

# 基于指标满意度的多层矿体回采顺序数值模拟

邓红卫, 黄伟, 胡普仑, 高峰

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 回采顺序是采矿工程的重要研究内容之一,合理的回采顺序对采场稳定性和采场生产能力有重要影响。针对老厂 13-8# 矿群多层矿体的赋存特点和开采技术条件,采用 3Dmine-MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合的数值模拟方法,对多层矿体回采顺序进行数值模拟,提出了 4 种回采顺序优化方案:下向下行式、下向上行式、上向下行式、上向上行式,并从应力场、位移场、塑性区 3 方面综合考虑,得到了 4 种回采顺序优化方案的模拟结果;运用基于指标满意度的多指标综合评价模型对模拟结果进行满意度分析。结果表明,4 种回采顺序优化方案的多指标综合满意度分别为 0.684,0.641,0.653 和 0.683。其中,上向上行式开采方式的满意度为 0.683,因此,上向上行式开采在理论上可行。

**关键词** 指标满意度;多层矿体;回采顺序;数值模拟

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.005

## Numerical Simulation of Multilayer Orebody Mining Sequence Based on the Index Contentment Degree

DENG Hongwei, HUANG Wei, HU Pulun, GAO Feng

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Abstract Mining sequence is one of the important research contents for mining engineering. Different secondary stress field would be formed with different mining process and filling sequence. By means of reasonable arrangement and adjustment of the mining sequence of orebody, the stress distribution of the surrounding rock is able to be remarkably changed, the current excavated working face is able to be in the stress-reduced area and the phenomenon of stress concentration in course of mining process could be also avoided. Rational mining sequence is able to largely improve the stability of stope and the security of working face. According to multilayer orebody occurrence characteristics and mining technical conditions of Laochang 13-8# ore groups, by using 3Dmine-MIDAS-GTS-FLAC<sup>3D</sup> coupled numerical simulation method, numerical simulation study on the mining sequence of multilayer orebody is carried out and four kinds of optimization schemes of multilayer orebody mining sequence are put forward, namely, downward mining from upper to lower, overhead mining from upper to lower, downward mining from lower to upper, and overhead mining from lower to upper. By applying the multi-index comprehensive evaluating model based on index contentment degree and considering stress fields, displacement fields, and crack fields comprehensively, the four multi-index comprehensive contentment degrees of the optimization schemes for mining sequence are 0.684, 0.641, 0.653, and 0.683, respectively. The contentment degree of the overhead mining from lower to upper is 0.683. Therefore, the result indicates that the overhead mining from lower to upper is feasible in the theory.

**Keywords** index contentment degree; multilayer orebody; mining sequence; numerical simulation

### 0 引言

地下矿床开采过程的实质是应力场和位移场不断转移和重新分布的过程,矿体开采会破坏原有的应力平衡状态,

不同的回采过程和充填顺序会形成不同的次生应力场<sup>[1,2]</sup>。通过合理安排、调整矿体的回采顺序,可以显著改变开挖后围岩的应力分布状态,在很大程度上提高采场的稳定性和回采

收稿日期:2012-10-30;修回日期:2013-01-06

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51204205);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB14B01)

作者简介:邓红卫,副教授,研究方向为非传统采矿工艺和矿山安全技术,电子邮箱:denghw208@126.com

工作面的安全性。国内外许多专家对回采顺序优化进行了多方面研究,传统的相似模型试验、半工业试验以及现场工业试验<sup>[3,4]</sup>都会消耗大量的人力、物力和财力,且很难实现多种回采方案的比较。随着计算机技术的不断发展,数值模拟计算方法已广泛应用于采矿工程,FLAC<sup>3D</sup>、ANSYS、ADINA、MIDAS/GTS、RFPA<sup>2D</sup>、UDEC 等数值模拟软件在回采顺序优化、采场稳定性分析等<sup>[5-9]</sup>方面都发挥着重要的作用。

长期以来,基本上都是从应力、位移、塑性区三方面对回采顺序数值模拟结果进行分析,这是一个多指标综合评价问题<sup>[10,11]</sup>。然而,在回采顺序综合评价的决策过程中,应力、位移、塑性区三者在同一采场很难同时达到最优。另外,在回采顺序的多步开挖过程中,很难实现某一方案在多个采场同时达到最优。因此,仅仅通过考查每个方案的最大主应力、最大位移、最大塑性区来判断不同回采顺序的优劣就显得比较牵强。Simon 提出“满意度”的概念,用满意决策代替最优决策,使评价结果更合理,并成功应用在多个领域<sup>[12,13]</sup>。鉴于此,本文结合数值模拟方法,将指标满意度应用于多层矿体回采顺序的多指标综合评价,得到不同回采顺序的多指标综合满意度,进而提出了多层矿体的最佳回采顺序。

## 1 多指标综合评价模型

### 1.1 指标满意度

**定义 1** 设在多方案评价中,各方案的指标  $A_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ),所有指标组成论域  $X$ ,第  $i$  个方案中所得到的某指标  $A_j$  的值  $x_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) 为  $X$  中的元素,对于任意的  $x_{ij} \in X$ ,给定映射:

$$\begin{aligned} X &\rightarrow f_{A_j}(x_{ij}) \in [0,1] \\ X &\rightarrow [0,1] \end{aligned}$$

称“偶序”组成的模糊集合  $\tilde{A}_j = \{(x_{ij} | f_{A_j}(x_{ij}))\}$ ,  $\forall x_{ij} \in X$  为  $X$  上的满意子集,称隶属函数  $f_{A_j}(x_{ij})$  为  $x_{ij}$  对  $\tilde{A}_j$  的  $A_j$  指标满意度函数;对于具体的  $x_{ij}$  而言,隶属度  $f_{A_j}(x_{ij})$  称为  $x_{ij}$  对  $\tilde{A}_j$  的  $A_j$  指标满意度。若  $f_{A_j}(x_{ij})=1$ ,表示  $x_{ij}$  完全隶属于  $\tilde{A}_j$ ,即满意;若  $f_{A_j}(x_{ij})=0$ ,表示  $x_{ij}$  完全不隶属于  $\tilde{A}_j$ ,即不满意。

**定义 2** 设在多方案评价中,第  $i$  个方案所得到的各指标满意度集合  $\tilde{B}_i = \{f_{A_j}(x_{ij}), j=1,2,\dots,n\}$ ,  $i=1,2,\dots,m$ ,组成论域  $Y$ ,对于任意的  $\tilde{B}_i \in Y$ ,给定映射:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_i &\rightarrow f(\tilde{B}_i) \in [0,1] \\ Y &\rightarrow [0,1] \end{aligned}$$

称“偶序”组成的模糊集合  $\tilde{C} = \{\tilde{B}_i | f(\tilde{B}_i)\}$ ,  $\forall \tilde{B}_i \in Y$  为  $Y$  上的综合满意子集,称隶属函数  $f(\tilde{B}_i)$  为  $\tilde{B}_i$  对  $\tilde{C}$  的多指标综合满意度函数;对于具体的  $\tilde{B}_i$  而言,  $f(\tilde{B}_i)$  称为  $\tilde{B}_i$  对  $\tilde{C}$  的第  $i$  个方案的多指标综合满意度。

### 1.2 多指标综合评价模型

基于指标满意度的多指标综合评价模型构建过程如下。

(1) 设有  $m$  个待评价方案,每个方案有  $n$  个评价指标来描述对象的属性,用  $x_{ij}$  表示第  $i$  个方案的第  $j$  个指标值,则原始指标模糊关系矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 将原始指标模糊关系矩阵转换为指标满意度矩阵。

对于效益型指标,选用如下指标满意度函数:

$$f_{x_{ij}} = \frac{x_{ij} - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中,  $x_{ij}$  为第  $i$  个方案的第  $j$  个指标值;  $x_{i\min}$  为第  $i$  个方案的最小指标值;  $x_{i\max}$  为第  $i$  个方案的最大指标值。

对于成本型指标,选用如下指标满意度函数:

$$f_{x_{ij}} = \frac{x_{i\max} - x_{ij}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

转换后得到指标满意度矩阵:

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} f_{x_{11}} & f_{x_{12}} & \cdots & f_{x_{1n}} \\ f_{x_{21}} & f_{x_{22}} & \cdots & f_{x_{2n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{x_{m1}} & f_{x_{m2}} & \cdots & f_{x_{mn}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 对于每个指标,用权重  $\omega_j$  表征其重要度,并且有  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0$ 。其中,每个指标的权重根据专家经验选取。

(4) 根据模糊关系综合评价方法,得到多指标综合满意度:

$$\tilde{R} = \tilde{E} \times W^T = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T \quad (5)$$

$\tilde{R}$  的第  $i$  个分量  $r_i$  表示第  $i$  个方案总体上的综合满意隶属情况。 $r_i$  越大,相应的满意度也越高,该方案越优越。

## 2 多层矿体回采顺序数值模拟

### 2.1 矿山概况

老厂分矿是云南锡业集团(控股)有限责任公司下属的坑下脉矿、地表砂矿采选联合的大型有色矿山企业。13-8# 矿群是老厂矿田白龙井矿段的一部分,主要赋存于花岗岩凹陷构造带的变玄武岩中,凹陷带内矿体连续性好,规模大,矿体空间总体呈多层状重叠产出,7 个矿体分别为 13-8-1、13-8-2、13-8-3、13-8-4、13-8-5、13-8-6 和 13-8-7。各层矿体之间的夹石厚度较小,有的甚至不到 10m。矿体走向北西,总体上南西高北东低,向北东倾斜,倾角  $0^\circ \sim 19^\circ$ ,平均  $10^\circ$ 。勘探控制范围矿体宽 35~321m,长 100~550m,矿体最大厚度达 21.9m,单层平均厚度为 2.5~11.5m,埋深 700m 左右。矿体顶底板岩石为大理岩、变玄武岩或花岗岩,大理岩稳固,变玄武岩和花岗岩中

等稳固至不稳固,硫化矿稳固。矿体规模大、形态简单、厚度稳定,主要有用组份含量均匀,均为硫化矿体。老厂 13-8# 矿群属于典型的深埋缓倾斜薄-中厚多层矿体,是矿业界公认的难采矿体。根据以往的工程经验,制约此类矿体安全、高效、低成本开采的因素有很多,其中多层矿体之间的开采顺序和相互影响是关键。因此,选择合理的回采顺序尤为重要。

2.2 数值计算模型

2.2.1 3Dmine-MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模

本文充分考虑 3Dmine、MIDAS/GTS 和 FLAC<sup>3D</sup> 各自在建立实体模型、网格划分和计算分析等方面的优势,利用 MIDAS/GTS 转 FLAC<sup>3D</sup> 接口程序,高效、快速构建了数值计算模型<sup>[4]</sup>。3Dmine-MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模流程如图 1 所示。

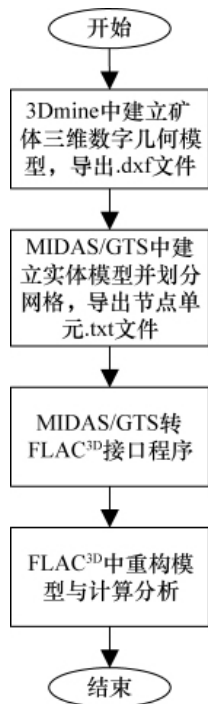
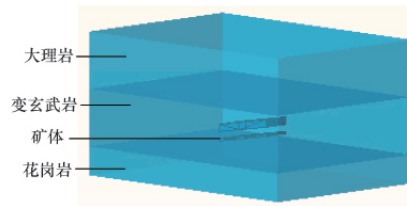
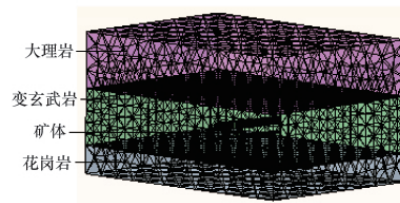


图 1 3Dmine-MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模流程  
Fig. 1 Flowchart of 3Dmine-MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> coupled modeling

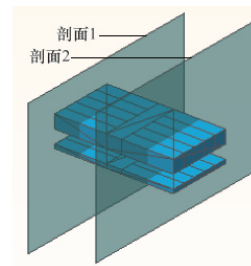
充分考虑矿体赋存的实际情况及数值模拟对计算机软硬件的要求,整个矿群 7 层矿体模型只选择具有代表性的 2 层矿体:上层中厚矿体,尺寸为 92m×40m×10m;下层薄矿体,尺寸为 92m×40m×3m。中间夹石厚度 10m,矿体倾角 12°,模型上部为大理岩、中部为变玄武岩、下部为花岗岩。根据圣维南原理,围岩足够大才能消除局部效应的影响,取模型尺寸为矿体尺寸的 3~5 倍<sup>[5]</sup>。建立的数值计算模型共有 30580 个节点和 177440 个四面体单元。模型边界条件采用位移约束方式:模型四周和底部边界进行位移约束,且由于该矿群埋深 700m 左右,模型没有建到地表,顶部施加 15.6MPa 的自重荷载。三维数值计算模型如图 2 所示。



(a) 三维实体模型  
(a) 3D solid model



(b) 三维网格模型  
(b) 3D mesh model



(c) 分析特征剖面  
(c) Analysis of the characteristic section

图 2 三维数值计算模型

Fig. 2 3D model of numerical calculation

2.2.2 岩体破坏准则

计算区域涉及的岩体(上盘大理岩、矿体赋存的变玄武岩、下盘花岗岩)、矿体、废石胶结充填体均属弹塑性材料,适用莫尔-库仑破坏准则,其力学模型为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} \quad (6)$$

式中,σ<sub>1</sub>、σ<sub>3</sub> 分别为最大和最小主应力,MPa;c 为材料内聚力,MPa;φ 为内摩擦角,°;f<sub>s</sub> 为破坏判断系数。当 f<sub>s</sub> ≥ 0 时,材料处于塑性流动状态;当 f<sub>s</sub> ≤ 0 时,材料处于弹性变形阶段。

2.2.3 矿岩物理力学参数

数值模拟中涉及大理岩、变玄武岩、花岗岩、硫化矿、充填体等 4 种矿岩和 1 种充填体。结合室内岩石力学实验和国内外专家提出的各种工程折减法<sup>[6]</sup>,抗拉强度、弹性模量一般折减至 1/3,黏聚力一般折减至 1/7~1/10,经工程折减后的矿岩物理力学参数如表 1 所示。

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of ores and rocks

岩性	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	体积模量/(10 <sup>4</sup> MPa)	剪切模量/(10 <sup>4</sup> MPa)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
大理岩	2.75	3.52	1.52	2.4	45	1.5
变玄武岩	3.00	3.21	1.50	1.7	48	0.8
硫化矿	3.69	4.71	2.92	1.9	45	1.2
花岗岩	2.46	2.42	1.52	1.9	41	0.8
充填体	2.25	1.32	0.58	0.8	35	0.3

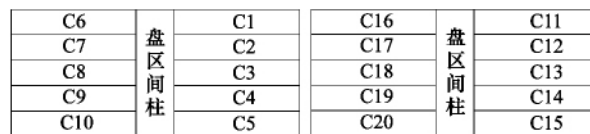
2.3 数值模拟方案

对于多层矿体的回采顺序, 主要考虑以下两个方面: 一是多层矿体之间上下层的回采顺序, 有上向开采和下向开采两种方式; 二是同层矿体不同阶段的回采顺序, 有上行开采和下行开采两种方式。目前, 关于同阶段采场回采顺序的研究较多, 推荐从高端向低端的开采方式。结合建立的模型, 上下两层矿体采场布置形式如图 3 所示。

4 种回采顺序数值模拟方案见表 2。

方案 1: 下向下行式开采, 即多层间由上至下, 同层不同阶段从上至下, 同阶段各采场从高端向低端隔一采一充一。

方案 2: 下向上行式开采, 即多层间从上至下, 同层不同阶段从下至上, 同阶段各采场从高端向低端隔一采一充一。



(a) 上层中厚矿体 (b) 下层薄矿体  
(a) Thick orebody in the upper layer (b) Thin orebody in the under layer

图 3 采场布置形式

Fig. 3 Layout of stope

方案 3: 上向下行式开采, 即多层间从下至上, 同层不同阶段从上至下, 同阶段各采场从高端向低端隔一采一充一。

方案 4: 上向上行式开采, 即多层间从下至上, 同层不同阶段从下至上, 同阶段各采场从高端向低端隔一采一充一。

表 2 4 种数值模拟方案开采顺序

Table 2 Mining sequences of four numerical simulation solutions

开采时步	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
0	初始应力场, 位移清零	初始应力场, 位移清零	初始应力场, 位移清零	初始应力场, 位移清零
1	开采 C1, 充填 C1	开采 C6, 充填 C6	开采 C11, 充填 C11	开采 C16, 充填 C16
2	开采 C3, 充填 C3	开采 C8, 充填 C8	开采 C13, 充填 C13	开采 C18, 充填 C18
3	开采 C5, 充填 C5	开采 C10, 充填 C10	开采 C15, 充填 C15	开采 C20, 充填 C20
4	开采 C2, 充填 C2	开采 C7, 充填 C7	开采 C12, 充填 C12	开采 C17, 充填 C17
5	开采 C4, 充填 C4	开采 C9, 充填 C9	开采 C14, 充填 C14	开采 C19, 充填 C19
6	开采 C6, 充填 C6	开采 C1, 充填 C1	开采 C16, 充填 C16	开采 C11, 充填 C11
7	开采 C8, 充填 C8	开采 C3, 充填 C3	开采 C18, 充填 C18	开采 C12, 充填 C12
8	开采 C10, 充填 C10	开采 C5, 充填 C5	开采 C20, 充填 C20	开采 C13, 充填 C13
9	开采 C7, 充填 C7	开采 C2, 充填 C2	开采 C17, 充填 C17	开采 C14, 充填 C14
10	开采 C9, 充填 C9	开采 C4, 充填 C4	开采 C19, 充填 C19	开采 C15, 充填 C15
11	开采 C11, 充填 C11	开采 C16, 充填 C16	开采 C1, 充填 C1	开采 C6, 充填 C6
12	开采 C13, 充填 C13	开采 C18, 充填 C18	开采 C3, 充填 C3	开采 C8, 充填 C8
13	开采 C15, 充填 C15	开采 C20, 充填 C20	开采 C5, 充填 C5	开采 C10, 充填 C10
14	开采 C12, 充填 C12	开采 C17, 充填 C17	开采 C2, 充填 C2	开采 C7, 充填 C7
15	开采 C14, 充填 C14	开采 C19, 充填 C19	开采 C4, 充填 C4	开采 C9, 充填 C9
16	开采 C16, 充填 C16	开采 C11, 充填 C11	开采 C6, 充填 C6	开采 C1, 充填 C1
17	开采 C18, 充填 C18	开采 C13, 充填 C13	开采 C8, 充填 C8	开采 C3, 充填 C3
18	开采 C20, 充填 C20	开采 C15, 充填 C15	开采 C10, 充填 C10	开采 C5, 充填 C5
19	开采 C17, 充填 C17	开采 C12, 充填 C12	开采 C7, 充填 C7	开采 C2, 充填 C2
20	开采 C19, 充填 C19	开采 C14, 充填 C14	开采 C9, 充填 C9	开采 C4, 充填 C4

3 模拟结果与分析

3.1 模拟结果

将 4 种不同回采顺序的顶板沉降位移、底板臃起、最大压应力、最大拉应力、剪切破坏体积和拉伸破坏体积(剪切和

拉伸破坏体积是利用 fish 语言编写的塑性区体积显示程序计算出来的, 统计当前步开挖引起的塑性破坏)的数值模拟结果从软件中提取出来。限于篇幅, 本文只列出下向下行式开采的数值模拟结果, 如表 3 所示。

表 3 下向下行式开采数值模拟结果  
Table 3 Numerical simulation results of downward mining from upper to lower

开采时步	位移场		应力场		塑性区	
	顶板沉降/mm	底板膨起/mm	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	剪切破坏体积/m <sup>3</sup>	拉伸破坏体积/m <sup>3</sup>
1	5.035	5.093	36.092	1.606	547.390	0.000
2	7.616	7.451	38.743	1.285	488.780	17.111
3	9.953	9.334	41.497	1.047	321.150	11.800
4	11.485	10.572	46.163	1.235	334.460	21.966
5	12.713	11.564	34.474	1.311	538.310	35.904
6	5.446	4.699	40.240	0.949	156.840	0.000
7	7.975	7.043	42.292	1.484	843.230	6.573
8	10.278	9.024	44.291	1.105	744.830	10.921
9	12.004	10.302	47.168	1.293	596.500	15.003
10	13.481	11.215	35.043	3.675	699.120	36.664
11	2.747	1.932	26.300	0.000	1052.900	14.118
12	3.814	2.510	30.850	1.200	355.580	34.354
13	4.282	2.864	28.668	0.323	252.420	15.482
14	4.387	2.951	33.664	0.328	653.520	13.166
15	4.496	3.231	31.879	2.087	828.610	321.850
16	2.749	1.570	29.584	1.022	520.000	132.810
17	3.822	2.191	32.968	1.557	330.940	22.658
18	4.336	2.449	27.506	0.457	597.730	8.373
19	4.453	2.593	32.528	0.928	799.350	33.857
20	4.429	2.949	36.997	1.259	1483.500	210.240

3.2 满意度计算

利用式(1)~式(5)对4种方案模拟结果的原始数据进行

计算,得到各方案位移场、应力场、塑性区的满意度及多指标综合满意度,如表4所示。

表 4 4种方案的指标满意度  
Table 4 Index contentment degrees of four schemes

开采时步	方案1				方案2				方案3				方案4			
	位移场	应力场	塑性区	多指标	位移场	应力场	塑性区	多指标	位移场	应力场	塑性区	多指标	位移场	应力场	塑性区	多指标
1	0.71	0.59	0.86	0.72	0.73	0.59	1.00	0.77	0.92	0.55	1.00	0.77	1.00	0.56	0.72	0.76
2	0.66	0.65	0.62	0.64	0.68	0.50	0.69	0.62	0.91	0.35	0.69	0.75	0.97	0.50	0.98	0.82
3	0.63	0.57	0.52	0.57	0.67	0.07	0.56	0.43	0.90	0.24	0.56	0.67	0.95	0.64	0.76	0.78
4	0.20	0.43	0.92	0.51	0.25	0.30	0.70	0.42	0.22	0.57	0.70	0.51	0.24	0.59	0.89	0.57
5	0.02	0.67	0.74	0.48	0.08	0.64	0.58	0.43	0.04	0.78	0.58	0.51	0.04	0.76	0.78	0.53
6	0.71	0.62	0.98	0.77	0.71	0.53	0.88	0.70	0.98	0.52	0.88	0.75	0.93	0.54	0.70	0.73
7	0.66	0.52	0.65	0.61	0.66	0.60	0.27	0.51	0.94	0.46	0.27	0.79	0.92	0.36	0.98	0.75
8	0.64	0.08	0.49	0.40	0.62	0.50	0.53	0.55	0.93	0.67	0.53	0.81	0.91	0.21	0.83	0.65
9	0.20	0.32	0.80	0.44	0.18	0.37	0.75	0.43	0.21	0.55	0.75	0.55	0.19	0.57	0.84	0.53
10	0.02	0.68	0.43	0.38	0.00	0.61	0.54	0.38	0.01	0.72	0.54	0.46	0.00	0.79	0.78	0.52
11	0.98	0.81	0.61	0.80	1.00	0.70	0.42	0.71	0.84	0.70	0.42	0.77	0.86	0.85	0.97	0.89
12	0.98	0.97	0.89	0.95	1.00	0.96	0.59	0.85	0.80	0.71	0.59	0.73	0.82	0.98	0.86	0.89
13	0.98	0.70	0.86	0.84	0.99	0.69	0.74	0.80	0.77	0.95	0.74	0.70	0.81	0.50	0.47	0.59
14	0.84	0.78	0.70	0.77	0.86	0.68	0.78	0.78	0.38	0.76	0.78	0.46	0.41	0.77	0.35	0.51
15	0.82	0.85	0.37	0.68	0.83	0.72	0.44	0.66	0.19	0.69	0.44	0.41	0.22	0.72	0.22	0.39
16	1.00	0.77	0.69	0.82	0.98	0.75	0.48	0.73	0.84	0.81	0.48	0.86	0.84	0.70	0.81	0.78
17	0.996	0.96	0.92	0.96	0.98	0.92	0.97	0.95	0.79	0.95	0.97	0.86	0.79	0.98	0.87	0.88
18	0.99	0.74	0.85	0.86	0.98	0.65	0.88	0.83	0.78	0.49	0.88	0.59	0.76	0.97	0.53	0.75
19	0.86	0.75	0.92	0.84	0.86	0.74	0.57	0.72	0.38	0.76	0.57	0.49	0.35	0.77	0.84	0.65
20	0.83	0.79	0.28	0.63	0.79	0.58	0.00	0.45	0.20	0.70	0.00	0.54	0.16	0.68	0.92	0.59

### 3.3 结果分析

将上述4种方案位移场、应力场、塑性区满意度及多指标综合满意度随回采步骤的变化绘制成曲线(图4~图7)。图4~图7及数值模拟结果表明:

(1) 随着开采的不断推进,采场顶板和底板出现沉降和臃起,顶板中间位置出现拉应力,采场两帮特别是四周角隅处压应力集中非常明显。这说明开采过程是一个岩石力学环境不断劣化的过程,但不同回采顺序,劣化程度和方式不尽相同,岩石力学演变过程也不同。

(2) 对于每层矿体的每个采区,随着回采的进行,位移场、应力场、塑性区和多指标综合满意度基本上都呈现出变小的趋势;由一个采区向另一采区推进时出现转折点,指标满意度基本呈现先增大后又降低的规律。说明在同一采区内,随着采场的不断推进,采场稳定性不断劣化,呈下降趋

势,采区间柱对采场整体稳定性起到关键性作用。

(3) 4个方案的多指标多步骤综合满意度依次为0.684、0.641、0.653、0.683,从采场受力情况满意度来看,下向下行式开采方式的满意度最高,为0.684,与之相比,上向上行式开采方式的满意度相差不多,为0.683,说明上向上行式开采在理论上也是可行的。

(4) 上向上行式开采方式能够充分利用上部开拓、采准废石以及选厂尾矿充填空区,实现低成本废石不出坑、尾矿不入库,最大限度回收资源的同时能够减少对生态环境的破坏,在工艺上是合理的,推荐矿山采用上向上行的开采方式。值得注意的是,上向上行式开采每个盘区的最后一步,即第5步、10步、15步、20步的多指标综合满意度下降较快,在开采过程中,应该密切关注该采场顶板及两帮充填体的稳定性,同时应该快采快出,缩短采场回采周期。

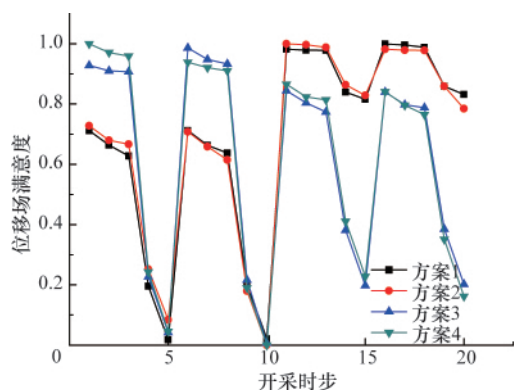


图4 位移场满意度时变曲线

Fig. 4 Time-varying curve of displacement field contentment degree

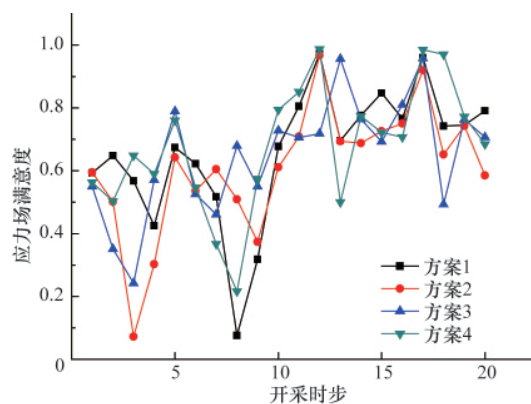


图5 应力场满意度时变曲线

Fig. 5 Time-varying curve of stress field contentment degree

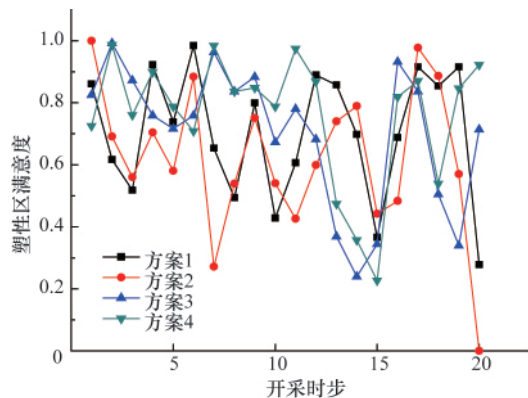


图6 塑性区满意度时变曲线

Fig. 6 Time-varying curve of crack field contentment degree

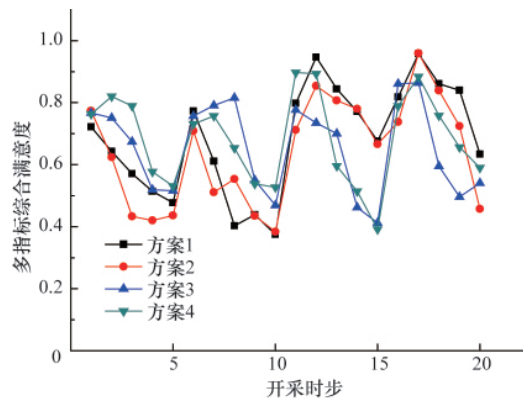


图7 多指标综合满意度时变曲线

Fig. 7 Time-varying curve of multi-index comprehensive contentment degree

## 4 结论

(1) 地下矿山开采过程中,采场顶板和底板分别出现沉降和臃起,顶板中间位置出现拉应力,采场两帮特别是四周

角隅处压应力集中非常明显,说明开采过程是一个岩石力学环境不断劣化的过程,但不同回采顺序劣化的程度和方式不尽相同,表现出不同的岩石力学演变过程。

(2) 上向上行式开采方式能够充分利用上部掘进废石和

选厂尾砂充填空区,实现废石不出坑、尾矿不入库,最大限度地回收资源的同时减小对生态环境的破坏,在理论上是可行的,在工艺上也是合理的,推荐矿山采用上向上行式的开采方式。

### 参考文献 (References)

- [1] 周科平, 古德生. 遗传算法优化地下矿山开采顺序的应用研究 [J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 50-54.  
Zhou Keping, Gu Desheng. China Mining Magazine, 2001, 10(5): 50-54.
- [2] 胡建华, 苏家红, 周科平, 等. 诱导顶板崩落时变力学模型的建立与应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1212-1218.  
Hu Jianhua, Su Jiahong, Zhou Keping, et al. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2007, 38(6): 1212-1218.
- [3] 李夕兵, 刘志祥, 彭康, 等. 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1945-1953.  
Li Xibing, Liu Zhixiang, Peng Kang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1945-1953.
- [4] 黄平路, 陈从新. 露天与地下联合开采引起岩层移动规律的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1310-1314.  
Huang Pinglu, Chen Congxin. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1310-1314.
- [5] 胡建华, 雷涛, 周科平, 等. 基于采矿环境再造的开采顺序时变优化研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2517-2522.  
Hu Jianhua, Lei Tao, Zhou Keping, et al. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2517-2522.
- [6] 周科平, 朱和玲, 肖雄, 等. 采矿环境再造连续开采地压演化过程的控制与仿真[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 417-423.  
Zhou Keping, Zhu Heling, Xiao Xiong, et al. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2008, 39(3): 417-423.
- [7] 李元辉, 刘炜, 解世俊. 矿体阶段开采顺序的选择及数值模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 88-91.  
Li Yuanhui, Liu Wei, Xie Shijun. Journal of Northeastern University: Science and Technology Edition, 2006, 27(1): 88-91.
- [8] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 三山岛金矿中段盘区合理回采顺序动态

- 模拟选择[J]. 矿冶工程, 2010, 30(3): 8-11.  
Peng Kang, Li Xibing, Peng Shuquan, et al. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(3): 8-11.
- [9] 刘晓明, 杨承祥, 罗周全. 深井开采回采顺序数值模拟优化研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2008, 22(4): 15-21.  
Liu Xiaoming, Yang Chengxiang, Luo Zhouquan. Journal of University of South China: Science and Technology Edition, 2008, 22(4): 15-21.
- [10] 李博. 多指标综合评价方法应用中存在的问题与对策 [J]. 沈阳工程学院学报: 社会科学版, 2010, 6(2): 200-202, 236.  
Li Bo. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Social Sciences Edition, 2010, 6(2): 200-202, 236.
- [11] 冯博. 基于协同网络信息的多指标决策方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
Feng Bo. Study on multiple criteria decision making methods based on collaboration network information[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [12] 张葛祥, 金炜东, 胡来招. 多变量系统中多参数多目标满意优化研究 [J]. 信息与控制, 2003, 32(6): 481-485.  
Zhang Gexiang, Jin Weidong, Hu Laizhao. Information and Control, 2003, 32(6): 481-485.
- [13] 汪波, 文怡. 基于指标满意度算法的物流中心选址方法[J]. 工业工程, 2004, 7(2): 12-15.  
Wang Bo, Wen Yi. Industrial Engineering Journal, 2004, 7(2): 12-15.
- [14] 周科平, 杜相会. 基于 3DMINE-MIDAS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合的残矿回采稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 17-22.  
Zhou Keping, Du Xianghui. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 17-22.
- [15] 杜坤, 李夕兵, 刘科伟, 等. 采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(9): 2802-2811.  
Du Kun, Li Xibing, Liu Kewei, et al. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2011, 42(9): 2802-2811.
- [16] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. International Journal of Rock Mechanics of Mining Science, 1998, 34(8): 1165-1186.

(责任编辑 张玉肖, 岳臣)

### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。