

# 基于软件数据耦合精细建模的采区稳定性分析研究<sup>\*</sup>

王敏<sup>\*,1</sup> 陈晓艳<sup>2</sup> 柯波<sup>1</sup> 李杰林<sup>1</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083;

2. 国家知识产权局专利局专利审查协作广东中心,广州 510530)

**摘要:**针对地下矿山采区稳定性数值模拟分析过程中存在的三维矿床模型建立以及单元网格划分等难点问题,提出利用三维矿山软件进行精细建模与数值模拟软件耦合的模式,简化复杂矿山地质条件下模型前处理过程的思路。利用3DMINE对地下矿山三维矿床模型进行精细建模,通过MIDAS GTS软件对精细建模得到的三维矿床模型进行单元网格的划分与材料组的分配,快速、准确地为采区稳定性数值模拟分析提供具有较高几何相似性的模型,采用具有较强计算能力的计算软件FLAC3D进行计算。这种耦合精细建模方式不仅简化了矿山采区稳定性数值模拟的前处理过程,提高了地下矿山采区稳定性模拟计算的准确性,同时也将不同精度要求的三维矿床模型用于数值模拟运算,拓宽了三维矿山模型的应用领域。

**关键词:**精细建模;三维矿山模型;数据耦合;几何相似性;采区稳定性分析;数值模拟分析

中图分类号:TD853 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.04.008

## Mining Area Stability Analysis Based on Software Data-coupled and Refined Modeling<sup>\*</sup>

WANG Min<sup>\*,1</sup> CHEN Xiaoyan<sup>2</sup> KE Bo<sup>1</sup> LI Jieli<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083;

2. Patent Examination Cooperation Center of The Patent Office, SIPO, Guangzhou 510530)

**Abstract:** To solve the difficulties such as complex 3D geographical model building and model meshing of mining area stability analyzing process in underground mine, a method which coupled fine modeling of 3D mine software with numerical software was proposed. The pre-processing of complex deposit model in underground was largely simplified by this coupled pattern. In the paper, the 3D mineral deposit model was fine built by 3DMINE, and was meshed and grouped in MIDAS GTS, which fast and accurately provided a high geometrical similarly model for stability analysis of mining area, then was calculated by FLAC3D. Not only did the coupled pattern simplify pre-processing of complex deposit model, but also the accuracy of stability analysis of mining area was improved. And at the same time, different accuracy 3D deposit model could be used in numerical calculating, which broaden the application zone of 3D mineral deposit model.

**Key words:** fine modeling; 3D mine model; data-coupled; geometrical similarity; stability analysis of mining area; numerical analysis

## 1 引言

近年来,随着采矿生产的持续进行和采矿生产能力的提高,地下采矿产生的空区面积逐步增大且产生速度逐渐加快<sup>[1]</sup>;此外,随着采矿活动向深部延伸,“三高”现象也加剧了采矿环境的恶化。这些都给采矿活动的安全性带来了更大的挑战,采区稳定性尤其是大空区的稳定性问题更显重要。

伴随着计算机技术的发展,利用数值模拟技术

进行采区稳定性分析的手段得到广泛应用和显著提高<sup>[2]</sup>,为采矿活动提供了相应的技术指导。在数值模拟过程中,模拟结果的合理性很大程度上取决于模型建立的准确性<sup>[3]</sup>。然而,目前针对地下矿山三维模型的建立,由于受限于数值模拟软件的分析计算过程,不得不简化数值模型<sup>[4,5]</sup>,难以真实反映采区的力学情况,在一定程度上影响了数值模拟软件的分析结果。

针对矿山采区稳定性分析数值模拟计算模型相似性不良这一难题,很多学者进行了相关研究。李新星等<sup>[6]</sup>提出了一种新的岩土工程有限元建模方法—CRM地质模型转化法,以及通过特定方式将三维地质模型转化为符合有限元网格要求的数值计算

2016-01-06 收稿,2016-02-15 接受,2016-08-25 网络发表

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51074178),国家“十二五”科技支撑计划(2012BAC09B00)资助

<sup>\*\*</sup> 通讯作者, E-mail: wm681998@163.com; Tel: 1560841145

模型的模式;王环玲等<sup>[7]</sup>提出了以 AutoCAD 为平台,借助 AutoLISP 二次开发技术,将 AutoCAD 构建的三维地质模型用于数值计算的思路;侯恩科等<sup>[8]</sup>提出了将三维地学模拟与数值模拟结合来简化复杂数值模拟前处理的思路,并以三维地学模拟软件 microLYNX 与数值模拟软件 RFPA 和 FLAG 的应用为例,提出了软件联合使用的具体方法。

由于三维矿业软件的三维建模技术能够满足不同精度的地下矿山地质体的建模要求,若能将地下矿山三维地质模型与数值模拟分析耦合起来,让数值模拟直接继承和利用三维矿业软件建立的精细模型,生成更加精细化的数值模拟计算模型单元网格,就可以大大减化数值模拟计算的前处理工作,从而提高数值模拟计算的模型相似性,增大数值模拟计算分析的准确性。本文根据上述思路,将 3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D 耦合,以此来提高建立地下矿山三维地质模型的便捷性和采区稳定性数值模拟分析的准确性。

2 耦合精细建模模式

三维数字矿床模型与数值模拟计算分析的耦合模式一般情况下分为两种:一种为数据耦合模式,即将三维数字矿床模型的数据格式和结构进行转换,然后用于数值模拟计算;一种为功能耦合模式,即扩展三维矿业软件使之具有数值模拟分析功能<sup>[9]</sup>。本文涉及的耦合模式为数据耦合模式,通过对不同软件之间的数据结构进行转换改造,使之变成能用于数值模拟计算分析的数据结构,将三维矿山软件能够建立不同精度几何模型的优势移植到数值模拟计算中,使数值模拟计算的可靠性进一步提高。其耦合模式图如图 1 所示。

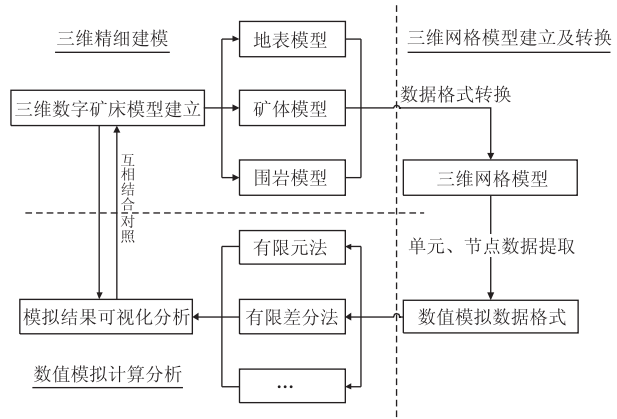


图 1 耦合模式图

3 3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D 耦合精细建模方法

基于 3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D 数据耦合的精细建模方法分为三个步骤完成:①利用 3DMINE 构建符合计算精度要求的精细采区矿床模型,包括矿体模型和采区地表模型;②将 3DMINE 中构建的三维矿床模型经 AutoCAD 进行数据格式转换后导入至 MIDAS GTS 中进行数值模拟实体模型构建、采场切割、网格划分以及材料组分组等数值模拟计算前处理。完成前处理工作后,将生成的单元以及节点数据保存为 .txt 文档备用;③利用转换软件将节点及单元数据文件转换为 FLAC3D 文件格式,并导入 FLAC3D 进行检查,检查无误后进行材料组赋值等工作,进入数值模拟计算运算分析过程。具体方法步骤如图 2 所示。

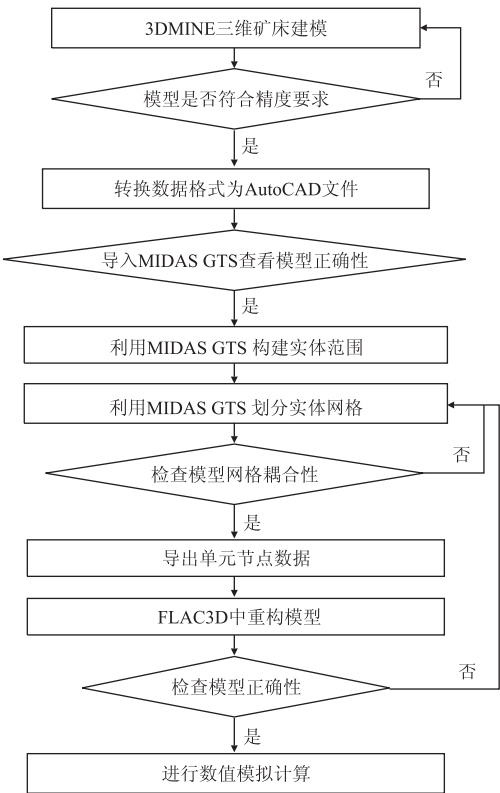


图 2 耦合精细建模步骤图

4 3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D 耦合精细建模的实例应用

4.1 某采区概述

矿区内矿群主要为缓倾斜薄矿体(局部中厚),为变玄武岩硫化物铜和接触带矽卡岩硫化矿体,根据现场实际开挖情况,该矿群总体产状受变玄武岩

产状制约,矿体上、下盘多为变基性玄武岩、大理岩或花岗岩。大理岩稳固,变玄武岩中等稳固至不稳固,矿石稳固。

根据该矿群矿体的开采技术条件,经多方案综合分析论证,矿山采取以下采矿方案:矿体厚度在 1~5 m 时,确定采用高效全面法,矿体厚度为 5~10 m 时,采用中深孔落矿平底出矿房柱法,矿体厚度在 15 m 以上(所占比例非常小)时,确定采用预切顶房柱法。

4.2 精细建模

采矿工程涉及到非常复杂的三维空间、非线性问题<sup>[10]</sup>,模拟计算结果是否符合实际的客观规律主要取决于以下因素:

1) 岩土材料的材料属性及本构模型的选择合理与否

由于计算研究范围涉及的岩体、矿体和废石胶结充填体都属于弹塑性材料,适应于莫尔-库伦破坏准则,其力学模型为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}}$$

式中, $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大和最小主应力, $c$ 、 $\varphi$  分别为材料内聚力和内摩擦角, $f_s$  代表破坏判断系数。当  $f_s \geq 0$  时,材料处于塑性流动状态;当  $f_s \leq 0$  时,材料处于弹性变形阶段。在拉应力状态下,如果拉应力超过材料的抗拉强度,材料将发生拉伸破坏。

2) 计算数值模型的建立合理与否

采区地质计算模型的准确建立与否是影响矿区稳定性数值模拟结果是否可靠的关键因素。本次计算模型由地表表土、矿体上下盘围岩、矿体赋存围岩、矿体等子模型构成,其中采区开拓运输系统以及采切工程开挖体积相对于整个模型来说非常小,所以计算过程中不考虑其对采场稳定性的影响<sup>[11]</sup>。

由于矿体处于缓倾斜状态,埋深在 1000 m 水平上下,且无明显的水平构造应力,因此,采区的初始应力场设置为采用连续介质力学原理的岩体自重应力场。至于边界条件,采用位移约束的边界条件,由于采动范围有限,在离采区较远处的岩体位移量很小,可将模型边界处位移视为 0,即模型的左右( $X$  方向)边界、前后( $Y$  方向)边界和底边界均施加位移约束条件,上边界( $Z$  方向)为自由边界。

3) 工程地质条件准确获取与否

经现场实地取样、试样加工和测试实验,获得矿

岩的各项物理力学参数如表 1 所示。

表 1 矿群矿岩物理力学参数

| 矿岩类型 | 单轴抗压强度 /MPa | 单轴抗拉强度 /MPa | 弹性模量 E/GPa | 泊松比  | 内聚力 /MPa | 内摩擦角 /(°) |
|------|-------------|-------------|------------|------|----------|-----------|
| 大理岩  | 132.264     | 6.277       | 43.024     | 0.25 | 14.287   | 72.467    |
| 矿体   | 159.057     | 13.928      | 57.872     | 0.25 | 23.533   | 63.368    |
| 玄武岩  | 151.264     | 8.928       | 51.522     | 0.25 | 18.610   | 70.025    |

由于岩芯的岩石力学参数与自然岩体的力学性能是有区别的,因此,综合工程地质调查、岩体质量评价、现场实际采矿工程的情况进行分析,利用 RocData 软件对岩体物理力学参数进行折减处理,处理后结果如表 2 所示。

表 2 折减后的矿岩物理力学参数

| 矿岩类型 | 单轴抗压强度 /MPa | 单轴抗拉强度 /MPa | 弹性模量 E/GPa | 泊松比  | 内聚力 /MPa | 内摩擦角 /(°) |
|------|-------------|-------------|------------|------|----------|-----------|
| 大理岩  | 105.81      | 5.02        | 30.12      | 0.25 | 10.72    | 58.0      |
| 矿体   | 127.24      | 11.14       | 24.66      | 0.25 | 17.65    | 50.7      |
| 玄武岩  | 121.01      | 7.14        | 38.2       | 0.25 | 13.96    | 56.02     |

区别于传统数值计算建模方式,耦合精细建模并不直接利用数值模拟软件如 FLAC3D 等进行建模,而是在 3DEMINE 中分步进行建模,逐步建立地表模型如图 3 所示,简化的首采区矿床模型见图 4。检查模型符合本次数值模拟计算的精度要求之后,将模型保存为 .dxf 格式导入 Midas GTS 进行编辑,得到计算范围内完整的实体模型如图 5 所示。在 Midas GTS 中对得到的实体模型进行网格划分,得到如图 6、图 7 的三维网格模型。

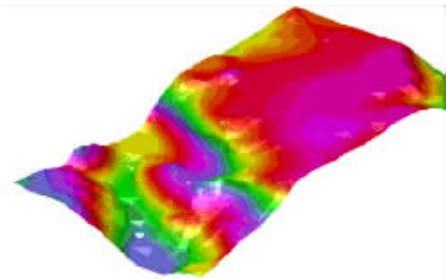


图 3 地表模型图



图 4 简化的首采区矿床模型

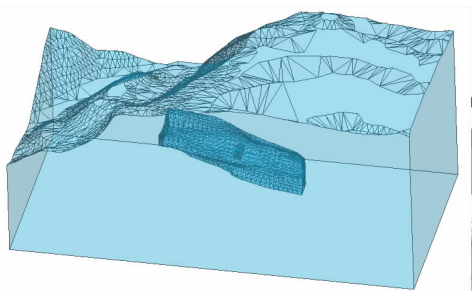


图5 Midas GTS 中处理得到的实体模型

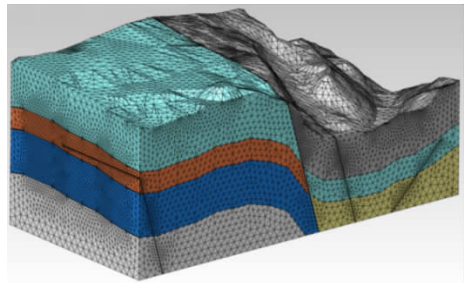


图6 整体三维网格模型

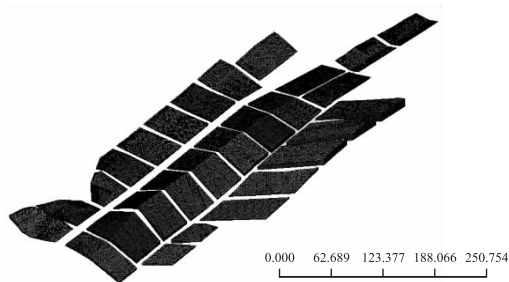


图7 内部采场三维网格模型

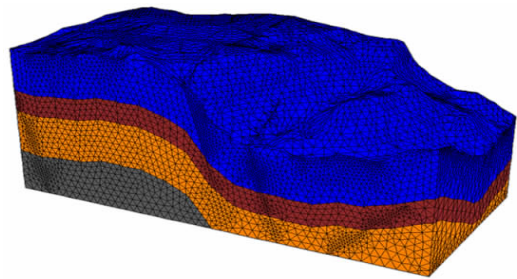


图8 FLAC3D 中重构的三维网格模型

为实现软件间的数据耦合,根据 FLAC3D 软件模拟计算的力学参数要求,利用式(1)、(2),以及表 2 的弹性模量  $E$ (杨氏模量),计算出矿岩的体积模量和剪切模量,其结果如表 3 所示。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \tag{1}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + 2\nu)} \tag{2}$$

式中, $E$  为杨氏模量; $\nu$  是泊松比; $K$  和  $G$  分别为体积模量和剪切模量。

表 3 矿岩体积模量和剪切模量

| 矿岩类型 | 体积模量 $K/\text{GPa}$ | 剪切模量 $G/\text{GPa}$ |
|------|---------------------|---------------------|
| 大理岩  | 20.08               | 12.05               |
| 矿体   | 27.01               | 16.2                |
| 玄武岩  | 24.04               | 14.43               |

检查网格完全耦合后将单元节点数据导出,经转换后在 FLAC3D 中重构模型如图 8 所示。检查模型无误后,精细建模过程完成。

4.3 数值模拟计算结果分析

FLAC3D 软件是有限差分软件的代表软件,它建立在拉格朗日算法基础上,采用有限差分显式算法来获得模型全部运动方程(包括内变量)的时间步长解,从而可以追踪材料的渐进破坏和垮落<sup>[12,13]</sup>,这对采矿工程的各种数据模拟分析研究是非常重要的,所以本次模拟计算即采用 FLAC3D 进行计算。

图 7 所示的模型为采场开挖后在 FLAC3D 中的计算模型,采场尺寸为  $80 \times 40(\text{m})$ ,采场高度为矿体厚度  $3 \text{ m}$ ,基于最不利于采区稳定的条件考虑,采用采场一次开挖完毕且所有形成的空场以不充填的方式进行计算。部分计算结果如图 9 所示(部分后处理图片)。从图中可以看出,最大拉应力出现采场的顶板处,大小为  $4 \text{ MPa}$ ,均在大理岩和玄武岩的抗拉强度之内;采区周围的最大压应力出现在矿柱处,大小为  $80 \text{ MPa}$ ,远小于折减后的矿体抗压强度;左侧采场倾向方向的顶板处未出现塑性区;左侧采场倾向方向顶板位移最大达  $10 \text{ cm}$ ,相对于采场尺寸而言,属安全范围。

分析 FLAC3D 计算结果可知,依据矿山设计所定的采场布局以及矿柱规格尺寸(采场尺寸为  $80 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ,矿柱宽度为  $6 \text{ m}$ ,矿柱长度为采场宽度  $40 \text{ m}$ ),并结合工程进展情况所决定的开采顺序进行开采,采区在整个生产过程中是稳定的。各采场顶板所出现的最大拉应力为  $4 \text{ MPa}$ ,均在顶板抗拉强度以内,顶板位移最大达  $10 \text{ cm}$ ,但顶板未出现塑性区;各采场间柱最大压应力为  $81 \text{ MPa}$ ,远小于折减后的矿岩抗压强度,且无拉应力和塑性区出现。故通过数值模拟得出结论:采区在采场开挖和生产过程中是稳定的,采场结构参数和矿柱尺寸设置合理。

通过试验采场现场验证,当采场顶板整体性较好时,采场顶板沉降量与数值模拟结果基本吻合,但当顶板节理裂隙较为发育时,应及时检查顶板,并适当辅以点锚支护的形式处理。

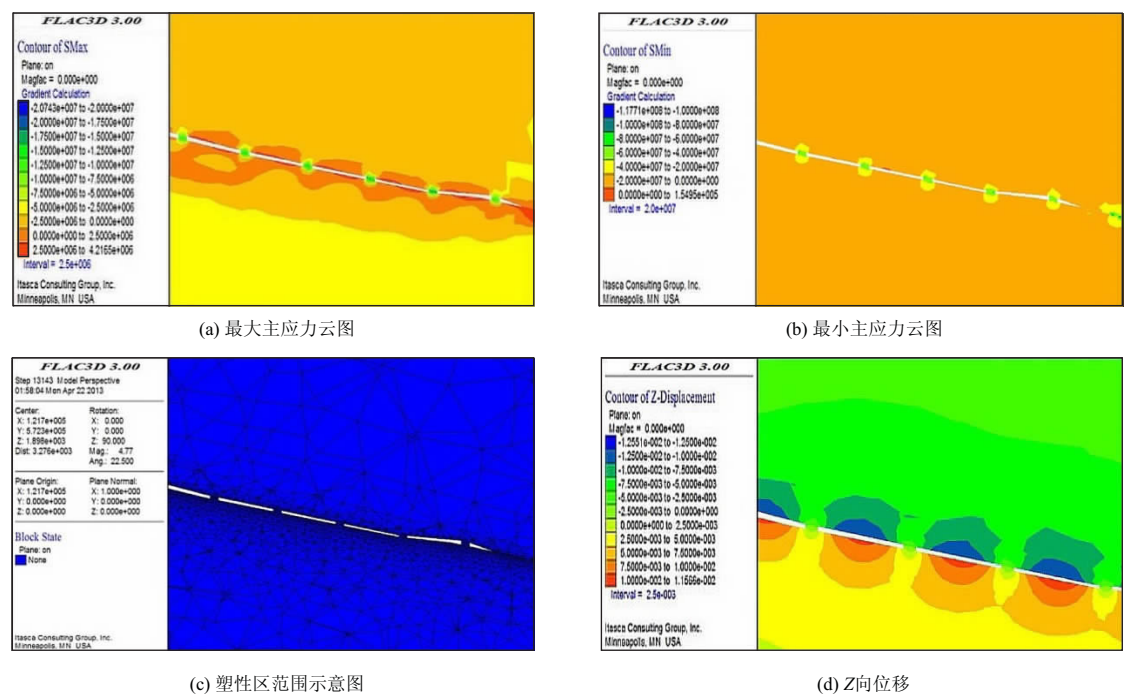


图9 左侧采场倾向方向的应力云图、塑性区范围示意图和顶板位移

5 结论

针对地下矿山采区稳定性数值模拟计算过程中模型前处理工作困难,单元网格划分极易造成分析计算出现较大误差,利用常规建模方法不易发现并解决误差问题的难点,本文提出了3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D耦合精细建模的具体思路和方法,并通过工程实例给出了具体操作过程以及数据耦合方式。通过3DMINE建立精细的地下矿山三维矿床模型以及MIDAS GTS进行便捷的自动网格划分,为后续利用FLAC3D进行数值模拟计算分析提供了高相似性的计算模型。通过对3DMINE/MIDAS GTS/FLAC3D耦合精细建模的具体思路、方法的阐述以及该方法在工程实例上的应用可以发现:

- 1) 该建模方式建立的模型,能较好地模拟地下矿山的地质状况,构建不同的地层,使得数值计算模型更加贴近矿山实际;
- 2) 该精细建模利用MIDAS GTS按地层属性划分单元网格,单元网格耦合性高,提高了计算结果的准确度。
- 3) 在某矿山实例中的应用证明该方式具有良好的可用性,提供的数值模拟计算模型几何相似性高;数据耦合模式切实可用,模型建立过程方便可行,计算分析以及后处理过程也较为方便。

参考文献

[1] 李改军,林武清,陈阳. 基于 AGA-BP 神经网络的采空区危险性评价[J]. 中国安全科学学报,2015,(7):135-141.

[2] 周科平,杜相会. 基于 3DMINE- MIDAS- FLAC3D 耦合的残矿回采稳定性分析[J]. 中国安全科学学报,2011,21(5):17-22.

[3] 邓红卫,朱和玲,周科平. 基于 FLAC3D 数值模拟的前后处理优化研究[J]. 矿业研究与开发,2008,28(2):60-62.

[4] 孙国权,李娟,胡杏保. 基于 FLAC3D 程序的采空区稳定性分析[J]. 金属矿山,2007(2):29-32.

[5] 张耀平,曹平,袁海平. 复杂采空区稳定性数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):233-238.

[6] 李新星,朱合华,蔡永昌. 基于三维地质模型的岩土工程有限元自动建模方法[J]. 岩土工程学报,2008,30(6):855-862.

[7] 王环玲,徐卫亚. 三维地质建模技术在岩土工程数值模拟中的应用[J]. 长江科学院院,2008,25(5):125-129.

[8] 侯恩科,吴立新,李建民. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报,2002,27(4):388-392.

[9] 李明超,钟登华,秦朝霞. 基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1893-1898.

[10] 张海波,宋卫东. 基于 FLAC3D 数值模拟的采空区稳定性分析[J]. 黄金,2013,34(3):31-34.

[11] 王来贵,赵尔强,冯瑞. 巷道布置对围岩稳定性影响的数值模拟[J]. 世界科技研究与发展,2012,34(4):651-654.

[12] 李胜,范超军,罗明坤,等. 二次采动下沿空留巷围岩变形及其控制研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(7):49-55.

[13] 许鹏飞,肖辉赞,王亚东. 基于有限差分的直接顶稳定性影响因素的数值模拟分析[J]. 世界科技研究与发展,2012,34(3):375-378.