

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.023

露天采场台阶爆破萨道夫斯基公式的 线性回归分析

杜军,花良奎,厉美杰,王洪强,王明伟

(北方爆破科技有限公司,北京 100089)

摘要: 随着爆破器材的不断发展,尤其高精度导爆管雷管和电子雷管的普及,露天采场台阶爆破在进行萨道夫斯基公式线性回归分析,对于测振点距离爆破区域较近而无法忽略炮孔散布位置时,在选择最大一段起爆药量和爆源至测振点距离上定义模糊。针对逐孔爆破近距离爆破测振,采用比例距离,最大一段起爆药量选取 ≤ 8 ms的总装药量或距离该测振点最近炮孔的药量,爆源至测振点距离选取最大一段起爆药量炮孔范围的中心距测振点的三维距离或距离该测振点最近炮孔的三维距离,通过群孔比例距离和单孔比例距离两者数值对比,选取比例距离较小者进行线性回归。结果表明:采用该方法,对于同一方向或邻近方向的测振点数值,经过降噪处理后,能相对较准确地进行线性回归。

关键词: 逐孔爆破; 爆破振动; 近距离爆破测振; 萨道夫斯基线性回归; 比例距离

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2024)04-0181-06

Linear Regression Analysis on Sadovsky Formula for Open-pit Bench Blasting

DU Jun, HUA Liang-kui, LI Mei-jie, WANG Hong-qiang, WANG Ming-wei

(North Blasting Technology Co., LTD., Beijing 100089, China)

Abstract: With the continuous development of blasting equipment, the popularization of high-precision detonator detonators and electronic detonators have been widely used in open-pit bench blasting. However, the definition is vague in the selection of the maximum amount of initiating charge and the distance from the detonation source to the vibration measurement point for the linear regression analysis of the Sadovsky formula when the vibration measurement point is close to the blasting area, and the dispersion position of the blast hole cannot be ignored. A proportional distance was used to measure close-range blasting vibrations by hole blasting. The total charge with a delay interval smaller than 8 ms or the charge quantity nearest to the vibration measurement point was selected as the maximum blasting charge in a section. The distance between the detonation source and the vibration measurement point was selected as the three-dimensional distance between the center of the hole range of the maximum blasting charge and the vibration measurement point or the three-dimensional distance between the hole and the nearest vibration measurement point. The one with a smaller proportional distance was selected for linear regression by comparing the group proportional and single proportional distances. The results show that it has relatively accurate linear regression using this method for the same direction or near the direction of the vibration point value after the noise reduction process.

Key words: hole-by-hole blasting; blasting vibration; close-range vibration measurement; linear regression; proportional distance

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-16

网络首发日期 (Published online): 2024-05-07

作者简介: 杜军(1981-),男,本科,高级工程师,工程爆破施工作业, (E-mail) dj@northminingdrc.com.

About the author: DU Jun(1981-), male, undergraduate, senior engineer, Engineering blasting construction operations, (E-mail) dj@northminingdrc.com.

露天矿山爆破施工作业时,爆破产生的有害效应中,爆破振动及高程差带来的爆破振动放大效应而导致的安全平台或边坡的垮塌事件时有发生^[1-5]。对于封闭圈较小的露天矿山或临近高陡边坡时,爆破时产生的振动对边坡的影响不容忽视,因此需要对爆破振动进行控制^[6-8]。根据爆破测振相关规范和标准^[9,10],杜军等人在某铜钴氧化矿露天采场通过近距离爆破测振试验,采用比例距离,低通滤波对实测数值进行降噪的方法,对萨道夫斯基公式进行线性回归分析,得出 K 、 a 值,并分析理论计算值和实际值误差的原因。

1 露天采场介绍

该露天采场为铜钴氧化矿露天采场,矿石主要为孔雀石、水钴矿、钴华,少量为硅孔雀石,矿石构造常见为蜂窝状构造。基岩为白云岩类为主的碳酸盐

岩,地表风化和岩溶作用强烈,局部夹有软弱夹层和构造破碎带。境界上口尺寸:511 m×399 m;境界内采出矿石量 293.61 万 t,剥离岩石量 2846.76 万 t。采场台阶高度 12 m,钻孔设备采用 FlexiROC D50 履带式潜孔钻机一体机,孔径 ϕ 138 mm。

2 爆破试验

针对该铜钴氧化矿露天采场爆破振动试验共进行了 4 次,包括 1364 ~ 1352 m 台阶、1352 ~ 1340 m 台阶、1340 ~ 1328 m 台阶及 1328 ~ 1316 m 台阶,4 个爆破区域均采用多孔粒状铵油炸药,起爆弹为 150 g,地表及孔内均采用高精度导爆管雷管,孔间选择 17 ms 或 25 ms,排间选择 42 ms,孔内为 500 ms,装药结构为连续装药。

2.1 爆破参数介绍

爆破参数统计表见表 1。

表 1 爆破参数统计表
Table 1 Blasting parameters

台阶	爆区长宽比	侧向临空面情况	排数	孔数/个	孔深/m	孔排距/m	单孔药量/kg	最大一段起爆药量/kg	雷管选择/ms
1364 ~ 1352 m	3.0	1	13	361	12 ~ 12.5	6×5	75 ~ 87.5	612.5	17/42/500
1352 ~ 1340 m	6.7	1	7	216	12 ~ 12.5	6×5	75 ~ 87.5	612.5	17/42/500
1340 ~ 1328 m	1.9	拉槽爆破	12	165	11 ~ 12	6×4	87.5	612.5	25/42/500
1328 ~ 1312 m	4.0	1	8	166	12 ~ 12.5	5.5×4	87.5	240	25/42/500

2.2 测振仪器及测振点介绍

2.2.1 测振仪器的选择

试验选用中科测控的 TC-4850 爆破测振仪,采样频率 8 k,触发电平 0.2 cm/s,采样延时 -100 ms,采样长度根据爆区网络总延时时间选择。

2.2.2 测振点介绍

(1) 1364 ~ 1352 m 台阶爆破区域

该爆破区域分别布设 6 个测振点,1-5 号测振点与炮孔孔口在一个水平面,1 号点,2 号点,5 号点

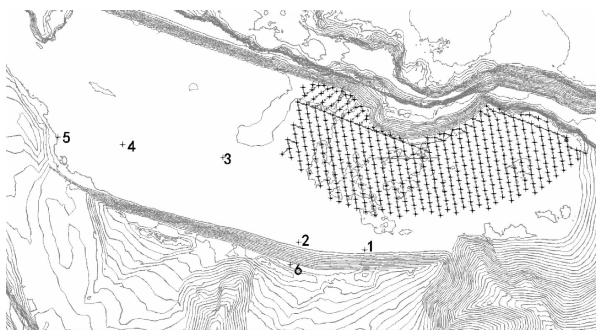


图 1 1364 ~ 1352 m 台阶爆破区域测振点布置示意图
Fig. 1 Vibration measurement point layout in the 1364 ~ 1352 m blasting area

距离 1364 m 平台边坡坡脚 1 m 处,6 号点位于 1376 m 平台坡顶 2.5 m 处。具体各测振点示意图见图 1,各测振点具体位置见表 2。

(2) 1352 ~ 1340 m 台阶爆破区域

该爆破区域分别布设 6 个测振点,1 号测振点与炮孔孔口在一个水平面,2~5 及 7 号位于 1364 m 平台。具体各测振点示意图见图 2,各测振点具体位置见表 3。

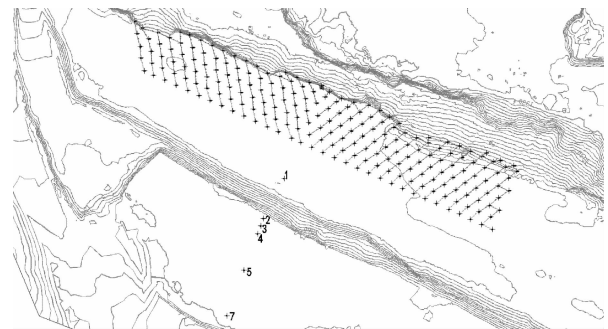


图 2 1352 ~ 1340 m 台阶爆破区域测振点布置示意图
Fig. 2 Vibration measurement point layout in the 1352 ~ 1340 m blasting area

表 2 1364 ~ 1352 m 台阶爆破区测振点坐标

Table 2 Coordinates of vibration measurement points in the 1364 ~ 1352 m blasting area

编号	1	2	3	4	5	6
Y	266 145. 029	266 102. 923	266 054. 666	265 990. 767	265 949. 537	266 097. 618
坐标 X	296 108. 126	296 113. 113	296 167. 189	296 175. 418	296 180. 072	296 098. 731
Z	1364. 458	1364. 703	1364. 243	1364. 628	1364. 940	1375. 422
测点到爆源中心水平距 r_1/m	69. 77	96. 20	128. 04	192. 13	233. 54	109. 00
高程差 H/m	0	0	0	0	0	11
$R_1 = (r_1^2 + H^2)^{1/2}/m$	69. 77	96. 20	128. 04	192. 13	233. 54	109. 55
测点与最近炮孔水平距 r_2/m	23. 30	34. 80	37. 90	101. 50	143. 30	49. 76
$R_2 = (r_2^2 + H^2)^{1/2}/m$	23. 30	34. 80	37. 90	101. 50	143. 30	50. 96

表 3 1352 ~ 1340 m 台阶爆破区测振点坐标

Table 3 Coordinates of vibration measurement points in the 1352 ~ 1340 m blasting area

编号	1	2	3	4	5	6
Y	266 005. 277	265 995. 259	265 993. 929	265 992. 452	265 985. 906	265 977. 59
坐标 X	296 217. 842	296 198. 561	296 194. 923	296 191. 113	296 173. 541	296 151. 591
Z	1351. 004	1363. 254	1363. 307	1363. 294	1363. 920	1363. 929
测点到爆源中心水平距 r_1/m	34. 67	55. 98	59. 70	63. 68	82. 10	105. 20
高程差 H/m	1. 00	13. 25	13. 31	13. 29	13. 92	13. 93
$R_1 = (r_1^2 + H^2)^{1/2}/m$	34. 68	57. 53	61. 17	65. 05	83. 27	106. 12
测点与最近炮孔水平距 r_2/m	19. 20	40. 90	44. 80	48. 80	67. 50	91. 00
$R_2 = (r_2^2 + H^2)^{1/2}/m$	19. 23	42. 99	46. 73	50. 58	68. 92	92. 06

(3) 1340 ~ 1328 m 台阶爆破区域

该爆破区域分别布设 6 个测振点, 1 ~ 3 号测振点处于同一高程上, 4 号测振点距临空面 3 m 位置, 5 号测振点位于 1352 m 平台 12 m 宽安全平台中心处, 6 号测振点位于 1364 平台, 距离临空面 4 m 处。具体各测振点示意图见图 3, 各测振点具体位置见表 4。

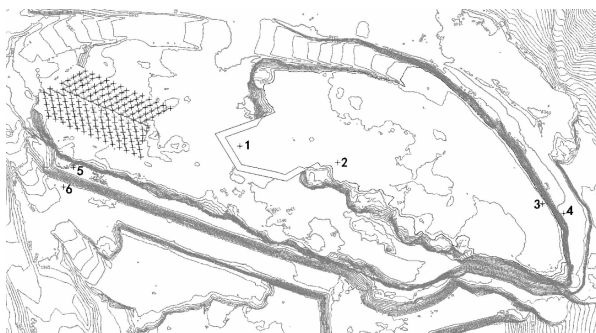


图 3 1340 ~ 1328 m 台阶爆破区域测振点布置示意图
Fig. 3 Vibration measurement point layout in the 1340 ~ 1328 m blasting area

(4) 1328 ~ 1316 m 台阶爆破区域

该爆破区域分别布设 5 个测振点, 1 ~ 3 号测振点与炮孔口处于同一高程上, 4 ~ 5 号测振点位于 1340 m 平台位置。具体各测振点示意图见图 4, 各

测振点具体位置见表 5。

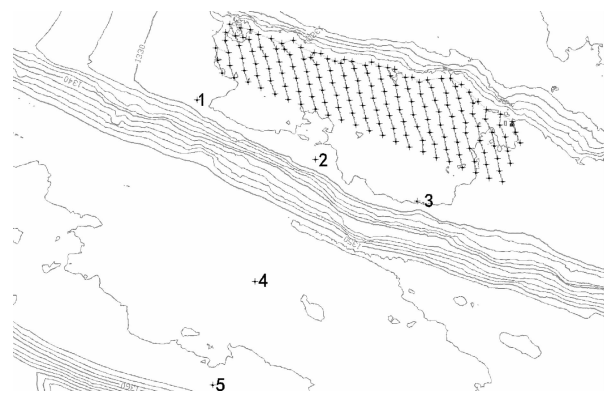


图 4 1328 ~ 1316 m 台阶爆破区域测振点布置示意图
Fig. 4 Vibration measurement point layout in the 1328 ~ 1316 m blasting area

3 爆破振动分析

3.1 爆破振动数值统计

各爆破区域测振点实测矢量值见表 6。

试验中各测振点由于距离爆破区域较近, 存在着环境噪声对采集数据的影响。为了保证采集数据的真实有效性, 采用低通滤波的方式读取各测振仪测得的振动数据, 低通滤波阈值选取 300 Hz, 统计结果如表 7 所示。

表 4 1340 ~ 1328 m 台阶爆破区测振点坐标

Table 4 Coordinates of vibration measurement points in the 1340 ~ 1328 m blasting area

编号	1	2	3	4	5	6
坐标 Y	266 054. 223	266 130. 023	266 304. 953	265 925. 296	26 5917. 539	266 288. 367
X	296 310. 760	296 298. 012	296 258. 443	296 294. 064	296 279. 044	296 265. 979
Z	1328. 815	1328. 166	1340. 336	1352. 559	1363. 800	1327. 311
测点到爆源中心水平距 r_1/m	101. 2	178. 0	339. 5	357. 3	51. 6	68. 4
高程差 H/m	-12	-12	-12	24	12	24
$R_1 = (r_1^2 + H^2)^{1/2}/m$	101. 91	178. 4	339. 71	358. 11	52. 98	72. 49
测点与最近炮孔水平距 r_2/m	61. 3	136. 3	297. 4	315. 4	28. 9	45. 8
$R_2 = (r_2^2 + H^2)^{1/2}/m$	62. 46	136. 83	297. 64	316. 31	31. 29	51. 71

表 5 1328 ~ 1316 m 台阶爆破区测振点坐标

Table 5 Coordinates of vibration measurement points in the 1328 ~ 1316 m blasting area

编号	1	2	3	4	5
坐标 Y	266 028. 939	266 112. 681	266 074. 008	266 050. 937	266 034. 848
X	296 248. 424	296 209. 842	296 225. 770	296 179. 175	296 139. 713
Z	1328. 193	1327. 980	1328. 101	1351. 288	1352. 134
测振点到爆源中心水平距 r_1/m	68. 86	41. 93	33. 28	84. 13	126. 16
高程差 H/m	0	0	0	23	24
$R_1 = (r_1^2 + H^2)^{1/2}/m$	68. 86	41. 93	33. 28	87. 22	128. 42
测振点与最近炮孔水平距 r_2/m	14. 03	18. 20	18. 04	69. 93	112. 40
$R_2 = (r_2^2 + H^2)^{1/2}/m$	14. 03	18. 20	18. 04	73. 62	114. 93

表 6 各台阶爆破区域测振点矢量值

Table 6 Vector blast vibration velocities in each blasting area

爆破区域	测点编号	实测值/($cm \cdot s^{-1}$)
1364 ~ 1352 m	1	20. 15
	2	8. 67
	3	7. 39
	4	1. 80
	5	2. 87
	6	10. 97
1352 ~ 1340 m	1	26. 68
	2	11. 13
	3	10. 19
	4	9. 27
	5	3. 67
	7	2. 04
1340 ~ 1328 m	1	4. 01
	2	1. 79
	3	0. 35
	4	0. 57
	5	13. 62
	6	6. 71
1328 ~ 1316 m	1	29. 70
	2	18. 15
	3	9. 24
	4	1. 91
	5	0. 89

表 7 各爆破区域爆破振动矢量合成数值优化

Table 7 Optimized vector blast vibration velocities in each blasting area

爆破区域	测点编号	降噪后数值/($cm \cdot s^{-1}$)
1364 ~ 1352 m	1	19. 54
	2	8. 46
	3	7. 28
	4	1. 79
	5	2. 85
	6	10. 77
1352 ~ 1340 m	1	25. 01
	2	11. 01
	3	10. 11
	4	9. 28
	5	3. 68
	6	2. 01
1340 ~ 1328 m	1	3. 83
	2	1. 73
	3	0. 31
	4	0. 54
	5	12. 54
	6	6. 15
1328 ~ 1316 m	1	29. 26
	2	18. 17
	3	9. 23
	4	1. 88
	5	0. 87

3.2 爆破振动线性回归

根据萨道夫斯基公式 $V = K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^\alpha$, 取 $R' =$

$\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$, 萨道夫斯基公式即为

$$V = K(R')^{-\alpha} \quad (1)$$

公式两边各进行对数函数运算, 即

$$\lg(V) = \lg K - \alpha \lg(R') \quad (2)$$

式中: V 为介质质点的振动速度, 取降噪后矢量合速度, cm/s; K 为衰减系数, 与爆破临空面条件和爆破网络延时叠加情况有关; R 为测点到爆心距离, m, 取测点到爆源中心的三维距离 (R_1) 和测点与最近炮孔三维距离 (R_2); Q 为最大一次单段爆破量, 取群孔延时时差 ≤ 8 ms 的炮孔最大装药量总和 (Q_2) 和距离测点最近炮孔药量 (Q_1); R' 为比例距离, 取群孔比例距离 ($R'_{群} = \frac{R_1}{\sqrt[3]{Q_2}}$) 和单孔比例距离 ($R'_{单} = \frac{R_2}{\sqrt[3]{Q_1}}$), 当 $R'_{单} > R'_{群}$ 时, $R' = R'_{群}$, 反之, $R' = R'_{单}$; α 为衰减指数, 与地形地质条件有关, 与岩石软硬, 地形起伏有关。

采用 origin 软件对公式(2)中 $\lg K$ 值、 α 值进行线性回归, 见图 5 ~ 图 8。

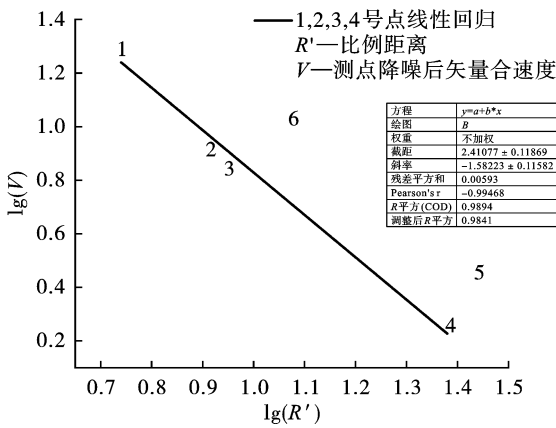


图 5 1364 ~ 1352 m 台阶爆破区域线性回归

Fig. 5 Linear regression of 1364 ~ 1352 m blasting area

通过线性回归, 得出 K 值、 α 值如表 8 所示。

表 8 各爆破区域 K 值、 α 值线性回归计算结果

Table 8 Calculation results of K and α values in each blasting area

爆破区域	K 值	α 值
1364 ~ 1352 m	257.0	1.58
1352 ~ 1340 m	229.1	1.57
1340 ~ 1328 m	218.8	1.60
1328 ~ 1316 m	257.0	1.87

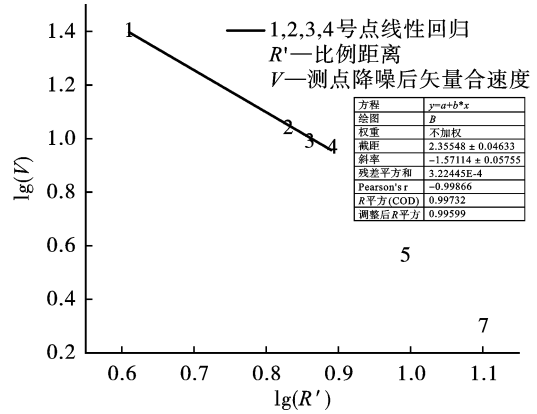


图 6 1352 ~ 1340 m 台阶爆破区域线性回归

Fig. 6 Linear regression of 1352 ~ 1340 m blasting area

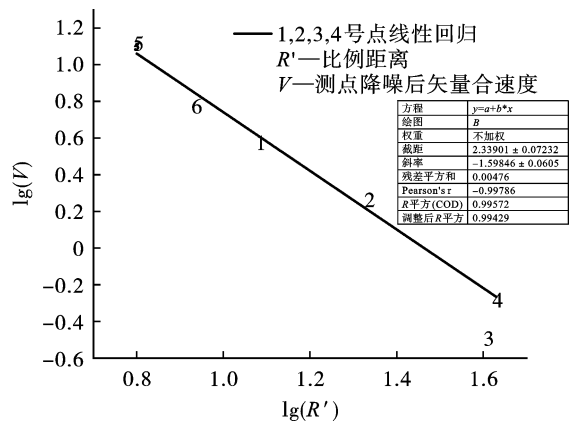


图 7 1340 ~ 1328 m 台阶爆破区域线性回归

Fig. 7 Linear regression of 1340 ~ 1328 m blasting area

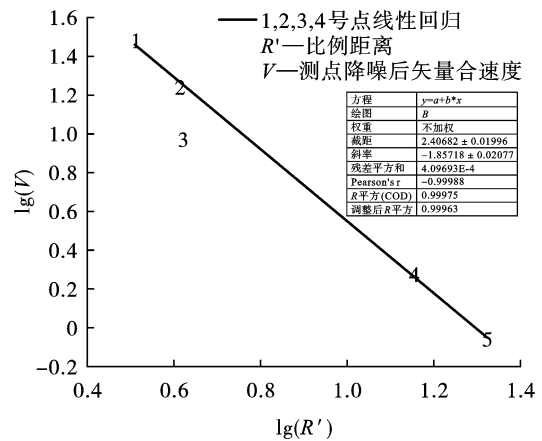


图 8 1328 ~ 1316 m 台阶爆破区域线性回归

Fig. 8 Linear regression of 1328 ~ 1316 m blasting area

根据 K 值、 α 值及对应的比例距离, 计算各测点的理论值, 计算结果如表 9 所示。

3.3 爆破测振点数据异常分析

从表中各测点的降噪后的实际数值和理论值的对比中可以看出:

- (1) 1364 ~ 1352 m 台阶爆破区域 5 号和 6 号测

振点降噪后实测数据大于理论计算值,分析原因:5号点距离1376~1364 m台阶边坡坡脚1 m处,6号点位于1376~1364 m台阶坡顶2.5 m处。根据爆破振动波传播规律,在2个测点位置存在着爆破振动叠加效应的可能性。

(2)1352~1340 m台阶爆破区域5号和6号测振点,降噪后实际数据小于理论计算值,分析原因:4号点与5号点之间可能存在着地质缺陷而导致爆破振动波在两点之间出现了明显的衰减。这种地质缺陷包含节理裂隙、溶洞及蜂窝状地质构造等。

(3)1340~1328 m台阶爆破区域1、3、6号测振点及1328~1316 m台阶爆破区域2、3号测振点降噪后实测数据均小于理论计算值,分析原因:由于铜钴氧化矿较多的存在节理裂隙、溶洞及蜂窝状地质构造,存在着因这些原因而导致。

表9 各爆破区域测点理论值及与降噪后实际值相对误差
Table 9 Theoretical values of measurement point and the relative error to the actual value after noise reduction in each blasting area

爆破区域	测点编号	理论计算值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%
1364 ~ 1352 m	1	16.82	13.92
	2	8.91	5.32
	3	7.79	7.01
	4	1.64	8.38
	5	1.31	54.04
	6	4.88	54.69
1352 ~ 1340 m	1	24.33	2.72
	2	10.99	0.18
	3	9.98	1.29
	4	9.06	2.37
	5	6.15	67.12
	6	4.20	108.96
1340 ~ 1328 m	1	3.97	3.66
	2	1.62	6.36
	3	0.58	87.10
	4	0.53	1.85
	5	11.30	9.89
	6	6.84	11.22
1328 ~ 1316 m	1	29.07	0.65
	2	18.30	0.72
	3	17.87	93.61
	4	1.78	5.32
	5	0.86	1.15

4 结论

通过以上四组试验结果的对比,结论如下:

(1)逐孔爆破近距离爆破测振的情况下,通过对比测振点最近炮孔和群孔比例距离进行萨道夫斯基公式线性回归是可行的。

(2)在进行萨道夫斯基公式进行线性回归时,应考虑到环境噪声对测振仪实测数据的干扰,应对实测数据进行降噪处理。

(3)衰减系数 K 值取决于该爆破区域产生的爆破振动大小。对于近距离测振时应考虑最后排单孔装药量、最大一段起爆药量、爆破区域的矿岩石的软硬程度及爆破区域岩矿石是否充分破碎、位移等条件。

(4)爆破振动衰减在正高程差存在的条件下仍然较为规律的遵循萨道夫斯基公式。爆破振动叠加效应较容易在坡底和正高程差边坡坡顶一定范围内。

参考文献 (References)

- [1] 钟冬望. 边坡爆破振动传播规律的试验研究[J]. 武汉大学学报, 2010, 33(3): 332-335.
- [1] ZHONG Dong-wang. Experimental study of propagation of slope blasting vibration[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(3): 332-335. (in Chinese)
- [2] 王子一. 多次爆破振动下陡边坡振动响应及稳定性研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 158-169, 176.
- [2] WANG Zi-yi. Study on vibration response and stability of steep slope under multiple blasting vibrations[J]. Blasting, 2023, 40(3): 158-169, 176. (in Chinese)
- [3] 李志文. 台阶地形对爆破振动波传播影响的数值模拟研究[J]. 南昌工程学院学报, 2023, 42(6): 38-42.
- [3] LI Zhi-wen. Numerical simulation study on influence of step topography on propagation of blasting vibration waves[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2023, 42(6): 38-42. (in Chinese)
- [4] 郭飞. 考虑高程放大效应的边坡动力稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(2): 71-76.
- [4] GUO Fei. Slope dynamic stability analysis considering elevation amplification effect[J]. Nonferrous Metals (Mining section), 2023, 75(2): 71-76. (in Chinese)
- [5] 汪志国. 中深孔爆破振动传播特性分析与控制[J]. 黄金, 2023, 9(44): 36-40.
- [5] WANG Zhi-guo. Analysis and control of vibration propagation characteristics of medium-long hole blasting[J]. GOLD, 2023, 9(44): 36-40. (in Chinese)