

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-4006-06

# 复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建

刘晓明, 罗周全, 杨 彪, 张 保

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 复杂三维地质可视化和数值模型的构建是采矿、岩土及水利水电工程中常常遇到的关键问题。针对数值模拟软件在复杂矿区地质体模型构建及单元网格划分等前处理问题上存在的不直观、工作量大等缺点, 结合矿业软件在复杂三维地质体建模的强大优势, 在研究线框模型和块体模型差异的基础上, 提出了基于线框模型的复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建技术。根据线框模型特点不同, 以地表和采空区模型为型, 分别阐述了基于Surpac的表面模型和实体模型无缝转换成MIDAS/GTS数值模型的有效方法, 并将该技术成功应用于冬瓜山铜矿复杂采空区群围岩稳定性研究中。结果表明, 该方法是可行、有效的, 从而为矿山开采设计、安全分析及复杂地质体结构的岩土工程数值模拟分析提供了一种新的建模方法。

**关 键 词:** 地质可视化; 三维地质模型; 数值模型; Surpac; MIDAS/GTS

中图分类号: P 642

文献标识码: A

## Numerical modeling and geological body visualization for complex mine

LIU Xiao-ming, LUO Zhou-quan, YANG Biao, ZHANG Bao

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

**Abstract:** The construction of the 3D visualization model and the numerical model of complex geological body is critical in mine, geotechnical, hydraulic and hydropower projects. Aiming at the disadvantages of modeling complex geological body of mine by numerical simulation software, such as the modeling process complex and difficult and mesh generation has great workload, Combined with the advantages of modeling complex geologic body of mine use mine software, on the base of studying the differences between wireframe model and block model, a kind of new method of numerical modeling and geologic body visualization based on complex mine is proposed based on wireframe model. According to the different characteristics of wireframe, taking surface and cavity model as examples, an effective method of converting Surpac surface model and solid model into MIDAS/GTS numerical model exactly is researched; this method has been used to research the cavity stability analysis of Dongguashan Copper Mine successfully. The results show that the new modeling method is feasible and effective, so as to offer a new modeling method for mine design, safety analysis and complex geological body rock soil engineering numerical simulation, etc.

**Key words:** geological body visualization; 3D geological model; numerical model; Surpac; MIDAS/GTS

## 1 引 言

有限元、有限差分等数值模拟方法在岩土工程、地质工程领域得到广泛应用, 已成为不可缺少的分析工具<sup>[1-7]</sup>。然而, 由于缺乏模拟复杂地质体实际的工具, 用户在建立复杂地质体模型时往往需要进行大量的简化, 因此, 经常出现计算模型与地质体实际严重不符, 从而在很大程度上降低了计算结果的可靠性。

国外已经涌现出一批优秀的三维建模及可视化软件, 并已应用在采矿、岩土、石油等领域。常见的软件有 Surpac、Datamine、GoCAD、GemCom、Earth Vision、Micromine 等。国内从 20 世纪 90 年代以来, 在采矿工程中的三维地质可视化技术也取得了较大发展, 常见的三维地质建模软件有: 北京理正研究院的三维地质建模软件、北京东澳达科技有限公司的 3Dmine。中南大学王李管等在分析国内外三维地质建模软件优缺点和调查国内矿山需求的

收稿日期: 2008-12-18

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划专题 (No.2007BAK22B04-12, 2006BAB0204-1-3-1); 中南大学博士研究生学位论文创新项目 (No. 1960-71131100008)。

第一作者简介: 刘晓明, 男, 1982 生, 博士, 讲师, 主要从事矿床深井开采与安全预警数字化技术方面的研究工作。E-mail: liuxiaoming33@163.com

基础上, 开发出的一整套专业矿山应用解决方案 Dimine<sup>[8]</sup>。地质软件的出现, 解决了复杂地质体三维建模的难题, 并广泛应用于地质、采矿、水利等岩土领域<sup>[7-15]</sup>。罗周全等<sup>[2, 6]</sup>利用矿业软件 Surpac 建立了多个复杂矿区地下结构模型, 为矿山进行采掘计划、安全监管及评价提供了重要的基础。但上述软件基于不同的界面平台, 且生成的三维地质可视化模型缺乏与通用数值计算软件的结合。可视化模型与数值模型的转换, 仍然是亟待研究的热点。因此, 如能让数值模拟直接继承和利用复杂地质体模型数据, 则可大大简化数值模拟前处理的难度, 解决由于简化模型带来的计算结果可靠性不高的难题。近年来国内外开展了一系列相关问题的研究, 如文献[2]提出了基于 Surpac 的复杂地质体 FLAC<sup>3D</sup> 模型生成技术, 文献[16]则通过实例研究了 3D GIS 与 3DEC 离散元的集成。众多文献在模型转化中均进行了模型简化, 致使数值计算模型与地质模型不完全相符, 因此, 本文在研究相关文献的基础上, 提出了基于 Surpac 与 MIDAS/GTS 的复杂地质体三维数值模型的集成方法, 建立三维精细数值模型, 并在冬瓜山铜矿复杂采空区群围岩稳定性研究中验证了其有效性和实用性。

## 2 Surpac 复杂地质体三维模型

### 2.1 线框模型与块体模型

线框模型 (wireframe model) 是一种表现实体表面形态的方法, 它既可以用于表现地形、岩层层位面等不封闭的实体 (称为 DTM 模型), 也可以用于表现矿体、不同岩性区域等封闭的实体 (3DM)。普遍采用的线框模型是用不规则三角网 (TIN) 来逼近实体的表面形态, 而生成 TIN 的方法则主要采用 Delaunay 三角形连法, 其基本原理是: 由随机分布在空间不同位置的数据点连接三角形, 而每一个三角形的外接圆不会覆盖除构成该三角形 3 个顶点之外的其他任意点, 如图 1 所示。

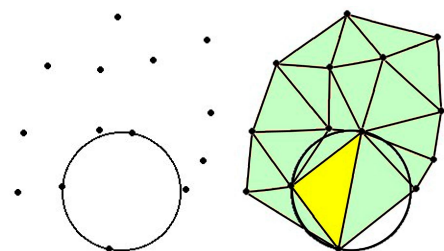


图 1 Delaunay 三角网生成原理

Fig. 1 Creation theory of Delaunay triangulation

块体模型采用八叉树结构来表达三维地质体的空间分布, 其基本思想是将地质体的空间几何模型按照一定的尺寸划分为众多的单元块, 然后对整个地质体范围内的单元块进行赋值。空间八叉树结构与一维的二叉树和二维的四叉树类似, 是一种空间非均匀网格剖分方法<sup>[17]</sup>, 该方法将含有整个域的空间长方体按 3 个方向分割成 8 个子长方体网格, 组织成一棵八叉树。若某一子长方体网格中所含景物面片数大于给定的阈值, 则为该子长方体作进一步的剖分, 直至八叉树每一个叶子节点所含面片数均小于给定的阈值为止。

### 2.2 模型选择

线框模型和块体模型是 Surpac 表达地质体三维模型的两种方式。基于线框模型的建模特点, 能完整地描述岩体空间结构、几何形态和空间边界, 准确表达地表、岩层、矿体、空区、断层、节理三维结构等, 但线框模型之间及模型内部空间在软件内无法实现单元剖分, 使得导出的数据还需另外重新剖分, 因而过程复杂, 实现难度大。块体模型是在线框模型基础上, 对线框模型之间以及线框模型内部运用规则六面体进行剖分<sup>[2]</sup>, 尽管能逐层分级, 直到次级块大小足够小, 满足精确模型边界问题, 但剖分时由于单元类型只能是六面体, 单元大小只能是倍数关系, 因而网格属于规则均匀网格, 不能实现渐变单元, 这将导致块体模型边界与线框模型边界无法完全重合, 块体模型边界呈齿状, 从而使模型精度大大降低。图 2 为 Surpac 线框模型与块体模型边界对比, 由图中可清楚看出, 模型间边界位置相差较大, 块体模型边界不能完全与线框模型边界重合, 如采用块体模型进行数值模拟, 模拟精度可想而知。另外, 块体模型由于只能是均匀网格, 这无形中增加了模型网格、节点数量, 计算时间加长。

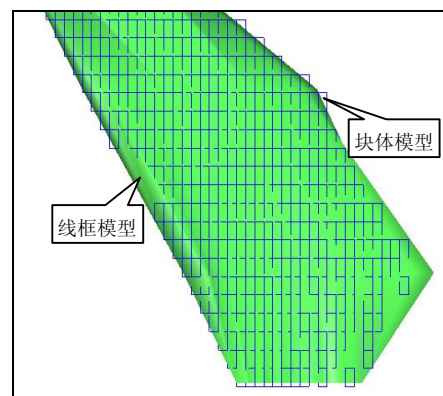


图 2 线框模型与块体模型边界对比

Fig. 2 Comparison between wireframe model and block model boundaries

综上所述,与块体模型相比,线框模型为模拟复杂地质体的最佳模型,使 GTS 复杂地质体模型直接继承和利用 Surpac 三维复杂地质线框模型,既能简化数值模拟软件前处理难度,又能满足模型精度。

### 3 MIDAS/GTS 复杂地质体数值模型

以往建立的数值计算模型中很难准确反映线框模型的实际形态,大多简化为规则平面代替,从而简化模型构建。显然,如此处理线框模型不符合地质体实际形态,也无法通过数值模型求的线框模型边界上及模型相交位置的应力场、位移场等重要信息。MIDAS/GTS 是专用于岩土和隧道结构分析与设计的有限元分析软件。通过研究 Surpac 与 GTS 对线框模型各自表达的特点,研究了将 Surpac 中线框模型无缝转换为 GTS 数值模型的方法。

#### 3.1 表面模型构建

表面模型用来虚拟地形和表面,一般由一系列离散的、稀疏的、空间上分布不均匀的散点组成,将点联成若干相邻的三角面,然后形成一个三角网随着地面起伏变化的单层模型,可以精确地表示模型的边界。如在 Surpac 中建立的地表、岩层和断层模型均属于表面模型,而非线框模型。通常表面模型是一系列等密线通过点间三角网的连接组成,线的密集程度反映了表面模型的精确度,如在建立地表模型时,等高线的间距为 1~10 m 不等,间距越小,所建模型越精确,但所需计算机内存也越大。

通过研究 Surpac 与 GTS 对表面模型各自表达的特点,成功将 Surpac 中表面模型无缝转换为 GTS 数值模型。以地表模型为例,阐述其方法如下:

①在 Surpac 中建立地表模型;②根据建模精度将地表模型生成一系列的等值线,如图 3 所示;③编辑等值线并输出为三维 DXF 线文件;④利用 GTS 强大的地形生成器 TGM (terrain geometry maker) 直接读取三维 DXF 线文件,确定建模范围及精度,生成复杂不规则地表模型;⑤在 GTS 中直接读取 TGM 建立的地表模型,通过坐标平移或转换形成 GTS 地表模型,如图 4 所示。岩层和断层模型在 GTS 中的实现过程与地表模型类似。

#### 3.2 实体模型构建

表面模型通常只能表达开放物体的表面信息,如要表达封闭物体的全部形态,则必须使用实体模型,如矿体、采空区和巷道模型均属于实体模型。与建立表面模型方法不同,实体模型的建立更为复杂。Surpac 中实测采空区实体模型无缝转换为 GTS 数值模型方法如下:①采用加拿大采空区激光探测

系统 (cavity monitoring system, CMS) 现场探测采空区;②实测采空区数据后处理,并在 Surpac 中建立实测的采空区实体模型<sup>[9]</sup>,如图 5 所示;③利用软件模型剖分功能将实测采空区实体模型生成一系列平行的剖面线,剖面线密集程度直接决定后续模型生成的精度;④编辑剖面线并输出为三维 DXF 线文件;⑤利用 GTS 接口程序直接读取三维 DXF 线文件,通过坐标平移或转换,最终实现实测采空区模型在软件中的再现,如图 6 所示。矿体模型在 GTS 中的实现过程与采空区模型类似。

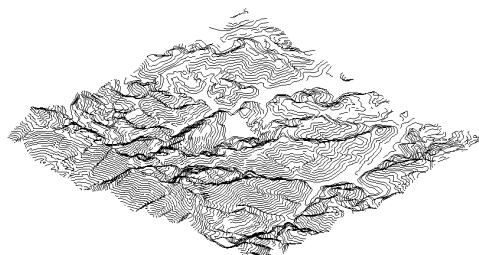


图 3 地表模型三维等值线  
Fig.3 3D contours of surface model

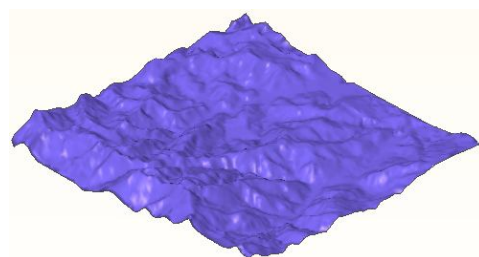


图 4 GTS 三维地表模型  
Fig.4 3D surface model of GTS



图 5 Surpac 采空区线框模型  
Fig.5 Cavity 3D models of Surpac mined-out area

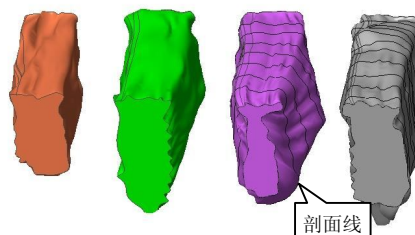


图 6 GTS 采空区三维模型  
Fig.6 Cavity 3D models of GTS mined-out area

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

冬瓜山铜矿是铜陵有色金属公司的后续主力矿山，是目前已发现国内埋藏最深的特大型铜矿山，矿体赋存于 $-690\sim-1\,007\text{ m}$ 之间。根据矿床开采技术条件，采用大直径深孔阶段空场嗣后充填和扇形中深孔阶段空场嗣后充填法采矿方法，两步骤回采矿房矿柱，先回采矿房，矿房胶结充填后再回收矿柱。首采区形成的矿房采空区经空区激光探测系统（CMS）现场探测，数据经处理建立复杂实测空区三维线框模型，准确获取采空区多维信息，包括体积、顶板面积、实际边界及回采质量参数等。从获取的参数来看，54-14<sup>#</sup>采场爆破效果欠佳，出现了冒顶和片帮等空区灾变现象。为真实反映其发生原因，自左向右选取 54-10<sup>#</sup>、54-12<sup>#</sup>、54-14<sup>#</sup>和 54-16<sup>#</sup>共 4 个典型采空区，结合矿业软件建立矿区数字化模型，包括地表模型、岩层模型、巷道模型、矿体模型等，建立复杂矿区三维地质模型，如图 7 所示。

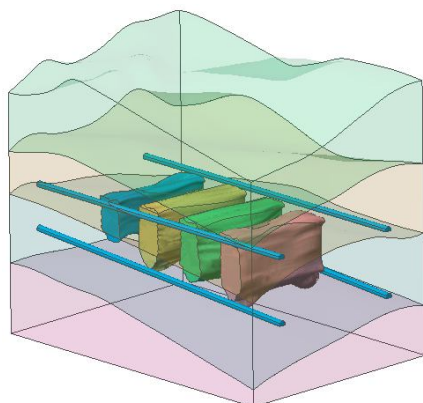


图 7 复杂矿区三维地质模型  
Fig.7 3D geological model of complex mine

### 4.2 数值计算模型构建

采用实体模型 GTS 构建方法将矿区三维地质模型与数值计算模型实现无缝集成和转换，最终建立的冬瓜山铜矿复杂矿区数值计算模型如图 8 所示。对模型采用表 1 中的岩体力学参数进行属性赋值，建立位移约束边界条件，即模型的左右（ $X$  方向）边界，前后边界（ $Y$  方向）和底边界均施加位移约束条件，上边界为自由边界。根据现场实测点应力值进行初始地应力反演，获得最佳的初始水平应力组合，侧压系数分别为 0.8 和 0.9，采用摩尔-库仑破坏准则分 6 步进行采场分步开挖及充填模拟计算<sup>[6]</sup>，模拟采场实际开挖及充填后周围岩体应力场、位移场和塑性区的分布特征与变化规律。

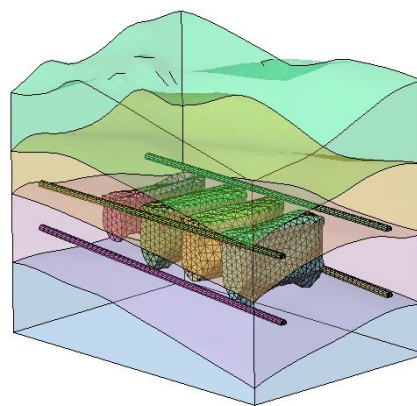


图 8 复杂矿区数值计算模型  
Fig.8 Numerical computing model of complex mine

表 1 岩体物理力学参数

Fig.1 Physico-mechanical parameters of the rocks

| 岩石性质 | 弹性模量 / MPa | 泊松比  | 重度 / (kN/m <sup>3</sup> ) | 抗拉强度 / MPa | 内摩擦角 / (°) | 凝聚力 / MPa |
|------|------------|------|---------------------------|------------|------------|-----------|
| 大理岩  | 14 870     | 0.26 | 27.1                      | 2.24       | 45         | 1.71      |
| 砂卡岩  | 34 320     | 0.25 | 39.7                      | 3.04       | 48         | 3.69      |
| 蛇纹石  | 10 550     | 0.22 | 33.0                      | 2.10       | 50         | 2.32      |
| 闪长岩  | 30 070     | 0.26 | 27.2                      | 2.78       | 46         | 2.75      |
| 充填体  | 1 000      | 0.25 | 20.0                      | 0.50       | 36         | 0.40      |

### 4.3 计算结果分析

限于篇幅，只列举第 5 步采场全部开挖后的计算结果进行显示，其中采场中心位置剖切面垂直位移、最大主应力和塑性区等值线分别如图 9~11 所示。

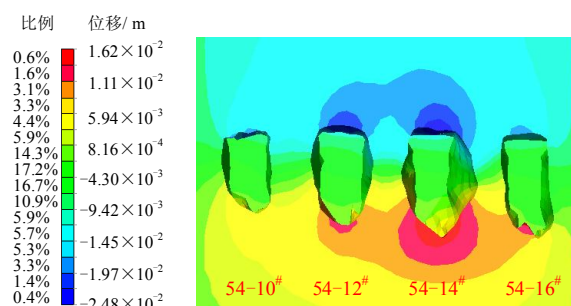


图 9 开挖后垂直位移等值线  
Fig.9 Contours of vertical displacements after excavation

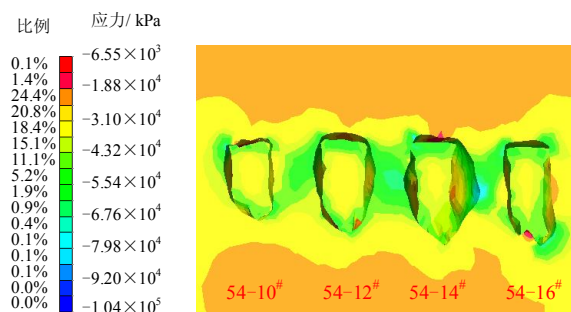


图 10 开挖后最大主应力等值线  
Fig.10 Contours of maximum principal stress after excavation

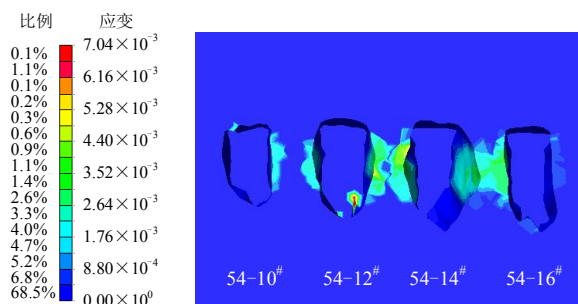


图 11 开挖后三维塑性区  
Fig.11 3D plastic zone after excavation

(1) 空区周围出现应力集中, 尤其在矿柱厚度较小处更为显著, 最大主应力范围在 6~80 MPa 之间, 其中最大值出现在 54-14#和 54-16#之间的矿柱上; 局部地段最小主应力出现拉应力, 空区顶底板表现较为显著, 最大拉应力值为 0.58 MPa, 在围岩抗拉强度以内, 围岩没有发生破坏。

(2) 随着采场的逐步开挖, 最先形成的采场应力、应变逐渐增加, 其中顶板最大位移约 2.48 cm, 出现在 54-14#采场顶板。

(3) 塑性区主要集中在矿柱和采场顶板部分位置, 尤其在 54-12#和 54-14#之间的矿柱位置, 由于矿柱厚度只有 12 m, 远小于设计厚度 18 m, 因此, 该矿柱为危险矿柱, 应及时充填矿柱周边采场。

(4) 由于 54-14#采场在爆破设计中存在炮孔布置不准、采场周围结构面发育等原因, 致使该采场出现严重超挖, 超挖厚度达 6 m。通过 CMS 实测及对数值模拟计算结果的分析, 验证了该采场发生超挖的原因。

## 5 结 论

(1) 复杂地质体的三维数值模拟本身相当复杂, 影响因素众多。在对比线框模型和块体模型的基础上, 首次提出利用 Surpac 线框模型建立复杂矿区地质体三维模型, 并将其无缝转化为 GTS 数值计算模型的方法, 从而简化了数值模拟软件前处理, 提高了模拟计算精度。

(2) 通过分析表面模型和实体模型各自特点, 研究了分别将其转化为数值计算模型的方法, 并结合 Surpac 和 GTS 各自优点, 构建了冬瓜山铜矿复杂矿区三维数值模型, 进行了复杂采空区安全稳定性分析, 为采矿工程、水利工程等岩土工程领域数值模拟分析方法开辟了一条新路径。

## 参 考 文 献

[1] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 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.

HOU En-ke, WU Li-xin, LI Jian-min, et al. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(4): 388—392.

[2] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 Surpac 的复杂地质体 FLAC<sup>3D</sup> 模型生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334—1338.

LUO Zhou-quan, WU Ya-bin, LIU Xiao-ming, et al. FLAC<sup>3D</sup> modeling for complex geologic body based on Surpac[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1334—1338.

[3] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1289—1295.

MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1289—1295.

[4] 雷光宇, 卢爱红, 茅献彪. 应力波作用下巷道层裂破坏的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1477—1480.

LEI Guang-yu, LU Ai-hong, MAO Xian-biao. Numerical simulation on layered crack and failure of roadway under stress wave[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9): 1477—1480.

[5] 胡建华, 苏家红, 周科平, 等. 顶板诱导崩落模式选择时变数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 931—936.

HU Jian-hua, SU Jia-hong, ZHOU Ke-ping, et al. Time-varying numerical analysis of mode in induction caving roof[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 931—936.

[6] 罗周全, 刘晓明, 吴亚斌, 等. 基于 Surpac 和 Phase-2 耦合的采空区稳定性模拟分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 485—488.

LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, WU Ya-bin, et al. Study on cavity stability numerical simulation based on coupling of Surpac and Phase-2[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2008, 27(4): 485—488.

[7] LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, SU Jia-hong, et al. Deposit 3D modeling and application[J]. *Journal of Central South University*, 2007, 14(2): 225—229.

[8] 毕林, 王李管, 陈建宏, 等. 基于 VTK 的矿体三维可视化研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(10): 78—82.

BI Lin, WANG Li-guan, CHEN Jian-hong, et al. Study and realization of 3D visualization of orebody based on VTK[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(10): 78—82.

- [9] LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, ZHANG Bao, et al. Cavity 3D modeling and correlative techniques based on cavity monitoring[J]. **Journal of Central South University**, 2008, 15(5): 639—644.
- [10] 周智勇, 陈建宏, 杨立兵. 大型矿山地矿工程三维可视化模型的构建[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3): 423—428.  
ZHOU Zhi-yong, CHEN Jian-hong, YANG Li-bing. 3D visualization modeling on geological and mining engineering in a large-sized mine[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2008, 39(3): 423—428.
- [11] LEMON A M, JONES N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. **Computers & Geosciences**, 2003, 29(3): 547—555.
- [12] JOHN G H, HANI S M. Numerical modeling of ore dilution in blasthole stoping[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(5): 692—703.
- [13] LIU Yu-zhou, LI Xiao-hong. Safety analysis of stability of surface gas drainage boreholes above goaf areas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 13(2): 149—153.
- [14] GONG Jian-ya, CHENG Peng-gen, WANG Dong-yang. Three dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. **Computers & Geosciences**, 2004, 30(4): 391—404.
- [15] FANG Yuan-min, DENG Jin-can, MI Hong-yan. Construction and visualization of 3D vacant place model[J]. **Journal of Central South University**, 2005, 15(Supp.1): 61—64.
- [16] 王涛, 陈晓玲, 杨建. 基于3DGIS和3DEC的地下洞室围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3476—3481.  
WANG Tao, CHEN Xiao-ling, YANG Jian. Study on stability of underground cavern based on 3DGIS and 3DEC[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3476—3481.
- [17] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于Surpac的FLAC<sup>3D</sup>三维模型自动构建[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 339—342.  
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. Automatic generation of FLAC<sup>3D</sup> model based on Surpac[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2008, 37(3): 339—342.