

基于AHP-模糊综合评价法的露天矿爆破布孔方案优选研究

齐志远¹ 陈辉^{1,2}

1. 新疆大学, 地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830047

2. 新疆大学新疆矿产资源绿色开发与生态修复省部共建协同创新中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830047

摘要: 针对露天矿爆破布孔方案优选缺乏系统定量评价的问题, 以新疆昌吉南露天煤矿为工程背景, 设计了矩形布孔与梅花型布孔两种方案进行现场对比试验。在保持孔径、孔排距及装药量等核心参数一致的条件下, 采集了大块率、根底率、爆堆高度、铲装效率及振动峰值等多维指标数据。构建了涵盖技术、经济、安全三个维度的多准则评价体系, 运用层次分析法(AHP)确定各维度权重, 其中技术维度权重最高(0.648), 体现了层理岩层条件下破碎质量的核心地位。在此基础上, 采用模糊综合评价法将实测数据运算, 得到方案I(矩形)综合得分75.88分, 方案II(梅花型)综合得分85.69分。结果表明, 梅花型布孔在层理发育区域能有效改善应力波干涉路径, 显著降低大块率与根底率, 综合优势明显, 可为类似地质条件下的露天矿爆破设计提供参考。

关键词: 露天矿; 爆破布孔; AHP层次分析法; 模糊综合评价; 梅花型布孔

Optimization Study on Blasting Hole Layout Scheme in Open-Pit Mine Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

Qi Zhiyuan¹, Chen Hui^{1,2}

1. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, China Xinjiang Urumqi 830047

2. Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources in Xinjiang, Xinjiang University, China Xinjiang Urumqi 830047

Abstract: To address the lack of systematic quantitative evaluation for optimizing blasting hole layout schemes in open-pit mines, field comparative tests of rectangular and quincunx hole layout schemes were conducted at Changji South Open-Pit Coal Mine, Xinjiang. Under the same core parameters (hole diameter, hole-row spacing, explosive charge), multi-dimensional indices including boulder rate, bottom root rate, muck pile height, loading efficiency and peak vibration velocity were collected. A multi-criteria evaluation system covering technical, economic and safety dimensions was established, and the analytic hierarchy process (AHP) was adopted to determine the weights of each dimension, with the technical dimension having the highest weight (0.648), which highlights the core role of fragmentation quality in stratified rock formations. Fuzzy comprehensive evaluation of the measured data showed that the comprehensive scores of Scheme I (rectangular) and Scheme II (quincunx) were 75.88 and 85.69, respectively. The results indicate that the quincunx hole layout can effectively optimize the stress wave interference path in stratified areas, significantly reduce the boulder and bottom root rates, and has obvious comprehensive advantages. It provides a reliable reference for blasting design of open-pit mines under similar geological conditions.

Keywords: Open-pit mine; Blasting hole layout; Analytic hierarchy process (AHP); Fuzzy comprehensive evaluation; Quincunx hole layout

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着我国矿山开采向深部化、规模化发展, 露天矿爆破作为采矿生产的第一道工序, 其效果直接影响到后续的铲装、运输及破碎效率。当前, 在“绿色矿山”与“智能

矿山”建设的背景下, 矿山企业对爆破的要求已不再局限于“爆得开”, 而是向“精细化、低扰动、高效率”转变。新疆作为我国能源保障基地, 如南露天煤矿在开采过程中, 面临着岩层性质多变等挑战。传统的爆破参数设计多依赖经验, 缺乏系统的科学评价, 导致爆破块度不均、根底残

留多、爆破次生危害大等问题依然突出。

1.2 国内外研究现状

(1) 爆破布孔参数研究阶段, 费鸿禄^[1]等国内外学者针对露天矿爆破参数优化进行了大量研究。国外研究较早起步于对炸药能量^[2]释放与岩石破碎机理^[3]的探讨, 如 Kucewicz Michal^[3]等学者通过数值模拟验证岩石爆破的本构模型, 说明其在应用的优缺点。国内学者如汪旭光^[4]等, 针对我国露天矿山的复杂岩性, 深入探讨了孔排距、填塞长度及布孔形式对爆破应力波叠加的影响。研究表明, 改变布孔排列形式能有效改善爆区内部的应力场分布, 使炸药能量释放更加均匀, 是降低大块率^[5]最经济有效的手段。

(2) 在评价爆破效果方面, 早期的研究多集中于单一指标的考核, 如仅以大块率或爆破成本作为评价标准。但随着开采要求的提高, 研究逐渐转向综合指标评价。近年来, 国内外研究者开始将爆破振动^[6]、有害气体、粉尘浓度等安全环保指标纳入评价体系, 体现了从“生产导向”向“安全环保导向”的转变。

(3) 在评价方法上, 从传统的经验定性判断逐渐演变为定量的数学模型。目前, 层次分析法 (AHP)^[7]、熵权法以及模糊综合评价法^[8]在矿业工程方案优选中得到了广泛应用。特别是针对露天矿爆破^[9]这种受多因素影响的复杂系统, 模糊综合评价法能有效处理评价过程中的模糊性与随机性。

1.3 本文研究内容

综合上述分析可知, 通过优化布孔形式并建立多指标综合评价体系来指导爆破方案设计, 具有较强的工程实践意义。鉴于此, 本文以新疆昌吉南露天煤矿为工程背景, 设计矩形与梅花型两种布孔方案开展现场对比试验, 采集大块率、根底率、爆堆高度、铲装效率及振动峰值等多维指标数据, 构建涵盖技术、经济、安全的三维评价体系, 运用 AHP-模糊综合评价法对两种方案进行定量优选, 以期类似地质条件下的露天矿爆破布孔设计提供科学依据。

2 露天矿爆破布孔方案设计

2.1 矿山工程概况

新疆昌吉南露天煤矿, 该矿地层平缓, 赋存稳定, 上覆剥离物主要为中硬程度的砂岩及部分高硬度砾岩 (普氏系数 f 分布在 4~8 之间)。矿山采用单斗-卡车间断开采工艺, 标准台阶高度为 15m。由于矿区岩石节理发育, 导致常规爆破中时常出现大块率偏高及根底残留问题, 亟需通过优化布孔方案来改善爆堆质量和铲装效率。

2.2 对比方案设定

方案 I 采用常规矩形排列, 炮孔沿台阶走向对齐排布。具体设计参数如下: 孔径 $D=152\text{mm}$; 采用大孔距比设计, 孔距 $a=7.0\text{m}$, 排距 $b=5.0\text{m}$ (孔距比 $m=1.4$); 单孔装药量 $Q=180\text{kg}$; 填塞长度 $l=4.5\text{m}$; 采用连续装药结构。由于受岩石层理面影响, 该方案在施工中通过行列对齐方式进行定位。

方案 II 采用梅花型 (交错式) 排列。其核心参数与方案 I 完全对标: 孔距 $a=7.0\text{m}$, 排距 $b=5.0\text{m}$, 孔径 $D=152\text{mm}$, 单孔装药量 $Q=180\text{kg}$, 填塞长度 $l=4.5\text{m}$ 。其关键设计在于空间几何位置的调整, 即第二排炮孔相对于第一排炮孔在轴线上交错 3.5m (孔距之半)。

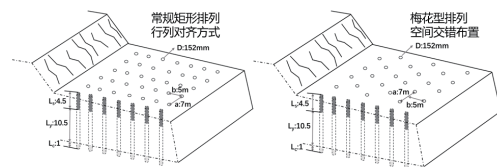


图1 矩形及梅花型布孔方案

2.3 现场实验及数据获取

(1) 选定在矿区采场的一处典型砂泥岩互层区域, 该区域岩石层理发育明显, 普氏系数 f 均值为 6。将试验区划分为面积相等的两个台阶爆区, 分别按照前述的矩形布孔与梅花型布孔参数进行精确测量放样, 并采用大直径潜孔钻机施工, 确保两组方案在孔深、孔径及钻孔倾角等施工上严格受控。

(2) 在爆区周边及保护目标方向部署三通道 iSensor 测振仪, 用于实时采集爆破振动峰值速度数据。同时, 利用无人机航拍系统对爆破前后的台阶原貌以及爆堆的三维形态进行拍摄记录^[10]。

(3) 爆破作业结束后, 采用图像破碎分析软件 WipFrag3.3 对无人机拍摄的爆堆照片进行粒度级配计算, 获取大块率分布曲线; 利用全站仪对台阶底板标高进行实测, 统计根底残留高度。同时, 通过现场跟踪记录对应爆区内挖掘机的单斗循环时间与日产量, 计算出实际铲装效率。最终将采集到的物理指标进行标准化处理, 作为多维评价模型的输入数据。

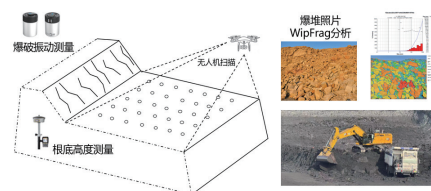


图2 爆破现场数据采集

3 爆破效果多维评价

3.1 评价指标选取原则

针对露天矿爆破受多因素耦合影响的特点，本体系构建遵循“多准则决策分析”逻辑。

(1) 技术维度指标侧重于评价应力波对复杂层理面切割的有效性。其中，大块率与根底率直接反映了爆破能量在岩体内部及台阶底部的分布均匀程度，而爆堆形状则通过宽度与高度的几何参数表征了矿岩的松散度与爆通质量。

(2) 经济维度指标则立足于生产全链条的增效潜力，通过核算钻孔与炸药的直接单耗成本，并结合挖掘机在不同破碎质量下的铲装效率提升值，量化布孔优化带来的二次经济效益。

(3) 安全与环境维度指标作为绿色矿山建设的硬约束，重点监测爆破质点振动峰值速度 (PPV) 以评估对层理边坡稳定性的影响。

3.2 爆破效果实测数据统计

试验区实测数据统计，见表 1。

表1 两种布孔方案爆破效果实测数据对比

维度	评价指标(单位)	方案 I (矩形)	方案 II (梅花型)
技术	大块率 (%)	12.4	9.1
	根底率 (%)	4.8	2.5
	爆堆平均高度 (m)	7.2	6.5
经济	钻爆单耗 (元/m ³)	3.85	3.85
	铲装效率 (m ³ /h)	520	585
安全	振动峰值 (cm/s)	1.25	1.10

4 基于 AHP- 模糊综合评价法的方案优选

4.1 建立层次分析法 (AHP) 权重模型

为体现方案评价的客观性，首先利用 AHP 确定各指标权重。针对矿区层理发育、大块率控制难度大的现状，在构造判断矩阵时，适当向技术维度倾斜。

4.1.1 构造判断矩阵

在 AHP 层次分析法中，判断矩阵是量化各评价指标相对重要性的核心。根据前文确定的多维评价体系，首先构造准则层判断矩阵 A。通过邀请矿山爆破专家及现场技术人员，采用 1-9 标度法对技术维度 (B1)、经济维度 (B2)、安全与环境维度 (B3) 进行两两比较。

针对矿区岩石层理发育、大块率及根底控制难度大的实际情况，确定各准则间的相对重要性系数，构造矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

由于层理发育直接制约爆破块度与底板平整度，其

破碎质量的改善能通过提升铲装效率产生显著的传导增益，故设定技术维度的重要性标度最高 (a12=3,a13=5)；同时，基于矿山生产属性，在确保安全底线的前提下，成本与效率对方案优选的影响力略高于环境监测指标 (a23=2)。

4.1.2 权重计算及一致性检验

基于上述判断矩阵 A，采用方根法进行各指标权重的量化计算，并引入随机一致性比率 CR 验证逻辑的严谨性。具体计算过程及结果如下：

(1) 权重向量计算。

经计算，准则层各维度的权重分配结果为：

技术维度 (B1) : W1=0.648;

经济维度 (B2) : W2=0.23;

安全与环境维度 (B3) : W3=0.122。

由此得到准则层权重向量 W=(0.648,0.230,0.122)。

(2) 一致性检验。

为排除决策主观性导致的逻辑矛盾，进行一致性校验，最大特征根 $\lambda_{max}=3.003$;

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3.003 - 3}{3 - 1} = 0.0015$$

查表得 n=3 时，平均随机一致性指标 RI=0.58。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0015}{0.58} = 0.0026$$

由于 CR=0.0026<0.1，该判断矩阵通过一致性检验。高权重的技术维度 (64.8%) 客观体现在岩石层理明显背景下，以破碎质量为核心的布孔方案优选导向。

4.2 模糊综合评价模型构建

在确定权重向量 W 后，需通过模糊数学理论对方案 I 与方案 II 进行综合评价，将定性指标与定量指标统一转化为隶属度分值。

4.2.1 确定评价集与隶属度函数

设定方案评价集 V=(v1,v2,v3,v4)，分别对应等级“优、良、中、差”。针对各评价指标，采用降半梯形隶属度函数，将现场实测数据转化为对各等级的隶属度。具体推导过程如下。

(1) 隶属度函数阈值确定。

参照矿山历史生产统计数据，结合现场技术人员经验，对各评价指标划定“优、良、中、差”四级阈值区间。对于成本型指标，采用降半梯形隶属度函数；对于效益型指标，采用升半梯形隶属度函数。各指标评价等级阈值见表 2。

表2 各评价指标等级阈值划分

等级	大块率 (%)	根底率 (%)	爆堆高度 (m)	铲装效率 (m ³ /h)	振动峰值 (cm/s)
优	≤5	≤1.5	≤5.5	≥600	≤0.8
良	5~10	1.5~3.5	5.5~7.0	500~600	0.8~1.2
中	10~15	3.5~5.5	7.0~8.5	400~500	1.2~1.6
差	>15	>5.5	>8.5	<400	>1.6

(2) 单项指标隶属度计算。

以方案 I 的大块率 (12.4%) 为例, 该值落入 “中” 等级区间 (10~15), 采用降半梯形函数计算其对各等级的隶属度: 对 “中” 等级的隶属度 $\mu_{中} = (12.4 - 10) / (15 - 10) = 0.48$; 对 “良” 等级的隶属度 $\mu_{良} = 1 - 0.48 = 0.52$; 对 “优” 和 “差” 等级的隶属度均为 0。由此得到大块率的隶属度向量 $r = [0, 0.52, 0.48, 0]$ 。

按照同样方法, 对两组方案的全部评价指标进行隶属度计算, 结果见表 3。

表3 各指标隶属度计算结果

评价指标	方案 I				方案 II			
	优	良	中	差	优	良	中	差
大块率	0	0.52	0.48	0	0.18	0.82	0	0
根底率	0	0.35	0.65	0	0.50	0.50	0	0
爆堆高度	0	0.87	0.13	0	0.33	0.67	0	0
钻爆单耗	0.15	0.85	0	0	0.15	0.85	0	0
铲装效率	0.20	0.80	0	0	0.85	0.15	0	0
振动峰值	0	0.88	0.13	0	0.25	0.75	0	0

(3) 子层权重确定与维度隶属度合并。

由于每个评价维度包含多个子指标, 需通过子层 AHP 确定维度内部权重, 再加权合并为维度级隶属度。

技术维度: 包含大块率、根底率、爆堆高度 3 项指标。考虑到大块率是直接衡量爆破破碎质量的核心参量, 构造子判断矩阵 (大块率 / 根底率 = 2, 大块率 / 爆堆高度 = 3, 根底率 / 爆堆高度 = 2), 经方根法计算得子权重向量 $w = (0.540, 0.297, 0.163)$ 。

经济维度: 包含钻爆单耗与铲装效率 2 项指标。由于两方案钻爆单耗相同, 铲装效率是区分方案经济效益的关键, 故设铲装效率 / 钻爆单耗 = 3, 得子权重向量 $w = (0.250, 0.750)$ 。

安全与环境维度: 仅包含振动峰值速度 (PPV) 1 项指标, 其隶属度向量直接作为安全维度的隶属度行向量, 无需子层加权。

将各维度子权重与对应指标隶属度向量进行加权合并并归一化, 即可得到方案 I 与方案 II 的模糊评价矩阵 R_1 与 R_2 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.53 & 0.47 & 0.0 \\ 0.19 & 0.81 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.88 & 0.12 & 0.0 \end{bmatrix} R_2 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0.0 & 0.0 \\ 0.67 & 0.33 & 0.0 & 0.0 \\ 0.25 & 0.75 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

4.2.2 模糊评价矩阵运算

利用模糊合成算子 $B = W \cdot R$, 其中 $W = (0.648, 0.230, 0.122)$, 进行矩阵乘法运算, 计算两组方案对评价集的综合隶属度矢量:

$$\text{方案 I: } B_1 = W \cdot R_1 = [0.044, 0.637, 0.319, 0.000]$$

$$\text{方案 II: } B_2 = W \cdot R_2 = [0.379, 0.621, 0.000, 0.000]$$

4.3 评价结果分析

为直观量化对比方案优劣, 赋予评价集分值向量:

$$S = [95, 80, 65, 50]^T$$

$$P_1 = B_1 \cdot S = 75.88$$

$$P_2 = B_2 \cdot S = 85.69$$

计算结果表明, 方案 II 的最终评分显著优于方案 I。在岩石层理发育的矿岩条件下, 方案 I 的行列对齐方式导致应力波在层理交界处能量衰减严重, 大块率与根底率均处于较高水平, 导致其在技术维度的隶属度偏向 “中” 与 “差”。而方案 II 通过空间交错布孔, 有效改善了应力波在复杂层理中的干涉与叠加路径, 其在破碎质量方面的技术优势成功转化为后续铲装维度的效率增益。

5 结语

(1) 构建适配复杂地质条件的多维评价体系。针对露天矿岩石层理发育明显的特征, 改变了单一依赖经济指标的传统评价模式, 建立了涵盖技术、经济、安全三个维度的多维评价模型。通过 AHP 层次分析法量化权重, 科学地反映了破碎质量在层理矿床开采中的核心地位。

(2) 量化证实了梅花型布孔的优越性。模糊综合评价结果显示, 梅花型布孔方案综合得分 (85.69) 显著高于矩形布孔方案 (75.88)。在层理发育区域, 梅花型布孔通过改变应力波的干涉路径, 实现了对层理面的有效切割, 大块率与根底率均得到显著控制, 证明了该方案在复杂工况下的适配性。

参考文献:

[1] 费鸿禄, 张鹏飞. 露天矿高台阶爆破单排孔间合理延迟时间研究[J]. 工程爆破, 2025,31(06):59-65. DOI:10.19931/j.EB.20240096.

[2] Ravikumar A, Vardhan H, Shankar U M, et al. Digital and AI-based evaluation of ANFO and SME explosives in surface coal mining: fragmentation, powder factor, ground vibrations, sustainability implications and safety outcomes[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2026,73(1):33.

- [3] Michał K ,Paweł B ,Łukasz M , et al.Comparison of selected blasting constitutive models for reproducing the dynamic fragmentation of rock[J].International Journal of Impact Engineering,2023,173.
- [4] 汪旭光, 吴春平. 我国爆破行业发展成就、挑战与机遇[J]. 中国矿业, 2024,33(12):1-9.
- [5] 陈文坤. 露天矿山爆破根底、大块产出因素与控制措施[J]. 中国金属通报, 2025,(11):37-40.
- [6] 赵国栋, 赵岩, 谷音等. 基于等效瞬时能量的爆破振动效应安全评价[J]. 工程爆破, 2025,31(06):183-192.
- [7] Xiaohua D ,Xin L ,Zhongchen A , et al.Research on blasting mechanism and blasting effect of aqueous media in open pit coal mines[J].Scientific Reports,2023,13(1):19140-19140.
- [8] Zhou J, Yao S, Monjezi M, et al. Comprehensive Evaluation and Prediction Model for Blasting Fragmentation in Mining Based on Fuzzy Theory and Multiple Weighting Methods[J]. Natural Resources Research, 2026, 35(1): 653-677.
- [9] Liu D ,Zeng X ,Chen M , et al.Blast Fragmentation Prediction Model Based on Energy Fan Theory[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2025,(prepublish):1-22.
- [10] Yi H ,Wu A ,Zhang X .Rock blasting evaluation – image recognition method based on deep learning.[J].Scientific reports,2025,15(1):23980.