

基于多元线性回归模型的预裂 爆破参数分析

Analysis of Pre-splitting Blasting Parameters Based on Multiple Linear Regression Model

李涛¹, 周斌¹, 艾纯明²

(1. 万宝矿产有限公司, 北京 100032; 2. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:某露天铜矿采用预裂爆破控制技术进行靠帮作业,为进一步优化预裂爆破参数,分析不同预裂爆破参数对爆破效果的影响,本文引入多元线性回归模型,以预裂孔孔距 a 和预裂缝至缓冲孔排距 D 为目标变量,以未破碎矿岩量 Y 为预测变量,根据二因素三水平均匀设计法进行预裂爆破试验。研究结果表明:①多元线性回归模型拟合度 $R^2=0.692$,拟合效果良好,可用于优化预裂爆破参数研究;②在其他预裂爆破参数不变的情况下,为取得最佳爆破效果,建议预裂孔孔距 a 及预裂缝至缓冲孔排距 D 的分别选取1.1 m与2.4 m;③预裂孔孔距 a 与未破碎矿岩量 Y 呈正相关性,预裂缝至缓冲孔排距 D 对未破碎矿岩量 Y 的影响程度更大。

关键词:预裂爆破; 边坡稳定性; 装药结构

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)04-0021-05

Abstract: One open-pit copper mine employs pre-split blasting control technology for steep end-slope mining. To further optimize the pre-split blasting parameters and analyze their impact on blasting effectiveness, this study introduces a multiple linear regression model. The target variables are the pre-split hole spacing and the distance from the pre-split crack to the buffer hole row, while the unfragmented rock volume serves as the predictor variable. Pre-split blasting experiments are conducted using a two-factor three-level uniform design method. The research findings are as follows: ① The multiple linear regression model achieves a good fit with $R^2=0.692$, indicating its suitability for optimizing pre-split blasting parameters; ② Keeping other pre-split blasting parameters constant, it is recommended to select pre-split hole spacing and the distance from the pre-split crack to the buffer hole row as 1.1 m and 2.4 m, respectively, to achieve the best blasting results; ③ Pre-split hole spacing shows a positive correlation with the unfragmented rock volume, while the distance from the pre-split crack to the buffer hole row has a greater impact on the unfragmented rock volume.

Key words: presplit blasting; slope stability; charging structure

1 前言

预裂爆破属控制爆破技术范畴,在矿山开采、道路建设及基坑开挖等领域应用比较广泛^[1-3]。为有效降低爆破对终了边坡破坏,提高终了边坡稳定性,露天矿山开采过程中通常采用预裂爆破技术。

预裂缝贯穿于否直接影响半壁孔成孔率,其成缝机理尚未形成统一定论^[4]。当前国内外主要有应力波干扰破坏理论、爆轰气体高压静力作用及爆炸应力波与爆轰气体联合作用理论。由于引发预裂孔孔壁断裂的应力波传播速度比裂缝扩展速度快,因此,在应力波的压力作用下裂缝逐渐扩展,最终形

成贯通预裂缝。其中,应力波的高初始动能随预裂孔产生径向开裂而减小,且不同的孔径在应力波作用下,其初始裂缝的长度各不一样。孔径越大,初始成缝长度越长,消耗炸药量越多^[5-8]。

影响预裂爆破效果的因素较多,粗略可分为以下三类:岩石物理力学特性、岩体特征及爆破工艺参数^[9]:(1)岩石由固体颗粒及内部空气、水分、杂质等构成,其容重、抗拉/压强度、泊松比等物理力学特性因构成成分不同而存在差异性,进而使得爆破克服岩石本身强度做功所需的能量也不同。因此,岩石物理力学特性对爆破效果有重要影响。(2)岩体

[作者简介] 李涛(1989—),男,博士研究生,采矿工程专业,从事采矿研究工作。

[基金项目] 浸矿体系孔裂结构演化规律及其调控机制(LJ2020JCL002),辽宁省教育厅基础科研项目。

[引用格式] 李涛,周斌,艾纯明. 基于多元线性回归模型的预裂爆破参数分析[J]. 中国矿山工程,2024,53(4):21-25.

结构越均匀越有利于炸药能量均匀释放,易于沿预裂孔中心线方向形成完整预裂面,而破碎、多裂隙或非均质的岩层则不利于预裂爆破。(3)预裂爆破工艺参数主要包括钻孔角度、炮孔直径、药卷直径、预裂孔孔距、预裂孔孔深、堵塞长度、不耦合系数及预裂孔至缓冲孔排距等。针对露天矿山而言,岩石物理学特性与炸药参数对爆破效果的影响是一定的,而合理的孔网参数才是决定爆破效果的重要因素^[10-14]。因此,本文拟选取预裂孔孔距与预裂缝至缓冲孔排距两个参数作为研究对象,通过引入多元线性回归模型验证分析其合理取值范围。

2 多元线性回归模型

多元线性回归模型包括 n 组观测值 $\{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, y_i\}$, 其中 x 为目标变量, y 为预测变量。预裂控制爆破技术包括参数预裂孔孔距 a 和预裂缝至缓冲孔排距 D , 该参数为多元线性回归模型中的目标变量, 未破碎矿岩量 Y 则为预测变量。其中, 未破碎矿岩量 Y 为矿体模型圈定爆破量与实际爆破量差值。

多元线性回归模型中假定线性关系表达式为

$$y_i = \lambda_0 + \lambda_1 x_{1i} + \dots + \lambda_m x_{mi} + \kappa_i \quad (1)$$

其中, λ 为标准化的偏斜率系数, κ_i 为随机误差项。系数 λ 的值通过式(2)中广义最小二乘法回归估算。

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (\lambda_0 + \lambda_1 x_{1i} + \dots + \lambda_m x_{mi})]^2 \quad (2)$$

针对不同预裂爆破模式, 参数 $\hat{\lambda}$ 的估算值与爆破期望的拟合值 \hat{y}_i 关系为

$$\hat{y}_i = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 x_{1i} + \dots + \hat{\lambda}_m x_{mi} \quad (3)$$

测量值 y_i 与拟合值 \hat{y}_i 之差为残差。为确保最小二乘法回归分析的合理性, 需满足三个假设: ①残差期望值为零; ②残差方差不变; ③残差呈正态分布。

本文将通过式(3)表征预裂爆破控制参数与爆破结果之间的线性关系。其中, 预测变量 Y 表征未破碎矿岩量, 目标变量分别为 $x_1 = a, x_2 = D, \kappa$ 为独立随机变量。

给定预裂爆破模式下, 爆破结果的预期响应值 $E(Y)$ 可通过式(4)估算:

$$E(Y) = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_1 x_1 + \dots + \hat{\lambda}_m x_m \quad (4)$$

选取回归分析为最优解时的预裂爆破控制参数即可取得最佳爆破结果。

而多元线性回归模型相关性则可通过拟合度指标 R^2 衡量, 其中,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

R^2 是表征回归模型优劣的主要指标, 从 0 ~ 100% 表示回归分析是否成功。 R^2 值越大, 表明拟合效果越好, 即测量值与拟合值之间的差异越小。随着目标变量数量的增加, R^2 会无限趋近于 1 (Vännman, 2009)。

偏斜率系数 λ 的假设检验如下: 在预裂爆破模型中其他参数给定的情况下, 特定参数对爆破结果影响程度可通过单个系数显著性验证。

$$H_0: \lambda_j = 0, j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$H_1: \lambda_j \neq 0 \quad (7)$$

式(6)表示零假设成立, 即特定参数不影响爆破结果。式(7)表示零假设不成立, 即特定参数对爆破结果有影响。统计学显著性检验方法中显著性水平 $\alpha = 0.05$, 如果显著性值 P 值 (P -value) > 0.05 , 则式(6)为真, 反之则式(7)为真。

如果参数间高度相关则会出现多重共线性, 这将难以判别具体参数对爆破结果的影响程度。此时, 判断标准为参数的方差膨胀因子 VIF , 衡量参数是否为相关联因子, 其定义式为

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (8)$$

其中, R_j^2 为变量 x_j 与其他参数之间的回归模型相关性指标。

当方差膨胀因子 VIF 满足下式时, 则不存在多重共线性问题。

$$VIF < \max \left(10, \frac{1}{1 - R^2} \right) \quad (9)$$

3 工程概况

3.1 岩性及地质构造

某露天铜矿矿体赋主要存于山体下部蚀变的安山斑岩、英安斑岩、火山热液角砾岩内, 控制长约 1 400 m, 宽约 1 000 m, 矿体规模为大型。分布标高 -6 ~ 694 m, 总体呈似层状、钟乳状, 其顶面近水平, 呈波状起伏。矿体厚度 4 ~ 628.04 m, 平均厚度 108.37 m。矿岩平均容重为 2.6 g/cm³, 普氏系数 $f = 8$ 。矿体围岩东西两侧为火山碎屑岩, 顶部为安山斑岩淋滤帽。采场边坡岩石质量总体较好, 但散

体结构软岩组安山斑岩体与东西两侧围岩接触部位的构造破碎带和块状结构软岩岩组的黏土化蚀变安山斑岩完整性较破碎,多呈碎石土,具黏土化,外部降雨、爆破振动及开挖扰动等影响可能导致边坡发生台阶局部垮塌等工程地质问题。

3.2 爆破设计方案

该露天铜矿台阶设计高度为 10 m,并段 20 m。为使矿岩爆破块度均匀、爆堆便于铲装,设计采用中深孔爆破,钻孔直径 200 mm,超深 1.5 m。采用轴向连续装药、径向不耦合装药模式,起爆方式为多排孔微差导爆管雷管分段起爆。主要开采及爆破工艺参数见表 1。

表 1 矿山采矿爆破主要技术参数

序号	项目	单位	参数
1	台阶高度	m	10
2	靠帮边坡坡面角	(°)	60
3	采场最终边坡角	(°)	32.5~40
4	炮孔直径	mm	200
5	炮孔孔排距	m	6×5
6	底盘抵抗线	m	6
7	钻孔倾角	(°)	90
8	钻孔孔深	m	11.5

该露天矿在进行靠帮作业时采用预裂爆破技术以形成光滑平整的台阶坡面,同时减小爆破地震波对边坡的影响,采用 $\phi 110$ mm 潜孔钻机进行预裂孔穿孔作业。起爆顺序为预裂孔-主爆孔-缓冲孔,具体预裂爆破参数见表 2。

表 2 预裂爆破主要技术参数

序号	项目	单位	参数
1	预裂孔直径	mm	110
2	孔深	m	10
3	底盘抵抗线	m	2
4	不耦合系数		3.5
5	填塞高度	m	2
6	正常装药段线装药密度	g/cm^3	1.28
7	单孔装药量	kg/孔	10.24
8	预裂孔倾角	(°)	60

为同时研究预裂孔孔距与预裂缝至缓冲孔排距对预裂爆破效果的影响作用,将爆破试验区内预裂孔孔距分别取 1.1、1.2、1.3 m 及预裂缝至缓冲孔排

距分别取 2.1、2.4、2.7 m。按二因素三水平均匀设计法,可在相对较少的试验次数内考虑不同因素水平的组合,以获得均匀的覆盖。对应均匀设计使用表即本研究采用的均匀设计表格分别见表 3、表 4。

表 3 二因素三水平均匀设计使用表

试验号	A	B	试验方案
1	1	1	A_1B_1
2	2	2	A_2B_2
3	3	3	A_3B_3
4	1	2	A_1B_2
5	2	3	A_2B_3
6	3	1	A_3B_1

表 4 二因素三水平均匀设计表

试验号	预裂孔孔距 a/m	预裂缝至缓冲孔排距 D/m
1	1.1	2.1
2	1.2	2.4
3	1.3	2.7
4	1.1	2.4
5	1.2	2.7
6	1.3	2.1

预裂孔布置示意图及预裂孔装填结构示意图如图 1、图 2 所示。

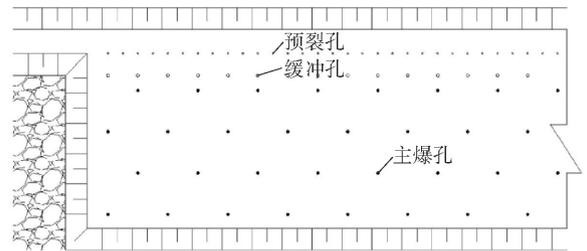


图 1 预裂孔布置示意图

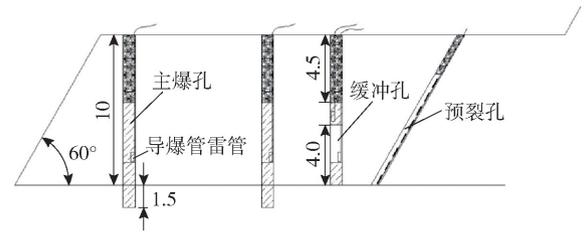


图 2 预裂孔装填结构示意图

4 多元线性回归分析与讨论

进行多元线性回归分析需足够数量的样本量。通过将不同预裂孔孔距 a 和预裂缝至缓冲孔排距 D

按表4均匀设计组合,每次爆破炮孔数量在120个左右,满足试验样本量要求。即本研究共分为6组预裂爆破试验,每组爆破设计参数 a 与 D 的值均按表4取得。矿体模型中圈定的爆破矿岩量与铲装爆破矿岩量之差即为每组试验未破碎矿岩量 Y 。对不同试验区内预裂孔孔距和预裂缝至缓冲孔排距 D 以及未破碎矿岩量 Y 进行均值计算,通过式(3)多元线性回归模型研究预裂爆破参数与爆破结果之间的关系。

模型的拟合度 $R^2 = 0.692$,模型表现良好,因此模型基本满足对于变量共线性表现。方差膨胀因子 VIF 全部小于10,根据式(9)知,模型不存在多重共线性问题,即模型构建良好。

试验数据代入式(3),可得出未破碎矿岩量 Y 与预裂孔孔距 a 和预裂缝至缓冲孔排距 D 的关系预测模型。

$$Y = 11.9a + 19.6D - 60.9 \quad (10)$$

通过将观测到的有序残差在横坐标轴上绘制,并将这些有序残差在纵坐标轴上绘制出在正态分布下的期望位置,得出残差图3以验证残差是否服从正态分布假设。

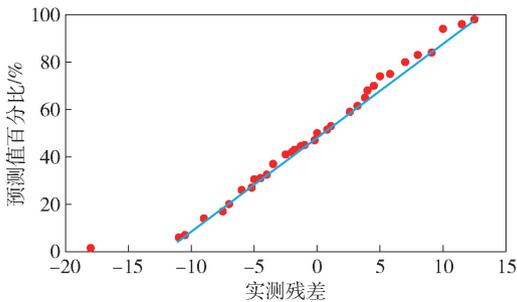


图3 未破碎矿岩量残差正态分布图

图3所示为式(10)残差的正态分布图。由图可知,实测残差值总体沿一条直线分布,即残差呈正态分布,但在残差-18处有一个离群点,符合残差正态分布假设。在其他预裂爆破参数不变的情况下,为求得式(10)的最优解,即未破碎矿岩量 Y 取最小值,通过线性规划求出预裂孔孔距 a 及预裂缝至缓冲孔排距 D 的最优解分别为1.1 m与2.4 m。

图4所示为标准化残差散点图,标准化残差图围绕零轴周围,基本呈上下对称分布,分布特征不随预测值的增加而改变,即数据符合方差齐性、独立性条件。但左右两侧存有一定的高度差异。在拟合值为40时,标准化残差有一异常值,且与图1中的异常值源于同一残差。经验证分析,异常值主要由预

裂缝至缓冲孔排距的值较大所导致。

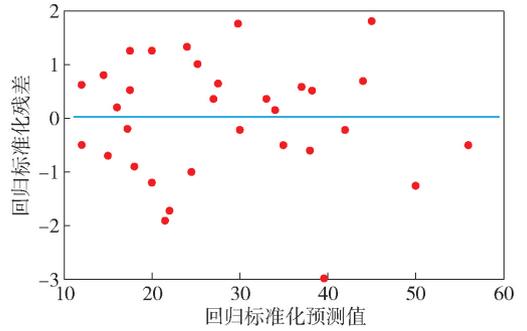


图4 标准化残差散点图

存在未破碎矿岩主要有两方面原因:①炮孔超深不足,爆破后在露天台阶底部残留根底;②节理发育情况对预裂缝的影响。根据野外调查研究,试验爆破区内岩体节理裂隙普遍较为发育,以北东及北西向发育为主,局部较为密集,呈网络状相互穿插,破坏了岩体的完整性。节理面为应力薄弱面,其方向与倾向间接影响岩石爆破程度。

根据多元线性回归模型分析,预裂缝至缓冲孔排距 D 的 P 值为0.000,远小于显著性水平0.05。而预裂孔孔距 a 的 P 值为0.061,略高于显著性水平0.05。即在预裂缝至缓冲孔排距 D 与预裂孔孔距 a 均减小的情况下,相较于预裂孔孔距 a ,目标变量预裂缝至缓冲孔排距 D 对未破碎矿岩量 Y 的影响程度更大。此外,预裂孔孔距 a 与未破碎矿岩量 Y 呈正相关性,即未破碎矿岩量随预裂孔孔距变大而增加,与工程实际相符,进一步验证了多元线性回归模型在预裂爆破参数研究中的合理性。

5 结论

(1)多元线性回归模型可用于确定合理预裂爆破参数研究,对于优化爆破参数具有借鉴意义。以预裂孔孔距 a 和预裂缝至缓冲孔排距 D 为目标变量,可得出两者与未破碎矿岩量 Y 间的线性拟合方程 $Y = 11.9a + 19.6D - 60.9$,模型拟合度 $R^2 = 0.692$,拟合效果良好。

(2)在其他预裂爆破参数不变的情况下,为使未破碎矿岩量 Y 取得最小值,由线性回归求得线性拟合方程最优解,即预裂孔孔距 a 及预裂缝至缓冲孔排距 D 的最优解分别为1.1 m与2.4 m。

(3)预裂孔孔距 a 与未破碎矿岩量 Y 呈正相关性,在预裂缝至缓冲孔排距 D 与预裂孔孔距 a 均减小的情况下,相较于预裂孔孔距 a ,目标变量预裂缝

至缓冲孔排距 D 对未破碎矿岩量 Y 的影响程度更大。

[参考文献]

- [1] 汪旭光. 工程爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [2] 洪勇,于明亮,张俊,等. 露天矿终了边坡爆破参数优化[J]. 采矿技术,2022,22(6):141-145.
- [3] 刘晓. 爆破动荷载对充填体内预留巷道的稳定性研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(4):24-29.
- [4] 杨仁树,苏洪,陈程,等. 相互贯通裂纹动态断裂的试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(13):134-139.
- [5] 王雁冰. 爆炸的动静作用破岩与动态裂纹扩展机理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [6] 陈啸林,彭磊. 爆破参数对预裂爆破裂纹扩展规律的影响研究[J]. 有色金属(矿山部分),2023,75(4):97-106.
- [7] 闫大洋. 露天矿台阶预裂爆破参数优化的研究与应用[D]. 淮南:安徽理工大学,2014.
- [8] 李洪伟,雷战,江向阳,等. 不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析[J]. 高压物理学报,2019,33(4):82-91.
- [9] 张飞燕,陈玥玥,韩颖,等. 低透气性煤层预裂爆破裂纹扩展特征数值模拟研究[J]. 爆破,2022,39(3):106-111.
- [10] 朱必勇,焦文宇,寇向宇,等. 基于数值模拟的预裂爆破参数优化研究[J]. 有色金属(矿山部分),2019,71(4):32-36.
- [11] 杨云强,何翔,王欢,等. 自然崩落采矿法不同拉底方式过沿脉技术分析[J]. 中国矿山工程,2023,52(5):53-58.
- [12] 侯猛. 巷道掘进光面爆破参数的动焦散实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
- [13] 璩世杰,刘际飞. 节理角度对预裂爆破成缝效果的影响研究[J]. 岩土力学,2015,36(1):189-194+204.
- [14] 高晓进,张震,徐刚,等. 双主动超前爆破预制顶板裂隙断顶卸压护巷技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2022,4(1):013015.
- (上接第20页)
- [5] 雷勇祥,王满谷,彭学军,等. 地铁渡线双线小断面隧道变单线大断面隧道施工技术[J]. 大众标准化,2022(13):158-159+162.
- [6] 黄锋,朱合华. 开挖进尺对大断面隧道变形的影响[J]. 铁道建筑,2013(8):56-58.
- [7] 张亚龙,王高彦,李志清等. 深埋大断面隧道施工影响参数分析[J]. 施工技术,2014,43(S2):116-119.
- [8] 黄金花,朱孟龙. 基于遍布节理模型的超大断面隧道开挖优化研究[J]. 西部交通科技,2022(2):169-175.
- [9] 颜杜民,何平,陈峥,等. IV级围岩隧道两台阶法开挖进尺研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(9):99-103.
- [10] 袁飞,包崇超,王猛等. 红层软岩隧洞大变形特征及控制措施研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(S1):332-340+349.
- [11] 何昌国. 软弱围岩大跨隧道合理预留变形量分析及初期支护刚度优化[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(S2):227-231.
- [12] 康三月,邱贞波,杲加俊,等. 筋箍桩复合地基技术在某渣土堆填工程中的应用研究[J]. 水利规划与设计,2021(9):107-111+138.
- [13] 边振荣. 引洮二期工程七干渠隧洞开挖支护及围岩监控量测技术[J]. 水利规划与设计,2021(4):83-87.
- [14] 杨斐毅. 浅埋大断面公路隧道单侧壁导坑法施工力学行为研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [15] 刘宗建. 超大断面突变小断面施工技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [16] 李臣,陈团团,王孝臣,等. 等煤柱巷道开挖时间差异性的围岩破坏数值分析[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):51-55.
- [17] 赵红亮,仇岩,梁海安,等. 地应力环境对深埋硐室岩爆特性影响的数值模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2023,5(6):063071.
- [18] 王志凯,宋文龙. 基于FLAC^{3D}对开采引起地表沉降规律研究[J]. 有色设备,2022,36(1):65-69.