

大型复杂地质体三维数值模型构建方法比较研究

陈庆发¹, 杨家彩², 高 远³, 牛文静¹, 陈大鹏², 刘俊广¹

(1. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

3. 山东金岭矿业股份有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要:真实地质体三维数值模型构建是进行岩体工程数值分析面临的难题, 开展大型复杂地质体三维数值模型构建方法比较研究具有重要意义。以 3DMine 数字化模型为基础, 提出了 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法和 3DMine-Surfer-Rhino-ANSYS-FLAC^{3D} 多软件耦合建模方法, 详细阐述了各建模方法具体步骤, 深入分析了各建模方法优缺点及适用性, 通过对比各建模方法的优势与短板, 取长补短, 改进了 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法存在的缺陷, 解决了复杂地质体三维数值模型构建难题。以广西铜坑矿锌多金属矿体开采为背景, 利用大型复杂地质体三维数值建模方法, 构建了锌多金属矿三维数值模型, 分析了矿体上行开采地表沉陷规律。研究成果对准确构建大型复杂地质体三维数值模型具有重要指导作用。

关 键 词:复杂地质体; 三维数值模型; 多软件耦合; 三维建模; 对比分析

中图分类号: P 642

文献识别码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增 2-0753-08

Comparative study of construction method for 3D numerical model of large complex geologic body

CHEN Qing-fa¹, YANG Jia-cai², GAO Yuan³, NIU Wen-jing¹, CHEN Da-peng², LIU Jun-guang¹

(1. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 3. Shandong Jinling Mining Limited Liability Company, Zibo, Shandong 255009, China)

Abstract: 3D numerical model construction of real geological body is the challenge faced by numerical analysis in rock mass engineering, resulting in that the comparative study between different constructing methods of 3D numerical models of large and complex geological body has great significance. Based on 3DMine digital model, the coupling modeling methods of 3DMine-FLAC^{3D} and 3DMine-Surfer-Rhino-ANSYS-FLAC^{3D} are put forward; and then the concrete steps of every modeling method are described in detail. Besides, the advantages, disadvantages and applicability of every modeling method are further analyzed. Through contrasting the advantages and short boards between each modeling method and learning from each other, the defects that exist in coupling modeling method of 3DMine-FLAC^{3D} are improved; and the constructing problem of 3D numerical model of complex geologic body is solved as well. With the background of zinc-polymetallic ore body in Guangxi Tongkeng Mine, the 3D numerical modeling method of large and complex geologic body is utilized to construct the 3D numerical model of zinc-polymetallic mine and analyze the surface subsidence law for ascending mining. Research achievements play an important guiding role in accurately constructing the 3D numerical model of large and complex geological body.

Keywords: complex geologic body; 3D numerical model; multiple software coupling; 3D modeling; comparative analysis

1 引 言

有限元、有限差分等数值模拟技术在工程领域中的应用越来越广泛, 因数值模拟软件缺乏构建复杂地质体的前处理功能, 在建立复杂地质体模型时常需大量简化, 以至构建的数值模型与真实地质体

严重不符, 很大程度降低了计算结果可靠性^[1]。基于计算机构建的岩体可视化模型, 构建三维数值计算模型成为必然趋势。

目前岩土、采矿工程常用数值模拟软件主要有 FLAC、MIDAS、ANSYS、ABAQUS、ADINA 等, 但上述软件普遍存在前期建模能力较弱、灵活性差,

收稿日期: 2015-00-00

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (No. 41402306); 广西科学研究与技术开发计划项目 (桂科攻 1598017-5)。

This work was supported by Young Foundation of the National Natural Science of China (41402306) and Scientific Research & Technological Development Projects of Guangxi (1598017-5)

第一作者简介: 陈庆发, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山岩石力学和非传统采矿理论的研究与教学工作。E-mail: chqf98121@163.com

较难构建大型复杂地质体三维数值模型等问题。针对上述问题学者开展了研究, 郑文棠等^[2]结合 AutoCAD 与 FLAC^{3D} 及 3DEC 计算功能, 构建了复杂边坡三维地质可视化和数值模型。廖秋林等^[3]通过分析 FLAC^{3D} 与 ANSYS 单元数据关系, 运用 VB 语言编写了 FLAC^{3D}-ANSYS 接口程序。马新根等^[4]通过 KUBRIX 插件实现了 Rhino3D 模型与 FLAC^{3D} 的对接。田树昆等^[5]提出了使用 AutoCAD 二维转三维程序生成三维模型线框的方式构建 ANSYS 数值计算模型。崔芳鹏等^[6]通过 FLAC^{3D} 内嵌 Fish 语言, 编制了可用 FLAC^{3D} 直接读取 Surfer 软件数据的程序。李翔等^[7]利用 SURPAC、AutoCAD 和 ARCGIS 等软件生成地质体网格点坐标, 并经 ANSYS 软件网格化后构建了 FLAC^{3D} 数值模型。孙涛等^[8]、许国等^[9]利用 GOCAD 软件建立的地质体三维可视化模型, 通过接口程序在 ABAQUS、FLAC^{3D} 软件中构建了三维数值模型。郭颖星等^[10]通过构建 Petrel 与 ADINA 的接口程序, 实现复杂网格数据的快速移植; 王树仁等^[11]利用 Matlab 编写 MIDAS/GTS-FLAC^{3D} 的接口程序, 实现了 MIDAS/GTS 到 FLAC^{3D} 的转化。

类似上述多软件耦合构建三维数值模型的方法较多^[12-15], 但构建的数值模型网格质量不高, 与真实地质体赋存产状对应性差, 且设计工程过程与数值模拟过程差异大。3DMine 矿业软件具有优越的三维可视化模型构建功能和岩体工程过程设计功能, 可基于地质平面图、剖面图等圈定出矿岩形态线, 并利用三角网建模方式, 通过控制线及分区线等方法, 构建大型复杂地质体真实三维数字化模型。若利用该优势构建数值计算模型, 不仅能够建立真实的复杂地质体三维数值模型, 还能实现数值模拟与设计工程过程的精确对应, 以达到岩体工程过程中岩层移动规律、应力变化规律等的仿真模拟。本文基于 3DMine 矿业软件, 将地质体三维数字化模型与 Surfer、Rhino、ANSYS、FLAC^{3D} 等软件耦合, 开展大型复杂地质体三维数值模型构建方法比较研究。

2 复杂地质体三维数字化模型构建

2.1 工程背景

广西铜坑矿锌多金属矿区位于广西河池市南丹县大厂镇境内, 矿区内由上至下主要赋存有 78 号、82 号、28-2 号、94 号、95 号、96 号、97 号等 7 层缓倾斜薄至中厚矿体, 矿体均厚 2.31~5.57 m, 总厚度为 25.65 m。矿体呈似层状且近于平行产出,

产状与地层基本一致, 大体上呈东西走向。上下 2 层矿体相距 30~150 m 不等, 地表海拔标高+710~+1008 m, 位于最上部的 78 号矿体距地表约 400 m, 各矿体具体赋存情况见表 1。

表 1 各矿体具体赋存情况
Table 1 Occurrence situations of orebodies

矿体号	控制规模			矿体产状		赋存标高 /m
	长/m	宽/m	厚/m	倾向	倾角/(°)	
78	680	230	2.31	N	17	+472~+643
82	757	1 125	4.52	NNE	13	+330~+534
28-2	1 350	450~1 120	2.54	NNE	13~28	+318~+467
94	3 025	42~1 861	3.58	NW~NE	8~25	+168~+374
95	3 157	173~1 860	4.95	NW~NE	17~29	+59~+312
96	2 757	100~1 747	5.57	NW~NE	13~28	-263~+152
97	1 661	380	3.38	W~NE	15~17	-78~+55

锌多金属矿体以 96 号矿体为首采区, 进行上行开采, 然而, 实施上行式开采需要面临深部高应力条件下岩爆问题突出, 复杂多矿层大面积开采, 应力转移规律复杂, 岩层移动范围大, 采动损害效应明显, 地表办公楼、破碎车间、东副井和黑水沟蓄水池等地表建筑物需要加强保护等突出问题。开展锌多金属矿上行开采岩层移动规律数值模拟研究, 能够有效地指导锌多金属矿体的安全、高效开采, 但锌多金属矿区地表起伏多变、矿体展布范围大且厚度小、地表重要建筑物分布范围广, 需构建的数值模型模型长 2 060 m、宽 1 591 m、高 970 m, 三维数值模型构建是开展岩层移动规律数值模拟的难点。

2.2 基于 3DMine 的三维数字化模型构建

现有的有限元、有限差分等大型数值模拟软件受限于前处理功能, 较难构建复杂地质体的三维精细化数值模型, 而运用三维建模软件能够建立复杂地质体的三维精细化数字模型, 将三维数字化模型构建方法与数值模型构建方法耦合, 建立三维精细化数值模型是必然趋势。本文利用 3DMine 矿业工程软件构建复杂地质体三维数字化模型, 并通过其他软件与该模型的耦合, 开展复杂地质体三维数值模型构建方法研究。

利用 3DMine 软件分别构建矿体、地层等的三维可视化实体模型, 如图 1 所示。

3DMine 软件可将各实体模型分别保存为“DXF”、“.STL”、“.3DM”格式文件。为确保实体模型向块体模型的转化, 3DMine 软件构建的可视化模型必须能通过实体验证。

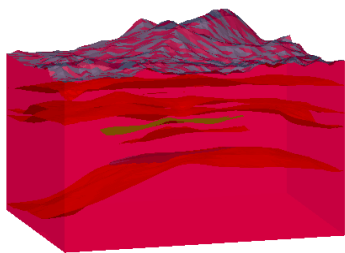


图 1 3DMine 三维可视化模型

Fig.1 3D visualization model of 3DMine

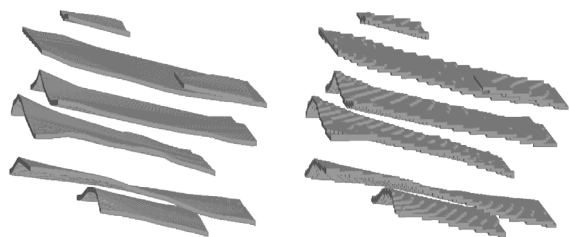
3 复杂地质体三维数值模型多软件构建方法

3.1 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法

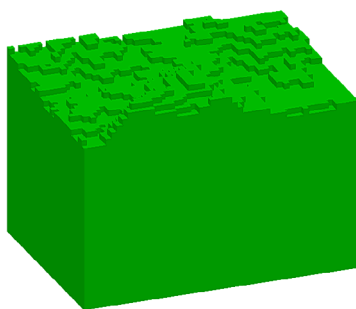
(1) 基于 3DMine 块体模型的构建方法

3DMine 软件构建的地质体三维数字化实体模型可通过 3DMine 软件与 FLAC^{3D} 软件的对接功能,以“块体堆积”的形式另存为 FLAC^{3D} 软件可识别的数值模型,并通过设置矿岩分类属性实现模型的分组。3DMine 块体模型数据库包含各块体质心坐标、尺寸和矿岩类型,但 FLAC^{3D} 模型数据库记录了每个长方体网格的 8 个节点坐标和尺寸,完成 3DMine 到 FLAC^{3D} 的数据库转换是构建数值模型的基础。

为有效减少 3DMine 块体模型转换的 FLAC^{3D} 模型中的单元体数量,可根据研究需要,在 3DMine 软件中将构建的地质体模型分区域划分为尺寸不等的若干层块体模型,如图 2 所示。



(a) 2 m×2 m×2 m 矿体块体模型 (b) 10 m×10 m×10 m 矿体块体模型

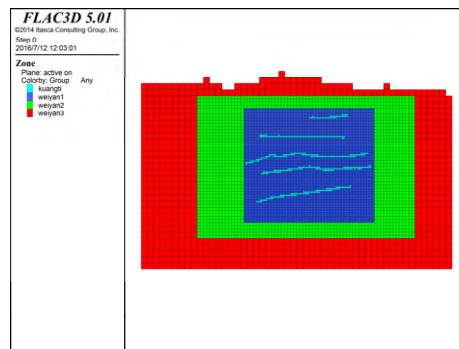


(c) 40 m×40 m×40 m 地表块体模型

图 2 3DMine 块体模型

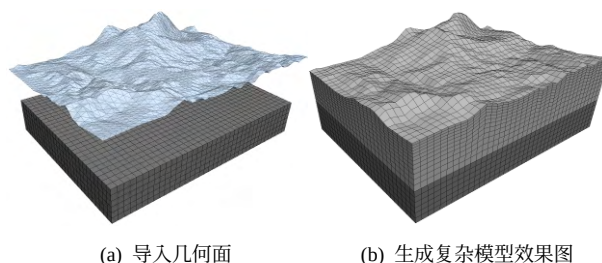
Fig.2 Block model of 3DMine

将块体模型分别输出为 FLAC^{3D} 数值模型,为实现不同区域的 FLAC^{3D} 数值模型组合拼接,在 3DMine 软件约束生成块体模型时,各区域块体模型的原点必须一致且不同层块体间大小成整数倍,如图 3 所示。

图 3 各层块体模型在 FLAC^{3D} 软件中拼接Fig.3 Splicing block models in FLAC^{3D}

(2) 基于 3DMine 面模型的构建方法

FLAC^{3D} 5.01 软件具有通过导入几何元素 (Geometry) 方式进行建模的功能,可将“DXF”、“STL”等格式的几何点、线及面网格直接导入到软件中,再利用 Geometry import 命令构建复杂地表模型,如图 4 所示。



(a) 导入几何面

(b) 生成复杂模型效果图

图 4 利用 geometry import 命令建立复杂模型

Fig.4 Modeling complex models through using command geometry import

本文基于 3DMine 软件构建的“STL”格式面模型,结合 FLAC^{3D} 5.01 的 Geometry import 建模方式,直接构建三维数值模型。

具体建模步骤:

① 编写在 FLAC^{3D} 中生成底面网格模型的文本命令,生成底面网格单元,如图 5 所示。底面模型中间网格密集部分是包含所有矿体的最大范围,由于在 FLAC^{3D} 中很难对网格进行精细控制,为减少总体单元数目,提高计算机运算速度,将矿体范围外的网格单元向外扩散并设置比率 (ratio)。

② 在 FLAC^{3D} 导入 3DMine 软件构建的“STL”格式地表面、地层面,通过 Geometry import 命令向

上生成网格化的复杂地表、地层。逐一导入各矿体、地层、地表等的几何面即可生成完整的网格化数值模型,如图 6 所示。模型构建过程中,单元格数量可通过“segment n ”命令控制(n 为划分的单元网格段数),也可通过设置相邻单元间的比率控制。

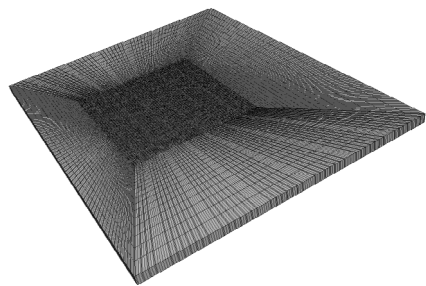


图 5 通过 FLAC^{3D} 读取命令文件生成的底面网格单元
Fig.5 Through FLAC^{3D} reads command to model grid cell on the underside

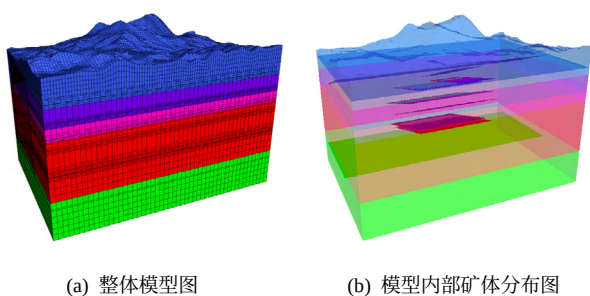


图 6 FLAC^{3D} 六面体网格模型
Fig.6 Hexahedral mesh model in FLAC^{3D}

③ 复杂地质体三维模型构建完毕,还需圈定各矿体真实范围并单独划分成组(group),以便于开展后续的数值模拟。

3.2 3DMine-Surfer-Rhino-ANSYS-FLAC^{3D} 耦合建模方法

3DMine、Surfer、Rhino 等软件能够较好地构建复杂地质体模型,且各软件在模型构建方面存在各自优势。ANSYS 软件能够对复杂模型进行网格化,并通过一定接口转换为 FLAC^{3D} 模型^[2]。上述各软件间存在一定联系,可以通过特定格式文件进行相互转换。本文基于 3DMine 三维可视化模型包含的各层面点信息,通过 Surfer 软件将点信息转入 Rhino 软件,生成地表面、地层面和矿体面,再利用 ANSYS Workbench 软件生成三维实体模型并划分精细网格,最终利用 ANSYS TO FLAC^{3D} 程序构建出复杂地质体三维数值模型。具体建模流程如图 7 所示。

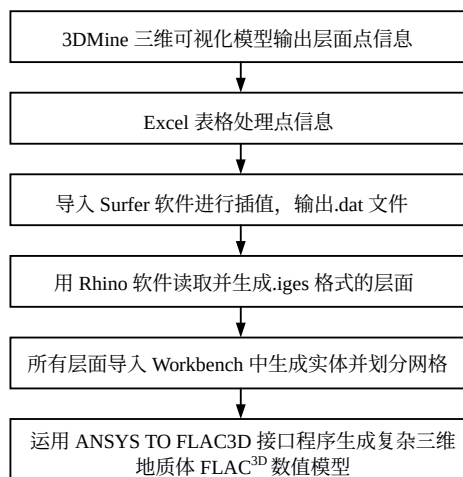


图 7 多软件耦合建模流程图
Fig.7 Modeling flow chart of multiple softwares coupling

具体建模步骤为

① 基于 3DMine 软件构建的三维可视化模型,将地表面、地层面和矿体面按一定 X 、 Y 间距生成点集,见图 8。将所有点、线坐标信息复制到 Excel 表格中,并整理为 Surfer 可识别的格式。

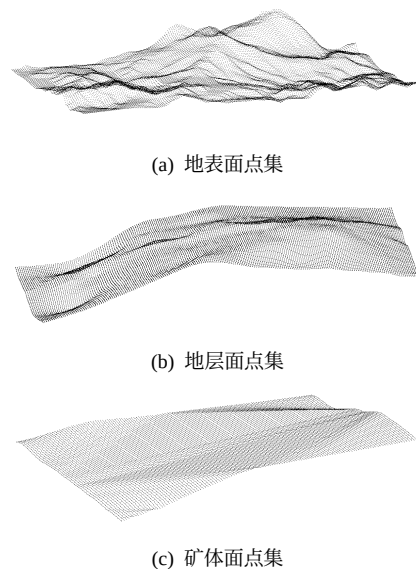


图 8 3DMine 层面点集
Fig.8 Plane point set in 3DMine

② 利用 Surfer 软件对点信息进行插值(见图 9),生成“.Grd”格式的等高线文件,并另存为“.csv”格式文件。通过添加 srftptgrid、Y 行 Node 数、X 行 Node 数,将“.csv”格式文件处理,并另存为“.txt”格式文件,使其能被 Rhino 软件读取,如图 10 所示。

③ 利用 Rhino 读取 Surfer 软件处理的“.txt”格式文件,生成地表面、地层面和矿体面,并将各面模型另存为“.iges”格式文件,如图 11 所示。

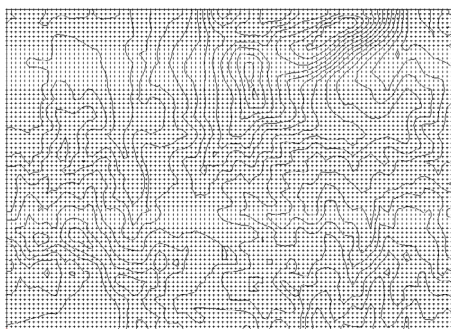


图 9 Surfer 生成的等值线图

Fig.9 Isogram in Surfer

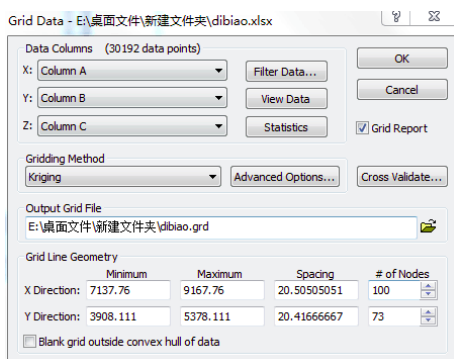


图 10 Surfer 插值设置

Fig.10 Set interpolation in Surfer

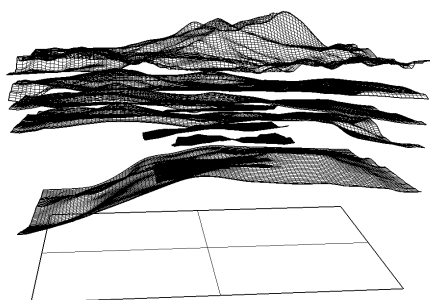


图 11 Rhino 里地表面、地层面和矿体面

Fig.11. Ground surface, formation boundaries and orebody surfaces

④ 将 “.iges” 格式的所有层面导入 ANSYS Workbench 软件, 利用拉伸命令将底面向上拉伸生成实体模型, 通过布尔运算, 用地层面切割实体形成多个地层模型。同样, 将矿体面拉伸为实体, 并对地质体三维模型进行网格化, 如图 12 所示。

通过 Workbench 与 Apdl 之间的数据共享, 输出各单元节点坐标及单元信息 “NODE.DAT” 和 “ELE.DAT 文件”, 利用 ANSYS TO FLAC^{3D} 程序转换生成复杂地质体三维数值模型, 如图 13 所示。

4 不同建模方法对比分析

深入分析各复杂地质体三维数值模型构建方法全过程, 从模型大小、网格划分类型、网格质量、

建模难易程度等方面分析各方法优缺点及适用条件, 如表 2 所示。

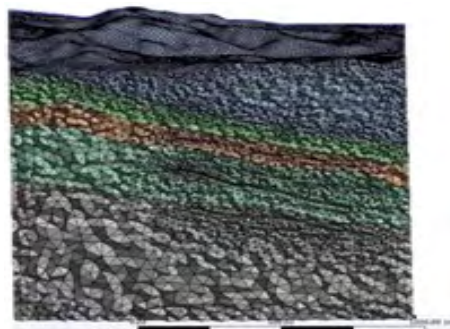
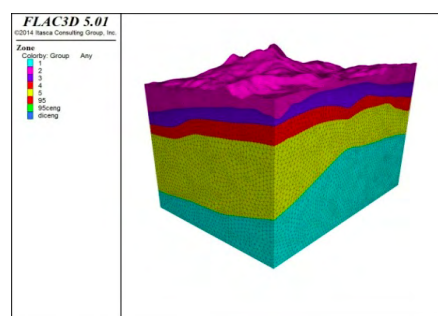


图 12 ANSYS Workbench 建好的网格模型

Fig.12 Mesh model in ANSYS Workbench

图 13 导入 FLAC^{3D} 的网格模型Fig.13 Import mesh model to FLAC^{3D}

基于表 2 对各建模方法优缺点及使用条件的分析结果, 分别对比不同 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法、3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模与多软件耦合建模方法的优势与缺陷, 取长补短, 确立综合性建模方法。

(1) 不同 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法比较

对比基于 3DMine 块体模型的 FLAC^{3D} 数值建模方法与基于 3DMine 面模型的 FLAC^{3D} 数值建模方法可知, 基于块体模型构建的 FLAC^{3D} 数值模型地表粗糙, 由单元块体呈阶梯状堆砌而成, 较难反映真实形态。但基于 3DMine 面模型的 FLAC^{3D} 数值建模方法, 可建立真实可靠的地表起伏形态。

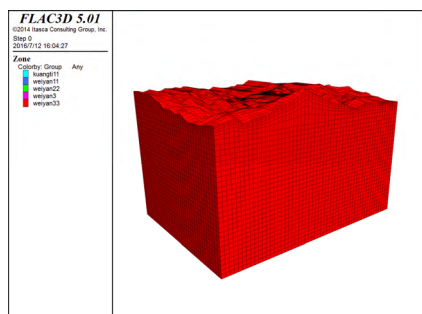
因此可结合这两种 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法的优点, 综合构建复杂地质体三维数值模型, 即先在 3DMine 软件中分别生成块体模型, 分别导入 FLAC^{3D} 软件中组装拼接, 再利用 FLAC^{3D} 的 Geometry import 命令建立地表, 如图 14 所示。

综合的建模方法结合了两两种建模方式优点, 可较简单、快捷的构建较真实的复杂地质体三维数值模型, 避免了 3DMine 块体模型-FLAC^{3D} 数值模型的 “堆积式” 建模缺陷, 也避免了 3DMine 面模型-FLAC^{3D} 数值模型的地表与地层单元尺寸跳跃性大的建模弊端。

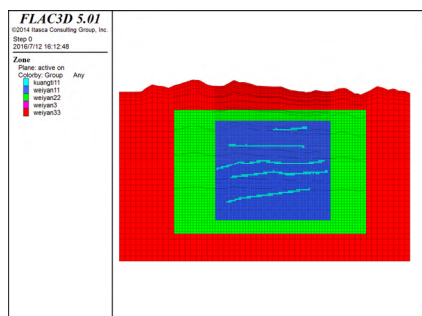
表 2 不同建模方法优缺点及适用条件比较

Table 2 Different modeling methods advantages and disadvantages and applicable condition

建模方法	网格类型及数量	优点	缺点	适用条件
基于 3DMine 块体模型的 FLAC ^{3D} 数值建模	围岩、矿体均为六面体网格, 共 649 684 个节点、623 617 个单元体	建模简便、操作灵活、便于修改, 可快速构建三维数值模型; 矿体块体模型由实体模型约束而成, 形态较为真实; 可导入地层面约束块体模型生成多个地层	模型尺寸较大时, 网格数较多; 模型导入 FLAC ^{3D} 后, 在若干种不同尺寸块体接触区域, 部分网格节点连接性差, 计算精度可能受影响。数值模型基于块体模型建立, 不能生成平滑的复杂地表, 不适合构建厚度薄且起伏变化大的地质体模型	构建尺寸相对较小、矿体厚度大、赋存条件简单的地质体
基于 3DMine 面模型的 FLAC ^{3D} 数值建模	围岩、矿体均为六面体网格, 共 4 091 827 个节点和 3 996 200 个单元体	可快速构建大型复杂地质体三维数值模型, 建立真实起伏地表。建模过程依托软件少, 不易出错。采用 3DMine 面模型辅助建模方式, 解决了节点连接性问题。建模过程中可人为干预并及时调节修正	模型范围很大时构建的数值模型单元体数目太大。地表形态受网格尺寸影响较大, 当尺寸较大时地表与地层单元尺寸的跳跃性大	构建尺寸稍大, 内部赋存多层缓倾斜薄矿体, 地表起伏变化的地质体
3DMine-Surfer-Rhino- ANSYS-FLAC ^{3D} 多软件 耦合建模	矿体为六面体网格、围岩为四面体网格, 共 308 035 个节点, 1 673 856 个单元体	可构建产状复杂多变的矿体模型。可构建真实起伏变化的地表、地层、断层模型。可根据需要对不同区域划分不同大小的网格, 极大减少网格单元数量。建立复杂地质体三维数值模型, 可达到与可视化数字模型的精确对应	依托软件多, 操作复杂, 需对各软件熟练掌握。各环节均可能导致建模失败, 且较难排查失败原因。模型内的矿体网格单元尺寸很难划分很小	构建尺寸较大、内部存在多层矿体且赋存条件复杂、围岩有多个地层组的复杂地质体



(a) 整体模型



(b) Z 方向剖面图

图 14 综合建模方式在 FLAC^{3D} 中构建的模型Fig 14. Modeling FLAC^{3D} model through synthetic modeling way

(2) 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模与多软件耦合建模方法比较

3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法虽然可结合块体模型与面模型综合构建数值模型, 但若导入的面模型互相交切时, 将导致建模失败。多软件耦合建模方法虽然建模过程也复杂, 较难操作, 但能构建产状多变复杂的地质体, 因此可将 Rhino 软件在多软件耦合建模过程中发挥的作用, 应用到

3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模中, 解决面模型互相交切时 3DMine-FLAC^{3D} 耦合方法不能成功构建模型的问题。

当需导入 FLAC^{3D} 中的 3DMine 面模型间存在相交关系时, 可将其导入 Rhino 软件中, 通过在研究区域边界添加倾向、倾角不同的面模型, 改变矿体面向外延伸的方向, 避免矿体面间相交, 如图 15 所示。

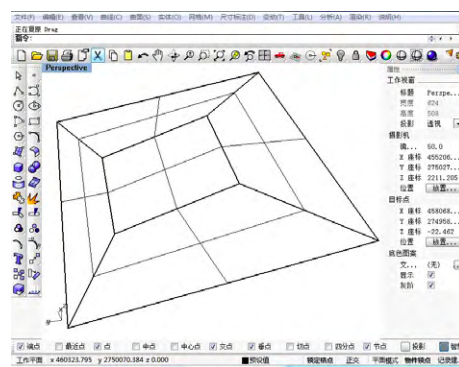


图 15 Rhino 处理的几何面

Fig.15 Processing geometrical surface in Rhino

将添加的辅助面与矿体面合并为统一对象, 并另存为 “.STL” 格式文件, 即可导入 FLAC^{3D} 软件中构建数值模型。

5 上行开采地表沉陷数值模拟

锌多金属矿体以 96 号矿体为首采区, 采用铲运机出矿房柱采矿法进行逐层上行开采。沿矿体走向每 80~120 m 划分为一个盘区, 盘区垂高 25~

30 m, 区内设 9 个分条。房间矿柱随分条回采逐步形成 3.5 m×3.5 m 方形点柱, 点柱沿走向间隔 10~12 m、倾向间隔 8~10 m, 顶部每隔 3.5 m 保留 3 m×4.5 m 矿柱, 盘区间柱宽 6.0 m, 底柱宽 3 m。

基于第 3 节构建的锌多金属矿体三维数值模型, 进行上行开采地表沉降数值模拟研究。锌多金属矿区 X 方向侧压系数为 4.2, Y 方向侧压系数为 1.8, 矿岩力学参数见表 3。

限于篇幅, 这里只列举 96 号、95 号、94 号、28-2 号、82 号和 78 号矿体开采结束的 Z 方向位移等值线图, 如图 16 所示。由图中可知, 因矿体埋深较大且厚度较小, 采用铲运机出矿房柱采矿法进行逐层上行回采后, 沉降盆地沿矿体走向呈椭球状形态分布, 下沉盆地中心最大下沉值大于 23 mm。地表各重点建筑物所处区域下沉值最大不超过 20 mm, 能够较安全运营。

表 3 锌多金属矿区矿岩力学参数

Table 3 Rock mechanics parameters in zinc polymetallic mining area

岩性	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kg/m ³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
泥灰岩 (D ₃ ³)	6 300	0.30	2 630	1.17	32	1.12
扁豆状灰岩 (D ₃ ²)	18 400	0.25	2 690	1.68	35	1.55
硅质岩 (D ₃ ¹)	28 500	0.24	2 680	2.50	42	2.10
砂卡岩、灰岩(D ₂ ²)	27 500	0.25	2 660	1.62	41	1.81
生物礁灰岩 (D ₂ ¹)	21 800	0.26	2 580	1.96	45	2.40
矿体	37 800	0.25	3 210	1.08	45	1.66

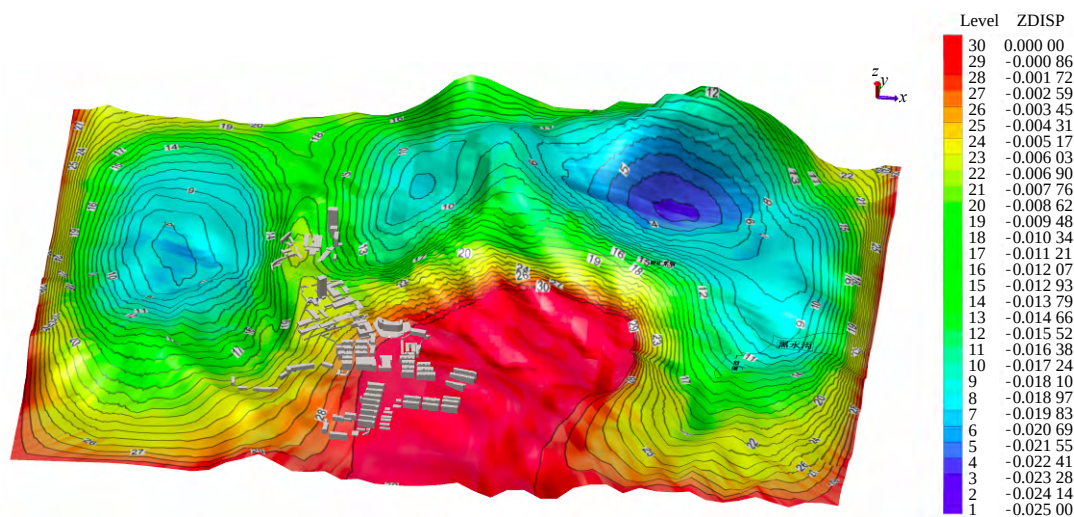


图 16 各矿体开采结束的地表 Z 方向位移等值线图 (单位: mm)

Fig.16 Z displacement isogram of ground surface after mining (unit: mm)

6 结 语

针对大型复杂地质体三维数值模型构建问题, 本文以 3DMine 数字化模型为基础, 提出了 3 种多软件耦合建模方法, 详细阐述了各建模方法的具体流程。

深入分析了各建模方法的优缺点及适用性, 对比分析了各建模方法的优势与短板, 取长补短, 改进了 3DMine-FLAC^{3D} 耦合建模方法存在的缺陷, 解决了复杂地质体三维数值模型构建难题。

利用大型复杂地质体三维数值建模方法, 构建了锌多金属矿区三维数值模型, 分析了矿体上行开采地表沉降规律。研究成果为复杂地质体三维数值

模型准确构建具有重要参考价值和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 刘晓明, 罗周全, 杨彪, 等. 复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 4006—4015.
LIU Xiao-ming, LUO Zhou-quan, YANG Biao, et al. Numerical modeling and geological body visualization for complex mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 4006—4015.
- [2] 郑文棠, 徐卫亚, 童富果, 等. 复杂边坡三维地质可视化和数值模型构建[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1634—1644.

- ZHENG Wen-tang, XU Wei-ya, TONG Fu-guo, et al. 3D geological visualization and numerical modeling of complicated slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1634—1644.
- [3] 廖秋林, 曾钱帮, 刘彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC^{3D} 模型的动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010—1013.
- LIAO Qiu-lin, ZENG Qian-bang, LIU Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC^{3D} based on ANSYS platform[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 24(6): 1010—1013.
- [4] 马新根, 孙健东, 赵洪泽, 等. 基于 Rhino3D NURBS 的 FLAC^{3D} 快速建模方法在露天边坡问题中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(8): 138—141.
- MA Xin-gen, SUN Jian-dong, ZHAO Hong-ze, et al. Application of FLAC^{3D} rapid modeling in slope problem of open-pit mine based on Rhino3D NURBS[J]. **Safety in Coal Mines**, 2015, 46(8): 138—141.
- [5] 田树昆, 曹兰柱. 基于 CAD 与 ANSYS 的 FLAC^{3D} 边坡模拟分析[J]. 微计算机信息, 2010, 16(11): 259—260.
- TIAN Shu-kun, CAO Lan-zhu. The simulation analysis of slope by FLAC^{3D} based on CAD and ANSYS[J]. **Microcomputer Information**, 2010, 16(11): 259—260.
- [6] 崔芳鹏, 胡瑞林, 刘照连, 等. 基于 Surfer 平台的 FLAC^{3D} 复杂三维地质建模研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 699—702.
- CUI Fang-peng, HU Rui-lin, LIU Zhao-lian, et al. Surfer software platform based complex three-dimensional geological digital models for preprocessing of FLAC^{3D}[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(5): 699—702.
- [7] 李翔, 王金安, 张少杰. 复杂地质体三维数值建模方法研究[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(6): 676—681.
- LI Xiang, WANG Jin-an, ZHANG Shao-jie. 3D modeling method of complicated geological body[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2012, 32(6): 676—681.
- [8] 孙涛, 刘亮明, 赵义来, 等. 基于 GOCAD 平台的复杂地质体系的动力学建模研究[J]. 矿产与地质, 2011, 25(2): 163—167.
- SUN Tao, LIU Liang-ming, ZHAO Yi-lai, et al. Study on dynamic modeling of complex geo-system based on GOCAD[J]. **Mineral Resources and Geology**, 2011, 25(2): 163—167.
- [9] 许国, 王长海. 万家口水电站复杂地质体三维模型及其数值模型构建[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(4): 469—474.
- XU Guo, WANG Chang-hai. Complex geological object visualization and numerical modeling for Wanjiakou Hydropower Station[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2013, 46(4): 469—474.
- [10] 郭颖星, 祝爱玉, 孙丰成, 等. 复杂断层数值建模及程序接口实现[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(2): 90—97.
- GUO Yin-xing, ZHU Ai-yu, SUN Feng-cheng, et al. The modeling methods of complex faults and the output file for Adina program[J]. **Seismological and Geomagnetic Observation and Research**, 2016, 37(2): 90—97.
- [11] 王树仁, 张海清. MIDAS/GTS-FLAC3D 耦合建模新方法及其应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 12—17.
- WANG Shu-ren, ZHANG Hai-qing. A coupling modeling method with MIDAS/ GTS-FLAC3D and its application[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2010, 32(1): 12—17.
- [12] BOCK S. New open-source ANSYS-SolidWorks-FLAC^{3D} geometry conversion programs[J]. **Journal of Sustainable Mining**, 2015, 14: 124—132.
- [13] ZHAO X D, JIANG J, LAN B C. An integrated method to calculate the spatial distribution of overburden strata failure in longwall mines by coupling GIS and FLAC^{3D}[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2015, 25(3): 369—373.
- [14] LIU L M, LI J F, ZHOU R C. 3D modeling of the porphyry-related Dawangding gold deposit in south China: Implications for ore genesis and resources evaluation[J]. **Journal of Geochemical Exploration**, 2016, 164:164—185.
- [15] YANG K M, WANG L B, ZHANG T, et al. Novel modeling on numerical computing the geo-deformation information in coalmine based on the GIS-Excel[J]. **High Technology Letters**, 2013, 19(2): 156—161.