doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.01.015

基于 Fuzzy-TOPSIS 的金矿床采矿方法优选

张居正[1],王 沉[1],朱获天[1],于骞翔[2]
(1. 贵州大学 矿业学院,贵阳 550025;2. 北京矿冶研究总院,北京 102628)

摘 要:针对工程地质条件为复杂隐伏大型金矿床簸箕田金矿,通过数学模糊法对其采矿方法优选。首先,在初选的四种采矿方法基础上,使用逼近理想解的排序法对其指标量化,建立矩阵计算的正理想解的欧氏距离,从而得出根据贴合度确定四种采矿方法最终的优劣顺序;其次,通过数值模拟,对得到的最大应力场分布及塑性区分布分析,得到初选四种采矿方法的优劣顺序。结果表明,上向进路充填采矿法是簸箕田金矿最优采矿方法,为簸箕田金矿采矿方法选择提供了参考,也为贵州地区同类型复杂黄金矿床的开采积累了经验。

关键词:采矿方法优选;数值模拟;数学模糊法;TOPSIS
中图分类号:TD863.1;TD853.34 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2023)01-0114-07

Mining Method Optimization of Gold Deposit Based on Fuzzy-TOPSIS

ZHANG Juzheng[1], WANG Chen[1], ZHU Huotian[1], YU Qianxiang[2]
(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 102628, China)

Abstract: In view of the engineering geological conditions of the Bojitian gold deposit with complex concealed large gold deposits, the mining method is optimized by mathematical fuzzy method. Firstly, on the basis of the four primary mining methods, the index is quantified by the ranking method of the approximate ideal solution, and the Euclidean distance of the positive ideal solution calculated by the matrix is established, so as to determine the final order of advantages and disadvantages of the four mining methods according to the fitting degree. Secondly, through numerical simulation, the distribution of the maximum stress field and plastic zone is analyzed, and the order of advantages and disadvantages of the four primary mining methods is obtained. The results show that the upward drift filling mining method is the optimal mining method of Bojitian gold deposit, which provides a reference for the selection of mining methods of Bojitian gold deposit and accumulates experience for the mining of similar complex gold deposits in Guizhou.

Key words: mining method optimization; numerical simulation; mathematical fuzzy method; TOPSIS

选择安全合理的采矿方案对于矿山企业来说具有重要意义,合理的采矿方法不仅对矿山的安全生产起着关键性的作用,还会对矿山的经济收益产生很大影响。在做采矿方法的选择时,需要从多方面

收稿日期:2022-06-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904081,52174072,51964008);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y042 号,黔科合基础-ZK[2021]一般 264,黔科合支撑[2021]一般 354)
Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51904081, 52174072, 51964008); Guizhou Provincial Science and Technology Foundation (Qian Ke He Zhi Cheng[2020]4Y042, Qian Ke He Ji Chu-ZK[2021]Yiban 264, Qian Ke He Zhi Cheng[2021]Yiban 354)
作者简介:张居正(1997—),男,硕士研究生,主要从事系统工程方向研究。
通信作者:王 沉(1989—),男,教授,主要从事采矿方法与岩层控制研究。
引用格式:张居正,王沉,朱获天,等. 基于 Fuzzy-TOPSIS 的金矿床采矿方法优选[J]. 有色金属工程,2023,13(1):114-120.
ZHANG Juzheng, WANG Chen, ZHU Huotian, et al. Mining Method Optimization of Gold Deposit Based on Fuzzy-TOPSIS[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 114-120.

考虑影响因素,因为各种因素所占权重千差万别,在传统采矿方法选择中往往采用操作简单却不精确的经验类比法。随着采矿行业的不断向现代化、数字化发展,对采矿技术要求越来越严格,经验类比法的不足之处愈发明显,优化理论的出现是大势所趋,优化理论因此逐渐被人接受并得以发展和推广。

优化理论逐渐被广泛应用,史太禄等[1]对模糊数学法在矿业中的使用做出研究,但对矿体特性的研究缺乏更为合理的描述方法。程光华等[2]在对模糊数学法于采矿方法优选过程中,把技术经济指标划分为定性和定量两个指标,但定性指标仍会由于其主观性对优选过程造成干扰。蔡汉玉等[3]针对龙桥铁矿残矿回收问题,构建层次分析法和模糊数学法的数学模型,优选出段空场嗣后充填法为最优结果。段军等[4]对某铁矿运用模糊数学法做出综合评判,较好地处理了判断一致性问题。杨力等[5]运用层次分析法和模糊数学针对石人沟特殊开采环境的采矿方法优选。叶海旺等[6-9]运用模糊数学理论和层次分析法使得优选方案具有较强的科学性和实用性。查到欢等[7-8]将层次分析法结合起来,以非金矿等金属矿为工程实例,在采矿方法优选的过程中,使得最优方案更为科学、合理。谭玉叶等[9]以程潮铁矿为工程背景采用模糊聚类法及层次分析法较好地解决了多因素决策的权重分配问题。

本文结合簸箕田 1 金矿的实际情况,为优选出具有良好经济价值且可行的采矿方法,对多种优选方法评判,最终决定采用基于模糊-逼近理想解排序法的采矿方法优选,再通过数值模拟验证,使得结果更加的合理可行,为簸箕田金矿实际工作提供了更好的参考。

1　开采技术条件简述

簸箕田 1 金矿是典型的隐伏大型金矿床,矿体大部分埋藏于地下,距离地表 200 m,矿体形状为似层状,可采标高为 633～1 106 m,主要由灰岩及粉砂岩组成,顶底板为黏土岩、黏土质粉砂岩、粉砂质黏土岩及炭质岩。矿体局部有夹层,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,岩体质量的区间为中等-差,顶底板稳固性的区间为中等-较差。

2　采矿方法优选

2.1　采矿方法初选

簸箕田 1 金矿的顶板稳固性较差,若采用空场法会出现冒顶,从而具有安全隐患,若采用崩落法会导致地表沉陷从而对地表村庄造成巨大影响。因此根据簸箕田 1 金矿的地质条件,结合先前的开采实践和开采技术条件可以考虑的合适的采矿方法有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和阶段空场嗣后充采矿填法。

2.2　基于模糊-逼近理想解排序法的采矿方法优选

逼近理想解的排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution,系文统称 TOPSIS)是一种多属性决策方法。TOPSIS 方法是在充分利用原始数据信息基础上,对若干个评价方案与理想化对象的接近程度进行排序,据此在现有方案中评价相对优劣,评估结果能较准确反映各评价对象之间的差距。这种方法的基本思想是通过比较评价对象到各方案的距离,距离越近方案越优。方法被广泛的作为一种定量效能评估算法,切实反映原始参数数据信息的差异性,评估结果容易使人信服。

根据 TOPSIS 法建立评价模型,计算步骤如下。

1)建立计算结构模型(图 1)

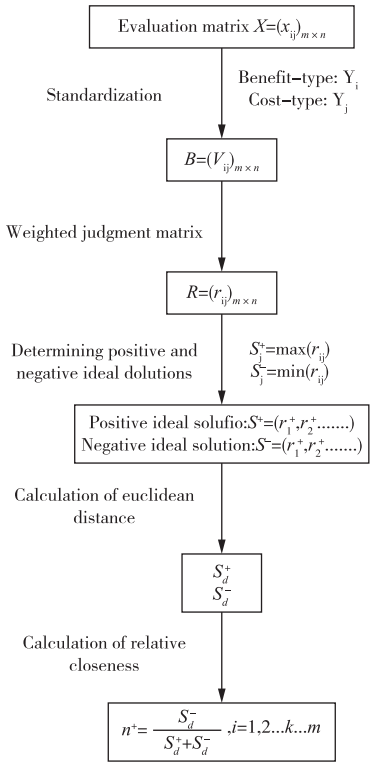


图 1　TOPSIS 模型计算流程

Fig. 1　Calculation flow of TOPSIS model

2)模糊集理论指标量化

在影响采矿方法的众多因素中进行层层筛选,选取适当的评价指标,考虑到指标的选取要有代表

性，所以指标种类包含定量指标和定性指标两种，选择采场生产能力(a_1)、贫化率(a_2)、损失率(a_3)、采出品位(a_4)、采切比(a_5)、作业安全程度(a_6)和通风情况(a_7)7 项因素作为初选的指标。四种采矿方法的评价指标如表 1 所示，分别用 A_1、A_2、A_3、A_4代表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、阶段空场嗣后充采矿填法。指标层中含有不能精确定量的指标，包括作业安全程度(a_6)和通风情况(a_7)，为了实现该类指标的定量管理引入模糊集理论实现对该类指标的量化。

表 1 采矿方法评价指标

Table 1 Evaluation index of mining method

Mining method	$a_1/(t\cdot d^{-1})$	$a_2/\%$	$a_3/\%$	$a_4/(g\cdot t^{-1})$	$a_5/(m^3\cdot kt^{-1})$	a_6	a_7
A_1	60	8.00	9	4.85	54.42	Good	General
A_2	50	10.00	5	4.70	62.13	Good	Good
A_3	54	9.18	6.64	4.82	58.96	General	General
A_4	56	9.00	12.00	4.83	56.64	Good	General

设 $f(x)$为关于模糊数 x 的隶属函数，其中：

$x=(m,a,b)_{LR}$，即 $m-a<x<m+b$，

且 $f(x)\in[0,1]$ (1)

式中，$(m,a,b)_{LR}$为 x 的区间，$f(x)$在$(m-a,m)$范围内为线性单调递增，在$(m,m+b)$范围内与线性单调递减函数。针对本决策问题中的模糊指标，拥有 5 个评价选择，分别为 $VG(1,0.25,0)_{LR}$，$G(0.75,0.25,0.25)_{LR}$，$M(0.5,0.25,0.25)_{LR}$，$B(0.25,0.25,0.25)_{LR}$，$VB(0,0,0.25)_{LR}$，如图 2 所示。

针对给出的模糊数，利用 Yager 指数的计算方法进行计算。

$$f(x)=F(m,a,b)=(3m-a+b)/3 \quad (2)$$

并将得到的 Yager 指数带入初始判断矩阵 $\boldsymbol{A}$，Yager 指数法去模糊化可以得到各模糊指标对应的模糊表达值，见表 2。

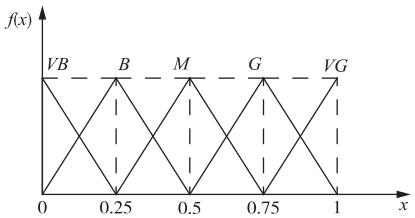


图 2 模糊指标表达示意图

Fig. 2 Diagram of fuzzy index expression

表 2 评价指标的模糊表达值

Table 2 Fuzzy expression of evaluation index

Numbering	Attribute value	Degree of safety	Ventilation conditions	Yager idex
VG	$(1,0.25,0)_{LR}$	Goodliness	Goodliness	0.917
G	$(0.75,0.25,0.25)_{LR}$	Good	Good	0.750
M	$(0.5,0.25,0.25)_{LR}$	General	General	0.500
B	$(0.25,0.25,0.25)_{LR}$	Worse	Worse	0.250
VB	$(0,0,0.25)_{LR}$	Bad	Bad	0.083

3)对评价矩阵进行标准化处理

根据表 3 的数据，以及通过模糊集理论定性指标量化后，将所甄选出的指标与数据带入矩阵运算，对所得结果进行标准化处理后即得到评价矩阵 $\boldsymbol{X}$。

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 60 & 50 & 54 & 56 \\ 8 & 10 & 9.18 & 9 \\ 9 & 5 & 6.64 & 12 \\ 4.85 & 4.7 & 4.82 & 4.83 \\ 54.42 & 62.13 & 58.96 & 56.64 \\ 4 & 4 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 3 & 3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4)对评价矩阵进行标准化处理

根据公式无量纲化处理对这些指标：

$$v_{ij}=\frac{x_{ij}-\min x_j}{\max x_j-\min x_j},\ v_{ij}=\frac{\max x_j-x_{ij}}{\max x_j-\min x_j} \quad (4)$$

式中，v_{ij} 为指标无量纲化结果，由语气算子和相对隶属度关系计算，得出如下结果：

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} 1 & 0.833 & 0.9 & 0.933 \\ 1 & 0.8 & 0.871 & 0.889 \\ 0.556 & 1 & 0.753 & 0.417 \\ 1 & 0.969 & 0.994 & 0.998 \\ 0.876 & 1 & 0.949 & 0.912 \\ 0.538 & 0.538 & 0.333 & 0.538 \\ 0.429 & 0.667 & 0.429 & 0.429 \end{bmatrix} \quad (5)$$

5)构建加权判断矩阵

由 4)计算得出矩阵 $\boldsymbol{V}$。

表 3　*P-a* 组合权重

Table 3　*P-a* Combination Weight

P-a	P_1	P_2	P_3	Combination weight
	0.400	0.400	0.200	W
a_1	0.259 4			0.103 8
a_2	0.384 0			0.153 6
a_3	0.052 7			0.021 1
a_4	0.053 8			0.021 5
a_5	0.250 0			0.100 0
a_6		1		0.400
a_7			1	0.200

根据层次分析法(Analytic Hierarchy Process)得出的指标相对权重(表 3),再根据式(6),可以得出其加权判断矩阵 R。

$$r_{ij}=v_{ij}\cdot w_j(i=1,2,\cdots,k,\cdots,m\ ;j=1,2,\cdots,k,\cdots,n) \tag{6}$$

$$R=\begin{bmatrix}0.1038 & 0.0865 & 0.0934 & 0.0968\\ 0.1536 & 0.1229 & 0.1338 & 0.1366\\ 0.0117 & 0.0211 & 0.0159 & 0.0088\\ 0.0215 & 0.0208 & 0.0214 & 0.0215\\ 0.0876 & 0.1000 & 0.0949 & 0.0912\\ 0.2152 & 0.2152 & 0.1332 & 0.2152\\ 0.0858 & 0.1334 & 0.0858 & 0.0858\end{bmatrix} \tag{7}$$

6)计算正负理想解

根据式(9)得出指标的最优值和最劣值为正负理想解:

$$\begin{cases}s_j^+=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{r_{ij}\},j=1,2,\cdots,k,\cdots,n\\ s_j^-=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{r_{ij}\},j=1,2,\cdots,k,\cdots,n\end{cases} \tag{8}$$

式中,S_j^+ 是正理想解,S_j^- 是负理想解,正负理想解的具体情况如表 4 所示。

表 4　各采矿指标正负理想解

Table 4　Positive and negative ideal solutions of each mining index

Index	Positive ideal solution	Negative ideal solution
Production capacity of mining field	0.103 8	0
Dilution ratio	0.153 6	0
Loss rate	0.021 1	0
Extraction	0.021 5	0
Shear ratio	0.100 0	0
Operational safety	0.400 0	0
Ventilation conditions	0.200 0	0

7)计算各方案欧氏距离及贴近度

根据式(9)计算各待评价采矿方法与正负理想解的欧氏距离。

$$Sd_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(s_j^+-r_{ij})^2},i=1,2,\cdots,k,\cdots,m,$$

$$Sd_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(s_j^--r_{ij})^2},i=1,2,\cdots,k,\cdots,m, \tag{9}$$

可由式(10)计算出各待评价采矿方法的相对贴近度。

$$n_i^+=\frac{Sd^-}{Sd_i^++Sd_i^-},i=1,2,\cdots,k,\cdots,m \tag{10}$$

式中,Sd_i^+ 为正理想解的欧式距离,Sd_i^- 为负理想解的欧式距离,n_i^+ 为各待评价采矿方法的相对贴近度,结果如表 5 所示。

表 5　各采矿方法与正负理想解的欧氏距离及贴近度

Table 5　Euclidean distance and closeness between each mining method and positive and negative ideal solution

Mining method	Euclidean distance		Accessible degree
	Sd_i^+	Sd_i^-	
A_1	0.217 8	0.310 3	0.587 6
A_2	0.199 6	0.312 4	0.610 2
A_3	0.291 7	0.247 9	0.459 4
A_4	0.218 8	0.300 9	0.579 0

贴近度表示两个模糊子集间相似程度的一种度量,可用于进行模式识别与情报检索,也可用于优化综合判决中的权重。根据表 5 的结果按照贴近度数值从大到小的顺序对四种采矿方法的贴近度数排序,贴近度数值越大即方案越合理,通过比较贴近度的大小筛选出进度最大者为最合理方案,得出四种采矿方法的优劣顺序为:A_2,A_1,A_4,A_3。

2.3　数值模拟

2.3.1　模型建立

基于 FLAC^{3D}能够在三维空间上模拟岩体等力学特性,选择 FLAC^{3D}作为数值模拟手段。在数值模拟模型建立过程中充分结合簸箕田金矿的地质资料、金矿矿体赋存条件以及现场实际调研结果,建立结构为矿体顶底板主体为黏土岩、矿体为石灰岩的

模型。

最终模型的参数为上部为黏土岩，走向长度 100 m，倾向长度 100 m，矿体倾角为 15°。采用摩尔-库伦准则模型，固定模型的前后左右和下部边界。根据上覆 200 m 岩层重量进行计算。模型初始单元见图 3。

2.3.2 回采过程模拟结果分析

1)最大主应力场分布分析

开挖后，选取采场顶板、围岩为研究对象，对四种采矿方法的最大主应力场分布分析，可以得到上向进路充填采矿法的最大主应力受工程扰动影响最小。最大主应力场分布见图 4。

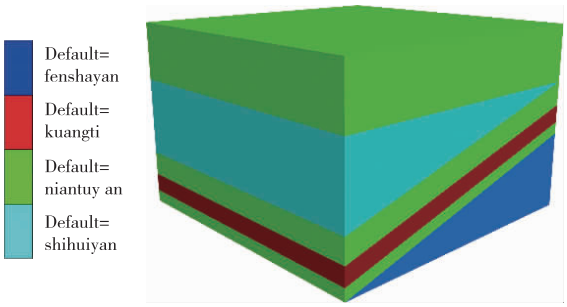
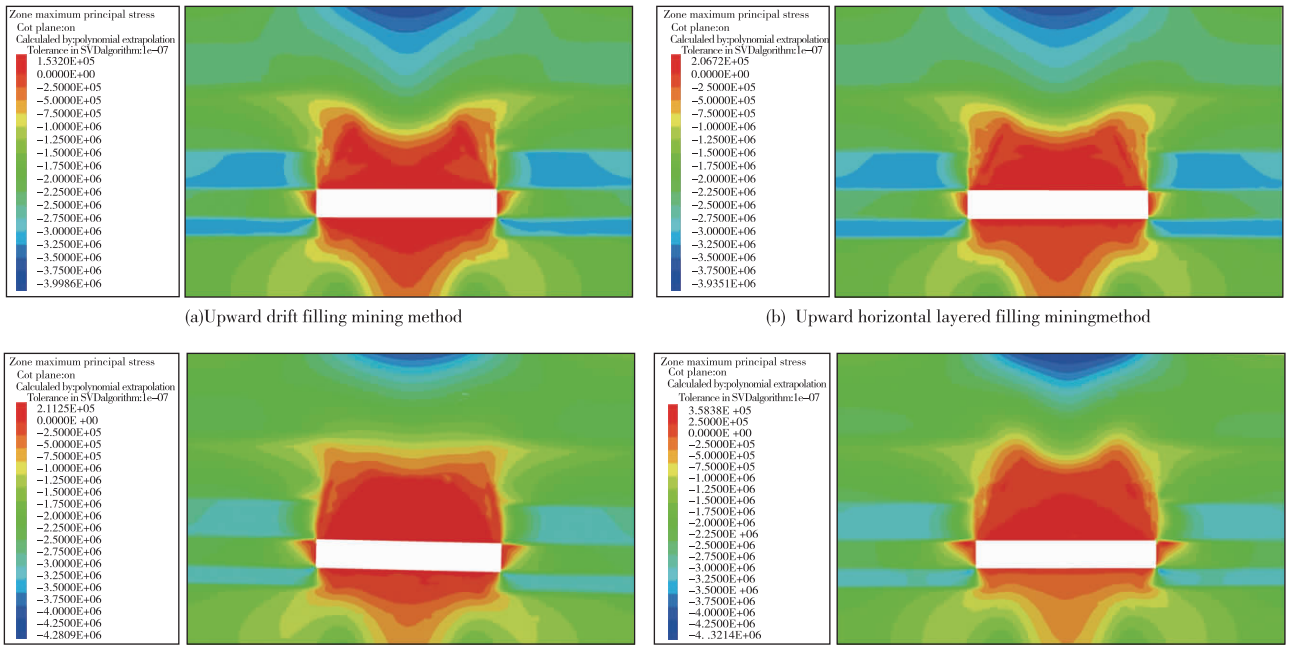


图 3 矿体初始模型

Fig. 3 Initial model of ore body



(a)Upward drift filling mining method

(b) Upward horizontal layered filling miningmethod

(c)Downward slicing filling mining method

(d)Phase house subsequent filling mining method

图 4 各采矿方法最大主应力场分布图

Fig. 4 Distribution map of maximum stress field of each mining method

根据四种采矿方法最大主应力场分布图 4，采场开挖后，周围围岩岩体受到采动影响，其内部应力场发生了新的变化，主要表现为分段顶底板岩体和两帮岩体最大应力呈现降低，其中，上向水平分层充填采矿法最大应力和下向分层充填采矿法最大主应力均匀变化比较平稳，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。上向进路充填采矿法顶底板最大主应力为 1.02 MPa，为拉应力，集中在分层采场顶底板中部。上向水平分层充填采矿法最大主应力为 1.51 MPa，也是集中在分层采场顶底板中部，为拉应力。下向分层充填采矿法最大主应力最大拉应力 1.42 MPa，集中在分段采场中部。阶段矿房嗣后充填采矿法顶底板最大主应力为 1.78 MPa，集中在分段采场中部。四种采矿方法的拉应力都没有超过顶底板岩石的最大抗拉强度和最大抗压强度，且分段开采后采场顶底板和两帮都处于稳定状态。上向进路充填采矿法分段采场顶底板最大拉应力小于其余四种采矿方法的顶底板最大拉应力，最大主应力变化比较平稳，采场相对更稳定。

2)塑性区分布对比分析

对四种采矿方法的塑性区分布云图进行分析，可以得到所选取方法的分段采场和两帮均未出现塑性破坏现象，且塑性区变形最小的是上向进路充填采矿法。塑性区分布见图 5。

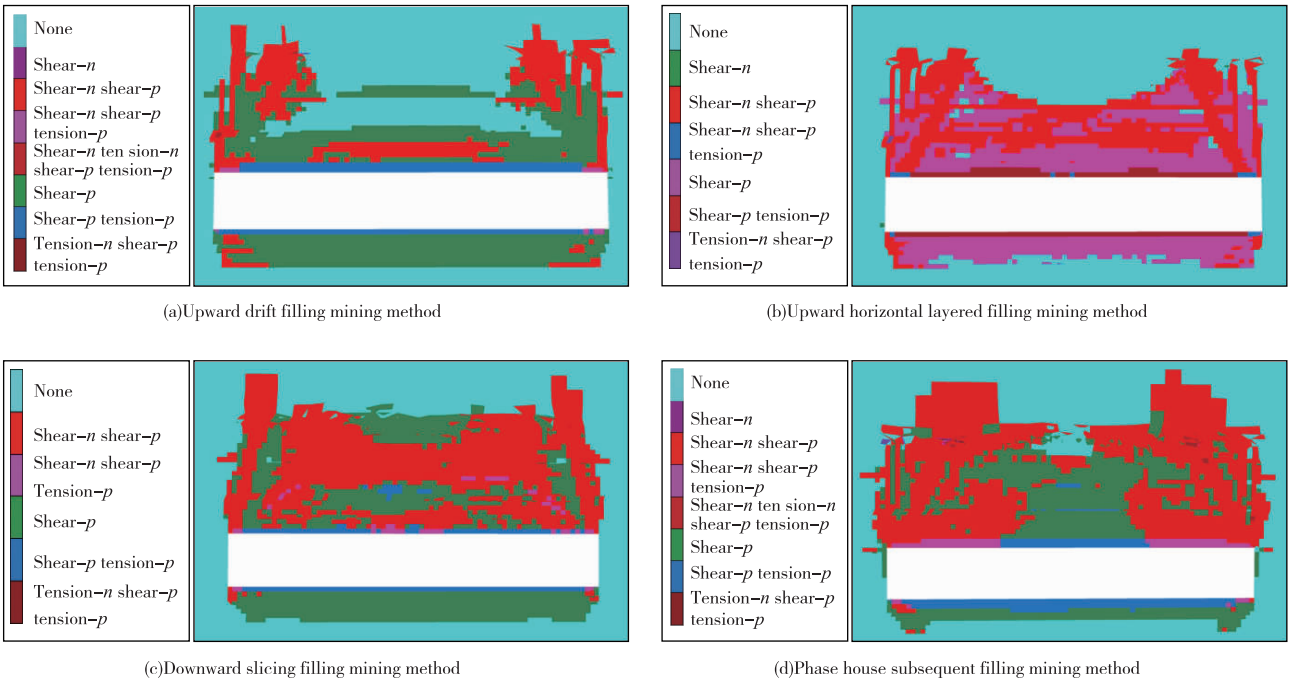


图 5　各采矿方法塑性区分布图

Fig. 5　Plastic zone distribution map of each mining method

根据四种采矿方法塑性区分布图 5,得到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,采场两帮也出现了塑性区,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,两帮也出现了塑性区,上向水平分层充填采矿法采场两帮的塑性区最大,阶段矿房嗣后充填采矿法顶底板出现了塑性区两帮最大。四种采矿方法分段采场和两帮均未出现塑性破坏,其中上向进路充填采矿法塑性区变化最小。

3　结论

1)通过查阅相关文献以及对现场的考察,获得了相关的指标,构建了评价指标体系。运用模糊-逼近理想解排序法,获得初选四种采矿方法的贴近度分别为 0.587 6,0.610 2,0.459 4,0.579 0,比较贴近度的大小,得到簸箕田金矿的最优开采方法为上向进路充填采矿法。

2)对四种采矿方法采场回采进行数值模拟,得出四种采矿方法都满足安全采矿要求。模拟结果显示上向水平分层充填采矿法最大主应力为 1.51 MPa,且其塑性区变化最小。结合采矿方法的优选,确定最终的采矿方法为上向进路充填采矿法。

参考文献:

[1]　史太禄,任凤玉,李文增,等. 模糊数学在采矿方法优选中的应用[J]. 金属矿山,2007(11):29-31.
SHI Tailu, REN Fengyu, LI Wenzeng, et al. Application of fuzzy mathematics in mining method optimization[J]. Metal Mine,2007(11):29-31.

[2]　程光华,宋卫东,张永林,等. 模糊数学在山后矿区采矿方法优选中的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2013,65(5):20-23.
CHENG Guanghua, SONG Weidong, ZHANG Yonglin, et al. Application of fuzzy mathematics in optimization of mining method in Shanhou mining area[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2013,65(5):20-23.

[3]　蔡汉玉,张耀平,雷大星. 基于层次分析法与模糊数学的残矿回收方法优选研究[J]. 矿业研究与开发,2016,36(5):7-9.
CAI Hanyu, ZHANG Yaoping, LEI Daxing. Optimization of residual ore recovery method based on analytic hierarchy process and fuzzy mathematics[J]. Mining Research and Development,2016,36(5):7-9.

[4]　段军,梁智广,岳洪辉. 基于模糊层次分析法的采矿方法优选[J]. 化工矿物与加工,2017,46(12):53-56.
DUAN Jun, LIANG Zhiguang, YUE Honghui. Optimization of mining methods based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Chemical Minerals and Processing,2017,46(12):53-56.

[5] 杨力,王新民,赵建文.石人沟露天转地下采矿方法优化选择[J].金属矿山,2011(7):19-23.
YANG Li,WANG Xinmin,ZHAO Jianwen. Shirengou open-pit to underground mining method optimization selection[J]. Metal Mine,2011(7):19-23.

[6] 叶海旺,常剑.基于模糊决策和层次分析法的采矿方法选择[J].武汉理工大学学报,2009,31(8):145-148,153.
YE Haiwang,CHANG Jian. Mining method selection based on fuzzy decision and analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2009,31(8):145-148,153.

[7] 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.
CHA Daohuan,ZHONG Wen,LUO Jianlin,et al. Optimization of mining method for a zinc-metal polymetallic ore based on AHP-FUZZY[J]. Mining Research and Development,2019,39(9):6-11.

[8] 王新民,赵彬,张钦礼.基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J].中南大学学报(自然科学版),2008(5):875-880.
WANG Xinmin,ZHAO Bin,ZHANG Qinli. Mining method selection based on analytic hierarchy process and fuzzy mathematics[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2008(5):875-880.

[9] 谭玉叶,宋卫东,雷远坤,等.基于模糊聚类及层次分析法的采矿方法综合评判优选[J].北京科技大学学报,2012,34(5):489-494.
TAN Yuye,SONG Weidong,LEI Yuankun,et al. Comprehensive evaluation and optimization of mining methods based on fuzzy clustering and analytic hierarchy process[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology,2012,34(5):489-494.

(编辑 郭文晶)