

基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化^①

林杰^{1,2}, 刘少光³, 李广斌⁴, 楼晓明^{1,2}, 韩启民⁴

(1.福州大学紫金地质与矿业学院,福建福州 350108; 2.福州大学爆破技术研究所,福建福州 350108; 3.宁德市公安局,福建宁德 352100; 4.乌拉特后旗紫金矿业有限公司,内蒙古巴彦淖尔 015500)

摘要: 以内蒙古三贵口铅锌矿为背景,利用理论分析、图像处理和工程试验等技术手段对地下深孔切割槽爆破块度影响因素及参数优化开展研究。首先针对现场粉矿率高、平均块度小等问题,开展了爆破块度影响因素试验并采集现场数据,利用 Split-Desktop 4.0 软件处理试验爆堆图像;然后运用灰色关联理论确定影响爆破块度的主次因素;最后利用趋势分析法并结合现场实际情况,确定爆破参数优化方案,并进行工程试验验证。结果表明,该矿山切割槽粉矿率主要受排间延期时间和孔距影响,平均块度主要受孔距和排数影响;优化后的爆破参数为:孔距 1.2 m,排距 1.5 m,抵抗线 0.8 m,爆破排数 3 排,4 孔孔间延期时间分别为 13、0、9、18 ms,排间延期时间 42 ms,该参数条件下爆破粉矿率降低了 27.19%,平均块度提高了 62.89%。

关键词: 深孔爆破; 切割槽; 灰色关联理论; 爆破块度; 粉矿率; 平均块度; 影响因素; 参数优化

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.002

文章编号: 0253-6099(2023)05-0006-05

Influencing Factors Analysis and Parameter Optimization for Rock Fragmentation by Deep-Hole Cut Blasting Based on Grey Correlation Analysis

LIN Jie^{1,2}, LIU Shaoguang³, LI Guangbin⁴, LOU Xiaoming^{1,2}, HAN Qimin⁴

(1. Zijin College of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Institute of Explosive Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 3. Ningde Public Security Bureau, Ningde 352100, Fujian, China; 4. Wulatehouqi Zijin Mining Co Ltd, Bayannur 015500, Inner Mongolia, China)

Abstract: With Sanguikou Lead Zinc Mine in the Inner Mongolia Autonomous Region taken for study, the influencing factors and parameter optimization for rock fragmentation by deep-hole cut blasting were explored by performing theoretical analysis, image processing and engineering tests. Firstly, in view of the problems of high fines generation rate and small fragment size on average, the factors influencing blasting fragmentation were tested and field data were collected. Also, image processing and analysis were performed for the muckpile in the test by using Split-Desktop 4.0 software. Then, the primary and secondary factors affecting blasting fragmentation were determined based on grey correlation analysis. Finally, an optimal scheme of blasting parameters was determined by using trend analysis based on actual situation of the site, and was then verified in the practical engineering test. The results show that the fines generation rate by the cut blasting in the mine is mainly affected by the delay time between rows and the borehole spacing, and the average fragment size is mainly affected by the borehole spacing and the number of rows for blasting. The optimized blasting parameters are finally determined as follows: borehole spacing of 1.2 m, row spacing of 1.5 m, burden of 0.8 m, 3 rows of boreholes, delay interval of 13 ms, 0 ms, 9 ms and 18 ms, respectively, between 4 holes, and a delay interval of 42 ms between rows. With the above-mentioned parameters, the blasting can result in the fines generation rate down by 27.19% and the average fragment size up by 62.89%.

Key words: deep-hole blasting; cut; grey correlation analysis; rock fragmentation by blasting; fines generation rate; average fragment size; influencing factor; parameter optimization

① 收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(52109124); 乌后紫金采场深孔回采爆破控制技术研究项目(01612203)

作者简介: 林杰(1998—),男,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为爆破工程及采矿工程。

通信作者: 楼晓明(1972—),男,浙江东阳人,博士,教授,主要从事工程爆破方面的研究。

采用分段空场嗣后充填采矿法的深孔爆破地下矿回采中,切割槽为深孔侧向爆破提供自由面^[1]。但由于切割槽爆破存在爆破自由面较少、爆破夹制力较大的问题,一般采用增大炮孔密度系数、增大炸药单耗等方法来确保形成切割槽,这就极易导致切割槽爆破后粉矿率偏高和平均块度偏小等问题。

针对以上问题,众多学者从不同角度开展了爆破参数对爆破块度优化的研究^[2-9]。本文在已有研究基础上,以内蒙古三贵口铅锌矿为依托,利用理论分析、图像识别和工程试验等手段,运用灰色关联理论分析

并确定影响切割槽爆破块度的主次因素,利用趋势分析法并结合现场实际情况优化爆破参数,以期优化切割槽爆破块度、降低粉矿率、提高平均块度。

1 工程概况

内蒙古三贵口铅锌矿采用分段空场嗣后充填采矿法采矿、上向扇形深孔爆破,中段高 50 m,分层高 16.5 m,切割槽垂直矿块布置,采用上向垂直深孔爆破,现场使用全液压钻机钻孔,孔径 90 mm。切割槽孔距 1.2 m,排距 1.0~1.5 m,切割槽炮孔布置见图 1。

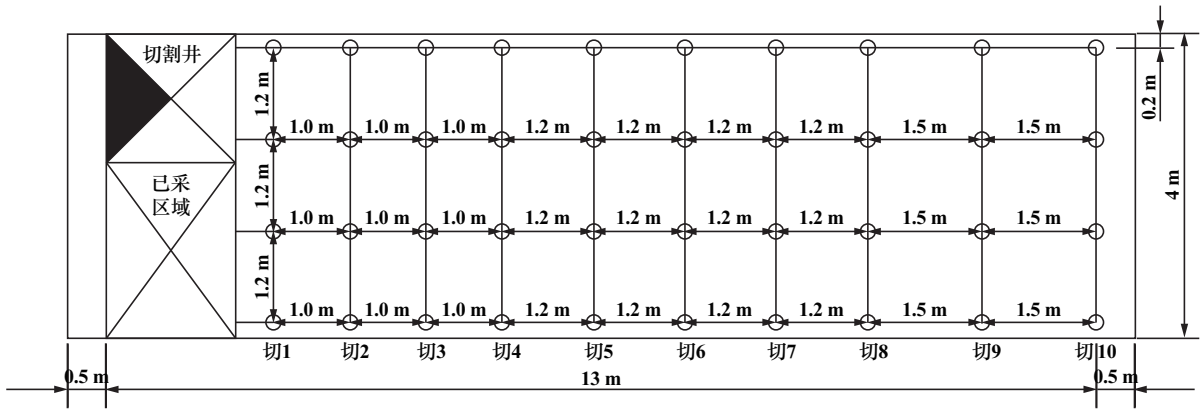


图1 90 mm 炮孔切割槽炮孔布置图

矿山所用炸药为多孔粒状铵油炸药,现场采用压气装药,连续耦合装药。矿山原爆破方案采用导爆管雷管逐排起爆,雷管段别 1、2、3、4、5 段,单次起爆 3~5 排。装药结构示意图见图 2。

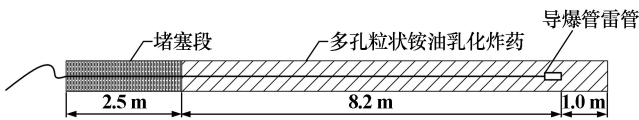


图2 装药结构示意图

在矿山现场爆破中,爆破块度不理想,出现粉矿率偏高、平均块度偏小等问题。为解决这些问题,运用灰色关联理论对粉矿率和平均块度的主要影响因素开展分析研究,进一步优化爆破参数。

2 灰色关联分析方法原理及计算方法

2.1 系统特征变量和相关因素变量

岩石爆破过程中主要有两类变量:一类是衡量爆破质量优劣的指标,如粉矿率、大块率和平均块度等;另一类是控制爆破质量的影响因素,如孔距、排距和延期时间等。进行灰色关联分析时,将前一类指标作为系统特征变量,记为 $Y_i(i=1,2,\dots,s)$, s 为指标个数;将后

一类因素作为相关因素变量,记为 $X_j(j=1,2,\dots,m)$, m 为因素个数。若进行 n 次爆破试验来确定控制爆破质量的主要因素,即可形成对应的系统特征变量序列和相关因素变量序列:

$$Y_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(k), \dots, y_i(n)] \quad (1)$$

$$X_j = [x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(k), \dots, x_j(n)] \quad (2)$$

式中 $y_i(k)$ 、 $x_j(k)$ 分别表示在第 k 次试验中所测得的第 i 个系统特征变量和第 j 个相关因素变量数据。

2.2 灰色绝对关联度计算方法

采用灰色绝对关联度为基础对爆破质量主要影响因素进行灰色关联分析。由于数据序列样本单位不统一,需对数据系列样本进行无量纲化处理,保证关联度分析的准确性^[10]。通过均值化算子 D_1 可求得各变量序列的均值象,式(1)和式(2)可转化为:

$$Y_i^1 = Y_i D_1 = [y_i^1(1), y_i^1(2), \dots, y_i^1(k), \dots, y_i^1(n)] \quad (3)$$

$$X_j^1 = X_j D_1 = [x_j^1(1), x_j^1(2), \dots, x_j^1(k), \dots, x_j^1(n)] \quad (4)$$

$$\text{式中 } y_i^1(k) = \frac{y_i(k)}{\bar{y}_i}; \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_i(k); x_j^1(k) = \frac{x_j(k)}{\bar{x}_j};$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_j(k)。$$

利用始点零化算子 D_0 对式(3)和式(4)进行计

算,可求得各变量序列的始点零化像:

$$Y_i^0 = Y_i^1 D_0 = [y_i^0(1), y_i^0(2), \dots, y_i^0(k), \dots, y_i^0(n)] \quad (5)$$

$$X_j^0 = X_j^1 D_0 = [x_j^0(1), x_j^0(2), \dots, x_j^0(k), \dots, x_j^0(n)] \quad (6)$$

式中 $y_i^0(k) = y_i^1(k) - y_i^1(1)$; $x_j^0(k) = x_j^1(k) - x_j^1(1)$ 。

灰色绝对关联度 ε_{ij} 表示第 i 系统特征变量与第 j 个相关因素变量的灰色绝对关联度,灰色绝对关联度 ε_{ij} 计算公式为^[11]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + |YS_i| + |XS_j|}{1 + |YS_i| + |XS_j| + |XS_j - YS_i|} \quad (7)$$

式中 $|YS_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_i^0(k) + \frac{1}{2} y_i^0(n) \right|$; $|XS_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^0(k) + \frac{1}{2} x_j^0(n) \right|$; $|XS_j - YS_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} [x_j^0(k) - y_i^0(k)] + \frac{1}{2} [x_j^0(n) - y_i^0(n)] \right|$ 。

利用式(7)可以进一步得到灰色绝对关联度矩阵^[9]:

$$A = (\varepsilon_{ij}) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1m} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{s1} & \varepsilon_{s2} & \cdots & \varepsilon_{sm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

当 $l, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 满足 $\varepsilon_{il} \geq \varepsilon_{ij} (i=1, 2, \dots, m)$, 则认为相关因素变量 X_l 优于相关因素变量 X_j 。若对任意的 $j=1, 2, \dots, m, j \neq l, X_l$ 均优于 X_j , 称 X_l 为最优因素。若不存在最优因素, 必然存在 $l, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 满足 $\sum_{i=1}^s \varepsilon_{il} \geq \sum_{i=1}^s \varepsilon_{ij}$, 则认为相关因素变量 X_l 准优于相关因素变量 X_j ^[9]。

3 切割槽爆破块度影响因素的灰色关联分析

3.1 现场试验

切割槽现场试验设置在 630 中段 630、647 和 664 分层中,共进行了 6 个方案爆破试验,为减少单次试验结果的偶然性,每个方案进行 3 次试验,共完成 18 次现场试验,试验方案参数见表 1。

3.2 块度分析

爆破块度图像分析技术日益成熟,提高了爆破块度分析的准确性。本文采用 Split-Desktop 4.0 软件分析爆破块度分布。现场爆破试验后,分别对未出矿和出矿过程中的爆堆进行多角度、多方位的拍摄工作,拍摄覆盖面积超过爆堆表面积的 15%,拍摄图像数量为 15~20 张。同时测量并记录拍摄区域特征岩石的实际尺寸。

表 1 90 mm 炮孔切割槽爆破参数

试验方案	钻孔参数			排数	堵塞长度/m	起爆网络		
	孔距/m	排距/m	孔深/m			起爆方式	孔间延期时间/ms	排间延期时间/ms
1	1.2	1.0	11.7	3	2~3	导爆管 1,2,3 段	0	25
2	1.2	1.2	19.6	4	2~3	导爆管 1,2,3,4 段	0	25
3	1.2	1.5	16.0	3	2~3	导爆管 1,2,3 段	0	25
4	1.2	1.0	16.0	3	2~3	数码电子雷管	9	9
5	1.2	1.2	19.6	4	2~3	数码电子雷管	9	25
6	1.2	1.5	11.7	3	2~3	数码电子雷管	9	42

利用 Split-Desktop 4.0 软件对图像信息进行自动预处理后,对部分不清晰的轮廓进行修改,对不属于爆堆的部分填充标注,标定岩块真实尺寸,即可进行运算。现场爆堆图像及软件处理过程如图 3 所示,块度分布曲线如图 4 所示。

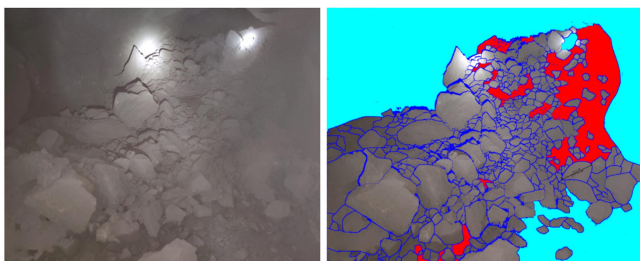


图 3 现场爆堆图像及软件处理过程

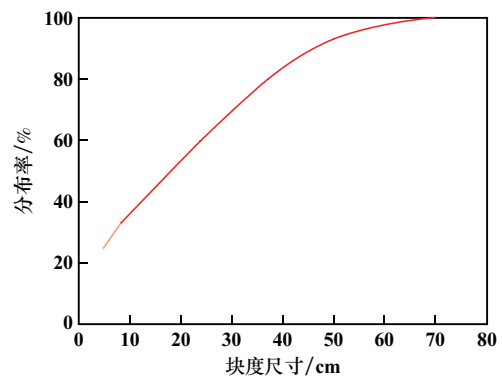


图 4 块度分布曲线图

3.3 爆破块度灰色绝对关联度计算及分析

针对三贵口铅锌矿爆破块度不理想、粉矿率偏高、平

均块度偏小等现场问题,选取爆破后的平均块度(Y_1, m)、最大块度(Y_2, m)、粉矿率(Y_3 , 块度小于 5 cm 的岩石占比,%)和大块率(Y_4 , 块度大于 55 cm 的岩石占比,%)作为系统特征变量;选取孔距(X_1, m)、排距(X_2, m)、孔深(X_3, m)、排数(X_4)、抵抗线(X_5, m)、孔间延期时间(X_6, ms)和排间延期时间(X_7, ms)作为相关因素变量,其中,各试验方案的系统特征变量取 3 次试验结果的平均值作为计算数据。如表 2 所示。

表 2 相关因素变量和系统特征变量

试验方案	相关因素变量(X_j)							系统特征变量(Y_i)			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	1.2	1.0	11.7	3	0.46	0	25	13.66	49.98	35.46	0
2	1.2	1.2	19.6	4	0.63	0	25	11.00	56.37	33.00	0.10
3	1.2	1.5	16.0	3	0.87	0	25	14.33	56.50	34.46	0.15
4	1.2	1.0	16.0	3	0.55	9	9	14.45	61.57	33.55	0.18
5	1.2	1.2	19.6	4	0.67	9	25	15.60	58.56	31.11	0.21
6	1.2	1.5	11.7	3	0.85	9	42	20.12	75.50	28.34	0.57

对表 2 中各变量进行灰色绝对关联度计算,通过式(7)~(8)可得到灰色关联矩阵,计算结果如表 3 所示。

表 3 灰色绝对关联矩阵

变量	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Y_1	0.841 42	0.755 59	0.678 80	0.832 83	0.674 30	0.566 57	0.742 66
Y_2	0.697 28	0.942 34	0.809 45	0.934 01	0.801 65	0.615 20	0.659 72
Y_3	0.775 73	0.635 93	0.601 86	0.665 93	0.599 71	0.542 33	0.940 06
Y_4	0.549 15	0.640 80	0.701 26	0.608 12	0.706 47	0.962 43	0.546 43
$\sum_{i=1}^4 e_{ij}$	2.863 58	2.974 66	2.791 37	3.040 89	2.782 13	2.686 53	2.888 87

由表 3 分析可知,7 个爆破参数对切割槽爆破的块度分布影响主次顺序为:排数>排距>排间延期时间>孔距>孔深>抵抗线>孔间延期时间。上述数据说明,在对切割槽整体爆破块度效果上,排数、排距、排间延期时间起主要影响作用。

分析系统特征变量可知,对平均块度影响最大的是孔距,其次是排数和排距;对粉矿率影响最大的是排间延期时间,其次是孔距和排数;对最大块度影响最大的是排距,其次是排数,对大块率影响最大的是孔间延期时间,其次是抵抗线。根据实际情况,孔距不变,以降低粉矿率和提高平均块度为首要问题,综合分析表 2 和表 3 并绘制系统特征变量随主要影响因素变化情况,如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,平均块度随排数增多而减小,符合爆破碰撞作用,排数增多,爆破后矿石碰撞作

用增强,平均块度减小,因此要采用少排数爆破弱化碰撞作用提高平均块度,排数选用 3 排时平均块度效果较好。从图 5(b)可知,随着排距增大,平均块度增大,其中排距 1.2 m 采用导爆管雷管起爆平均块度明显减小,主要是多排数碰撞作用导致的,而采用数码电子雷管爆破时,正相关效果更为明显,排距选用 1.5 m 时平均块度效果更好。从图 5(c)可以看出,粉矿率随着排间延期时间增大而减小,粉矿率与排间延期时间呈现明显的负相关,采用较大的排间延期时间有利于降低粉矿率,结合方案 6 爆破效果,采用排间延期时间 42 ms 较为合适。从图 5(d)可以看出,粉矿率随着排距增加整体上呈现降低的趋势,采用数码电子雷管爆破负相关更为明显,排距选用 1.5 m 时降低粉矿率效果更好。大块率最大影响因素为孔间延期时间,其次为抵抗线,由于要减少爆破振动对充填体的影响,确定优化采用逐孔起爆,因此大块率采用抵抗线进行分析,从图 5(e)可以看出,大块率随着抵抗线增大呈现增大的趋势,确定排距后可通过减小抵抗线来控制大块率。方案 6 中排距 1.5 m、采用数码电子雷管爆破时,最大块度为 75.5 cm,大块率为 0.57%,均符合矿山生产要求。因此为最大限度降低粉矿率和提高平均块度,结合方案 6 爆破效果,排距选用 1.5 m、抵抗线设置为 0.8 m 较为合适。最大块度的最大影响因素为排距,从图 5(f)可以看出,随着排距增大,最大块度呈增大的趋势。

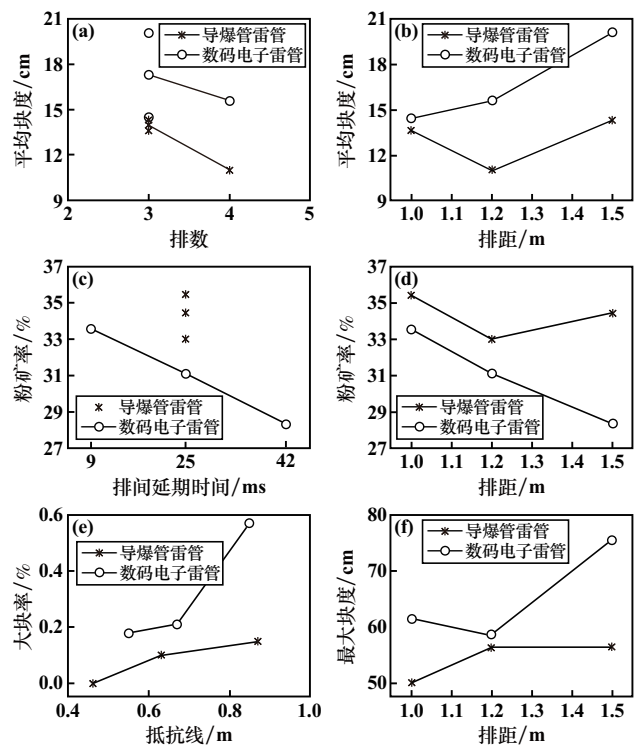


图 5 主要影响因素-评价指标趋势图

4 爆破优化现场试验

4.1 爆破参数优化方案确定

现场试验区域为630中段664分层4406采场9#矿体切割槽。现场采用全液压钻机钻孔,孔径90 mm。根据上述分析确定,优化后的爆破参数为:炮孔孔距1.2 m,排距1.5 m,爆破排数3排,抵抗线0.8 m。根据现场分层高度,孔深为11.7 m。采用多孔粒状铵油炸药,炸药密度 0.9 g/cm^3 ,装药结构为连续耦合装药,装药长度9 m,堵塞长度2~3 m,炸药爆速2 600 m/s,总药量720 kg,起爆方式为数码电子雷管,排间延期时间42 ms,4孔孔间延期时间分别为13、0、9、18 ms,起爆网络见图6。

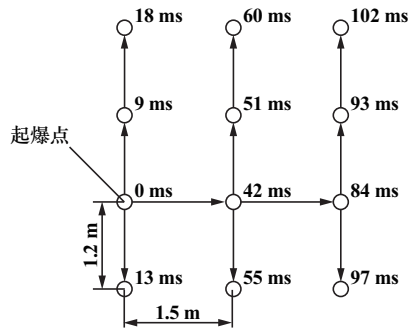


图6 起爆网络

4.2 试验结果及分析

采用优化参数进行爆破,按照爆破块度图像识别分析要求,对本次爆破试验的块度进行分析处理得到块度参数,并与矿山采用导爆管起爆的原爆破方案的爆破块度参数平均值进行对比分析,结果见表4。

表4 优化前后爆破块度参数对比

爆破方案	平均块度/cm	最大块度/cm	粉矿率/%	大块率/%
优化前	12.99	54.28	34.31	0.083
优化后	21.16	71.10	24.98	1.05

由表4可以看出,矿山原爆破方案的粉矿率为34.31%,优化后粉矿率为24.98%,粉矿率降低了27.19%;优化后平均块度为21.16 cm,与矿山原爆破方案的平均块度12.99 cm相比提高了62.89%;最大块度为71.10 cm,大块率为1.05%,均在合理的范围内,未对现场铲装造成影响。整体上,爆破参数优化后,岩石平均块度明显提高,粉矿率降低显著,说明本次爆破参数优化合理,能够有效控制大块岩石在合理范围内,对粉矿率起到很好的降低作用,平均块度提高,进一步验证了基于灰色关联分析理论确定爆破块度影响因素来优化爆破

参数提高爆破效果的可行性。

5 结 论

以内蒙古三贵口铅锌矿为研究对象,运用灰色关联理论对深孔切割槽爆破块度的主要影响因素进行分析研究;利用趋势分析法对爆破参数进行优化,开展工程试验验证优化效果,得到如下结论:

1) 运用灰色关联理论,对三贵口铅锌矿深孔切割槽爆破块度效果影响因素进行分析,得到各影响参数的主次关系为:排数>排距>排间延期时间>孔距>孔深>抵抗线>孔间延期时间。

2) 利用趋势分析法确定主要影响因素对粉矿率和平均块度的作用趋势,其中粉矿率随着排间延期时间增大而减小,随着排距增加整体上呈降低趋势;平均块度随排数增多而减小,随着排距增大整体上呈增大趋势。

3) 基于分析结果并结合现场实际情况,优化后的爆破参数为:孔距1.2 m,排距1.5 m,采用数码电子雷管逐孔起爆,4孔孔间延期时间分别为13、0、9、18 ms,排间延期时间为42 ms,该参数下爆破,能够明显降低粉矿率、提高平均块度,与矿山原爆破方案相比,粉矿率降低了27.19%,平均块度提高了62.89%。

参考文献:

- [1] 何斌全,高宇梁,张德明,等. 中深孔切割槽爆破设计与起爆网路可靠性分析[J]. 爆破, 2014,31(4):26-30.
- [2] 欧阳剑,史秀志,张宗国,等. 深孔直眼掏槽爆破装药孔合理堵塞长度研究[J]. 爆破, 2022,39(2):16-22.
- [3] 赵新涛,黄海龙. 影响岩体爆破质量的垂直炮孔堵塞长度研究[J]. 公路交通科技, 2010,27(7):94-99.
- [4] 李林军,史秀志,胡洪文,等. 地下金属矿山扇形中深孔孔网参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):10-13.
- [5] 孔 坤,李小元,史秀志,等. 装药结构对深孔爆破粉矿产出率的影响研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):28-32.
- [6] 张阳光,林 飞,赵 彭,等. 延时时间对露天深孔爆破破碎效果的影响研究[J]. 工程爆破, 2021,27(4):69-75.
- [7] 邢光武,郑炳旭. 特大型采石场粉矿率控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2009,29(3):77-79.
- [8] 尹岳降,李瑞泽,陈 明,等. 基于正交试验法的爆破块度分布影响因素敏感性分析[J]. 爆破, 2019,36(4):37-42.
- [9] 张继春,钮 强,徐小荷. 用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素[J]. 爆炸与冲击, 1993(3):212-218.
- [10] 邓聚龙. 灰色系统[M]. 武汉:华中工学院出版社, 1987.
- [11] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用(第七版)[M]. 北京:科学出版社, 2014.

引用本文:林 杰,刘少光,李广斌,等. 基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):6-10.