基于TOPSIS的露天矿爆破孔网参数多目标优化研究*

聂港，徐海，马驰，蒋雨村

（长沙有色冶金设计研究院有限公司， 湖南 长沙 410019）

摘要：为研究高原露天矿复杂工况下爆破效果与穿爆成本协同优化问题，提出了一种基于TOPSIS方法的多目标评价-数值模拟验证一体化孔网参数优化方法。以某特大型高原露天矿实际工况为依据，结合台阶高度、台阶坡面角等参数确定孔网参数的取值范围及比选方案；以爆破效果和穿爆成本为评价指标，采用Kuz-Ram爆破块度模型与穿爆成本模型计算各比选方案的评价指标预测值，运用TOPSIS法对各比选方案进行综合评价与排序优选；通过Ansys LS-DYNA软件对各比选方案进行爆破损伤数值模拟。结果表明：5种方案综合评分排序为：方案3(0.559)＞方案2(0.544)＞方案4(0.528)＞方案1(0.507)＞方案5(0.493)，即方案3的综合评分最高；优选方案3(孔距10 m×排距8.5 m)的爆破损伤云图中，强破碎区、裂隙发育区及弱损伤区分布均匀，爆破损伤范围有效破碎与过度损伤相对平衡，实现了爆破效果与穿爆成本之间的优化平衡。研究成果可为露天矿爆破孔网参数优化提供参考。

关键词：露天矿爆破；孔网参数优化；爆破效果；穿爆成本；数值模拟

中图分类号：TD235　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)05-0065-08

Multi-Objective Optimization Study on Blasting Hole Network Parameters in Open-Pit Mines Based on TOPSIS

Nie Gang, *Xu Hai*, *Ma Chi*, *Jiang Yucun*

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410019, China)

Abstract: To investigate the collaborative optimization problem of blasting effect and drilling and blasting cost under complex working conditions in plateau open-pit mines, an integrated optimization method for hole network parameters combining multi-objective evaluation and numerical simulation verification based on the TOPSIS method was proposed. Based on the actual working conditions of a super-large plateau open-pit mine, the value ranges and comparison schemes of hole network parameters were determined in combination with parameters such as bench height and bench slope angle. Taking blasting effect and drilling and blasting cost as evaluation indexes, the predicted values of evaluation indicators for each comparison scheme were calculated by using the Kuz-Ram blasting fragmentation model and the drilling and blasting cost model. The TOPSIS method was employed to conduct a comprehensive evaluation and ranking optimization of each comparison scheme. Blasting damage numerical simulations for the comparison schemes were performed using the Ansys LS-DYNA software. The results show that the comprehensive scoring ranking of the five schemes is as follows: Scheme 3 (0.559) > Scheme 2 (0.544) > Scheme 4 (0.528) > Scheme 1 (0.507) > Scheme 5 (0.493), indicating that Scheme 3 achieves the highest comprehensive score. In the blasting damage nephogram of the optimal Scheme 3 (hole spacing of 10 m × row spacing of 8.5 m), the strongly fragmented zone, the fracture development zone, and the weakly damaged zone are evenly distributed. The blasting damage range achieves a relatively balanced control between effective fragmentation and excessive damage, thereby realizing an optimized balance between blasting effect and drilling and blasting cost. The research results can provide a reference for the optimization of blasting hole network parameters in open-pit mines.

Key words: Open-pit blasting, Hole network parameter optimization, Blasting effect, Drilling and blasting cost, Numerical simulation

---

* **收稿日期**：2025-05-11

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2903905)

作者简介：聂港(1997—)，男，湖南怀化人，硕士，助理工程师，主要从事有色金属矿床开采工程设计与技术研究。E-mail：15874560900@163.com

通信作者：徐海(1986—)，男，湖南浏阳人，博士，高级工程师，主要从事有色金属矿床开采工程设计与技术研究。E-mail：xuhai104@163.com

0 引言

爆破作为露天矿山开采过程中的关键环节,直接影响矿山的整体经济效益与生产效率。合理控制爆破参数不仅能提高矿石的爆破效果,还能显著降低穿爆成本,提升铲装效率,减少二次破碎的工作量[1-3]。孔间距与排距的优化需在保证有效破碎率的同时,避免过度破碎而造成爆炸能量浪费,这对实现爆破精细化设计与成本控制具有重要工程意义。尤其在当前绿色矿山发展趋势下,如何通过科学方法建立孔网参数与爆破效果之间的定量关系,成为提升矿山经济效益与技术竞争力的关键[3-4]。受地质条件、岩层结构及爆破材料等因素的综合影响,基于经验公式或简单模型的常规孔网参数设计方法的适应性有限,难以满足现代矿山工程对高效、安全、环保的要求[5-6]。因此,开展针对露天矿孔网参数的优化研究十分重要。

针对露天矿爆破效果优化的问题,学者们以影响因素、优化算法为切入点开展了诸多研究,并取得了一定成果[7-12]。崔宝[3]基于七峰山石灰石矿多年生产实践,指出影响露天矿爆破效果的主要因素为矿岩性质、矿岩非均质特性、炸药与岩石匹配度、自由面规模及装药结构等,并分析了地质条件、爆破参数及环境因素等对爆破效果的影响机制。郑位等[13]针对云南省某露天矿边坡治理工程,提出了基于模糊聚类分析的爆破参数优选方法,标准化处理孔深、孔距、排距、抵抗线等 12 项关键参数,结合最大最小法构建模糊相似矩阵,利用传递闭包法生成模糊等价矩阵,并通过动态调整聚类阈值实现参数分类。马建博等[14]通过增加平均块度和不均匀指数对原 KUZ-RAM 模型的修正系数进行优化,解决了原有经验公式中未考虑岩性现状的问题。过江等[15]结合大皇山凝灰岩矿的生产统计数据,提出砂石骨料加工破碎环节的能耗控制指标——耗量比,并建立了耗量比与爆破参数多目标粒子群优化模型。伍世虔等[16]利用最小二乘法改进了 Kuz-Ram 预测模型,并结合差分进化算法加速模型求解速度,提出了一种新的爆破参数优化方法。胡涛等[17]采用 Split Desktop 3.1 图像处理分析软件,对爆破后的岩块粒径进行精确分析和预测,有效降低了人为因素对爆破块度评估的影响。马力[18]从应力波作用范围、应力波干涉效应及爆炸气体膨胀理论出发,探讨了大孔距小排距爆破技术机理,并推导出了相应的参数计算公式。

综上所述,露天矿爆破孔网参数优化虽已取得了诸多研究成果,但受矿岩性质、地质条件、爆破材料等多因素的影响,现有研究存在一定局限性:部分研究聚焦于爆破块度或爆破效果等单一目标优化,对破碎能耗、振动效应与爆破成本间的多目标协同优化机制探讨不足;常规孔网参数设计优化方法对于复杂工况的适应性有限,难以满足爆破工序综合效益最大化的要求,亟需探索更加高效、准确的爆破参数优化方法。为此,本文针对某大型露天矿工况条件,基于台阶高度、台阶坡面角等边坡参数确定孔网参数取值范围,综合爆破块度预测模型、穿爆成本模型,以爆破效果和穿爆成本为评价指标,运用 TOPSIS 方法比选不同孔网参数方案,并通过 Ansys-DYNA 软件对孔网参数优化方案下的爆破损伤裂隙发育特征开展数值模拟分析。

1 工程背景

某特大型露天矿地处藏北高原中西部,属高原中低山地貌区,区内海拔为 4 700～5 100 m,最高海拔为 5 540 m,相对高差为 300～840 m。矿区出露地层较为简单,主要为中侏罗统色哇组一段(J_2s^1)、下白垩统美日切错组(K_1m)、上白垩统阿布山组(K_2a)、第四系(Q)。含矿地质体为中侏罗统色哇组第一岩性段(J_2s^1)变质长石石英砂岩、绢云母化石英砂岩及早白垩世花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi K_1$),该花岗闪长斑岩体侵位于色哇组地层中,矿体受蚀变花岗闪长斑岩岩枝控制。矿岩硬度系数 $f=3$～11。

该矿山为在建的矿山,当前尚未进入开采阶段。现有设计参数主要基于常规地质和低海拔经验设定,针对该矿山的高原特殊环境和复杂矿岩条件存在的不确定性:大块率超出可接受范围,根底(尤其在硬岩/冻土区)频繁出现,粉矿率在特定区域难以控制,整体块度均匀性差,后冲与侧裂现象时有发生。这些问题不仅严重制约矿山后续铲装、运输效率,大幅增加二次破碎成本和安全风险,还会影响矿山整体经济效益。因此,本文采用 Kuz-Ram 预测模型、TOPSIS 法、Ansys LS-DYNA 软件等多种分析方法,对该矿山爆破孔网参数方案进行研究。研究结果可为矿山未来在高海拔寒区环境下的高效开采提供理论基础和技术支撑。

2 孔网参数方案初选

2.1 底盘抵抗线

底盘抵抗线是影响台阶爆破效果的重要爆破参数,与炸药量、大块率、钻孔直径、台阶高度及坡面角等因素有关。在孔网参数不变的情况下,合理的减小底盘抵抗线可以改善爆破效果。

按台阶高度确定:

$$W_1 \geqslant H \times \cot\alpha + L \tag{1}$$

式中:W_1 为底盘抵抗线,m;α 为台阶坡面角,(°);L 为安全距离,大型钻机取 2.5～3.0 m;H 为台阶高度,m。

按起爆方式、矿岩特性、炮孔直径确定:

$$W_1 = K_1 \times k_2 \times D + \sqrt{\frac{\rho_{炸}}{\rho_{矿岩}}} \tag{2}$$

式中:K_1 为常数,微差爆破时,$K_1=53$,齐发爆破时,$K_1=50$;k_2 为岩石裂隙系数,$k_2=1.0\sim1.2$;D 为炮孔直径,m;$\rho_{炸}$ 为炸药密度,t/m^3;$\rho_{矿岩}$ 为矿岩平均容重,t/m^3。

2.2 布孔与钻孔

露天矿爆破布孔方式需根据岩石可爆性、爆破块度要求确定,可分为矩形布孔、正方形布孔和梅花形布孔;炮孔直径需根据爆破规模、块度、台阶高度、地质条件、爆破作业条件选取。

2.3 孔距与排距

在露天矿山台阶爆破过程中,孔网参数是主要优化对象。在爆破台阶不变的前提下,适当减小底盘抵抗线或排距,并增大孔距,可以减小大块率,改善爆破效果[18]。

孔距 a:

$$a = m \times W_1 \tag{3}$$

式中,m 为密集系数,$m\geqslant1$。

排距 b:

$$b = 0.866 \times a \tag{4}$$

2.4 孔网参数方案

该矿山设计台阶高度 $H=15$ m,台阶坡面角 $\alpha=65°\sim70°$,底盘抵抗线 $W_1=8.0$ m,采用矩形或梅花形布置垂直孔,孔径为 310 mm,孔深为 17.5 m,超深 2.5 m,装药长度为 11.4 m,填塞长度为 6.1 m,选用孔径为 310 mm 的牙轮钻机进行穿孔作业。根据上述公式,初步确定炮孔间距 $a=8.0\sim11$ m,排间距 $b=7.0\sim9.5$ m,综合考虑矿山年采剥量及矿岩特性,可选取表 1 所列的孔网参数作为比选方案。

表 1 爆破孔网参数方案

Table 1 Blasting hole network parameter schemes

方案	孔距/m	排距/m
1	9.0	7.5
2	9.5	8.0
3	10.0	8.5
4	10.5	9.0
5	11.0	9.5

3 爆破孔网参数优化

3.1 评价指标选取及预测值计算

露天矿爆破孔网参数设计的合理性直接影响爆破成本和爆破效果,其中爆破效果主要通过大块率和平均块度表征,爆破成本主要包括炸药及起爆器材的消耗费用。值得注意的是,爆破成本和爆破效果存在相互矛盾关系:爆破成本越高,大块率和平均块度越低,爆破效果越好;反之,爆破成本越低,大块率和平均块度越高,爆破效果越差。孔网参数也会在一定程度上影响穿孔、铲装等工序:炮孔布置过于密集,会导致穿孔作业量与穿孔成本增加;炮孔布置过稀,则会提高爆破大块率,导致铲装、运输及破碎工序生产效率下降。

综上所述,露天矿爆破孔网参数优化是技术与经济合理性的综合比较优选过程,与开采工艺、综合成本等多方面密切相关。经分析,选取爆破平均块度、大块率、块度分布不均匀指数、穿孔成本、爆破成本作为评价指标,见表 2。通过爆破效果预测模型与成本模型,确定不同方案下的指标预测值,用于评价露天矿爆破孔网参数方案。

表 2 爆破孔网参数评分指标

Table 2 Scoring indexes of blasting hole network parameter

指标类型	指标名称	指向性
爆破效果	矿岩平均块度	极小型
	大块率	极小型
	块度分布不均匀指数	极大型
成本	穿孔成本	极小型
	爆破成本	极小型

3.1.1 爆破块度预测模型

爆破块度受炸药单耗等诸多因素影响,属于多因素综合预测与分析问题。目前,爆破块度预测模型主要包括哈里斯模型、GAMA 模型、Kuz-Ram 模型等,其中 Kuz-Ram 模型通过经验公式将爆破块度与爆破参数联系起来,反映了爆破块度分布与爆破参数之间的关系,在国内外得到了广泛的使用。因此,本文选用 Kuz-Ram 模型作为爆破平均块度、大

块率、块度分布不均匀指数3项指标的预测模型。

(1) 爆破平均块度。

根据Kuznetsov模型,矿岩平均块度计算公式为:

$$\overline{X}=C\times\left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0.8}\times Q^{\frac{1}{6}}\times\left(\frac{115}{E}\right)^{\frac{19}{30}} \tag{5}$$

式中:$\overline{X}$ 为矿岩平均破碎块度,mm;C 为矿岩的岩石特性系数;V_0 为单个炮孔负担的矿岩体积,$V_0=a\times b\times H$,m^3;Q 为单孔装药量,kg;E 为炸药质量威力。

(2) 爆破大块率。

根据Rosin-Rammler(R-R)矿岩破碎块度分布预测数学模型可得:

$$R=\exp\left[-\left(\frac{X}{X_0}\right)^n\right] \tag{6}$$

$$X_0=\frac{\overline{X}}{0.693^{1/n}} \tag{7}$$

式中:R 为某矿岩粒径的筛上累计率,%;X 为筛网孔径或矿岩粒径,m;X_0 为特征粒径值,即筛下累计率达到特定值的矿岩宽度尺寸,m;n 为不均匀指数。

(3) 块度分布不均匀指数。

块度分布不均匀指数 n 的计算公式为:

$$n=\left(2.2-\frac{14W_1}{D}\right)\times\left(1-\frac{C}{W_1}\right)\times\left(1+\frac{m-1}{2}\right)\times\frac{L}{H} \tag{8}$$

式中:C 为穿孔精度的标准误差,mm;L 为不计超深部分的装药高度,m。

3.1.2 穿孔爆破成本模型

(1) 穿孔成本模型。

露天矿穿孔成本主要由钻头和钻杆耗材费用、燃料动力费及人工费用组成,其中,人工费用可通过合理定员、定额,加强管理进行调控优化,燃料动力费可通过优选设备型号、规格进行控制,钻机耗材费用则受到穿孔作业量的影响,由此得到穿孔成本计算模型为:

$$C_{穿孔}=(n_{矿}+n_{岩})\times h\times\left(\frac{p_{钻头}}{L_{钻头}}+\frac{p_{钻杆}}{L_{钻杆}}\right)/Q_{矿岩} \tag{9}$$

$$n_{矿}=\frac{Q_{矿}}{\rho_{矿}\cdot(a\times b)\cdot H} \tag{10}$$

$$n_{岩}=\frac{Q_{岩}}{\rho_{岩}\cdot(a\times b)\cdot H} \tag{11}$$

式中:$C_{穿孔}$ 为单位矿岩穿孔成本,元/t;$n_{矿}$、$n_{岩}$ 为矿石、废石钻孔数量;h 为钻孔深度,m;$p_{钻头}$、$p_{钻杆}$ 为钻头、钻杆价格,元/套;$L_{钻头}$、$L_{钻杆}$ 为钻头、钻杆使用寿命,m/套;$Q_{矿岩}$ 为露天矿境界内矿岩总量,t;$Q_{矿}$、$Q_{岩}$ 分别为露天矿境界内矿石、岩石总量,t;$\rho_{矿}$、$\rho_{岩}$ 分别为矿石、岩石容重,t/m^3。

(2) 爆破成本。

露天矿爆破成本主要由炸药和起爆器材消耗成本组成,考虑到矿石、岩石性质差异,矿石、岩石爆破成本计算模型可分别表示为:

$$C_{爆矿}=n_{矿}\times(q_{矿}\times p_{炸药}+p_{起爆})/Q_{矿} \tag{12}$$

$$C_{爆岩}=n_{岩}\times(q_{岩}\times p_{炸药}+p_{起爆})/Q_{岩} \tag{13}$$

式中:$C_{爆矿}$、$C_{爆岩}$ 分别为单位矿石、岩石爆破成本,元/t;$q_{矿}$、$q_{岩}$ 分别为爆破矿石、废石单孔装药量,kg;$p_{炸药}$ 为炸药单价,元/kg;$p_{起爆}$ 为起爆器材单价(含起爆药),元/个。

根据上述公式,可得露天矿平均每吨矿岩爆破成本 $C_{爆破}$ 计算模型:

$$C_{爆破}=[n_{矿}\times(q_{矿}\times p_{炸药}+p_{起爆})+n_{岩}\times(q_{岩}\times p_{炸药}+p_{起爆})]/Q_{矿岩} \tag{14}$$

3.1.3 孔网参数方案评价指标预测值

以爆破平均块度、大块率、块度分布不均匀指数、穿孔成本、爆破成本作为评价指标。该矿山岩石特性系数 $A=10$,炸药质量威力 $E=100$,矿岩最大控制块尺寸为1 400 mm,穿孔精度标准误差 $C=0.65$ mm,钻头价格 $p_{钻头}=15\ 000$ 元/个,钻杆价格 $p_{钻杆}=36\ 000$ 元/根,单孔装药量 $q=642.6$ kg。根据上述爆破块度、穿孔爆破成本模型确定不同孔网参数方案下的指标预测值,结果见表3。

表3 不同孔网方案指标预测值

Table 3 The predicted values of indexes for different hole network schemes

方案	爆破平均块度/mm	大块率/%	块度分布不均匀指数	穿孔成本/(元/t)	爆破成本/(元/t)
1	369.4	3.89	1.16	0.61	2.05
2	406.2	4.81	1.19	0.54	1.82
3	444.2	5.87	1.23	0.49	1.63
4	483.5	7.07	1.26	0.44	1.46
5	524.0	8.41	1.30	0.40	1.32

3.2 指标预测值标准化

3.2.1 指标正向化处理

表2中的矿岩平均块度、大块率及成本各子项指标均为极小型,需对其进行正向化处理,即极小型指标转换为极大型指标:

$$X_{ij}=x_{j\max}-x_{ij} \tag{15}$$

式中:X_{ij} 为已正向化的第 i 个方案的第 j 项指标数值;$x_{j\max}$ 为第 j 项指标中的最大值;x_{ij} 为未进行正

向化的第 i 个方案的第 j 项指标数值。

表 3 中 5 个方案的 5 项评价指标构成的正向化矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}154.6 & 4.52 & 1.16 & 0.00 & 0.00\\ 117.8 & 3.60 & 1.19 & 0.07 & 0.23\\ 79.8 & 2.54 & 1.23 & 0.13 & 0.42\\ 40.5 & 1.34 & 1.26 & 0.18 & 0.59\\ 0.0 & 0.00 & 1.30 & 0.22 & 0.73\end{bmatrix} \tag{16}$$

3.2.2 标准化处理

为消除不同指标量纲的影响,需对已经正向化处理的指标数值进行标准化处理,标准化矩阵为 $\boldsymbol{Z}$,其元素为:

$$Z_{ij}=X_{ij}/\sqrt{\sum_{j=1}^{5}X_{ij}^{2}} \tag{17}$$

式中,Z_{ij} 为标准化处理后第 i 个方案的第 j 项指标数值。

得到标准化矩阵 $\boldsymbol{Z}$:

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}0.722 & 0.700 & 0.422 & 0.000 & 0.000\\ 0.551 & 0.558 & 0.434 & 0.219 & 0.219\\ 0.373 & 0.394 & 0.447 & 0.402 & 0.402\\ 0.189 & 0.208 & 0.459 & 0.558 & 0.558\\ 0.000 & 0.000 & 0.472 & 0.692 & 0.692\end{bmatrix} \tag{18}$$

3.3 指标综合评分与方案比选

3.3.1 指标综合评分

定义最大值与最小值,见式(19)和式(20)。

$$\boldsymbol{Z}^{+}=(Z_1^{+},Z_2^{+},\cdots,Z_5^{+})=(\max\{z_{11},z_{21},\cdots,z_{51}\},\max\{z_{12},z_{22},\cdots,z_{52}\},\cdots,\max\{z_{15},z_{25},\cdots,z_{55}\}) \tag{19}$$

$$\boldsymbol{Z}^{-}=(Z_1^{-},Z_2^{-},\cdots,Z_5^{-})=(\min\{z_{11},z_{21},\cdots,z_{51}\},\min\{z_{12},z_{22},\cdots,z_{52}\},\cdots,\min\{z_{15},z_{25},\cdots,z_{55}\}) \tag{20}$$

式中:$\boldsymbol{Z}^{+}$、$\boldsymbol{Z}^{-}$ 分别为标准化处理后 5 项指标最大值列向量、最小值列向量;$\boldsymbol{Z}_j^{+}$、$\boldsymbol{Z}_j^{-}$ 分别为标准化处理后第 j 项指标最大值、最小值。

根据标准化矩阵 $\boldsymbol{Z}$,得到:

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}^{+}=(0.722 & 0.700 & 0.472 & 0.692 & 0.692)\\ \boldsymbol{Z}^{-}=(0.000 & 0.000 & 0.422 & 0.000 & 0.000)\end{cases} \tag{21}$$

定义第 $i(i=1,2,\cdots,5)$ 个方案与最大值的距离 D_i^{+}:

$$D_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{5}(Z_j^{+}-Z_{ij})^{2}} \tag{22}$$

定义第 $i(i=1,2,\cdots,5)$ 个方案与最小值的距离 D_i^{-}:

$$D_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{5}(Z_j^{-}-z_{ij})^{2}} \tag{23}$$

综上可计算得出第 $i(i=1,2,\cdots,5)$ 个方案未归一化的综合得分 S_i:

$$S_i=\frac{D_i^{-}}{D_i^{+}+D_i^{-}} \tag{24}$$

取各项指标中的最大值组成理想解列向量 $\boldsymbol{Z}^{+}$,取各项指标中的最小值组成理想解列向量 $\boldsymbol{Z}^{-}$,计算每列元素与列向量 $\boldsymbol{Z}^{+}$ 的距离 D_i^{+},与列向量 $\boldsymbol{Z}^{-}$ 的距离 D_i^{-},并根据评分式(24)为各方案进行打分,最终得到 5 个孔网参数方案综合评分列向量 $\boldsymbol{S}$。

$$\boldsymbol{S}=(0.507 \quad 0.544 \quad 0.559 \quad 0.528 \quad 0.493) \tag{25}$$

3.3.2 方案比选

根据各孔网参数方案的综合评分,进行数据分析并排序,结合式(25)可知:

$$S_{\text{递减}}=(0.559 \quad 0.544 \quad 0.528 \quad 0.507 \quad 0.493) \tag{26}$$

方案 3 的综合评分 $S_3=0.559$,在 5 个备选方案中得分最高,因此方案 3 为最优方案。

4 数值模拟分析

利用 Ansys LS-DYNA 数值模拟软件分别对 5 种方案进行模拟,构建三维模型并设置爆破边界条件,如图 1 所示。矿岩物理力学参数见表 4。炸药材料模型选用 High-Explosive 模型,炸药 JWL 状态方程参数见表 5。基于岩体爆破损伤裂隙发育情况对不同孔网参数方案进行对比分析,露天矿爆破参数见表 6。各方案模拟情况如图 2 所示。

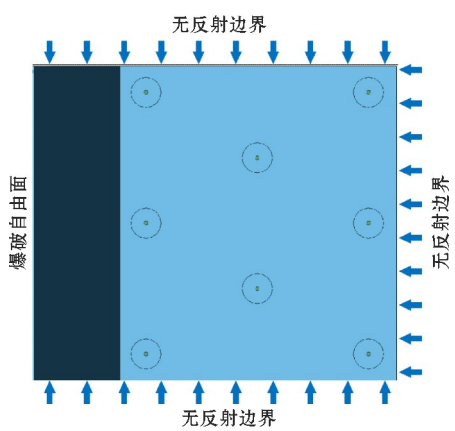


图 1 爆破边界条件设置

Fig.1 Setting of blasting boundary condition

表 4 矿岩物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of rock

干密度 $\rho_{干}$/(kg·m^{-3})	弹性模量 E_m/GPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ/MPa	黏聚力 c/MPa	抗压强度 σ_c/MPa	单轴抗压强度 R_c/MPa		
						干燥	饱和	冻融
2 700	35.85	0.27	2.45	7.80	73.10	42.92	35.26	22.12

表 5 炸药 JWL 状态方程参数

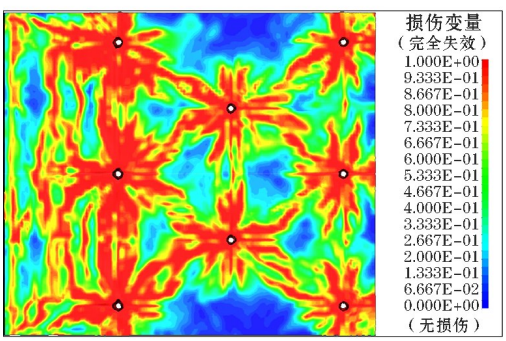
Table 5 Parameters of JWL equation of state for explosives

炸药密度 $\rho_{炸}$/(kg·m^{-3})	爆速 v/(m·s^{-1})	压力系数		指数衰减系数		绝热膨胀修正系数 ω	初始比内能 E_0/GPa
		A/GPa	B/GPa	R_1	R_2		
1 500	7 450	625	23.29	5.25	1.60	0.28	8.56

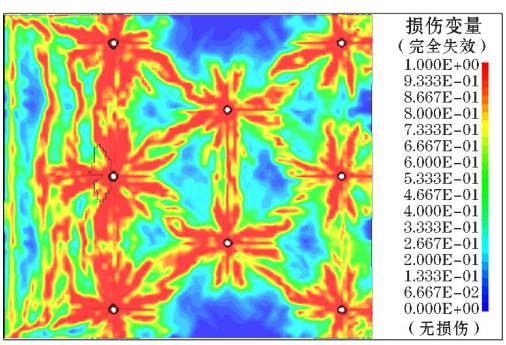
表 6 露天爆破参数

Table 6 Open-pit blasting parameters

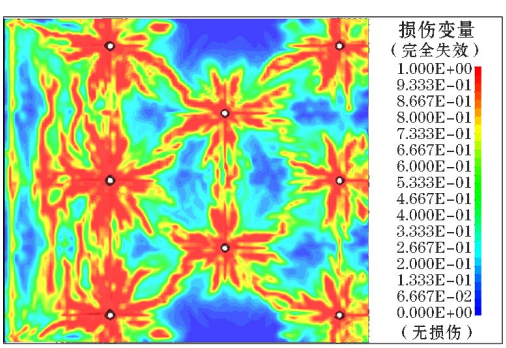
填塞长度/m	装药长度/m	底盘抵抗线/m	孔间延时/ms
6.10	11.40	8.00	100



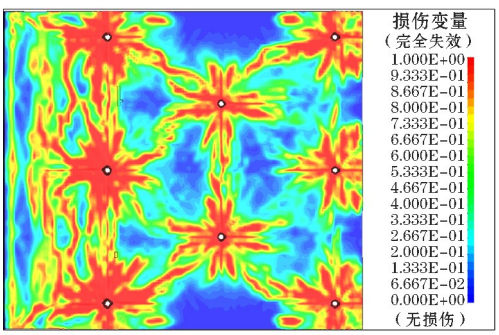
(a) 方案 1 (9.0 m×7.5 m)



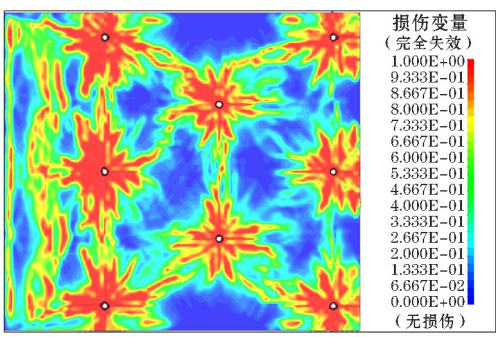
(b) 方案 2 (9.5 m×8.0 m)



(c) 方案 3 (10.0 m×8.5 m)



(d) 方案 4 (10.5 m×9.0 m)



(e) 方案 5 (11.0 m×9.5 m)

图 2 爆破损伤裂隙发育情况模拟结果

Fig.2 Simulation results of blasting damage fracture development

根据矿岩爆破机理,矿岩的爆破损伤主要源于炸药爆炸冲击波传递至自由面产生反向拉伸应力波,进而导致矿岩发生拉伸破坏。本研究选择 RHT 模型中的 history variable ♯4 进行对比分析,其代表矿岩在爆破作用下的损伤变量,取值范围为 0(无损伤)~1(完全损伤)。由图 2 可知,5 种方案的爆破损伤云图均呈现出典型的“三区”分布特征(颜色

标识见电子版):由炮孔中心向外依次形成强破碎区(红色)、裂隙发育区(黄色)和弱损伤区(蓝色);在靠近自由面的位置(见图 2 左侧),爆破损伤效果更为明显,后排矿岩因受夹制作用影响,爆破损伤效果相对较差。通过对比 5 种方案的爆破损伤云图可知,方案 1 靠近自由面的炮孔周边出现比较明显的强破碎区,存在一定程度的过度损伤及爆破能量浪费问题。方案 2、方案 3 的"三区"分布相对均匀,爆破损伤范围有效破碎与过度损伤相对平衡。方案 4、方案 5 随着孔距、排距增加,爆破时排间弱损伤作用区域逐渐凸显,且分布范围不断扩大,排间弱损伤特征表现得更为突出。

综合 5 种方案的穿爆成本预测值可知,方案 3(10.0 m×8.5 m)在保障爆破效果的同时,能够实现穿爆成本的优化控制,即针对该矿山的工况条件,方案 3 为最优孔网参数方案。

5 结论

(1) 针对露天矿山爆破孔网参数优化问题,构建了涵盖爆破效果与穿爆成本的多指标评价体系。将 Kuz-Ram 模型与穿爆成本模型相结合,实现了不同孔网参数方案的定量化分析。综合考虑了爆破块度、大块率和块度分布不均匀指数等技术性指标,以穿孔成本、爆破成本为评价指标,全面反映了孔网参数对爆破效果与矿山经济效益的影响。引入 TOPSIS 方法,基于各项指标的预测值开展综合评分与排序,确定了最优爆破孔网参数方案。最后通过 Ansys LS-DYNA 软件对各孔网参数方案下的爆破损伤裂隙发育情况进行数值模拟分析。

(2) 对各孔网参数方案进行数据分析并排序,得到 5 种方案的综合评分排序为:方案 3(0.559)>方案 2(0.544)>方案 4(0.528)>方案 1(0.507)>方案 5(0.493),即方案 3 的综合评分最高,对应的爆破平均块度为 444.2 mm,大块率为 5.87%,块度分布不均匀指数为 1.23,穿孔成本为 0.49 元/t,爆破成本为 0.63 元/t。

(3) 进一步利用 Ansys LS-DYNA 数值模拟软件分别对 5 种方案进行模拟。结果表明,孔距与排距的合理匹配可显著减小排间弱损伤区域面积,优化爆破能量空间分布;5 种方案的爆破损伤云图均呈现典型的"三区"分布特征,方案 2(9.5 m×8.0 m)、方案 3(10.0 m×8.5 m)的"三区"分布相对均匀,爆破损伤范围有效破碎与过度损伤相对平衡,损伤区连续性良好,爆破能量传递效率高。综合穿爆成本预测值可知,方案 3(10.0 m×8.5 m)在保障爆破效果的同时,实现了穿爆成本的优化控制。研究结果为复杂地质条件下的露天矿爆破设计提供了新思路与新方法。

参考文献(References):

[1] 刘建兵,张建华,胡德义.黄麦岭露天矿爆破参数的优化研究[J].矿业研究与开发,2013,33(1):110-112.
Liu Jianbing, Zhang Jianhua, Hu Deyi. Optimization of blasting parameters in Huangmailing open-pit mine[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(1): 110-112.

[2] 戴林,李思维.黑山露天矿爆破参数优化数值模拟研究[J].爆破,2021,38(4):101-107.
Dai Lin, Li Siwei. Numerical simulation of blasting parameters optimization in Heishan open-pit mine[J]. Blasting, 2021, 38(4): 101-107.

[3] 崔宝.露天矿爆破效果影响因素分析[J].中国矿业,2004(9):54-55.
Cui Bao. Analysis of the influence factors on blasting effect of open-pit mine[J]. China Mining Magazine, 2004(9): 54-55.

[4] 赵新涛,刘东燕,程贵海,等.爆生气体作用机理及岩体裂纹扩展分析[J].重庆大学学报,2011,34(6):75-80.
Zhao Xintao, Liu Dongyan, Cheng Guihai, et al. Analysis of blasting gas mechanism and rock crack growth[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(6): 75-80.

[5] 黄梦龙,吴钦正,李金平,等.基于 JKSimBlast 的露天矿爆破效果数值模拟研究与应用[J].爆破,2022,39(3):95-99.
Huang Menglong, Wu Qinzheng, Li Jinping, et al. Numerical simulation of blasting effect in open-pit mine based on JKSimBlast[J]. Blasting, 2022, 39(3): 95-99.

[6] 张卫中,李梦玲,康钦容,等.最优传递矩阵改进 AHP 及其在露天矿台阶爆破参数权重确定中的应用[J].矿业研究与开发,2020,40(6):28-31.
Zhang Weizhong, Li Mengling, Kang Qinrong, et al. Application of AHP improved by optimal transfer matrixin weight determination of bench blasting parameters in open-pit mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 28-31.

[7] Kumar S B, Kumar B P. Optimization of blasting parameters in opencast mine with the help of firefly algorithm and deep neural network[J]. Sādhanā, 2022, 47(3): 01956-6.

[8] Bai Runcai, Zhang Pengfei, Zhang Zhiqiang, et al. Optimization of blasting parameters and prediction of vibration effects in open pit mines based on deep neural networks[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 70: 261-271.

[9] 李爱陈,马建军,池恩安,等.基于改进 AHP 法的露天矿爆破效果影响因素分析[J].矿业研究与开发,2019,39(10):5-10.
Li Aichen, Ma Jianjun, Chi En'an, et al. Influence factors of open-pit blasting effect based on improved AHP[J]. Mining Research and Development,2019,39(10):5-10.

[10] Wang Ziyi, Wu Guiyi, Zhou Lang. Optimization of pre-splitting blasting hole network parameters and engineering applications in open pit mine[J]. Applied Sciences,2022,12(10):4930-4937.

[11] Ma Li, Lai Xingping, Zhang Jianguo, et al. Blast-casting mechanism and parameter optimization of a benched deep-hole in an opencast coal mine[J].Shock and Vibration,2020:1-11.

[12] 聂铮玥.三种典型岩石材料的 RHT 模型参数研究[D].长沙:中国人民解放军国防科技大学,2021.
Nie Zhengyue. Experimental study on RHT model parameters of three typical rock materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2021.

[13] 郑位,武旭阳.模糊聚类分析在露天矿爆破参数优化中的应用[J].云南冶金,2022,51(5):18-21.
Zheng Wei, Wu Xuyang. Application of fuzzy cluster analysis on parameters optimization of strip mine blasting [J]. Yunnan Metallurgy,2022,51(5):18-21.

[14] 马建博,王仲琦,杨恩.基于 KUZ-RAM 修正模型的矿山爆破精度评估研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(7):51-56.
Ma Jianbo, Wang Zhongqi, Yang En. Research on mine blasting accuracy evaluation based on KUZ-RAM modified model[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(7):51-56.

[15] 过江,赵培东,张琛,等.能耗控制视角下的 MOPSO 爆破参数优化研究[J].工程爆破,2022,28(5):9-16.
Guo Jiang, Zhao Peidong, Zhang Chen, et al. Research on MOPSO blasting parameters optimization from the perspective of energy consumption control[J]. Engineering Blasting,2022,28(5):9-16.

[16] 伍世虔,叶健,孙继林,等.露天矿台阶爆破参数优化模型与求解研究[J].金属矿山,2024(7):146-151.
Wu Shiqian, Ye Jian, Sun Jilin, et al. Study on optimization model and solution of bench blasting parameters in open-pit mine[J]. Metal Mine,2024(7):146-151.

[17] 胡涛,王明君.某露天矿爆破参数优化及块度预测[J].露天采矿技术,2015(6):39-42.
Hu Tao, Wang Mingjun. Blasting parameters optimization and fragmentation prediction in the open-pit mine [J]. Opencast Mining Technology,2015(6):39-42.

[18] 马力,涂宇航,马成卫,等.露天矿台阶深孔大孔距小排距爆破参数优化[J].中国科技论文,2019,14(5):506-509.
Ma Li, Tu Yuhang, Ma Chengwei, et al. Blasting parameters optimization for larger hole spacing and smaller burden of deep hole bench for surface coal mine[J]. China Science paper,2019,14(5):506-509.