斯库都克露天煤矿爆破采用电子雷管微差起爆网路,孔排间采用毫秒微差延时网路来控制最大单响药量,采用三角形布孔方式^[4]。爆破孔网参数见表1。

2.2 爆破振动试验结果及分析

本次爆破振动试验共进行了7次,每次测得4

收稿日期:2021-05-17

作者简介:安胜杰(1974-),男,工程师、硕士研究生,主要从事采矿研究,(E-mail)cobblestone@yeah.net。

通讯作者:欧阳天云(1992-),男,工程师、硕士研究生,主要从事爆破数字化研究,(E-mail)714441770@qq.com。

基金项目:2019年新疆维吾尔自治区引进高层次人才天池计划

组振动数据,其中除去2次异样数据后,还剩5次有效数据,包括有效测点数据共20组,60个爆破振动信号。爆破工艺参数见表2,爆破振动实测数据见表3。

表1 爆破孔网参数表

Table 1 Blasting hole network parameter table

参数名称	参数选择
台阶高度 H	$H = 10 \sim 12$ m
炮孔直径 d	$d = 120$ mm
底盘抵抗线 W_d	实际抵抗线取 $W_d = 4 \sim 4.5$ m
孔距 a	孔距 $a = 5.5 \sim 6.5$ m
排距 b	梅花形布孔,排距 $b = 3.5 \sim 4$ m
超深 h	超深 $h = 1.2$ m
炸药单耗 q	$q \leq 0.5$ kg/m ³ , 根据实际孔深调整
单孔装药量 Q	$Q = qabH = 72 \sim 108$ kg, 根据实际孔深调整
填塞长度 l	实际取值为 $l = 3.5$ m

表2 爆破工艺参数表

Table 2 Blasting process parameter table

测试次数	爆区中心坐标		孔径/mm	最大单响药量/kg	总药量/t
	X	Y			
1	4921195.692	4122247.916	120	81.0	10.40
2	4921199.400	4122193.229	120	125.0	16.04
3	4921240.958	412033.360	120	90.0	9.36
4	4920748.924	412009.725	120	104.2	15.73
5	4920946.948	412000.998	120	110.0	14.28

表3 爆破振动试验实测数据

Table 3 Measured data of blasting vibration test

次数	测点	最大单响药量/kg	爆心距/m	振动峰值速度/(cm·s ⁻¹)			合速度/(cm·s ⁻¹)	振动频率/Hz		
				V_x	V_y	V_z		F_x	F_y	F_z
1	A	81	57.1	2.92	2.85	2.73	4.909	18.52	12.20	23.81
	B		79.3	1.80	1.78	0.99	2.718	22.22	35.71	35.71
	C		93.0	1.39	1.30	0.77	2.053	27.62	24.38	25.31
	D		110.5	0.75	1.83	0.78	2.126	25.08	14.01	30.89
2	A	125	60.0	4.81	3.18	1.86	6.059	23.18	21.56	21.51
	B		75.0	2.45	2.32	1.93	3.887	14.71	18.35	44.44
	C		95.0	1.59	1.45	0.90	2.333	40.00	39.80	37.64
	D		105.0	1.21	1.78	1.14	2.436	13.42	32.00	38.84
3	A	90	58.5	2.35	2.14	1.85	3.678	34.04	36.53	18.82
	B		82.0	1.85	1.76	1.57	2.997	23.76	35.84	26.43
	C		96.5	1.72	1.39	0.72	2.326	37.26	34.78	34.78
	D		120.0	1.33	1.12	1.09	2.052	20.10	48.49	35.71
4	A	104.2	50.0	5.47	5.09	3.82	8.392	17.35	17.35	23.74
	B		68.0	3.46	2.78	2.13	4.923	21.57	15.41	17.94
	C		87.0	2.26	1.51	1.18	2.963	19.14	15.56	33.76
	D		100.0	1.47	1.12	0.98	2.092	38.28	28.37	38.46
5	A	110	45.0	5.66	5.11	3.33	8.321	24.76	23.42	29.52
	B		70.0	3.76	2.54	2.38	5.124	13.07	25.56	27.68
	C		85.0	2.54	1.65	1.36	3.320	14.71	33.47	29.96
	D		102.3	1.96	1.94	1.61	3.193	43.01	30.89	15.15

通过对表3中爆破振动实测数据进行分析,得出别矿台阶边坡爆破振动的响应特征^[5]:

(1)整体数据显示,随着爆破振动在边坡上传播时间和距离的增加,三个方向上的振动峰值速度不断衰减,监测点距爆源的距离对爆破振动峰值速度的影响要远大于高程^[6]。

(2)水平径向质点振动的峰值速度最大,水平切向次之,垂直向最小^[7]。水平径向质点振动峰值范围为0.75~5.66 cm/s、水平切向为1.12~5.11 cm/s、垂直方向为0.72~3.82 cm/s,爆破振动合速度为2.053~8.392 cm/s。

3 爆破振动公式回归拟合

利用萨道夫斯基经验公式研究测点振速与爆心距和最大单响药量之间的关系^[8-11],利用MATLAB软件线性回归分析得到与传播地质条件和爆破方式有关的衰减系数 K 、 α 值,进而得到别矿爆破地震波的传播规律公式^[8]。对萨道夫斯基公式两边取对数进行变形可得

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

$$\text{令 } y = \ln V, x = \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right), b = \ln K, a = \alpha。$$

则有线性回归方程

$$y = ax + b \quad (2)$$

利用MATLAB软件对采集到的振动数据进行拟合处理,得到符合现场实际工程影响爆破振动的相关参数 K 、 α ,三个方向速度及合速度拟合结果分别见式(3)、(4)、(5)、(6)。

$$V_x = 276.99 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.704} \quad (3)$$

$$V_y = 94.07 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.355} \quad (4)$$

$$V_z = 104.48 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.504} \quad (5)$$

$$V = 227.47 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.48} \quad (6)$$

式中, X 方向和合速度方向拟合曲线结果见图5、图6。

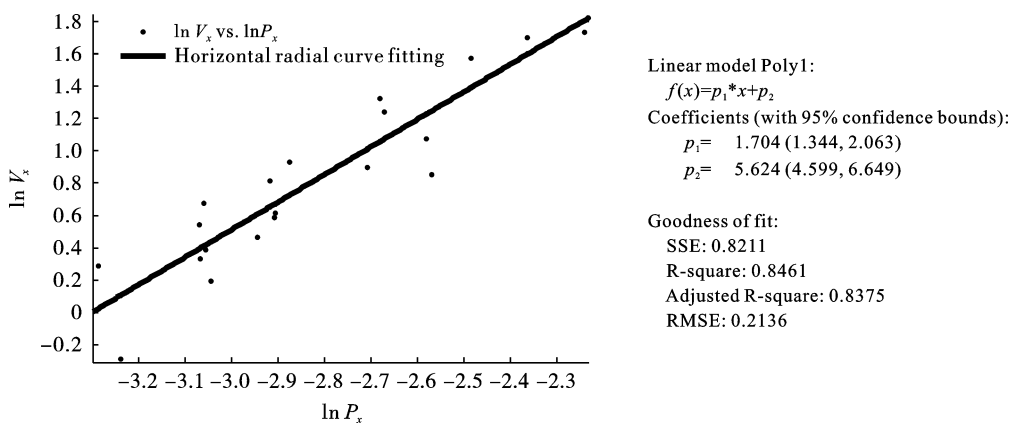


图5 水平径向速度线性拟合曲线图

Fig. 5 Linear fitting curve of horizontal radial velocity

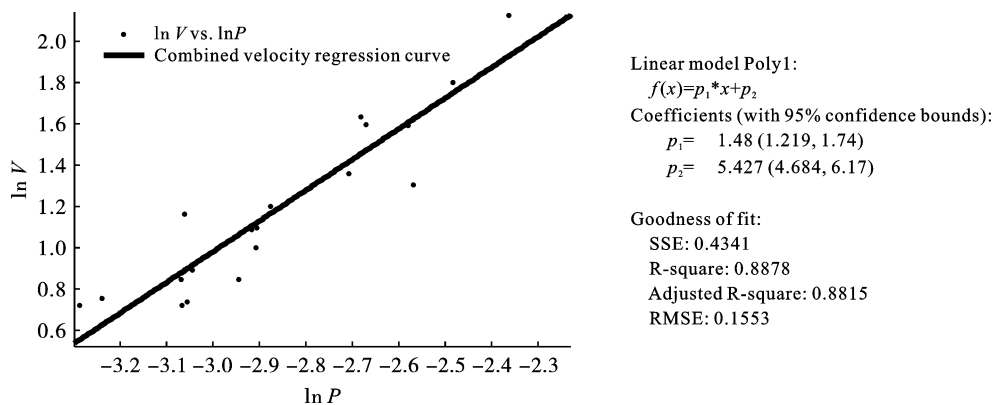


图6 合速度线性拟合曲线图

Fig. 6 Linear fitting curve of combined velocity

相关性系数 R 是评价线性关系的密切程度,即衡量回归分析值与真实值的相似度, R 的值大于 0.8 且与 1 越接近,线性相关程度越高。三个方向速度及合速度拟合结果相关性系数均大于 0.8,说明该测振结果具有一定的参考价值。

4 振动预测软件研发

当监测点距离爆源较远时,将整个爆区看作一个参考点 O ,该点的坐标 $O(x_0, y_0, z_0)$ 计算公式见式(7)

$$\begin{cases} x_0 = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2} \\ y_0 = \frac{Y_{\min} + Y_{\max}}{2} \\ z_0 = \frac{Z_{\min} + Z_{\max}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: X_{\min} 、 Y_{\min} 、 Z_{\min} 为所有炮孔 X 、 Y 、 Z 坐标中最小值; X_{\max} 、 Y_{\max} 、 Z_{\max} 为所有炮孔 X 、 Y 、 Z 坐标中最大值。

监测点至爆源中心距离 R 的计算公式见式(8)

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (8)$$

式中, x 、 y 、 z 分别为监测点的 GPS 坐标。

当给定场地系数 K ,衰减系数 α ,最大单响药量和监测点的坐标后,便可根据萨道夫斯基经验公式预测该点的质点振动速度峰值,经过公式的相关变换,可实现校核最大单段起爆药量、校核振动安全距离。如图 7 所示。



图 7 爆破振动预测的软件界面

Fig. 7 Software interface for blasting vibration prediction

5 结论

(1) 别矿的爆破振动监测结果显示,随着爆心距的增大,边坡质点振动速度不断衰减,三个方向中水平径向峰值振速最大,水平切向次之,垂直方向最小,爆心距对爆破振动速度的影响要远大于高程。

(2) 利用 MATLAB 软件结合萨道夫斯基经验公

式对其进行线性拟合回归计算,获取了与传播地质条件和爆破方式有关的系数 K 、 α 值,其中水平径向 $K = 276.99$ 、 $\alpha = 1.074$,水平切向 $K = 94.07$ 、 $\alpha = 1.355$,垂直方向 $K = 104.48$ 、 $\alpha = 1.504$,合速度方向 $K = 227.47$ 、 $\alpha = 1.48$ 。

(3) 结合试验的结果,编制爆破振动预测软件,实现了对测点位置振动峰值的预测、校核最大单段起爆药量、校核爆破振动的安全距离。

参考文献 (References)

- [1] 马斐,朱帅帅,唐海,等.爆破荷载下露天矿高边坡振动速度阈值的确定及控制[J].矿业工程研究,2020,35(4):20-26.
- [1] MA F, ZHU S S, TANG H, et al. Determination and control of vibration velocity threshold of high slope in open pit mine under blasting load[J]. Research of Mining Engineering, 2020, 35(4): 20-26. (in Chinese)
- [2] 陈涛,黄浩轩,王珍.露天矿山开挖边坡爆破振动损伤规律及稳定性分析[J].煤炭工程,2019,51(11):116-119.
- [2] CHEN T, HUANG H X, WANG Z. Analysis of blasting vibration damage law and stability of open pit excavation slope[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 116-119. (in Chinese)
- [3] 雷兴海,吴桂义,雷振,等.露天控制爆破振动对邻近建筑物影响的分析[J].采矿技术,2021,21(2):124-128.
- [3] LEI X H, WU G Y, LEI Z, et al. Analysis of the influence of open-pit controlled blasting vibration on adjacent buildings[J]. Mining Technology, 2021, 21(2): 124-128. (in Chinese)
- [4] 冯志楼,张云鹏,刘永亮.某露天矿深孔爆破振动效应预测分析[J].华北理工大学学报(自然科学版),2019,41(4):13-18.
- [4] FENG Z L, ZHANG Y P, LIU Y L. Prediction and analysis of vibration effect of deep hole blasting in an open pit mine[J]. Journal of North China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 41(4): 13-18. (in Chinese)
- [5] 黄志坚,张绍江,李永利,等.露天灰岩矿在岩溶区域边坡爆破的振动规律研究[J].中国矿山工程,2021,50(1):76-78.
- [5] HUANG Z J, ZHANG S J, LI Y L, et al. Study on the vibration law of slope blasting of open-pit limestone mine in karst area[J]. China Mine Engineering, 2021, 50(1): 76-78. (in Chinese)