

# 完全充填开采下地表变形特征分析及现状评价

江飞飞<sup>1,2</sup>, 周辉<sup>1,2</sup>, 盛佳<sup>3,4</sup>, 帅金山<sup>5</sup>, 孙德胜<sup>5</sup>, 胡勇<sup>5</sup>, 李向东<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 长沙矿山研究院有限责任公司 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012; 4. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,  
湖南 湘潭 411201; 5. 湖北三鑫金铜股份有限公司, 湖北 大冶 435100)

**摘要:** 地下金属矿山充填开采往往被认为是控制覆岩移动和保护地表的有效方法之一。为了对桃花嘴金矿 10 线以西 -270~ -570 m 多中段 8 a 来完全胶结充填开采上覆地表变形特征及现状做出合理的分析评价, 建立采场安全现状 AHP-Fuzzy 评价模型和“采场→覆岩及地表”安全分析模式, 按照 8 a 的历史回采顺序模拟分析区域采-充全过程, 并将理论分析结果与矿山近 2 a 的地表沉降观测数据进行对比分析。结果表明: (1) 完全胶结充填开采的 25 个采场中有 22 个安全现状属 II 级较好, 11 个评价因子中矿体赋存条件、采矿方法以及距离主副井位置对采场及区域安全现状影响相对最为显著; (2) 充填开采岩移区域可分为“相对明显扰动区域”和“微扰动区域”, 覆岩中相对明显扰动区域会形成一定高度的“自然岩移拱”, 其三维空间形态为近似椭球体, 当充填开采达到一定深度时该椭球体对上覆地表影响是微弱的, 而微扰动区域则会形成“微沉降盆地”, 开采区域上覆地表由 2014 年前的未扰动状态逐渐转变为 0.5~1 mm 微扰动状态, 充填开采时间效应对地表安全影响微小; (3) 上覆地表布置的 3 个闭合环线中的各观测点沉降量整体分别沿着 0, -3, -6 mm 水平线上下稳定波动, 观测过程中沉降量均未超过允许变形值。理论分析与实际观测结果基本一致, 地表安全现状总体良好。分析成果对矿山安全生产具有指导意义, 同时可为类似充填矿山岩移分析提供借鉴。

**关键词:** 采矿工程; 地下金属矿山; 完全充填开采; 地表沉降观测; 地表变形特征; 现状评价

**中图分类号:** TD 325

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)10 - 2344 - 15

## Analysis and evaluation of surface deformation characteristics under the condition of completely backfill mining

JIANG Feifei<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, SHENG Jia<sup>3,4</sup>, SHUAI Jinshan<sup>5</sup>, SUN Desheng<sup>5</sup>, HU Yong<sup>5</sup>, LI Xiangdong<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *National Engineering Research Center for Metal, Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China*; 4. *School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*; 5. *Hubei Sanxin Gold Copper Co., Ltd., Daye, Hubei 435100, China*)

**Abstract:** Backfill mining is often considered as one of the effective methods to control the movement of overlying strata and to protect the ground surface in underground metal mining. In order to analyse and evaluate deformation characteristics and current situation of overlying surface after 8 years of multi-level completely backfill mining in the west of exploration line 10 of Taohuazui gold mine, an AHP-Fuzzy evaluation model of

**收稿日期:** 2018 - 04 - 23; **修回日期:** 2018 - 06 - 22

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 国家自然科学基金资助项目(51427803, 51709257)

Supported by the National Program on Key Basic Research Project of China(Grant No. 2014CB046902) and National Science Foundation of China(Grant Nos. 51427803 and 51709257)

**作者简介:** 江飞飞(1990 -), 男, 2012年毕业于湖南科技大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事深部岩体力学与灾害防治、地下工程稳定性评价与控制技术方面的研究工作。E-mail: jiangfeifei17@mails.ucas.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0396

stope safety was established and the safety analysis mode of “stopes to overlying strata and surface” was put forward. The whole backfill mining process according to the historical sequence of past 8 years was simulated, and the numerical results were compared with the monitored data of surface subsidence in the past 2 years. The results show that 22 of the totally 25 backfill stopes are in good safety condition and belong to level II. The existing condition of orebody, the mining method and the distance from the shafts of 11 evaluated factors are the most significant in influencing the stopes and current regional safety. The strata can be divided into “relative significantly disturbed area” and “micro disturbed area”. The relative significantly disturbed area tends to form a certain height of “Natural rock movement arch” with the morphology of approximately a 3D ellipsoid. The effects of ellipsoid on overlying surface are weak when the backfill mining reaches a certain depth. The micro disturbed area tends to form a “Micro subsidence basin”. The surface of mining area gradually changed from undisturbed status to 0.5 - 1 mm micro-disturbed status in 2014. The time effect of backfill on surface safety is weak. All the observation points of three closed loops arranged on the surface are in stable fluctuation, which fluctuate along the horizontal lines of 0, -3 and -6 mm respectively. The surface settlement did not exceed the allowed deformation value during the observation period. The calculated results agreed largely with the monitored data. The overall safety of surface is good.

**Key words:** mining engineering; underground metal mine; completely backfill; surface subsidence observation; surface deformation characteristics; current situation evaluation

## 1 引言

地下金属矿山开采过程中, 在开采初步设计阶段往往会根据矿体产状、围岩条件以及矿区主要地质构造等情况, 通过工程类比等方式来设计圈定岩移范围。与空场法和崩落法开采时发生显著的岩移、破坏等现象不同, 充填法开采后其开采区域覆岩移动和变形往往是缓慢变化的、非突发性的, 已有的研究成果主要针对充填开采时的岩层移动范围、充填体变形机制、岩移监测预警及控制等方面开展研究<sup>[1-5]</sup>, 且开展研究的目的是为了为了保证地下采矿活动的安全稳定<sup>[6-7]</sup>。然而对于地下金属矿山而言, 随着充填开采深度和开采时间的增长, 多中段完全胶结充填开采对上覆地表变形所带来的影响是充填矿山越来越需要重点关注的内容之一, 目前相关研究还非常缺乏。

桃花嘴金矿位于湖北大冶金湖街道办株林村, 距离大冶市城西 4.2 km, 与铜绿山矿区毗邻。矿山自 20 世纪 90 年代初开始基建开采, 前后经过共四期的改扩建, 并于 2004~2009 年完成了采矿方法改造, 由最初的浅孔留矿法转变为空场嗣后充填采矿法, 并且在早期也将原留矿法开采的遗留空区进行了充填处理, 矿山目前生产规模已扩大至 100 万 t/a。其中矿山在第四期 3 000 t/d 的改扩建中, 由于矿山地表工业场地建设位置的限制、原地质探矿工作的

不连续性和开采的阶段性的, 导致主副井及部分工业场地建筑物位于理论岩移范围内。矿山自 2010 年以来, 主采中段由最初的 -270 m 水平下降至 -570 m 水平, 其中 10 线以西理论岩移范围内采场的开采可能会对覆岩及地表带来不利影响, 合理的分析评价 8 a 来多中段多采场充填开采对上覆地表的影响对于矿山安全生产至关重要。

为此, 本文在对矿山自 2010 年来位于 10 线以西理论岩移范围内的各采场历史开采过程和当前开采现状进行详细调查的基础上, 分别采用 AHP-Fuzzy 采场安全现状评价模型、三维数值计算模型和地表沉降观测多种方法和手段, 对矿山 8 a 来多中段完全充填开采条件下区域地表变形特征及现状进行综合分析评价, 研究成果可为矿山当前安全生产及今后深部充填开采提供一定的依据, 同时可为类似充填开采矿山岩移分析提供一定的借鉴。

## 2 矿山地质及完全充填开采现状

### (1) 工程地质调查与分析

桃花嘴金矿区改扩建设计主要开采桃 II 矿体群中的 II4 矿体、桃 III 矿体群的 III1 矿体等, 本次研究范围内矿体分布于 10~24 勘探线范围, 矿体形态均呈透镜状, 其中桃 II4 矿体厚度 2.60~71.60 m, 倾角 65°~85°, 桃 III1 矿体厚度 5.33~23.52 m, 倾角 40°~70°, 属于厚大急倾斜矿体。矿体受石英二

长闪长玢岩与侵入接触构造(F<sub>11</sub> 和 F<sub>12</sub>)所控制, 控矿构造形态和产状变化与矿体基本一致, 控矿构造与矿体之间 2~15 m 范围内主要为矽卡岩(SK), 控矿构造以外区域均为石英二长闪长玢岩(Qηδμ<sub>5</sub><sup>2-3</sup>), 根据区域工程地质调查结果可知, 铜(金)矿体、矽卡岩和石英二长闪长玢岩均发育有 2~3 组优势结构面, 在此结果基础上采用 RMR 法对岩体质量进行了评价, 工程地质调查与评价结果见表 1。总体而言, 研究区域内属工程地质条件中等的非层状矿床类型, 矿岩接触部位的矽卡岩、蚀变构造区域等是地下工程中易发生不良工程地质问题的地方, 且矿区 10 线以西范围内有主副井及部分地表工业场地建、构筑物分布, 因此地表不允许崩落且岩移变形须满足要求才可保证安全生产。

表 1 主要矿岩的工程地质调查与评价结果

Table 1 Engineering geology investigation and evaluation results of main orebody and surrounding rocks

岩体类型	优势结构面产状(°)	所占比重/%	结构面分布规律	RMR 值及评价结果
铜(金)矿体	127∠64	21.13	2 组优势+少有零星结构面, 平均间距 0.456 m	72
	170∠70	22.54		II 级好岩石
石英二长闪长玢岩 Qηδμ <sub>5</sub> <sup>2-3</sup>	241∠84	26.46	3 组优势+少有零星结构面, 平均间距 0.305 m	69
	133∠73	8.07		II 级好岩石
	342∠63	5.83		
矽卡岩 SK	184∠84	16.04	3 组优势+较多零星结构面, 平均间距 0.109 m	38
	222∠74	16.04		IV 级差岩石
	306∠74	31.13		

(2) 胶结充填采矿工艺

矿山自 2009 年正式完成采矿方法改造后, 厚大矿体开采的主体采矿方法为阶段空场嗣后充填采矿法, 采场垂直矿体走向布置, 间隔回采, 各采场实际尺寸基本一致, 即采场长度 30 m 左右, 宽度 12~15 m, 留设 8~10 m 的底柱。矿山实际充填灰砂比均为 1:6~1:8, 实际充填体强度可达 2~3 MPa 以上, 充填质量总体较好。矿山主体采矿方法示意图如图 1 所示。

(3) 2010 年以来研究范围内开采现状分析

矿山自 2010 年来主要开采深度由-270 m 水平下降至-570 m 水平, 期间所有的回采空间均进行了完全充填处理, 根据调查统计结果可知 10 线以西保护范围内包含-270, -320, -370, -420, -470, -520 和-570 m 共计 7 个中段的 25 个采场, 其中-270, -320 和-570 m 中段各有 2 个采场, -370 m 中段有 3 个采场, -420 m 中段有 6 个采场, -470 m

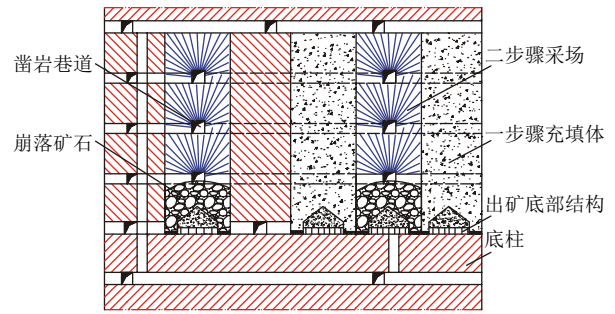


图 1 矿山主体采矿方法示意图  
Fig.1 Diagram of main mining method

和-520 m 中段各有 5 个采场, 开采现状纵投影图如图 2 所示。在实际开采过程中, 部分较大的采场采-充时间需要 2~3 a, 基于矿山各年度生产计划和验收资料可知, 研究范围内采场分布位置及各年度实际开采进度分别如图 2 和 3 所示(图 3 中, 2015 年度设计保护范围内主要安排回采桃花嘴矿区-420 m 中段 12~14 线底柱、-520 m 中段 12 线间柱以及-570 m 中段保安矿柱采场采准副产)。分析可知矿山在实际生产中, 从安全等各方面角度出发逐年减少和控制同时位于理论岩移范围内的采场数量。

### 3 采场及地表安全现状模糊综合评价

#### 3.1 影响采场安全主要风险因子辨识

采场风险因子辨识是指采-充全过程中涉及到采场安全稳定相关的危险源及其特性, 并对可能的危害及不利影响进行预判和防治, 以确保采场回采期间的安全。

对于充填采场而言, 影响其采场稳定性的风险因子一般不会是突发性瞬间破坏的, 而是需要一定时间和范围积累所带来的不利影响。通过研究分析桃花嘴金矿区历史开采过程及相关图纸资料, 参照规范<sup>[8]</sup>、规程<sup>[9]</sup>、实施指南<sup>[10]</sup>等及李 铀等<sup>[11-14]</sup>的研究成果, 调研影响各采场实际安全与稳定性的各因子, 并据此基于专家咨询的方式筛选出符合桃花嘴金矿充填采场特点的主要风险因子, 而其他相对次要因子在此不予考虑。

(1) 自然条件: ① 矿体赋存条件: 矿体赋存直接影响开采范围及总体开采规划, 从而对区域的稳定性产生直接的影响, 因此矿体的赋存条件是必须考虑的因子之一; ② 地质构造: 区域性的地质构造(如大型断层、破碎带等)会对区域稳定性造成一定的不利影响, 对于 10 线以西的矿体开采而言, 则主

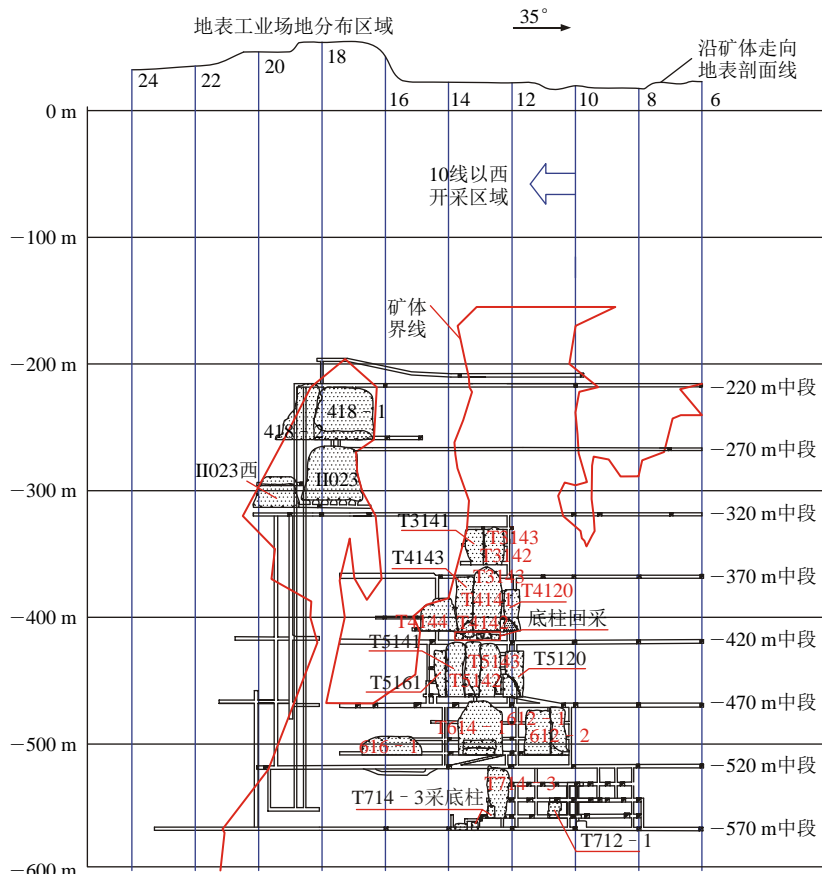


图 2 开采现状纵投影图

Fig.2 Vertical projection of present situation of exploitation

中段	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016~2017年
-270 m				T418 - 1采 T418 - 2采			
-320 m			II023采			II023西采	
-370 m		T3141采		T3142采 T3143采			
-420 m		T4141采 T4142采 T4143采 T4120采			T4144 - 1采	T4144 - 2采	
-470 m		T5161采 T5141采 T5142采 T5143采		T5120采			
-520 m			614 - 1采	616 - 1采 612 - 1采	616 - 2采 614 - 2采		
-570 m						T714 - 3采底柱回采 T714 - 1采底柱回采	

图 3 过去 8 a 历史回采进度

Fig.3 History of mining process in the past 8 years

要为  $F_{11}$  和  $F_{12}$  大型控矿构造，其存在会在一定程度上影响开采过程中的采场稳定性和岩层移动；③ 矿岩物理力学特性：根据矿山已有试验结果可知，研

究范围内的矿岩类型主要为铜(金)矿体、石英二长闪长玢岩和矽卡岩，其单轴抗压强度分别为 129.38, 118.91 和 65.39 MPa，可见除矽卡岩分布的地段外，

矿岩总体强度较高、力学性质较好；④ 地下水：根据矿区水文地质资料可知，矿床属以溶洞充水为主、顶底直接进水、水文地质条件中等偏复杂的岩溶充水矿床类型，且矿区地处大冶湖围垦区，常有内涝，矿区浅部岩溶发育，会对开采带来一定的不利影响；⑤ 风化作用：对于矿区浅部采场而言，由于大部分采场开采时间较长，在完全充填前会暴露在一定湿度和温度环境下，可能导致开采区域岩体发生一系列的物理化学变化，从而对区域岩体安全稳定带来一定的不利影响。

(2) 回采扰动：① 采矿方法：地下金属矿山的采矿方法一直是直接影响整体开采的安全和稳定，采用不同的采矿方法开采带来的影响范围和程度存在显著的差别，桃花嘴金矿采用充填法开采能够有效的处理回采空间，其对周边区域的作用与其他类型采矿方法相比存在显著的差异性；② 距离主副井位置：研究范围内的主、副井作为 I 级保护建(构)筑物，位于理论岩移范围内，因此与主副井的相对距离位置关系会在一定程度上影响采场乃至区域的安全与稳定；③ 开采深度：开采深度的增加势必会在地应力、开采环境等方面发生一系列的变化，回采扰动和影响范围也与开采深度存在一定的联系；④ 爆破震动：桃花嘴金矿实际回采过程中大多采用中深孔爆破，单次爆破能量较浅眼回采要大得多，且回采爆破频率较高，周期性的爆破震动作用会对回采区域采场的安全稳定性带来一定的不利影响，因此爆破震动是现状评价过程中须考虑的要素之一。

(3) 生产管理：① 施工质量管理：施工质量能否满足回采作业的要求，是影响采场乃至局部区域稳定性的重要因子，因此有效的现场施工管理对于矿山而言至关重要，也是影响回采稳定性的因子之一；② 采-充作业管理：回采和充填作业是否严格按照设计要求进行，会直接影响充填质量和采场自身的安全稳定，进而在一定程度上影响区域及覆岩地表的安全稳定。

### 3.2 采场安全现状 AHP-Fuzzy 评价模型

层次分析是一种能够将多要素对同一目标的综合影响程度进行系统的决策分析方法，是一种定性与定量相结合的分析方法<sup>[13, 15-16]</sup>。根据主要风险因子辨识结果可知，充填开采时采-充全过程中采场的安全稳定主要受自然条件、回采扰动、生产管理三大方面 11 个要素的共同作用，为了对桃花嘴金矿-270~-570 m 中段设计保护范围内各充填回采采

场的安全稳定做出合理的评价，依据各要素的属性，即从-属关系和重要性进行层次排列，建立充填采场安全现状层次分析模型，如图 4 所示。

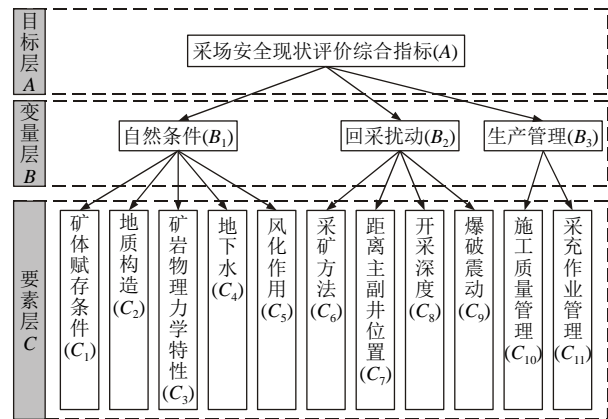


图 4 现状评价层次分析模型

Fig.4 Hierarchal model of analysis for status evaluation

#### (1) 各层级相对权重值及评价因子的标准化

基于 AHP 基本理论，为了建立成对比较矩阵，采用 1~9 尺度衡量要素  $X_i$  与要素  $X_j$  之间的相对重要性<sup>[14, 17-18]</sup>，其中 1, 3, 5, 7, 9 为 5 个基本尺度，2, 4, 6, 8 依次为相邻基本尺度之间的中间尺度，评估尺度及其基本含义见表 2<sup>[14, 17-18]</sup>，基于评估尺度便可建立多组与层次分析模型相对应的成对比较矩阵，其一般形式见表 3。

表 2 评估尺度及其含义<sup>[14, 17-18]</sup>

Table 2 Evaluation scale and its meanings<sup>[14, 17-18]</sup>

基本标度	含义	中间尺度	含义
1	因子 $X_i, X_j$ 对目标影响同样重要	-	-
3	基于经验与判断，因子 $X_i$ 较另一因子 $X_j$ 对目标影响稍微重要	2	相对重要程度介于 1~3 范围
5	基于经验与判断，因子 $X_i$ 较另一因子 $X_j$ 对目标影响明显重要	4	相对重要程度介于 3~5 范围
7	实际显示因子 $X_i$ 较另一因子 $X_j$ 对目标影响强烈重要	6	相对重要程度介于 5~7 范围
9	有足够证据确定因子 $X_i$ 较另一因子 $X_j$ 对目标影响极端重要	8	相对重要程度介于 7~9 范围
倒数	当 $X_i$ 与 $X_j$ 相比尺寸取值为 $c_{ij}$ ，则 $X_j$ 与 $X_i$ 相比尺度取值为 $1/c_{ij}$	-	-

表 3 成对比较矩阵的一般形式

Table 3 General form of pairwise comparison matrix

Y 层→X 层	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_n$
$X_1$	$c_{11}=1$	$c_{12}$	$c_{13}$	...	$c_{1n}$
$X_2$	$1/c_{12}$	$c_{22}=1$	$c_{23}$	...	$c_{2n}$
$X_3$	$1/c_{13}$	$1/c_{23}$	$c_{33}=1$	...	$c_{3n}$
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
$X_n$	$1/c_{1n}$	$1/c_{2n}$	$1/c_{3n}$	...	$c_{nn}=1$



基于成对比较矩阵一般形式，便可分别建立要素层  $C \rightarrow$  变量层  $B$ 、变量层  $B \rightarrow$  目标层  $A$  共计 4 个比较矩阵。为了确保多个比较矩阵的差异性处于允许范围之内，在进行各个层级中各要素的权重值计算之前，往往需要根据 T. L. Saaty<sup>[17]</sup> 建议的公式检验比较矩阵的一致性：

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} \quad (1)$$

式中： $CR$  为一致性比率； $CI$  为一致性指标； $\lambda_{\max}$  为比较矩阵的最大特征值； $n$  为比较矩阵的阶数； $RI$  为随机一致性指标，可根据 T. L. Saaty<sup>[17]</sup> 建议的模拟结果可取  $RI_{n=1} = RI_{n=2} = 0$ ， $RI_{n=3} = 0.52$ ， $RI_{n=4} = 0.89$ ， $RI_{n=5} = 1.11$ ，且每一个 2 阶比较矩阵都是一致的。

当  $CR \leq 0.1$  时，认为比较矩阵的一致性较好，否则就说明比较矩阵的指标因子判断存在一定的问题，就要对其进行重新调整。

根据计算可知，要素层  $C \rightarrow$  变量层  $B$  的 3 个比较矩阵的最大特征值分别为 5.056，4.033，2.000，其对应  $CR$  值分别为 0.013，0.012，0，变量层  $B \rightarrow$  目标层  $A$  的 1 个比较矩阵的最大特征值为 3.000，其对应  $CR$  值为 0，均小于 0.1，因此各比较矩阵的相容性均较好，可以采用比较矩阵最大特征根  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量  $\xi$  作为权重向量，然后根据下式采用方根法对特征向量进行归一化处理，即得各层级中各要素的权重值：

$$w_i = \frac{\left( \prod_{j=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中： $w_i$  为要素  $X_i$  的权重值， $c_{ij}$  为要素  $X_i$  相对要素  $X_j$  的重要度。据此依据专家咨询结果逐层确定各层级因子相对权重值，其最终计算结果见表 4。

另外，为了使各评价因子(要素)具有可比性，需要对这些评价因子进行标准化处理，使各个评价因子可以统一量化标准，形成统一的可评价数值。本研究选择百分比标准化法对评价因子进行标准化处理，使各个评价因子数值在 0~1 范围内，根据各个评价因子的影响正负性质不同，其计算可采用下式：

$$S_i = \begin{cases} \frac{P_i}{R_i} & \text{(正指标)} \\ 1 - \frac{P_i}{R_i} & \text{(负指标)} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_i$  为第  $i$  个评价因子标准值， $R_i$  为第  $i$  个评价因子参照值(见表 4)， $P_i$  为第  $i$  个评价因子实际值。

标准化参照值  $R_i$  分为定量指标因子和定性指标因子两类，其中定量指标因子包括距离主副井位置( $C_7$ )和开采深度( $C_8$ )，研究范围内的采场与主副井之间最大距离约为 200 m，距离地表最大开采深度为 624 m；其余因子则均属于定性指标，其标准化参照值则是基于大量充填开采矿山调研结果，同时咨询专家意见和岩体质量分级方法等进行合理设计得出的，如矿体赋存条件( $C_1$ )设计类型和参照值可分为好(0.80)、中等(0.50)、差(0.20)三个级别，因此其标准化参照值  $R_{C_1}$  即取最佳值 80%，其余因子均进行类似处理。需要说明的是，由于研究中所有采场的各因子均在对应同一参照值下进行的标准化处理，经过测试可知定性指标因子设计类别划分的不同对最终评价结果影响并不明显，即对最终计算与评价结果影响微小。

表 4 各层级指标相对权重值及评价因子标准化参考值

Table 4 Relative weight values of different levels and the standardized reference values of the evaluation factors

目标层	变量层	变量层权重值 (B 层对 A 层)	要素层 (评价因子)	要素层权重值 (C 层对 B 层)	最终总权重值 $w_i$ (C 层对 A 层)	标准化参照值 $R$	备注
采场安全现状评价综合指标(A)	自然条件( $B_1$ )	0.455	矿体赋存条件( $C_1$ )	0.467	0.212	80%	最佳值
			地质构造( $C_2$ )	0.194	0.088	1	极限值
			矿岩物理力学特性( $C_3$ )	0.194	0.088	80%	最佳值
	回采扰动( $B_2$ )	0.455	地下水( $C_4$ )	0.073	0.033	0.5	极限值
			风化作用( $C_5$ )	0.073	0.033	0.5	极限值
			采矿方法( $C_6$ )	0.421	0.191	90%	最佳值
			距离主副井位置( $C_7$ )	0.421	0.191	200 m	最佳值
			开采深度( $C_8$ )	0.097	0.044	624 m	极限值
	生产管理( $B_3$ )	0.091	爆破震动( $C_9$ )	0.062	0.028	1	最佳值
			施工质量管理( $C_{10}$ )	0.500	0.046	95%	最佳值
			采-充作业管理( $C_{11}$ )	0.500	0.046	95%	最佳值

(2) 安全现状评价等级的建立

根据矿山调查实际情况，结合一些国家现行规范常用的等级划分方式，将此次桃花嘴金矿 10 线以西 -270~-570 m 设计保护范围内采场安全现状评价分为好(I 级)、较好(II 级)、中等(III 级)、差(IV 级)和极差(V 级)共 5 个等级，各等级与最终计算结果对应的标准见表 5。

表 5 采场安全现状评价标准等级

Table 5 Current situation evaluation standard of stope safety

等级	参照值	评价
I 级	1~0.80	好
II 级	0.80~0.60	较好
III 级	0.60~0.40	中等
IV 级	0.40~0.20	差
V 级	<0.20	极差

根据研究范围内矿体赋存及采场分布情况调查结果，分别采用建立的模型及相应的公式对研究范围内共计 7 个中段的 25 个采场安全现状进行计算，并对照相应的评价标准对各采场的安全现状进行评价，其最终结果汇总如图 5(a)所示。

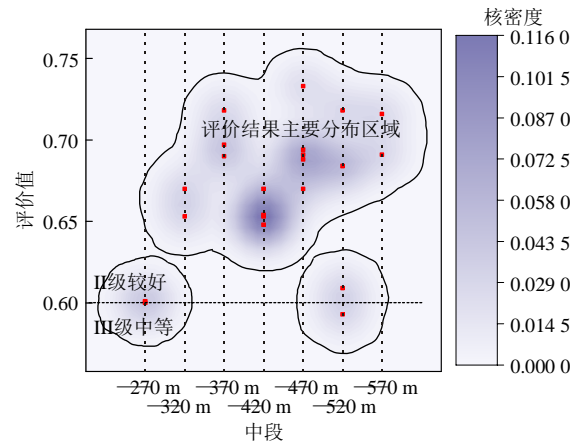
3.3 采场及地表现状初步评价结果

研究范围内各中段各采场的最终安全评价综合指标值计算公式如下式所示：

$$U = \sum_{i=1}^m S_i w_i \tag{4}$$

式中：U 为最终的评价指标值；w<sub>i</sub> 为第 i 个评价因子的权重值；m 为评价因子的总数量，且 m = Σn。

根据评价结果可知，研究内采场安全现状总体较好，除了少数矿体赋存条件较差、离主副井较近的采场(T418-1 采、T418-2 采、616-2 采)属于 III 级中等外，其余采场安全性均属于 II 级较好。另外，在所考虑的自然条件、回采扰动、生产管理 3 个大的方面共 11 个评价因子中，矿体赋存条件、采



(b) 区域安全性评价核密度分布

图 5 基于 AHP-Fuzzy 模型的安全现状评价结果

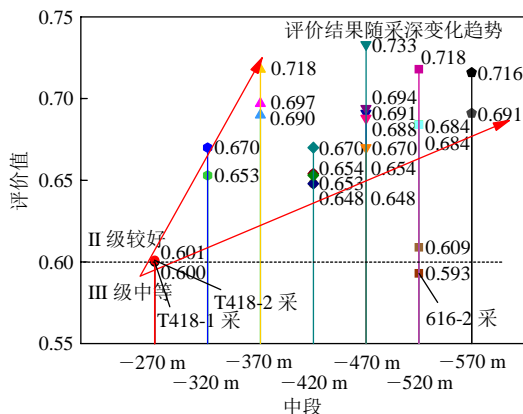
Fig.5 Evaluation results of safety status based on AHP-Fuzzy model

矿方法以及距离主副井位置对区域的安全稳定性影响相对最为显著，其中矿体连续性好、赋存地段上下盘围岩处矸卡岩少的地段更有利于区域的稳定，采矿方法中充填开采在控制岩移变形和保证区域的稳定性具有重要的作用。另外，随着开采深度的增加，采场安全性评价结果呈现出微弱递增趋势。

基于开采区域内若没有开采扰动则处于相对安全稳定状态的基本事实，便可建立由“采场→区域覆岩及地表”的安全分析模式。根据有限个采场(25 个)的 AHP-Fuzzy 综合评价结果，可进一步分析得出整个区域采场的安全性评价结果概率分布即核密度分布，如图 5(b)所示。据此在各采场安全稳定性计算评价结果的基础上分析可知，除少部分回采区域外，大部分回采区域的安全评价结果总体上为 II 级良好，整个采场周边区域安全稳定性良好，且基于 -270 m 中段采场顶部距离地表超过 240 m 的事实，因此进一步推断可知，对应区域上覆地表的安全稳定性良好。

4 基于 3DEC 地表变形特征模拟分析

在对采场与地表安全现状有了一个初步评价结果与认识的基础上，为了进一步定量研究 10 线以西 -270~-570 m 中段研究范围内采场在过去 8 a 来历史开采顺序下，完全胶结充填开采下地表变形特征，本文基于能够考虑区域控矿构造影响的离散元程序 3DEC 按照历史回采顺序进行了模拟分析，实现了定量计算分析完全充填开采下地表沉降变形量和变形特征，同时可以在一定程度上验证模糊综合评价结果的合理性。



(a) 各采场最终评价结果

### 4.1 计算模型的建立

依据桃花嘴金矿区 10~24 线剖面图，结合 -270~-570 m 中段平面图可知，研究范围内主要的构造为 F<sub>11</sub> 和 F<sub>12</sub> 区域控矿构造，控矿构造形态和产状变化与矿体基本一致，基于此矿体赋存地质现状，便可建立相应的 3DEC 计算模型。模型的建立分两部分：一部分是地表三维模型(标高+54~-162 m)，另一部分是 10 线以西-270~-570 m 中段矿体三维模型(标高-162~-620 m)，然后再将所建立的模型粘结为一体，并进一步切割形成相应的区域控矿构造即可。本次所建立的计算模型高程方向上至地表，即模型顶部为自由面，底部至-620 m 中段，水平 X 方向和 Y 方向尺寸向外扩展采场跨度的 5 倍以上，即 X 方向为模型尺寸为 600 m(3330150~3330750)，Y 方向模型尺寸为 650 m(38588450~38589100)，所建立的几何模型如图 6 所示。

### 4.2 历史回采过程模拟计算方案

根据所建立是三维数值计算模型，依据研究范围内采场布置情况对实体模型进行区域划分和定义，然后依据-270~-570 m 近 8 a 历史回采顺序进行采-充模拟计算，计算过程中，由于部分较大采场在实际回采过程中需要 2~3 a 完成，因此模拟中以“块体位移计算循环至稳定”为基本原则来控制计算时步。

基于此认识，可确定历史回采过程模拟计算的方案为：step 1~6 依次对应于 2010~2015 年各年度采场的采-充作业，step 7 对应于 2016~2017 年度采场的采-充作业。模拟中重点研究历史回采顺序中的各采场→区域覆岩和地表的位移分布与变化情况，并对相应的地表变形特征进行分析总结。

### 4.3 岩体特性参数

依据研究范围内地质资料和现场调查情况，在模拟计算中主要考虑的岩体类型包括铜(金)矿体、石英二长闪长玢岩、矽卡岩及地表局部第四系、充填体，模拟中岩石本构模型采用莫尔-库仑塑性模型(Mohr-Coulomb plasticity model)，控矿构造本构模型采用库伦-滑移模型(Coulomb-slip model)。模型中所采用的岩体物理力学特性参数则是基于广义 Hoek-Brown 准则的 GSI 法<sup>[19]</sup>对矿山已有的室内岩石试验结果参数进行折减处理，其中铜(金)矿体、石英二长闪长玢岩和矽卡岩对应的 GSI 指标值分别为 77, 74 和 48，折减后得到的矿岩体物理力学参数见表 6，区域控矿构造特性参数采用类比法获得，其具体取值见表 7。

### 4.4 边界条件和初始条件

当模型完成区域划分及可变形体化之后，便可施加边界条件和初始条件，且应力边界条件一般需在速度边界条件之前指定。由于模型上部至地表自由面，因此只需要采用“BOUNDARY”命令限定模型侧边界在 X, Y 方向的水平运动速率为 0，限定底部在 X, Y, Z 方向上的运动速率为 0 即可。

然后采用“INSITU”命令对模型的初始原岩应力场进行定义(包括相应的应力梯度)，并进一步施加重力的影响作用，即在高程方向上采用 gravity 施加重力加速度 10 m/s<sup>2</sup>。由于矿山还未曾进行过地应力测量工作，因此本次模拟所采用的参数根据现有的经验公式<sup>[20]</sup>进行估算：

$$\sigma_v = \gamma H \tag{5}$$

$$\sigma_{hav} = \frac{\sigma_{hmax} + \sigma_{hmin}}{2} \approx (0.8 \sim 1.5)\sigma_v \tag{6}$$

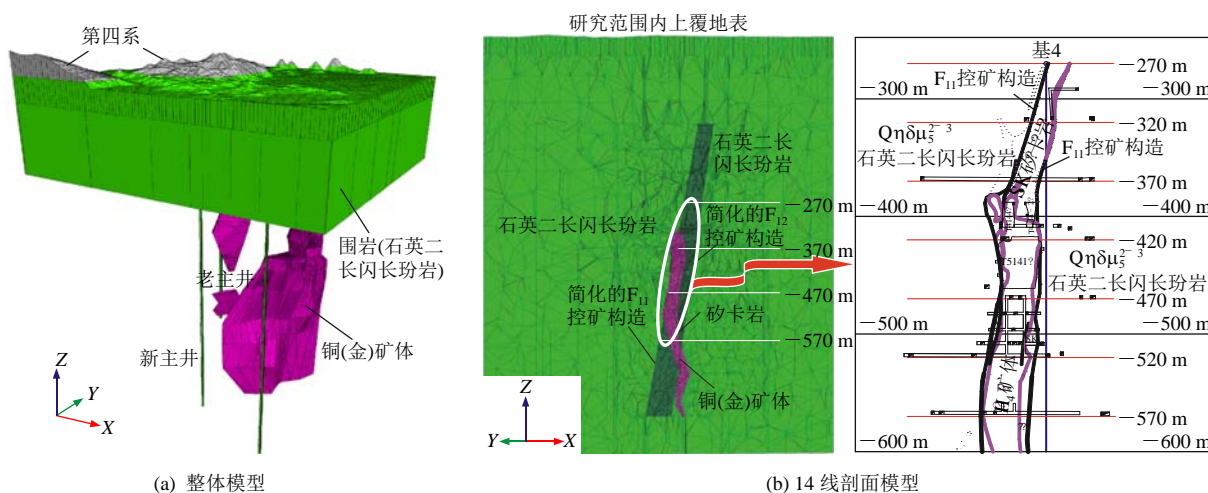


图 6 数值计算建模结果

Fig.6 Modeling result of numerical calculation



表6 折减后的矿岩体物理力学参数

Table 6 Physico-mechanical parameters of orebody and surrounding rocks after reduction

序号	岩组类型	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 $\sigma_c / \text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t / \text{MPa}$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\nu$	体积模量 $K / \text{GPa}$	剪切模量 $G / \text{GPa}$	黏聚力 $c / \text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
1	铜(金)矿体	3 190	36.00	1.10	47.32	0.23	29.21	19.24	12.00	44.40
2	石英二长闪长玢岩	2 580	28.00	0.80	39.81	0.21	22.88	16.45	10.50	43.60
3	矽卡岩	3 100	3.50	0.10	7.21	0.19	3.88	3.03	3.60	33.40
4	第四系	2 100	3.00	0.20	0.20	0.30	0.17	0.08	0.12	25.00
5	充填体	2 000	3.56	0.40	0.49	0.18	0.26	0.21	1.09	35.86

表7 区域控矿构造特性参数

Table 7 Characteristic parameters of regional ore-controlling structure

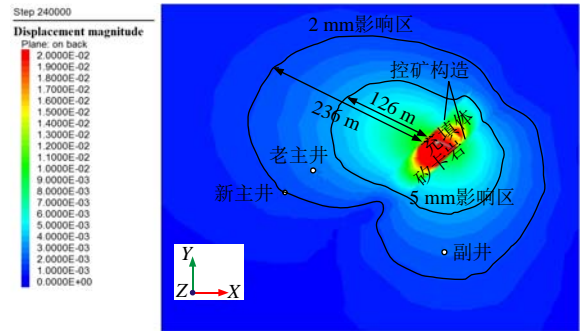
法向刚度/ $(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	剪切刚度/ $(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	黏聚力/ $\text{MPa}$	摩擦角/ $(^\circ)$	剪胀角/ $(^\circ)$	抗拉强度/ $\text{MPa}$
2	1	0.02	30	15	0

式中:  $\sigma_v$  为垂直应力;  $\gamma$  为上覆岩层的容重;  $H$  为埋深;  $\sigma_{h\max}$ ,  $\sigma_{h\min}$  和  $\sigma_{hav}$  分别为最大、最小和平均水平应力。

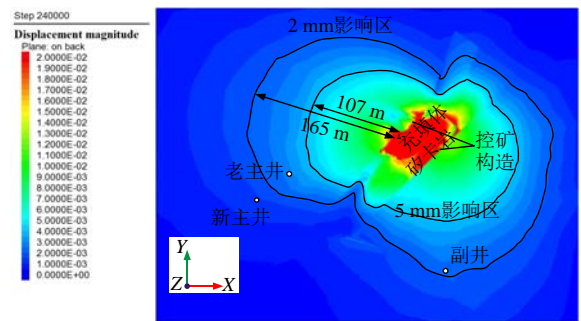
根据矿山历史开采经验,同时参考周边矿山(如铜绿山铜矿)部分已有地应力成果资料,本次应力估算中式(6)中  $\sigma_{hav} / \sigma_h$  取 1.3,  $\sigma_{h\max} / \sigma_v$  取 1.5, 则计算可得-570 m 水平垂直应力为 16.10 MPa, 最大水平主应力为 24.15 MPa, 最小水平主应力为 17.71 MPa, 可见-570 m 水平及以上区域的应力水平较低, 且垂直方向和最大、最小水平应力方向的应力梯度分别为 0.026, 0.039, 0.029 MPa。

4.5 模拟结果及其分析

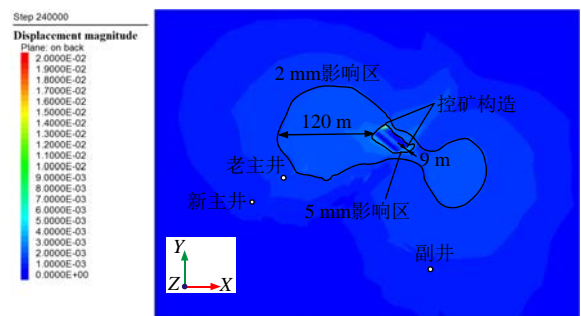
从 2010~2017 年矿山共完成了 10 线以西-270~-570 m 中段设计保护范围内的共计 25 个采场(部分底柱)的充填开采, 基于历史回采过程模拟计算方案, 以年度为基本回采步骤, 待模型初始平衡后, 便可逐一完成各步骤的采-充循环模拟, 记录分析各步骤位移变化情况, 同时重点研究分析 2016~2017 年度采-充完毕之后的区域覆岩和地表变形特征。step 7 采-充完毕后主要水平的影响范围位移云图如图 7 所示, 沿矿体走向竖直剖面位



(b) -370 m 水平位移云图

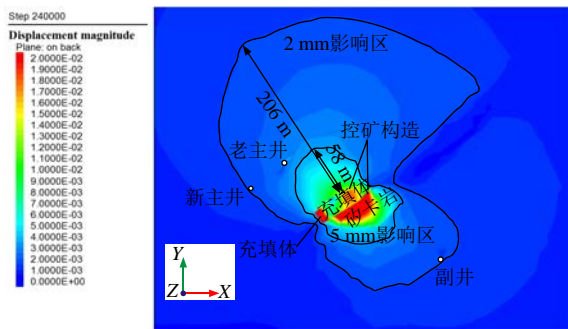


(c) -470 m 水平位移云图



(d) -570 m 水平位移云图

图7 主要水平剖面位移分布云图及影响范围(单位: m)  
Fig.7 Contours of displacement of main horizontal section and its influence range(unit: m)



(a) -270 m 水平位移云图

移云图及影响范围如图 8 所示, 根据 2010~2017 各年度(不同的充填开采步)对应的沿矿体走向竖直剖面位移云图, 可得开采时间效应对区域覆岩和地表变形的影响情况, 其中不同影响范围边界线与地表之间的最小距离随年度的变化曲线如图 9 所示。

根据主要水平方向和沿矿体走向竖直剖面方向位移分布云图, 便可绘制出完全充填开采下 step 7

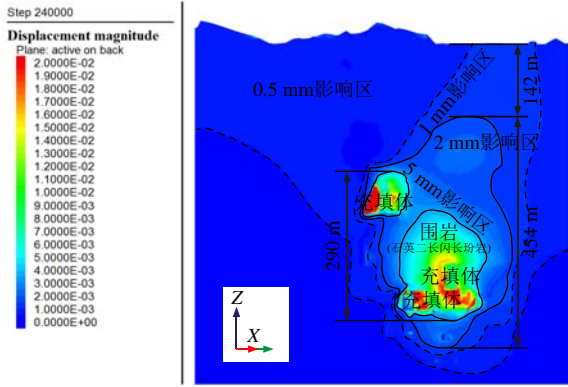


图 8 沿矿体走向垂直剖面位移云图及影响范围(单位: m)  
Fig.8 Displacement distribution and its influence range along orebody trend of vertical section(unit: m)

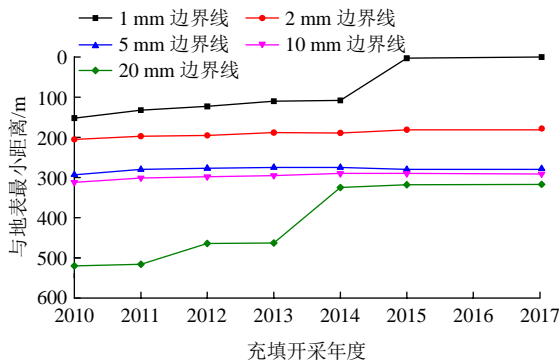


图 9 不同影响边界与地表的最小距离随年度变化曲线  
Fig.9 Curves of the minimum distance between the different influence boundary and surface changing with years

采 - 充完毕后的影响范围区域, 如图 10 所示, 其各水平 2 和 5 mm 最大影响范围边界连线形状均为以开采区域为轴线的近似椭圆形边界。由图 7~10 可知, 对于桃花嘴金矿 10 线以西研究范围内完全充

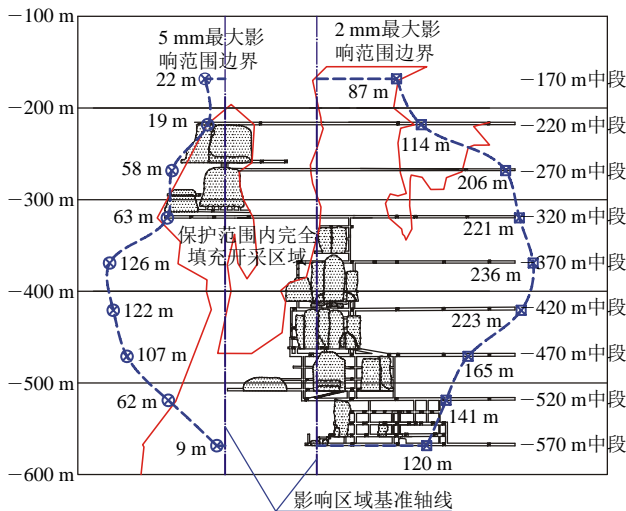


图 10 完全充填开采下的最大影响范围示意图  
Fig.10 Diagram of maximum influence range under the condition of completely backfill mining

填开采区域, 其影响范围主要局限在采场周边一定区域内, 且开采区域和地表变形具有以下特点:

(1) 在水平方向上, 其岩移影响范围与各水平充填开采采场数量和采 - 充区域大小相关, 其中 -320, -370 和 -420 m 三个中段采场数量较多, 从采场中间边界起算其水平方向上 2 和 5 mm 岩移影响范围分别超过 200 和 100 m; 各水平 2 和 5 mm 岩移边界均呈近似“8”字形, 且垂直于矿体走向方向的岩移范围最大。

(2) 在垂高方向上, 尽管其上覆岩层会受到开采的影响呈现出典型的微沉降盆地现象(如图 8 中的虚线所示), 但其 2 和 5 mm 影响范围均是有限的, 其中 2 mm 影响区域高度为 454 m, 5 mm 影响区域高度为 290 m, 2 mm 影响区域边界与上覆地表最小距离为 142 m, 这一特点与一般的空场法或崩落法开采有明显的不同。

(3) 结合水平方向和垂高方向岩移分布情况可知, 充填法开采其显著岩移扰动范围(大于 2~5 mm) 是以开采区域为核部的近似椭球体, 且当充填开采达到一定深度后, 该近似椭球体对地表的影响微弱。

(4) 根据影响范围边界线与地表之间的距离随时间变化曲线分析可知, 不同影响边界与地表的最小距离均随着开采年度的增长、开采范围和采场数量的增加, 逐渐呈减小趋势, 5 mm 以下变形区域主要发生在采场周边的石英二长闪长玢岩岩体内, 而 5~10 mm 以上变形区域则主要发生在采场充填体及采场邻近区域的矽卡岩内, 充填体和矽卡岩的流变变形影响范围大多局限在采场周边 50~100 m 区域内, 且通过分析可知, 在 2010~2017 年整个回采过程中, 地表在 2014 年以前处于未扰动状态, 2014 年开始逐渐处于 0.5~1 mm 微变形影响区域, 说明 8 a 来整个开采过程中的时间效应对地表变形影响始终处于微弱状态。

通过上述模拟结果分析可知, 充填开采对于周边区域的影响是有一定范围界线的, 超出此范围的影响是有限的和微小的, 因此充填开采可以有效的控制开采区域岩移沉降和保护地表, 对于桃花嘴金矿 10 线以西矿体多中段充填开采, 至 2017 年开采后上覆地表处于 0.5~1 mm 影响区, 沉降量微小, 符合现有规范要求, 地表安全现状良好。

### 5 地表沉降观测

基于主副井及地表工业场地部分建筑物安全需

要，矿山自 2016 年 1 月开始对 10 线以西地表主要建、构筑物进行定期的沉降观测，根据观测数据综合分析可在一定程度上反映地表沉降变形特征，为地表安全现状评价提供了一定的依据。

### 5.1 观测方案

根据桃花嘴金矿 10 线以西保护范围内地表建筑物分布现状，经过技术人员对各建筑物实地查看比较，确定研究范围内最终沉降变形观测对象主要包括公司办公楼、文体中心、副井和新主井、选矿车间破碎工段厂房等，共计布置 18 个观测点，其中公司办公楼东头布置“办 1”和“办 2”小计 2 个观测点，副井旁新办公楼布置“副 1”和“副 2”小计 2 个观测点，文体中心布置“体 1”和“体 2”小计 2 个观测点，新主井井塔+45 m 平台布置“主 1~主 4”小计 4 个观测点，选矿车间破碎工段厂房外墙上布置“破 1~破 5”、地面布置“破 6~破 8”小计 8 个观测点，如图 11 所示。

公司办公楼、副井旁新办公楼和文体中心共 6 个观测点以 GPSDSX01(高程+19.874 m)为基点构成闭合环线，新主井井塔共 4 个观测点以 GPSDSX05(高程+42.092 m)为基点构成闭合环线，选矿车间破碎工段厂房共 8 个观测点以 SD15(高程+52.613 m)为基点构成闭合环线，所有闭合环线均采用“DS3 型水准仪+双面木塔尺”按四等水准观测，观测周期

为每月一次。

### 5.2 观测结果及其分析

矿山自 2016 年 1 月份开始组织专人负责各沉降观测点的观测工作，至 2017 年 12 月底各观测点共计观测 22~24 次，基于 2 a 来的沉降观测数据，在同一闭合环路中，以各观测点初始观测高程值为基准，通过计算各次观测高程值与初始基准高程值的差值来反映各观测点沉降量的变化情况，公司办公楼、副井旁新办公楼和文体中心(GPSDSX01 闭合环线)沉降观测结果如图 12 所示，新主井井塔(GPSDSX05 闭合环线)沉降观测结果如图 13 所示，选矿车间破碎工段厂房(SD15 闭合环线)沉降观测结果如图 14 所示。

根据各闭合环线的观测结果验算可知，3 个水准路线闭合差均满足四等水准测量规范要求，并且同一闭合环线的各沉降观测点的沉降量变化规律基本是一致的，分析可知各闭合环线沉降观测分别有如下规律：

(1) GPSDSX01 闭合环线中，根据各观测点沉降量变化趋势可知，除了 2016 年 10 月和 2017 年 3 月发生了 4~8 mm 的沉降位移外，各测点沉降变化量大多沿着 0 mm 水平线上下波动，由于整个观测过程中沉降量小，且没有出现明显变大的趋势，因此可以认为此波动主要受观测误差的影响，实际受充

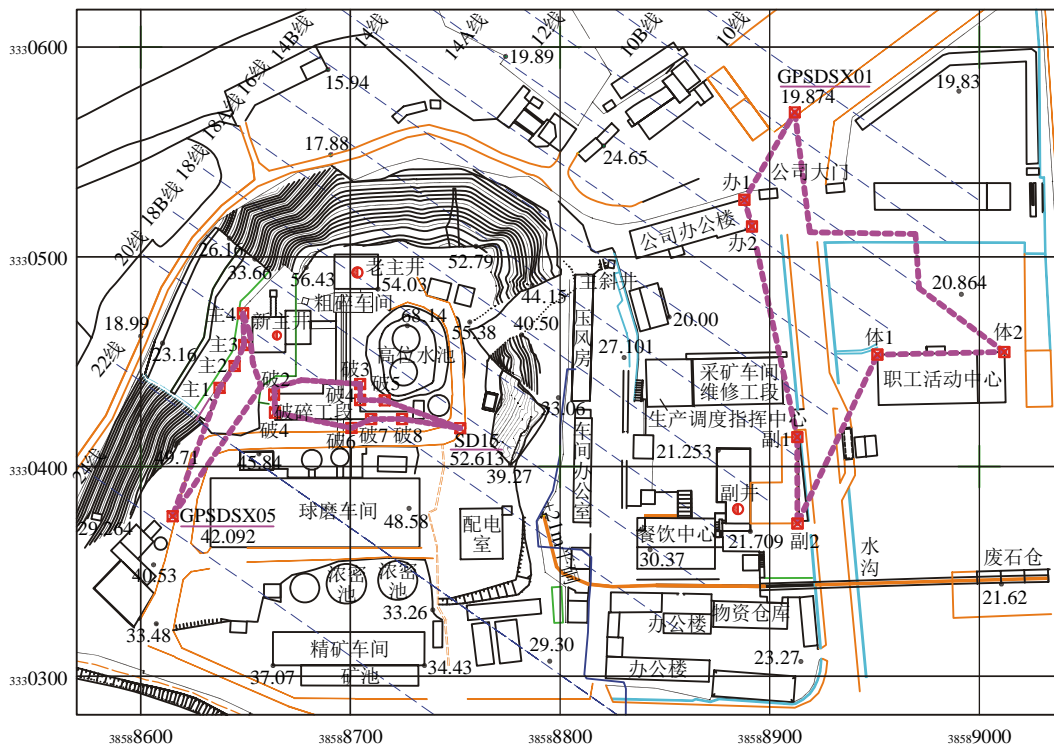


图 11 地表沉降观测点布置图  
Fig.11 Layout of points for surface subsidence observation



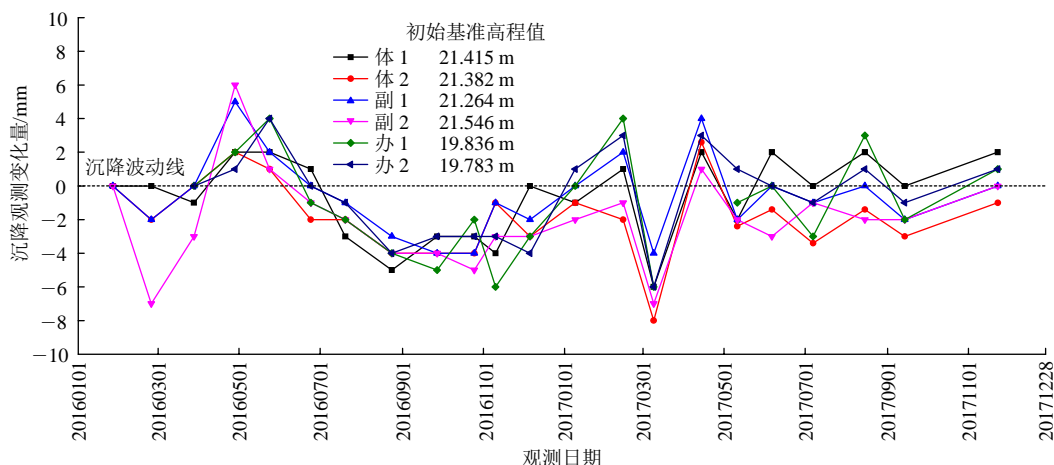


图 12 GSPDSX01 闭合环线各观测点沉降观测结果

Fig.12 Measured settlement results at observation points among the closed loop of GSPDSX01

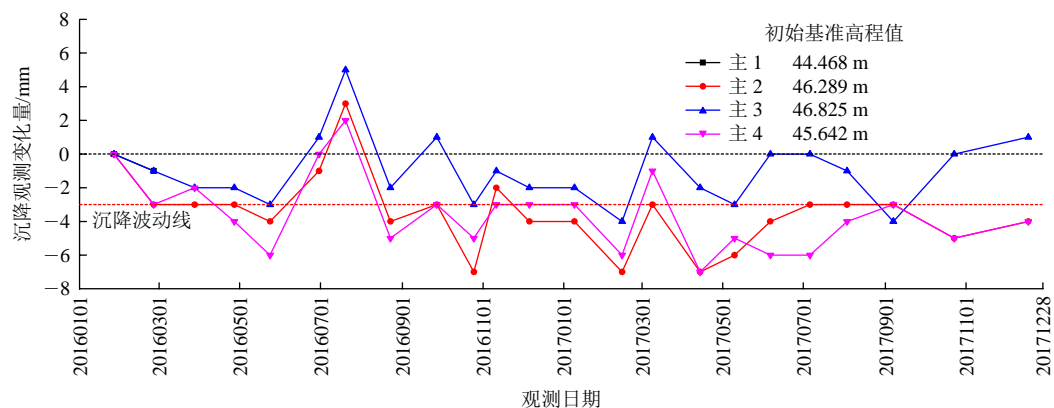


图 13 GSPDSX05 闭合环线各观测点沉降观测结果

Fig.13 Measured settlement results at observation points among the closed loop of GSPDSX05

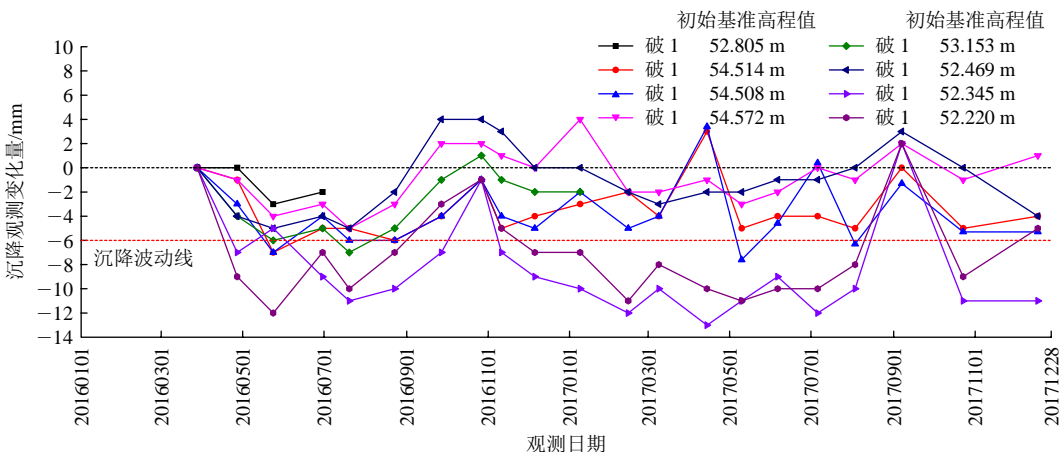


图 14 SD15 闭合环线各观测点沉降观测结果

Fig.14 Measured settlement results at observation points among the closed loop of SD15

填开采影响的沉降变形量十分微小，可以忽略不计。

(2) GSPDSX05 闭合环线各观测点中，除了“主 3”观测点 2016 年 8 月沿着 0 mm 线上下波动外，各观测点沉降量整体上沿着 -3 mm 水平线上下波动，波动过程中最大沉降量为 -7 mm(2016 年 10 月“主 2”测点、2017 年 2 月“主 2”测点、2017 年

4 月“主 2”和“主 4”测点)，且至 2017 年 12 月底为止没有增大的趋势，说明整体沉降量稳定且沉降量微小。

(3) SD15 闭合环线中，2016 年 6 月~2016 年 8 月各观测点先发生 -4~-11 mm 的沉降，随后有所上升，且各观测点沉降量整体上沿着 -6 mm 水平线

上下波动，波动过程中最大沉降量为-13 mm (2017年4月“破7”测点)，且至2017年12月底为止没有继续增大的趋势，说明整体沉降量稳定。

矿山基于国家现有相关规程要求采用类比法确定了矿区地表重要建筑物、地表沉降允许变形值为±15 mm，对比3个闭合观测环线2年来的观测结果可知，目前所有观测点的沉降观测结果均未超限，总体均在正常波动范围内，分析各观测环线出现波动差异性的原因主要有：①观测过程中由于仪器设备自身精度和人员作业水平的不同或者观测点的标石等受到矿区日常作业的扰动等，导致观测出现一定的上下波动，根据观测结果可知波动范围小；②环线观测点所处位置的差异，SD15闭合环线18B~22线之间西部，GPSDSX05闭合环线位于20~24线之间西部，GPSDSX01闭合环线位于10~18线之间东部，3个闭合环线与-270~-570 m充填开采区域的水平投影距离大小依次是 $L_{GPSDSX01} > L_{GPSDSX05} > L_{SD15}$ ，可见与充填开采区域的水平投影距离越近，其对应区域地表沉降受到开采活动的影响相对越大。尽管充填开采会对上覆地表沉降产生一定的影响，但影响程度均处于允许的范围内，与空场法或崩落法相比，充填开采可以有效的控制地表岩层移动和沉降变形，从目前沉降观测结果来看矿区地表总体安全稳定性良好。

## 6 地表变形特征及现状讨论

综合 AHP-Fuzzy 综合评价、数值模拟以及地表沉降观测结果可知，采用不同的方法的分析评价结果总体基本一致，即完全充填开采对区域覆岩和地表的影响范围有限，地表变形微小，目前已开采区域上覆地表安全性良好。现针对各方法得出的结果，将完全充填开采区域及地表变形特征和现状比较讨论如下：

(1) 对比3种方法的分析评价结果可知，所建立了采场安全现状 AHP-Fuzzy 评价模型和“单采场→覆岩区域及地表”安全评价模式是合理的，且在所识别的11个风险评价因子中，矿体赋存条件、采矿方法以及距离主副井位置对区域的安全稳定性影响相对最为显著，这与地下金属矿山开采安全规范及常识是一致的，此模糊评价模型也侧面反映了充填法在安全开采控制方面较其他采矿方法的优越性。此评价模型可用于类似充填开采矿山的采场及区域安全稳定性评价。

(2) 基于数值模拟结果可知，在长达8a的充填开采过程中，充填体会在覆岩压力作用下不断密实沉降直至相对稳定，同时力学性能较差的矸卡岩也会发生一定的变形直至相对稳定，因此开采后充填体自身和矸卡岩地段是区域岩移最大的部位。充填体在压缩密实变形的过程中也会提供一定的反作用力来抑制覆岩沉降变形的进一步扩展，最终在覆岩中形成一定高度的相对显著的“自然岩移拱”，该“自然岩移拱”的岩移量一般大于2~5 mm，本研究中的岩移拱顶标高为-123 m，距离地表高度142 m，整个相对显著扰动区域在三维空间形态是以充填开采区域为核部的近似椭球体；而在非显著扰动区域至地表在开采作用下会形成“微沉降盆地”，整个地表区域位于0.5~1 mm微影响区。矩形采场充填开采覆岩及地表变形特征及分区示意图如图15所示。数值模拟结果揭示了完全充填开采覆岩移动和地表变形的具体特点，这些特点在模糊评判结果和现场观测结果中均有所体现。

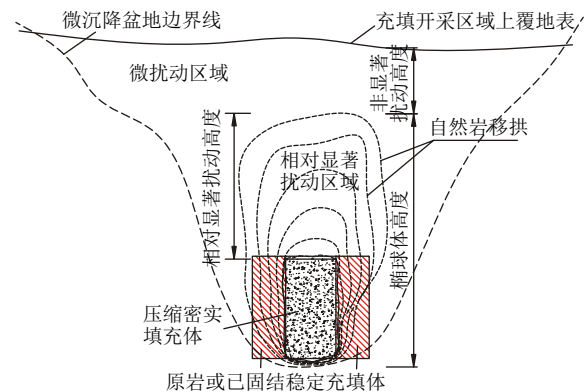


图15 矩形采场充填开采覆岩及地表变形特征及分区示意图

Fig.15 Overburden and surface deformation characteristics and division under rectangular slope backfill mining

(3) 根据2010~2017年整个充填开采过程数值模拟沿走向垂直剖面位移变化情况分析可知，不同影响边界与地表的最小距离均随着开采年度的增长逐渐呈减小趋势，其中2, 5和10 mm岩移边界与地表最小距离随开采时间的推进缓慢变化，分析其原因主要是-270和-320 m中段采场开采充填后，矿岩及充填体在开采扰动下短期内(往往只有数个月)即发生稳定的岩移变化，在随后下部中段各采场开采下其岩移范围也不会受到显著影响；1 mm岩移边界与地表最小距离在2014~2015年发生显著的突变，与地表最小距离由2014年的108 m急剧减小至2015年的3 m，2016~2017 m更是直接到达部分



地表, 分析原因主要是 2015 年开始研究范围内主要中段各采场基本充填回采完毕, 部分采场岩移范围叠加导致 1 mm 岩移影响区域迅速增加直至地表; 20 mm 岩移边界主要为充填体和局部矽卡岩地段发生的流变变形, 其与地表最小距离由 2013 年的 463 m 迅速减小至 2014 年的 325 m, 分析其原因则主要是 2014 年-320 和-420 m 部分采场回采结束, 充填体和矽卡岩变形区域由最初的-520 m 水平增加至-320 m 水平, 从而导致相应的边界与上覆地表之间的距离显著减小。从开采影响区域整体变化趋势分析可知, 尽管研究范围内充填开采对地表影响有所增加, 但总体上影响仍然十分微小(位于 0.5~1 mm 变形区域内), 对地表安全不构成威胁。

(4) 基于观测结果可知, 目前开采区域内上覆地表布置的 3 个闭合环线中的各观测点均处于稳定波动状态, 其中 GPSDSX01, GPSDSX05, SD15 闭合环线各自整体分别沿着 0, -3, -6 mm 水平线上下波动, 整个观测波动过程各观测点沉降量均未超过允许变形值, 此结果与模糊综合评价分析结果较为一致; 但与数值模拟结果相比, 部分观测点部分时间内的观测结果相比偏大, 分析其原因认为除了观测点所处位置有一定的影响外, 导致偏大的更主要原因是观测仪器设备性能及人员操作水平所导致的误差, 各闭合环线区域实际平均沉降量可认为是整体波动线的数值。

## 7 结 论

通过采用多种方法对桃花嘴金矿 10 线以西-270~-570 m 水平设计保护范围内 8 a 来完全充填开采下区域覆岩与地表变形特征及现状进行研究, 可以得出如下结论:

(1) 完全充填开采下, 影响采场及区域安全现状包括自然条件、回采扰动、生产管理 3 个方面的 11 个风险因子, 并据此建立了一套安全现状模糊评价模型, 评价结果表明 25 个采场中 22 个采场的安全性属于 II 级较好, 同时可分析推断出区域覆岩及地表安全稳定性较好。

(2) 数值模拟结果表明充填开采对覆岩及地表扰动有限, 充填体与覆岩相互作用中, 逐步在覆岩中形成一定高度的相对明显的“自然岩移拱”, 整个相对明显扰动区域在三维空间的形态是以充填开采区域为核部的近似椭球体, 充填开采达到一定深度时, 该椭球体对上覆地表影响是微弱的; 而微扰动

区域在开采作用下会形成“微沉降盆地”。另外, 模拟结果表明随着开采时间的推进, 地表在 2014 年以前处于未扰动状态, 2014 年开始逐渐处于 0.5~1 mm 微变形影响区域, 8 a 来整个开采过程中地表变形随时间变化微小。

(3) 开采区域内上覆地表布置的 3 个闭合环线 GPSDSX01, GPSDSX05, SD15 整体上分别沿着 0, -3, -6 mm 水平线上下波动, 各观测点在 2 a 来的观测结果均未超过允许变形值, 目前矿区地表沉降变形总体上安全稳定。

(4) 本研究成果可为地下金属矿山“三下”开采岩移控制与地表保护提供了一定的理论依据和工程实例借鉴, 同时一定程度上反映了充填法开采时传统的岩移理论中按照空场法开采时设计岩层移动角和圈定岩移范围往往是过于保守的, 地下金属矿山充填法开采时岩移角和岩移范围的合理确定是一个关乎矿山安全生产、资源合理利用及经济效益的值得进一步深入研究的课题。

## 参考文献(References):

- [1] 江飞飞, 李向东, 万兵, 等. 盘区二步骤采场嗣后胶结充填对岩层移动影响分析[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(10): 94-98.(JIANG Feifei, LI Xiangdong, WAN Bing, et al. Influence analysis of strata movement in subsequent cemented filling of panel second-step stopes[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(10): 94-98.(in Chinese))
- [2] 赵海军, 马凤山, 李国庆, 等. 充填法开采引起地表移动、变形和破坏的过程分析与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 670-676.(ZHAO Haijun, MA Fengshan, LI Guoqing, et al. Analysis and mechanism of ground movement, deformation and fracture induced by underground backfill mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 670-676.(in Chinese))
- [3] 丁德民, 马凤山, 张亚民, 等. 急倾斜矿体分步充填开采对地表沉降的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 249-254.(DING Demin, MA Fengshan, ZHANG Yamin, et al. Effect of multi-step backfilling of steep orebody on ground surface subsidence[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(2): 249-254.(in Chinese))
- [4] 彭府华, 李庶林, 李小强, 等. 金川二矿区大体积充填体变形机制与变形监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 104-113.(PENG Fuhua, LI Shulin, LI Xiaoqiang, et al. Deformation monitoring of bulky backfill in No.2 mine area in Jinchuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 104-113.(in Chinese))

- [5] YANG Z, ZHAI S, GAO Q, et al. Stability analysis of large-scale stope using stage subsequent filling mining method in Sijiyang iron mine[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1): 87 - 94.
- [6] 于世波, 杨小聪, 董凯程, 等. 空场嗣后充填法充填体对围岩移动控制作用时空规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(3): 430 - 434.(YU Shibo, YANG Xiaocong, DONG Kaicheng, et al. Space-time rule of the control action of filling body for the movement of surrounding rock in method of the delayed filling open stoping[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, 31(3): 430 - 434.(in Chinese))
- [7] SHESHARI M. A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 20(13): 5 183 - 5 208.
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50771—2012 有色金属采矿设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50771—2012 Code for design of nonferrous metal mining[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国国家标准编写组. GB16423—2006 金属非金属矿山安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB16423—2006 Safety regulations for metal and nonmetal mines[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. AQ/T2050.2—2016 金属非金属矿山安全标准化规范地下矿山实施指南[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. AQ/T2050.2—2016 The applicable guide of standardized specification of work safety for metal and nonmetal underground mines[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2016.(in Chinese))
- [11] 李 铀, 白世伟, 杨春和, 等. 矿山覆岩移动特征与安全开采深度[J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 27 - 32.(LI You, BAI Shiwei, YANG Chunhe, et al. Characters of overburden strata movement of mines and safe mining depth[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 27 - 32.(in Chinese))
- [12] NAGHADEHI M Z, MIKAEIL R, ATAEI M. The application of fuzzy analytic hierarchy process(FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(4): 8 218 - 8 226.
- [13] BADRI A, NADEAU S, GBODOSSOU A. A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6): 1 145 - 1 158.
- [14] 原虎军, 陈玉明, 赵继锋. FAPH 在采场安全风险分析中权重分配的应用[J]. *有色金属科学与工程*, 2010, 1(3): 55 - 58.(YUAN Hujun, CHEN Yuming, ZHAO Jifeng. The application of FAHP in priorities of the stope security's risk analysis[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2010, 1(3): 55 - 58.(in Chinese))
- [15] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 1): 2 627 - 2 632.(HUANG Jianwen, LI Jianlin, ZHOU Yihong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup.1): 2 627 - 2 632.(in Chinese))
- [16] 范 英, 李 辰, 晋民杰, 等. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(7): 70 - 74.(FAN Ying, LI Chen, JIN Minjie, et al. Research on application of triangular fuzzy number and AHP in risk evaluation[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(7): 70 - 74.(in Chinese))
- [17] SAATY T L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process[J]. *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales Serie A Matematicas*, 2008, 102(2): 251 - 318.
- [18] 龚 剑, 胡乃联, 崔 翔, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1 442 - 1 448.(GONG Jian, HU Nailian, CUI Xiang, et al. Rockburst tendency prediction based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1 442 - 1 448.(in Chinese))
- [19] 朱合华, 张 琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(10): 1 945 - 1 963.(ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 1 945 - 1 963.(in Chinese))
- [20] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013: 125 - 134.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. *Rock mechanics and engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013: 125 - 134.(in Chinese))