

# 基于层次分析和模糊数学法的采矿方法优选

朱获天<sup>1</sup>, 王沉<sup>1\*</sup>, 罗来和<sup>2</sup>, 夏国进<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州紫金矿业股份有限公司, 贵州 贞丰 562200)

**摘要:** 贞丰簸箕田金矿矿体赋存条件复杂, 岩体及顶底板岩石稳定性差. 为达到相应的安全技术及技术经济指标标准, 采用层次分析法和模糊数学法确定最优的采矿方法, 得出了上向进路充填采矿法、上向水平分层充填采矿法、下向分层充填采矿法 3 种采矿方法的优劣顺序. 并用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件分别进行了 3 种采矿法的模拟, 最终优选出上向进路充填采矿法为簸箕田金矿的开采方法, 并取得了良好的实践效果.

**关键词:** 复杂矿床; 采矿方法; 层次分析法; 模糊数学法; 数值模拟

**中图分类号:** TD853      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2020)04-0013-07

## Mining Methods Choice By AHP and Fuzzy Mathematics

Zhu Huotian<sup>1</sup>, Wang Chen<sup>1</sup>, Luo Laihe<sup>2</sup>, Xia Guojin<sup>2</sup>

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Zijin Mining Co., Ltd., Zhenfeng 562200, China)

**Abstract:** The occurrence conditions of gold ore are complex in Zhenfeng Bojitian Mine, and stability of rock mass roof and floor is poor. In order to achieve the corresponding safety technology and technical and economic index standards, using AHP and fuzzy mathematics to determine the optimal mining method, the obtained sequence of the three mining methods include upward horizontal cut and fill mining method, upward drift cut and fill mining method, downward cut and fill mining method. In addition, the three kinds of mining methods are simulated by FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software, and finally the upward drift cut and fill mining method is selected as the Bojitian gold mining method. Thus, good practice effects have been achieved.

**Keywords:** complex ore deposit; mining methods; analytic hierarchy process; fuzzy mathematics method; numerical simulation

采矿方法是地下矿山开采最重要的部分. 它直接影响矿山生产的许多技术经济指标, 合理与否关系矿山企业的生产安全和经济效益. 采矿方法的选择不仅与矿体赋存条件相关, 而且与开采技术水平、社会经济条件息息相关. 因此, 选择采矿方法时必须综合考量众多因素, 优选出最适合矿山的采矿方法, 以实现安全、经济、高效的开采目标.

对于复杂矿山开采, 张见等人提出了二步骤开采方法, 能有效控制采场稳定性<sup>[1]</sup>; 李新成、张胜光等人针对缓倾斜中厚矿体提出了安全高效开采的方案, 取得了较好的技术经济指标<sup>[2,3]</sup>; 杨宁、杜永亮、陶明、宋霞飞等人以某矿山为研究对象, 运用突变优选理论、云模型理论或层次分析、基对分析统一度、密切值等方法进行了采矿方法优选<sup>[4-9]</sup>; 谭富生、罗骋等综合考虑安全、经济等方面因素对采矿方法的影响, 采用赋权与 TOPSIS 组合方法等进行了采矿方法的优选<sup>[10-12]</sup>; 杨宁、查道欢等分别运用 AHP-Fuzzy, AHP-UMT 结合的方法以及灰色关联理论进行采矿方法优选<sup>[13-17]</sup>; 何金成提出了基于 FAHP-Entropy 耦合定权

收稿日期: 2020-08-27

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2020]4Y042)

\* 通信作者, E-mail: cwang@gzu.edu.cn

法的锡矿采矿方法优选模型<sup>[18]</sup>.

本研究根据簸箕田金矿矿体复杂赋存条件,运用层次分析法和模糊数学相结合的方法进行采矿方法优选,并采用数值模拟软件对矿山稳定性进行模拟验证.

## 1 工程概况

簸箕田金矿位于贞丰城北以西约 20 km,矿区公路网发达.簸箕田金矿主要矿体为埋藏于地表 200 m 以下的隐伏大型金矿床,金矿体分布标高 633.0~1 106.0 m,似层状矿体,含矿层主要为坚硬、较坚硬的灰岩及粉砂岩;顶底板围岩为岩质软或较软的黏土岩、黏土质粉砂岩、粉砂质黏土岩及炭质岩,局部夹层力学强度低,摩擦系数较小,遇水易崩解软化、泥化,容易形成滑脱面的软弱夹层,岩体质量中等偏差,顶底板稳固性中等或较差.区内断层发育程度高,水文地质条件复杂程度中等.工程地质条件复杂程度中等.该矿体的开采技术条件为中等复合问题矿床(Ⅱ-4)类型.由于簸箕田金矿的顶底板稳固性为中等或较差,若采用空场法开采,会引起顶底板的垮落,具有安全隐患,因此,簸箕田金矿不适合采用空场法开采.由于埋深在地表 200 m 以下,若采用崩落法开采,会出现大面积坍塌,引起地表不稳定(地表上有村庄),所以簸箕田金矿也不适合采用崩落法开采.

根据簸箕田金矿的地质条件和参考相似条件下的矿山开采方法,选择充填法开采较合适,分别从上向水平分层充填采矿法、上向进路充填采矿法、下向分层充填采矿法中选择一种采矿方法作为簸箕田金矿的开采方法.如何实现复杂矿床采矿方法的优选是簸箕田金矿面临的重大技术难题,难点主要有(1)顶底板岩石物理力学性质差,此类地质条件增加了矿山开采难度,要求安全技术及技术经济指标达到较高标准;(2)复杂矿床开采条件下,构建评价指标体系,采用合理的系统分析方法及数学方法,确定最优的采矿方法,且要求采场均处于稳定状态.

## 2 层次分析法

层次权重决策分析法(Analytical Hierarch Process,即 AHP)是一种实用的多准则、多目标决策分析方法.本文采用层次分析法结合模糊数学方法在 3 种采矿方法(上向水平分层充填采矿法、上向进路充填采矿法、下向分层充填采矿法)中优选更适合簸箕田金矿的开采方法.

层次分析法分为以下步骤:

### 1) 构造判断矩阵

表 1 判断矩阵比较标准

标准值	定义	说明
1	同样重要	因素 $X_i$ 与 $X_j$ 的重要性相同
3	稍微重要	因素 $X_i$ 的重要性稍微高于 $X_j$
5	明显重要	因素 $X_i$ 的重要性明显高于 $X_j$
7	强烈重要	因素 $X_i$ 的重要性强烈高于 $X_j$
9	绝对重要	因素 $X_i$ 的重要性绝对高于 $X_j$
2,4,6,8	为以上两判断之间的中间状态对应的标度值	
倒数	若 $j$ 因素与 $i$ 因素比较,得到判断值 $a_{ji} = 1/a_{ij}$	

按照层次结构模型,每一层元素都以相邻的上一层各元素为基准,按上述比较标度构造判断矩阵  $D$ ,按定义有

$$D = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_1}{X_1} & \cdots & \frac{X_1}{X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{X_m}{X_1} & \cdots & \frac{X_m}{X_n} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

## 2) 层次相对权重

计算判断矩阵每行所有元素的几何平均值:

$$\bar{\omega}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中:  $a_{ij}$  为判断矩阵的元素.

通过式(3)将其归一化处理,得到  $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 即为所求元素的相对权重.

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

## 3) 一致性检验

判断矩阵的合理性必须通过一致性检验才能具有可信度,判断矩阵的一致性指标 CI 为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (4)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值,且

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(D\mathbf{W})_i}{n\omega_i}. \quad (5)$$

式中:  $(D\mathbf{W})_i$  为矩阵  $D\mathbf{W}$  的第  $i$  个元素,  $D$  为判断矩阵.

根据判断矩阵进行一致性判断,由式(6)计算 CR 的值.若  $CR < 0.1$ ,认为判断矩阵的一致性可以接受,所得出的权重向量是可信的,否则重新构建判断矩阵,直至通过一致性检验.

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (6)$$

## 4) 标准化决策矩阵,计算各层要素对总目标的总权重

隶属度矩阵  $\mathbf{R}$  由  $j$  个方法  $k$  个评价因素构成.对于判断矩阵  $D$  中越大越优的指标和越小越优的指标通过式(7)进行标准化,得到隶属度矩阵  $\mathbf{R}$  (评价矩阵).

$$\text{越大越优指标 } r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})}, \text{ 越小越优指标 } r_{ij} = \frac{\max_j(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})}, \quad (7)$$

由评价矩阵  $\mathbf{R}$  以及因素权重  $\mathbf{W}$ ,可得方案集  $A$  的综合评价为

$$\mathbf{B} = \mathbf{WR} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m). \quad (8)$$

## 3 簸箕田金矿采矿方法优选

根据矿山实地调研,参考类似金矿开采条件和有关采矿方法选择的影响因素,同时结合矿山实际生产要求,选取7项因素作为评价指标,分别是采场生产能力、贫化率、损失率、采出品位、采切比、作业安全程度和通风情况,分别用  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  表示,其中采场生产能力、贫化率、损失率、采出品位及采切比是定量指标,作业安全程度和通风情况是定性指标.具体情况见表2.

表2 判断矩阵比较标准采矿方法

	$a_1/(t/d)$	$a_2/\%$	$a_3/\%$	$a_4/(g/t)$	$a_5/(m^3/kt)$	$a_6$	$a_7$
上向水平分层充填采矿法	60	8.00	9.00	4.85	54.42	较好	一般
上向进路充填采矿法	50	10.00	5.00	4.70	62.13	较好	较好
下向分层充填采矿法	54	9.18	6.64	4.82	58.96	一般	一般

### 3.1 建立层次结构

由采矿方法和评价指标构成的递阶层次评价指标体系如图1所示.

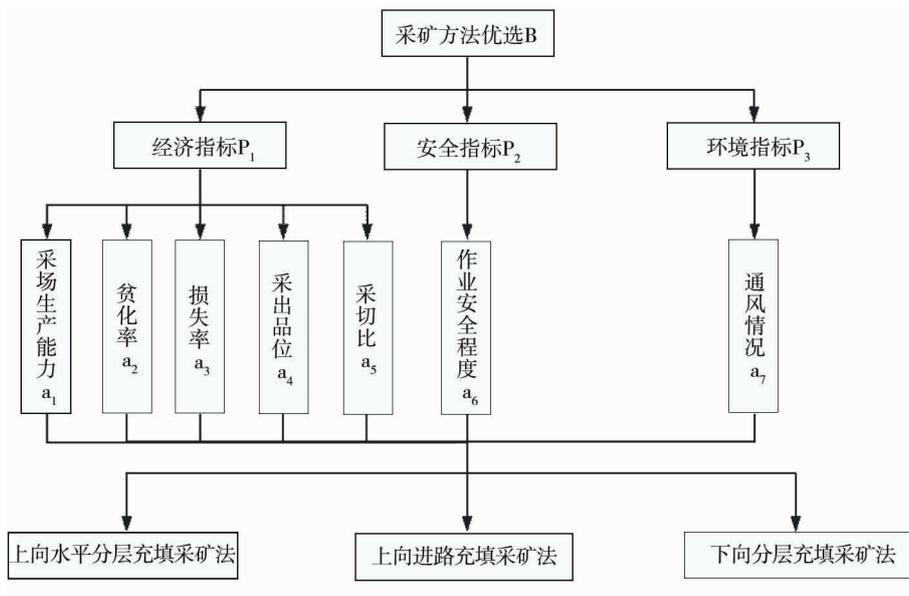


图1 评价指标体系

### 3.2 构造判断矩阵

采矿方案层(B)与各指标层(P)的相对权重判断矩阵如表3所示.

表3 B-P 判断矩阵

B-P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	权重
P <sub>1</sub>	1	1	2	0.400
P <sub>2</sub>	1	1	2	0.400
P <sub>3</sub>	1/2	1/2	1	0.200

经济指标(P<sub>1</sub>)与该指标层各元素(a<sub>1</sub>~a<sub>5</sub>)相对权重判断矩阵如表4所示.

表4 P<sub>1</sub>-a 判断矩阵

P <sub>1</sub> -a	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>
a <sub>1</sub>	1	1/2	3	4	3
a <sub>2</sub>	2	1	4	4	4
a <sub>3</sub>	1/2	1/4	1	1/4	1/5
a <sub>4</sub>	1/4	1/4	1/3	1	1/3
a <sub>5</sub>	1/3	3	5	3	1

### 3.3 层次相对权重及一致性检验

由式(2)和式(3)可以得到各元素的相对权重如表5所示.

表5 P-a 组合权重

P-a	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	组合权重
a <sub>1</sub>	0.259			0.104
a <sub>2</sub>	0.384			0.154
a <sub>3</sub>	0.053			0.021
a <sub>4</sub>	0.054			0.022
a <sub>5</sub>	0.250			0.100
a <sub>6</sub>		1		0.400
a <sub>7</sub>			1	0.200

由式(5)可得  $\lambda_{\max} = 5.422$ , 把这一结果代入式(4)中计算 CI, 根据式(6)计算 CR 值来确定权重向量是否可信. 最终计算得  $CR = 0.094$   $1 < 0.1$  满足要求, 因此可知准则层所求的权重系数是合理的.

### 3.4 总权重

将 5 个定量指标归一化后得

$$R_{1-5} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.833 & 0.900 \\ 1.000 & 0.800 & 0.871 \\ 0.556 & 1.000 & 0.753 \\ 1.000 & 0.969 & 0.994 \\ 0.876 & 1.000 & 0.949 \end{bmatrix}.$$

两个定性指标, 由语气算子和相对隶属度关系, 得  $R_6 = (0.429 \quad 0.667 \quad 0.429)$ ,  $R_7 = (0.538 \quad 0.538 \quad 0.333)$ . 综上, 可得 3 种采矿方法的隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.833 & 0.900 \\ 1.000 & 0.800 & 0.871 \\ 0.556 & 1.000 & 0.753 \\ 1.000 & 0.969 & 0.994 \\ 0.876 & 1.000 & 0.949 \\ 0.429 & 0.667 & 0.429 \\ 0.538 & 0.538 & 0.333 \end{bmatrix}.$$

从而  $B = WR = (0.657 \quad 0.726 \quad 0.598)$ .

由此得出 3 种采矿方法优劣顺序为

- 1) 上向进路充填采矿法 (0.726);
- 2) 上向水平分层充填采矿法 (0.657);
- 3) 下向分层充填采矿法 (0.598).

## 4 数值模拟验证

采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟分析采场稳定性, 根据矿体赋存条件建立数值模拟模型, 矿体顶底板以黏土岩为主, 矿体为石灰岩. 模型如图 2 所示, 走向长度 100 m, 倾向长度 100 m, 矿体倾角 15°, 采用摩尔-库伦准则模型, 根据现场采样试验获取的力学参数, 建立模型并限定边界条件.

### 4.1 采场失稳依据

采场失稳条件为顶底板承受的最大主应力超过采场矿岩抗压强度, 根据文献[19, 20]可知, 充填法下采场顶板下沉位移  $< 10$  mm, 其岩体比较稳定; 下沉位移 10~25 mm, 岩体基本保持稳定; 下沉位移 25~40 mm, 岩体存在潜在稳定问题; 下沉位移  $> 40$  mm, 则岩体破坏.

### 4.2 应力场分布对比分析

以开挖后的采场顶板和围岩为研究对象, 3 种采矿方法沿分段方向的最大应力分布情况如图 3 所示. 通过数值模拟分析开挖后的采场岩体应力场分布变化, 3 种采矿方法的拉应力都未达到顶底板岩石的最大抗拉强度和最大抗压强度, 3 种采矿方法分段开采后都处于稳定状态. 上向进路充填采矿法最大拉应力集中分布在采场中部顶底板上, 采场两端的最大主应力分布较小. 最大主应力为 1.02 MPa, 为拉应力, 集中

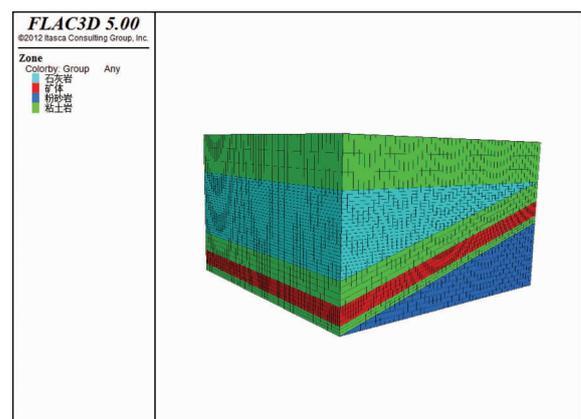


图 2 矿体初始模型

在分层采场顶底板中部.上向进路充填采矿法分段采场顶底板最大拉应力比上向水平分层充填采矿法和下向分层充填采矿法分段采场顶底板最大拉应力小,最大主应力变化比较平稳,采场相对更稳定.

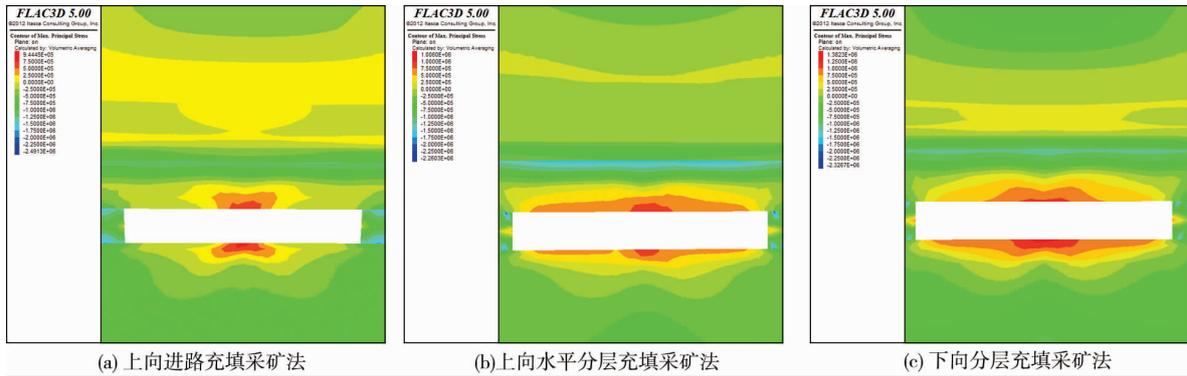


图3 3种采矿方法最大应力分布云图

### 4.3 位移场大小对比分析

3种采矿方法采场最大位移云图如图4所示.上向进路充填采矿法采场位移分布在采场中部,中部位移值最大,位移最大值为3.03mm;上向水平分层充填采矿法采场最大位移分散在整个分段采场中,中部位移值最大,最大位移值为3.72mm;下向分层充填采矿法采场最大位移值为4.05mm,最大位移值在分散采场中部,位移沿分段采场中部向采场两端分散,位移值逐渐降低.3种采矿方法中,上向进路充填采矿法分段采场顶底板最大位移值最小,且采场顶底板相对稳定.

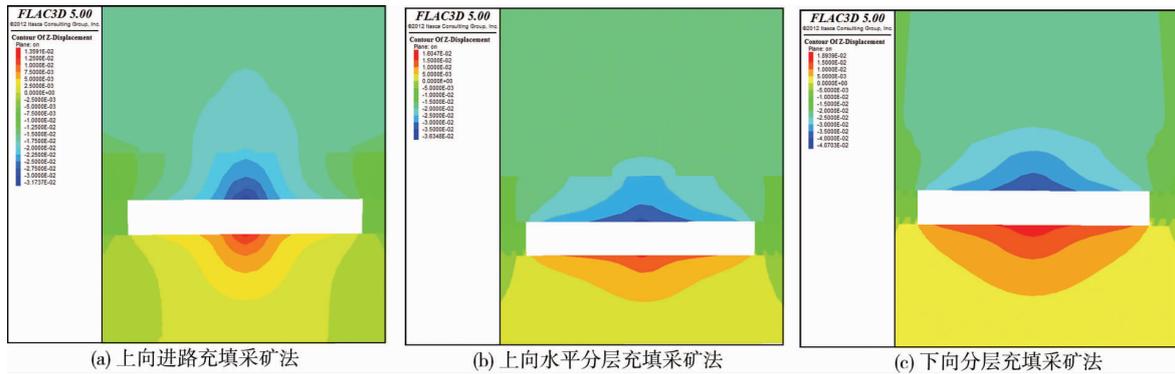


图4 3种采矿方法采场最大位移云图

### 4.4 塑性区分布对比分析

3种采矿方法塑性区分布云图如图5所示.上向进路充填采矿法塑性区集中分布在分段采场顶底板中部,上向水平分层充填采矿法和下向分层充填采矿法的塑性区分散分布于分段采场顶底板中,两帮均出现了塑性区,上向水平分层充填采矿法采场两帮的塑性区最大.3种采矿方法分段采场和两帮均未出现塑性破坏.

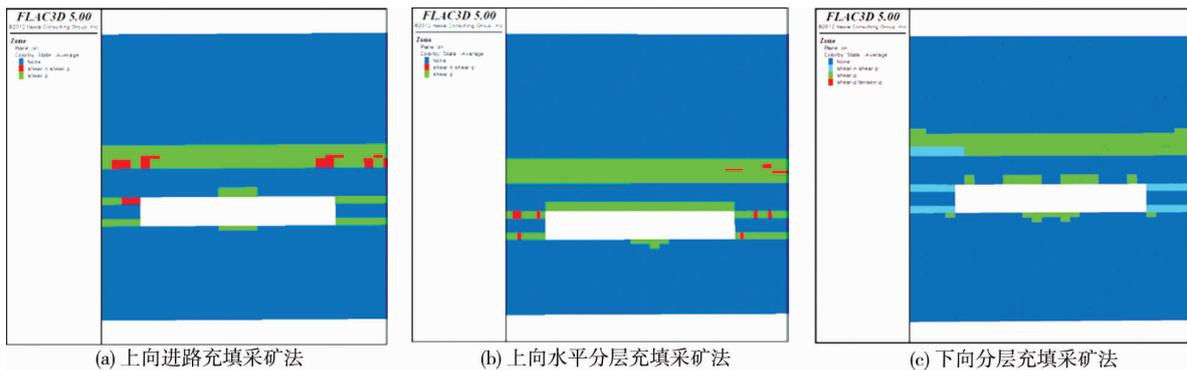


图5 3种采矿方法塑性区分布云图

综上所述,3种采矿方法的最大拉应力和最大压应力都小于采场顶底板岩石抗拉强度和抗压强度,最大位移量较小,没有出现塑性破坏区,3种采矿方法都满足安全采矿要求.结合簸箕田金矿采矿方法优选发现上向进路充填法相对其他2种采矿方法,是最经济的采矿方法.所以,最终的采矿方法选择上向进路充填采矿法.

## 5 结论

1)根据簸箕田金矿地质条件、顶底板稳固性等方面进行了矿山开采方法初选,选出3种采矿方法分别为上向进路充填采矿法、上向水平分层充填采矿法、下向分层充填采矿法.

2)基于初选结果对3种采矿方法优选,结果表明,上向进路充填采矿法相较于其他2种方法采场最大位移更小,没有出现塑性区破坏.最终确定上向进路充填采矿法为簸箕田金矿开采最优方案,为簸箕田金矿开采提供了方法,对类似矿山采矿方法优选具有指导意义.

### 参考文献:

- [1] 张见,余小明,尚振华,等.复杂不稳固矿体二步骤开采优化研究[J].采矿技术,2020,20(1):5-7.
- [2] 李新成,于振,周士霖,等.高效缓倾斜中厚矿体采矿方法研究[J].采矿技术,2020,20(3):8-10.
- [3] 张胜光,廖文景.缓倾斜中厚矿体安全高效采矿方法工艺技术应用[J].采矿技术,2020,20(3):1-3.
- [4] 杨宁,尹贤刚,雷江龙,等.基于MOT的采矿方法优选研究[J].采矿技术,2017,17(5):8-10.
- [5] 杜永亮.基于云模型理论的采矿方法优选研究[J].采矿技术,2017,17(6):3-5.
- [6] 陶明,罗福友.基于层次分析法与模糊数学的采矿方法优选[J].采矿技术,2016,16(3):14-17.
- [7] 宋霞飞,王志勇.基于集对分析同一度的采矿方法最优选择[J].采矿技术,2014,14(3):12-15.
- [8] 杨宁,尹贤刚,林尧,等.密切值法在采矿方法优选中的研究与应用[J].采矿技术,2017,17(6):1-2.
- [9] 陈烈,陈星明,韩方建.改进AHP在采矿方法优选中的应用[J].化工矿物与加工,2019,48(7):1-5.
- [10] 谭富生,王初步.组合赋权与TOPSIS在采矿方法优选中的应用[J].矿业研究与开发,2016,36(10):31-34.
- [11] 罗聘.某磷矿山采矿方法的变更与优化[J].矿业研究与开发,2018,38(11):1-5.
- [12] 马少维.基于改进型AHP-TOPSIS评判模型的采矿方法优选[J].矿业研究与开发,2019,39(10):1-4.
- [13] 杨宁,尹贤刚,肖木恩,等. AHP-Fuzzy在采矿方法优选中的研究及应用[J].矿业研究与开发,2016,36(10):27-30.
- [14] 查道欢,钟文,罗建林,等.基于AHP-FUZZY的某锌金多金属矿采矿方法优选[J].矿业研究与开发,2019,39(9):6-11.
- [15] 杨宁,尹贤刚,肖木恩,等.基于AHP-UMT的采矿方法优选[J].矿业研究与开发,2017,37(10):57-61.
- [16] 杨宁,尹贤刚,肖木恩,等. GRA在采矿方法优选中的应用[J].矿业研究与开发,2017,37(1):11-14.
- [17] 周豪,赵周能,吴记.基于耦合定权与灰关联分析的采矿方法优选[J].化工矿物与加工,2020,49(7):11-15.
- [18] 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.
- [19] 朱明.千家坪钒矿急倾斜厚大矿体采矿方法优化研究[D].赣州:江西理工大学,2012.
- [20] 王腾.“三软”条件下金矿采场稳定性分析及结构参数优化研究[D].贵阳:贵州大学,2018.