

# 基于 Bayes 算法与数值模拟的缓倾斜破碎薄矿体采矿方法优选

王小林<sup>1</sup>, 李泽琛<sup>1</sup>, 郭进平<sup>1</sup>, 刘亚雄<sup>2</sup>, 芦永利<sup>3</sup>, 卢皎旭<sup>1</sup>, 卢才武<sup>1</sup>, 顾清华<sup>1</sup>

- 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安, 710055;
- 河南发恩得矿业有限公司, 河南 洛阳, 471000;
- 陕西省应急管理厅, 陕西 西安, 710021

中图分类号: TD853 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0058-09  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.008

**摘要** 为实现某锰矿顶板破碎低品位缓倾斜薄矿体安全高效经济开采, 首先根据开采条件设计出 5 种技术可行的采矿方法, 然后基于贝叶斯(Bayes)和蒙特卡洛(Monte Carlo)方法建立涵盖技术和经济共 17 项评价指标的采矿方法优选体系进行采矿方法优选。研究表明, 浅孔进路 V 型掏槽后退/前进采矿法、中深孔进路 V 型掏槽/平行抛掷采矿法和浅孔接钎头斜向掏槽采矿法的综合得分依次为 0.524、0.193、0.214、0.228 和 0.221, 浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法最优。最后采用 MIDAS 数值模拟对优选出的采矿方法的 4 种不同跨度采场的稳定性进行分析, 其采场跨度 12 m 时可在采场稳定性和矿石回收率之间取得较好平衡。综合考虑技术、经济和安全指标的采矿方法及采场结构参数优化思路, 可为该矿山选出安全高效采矿方案, 并可供类似矿山参考借鉴。

**关键词** 缓倾斜薄矿体; 顶板破碎; 采矿方法; 设计与优选; 数值模拟; 采场跨度

顶板破碎低品位缓倾斜薄矿体属于典型难采矿体, 通常存在赋存条件差、开采难度大、劳动强度高、采矿效率低和安全性差等问题<sup>[1-3]</sup>, 加之品位低导致总体经济效益低下<sup>[4]</sup>。因此, 实现这类矿体的安全高效开采面临巨大的挑战。

在开采倾斜破碎矿体方面, 学者们提出了很多有效方案。张莞涛等人<sup>[5]</sup>使用小分段无底柱分段崩落法解决了产能问题, 提高了安全性与生产能力, 简化了生产工序。林友等人<sup>[6]</sup>采用上向阶梯式回采的方案解决了出矿难的问题, 减小了采切比与通风时间, 采矿成本由 62.3 元/t 降至 48.2 元/t, 矿山效益明显好转。张东杰等人<sup>[7]</sup>设计了垂直深孔阶段矿房法为主的空场嗣后充填法并提出了安全散体垫层铺设方法, 解决了冒落防控等问题, 回采率提高了 7.31 个百分点, 贫化率降低了 7.66 个百分点, 经济效益显著。陈焰苗等人<sup>[8]</sup>使用壁式空场嗣后充填采矿法解决了顶板不稳固、水害严重等问题, 出矿能力提高了 10 倍以上, 达到了低成本安全增产增效的目的。李冬萍等人<sup>[9]</sup>使用高分段嗣

后膏体充填法解决了采场结构不稳等问题, 千吨采切比降低 33.73%, 炸药单耗降低 8.70%, 贫化率下降 10.80 个百分点, 实现了安全高效开采。万串串等人<sup>[10]</sup>利用有限元-离散元耦合法对比了机械开采与爆破开采后岩体的稳定性, 发现相同进路尺寸下, 机械开挖的岩体位移和破坏面积远小于爆破开挖。丁航行等人<sup>[11]</sup>对使用无底柱分段崩落法的缓倾斜破碎矿体采用双进路分流采矿, 回采率提高 9.34 个百分点, 贫化率降低 0.36 个百分点, 降低矿石损失贫化成效显著。马天勇等人<sup>[12]</sup>使用阶段矿房法代替了留矿法进行开采, 矿块生产能力提高两倍, 采切比降低了 6.00%, 实现了生产成本的降低。张宏伟等人<sup>[13]</sup>采用上向水平进路分层充填采矿法进行开采, 损失率降低 9.3 个百分点, 贫化率降低 0.8 个百分点, 单位矿石成本降低了 8.02%, 有效解决安全高效生产的难题。在面对适用于同一矿体的多个采矿方法时, 需要进行采矿方法的优选。目前, 在进行优选时常采用的方法有模糊数学法<sup>[14]</sup>、层次分析法<sup>[15-17]</sup>、组合权重 TOPSIS 法<sup>[18]</sup>、模糊聚类与 BP 神经网络

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51974223); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20232063); 陕西省博士后科研基金项目(2023BSHYDZZ142); 陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBQN-0507); 陕西省创新能力支撑计划(2023-CX-TD-12)

作者简介: 王小林(1991—), 男, 讲师, 博士, 从事矿山充填开采理论与技术研究。

通信作者: 郭进平(1970—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事矿山开采、安全与应急管理研究, E-mail: 414075711@qq.com。

络法<sup>[19]</sup>以及其他多种优选方法<sup>[20-23]</sup>。灰色关联法<sup>[24-25]</sup>适用于处理不完善数据和少样本数据,具有较强的灵活性,但对数据预处理要求高。灰数白化变权关联算法<sup>[26]</sup>能够提高数据分析的准确性和可靠性,但算法复杂度也相应增加。上述方法在各自应用场景均具有优势,但在计算中,普遍存在过程繁琐、专业性要求高的特点,且多个方案采用一组指标权重进行计算。这种方式忽视了在单一方案与整体方案间的指标重要性差异,有失客观性和公正性,进而导致优选结果产生偏差。贝叶斯公式<sup>[27-30]</sup>在进行决策时属于客观赋权,可操作性强,考虑了在单一方案和整体方案中指标的重要性差异,使优选结果更具有科学性。蒙特卡洛法<sup>[31]</sup>是一种基于概率现象的数值模拟方法,通过生成大量的随机样本,并利用统计学原理来估计数学问题的解。蒙特卡洛法的优点在于其灵活性,可以用于处理各种类型的问题,包括但不限于统计物理学、机器学习、生物医学等领域,具有广泛的适用性<sup>[32-35]</sup>。总体来说,针对顶板破碎低品位缓倾斜薄矿体的采矿方法优选研究还比较少见。

上述研究对于矿山生产实践具有较好的参考价值,但是在实际工程中,由于地质条件的复杂多变,有必要根据矿体具体赋存条件合理地进行采矿方法设计和优选。针对某锰矿顶板破碎低品位缓倾斜薄矿体,首先根据其开采技术条件设计出 5 种采矿方法,然后建立以改进的 Bayes 和 Monte Carlo 方法为基础的采矿方法优选体系,最后采用数值模拟方法对最优采矿方法不同跨度时的采场稳定性进行分析,以期为该矿山选出安全高效采矿方案,并为类似矿山提供参考。

## 1 工程概况

某锰矿体主要赋存于标高 220~280 m 间,沿走向长 940~1 500 m,沿倾向宽 300~600 m,厚度 0.5~1.6 m,平均厚度 0.7 m,倾角 12~33°,平均品位为 8.19%,矿体规模为中型,属于缓倾斜的薄矿体。矿体呈条状、块状,中间由石渣碎屑填充,节理发育、酥脆。矿体顶底板为相对隔水层或富水性极弱的含水层。矿体顶板为稳固性较差的页岩如含炭质页岩、含锰白云岩或粉砂质页岩。底板围岩为含锰炭质页岩、含砾砂岩或黑色页岩组成,稳固性较差。

## 2 缓倾斜薄矿体采矿方法设计

矿区地表禁止崩落且矿体埋藏较浅,首先排除崩落法。该矿品位低,市场价值不高,不适合采用充填法开采。基于对矿体的赋存条件及开采技术条件的综合分析,设计以下 5 种采矿方法。

### 2.1 浅孔进路式 V 型掏槽前进/后退采矿法

如图 1 所示,该采矿方法中段高 25 m,矿房长

73.1 m,间柱宽 2 m,矿房跨度根据顶板稳定性确定。电耙硐室 2 布置于上山 1 对侧的底柱,在电耙硐室 2 对面中段运输巷道另一侧,沿矿体底板上向掘进上山 1,上山 1 顶板与矿体顶板取齐,掘进至上中段运输巷道。后退法在上山 1 上口,切割与上山 1 成 60°角的漏斗状切割槽,作为爆破落矿的补偿空间,前进法在上山 1 下口进行相同工作。在人行通风上山 1 中向左右两侧矿体开凿 60°倾角的炮孔,炮孔深度 1.6~3.7 m,后退法炮孔口朝向顶柱,前进法炮孔口朝向底柱,进行掏槽抛掷爆破,电耙出矿。锚杆护顶。当矿体极薄且有开采价值时,采用矿岩分采工艺解决废石混入率高的问题。

### 2.2 中深孔进路式 V 型掏槽采矿法

如图 2 所示,该采矿方法中段高 25 m,间柱宽 3 m,矿房长约 73.1 m。电耙硐室 3 与上山 1 布置同前节。在上山 1 上口切割与上山上向成 45°角的漏斗状切割槽 7,作为爆破落矿的补偿空间。在上山 1 中向左右两侧矿体布置 45°倾角的炮孔,左右侧矿体内炮孔各 3 排,每排 2 个,炮孔深度 7.3 m,采用导爆管雷管逐排起爆落矿,电耙出矿。锚杆护顶。

### 2.3 中深孔进路式平行抛掷采矿法

如图 3 所示,该采矿方法中段高 25 m,矿房长 73.1 m,间柱宽 3 m,宽为矿体厚度。电耙硐室 3 与上山 1 布置同前节。在上山 1 距离下口 3 m 处,向两侧掘进凿岩巷道 2,沿矿体斜长间隔 21 m,从上山向水平两侧掘进同样的凿岩巷道。在凿岩巷道 2 中凿 16.5 m 的平行中深孔,以 1 排炮孔、每排 3 个逐孔进行掏槽抛掷爆破,电耙出矿。锚杆护顶。

### 2.4 浅孔接钎头斜向掏槽采矿法

如图 4 所示,该采矿方法中段高 25 m,矿房长 73.1 m,间柱宽 3 m,矿房跨度根据顶板稳定性确定。上山 3 布置同前节。在相邻上山 3 之间掘进切割平巷 1 连通两个上山将矿体划分为一定尺寸的矿格,每隔 15 m 布置一个矿格。人员和设备通过在采准完成的矿房四角进行斜向掏槽,首先采用掏槽爆破崩落矿石,之后再开凿平行炮孔将废石崩落形成 3 m×3 m 规则点柱 2 以维护顶板的稳固,可以接钎头以解决作业空间限制,崩落的矿石直接运出地表。局部锚杆护顶。

## 2.5 技术指标

采矿方法有浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法( $A_1$ )、浅孔进路 V 型掏槽前进采矿法( $A_2$ )、中深孔进路 V 型掏槽采矿法( $A_3$ )、中深孔进路平行抛掷采矿法( $A_4$ )和浅孔接钎头斜向掏槽采矿法( $A_5$ )等 5 种。得出的技术指标如表 1 所示。

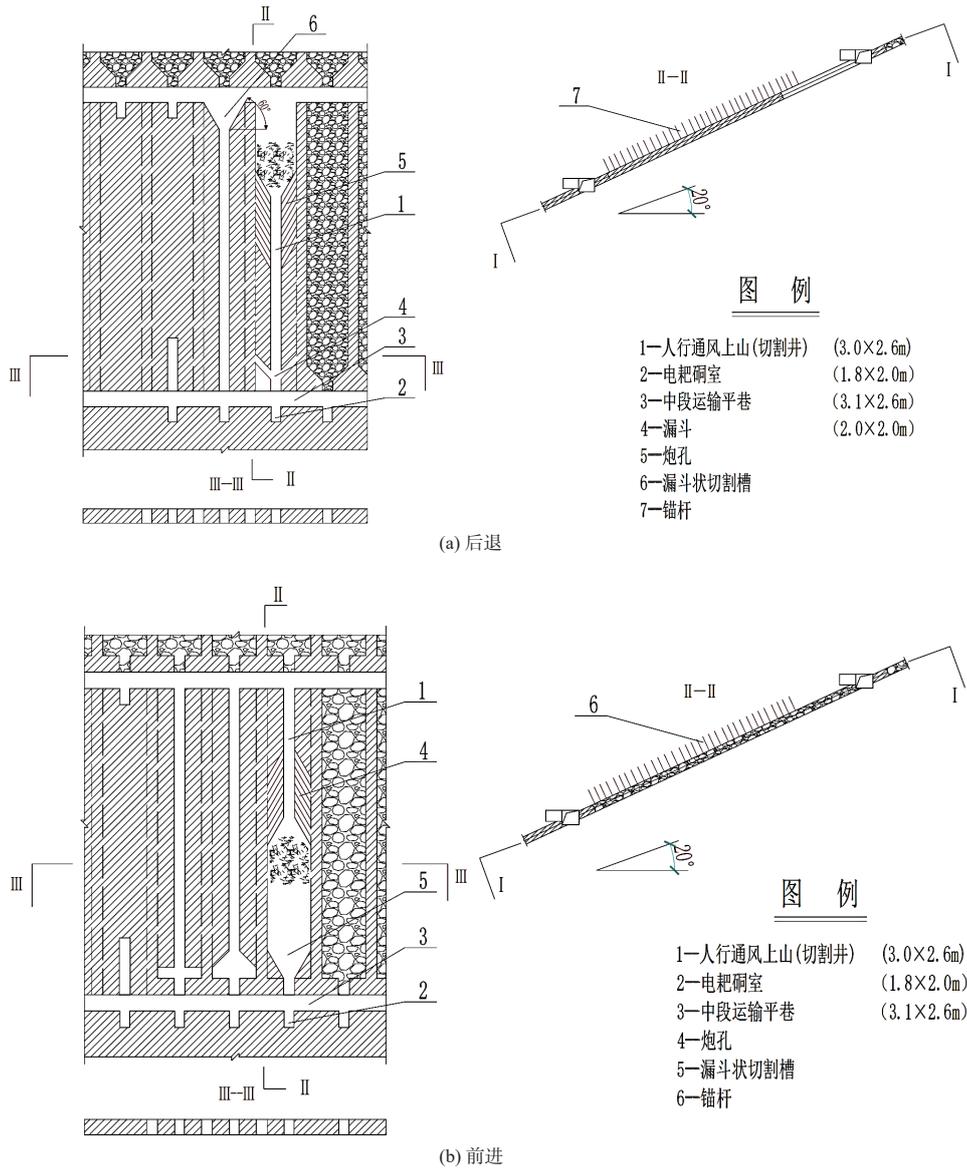


图 1 浅孔进路 V 型掏槽前进/后退采矿法

Fig. 1 Shallow-hole approach V-cut retreat/forward mining method

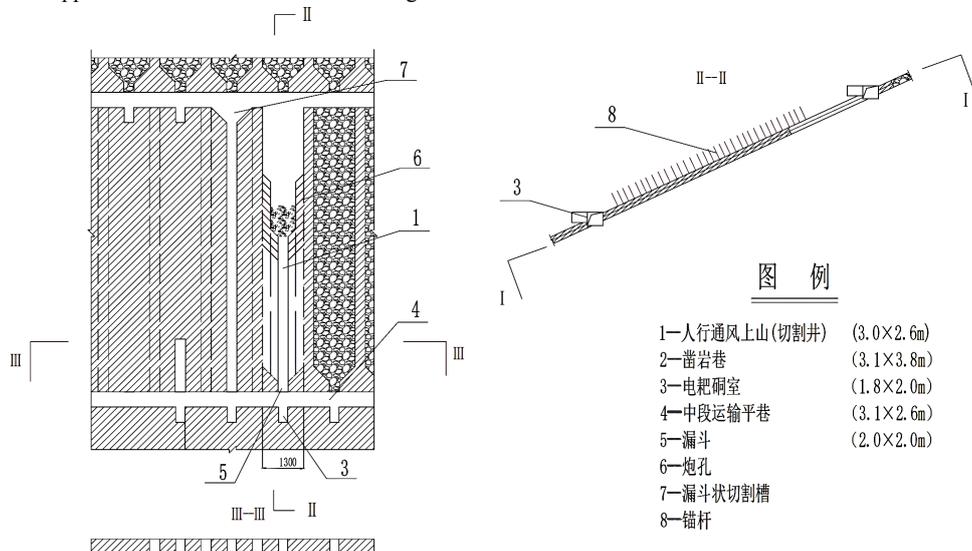


图 2 中深孔进路 V 型掏槽采矿法

Fig. 2 V-cut mining method with medium-deep hole drift

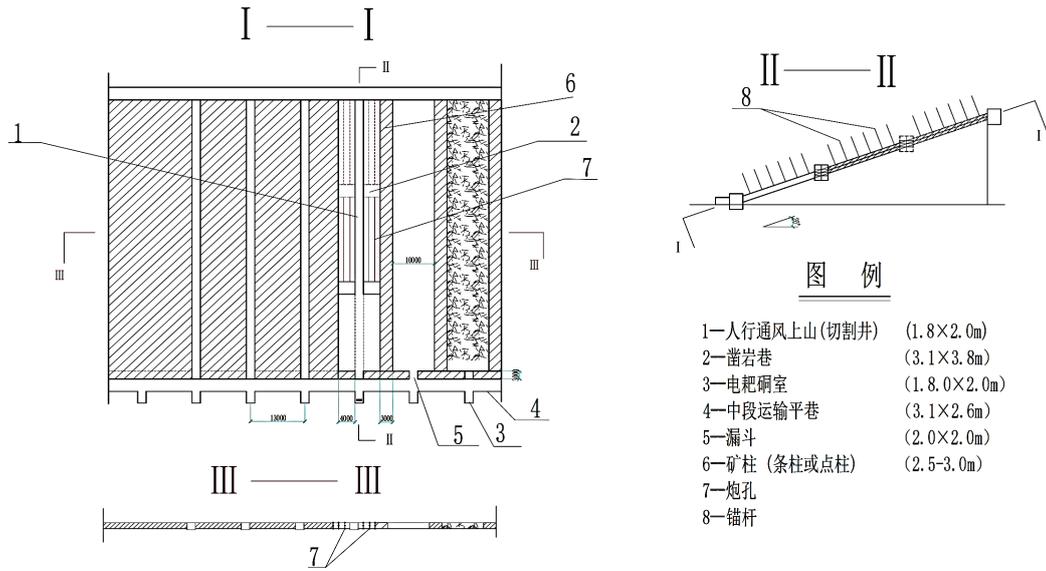


图 3 中深孔进路平行抛掷采矿法  
Fig. 3 Parallel throwing mining method of medium-deep hole approach

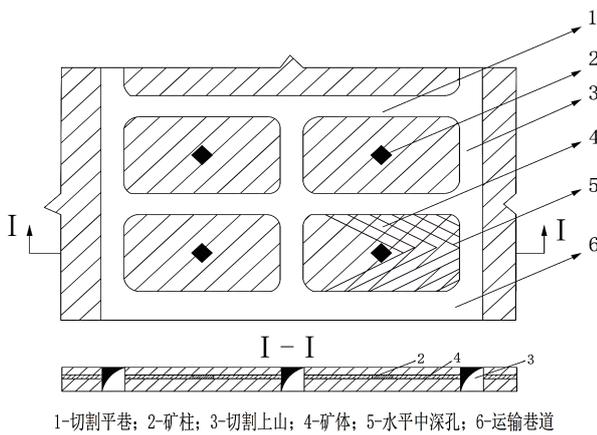


图 4 浅孔接钎头斜向掏槽采矿法  
Fig. 4 Shallow hole drill bit oblique cutting mining method

### 3 缓倾斜薄矿体采矿方法优选

#### 3.1 蒙特卡洛模拟法计算经济指标

初选方案有  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  和  $A_5$  等 5 种采矿方法, 评价采矿方法的经济指标包括投资收益率、净利润率、投资利税率等。在计算上述指标时采用蒙特卡洛模拟法来减小多种可变因素对评价指标的影响。计算出锰矿采用 5 种不同的采矿方法对应的投资收益率、净利润率、投资利税率等经济指标, 结果见表 2。

#### 3.2 采矿方法优选体系构建

通过蒙特卡洛法对  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  等 5 种采矿方法计算得出的经济指标, 可知各个技术经济指标具有局限性和相对性。不同指标反映采矿方法的不同方面, 各有优劣难以权衡, 因此采用改进的 Bayes 公式

表 1 5 种采矿方法技术指标

Table 1 Technical indexes of five mining methods

技术指标	代号	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
矿块生产能力/(t·a <sup>-1</sup> )	$f_1$	92	92	111	144	148
采切工程量/m <sup>3</sup>	$f_2$	383.69	399.04	690.07	582.78	1 003.18
采矿效率/(t·班 <sup>-1</sup> )	$f_3$	5.09	5.09	6.18	8.01	8.24
采切比/(10 <sup>3</sup> m·t <sup>-1</sup> )	$f_4$	261	275	340	333	343
贫化率/%	$f_5$	6	6	8	10	10
损失率/%	$f_6$	24	24	12	28	6
采矿设备/万元	$f_7$	462	462	368	368	470
采矿成本/万元	$f_8$	14.15	14.15	21.3	24.6	52.4

表 2 5 种采矿方法经济指标

Table 2 Economic indicators of five mining methods

序号	经济指标	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
1	投资收益率( $B_1$ )/%	26.38	25.42	18.45	20.43	15.89
2	贷款偿还期/a	2.8	3.3	3.6	2.8	3.4
3	净利润率( $B_2$ )/%	42.53	38.56	45.86	42.73	25.31
4	投资回收期/a	3.2	3.8	4.1	3.6	4.8
5	投资利税率( $B_3$ )/%	24.81	23.62	40.31	42.51	51.83
6	净现值/万元	68 571.8	54 324.1	35 862.4	48 581.7	29 431.5
7	内部收益率( $B_4$ )/%	30.18	28.43	19.83	21.75	16.21
8	自有资金内部收益率/%	37.63	30.82	25.74	32.96	25.46
9	盈亏平衡点( $B_5$ )/%	28.42	31.56	38.31	42.51	58.78

进一步评价 5 种采矿方法。利用改进的 Bayes 算法来体现评价指标与采矿方法间的联系, 对采矿方法进行

综合分析。 $A_i$ 代表可行采矿方法， $B_{ij}$ 代表采矿方法评价指标。基于改进的 Bayes 公式构建采矿优选体系，具体见式(1)<sup>[36]</sup>：

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \omega_{ij} (i = 1, 2, 3 \dots m; j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (1)$$

式中： $\lambda_i$ 为采矿方法综合评价指标； $\xi_{ij}$ 表示第  $A_i$  种采矿方法的第  $B_{ij}$  个标准化后的指标值； $\omega_{ij}$ 为指标权重，见式(2)<sup>[36]</sup>：

$$\omega_{ij} = \frac{P(B_{ij})P(A_i/B_{ij})}{\sum_{j=1}^n P(B_{ij})P(A_i/B_{ij})} (i = 1, 2, 3 \dots m; j = 1, 2, 3 \dots n) \quad (2)$$

### 3.2.1 建立决策矩阵

根据各经济指标对综合评价的相关性与适用度选出投资收益率( $B_1$ )、净利润率( $B_2$ )、投资利税率( $B_3$ )、内部收益率( $B_4$ )、盈亏平衡点( $B_5$ )等 5 种经济指标，进行标准化得到标准化的经济指标矩阵：

$$Z = \begin{pmatrix} \xi_{11} & \dots & \xi_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{51} & \dots & \xi_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.38 & 0.38 & 0.24 & 0.62 & 0.63 \\ 0.61 & 0.58 & 0.59 & 0.30 & 0.39 \\ 0.36 & 0.35 & 0.52 & 0.30 & 0.19 \\ 0.43 & 0.42 & 0.26 & 0.59 & 0.62 \\ 0.41 & 0.47 & 0.49 & 0.30 & 0.17 \end{pmatrix}$$

其中  $\xi_{11}$  为第 1 个方法  $A_1$  的第 1 个经济指标， $\xi_{15}$  为第 1 个方法  $A_1$  的第 5 个经济指标， $\xi_{51}$  代表第 5 个方法  $A_5$  的第 1 个经济指标， $\xi_{55}$  代表第 5 个方法  $A_5$  的第 5 个经济指标，以此类推。

### 3.2.2 计算采矿方法综合评价指标

根据公式(1)计算得到不同采矿方案对应的经济指标  $\lambda_i$ ：

$$\lambda_i = (\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5) = (0.545 \quad 0.314 \quad 0.407 \quad 0.533 \quad 0.421)$$

同理得到技术指标  $\gamma_i$ ：

$$\gamma_i = (\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3 \quad \gamma_4 \quad \gamma_5) = (0.961 \quad 0.614 \quad 0.526 \quad 0.427 \quad 0.534)$$

再以  $\lambda_i$  与  $\gamma_i$  建立技术经济指标矩阵，则有  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  采矿方案综合评价值  $Z_i$ ：

$$Z_i = (Z_1 \quad Z_2 \quad Z_3 \quad Z_4 \quad Z_5) = (0.524 \quad 0.193 \quad 0.214 \quad 0.228 \quad 0.221)$$

综上，采矿方案  $A_1$  的综合评价值最优，为 0.524。因此，确定浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法最优。

## 4 缓倾斜薄矿体开采采场稳定性

为进一步确定优选方法合理的结构参数，基于 ANSYS 建立浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法三维数值

模型，间柱宽度固定为 2 m，矿房跨度为 10~16 m (2 m 为间隔)，对其划分网格并赋予材料属性参数。施加荷载与边界条件，利用 MIDAS 计算不同矿房跨度下的采场稳定性并将结果输出得到应力应变云图。

### 4.1 破坏准则和计算参数

矿岩破坏力学模型为式(3)<sup>[37]</sup>：

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (3)$$

式中： $\sigma_1$ 为最大主应力； $\sigma_3$ 为最小主应力； $\varphi$ 为内摩擦角； $C$ 为内聚力。 $f_s$ 是破坏判断系数，当  $f_s \geq 0$  时，岩体出现破坏；当  $f_s < 0$  时，岩体没有受到破坏。

本矿体属于破碎矿体，内部存在复杂的结构面，Hoek-Brown 准则通过综合考虑岩体的多种力学因素，能够更准确地反映岩体的力学行为，从而提供更可靠的力学参数<sup>[38]</sup>。经 Hoek-Brown 准则修正后的岩体物理力学参数见表 3。

表 3 数值计算岩体强度参数表

Table 3 Numerical calculation of rock mass strength parameters table

名称	密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 / GPa	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / MPa	泊松比	抗拉强度 / MPa
矿体	2860	8.45	35.9	2.54	0.353	0.13
顶板	2450	4.61	24.2	0.93	0.312	0.11
底板	2820	9.36	38.1	4.75	0.265	0.21

### 4.2 实验结果分析

当采场跨度取 10 m 和 12 m 时，据图 5 与图 6 知最大应力分别为 4 429 Pa 和 5 083 Pa，顶板最大应变分别为  $2.356 \times 10^{-8}$  m 和  $2.413 \times 10^{-8}$  m，进路间柱未出现应力集中且采场变形较小，最大应力小于抗拉强度，无明显破坏，采场稳定。

当采场跨度取 14 m 时，由图 7 可知采场最大应力为 5 781 Pa，最大应变为  $2.540 \times 10^{-8}$  m，部分进路间柱的右上处出现小范围应力集中，但总体稳定。

当采场跨度取 16 m 时，由图 8 可知最大应力为 5 761 Pa，最大应变为  $2.589 \times 10^{-8}$  m，可以看到应力集中现象出现在超过一半的进路间柱，采场稳定性最差。

总体上看，顶板的抗拉强度最小，为 0.11 MPa。为确保采场安全性，对顶板的抗拉强度设定 2 倍的安全系数，则顶板允许的最大拉应力为 5 500 Pa。由图 5 与图 6 可知，在矿房跨度为 10~12 m 的情况下，拉应力并未超过这个上限，说明该矿房跨度是符合安全要求的，最佳矿房跨度应在 10~12 m 之间选择。综合考虑安全性和经济性，最佳矿房跨度取 12 m。

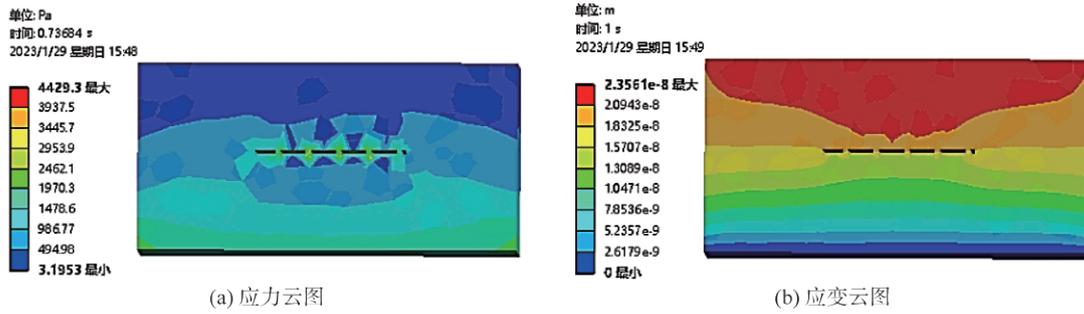


图 5 10 m 矿房跨度应力应变云图  
Fig. 5 Stress-strain cloud diagram of 10 m room span

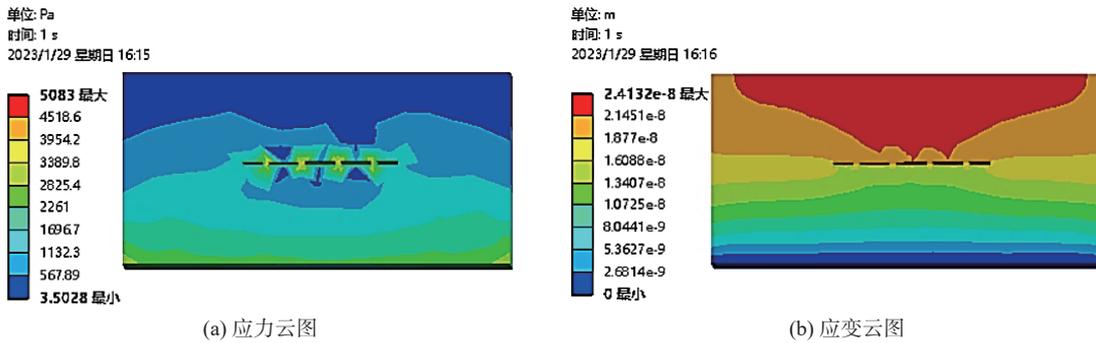


图 6 12 m 矿房跨度应力应变云图  
Fig. 6 Stress-strain cloud diagram of 12 m room span

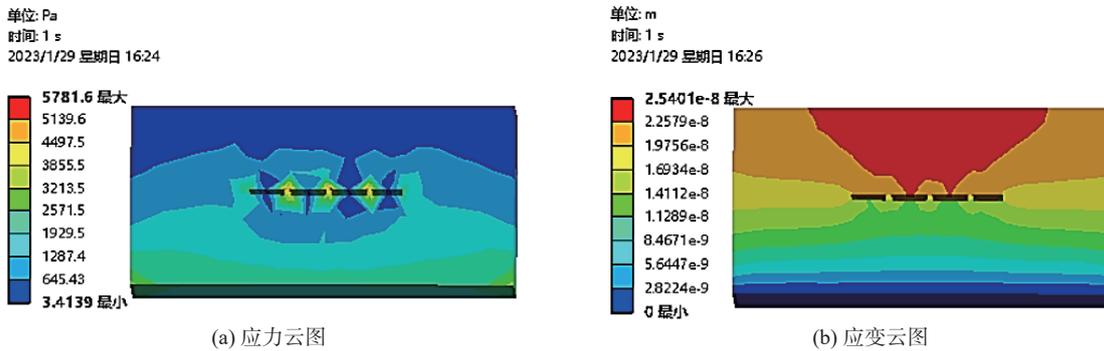


图 7 14 m 矿房跨度应力应变云图  
Fig. 7 Stress-strain cloud diagram of 14 m room span

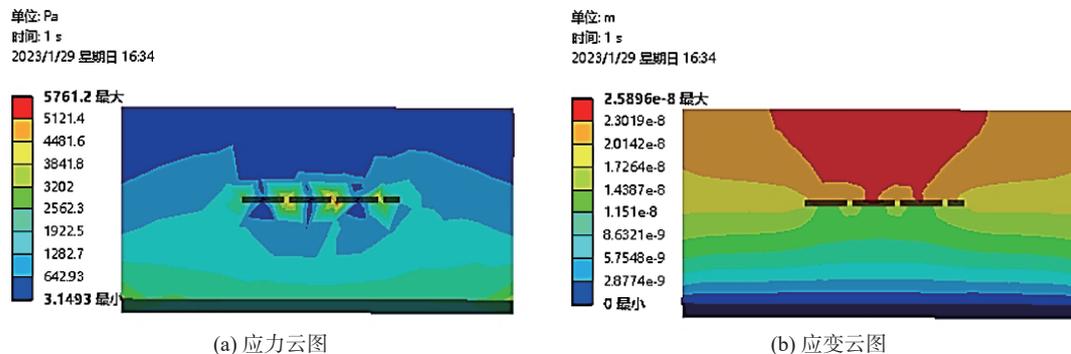


图 8 16 m 矿房跨度应力应变云图  
Fig. 8 Stress-strain cloud diagram of 16 m room span

### 5 结论

(1) 针对低品位的缓倾斜薄矿体, 初步设计了浅

孔进路 V 型掏槽后退采矿法、浅孔进路 V 型掏槽前进采矿法、中深孔进路 V 型掏槽采矿法、中深孔进路平行抛掷采矿法和浅孔接钎头斜向掏槽采矿法等 5

种采矿方法。

(2)从经济和技术角度构建了采矿方法优选综合评价指标体系,基于 Monte Carlo 与改进的 Bayes 公式得到浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法的综合评价价值最优。

(3)应用数值模拟软件对浅孔进路 V 型掏槽后退采矿法采场最大应力应变进行评判,确定最佳矿房跨度为 12 m。

(4)本研究为开采顶板破碎的缓倾斜薄矿体提供了一种新的思路,可以为类似矿山安全高效开采提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 薛田喜,常洋凯. 中厚倾斜破碎矿体下向进路法开采工艺及稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 15-21.  
XUE T X, CHANG Y K. Study on mining technology and stability of downward filling mining method for medium-thick inclined broken ore body[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 15-21.
- [2] 李杨,宋卫东,杜云龙,等. 深部倾斜破碎金矿体高效开采技术研究[J]. 金属矿山, 2023(3): 29-35.  
LI Y, SONG W D, DU Y L, et al. Study on the high-efficient mining technique for deep inclined broken gold ore-body[J]. Metal Mine, 2023(3): 29-35.
- [3] 陈能飞. 倾斜薄矿体房柱采矿法的实践[J]. 中国锰业, 2021, 39(5): 26-28.  
CHEN N F. A practice of room pillar mining method for inclined thin orebody[J]. China Manganese Industry, 2021, 39(5): 26-28.
- [4] 刘嘉伟,黄明清,陈霖,等. 缓倾斜破碎矿体集群式液压支柱护顶空场嗣后充填采矿法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 1-6.  
LIU J W, HUANG M Q, CHEN L, et al. Open stoping and subsequent backfill under clustered hydraulic prop roof support for gently-inclined broken orebody[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 1-6.
- [5] 张莞涛,林卫星,欧任泽,等. 深埋复杂倾斜薄矿体高效回采方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(10): 1-5.  
ZHANG Y T, LIN W X, OU R Z, et al. Research on efficient mining scheme for deep buried complex inclined thin orebody[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(10): 1-5.
- [6] 林友,尤本勇,董继德,等. 观天厂铜矿倾斜薄矿体开采工艺研究[J]. 金属矿山, 2018(2): 46-49.  
LIN Y, YOU B Y, DONG J D, et al. Study on mining technology of inclined thin orebody in Guantianchang copper mine[J]. Metal Mine, 2018(2): 46-49.
- [7] 张东杰,拓明轩,刘树新,等. 急倾斜中厚破碎矿体空场嗣后充填安全开采技术研究[J]. 金属矿山, 2022(5): 50-55.  
ZHANG D J, TUO M X, LIU S X, et al. Study on safe mining technology of open stoping with subsequent filling in steeply inclined medium-thick broken orebody[J]. Metal Mine, 2022(5): 50-55.
- [8] 陈焰苗,罗来和,付毅,等. 缓倾斜薄矿体群壁式空场嗣后充填采矿法试验[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(6): 22-25.  
CHEN Y M, LUO L H, FU Y, et al. Experiment on group-wall open stoping with subsequent backfilling method in gently inclined and thin ore body[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(6): 22-25.
- [9] 李冬萍,张浩强. 金矿破碎矿体高分段嗣后充填采矿技术优化研究[J]. 金属矿山, 2021(12): 102-105.  
LI D P, ZHANG H Q. Study on optimization of high sublevel backfill mining technology for broken orebody in a gold mine[J]. Metal Mine, 2021(12): 102-105.
- [10] 万串串,郑志杰,黄丹,等. 基于二维 FDEM 的金属矿破碎矿体进路法开挖方式与参数优化研究[J/OL]. 矿业研究与开发, 2024, 44(3): 16-22.  
WAN C C, ZHENG Z J, HUANG D, et al. Research on excavation method and parameter optimization of broken ore in metal mine based on two-dimensional FDEM[J/OL]. Mining Research and Development, 2024, 44(3): 16-22.
- [11] 丁航行,韩智勇,任凤玉,等. 谦比西铜矿缓倾斜中厚破碎矿体分流采矿技术[J]. 金属矿山, 2016(1): 13-16.  
DING H X, HAN Z Y, REN F Y, et al. Divided-flow drawing technology of gently inclined medium-thick broken ore bodies in Chambishi copper mine[J]. Metal Mine, 2016(1): 13-16.
- [12] 马天勇,行鹏飞. 阶段矿房法在缓倾斜厚矿体中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2013(1): 11-13.  
MA T Y, XING P F. Application of sublevel room mining on slightly dipped thick orebody[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2013(1): 11-13.
- [13] 张宏伟,张富兴,孙胜,等. 缓倾斜破碎矿体高效进路充填采矿方法研究与应用[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(6): 899-907.  
ZHANG H W, ZHANG F X, SUN S, et al. Research and application of high-efficiency drift backfill mining method in gently inclined broken orebody[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(6): 899-907.
- [14] 何宇翔,杨溢,张志华,等. 基于模糊数学在采矿方法中的优化[J]. 矿冶, 2018, 27(4): 41-44.  
HE Y X, YANG Y, ZHANG Z H, et al. Optimization of mining method based on fuzzy mathematics[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(4): 41-44.
- [15] 杨世兴,付玉华,侯永强. 基于层次分析对某铁矿的采矿方法选择[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(4): 86-90.  
YANG S X, FU Y H, HOU Y Q. Selection of mining method for a certain iron ore based on analytic hierarchy process[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(4): 86-90.
- [16] 曹楠. 基于层次分析法的采矿方法选择研究[J]. 煤矿现代化, 2018, 8(4): 108-110.  
CAO N. Mining methods selection based on analytic hierarchy process[J]. Coal Mine Modernization, 2018, 8(4): 108-110.
- [17] 张卫中,王维庆,彭亚利,等. 基于 AHP-FUZZY 的瓦屋磷矿 IV 阶段房柱法出矿方式优选[J]. 金属矿山, 2022(9): 18-24.  
ZHANG W Z, WANG W Q, PENG Y L, et al. Based on AHP-FUZZY, optimization of room-and-pillar mining method extraction for section IV of Wawu phosphate mine based on AHP-FUZZY[J]. Metal Mine, 2022(9): 18-24.
- [18] 邓龙鑫,陈建宏. 基于博弈论的主客观组合权重 TOPSIS 采矿方法优选[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(2): 282-290.  
DENG L X, CHEN J H. Optimization of mining method with subjective and objective combination weight TOPSIS based on game theory[J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(2): 282-290.
- [19] 吴姗,郭利杰. 基于模糊聚类及 BP 神经网络的采矿方法选择研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(S2): 281-285.  
WU S, GUO L J. Mining method optimization based on the fuzzy clustering and the BP neural network[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(S2): 281-285.
- [20] 刘志祥,刘进. 基于变权重理论和 TOPSIS 法的采矿方法优选[J]. 有色金属工程, 2019, 9(3): 76-81+107.  
LIU Z X, LIU J. Optimization of mining methods based on variable weight theory and TOPSIS[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019,

- 9(3): 76-81+107.
- [21] 何金城,何治良,郑航竹,等. FAHP-Entropy 耦合定权法在采矿方法优选中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(11): 9-14.  
HE J C, HE Z L, ZHENG H Z, et al. The application of FAHP-Entropy coupling weighting method in the optimal selection of mining method[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(11): 9-14.
- [22] 李宁,孙刚友,王合祥,等. 基于信息熵与模糊决策理论优选采矿方法[J]. 铀矿冶, 2018, 37(3): 166-170.  
LI N, SUN G Y, WANG H X, et al. Optimization of mining method based on information entropy and decision theory[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018, 37(3): 166-170.
- [23] 杨洋,黄德镛,耿元玲,等. 基于 FAHP-CRITIC 组合赋权的采矿方法优选[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(1): 6-11+22.  
YANG Y, HUANG D Y, GENG Y L, et al. Optimization of mining methods based on FAHP-CRITIC combined weighting process[J]. Industrial Minerals & Processing, 2022, 51(1): 6-11+22.
- [24] WANG Y Z, ZHAO J, WANG Y, et al. Multi-objective optimization and grey relational analysis on configurations of organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 114: 1355-1363.
- [25] XIA X F, SUN Y, WU K, et al. Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and grey correlation analysis method[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 152: 303-309.
- [26] 柯丽华,孟欢欢,姚团,等. 基于区间灰数白化变权关联算法的采矿方法决策模型及应用[J]. 金属矿山, 2021(12): 96-101.  
KE L H, MENG H H, YAO J, et al. Decision model of mining method based on interval grey number whitening variable weigh correlation algorithm and its application[J]. Metal Mine, 2021(12): 96-101.
- [27] 杨静,陈冬,程小红. 贝叶斯公式的几个应用[J]. 大学数学, 2011, 27(2): 166-169.  
YANG J, CHEN D, CHENG X H. Some applications of Bayesian formula[J]. College Mathematics, 2011, 27(2): 166-169.
- [28] 孙同云. 模糊软集合和贝叶斯公式在确定指标权重中的应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2014, 31(5): 34-38.  
SUN T Y. Application of fuzzy soft set and Bayesian formula to index weight determination[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2014, 31(5): 34-38.
- [29] 林晓辉. 模糊事件贝叶斯公式[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(4): 126-132.  
LIN X H. The Bayes' formula on fuzzy event[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(4): 126-132.
- [30] 徐泽水. 多属性决策的两种方差最大化方法[J]. 管理工程学报, 2001, 15(2): 11-13.  
XU Z S. Two methods of maximizing deviations of multi-attribute decision making[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2001, 15(2): 11-13.
- [31] 金畅. 蒙特卡洛方法中随机数发生器和随机抽样方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
JIN C. Study on random number generator and random sampling in Monte Carlo method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [32] 赵凯,刘阳,常琪,等. 基于蒙特卡洛模拟评价新生儿几万古霉素给药方案[J]. 儿科药学杂志, 2024, 30(4): 20-26.  
ZHAO K, LIU Y, CHANG Y, et al. Evaluation on administration regimen of vancomycin in neonates based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Pediatric Pharmacy, 2024, 30(4): 20-26.
- [33] 张鑫,刘欣荣,王慧鹏. 成形磨削人字齿轮齿面扭曲消减设计方法[J]. 机械传动, 2024, 48(3): 161-169.  
ZHANG X, LIU X R, WANG H P. Design method for twisting and reducing tooth surfaces of herringbone gears for form grinding[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(3): 161-169.
- [34] 赵杰,刘森,殷齐康,等. 碱金属修饰的萘炔/萘二炔对 CO<sub>2</sub> 选择性吸附分离的理论计算[J]. 无机化学学报, 2024, 40(3): 515-522.  
ZHAO J, LIU S, YIN Q K, et al. Theoretical calculation of selective adsorption and separation of CO<sub>2</sub> by alkali metal modified naphthalene/naphthalenediynes[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2024, 40(3): 515-522.
- [35] 孙国祥,黄银锋,汪小昆,等. 基于 LIO-SAM 建图和激光视觉融合定位的温室自主行走系统[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 227-239.  
SUN G X, HUANG Y F, WANG X C, et al. Autonomous navigation system in a greenhouse using LIO-SAM mapping and laser vision fusion localization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 227-239.
- [36] 王丹华,路增祥. 基于贝叶斯公式的采矿方法优选模型[J]. 金属矿山, 2020(3): 36-41.  
WANG D H, LU Z X. Optimization selection model of mining method based on Bayesian formula[J]. Metal Mines, 2020(3): 36-41.
- [37] 王少特,张耀平,刘书瑶,等. 某矿山地表移动及岩层监测稳定性研究[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(4): 543-552.  
WANG S T, ZHANG Y P, LIU S Y, et al. Study on the stability of surface movement and strata monitoring in a mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(4): 543-552.
- [38] 马栋,周传波,夏宇馨,等. 基于爆破损伤的 Hoek-Brown 强度准则修正[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 397-404.  
MA D, ZHOU C B, XIA Y Q, et al. Modification of Hoek-Brown strength criterion based on cumulative damage of blasting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 397-404.

## Optimization of Mining Method for Gently Inclined Broken Thin Vein Based on Bayes Algorithm and Numerical Simulation

WANG Xiaolin<sup>1</sup>, LI Zechen<sup>1</sup>, GUO Jinping<sup>1</sup>, LIU Yaxiong<sup>2</sup>, LU Yongli<sup>3</sup>, LU Jiaoxu<sup>1</sup>, LU Caiwu<sup>1</sup>, GU Qinghua<sup>1</sup>

1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Henan Fender mining Co., LTD, Luoyang 471000, Henan, China;

3. Department of Emergency Management of Shaanxi Province, Xi'an 710021, Shaanxi, China

**Abstract:** To achieve safe, efficient, and economically viable mining of a manganese mine with a fractured, low-grade, gently sloping, thin ore body, five technically feasible mining methods were first designed based on the mining conditions. Subsequently, a mining method optimization was conducted, utilizing a system established on Bayes and Monte Carlo methods, encompassing 17 evaluation criteria covering both technical and economic aspects. The research findings indicated that the comprehensive scores of the shallow hole approach V-cut retreat/advance mining method, the medium-deep hole approach V-cut/parallel throw mining method, and the shallow hole drill head oblique cut mining method were 0.524, 0.193, 0.214, 0.228, and 0.221, respectively. The shallow hole approach V-cut retreat mining method was found to be the most optimal. Finally, MIDAS numerical simulation was employed to analyze the stability of four different span stops of the selected mining methods. A span of 12 meters was found to achieve a favorable balance between stope stability and ore recovery rate. Considering technical, economic, and safety indicators, the optimization approach for mining methods and stope structural parameters can assist in selecting a safe and efficient mining scheme for the mine, and can also serve as a reference for similar mines to improve their operations.

**Keywords:** gentle dip thin vein; broken roof; mining method; design and optimization; numerical simulation; stope span

引用格式: 王小林, 李泽琛, 郭进平, 刘亚雄, 芦永利, 卢皎旭, 卢才武, 顾清华. 基于 Bayes 算法与数值模拟的缓倾斜破碎薄矿体采矿方法优选[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 58-66.

WANG Xiaolin, LI Zechen, GUO Jinping, LIU Yaxiong, LU Yongli, LU Jiaoxu, LU Caiwu, GU Qinghua. Optimization of mining method for gently inclined broken thin vein based on bayes algorithm and numerical simulation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 58-66.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)