

# 采场稳定性评价与结构参数优化 设计集成技术

房智恒\*

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南长沙 410007)

**摘要:**结合某地下稀土矿山工程实例,提出了一套融合地形信息、地质信息和力学信息的集成技术.充分利用地表、地质基础数据,在 DIMINE 可视化建模平台上构建复杂地质体精细化三维模型,结合初拟的采场结构参数完成采场单元划分,通过.dxf 文件导入 MIDAS 软件平台完成各地质体和拟定采场的三维网格划分,利用接口程序实现网格与 FLAC<sup>3D</sup> 力学模型的无缝转换.综合运用 Mathew 稳定图法和集成技术对初步拟定的两种开采方案形成的空场进行稳定性评价,结果表明 Mathew 稳定图法与数值模拟结论相一致.

**关键词:**采场稳定性;两步骤回采;数值模拟;Mathew 法;嗣后充填采矿法

**中图分类号:**TD214      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2019)04-0001-09

## Research on Integrated Technology of Stope Stability Evaluation and Structural Parameter Optimization Design

Fang Zhiheng

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** Combined with an underground rare earth mine engineering example, a set of integration technology integrating topographic information, geological information and mechanical information is proposed. A refined three-dimensional model of complex geological bodies is built, and the stope unites are divided according to the initially proposed stope structural parameters by making full use of the surface and geological basic data on the DIMINE visual modelling platform. The three-dimensional grids of local plastids and proposed stopes are divided by importing models into MIDAS software platform through dxf files. Grids are seamlessly converted into FLAC<sup>3D</sup> mechanical model by using interface program. The stability of the empty field formed by the two mining schemes initially drawn up is evaluated through the comprehensive application of Mathew stability diagram method and integration technology. Results show that the Mathew stability diagram method is consistent with the numerical simulation conclusion.

**Keywords:** stope stability; two-step stoping; numerical; Mathew method; subsequent filling mining method

随着中国经济飞速发展,浅地表资源逐步消耗殆尽,资源开发转向深部,加之绿色开采理念的推广和开采技术日趋成熟,使得两步骤充填采矿法成为深部开采和绿色矿山建设的主体采矿工艺.合理的采场结构尺寸关系着采矿作业的安全和成本,优化的开采顺序也是矿山实现安全开采的重要保障.判断采场在开

采过程中的稳定性是两步骤采矿法实施面临的关键问题之一。

采场稳定性分析一直以来都是采矿与岩土工程领域的基本命题。采场失稳是我国地下金属矿山生产中最为重大的安全隐患,导致大规模的人员伤亡时有发生,对矿山人员以及设备已经构成了极大的威胁。因此,加强采场稳定性分析和研究对保障矿山安全生产具有重要意义。极限平衡法、有限元法、有限差分法、边界元法、离散元法、可靠性分析法和相似模拟法相继得到成功应用。然而这些方法仅仅提供了分析采场稳定性的工具,计算结果很大程度上取决于对地质体特征的掌握程度,只能通过合理简化的方法进行分析;在此基础上开发的力学软件难以构建三维地质体精细化模型,直接影响计算结果的精度。随着计算机技术的不断发展,各类仿真软件逐步在矿业领域得以应用,三维可视化复杂地质体建模与力学模拟技术日趋成熟,房智恒等<sup>[1]</sup>以 Micromine 软件为基础构建矿山地质体三维模型,通过编制转换程序将几何模型转换成 FLAC<sup>3D</sup> 力学模型,成功分析了花岭沟铁矿地下开采对地表沉降影响。胡建华等<sup>[2]</sup>运用 3Dimine-Midas-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模技术构建了地表、采场的精细化模型,在此基础上获得了卧虎山铁矿采场暴露面积最佳值。

国内某地下矿山位于西南地区,海拔+1 650~+3 596 m,地貌为以构造剥蚀为主高中山。矿体形成与喜山期碱性花岗岩岩浆及后期热液有关,属于受北东向断裂带控制的内生碱性岩浆热液型稀土矿床。矿体赋存于二叠系中统阳新组大理岩与二叠系上统峨眉山玄武岩组绿泥石片岩接触部位的层间断裂中。矿体顶板围岩为绿泥石片岩,底板围岩为大理岩。顶底板围岩质量较差,且遇水软化,确定合理的采场结构参数关系着矿山安全开采,开展该方面研究工作迫在眉睫。矿山初步拟定两种开采方案及相应的采场结构参数。方案1:垂直矿体走向布置的分段空场阶段出矿嗣后充填采矿法,采场宽 12.5 m,长为矿体厚度 40 m,高 50 m,采场顶部暴露面呈水平状。方案2:沿矿体走向布置的分段空场分段出矿嗣后充填采矿法,采场宽 40 m,长 90 m,高 25 m,采场顶部暴露面与水平面呈 60°夹角。

目前,矿山采矿设计常采用三维可视化软件完成建模工作, DIMINE 软件应用较广泛、且操作简单,但该软件不能单独解决力学分析问题; Midas 是目前比较优秀的三维有限元力学分析软件,但其不是专业的建模软件,较难适应复杂地质体建模工作,同时计算核心为有限元算法,不能模拟大变形力学问题; FLAC<sup>3D</sup> 是岩土工程领域应用广泛的大变形力学分析软件,但建模功能较弱。针对各自的优缺点,本文提出了一套基于复杂地质体的采场稳定性分析与结构参数优化设计的集成技术,包括采用 DIMINE 软件构建地质体三维可视化精细模型。基于 Midas 完成高质量网格划分,基于有限差分法开展采场稳定性评价。技术流程见图 1。

## 1 复杂地质体精细化建模

复杂地质体常采用专业矿山建模软件完成精细化建模工作,本文采用 DIMINE 软件构建地表、岩层、矿体等几何模型,为后续采场划分、力学分析提供数据。建模功能采用先进的三角网构建技术,通过对地形等高线和剖面图上的散点、多段线处理后生成任何形态的复杂三维可视化地质体模型。

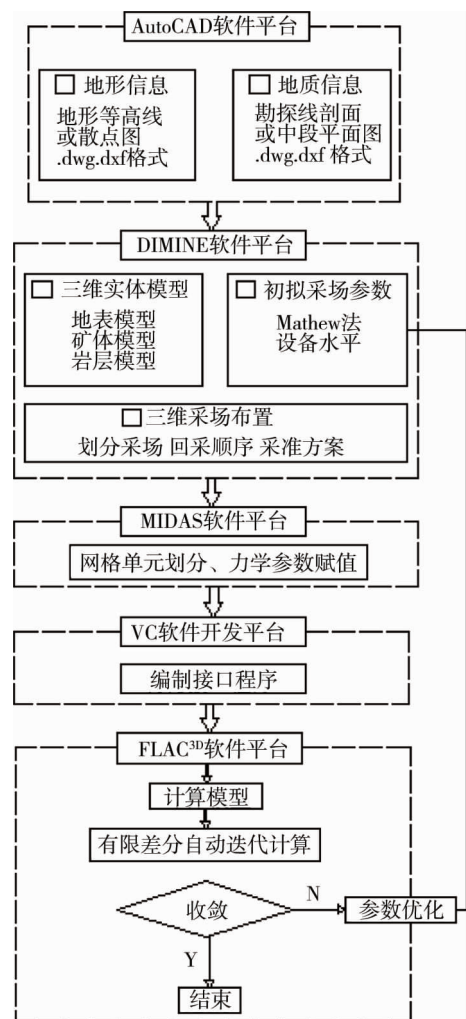


图1 采场稳定性分析与优化技术流程

地质体精细化建模主要采用无约束和有约束及快速 Delaunay 三角剖分算法建模理论.

### 1.1 地表三维建模

将矿区地表地形图.dwg 格式的文件导入 DIMINE 软件平台,通过实测散点、等高线赋高程、重合线异常点检测处理后,形成地表 DTM 模型,见图 2.

### 1.2 地质体三维建模

地质体三维模型可通过中段平面图或地质剖面图构建,为更切合实际地描述矿山地质体信息,对于实际生产,矿山常采用已有工程控制的中段平面现状图辅以地质剖面图完成地质体三维模型构建.将现有各中段平面图 2 073,2 118,2 175,2 220,2 270,2 315,2 360 m 等揭露的矿体、地质界线整理、统一比例和坐标后,保存为.dwg 格式文件,导入 DIMINE 平台.根据地质规律将相邻中段矿体相互连接,参照其他中段矿体进行修正、调整,最终形成三维模型,见图 3.

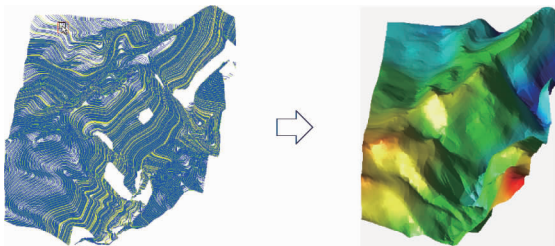


图2 地表三维模型

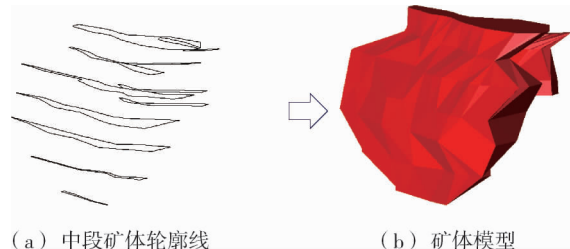


图3 矿体三维模型

从构建的三维模型分析,矿体倾角平均  $68^\circ$ ,矿体平均厚度 40 m,结合矿山现有中段划分,初步拟定两种采矿方案(见图 4):(1)采场垂直矿体走向布置,宽度为 12.5 m 两步骤不留矿柱回采,采场高 50 m (2 220~2 270 m).(2)采场沿矿体走向布置,长 100 m、留永久矿柱宽 10 m,分段高 25 m (2 220~2 245 m). 2 220 m 阶段平面采场布置见图 5.

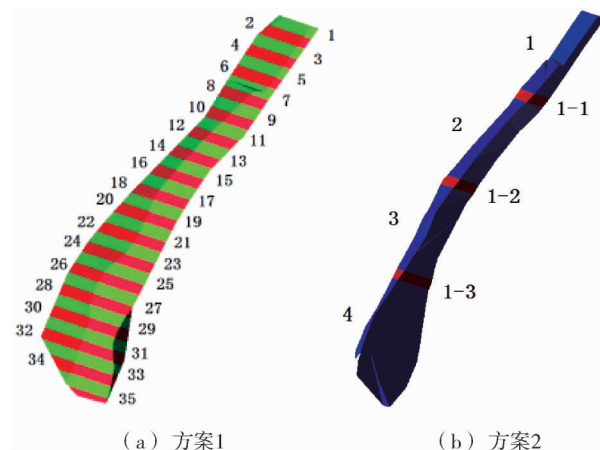


图4 中段采场划分模型

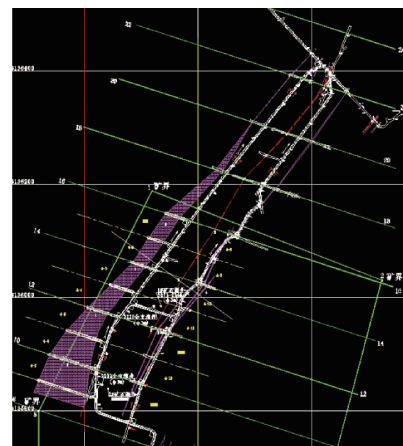


图5 2 220 m 中段采场布置

### 1.3 三维模型转换

Midas-GTS 是岩土工程领域优秀的有限元软件,前处理功能强大,能够自动划分单元网格,FLAC<sup>3D</sup> 是基于有限差分算法的岩土软件,可分析地表沉陷、采场稳定性、边坡稳定性等矿业领域岩土工程问题,具有明显的大变形分析优势.

DIMINE 软件按预设参数划分采场后(见图 6,图 7),通过.dxf 文件导入 MIDAS 平台完成模型重构和单元网格划分后,导出节点文件和单元文件.

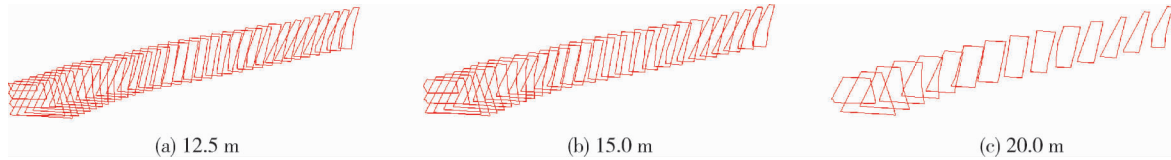


图6 方案1采场轮廓线

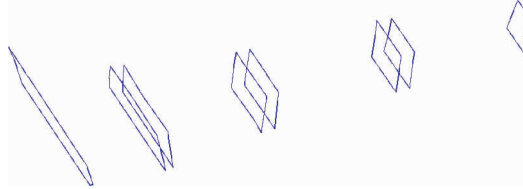


图7 方案二采场轮廓线

MIDAS 文件格式如下:

```

$ $ // 文件名称、注释、日期、计算信息
$ $ Node
NODE , 1, -457.96947883848, 50., -254.35448164143, 1, , ,
//(节点 序号 X Y Z 其他)
$ $ Element
TETRA , 1, 1, 236, 93, 94, 246, ,
//(四面体 序号 其他 节点1 节点2 节点3 节点4)
MSET , 2, kuang, , , , ,
MSETE , 2, 1015, , , , ,
, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8……
//(网格组 网格组序号 网格组名称 其他)
//(网格组项 网格组序号 网格数量 其他)

```

FLAC<sup>3D</sup>文件格式如下:

```

* 文件名称、注释、日期
* GRIDPOINTS
G 1 0 0 0 // (节点 序号 X Y Z)
* ZONES
Z T4 1 236 93 94 246
//(区域 四节点 序号 节点1 节点2 节点3
节点4)
* GROUPS
ZGROUP 'kuang' SLOT 1
1 2 3 4 5 6 7 8
9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 ……
ZGROUP 'yan' SLOT 1
1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 ……
//(编组 组名 该组单元序号)

```

采用 VC 开发平台完成转化接口程序开发,转化后 FLAC<sup>3D</sup>模型,见图 8 所示.

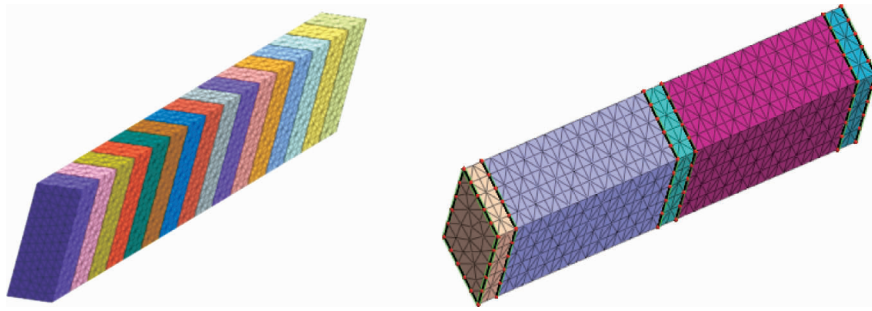


图8 划分网格后的采场模型

## 2 Mathew 法确定采场参数

### 2.1 Mathew 法简介

1974年挪威岩土所巴顿等提出了岩体隧道开挖质量分类法(NGI法),之后在此基础上发展成为Mathew图法<sup>[3-11]</sup>,该法实质上是以岩体稳定性指数 $N$ 和采场形状系数 $S$ 的关联关系做出的一个稳定性图表,见图9.该方法是在统计大量矿山实践经验的基础上提出的,具有简单快捷地对采场顶板的稳定性进行分析评价的优点.该法有两种应用方法:(1)根据岩体质量分级体系求出岩体稳定性指数 $N$ ,综合考虑开拓采准方式,初步确定采场结构参数,由采场长宽尺寸计算出形状系数 $S$ ,通过查图表的方式判断采场的稳定性.(2)根据岩体质量评价体系先求出岩体稳定性指数 $N$ ,结合图表查获采场极限暴露面形状系数 $S$ ,从而反推采场长和宽.

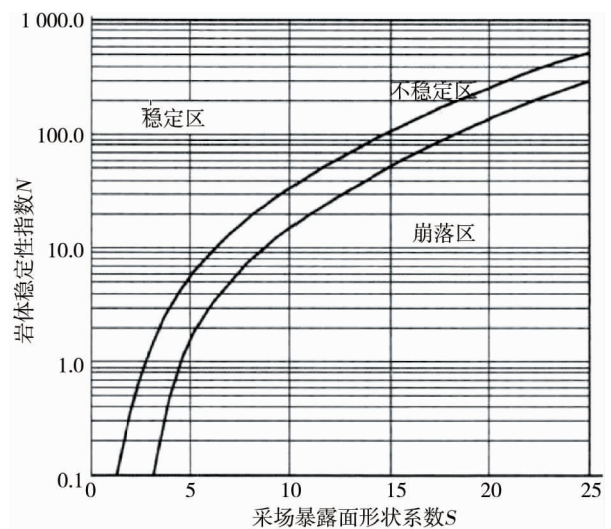


图9 Mathew 稳定图表

### 2.2 采场参数确定

稳定性指数 $N$ 计算公式如下:

$$N = QABC. \quad (1)$$

式中: $Q$ 为岩体质量指数; $A$ 为应力系数; $B$ 为岩体缺陷方位修正系数; $C$ 为采场暴露面积的方位修正系数.

其中 $Q$ 计算如下:

$$Q = \frac{R J_r J_w}{J_n J_a S_f}. \quad (2)$$

式中: $R$ 为岩体质量指标; $J_n$ 为节理组数; $J_w$ 为节理裂隙水折减系数; $J_r$ 节理粗糙度; $J_a$ 节理蚀变、充填及胶结程度; $S_f$ 应力折减系数.

应力系数 $A$ 计算如下:

$$A = \begin{cases} 0, & \sigma_c / \sigma_1 < 2; \\ 0.1 \sigma_c / \sigma_1, & 2 \leq \sigma_c / \sigma_1 \leq 10; \\ 1, & 10 < \sigma_c / \sigma_1. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma_c$ 为岩石单轴抗压强度,MPa; $\sigma_1$ 为与采场暴露面平行的采矿诱导应力,MPa.

岩体缺陷方位修正系数 $B$ 需综合考虑关键节理和采场的走向影响因素确定,当主节理与暴露面积夹角为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,依次取0.2,0.3,0.35,0.4和0.8.

当暴露面水平时 $C=1$ ;当暴露面和水平面夹角为 $\alpha$ 时, $C=8-6\cos\alpha$ .

采场形状系数  $S$  能综合反应采场形状和尺寸.

$$S = \frac{LL_1}{2(L + L_1)}. \quad (4)$$

式中:  $L$  为采场暴露面长度, m;  $L_1$  为采场暴露面宽度, m, 当  $L/L_1 > 4$  时,  $S$  基本保持不变, 宽度对稳定性起主导作用.

矿山相对稳定地段岩体质量整体评价为 III 级,  $Q$  值为 5,  $A$  值为 1,  $B$  值为 1,  $C$  值方案 1 为 2、方案 2 为 5. 因此, 可求得方案 1 稳定性指数  $N$  为 10, 方案 2 稳定性指数  $N$  为 25. 查 Mathew 稳定图表方案 1 采场暴露面形状系数  $S$  值为 6.3, 方案 2 采场  $S$  值为 8.8. 由  $S$  值确定采场极限宽度或极限长度, 方案 1 当采场长 40 m 时, 极限宽度为 18.5 m; 方案 2 当采场斜宽 40 m 时(矿体水平厚 40 m, 顶板与水平面呈  $60^\circ$  夹角), 极限长度为 31.42 m. 考虑 1.4 的安全系数后, 方案 1 设计采场极限宽度 13.2 m, 方案 2 设计采场极限长度 22.4 m. 方案 2 采用倾斜顶板的方式提高采场顶板安全性, 但采场长度拟定 90 m, 远远大于 31.42 m 的极限长度, 因此从安全角度看该方案结构尺寸不尽合理. 方案 1 采用水平顶板方式相对方案 2 顶板允许暴露面积较小, 但设计采用垂直矿体走向布置采场的方式, 宽度 12.5 m, 仍具有 1.4 的安全系数, 从安全角度比方案 2 更优.

### 3 采场稳定性数值分析

#### 3.1 力学模型构建

根据稀土矿矿体赋存条件, 计算模型选取 I 号主矿体为研究对象, 平均倾角  $68^\circ$ , 水平厚度 40 m, 垂直走向划分 35 个采场, 采场均位于 2 220 m 中段, 根据圣维南原理, 数值计算模型尺寸为 (1 400 m  $\times$  200 m  $\times$  615 m), 最低标高 2 000 m, 结构模型采用摩尔库伦模型, 由于矿体埋藏较浅, 忽略水平构造应力影响, 模型边界采用位移约束, 地表为自由面. 依据室内岩石力学试验、现场岩体质量调查分级、采用 Hoek-Brown 法确定矿体及围岩物理力学参数, 见表 1. 矿山目前处于设计研究阶段, 充填工作相对滞后, 充填体物理力学参数由类似矿山获取<sup>[12-16]</sup>.

表 1 矿体及围岩物理力学参数

岩石类型	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa	切变模量/GPa	体积模量/GPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	粘聚力/MPa
绿泥片岩	2.79	0.12	3.08	6.67	21.67	2.64
矿体	2.78	0.07	5.47	10.60	25.68	2.01
大理岩	2.58	0.05	6.40	10.70	27.06	1.06
充填体	1.79	0.20	0.10	0.24	35.00	0.27

#### 3.2 计算方案

数值模拟的主要目的是对初步拟定的两种方案进行安全验证, 同时分析两种方案在各自拟定的参数条件下采场周边应力、应变、位移及破坏区域变化规律, 并进一步验证 Mathew 稳定图法初步判定结果.

矿山开采过程中形成的空场是最危险的区域, 充填可改善围岩受力状态, 减小应力集中. 方案 1 形成的空场主要为一步骤回采和二步骤回采. 方案 2 形成的空场为一步骤回采时.

对于方案 1, 采用两步骤开采顺序进行模拟, 一步骤同时开采 1, 3, 5,  $\dots$ , 35 采场, 然后分别进行胶结充填, 最后完成 2, 4, 6,  $\dots$ , 34 采场开采.

对于方案 2, 仅模拟一步骤采场开采, 即 1, 2, 3, 4 采场同时开采.

#### 3.3 计算结果分析

方案 1 一步骤采场回采结束后和一步骤空场充填+二步骤回采结束后采场最大主应力分布、最大垂直位移及塑性区分布见图 10~图 12. 从图 10 可知一步骤采场和二步骤采场最大主应力呈现压应力的区域主要集中在采场上、下盘及顶板, 最大拉应力均小于岩体抗拉强度, 不存在拉破坏, 二步骤开采后采场最大拉应力数值由 0.11 MPa 降低至 0.09 MPa, 与充填体发挥支撑作用, 将采场周边应力进行转移重新分布有

关,但二步骤回采时空场的矿体和下盘拉应力已稍大于抗拉强度,生产中应加强对顶板和下盘的监测,防止安全事故的发生.

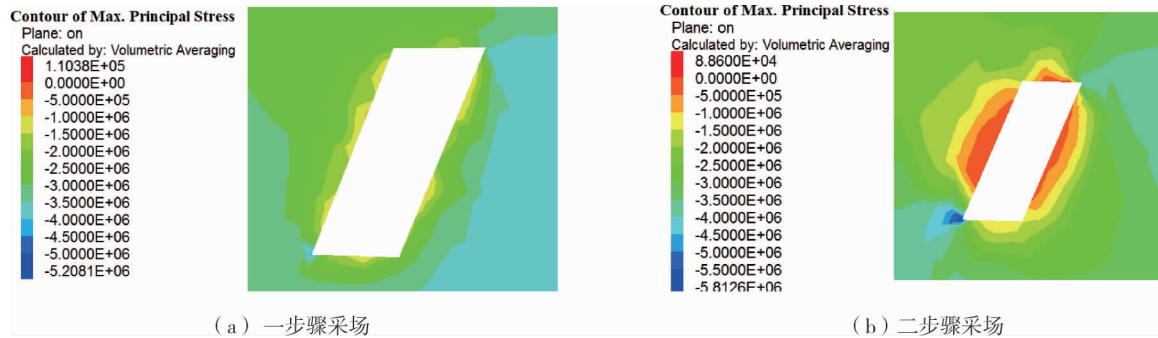


图 10 方案 1 采场最大主应力分布

从图 11 可知方案 1 一步开采时,空场沉降位移主要分布在采场顶部和底部,顶部向下沉降,底部产生底鼓现象,一步充填后二步骤开采形成的空场周边顶部和底部位移区域进一步扩大,最大值增加了一倍多,表明采用充填法虽然能有效控制采场应力集中,但二步骤空场开采的位移仍有增加的趋势.

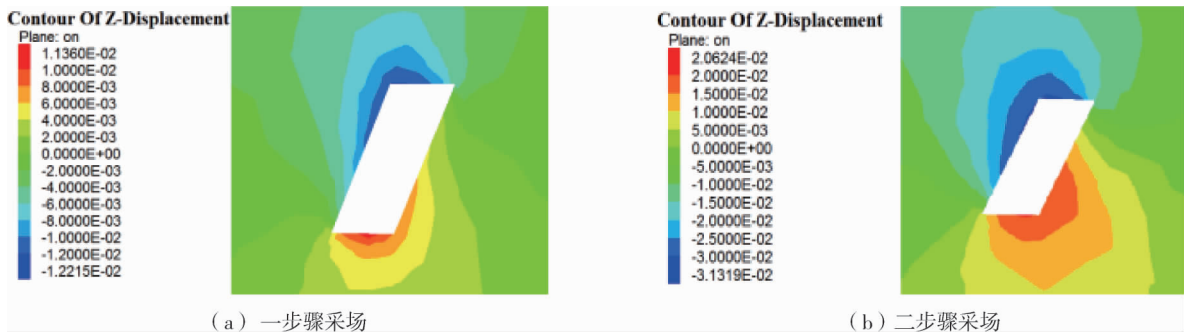


图 11 方案 1 采场垂直位移分布

从图 12 可得,一步开采时,空场周边塑性形变区域不明显,顶底板围岩未发生剪切、拉破坏,但二步骤开采时,空场下盘发生小范围剪切破坏,整体上围岩处于稳定状态,可见方案 1 采场结构参数选取相对比较合理.

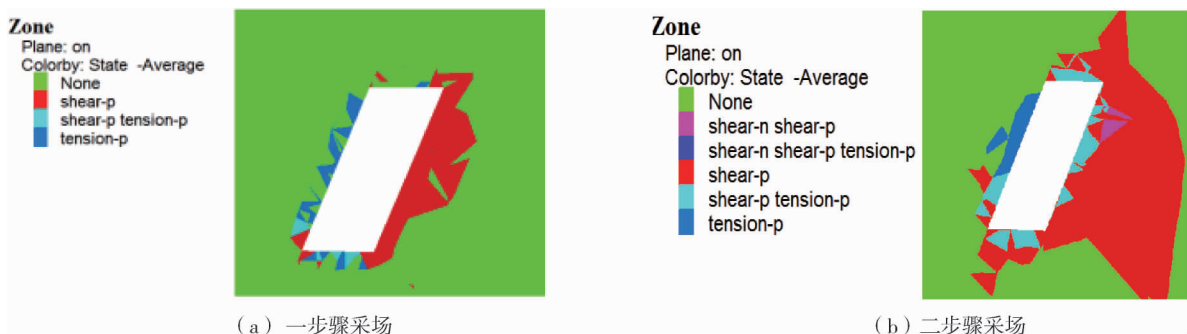


图 12 方案 1 采场塑性区分布

图 13 为方案 2 开采过程中采场周边和矿柱的应力、应变和塑性区变化规律,采场上盘发生较大面积的剪切破坏,矿柱上盘随着两边空场的形成逐步发生剪切破坏,矿柱整体稳定性相对较好,中心部位发生小范围的剪切破坏;采场沉降位移主要发生在上三角空场顶部,下三角空场底部主要发生底鼓现象,最大位移介于方案 1 一步开采和二步骤开采形成的位移之间;最大主应力中的拉应力主要集中在采场周边,数值较方案 1 一步开采时接近,除顶板外,其余三面拉应力均超过岩体抗拉强度,生产中有可能产生安全事故.

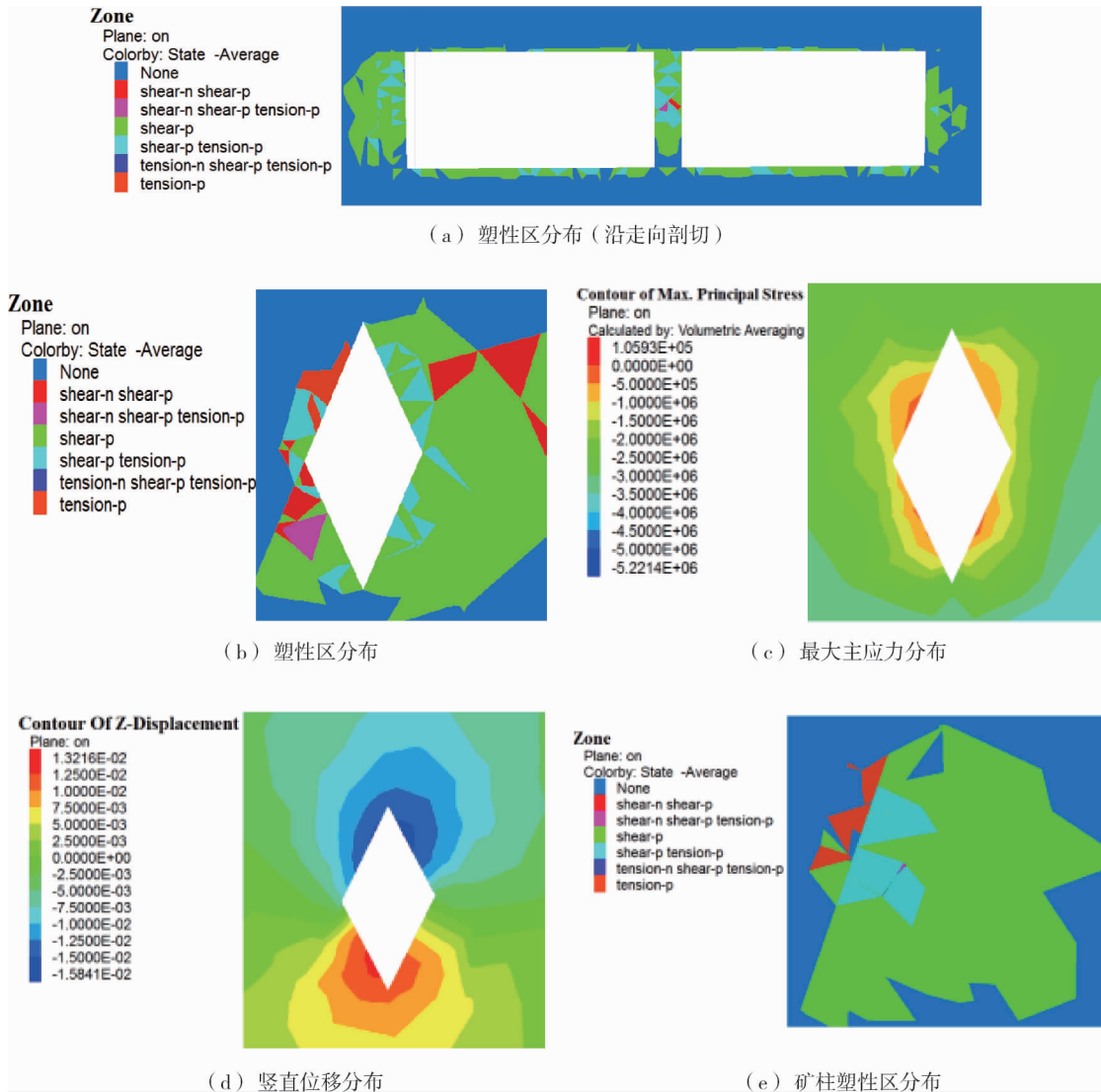


图 13 方案 2 采场数值计算结果

### 4 结论

1)通过研究分析 DIMINE, MIDAS 和 FLAC<sup>3D</sup> 等软件的优缺点,针对采矿领域需求,在编制单元转换程序的基础上,提出了一套基于复杂地质体精细化建模技术的采场稳定性分析和采场结构参数优化集成技术.

2)结合国内某地下稀土矿山围岩质量分级情况、生产实际,采用 Mathew 稳定图法初步确定在岩体质量等级为 III 的情况下,矿山采用垂直矿体走向布置的分段空场阶段嗣后充填采矿法顶板水平时,采场设计极限宽度为 13.2 m,采用沿矿体走向布置的分段空场分段嗣后充填采矿法顶板与水平呈 60° 夹角时,采场设计极限长度为 22.4 m.

3)针对矿山 I 号主矿体采用 DIMINE 软件构建三维可视化模型,采用集成技术导入 FLAC<sup>3D</sup> 后,模拟两方案的开采过程,模拟结果验证了 Mathew 稳定图法的可靠性,同时指出方案 1 较方案 2 在开采过程中安全性相对较高.方案 1 形成的空场整体稳定性较好,方案 2 形成的空场顶板处发生较大范围的剪切破坏.

### 参考文献:

[1] 房智恒,王李管,熊张友,等.基于 Micromine-FLAC<sup>3D</sup> 耦合技术的金属矿采矿扰动影响分析[J].采矿与安全工程学报,



2012,29(6):870-875.

- [2] 胡建华,任启帆,元中华,等.卧虎山铁矿采场极限暴露面积回归优化模型[J].黄金科学技术,2018,26(4):503-510.
- [3] 康小兵,许模,陈旭,等.岩体质量Q系统分类法及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):91-95.
- [4] 龚孔成,贾明涛,李响.基于Mathews方法的矿岩可崩性研究[J].江苏冶金,2008,9(4):30-33.
- [5] 周科平,苟国刚,罗佳,等.基于Mathew与数值模拟法的采场参数结构优化与稳定性研究[J].科技导报,2013,31(30):34-37.
- [6] 刘增辉,高谦.两中段开采的水平矿柱失稳影响因素分析与方案优化——以金川二矿区为例[J].中国安全科学学报,2013,23(11):79-84.
- [7] 罗周全,管佳林,冯富康,等.盘区隔离矿柱采场结构参数数值优化[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):261-264.
- [8] 常贯峰,路增祥,常帅,等.毛公铁矿大结构参数无底柱分段崩落法多分段放矿实验[J].金属矿山,2017,46(11):48-51.
- [9] 孔德阔,李长洪,魏晓明.基于Mathews稳定图的采场暴露面积计算[J].现代矿业,2015(5):6-8.
- [10] 尹士兵,张鸣鲁.基于Mathews稳定图法的采场暴露面积确定[J].现代矿业,2015,31(6):8-10.
- [11] 张小华,王建国,刘国寅,等.Mathew法在矿山深部采场稳定性分析中的应用[J].有色金属(矿山部分),2017,69(6):18-20.
- [12] 胡建华,习智琴,罗先伟,等.基于岩体时变力学参数的深部矿段回采顺序优化[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2761-2766.
- [13] 孙杨,罗黎明,邓红卫.金属矿山深部采场稳定性分析与结构参数优化[J].黄金科学技术,2017,25(1):99-105.
- [14] 李德,王李管,毕林,等.我国数字采矿软件研究开发现状与发展[J].金属矿山,2010,39(12):107-112.
- [15] 胡斌,张倬元,黄润秋,等.FLAC<sup>3D</sup>前处理程序的开发及仿真效果检验[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1387-1391.
- [16] 李廷春,李术才,邱祥波.三维快速拉格朗日法在安全顶板厚度研究中的应用[J].岩土力学,2004,25(6):935-939.