基于矿岩可爆性分级的中深孔爆破参数优化研究*

白朝阳[1,2]，刘拴平[1]，邓朋[2]

（1.陕西太白黄金矿业有限责任公司， 陕西 宝鸡市 721000；
2.北京科技大学 土木与资源工程学院， 北京 100083）

摘要：为实现地下金属矿山爆破作业降本增效的目标，对太白金矿1 100～1 200 m中段矿岩中深孔爆破工艺进行了研究。选取岩石普氏硬度系数、矿岩容重、波阻抗、完整性系数、抗拉强度为矿岩可爆性分级指标，基于博弈论组合赋权法对这5个指标赋予合理权重，采用集对分析的方法计算待分级区域指标实测值与常用矿岩可爆性级别判据的最大联系度，以此确定了太白金矿六大勘探区域的矿岩可爆性等级。基于矿岩可爆性分级更新了矿区的原始爆破参数，在爆破效果仍不理想的Ⅳ级爆区设计了9个现场的3因素3水平正交试验，并根据得到的现场试验结果分析了各因素对爆破效果指标的影响程度，根据3个因素与爆破效果指标的关系对Ⅳ级爆区进行爆破参数优化，得出的太白金矿Ⅳ级爆区最优爆破参数为：炮孔排距1.5 m，孔底距2.8 m，邻近系数1.8。将该参数应用于太白金矿Ⅳ级爆区实际生产中，大块率和炸药单耗显著降低，一次崩矿量显著提高，实现了太白金矿中深孔爆破工艺的降本增效。

关键词：降本增效；博弈论；集对分析；矿岩可爆性分级；正交试验

中图分类号：TD23 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)04-0088-08

Study on Optimization of Medium-Deep Hole Blasting Parameters Based on Classification of Ore-Rock Blastability

BAI Chaoyang[1,2], *LIU Shuanping*[1], *DENG Peng*[2]

(1.Shaanxi Taibai Gold Mining Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721000, China;
2.School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve the goal of cost decreasing and benefit increasing of blasting operation in underground metal mines, the medium-deep hole blasting technology of ore-rock in the middle section of 1 100-1 200 m in Taibai Gold Mine was studied. The rock Proctor hardness coefficient, ore-rock bulk density, wave impedance, integrity coefficient and tensile strength were selected as the classification indexes of ore-rock blastability. Based on the game theory combination weighting method, these five indexes were given reasonable weights. The set pair analysis method was used to calculate the maximum connection degree between the measured value of the index to be classified and the common criterion of ore rock blastability level, so as to determine the ore-rock blastability level of the six exploration areas in Taibai Gold Mine. Based on the classification of ore-rock blastability, the original blasting parameters of the mining area were updated. Nine three-factor and three-level orthogonal tests were designed in the Ⅳ-level blasting area where the blasting effect was still not ideal. According to the field test results, the influence degree of each factor on the blasting effect index was analyzed. According to the relationship between the three factors and the blasting effect index, the blasting parameters of the Ⅳ-level blasting area were optimized. The optimal blasting parameters of the Ⅳ-level blasting area in Taibai Gold Mine are as follows: the hole row distance is 1.5 m, the hole bottom distance is 2.8 m, and the proximity coefficient is 1.8. These parameters were applied to the actual production of grade Ⅳ blasting area in Taibai Gold Mine. The bulk rate and explosive unit consumption were significantly reduced, and the amount of one-time ore collapse was significantly increased, which realized the cost decreasing and benefit increasing of medium-deep hole blasting technology in Taibai Gold Mine.

Key words: Cost decreasing and benefit increasing, Game theory, Set pair analysis, Classification of ore-rock blastability, Orthogonal test

* **收稿日期**：2024-05-07
作者简介：白朝阳(1990—)，男，陕西渭南人，硕士研究生，主要从事金属矿山采矿技术研究与管理工作。E-mail:842898476@qq.com
通信作者：刘拴平(1977—)，男，陕西太白人，工程师，主要从事金属矿山采矿方法研究工作。E-mail:359050092@qq.com

0 引言

中深孔爆破工艺是目前地下矿山高效生产、建设的常用工艺。科学、精细的中深孔爆破技术能够使矿山提高产能、降低大块率以及节省炸药消耗。因此,中深孔爆破开采技术的精细化研究是实现矿山企业降本增效的有效途径之一,而矿岩可爆性分级[1]既是地下矿山中深孔爆破参数选取的依据之一,也是中深孔爆破开采技术精细化研究的重要内容。近些年伴随着学科交叉发展,适用于矿岩可爆性分级的理论方法也在更新迭代。

王文军等[2]在爆破作用指数法基础上提出一种评价矿岩可爆性的修正方法,成功对黑沟露天矿进行矿岩可爆性分级,并取得了良好的工业爆破效果。郑位等[3]建立集对分析模型,以最大联系度原则对某锡矿山的6类岩体进行矿岩可爆性分级,从而得出该矿不同岩性巷道掘进的合理爆破参数。展卫露等[4]结合室内岩石力学试验结果及现场工程爆破效果,对锡铁山矿的矿岩进行可爆性评价,并根据现场爆破漏斗试验结果对爆破参数进行了优化。韩超群等[5]对大量矿岩样本的分级结果进行主成分分析,引入支持向量机模型进行了矿岩可爆性等级预测。于庆磊等[6]对爆区岩石分级指标采用蚁群算法优化权重并进行聚类分析,根据分级结果建立了爆区炸药单耗预测数学模型。

综上所述,众多专家学者在矿岩可爆性分级问题上已取得一系列研究成果,但由于影响矿岩可爆性的因素具有多样性和复杂性,矿岩可爆性分级方法需要根据现场实际情况而定。基于此,本文采用博弈论组合赋权的方法对矿岩可爆性分级指标赋予合理权重,基于集对分析法的最大联系度原则确定了太白金矿六大勘探区域矿岩的可爆性级别,根据太白金矿的矿岩可爆性级别对原爆破参数进行了初步优化,但仍存在爆破不理想的现象,后续通过设计爆破参数正交试验,对爆破参数进行调整优化,取得了良好的技术经济效益。

1 工程概况

太白金矿位于秦西南地区。目前,该矿山1 100～1 200 m中段采用分段崩落法开采,落矿方式为中深孔凿岩爆破。矿山所采用的凿岩设备老旧,且对矿区矿岩可爆性精度掌握程度不够,原始设计的爆破参数在矿山生产实践中存在一次崩矿量低、爆破大块率高、炸药单耗大等缺陷,以致总体采矿爆破效果满意度较低。因此,需要在可靠性较高的矿岩可爆性分级条件下对中深孔爆破参数进行优化,从而提高一次崩矿量、减少炸药单耗、降低大块率。该矿山1 100～1 200 m中段矿岩的物理力学性质见表1。

表1 1 100～1 200 m中段矿岩的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of the ore and rock from 1 100 m level to 1 200 m level

位置	容重/(kg/m³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
50～42号勘探线	2 755	70.54	57.83	0.51	6.43
42～38号勘探线	2 762	63.81	25.76	0.36	6.98
38～34号勘探线	2 780	102.60	33.80	0.23	14.83
30～26号勘探线	2 723	54.35	31.91	0.51	8.19
16～12号勘探线	2 689	37.73	36.52	0.27	4.74
10～5号勘探线	2 741	56.81	35.25	0.42	8.35

2 理论分析基础

2.1 基于博弈论的组合赋权

2.1.1 基于层次分析法确定主观权重

层次分析法[7]能够将定性指标进行量化表示,使得定性指标以数据的形式参与赋权计算,层次分析法计算过程如下。

(1) 构造判断矩阵。将评价体系中的指标相互对比,以指标的重要性程度进行数据标定,判断矩阵元素的标定见表2。

表2 判断矩阵元素的标定

Table 2 Calibration of judgment matrix elements

标度值	标度含义
1	指标 i 与 j 同等重要
3	指标 i 比 j 稍微重要
5	指标 i 比 j 明显重要
7	指标 i 比 j 强烈重要
9	指标 i 比 j 极端重要
2,4,6,8	相邻判断中间值
倒数	指标 i 与 j 比较的判断标度为 m,则 j 与 i 比较的判断标度为 $1/m$。

构造出来的判断矩阵用 $\boldsymbol{R}$ 来表示:

$$\boldsymbol{R}=[r_{ij}]_{n\times n}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

(2) 一致性检验[8]。为避免判断矩阵中各指标重要性存在自相矛盾的情况,需要对判断矩阵进行一致性检验,一致性检验公式为:

$$CR=\frac{\lambda_{\max}-n}{RI(n-1)} \tag{2}$$

式中:$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根;RI 为平均一致性指标;n 为指标数。$CR<0.1$,则通过一致性检验。

(3) 确定主观权重。判断矩阵通过一致性检验后,采用算术平均法计算各指标权重值 w_j:

$$w_j=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{r_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}r_{kj}} \tag{3}$$

2.1.2 熵权法确定客观权重

熵权法[9]能够客观地反映不同指标之间的差异性和重要程度,不受主观因素的影响。熵权法计算过程如下。

(1) 构造评价模型。设有 m 个方案,n 个指标,则构建的评价矩阵为:

$$\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{m\times n}=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1n}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{m1}&x_{m2}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix} \tag{4}$$

(2) 计算初始矩阵。对评价矩阵进行非负正向化处理,再进行标准化:

$$x_{ij}^{*}=\frac{x_{ij}-\min x_i}{\max x_i-\min x_i} \tag{5}$$

得到的初始矩阵为:

$$\boldsymbol{X}^{*}=[x_{ij}^{*}]_{m\times n}=\begin{bmatrix}x_{11}^{*}&x_{12}^{*}&\cdots&x_{1n}^{*}\\x_{21}^{*}&x_{22}^{*}&\cdots&x_{2n}^{*}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{m1}^{*}&x_{m2}^{*}&\cdots&x_{mn}^{*}\end{bmatrix} \tag{6}$$

(3) 计算各指标的熵值 H_j。

$$\overline{x}_{ij}^{*}=\frac{x_{ij}^{*}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}^{*}}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{7}$$

$$H_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}\overline{x}_{ij}^{*}\ln\overline{x}_{ij}^{*} \tag{8}$$

(4) 计算各指标的权重值 u_j。

$$u_j=\frac{(1-H_j)}{\sum_{j=1}^{n}(1-H_j)} \tag{9}$$

2.1.3 基于博弈论确定组合权重

(1) 对采用 $L(L\geqslant 2)$ 种赋权方法[10]构成的权重集为 $\boldsymbol{w}_k=[\boldsymbol{w}_{k1}\ \ \boldsymbol{w}_{k2}\ \ \cdots\ \ \boldsymbol{w}_{kn}]^{\mathrm{T}}$,其中 $k=1,2,\cdots,L$。继续引入一个线性组合系数 $\alpha_k=(a_1\ \ a_2\ \ \cdots\ \ a_k)$ 与权重集结合计算得到的组合权重 $\boldsymbol{w}$ 为:

$$\boldsymbol{w}=\sum_{k=1}^{L}\alpha_k\boldsymbol{w}_k\quad(\alpha_k>0) \tag{10}$$

(2) 为得到更贴近理想值的博弈论组合权重向量 $\boldsymbol{w}^{*}$,需要进一步对线性组合系数进行优化,优化过程中以 $\boldsymbol{w}_k$ 与组合权重 $\boldsymbol{w}$ 离差最小化为目标,对策模型为:

$$\min\left\|\sum_{j=1}^{L}\alpha_j\boldsymbol{w}_j^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{w}_i\right\|_2\quad(i=1,2,\cdots,L) \tag{11}$$

(3) 根据矩阵微分性质,导出上式的最优化一阶导数条件:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_1\cdot\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}&\boldsymbol{w}_1\cdot\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}&\cdots&\boldsymbol{w}_1\cdot\boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{w}_2\cdot\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}&\boldsymbol{w}_2\cdot\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}&\cdots&\boldsymbol{w}_2\cdot\boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\\boldsymbol{w}_L\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}&\boldsymbol{w}_L\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}&\cdots&\boldsymbol{w}_L\cdot\boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_1\\a_2\\\vdots\\a_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_1\cdot\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{w}_2\cdot\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}\\\vdots\\\boldsymbol{w}_L\cdot\boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} \tag{12}$$

(4) 对求得的组合系数进行归一化处理:

$$a_k^{*}=\frac{a_k}{\sum_{k=1}^{L}a_k} \tag{13}$$

得到指标的博弈论组合权重 $\boldsymbol{w}^{*}$ 为:

$$\boldsymbol{w}^{*}=\sum_{k=1}^{L}a_k^{*}\boldsymbol{w}_k \tag{14}$$

2.2 集对分析理论模型

将两个存在一定联系的集合组成对子 $H(M,N)$,其中集合 M 有 t 个元素,即 $M=(m_1\ \ m_2\ \ \cdots\ \ m_t)$,$N$ 有 k 个元素,$N=(n_1\ \ n_2\ \ \cdots\ \ n_k)$。可以将这两个集合看成系统分析的一个整体,用联系度 μ 来表达对子 $H(M,N)$ 中两个集合的关系:

$$\mu_{(M,N)}=\alpha+\beta i+\gamma j \tag{15}$$

式中:α 为同一度;β 为差异度,可以将 βi 进一步扩展为 $\beta i=\beta_1 i_1+\beta_2 i_2+\cdots+\beta_k i_k$,得到多元联系度;$\gamma$ 为对立度;i 为差异不确定系数;j 为对立度系数,j 值恒为 -1。

若集合 M 由 t 个评价指标值组成,集合 N 由 k 个评价标准值组成,则由 M 与 N 组成的集对 $H(M,N)$ 的联系度 $\mu_{(M,N)}$ 为:

$$\mu_{(M,N)}=d+\beta_{(t,1)}i_1+\beta_{(t,2)}i_2+\cdots+\beta_{(t,k-2)}i_{k-2}+\gamma j \tag{16}$$

式中:d 为指标值隶属于Ⅰ级标准的可能程度;$\beta_{(t,1)}$ 为指标值隶属于Ⅱ级标准的可能程度;$\beta_{(t,2)}$

为指标值隶属于Ⅲ级标准的可能程度;$\beta_{(t,k-2)}$ 为指标值隶属于 $k-1$ 级标准的可能程度。对于越小越优指标,指标值 $m_x(x=1,2,\cdots,t)$ 与该指标评价标准的联系度 μ_x 为:

$$\mu_x=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{k-2}+0j & m_x\leqslant s_1\\ \dfrac{s_2-m_x}{s_2-s_1}+\dfrac{s_2-m_x}{s_2-s_1}i_1+0i_2+\cdots+0i_{k-2}+0j & s_1<m_x\leqslant s_2\\ \vdots & \vdots\\ 0+0i_1+0i_2+\cdots+0i_{k-2}+j & m_x>s_k\end{cases} \tag{17}$$

式中,s_k 表示评价分级的门限值,$s_1\leqslant s_2\leqslant\cdots\leqslant s_{k-1}\leqslant s_k$。

确定各指标值的联系度 μ_x 后,求得集对 $H(M,N)$ 的 K 元联系度 μ 为:

$$\mu=\sum_{x=1}^{t}w^*\mu_x \tag{18}$$

3 基于博弈论的矿岩可爆性分级评价模型

3.1 评价流程

根据矿岩可爆性评价指标体系,通过层次分析法求得主观权重,采用熵权法求得客观权重后结合博弈论求得组合权重,应用集对分析理论模型对待分级的区域矿岩进行可爆性分级评价。评价流程如下:

(1) 建立矿岩可爆性分级评价指标体系(如图 1 所示),求解组合权重;

(2) 通过联系度参数与权重向量计算得到各区域岩石与等级之间的联系度;

(3) 根据最大联系度原则确定该区域矿岩可爆性等级。

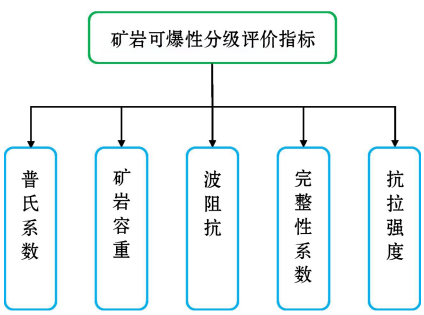


图 1 矿岩可爆性分级评价指标体系

Fig.1 Index system for classification evaluation of rock explosibility

3.2 矿岩可爆性指标分级

根据现有的矿岩可爆性分级研究[11-14],可以根据矿岩可爆性分级判据指标将矿岩可爆性分成 7 个等级,矿岩可爆性分级的具体判据指标见表 3。

表 3 岩体可爆性分级判据指标

Table 3 Index criteria of blastability classification of rock mass

可爆性等级	岩石普氏硬度系数	波阻抗/(×10⁶ kg/(m²·s))	岩石容重/(t·m⁻³)	抗拉强度/MPa	完整性系数	可爆性描述
Ⅰ	6	3.0	2.50	6.6	0.049 4	极易爆
Ⅱ	7	6.0	2.60	10.0	0.255 5	易爆
Ⅲ	9	9.0	2.75	13.0	0.365 4	较易爆
Ⅳ	12	12.0	2.90	17.0	0.512 2	中等
Ⅴ	16	15.0	3.16	20.0	0.602 1	较难爆
Ⅵ	17	18.0	3.30	23.0	0.712 2	难爆
Ⅶ	18	20.0	3.45	26.0	0.823 2	极难爆

3.3 区域可爆性指标实测

以太白金矿 1 100～1 200 m 中段 50～42 号、42～38 号、38～34 号、30～26 号、16～12 号、10～5 号勘探线区域为研究对象,这 6 个区域的矿岩可爆性指标实测结果见表 4。

表 4 各区域岩石可爆性指标实测值

Table 4 Measured values of blastability indicators of rock in the various areas

区域	普氏系数	波阻抗/(×10⁶ kg/(m²·s))	岩石容重/(t·m⁻³)	抗拉强度/MPa	完整性系数
50～42 号勘探线	7	13.14	2.76	6.43	0.168 2
42～38 号勘探线	6	19.28	2.76	6.98	0.269 5
38～34 号勘探线	10	19.03	2.78	14.83	0.643 7
30～26 号勘探线	5	17.76	2.72	8.19	0.366 5
16～12 号勘探线	3	6.75	2.69	4.74	0.310 2
10～5 号勘探线	8	27.40	3.02	8.35	0.452 8

3.4 评价指标权重的确定

根据层次分析法确定主观权重 $w_{主}$,采用熵权法确定客观权重 $w_{客}$,然后运用博弈论计算出最优分配系数 $x=0.42$,$y=0.58$,从而得到指标的组合权重 w。各指标的主、客观和组合权重见表 5。

表 5 指标的权重

Table 5 The weights of the indicators

权重类别	普氏系数	波阻抗	岩石容重	抗拉强度	完整性系数
主观权重	0.081 3	0.268 9	0.067 6	0.440 0	0.142 2
客观权重	0.098 4	0.077 3	0.399 9	0.255 9	0.168 3
组合权重	0.091 2	0.157 8	0.260 3	0.333 2	0.157 3

注:层次分析法求得主观权重过程中 CI 为 0.087 2,CR 为 0.077 8,通过一致性检验。

3.5 指标联系度确定和分级评价结果

使用 MATLAB 分别计算得到不同矿岩可爆性等级条件下 6 个区域的联系度。根据最大联系度原则[15-17]进行矿岩可爆性分级评价,评价结果见表 6。

表 6 联系度评价结果

Table 6 Results of association degree evaluation

区域	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	评价结果
50～42 号勘探线	0.399 3	0.182 4	0	0.242 1	0.116 1	0.059 9	0	Ⅰ级
42～38 号勘探线	0.387 7	0.173 5	0.020 4	0.242 1	0.018 2	0	0.157 8	Ⅰ级
38～34 号勘探线	0	0	0.449 3	0.235 4	0.092 8	0.064 5	0.157 8	Ⅲ级
30～26 号勘探线	0.267 8	0.208 7	0.364 0	0.001 6	0.012 6	0.145 2	0	Ⅲ级
16～12 号勘探线	0.424 4	0.301 1	0.274 3	0	0	0	0	Ⅰ级
10～5 号勘探线	0.163 3	0.215 5	0.108 5	0.234 9	0.119 7	0	0.157 8	Ⅳ级

4 实践验证

4.1 爆破参数优化

根据表 6 中太白金矿 6 个区域矿岩可爆性级别,对 6 个区域进行中深孔爆破参数初步优化。其中,5 个区域在生产中取得了良好的爆破效果;10～5 号勘探线区域的矿岩可爆性级别为Ⅳ级,该区域取得的爆破效果仍不够理想,大块率、炸药单耗较高。因此,需进一步对太白金矿 10～5 号勘探线区域Ⅳ级爆区的中深孔排距、孔底距、邻近系数(孔底距与最小抵抗线之比)等爆破参数进行优化,为此,设计出 3 因素 3 水平多指标的正交试验[18-19],具体的正交试验因素水平见表 7。

表 7 正交试验因素与水平

Table 7 Factors and levels of orthogonal test

水平	排距/m	孔底距/m	邻近系数
1	1.1	2.4	1.6
2	1.3	2.6	1.8
3	1.5	2.8	2.0

选取太白金矿Ⅳ级爆区 9 个爆破试验区进行爆破工业试验(见图 2),各爆破试验区的爆破参数与爆破效果见表 8,以表 8 中的每米炮孔崩矿量、炸药单耗、爆堆大块率进行正交试验,从因素对指标结果的影响程度来分析因素与指标的关系,进而选择最优爆破参数。

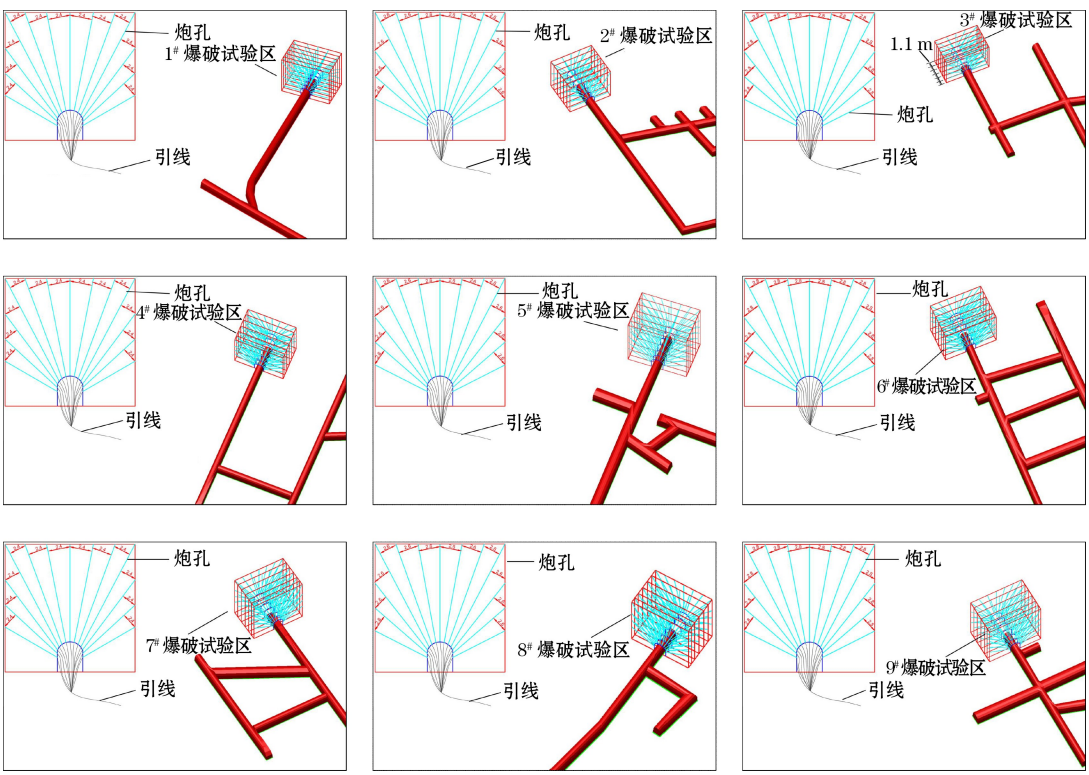


图 2 爆破试验区

Fig.2 Blasting test areas

对表 8 中的延米崩矿量、炸药单耗、爆堆大块率等指标进行分类[20],将指标划分为效益型指标(数值越大越好)和消耗型指标(数值越小越好)两种,其中崩矿量属于效益型指标,炸药单耗、大块率属于消耗型指标。

表 8 现场爆破试验结果

Table 8 Results table of on-site blasting test

爆破试验区编号	因素			延米崩矿量/(t·m^{-1})	炸药单耗/(kg·t^{-1})	大块率/%
	排距/m	孔底距/m	邻近系数			
1#	1.1	2.4	1.6	5.15	0.56	2.12
2#	1.1	2.6	1.8	7.10	0.66	1.54
3#	1.1	2.8	2.0	6.12	0.57	1.37
4#	1.3	2.4	2.0	5.24	0.61	2.11
5#	1.3	2.6	1.6	5.78	0.53	2.52
6#	1.3	2.8	1.8	5.18	0.61	1.29
7#	1.5	2.4	1.8	6.22	0.58	1.47
8#	1.5	2.6	2.0	6.18	0.63	1.15
9#	1.5	2.8	1.6	7.05	0.60	1.22

由表 8 中的 1#、2#、3# 爆破试验区结果可知,Ⅳ级爆区在中深孔排距为 1.1 m 的条件下,随着孔底距和邻近系数的增大,延米崩矿量和炸药单耗均呈现先增大后减小的趋势,而大块率逐渐减小。其中,2# 爆破试验区的延米崩矿量最大,为 7.10 t/m;1# 爆破试验区的炸药单耗最小,为 0.56 kg/t;3# 爆破试验区的大块率最小,为 1.37%。

由表 8 中的 4#、5#、6# 爆破试验区结果可知,Ⅳ级爆区在中深孔排距为 1.3 m 的条件下,随着孔底距和邻近系数的增大,每米炮孔崩矿量和大块率呈现先增后减的趋势,炸药单耗先减小后增大。最大延米崩矿量为 5.78 t/m,最小炸药单耗为 0.53 kg/t,最小大块率为 1.29%。

由表 8 中的 7#、8#、9# 爆破试验区结果可知,Ⅳ级爆区在中深孔排距为 1.5 m 的条件下,随着孔底距和邻近系数的增大,延米崩矿量和大块率呈现先减小后增大的趋势,炸药单耗先增大后减小。最大延米崩矿量为 7.05 t/m,最小炸药单耗为 0.58 kg/t,最小大块率为 1.15%。

根据太白金矿Ⅳ级爆区现场爆破试验结果,取各因素各水平的指标数值和的平均值,并进行极差分析,以各因素极差大小来分析该因素对指标的影响程度,进而选取该因素最优水平为优化后的爆破参数[21]。极差分析结果如图 3 所示。

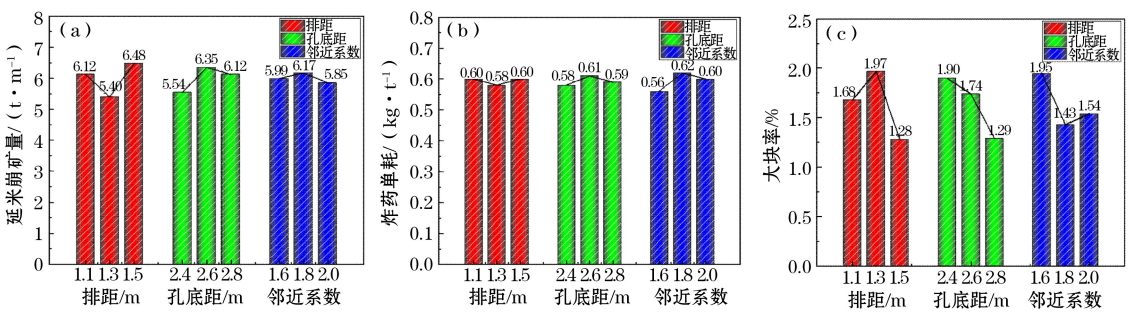


图 3 正交试验因素与指标的关系

Fig.3 Relationship between orthogonal test factors and indexes

从图 3 的极差值分析结果大小来看,爆破排距对延米崩矿量、崩矿大块率的影响最显著,三个因素中邻近系数对炸药单耗的影响最突出。结合三个因素与爆破效果指标的关系可知最佳爆破参数为:排距 1.5 m,孔底距 2.8 m,邻近系数 1.8。

4.2 技术经济效益

将最优爆破参数应用于太白金矿Ⅳ级爆区实际生产中,取得了较好的技术经济效益,中深孔爆破的崩矿块度合理,以块度为 8~10 cm 碎块居多,且欠挖现象较少。

爆破参数优化后,爆破大块率低,二次破碎的费用少,一次崩矿量达到 1 145.82 t。爆破参数优化前后的爆破成本如图 4 所示。

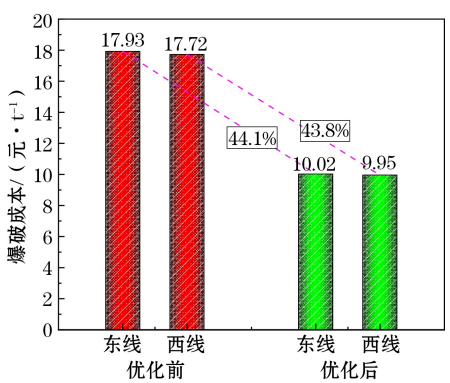


图 4 爆破参数优化前后的爆破成本对比

Fig.4 Comparison of blasting cost before and after optimization of blasting parameters

由图4可知,优化前矿区东线爆破成本为17.93元/t,优化后矿区东线爆破成本为10.02元/t,爆破成本降低了44.1%;优化前矿区西线爆破成本为17.72元/t,优化后矿区西线爆破成本为9.95元/t,爆破成本降低了43.8%。

5 结论

(1) 采用博弈论进行主客观组合赋权,得到5个矿岩可爆性分级指标的可靠性权重为0.091 2,0.157 8,0.260 3,0.333 2,0.157 3。将太白矿区1 100～1 200 m中段的6个待分级区域的各指标实测值代入集对分析理论模型中,得到了6个待分级区域的岩石可爆性等级,为后续的爆破参数设计及优化奠定基础。

(2) 在可爆性等级为Ⅳ级的10～5号勘探线区爆破效果不理想,为此设计3因素3水平多指标的正交试验。从延米崩矿量和大块率这两个试验结果分析,3因素的影响程度排序为:炮孔排距>孔底距>邻近系数;从炸药单耗这个试验结果分析,3因素的影响程度排序为:邻近系数>孔底距>炮孔排距。根据正交试验因素与指标的关系可知,10～5勘探线区域的最优爆破参数为:排距1.5 m,孔底距2.8 m,邻近系数1.8。

(3) 实践表明,爆破参数优化后,矿区东线爆破成本降低44.1%,矿区西线爆破成本降低43.8%,且10～5号勘探线区域的单次爆破崩矿量有所提高,爆破大块率、炸药单耗显著降低。与原爆破参数相比,采用优化后的爆破参数可得较好的技术经济效益。研究成果可以为同类型矿山矿岩可爆性分级和爆破参数优化提供参考。

参考文献(References):

[1] 白玉奇,李振阳,李传增,等.基于CRITIC-Vague模型的岩体可爆性评价[J].金属矿山,2020(12):27-32.
BAI Yuqi, LI Zhenyang, LI Chuanzeng, et al. Assessment for rock mass blastability based on CRITIC-Vague model [J]. Metal Mine,2020(12):27-32.

[2] 王文军,李润然,纪旭波,等.黑沟矿区露天开采矿岩可爆性分级研究[J].金属矿山,2021(4):64-69.
WANG Wenjun, LI Runran, JI Xubo, et al. Blastability classification of open pit mining in Heigou Mining Area[J]. Metal Mine,2021(4):64-69.

[3] 郑位,武旭阳.某矿矿岩可爆性分级研究[J].云南冶金,2023,52(1):36-40.
ZHENG Wei, WU Xuyang. Study on explosiveness classification of one ore-bearing rock [J]. Yunnan Metallurgy,2023,52(1):36-40.

[4] 展卫露,高天宇,蔡泽山,等.锡铁山中深孔爆破参数优化研究与应用[J].矿业研究与开发,2024,44(5):31-36.
ZHAN Weilu, GAO Tianyu, CAI Zeshan, et al. Research and application on parameters optimization of medium and deep hole blasting in Xitieshan mining area [J]. Mining Research and Development,2024,44(5):31-36.

[5] 韩超群,陈建宏,周智勇,等.基于主成分分析—支持向量机模型的矿岩可爆性等级预测研究[J].黄金科学技术,2019,27(6):879-887.
HAN Chaoqun, CHEN Jianhong, ZHOU Zhiyong, et al. Research on prediction of rock mass blastability classification based on PCA-SVM model [J]. Gold Science and Technology,2019,27(6):879-887.

[6] 于庆磊,李友,李万涛,等.基于可爆性分区方法的露天矿炸药单耗预测模型[J].金属矿山,2024(5):102-109.
YU Qinglei, LI You, LI Wantao, et al. Prediction model of explosive unit consumption in open-pit mine based on zoning of blasting compliance method[J]. Metal Mine,2024(5):102-109.

[7] 李杨,夏文浩,宋卫东,等.基于多源信息融合的海底矿山开采及治理稳定性评价[J].金属矿山,2024(3):29-36.
LI Yang, XIA Wenhao, SONG Weidong, et al. Stability evaluation of seabed mining and treatment based on multi-source information fusion[J]. Metal Mine,2024(3):29-36.

[8] 胡霞,钟文杰,程静静.基于AHP和熵权法的煤矿安全态势评价模型[J].煤矿安全,2021,52(2):248-252.
HU Xia, ZHONG Wenjie, CHENG Jingjing. Situational evaluation model of coal mine safety based on AHP and entropy weight method[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(2):248-252.

[9] 张宇鑫.基于序关系法-熵权法的矿井通风网络可靠性评价方法研究[J].中国矿业,2024,33(3):202-211.
ZHANG Yuxin. Research on the reliability evaluation method of mine ventilation networkbased on rank-order method and entropy weighting method[J]. China Mining Magazine,2024,33(3):202-211.

[10] 王其虎,熊淦麟,叶义成,等.基于博弈论-可拓云模型的尾矿库溃坝后果评价[J].矿业研究与开发,2023,43(11):137-142.
WANG Qihu, XIONG GanLin, YE Yicheng, et al. Evaluation of the consequences of dam failure in tailings reservoir based on game theory-extendable cloud model[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):137-142.

[11] 叶海旺,雷丙响,周汉红,等.基于K-Means聚类与熵权TOPSIS法的岩石可爆性评价研究[J].爆破,2024,41(2):112-119.
YE Haiwang, LEI Bingxiang, ZHOU Hanhong, et al. Rock blastability evaluation based on K-Means clustering and entropy weight TOPSIS method[J]. Blasting,2024,41(2):112-119.

[12] 史涵虚,周传波,蒋楠,等.魏家峁煤矿区深孔台阶剥离爆破施工岩体可爆性分析[J].爆破,2023,40(1):37-44.

SHI Hanxu, ZHOU Chuanbo, JIANG Nan, et al. Analysis on rock mass explosibility during deep-hole bench stripping by blasting in Weijiamao coal mine area[J]. Blasting,2023,40(1):37-44.

[13] 丁小华,原文杰,解祯,等.基于综合赋权云模型的露天矿岩体可爆性分级识别[J].煤炭科学技术,2019,47(10):96-101.
DING Xiaohua, YUAN Wenjie, XIE Zhen, et al. Classification and identification of rock blastability in open-pit mine based on comprehensive weighted cloud model[J]. Coal Science and Technology,2019,47(10):96-101.

[14] 吴凌峰,周宗红,孙伟.基于 XGBoost 模型岩体可爆性研究[J].黄金,2024,45(2):21-23+32.
WU Lingfeng, ZHOU Zonghong, SUN Wei. Study on explosibility of rock mass based on XGBoost model[J]. Gold,2024,45(2):21-23+32.

[15] 周英豪,王文杰,卢西洲,等.岩爆灾害博弈论组合赋权预测模型及应用[J].中国安全科学学报,2022,32(7):105-112.
ZHOU Yinghao, WANG Wenjie, LU Xizhou, et al. Combination weighting prediction model and application of rock burst disaster based on game theory[J]. China Safety Science Journal,2022,32(7):105-112.

[16] 李琪琪,侯克鹏,孙华芬,等.北厂-架崖山矿段露天采场边坡稳定性评价研究[J].有色金属(矿山部分),2021,73(4):33-39.
LI Qiqi, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Study on slope stability evaluation of open-pit stope in Beichang-Jiayashan Section[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(4):33-39.

[17] 柯丽华,黄畅畅,李全明,等.尾矿库安全态势分析及其敏感因素研究[J].金属矿山,2021(11):165-172.
KE Lihua, HUANG Changchang, LI Quanming, et al. Safety situation analysis and sensitive factors study of tailings pond[J]. Metal Mine,2021(11):165-172.

[18] 杜翠凤,杜帅,王九柱,等.高温高湿巷道内不稳定换热系数影响因素分析及模型建立[J].中国安全生产科学技术,2022,18(11):91-98.
DU Cuifeng, DU Shuai, WANG Jiuzhu, et al. Analysis on influencing factors of unstable heat transfer coefficient in high temperature and high humidity roadway and model establishment [J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(11):91-98.

[19] 周计彬.基于正交实验的坚硬顶板巷道支护参数优化模拟研究[J].能源技术与管理,2022,47(5):86-90.
ZHOU Jibin. Simulation study on support parameters optimization of roadway with hard roof based on orthogonal experiment[J]. Energy Technology and Management,2022,47(5):86-90.

[20] 赵黎,李正国,粟登峰,等.基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].矿冶工程,2024,44(1):31-34+38.
ZHAO Li, LI Zhengguo, SU Dengfeng, et al. Sensitivity analysis of slope stability influencing factors based on GRA-AHP combined range analysis composite algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(1):31-34+38.

[21] 王建超,梁卫龙.老龙山石灰岩矿深孔爆破参数优化试验[J].爆破,2022,39(4):80-84+99.
WANG Jianchao, LIANG Weilong. Optimization experiment of deep hole blasting parameters in Laolongshan limestone mine[J]. Blasting,2022,39(4):80-84+99.