

· 机电与自动化 ·

## 复杂地质构造矿床三维可视化实体建模技术\*

王李管 曾庆田 贾明涛 龚元翔 尚晓明  
(中南大学)

**摘 要** 复杂地质构造矿床实体建模的关键技术,是如何将地质和采矿工程师的经验充分和有效地考虑进来,建立全面反映地质构造的“真实”矿床模型,为块段建模、品位估值、储量计算、生产计划编制提供基础。在讨论了地质实体建模理论的基础上,采用 Micromine 矿业工程软件对实际矿山进行三维建模实践研究分析,介绍了如何建立复杂地质构造矿床三维可视化模型。结果表明,目前已经具备了建立复杂地质构造矿床的基本技术,正确合理采用三维建模工具并将地质采矿工程经验考虑进来,可以建立合理有效的复杂矿床模型。

**关键词** 复杂地质构造 TIN 技术 数字表面模型(DTM) 线框模型 布尔运算

Technology of Three-dimensional Visualized Solid Modeling for  
Mineral Deposit with Complicated Geological StructureWang Liguan Zeng Qingtian Jia Mingtao Gong Yuanxiang Shang Xiaoming  
(Central South University)

**Abstract** The key technique of deposit solid modeling of complicated geologic structure is how to fully and effectively take into consideration the experiences of geological and mining engineers in building up a "true" model of mineral deposit that can fully reflect the geological structure so as to lay a foundation for block modeling, grade evaluation, reserve calculation and production scheduling. Based on the discussion of geological solid modeling theory, study was carried out on the three-dimensional modeling practice for a real mine by MICROMINE, a mining engineering software, and description was made about how to build up a three-dimensional visualized model for the mineral deposit with complicated geological structure. The results show that the basic technique of modeling complicated architectonic deposit has been grasped. With the three-dimensional modeling tool correctly and reasonably adopted and the experiences in the geological and mining activities taken into consideration, a reasonable and effective model for complicated deposit can now be constructed

**Keywords** Complicated geological structure, TIN technology, Digital terrain model (DTM), Wire frame model, Boolean operation

矿床三维可视化技术是随着计算机软硬件技术、三维仿真技术、地质统计学和采矿工业的发展以及地质模型和储量准确度的进一步要求而迅速发展起来的。目前,三维可视化建模技术中的主流软件系统都可以在装有 Windows XP 的微机上运行,而且都提供了网络版本,支持网络共享。国外三维可视化软件有英国的 DataMine & Guide, 澳大利亚的 Vulcan、Surpac、Micromine 等,加拿大的 Lynx、MicroLYNX,美国的 M-KEagles 等等<sup>[1]</sup>。

地质体三维可视化模型构建是地质资料集成和二次开发的最佳方法,它具有形象、直观、准确、动态、信息丰富等特点<sup>[2]</sup>。我国很多金属矿山矿床构造复杂,采用矿山工程软件对复杂地质构造矿床进行建模,实际上是将地质采矿工作者的经验和

软件技术有机结合起来进行复杂地质体构模技术研究的漫长过程。

## 1 三维线框实体基本原理

三维线框模型的构建主要是采用了 TIN 技术(不规则三角网模型)中的 Voronoi 图与 Delaunay 三角形算法。TIN 是一种表示数字高程模型的方法,它既减少规则格网方法带来的数据冗余,同时在计算效率(如坡度)方面又优于纯粹基于等高线的方法。这种表面模型可以进行体积估算、表面渲染、切制剖面、快速三维显示等操作,比计算机图形学中的表面模型有所扩展。能满足矿山设计、生产中地质

\* 国家十五科技攻关项目(编号:2004BA615A-04-04)。

王李管(1964—),中南大学资源与安全工程学院,教授,博士生导师,410083 湖南省长沙市。

制图的基本要求,也是建立矿体三维实体模型的基础。矿体的地质形态复杂多变,很难用规则的几何体来描述。它需要一种灵活、简便、快速的方法来建立矿体的不规则几何模型。这种模型正是基于这一需要而提出来的。

### 1.1 TIN 不规则三角网技术

不规则三角网 TIN 属于基于场的数据模型范畴,三角形单元遍布整个区域无重叠、无缝隙,实体间的空间关系通过三角形连接表达。用于支持 TIN 建立的几何构造——Delaunay 三角网因其特有的“外接圆规则”和“最大最小角规则”,使得其成为空间邻近表达的有力工具。这些模型可以看作是不规则三角网 TIN 在平面空间场表达上发挥的具体作用<sup>[3]</sup>。

### 1.2 Voronoi 图

基于场论观念,空白区域可看作是目标的相互“竞争”生成空间,在群结构中,每个面目标的“影响区域”通过竞争以中剖分结果达到平衡,这是 Voronoi 图几何构造的基本思想。

Voronoi 图又叫泰森多边形或 Dirichlet 图,它是由 1 组由连接 2 邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形组成。 $N$  个在平面上有区别的点,按照最邻近原则划分平面;每个点与它的最近邻区域相关联。Delaunay 三角形是由与相邻 Voronoi 多边形共享 1 条边的相关点连接而成的三角形。Delaunay 三角形的外接圆圆心是与三角形相关的 Voronoi 多边形的 1 个顶点。Voronoi 三角形是 Delaunay 图的偶图<sup>[4]</sup>。

### 1.3 Delaunay 三角形网的通用算法——逐点插入算法

基于散点建立数字地面模型,常采用在  $d$  维的欧几里得空间中构造 Delaunay 三角形网的通用算法——逐点插入算法,具体算法过程如下。

(1) 遍历所有散点,求出点集的包容盒,得到作为点集凸壳的初始三角形并放入三角形链表。

(2) 将点集中的散点依次插入,在三角形链表中找出其外接圆包含插入点的三角形(称为该点的影响三角形),删除影响三角形的公共边,将插入点同影响三角形的全部顶点连接起来,从而完成一个点在 Delaunay 三角形链表中的插入。

(3) 根据优化准则对局部新形成的三角形进行优化(如互换对角线等)。将形成的三角形放入 Delaunay 三角形链表。

(4) 循环执行上述第 2 步,直到所有散点插入

完毕。

## 2 线框模型布尔运算

线框模型布尔运算在复杂地质矿床构模中主要是对有相交关系的复杂地质体(实体与实体之间、面与实体之间)进行交、差、并等基本的布尔运算功能对实体进行交接拼合以得到建模所需的组合实体模型<sup>[8]</sup>。

目前大多数数字矿山工程软件都可以实现实体模型的并、交和差运算,表面模型可以进行差、并运算。在建模实际中,按照软件提供的布尔运算功能进行组合,能够满足复杂地质体的建模要求。

复杂矿体建模中主要遇到的问题是矿体的分支复合和矿体被断层穿插切割等地质现象很难翔实地反映在可视化模型中。在建模中,实际上 2 个实体剖面之间是按照直线的方式来进行三角网连接的,但是遇到呈曲面的断层或者断层破碎带,实际上这种矿体与断层实体之间的吻合关系是很难在建模实体中反映的。所以只有通过线框模型布尔运算得到的实体组合来逼近矿床实体间的切割和相交等空间形态和关系。

## 3 复杂地质构造矿床建模技术

### 3.1 地表 DTM

数字地形模型(Digital Terrain Model)通过野外测量、航测、地图数字化等途径可得到设计所需的地形资料,这些资料经过计算机处理后可以形成数字地形模型<sup>[7-8]</sup>。

通常数字地形模型建立的方法,一是根据现在测量仪器(全站仪)得到的第一手地形测量数据(通常是点坐标)按照一定格式输入到数字矿山工程软件后可以直接通过软件功能生成数字地表模型;另一种是根据矿山提供的地质地形图进行矢量化后导入到数字矿山工程软件中进行高程赋值,然后直接生成数字地形模型。

实际上通过测量和地质地形图得到的数据信息是比较有限的,因此地表模型建立还需要进行空间数据插值来实现。目前空间数据插值的方法很多<sup>[9]</sup>,主要有:双线性插值、趋势面插值、样条函数插值、距离幂次反比法和克里金(Kriging)插值等。实际上软件提供的地形模型创建的空间数据插值主要是通过 TIN(不规则三角网)技术和利用空间插值技术生成的等值线修改地形模型来实现的。

### 3.2 复杂构造三维模型建模技术

#### 3.2.1 复杂断层三维建模技术

断层是最常见的地质现象之一,它破坏了地质

体的连续性,改变了数据的原始分布格局。因此,在存在断层的情况下,必须首先考虑断层对有关层状地质体的影响。复杂断层三维建模中,主要采用的是 TIN(不规则三角网)技术生成断层线框模型以逼近断层空间形态。断层模型一般分 2 类:一类是以面的形式存在,即通常所说的断层面;另一类是断层非常发育,并且在空间上已经形成了一定的宽度,三维建模中一般将它建立成三维实体,即通常所说的断层破碎带。断层数据通常只有 2 个来源:

(1) 钻孔数据,在三维建模中通常以点形式出现,通过一系列的点线连成线,然后再连接成面;

(2) 剖面图,可确定断层面及地层面的形态及相关参数,在建立模型中通常以线的形式进入软件,在软件中连接成面。

断层面的建模和模拟是一个复杂的交互过程。一般情况下,应利用不同剖面上的断层线来形成相应的面,因为同一条断层在不同剖面上的表现形式不同,有时不能确定哪条线应属于哪条断层,应根据已有的工程资料和认识来进行合理的解释,并运用以上提到的技术,进行断层面的拟合,形成合理的断层面形态。

### 3.2.2 复杂层状地质体建模技术

(1) 单个层状地质体构模方法。计算机图形学中的所有光滑曲面最终都是由多边形(主要是三角形)无限逼近得到的,因此建立曲面模型的实质是构造用来逼近该曲面的空间三角网。先将每个矩形网格划分成 2 个三角形,然后用大量的小三角片逼近三维曲面。利用 OpenGL 的绘制函数 glBegin (GL - TRIAN GL ES) 将离散化的网格点构成三角面,完成每个 TIN 表面的绘制,也就完成了整个层面的绘制<sup>[9]</sup>。单个层状地质体实体模型实际上就是表面模型内外包裹互不透气的三维线框实体模型,因此它的建模方法实际上是通过表面模型的逼近规则,加上自身的缝合和包裹技术来实现的。

(2) 构造三维地质模型。三维地质模型是建立在以岩石为要素单一划分的基础上的。地质调查和观察所得到的资料和数据主要是各岩层、断层的分界面的数据,且这些数据具有有限、稀疏、不规则等特点<sup>[10]</sup>。建模中将不同的数据资料进行有效的表示,弄清楚各个地质体之间原始数据的对应关系,然后按照三维实体建模的数据要求进行组合和处理,最后经过坐标变换还原成建模所需的实际数据,然后在软件中进行实体模型的连接的创建。

### 3.3 矿体三维线框模型

矿体三维可视化技术包括矿体三维建模以及可视化显示 2 部分。三维图形的可视化显示技术是计算机图形学中成熟的技术,矿体的三维模型多种分类方法:从模型的构成元素,可分为基于元模型、基于体元模型和基于面与体的混合模型;从模型存储的元素类型,可分为基于栅格模型、基于矢量模型以及栅格和矢量相结合的混合模型。因此,可以总结出构建矿体 3D 模型可以考虑的几个维:

(1) 模型的构成元素维:包表面、体元和混合 3 种取值;

(2) 存储的数据类维:包括栅格、矢量和混合 3 种取值;

(3) 构成元的形状:规则的、不规则和混合 3 种取值。实际中,根据需要可以将这些维组合起来构造混合集成模型。

### 3.4 复杂地质构造矿床建模关键技术

特殊地质现象处理是建模中比较关键的技术,主要指地质体中的断层处理及原始数据为大数据量(主要指地球物理、地球化学数据等)时的特殊模拟及反演方法。具体技术有:断层处理(断层几何参数定义,断层线框模型构建及实体布尔运算);断层面与其他地质实体间的切割。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

大红山铜矿位于位于扬子准地台、康滇地轴、滇中中台坳 3 组构造线的交汇地带,处于偏东西向构造带内,属区域性近东西向的底巴都背斜的南翼西端。近东西向褶皱与断裂成矿区的基本构造格局。次级后期的北西、北东向断裂较为发育,因而矿区构造较为复杂<sup>[11]</sup>。高矿建模区域内矿体呈层状和似层状,该矿床主要矿体有 7 层,全区范围内共有大小断层 48 条。这些断层对矿体进行交叉切割,是整个矿床分成 183 个小矿体,大部分断层间都有错动和变形,因此该矿床建模是属于复杂地质构造矿床的建模。

### 4.2 建模实践

#### 4.2.1 数字地表模型

大红山铜矿数字地面模型建立是根据矿山提供的地质地形图进行矢量化后导入到数字矿山工程软件中进行高程赋值,然后直接生成数字地形模型,模型建立过程中,使用了软件提供的等直线生成和使用边界线对地表模型进行裁剪等功能。生成后的数

字地表模型(DTM)如图1所示。



图1 数字地形模型

#### 4.2.2 矿体和断层实体模型

三维可视化实体模型实际上就是用来描述三维空间物体的实体模型,也就是通常所说的三维实体模型(3 dm);它由一系列相邻的三角面,包裹成内外不透气的实体。而实体是由一系列在线上的点,连成内外不透气的三角网,这些三角网在平面视图内,肯定有交叠,但在三维空间内,任何2个三角面之间是互不相交和重叠的。而且任何一个三角面的边必须有相邻的三角面,任何三角面的3个顶点都必须依附在有效的点上。大红山铜矿实体模型主要包括矿体实体模型和断层实体模型,因断层造成矿体错动通过实体模型和断层实体模型的空间关系反映出来。矿体和断层实体模型的建立流程如图2所示。

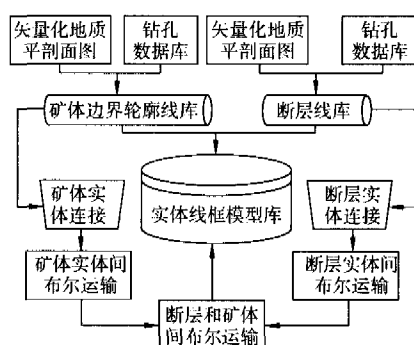


图2 矿体和断层实体建模流程

按照建模流程进行模型建立,大红山铜矿在建模区域内总计有大小各类断层48条,主要呈沿勘探线方向、垂直勘探线方向和水平方向分布。断层将整个矿床分成大小183个小矿块,而且断层切割处有错动,矿体和断层空间关系的修正主要通过实体间布尔运算来实现。建立和修正好的断层和实体模型如图3、图4所示。

#### 4.2.3 实体模型布尔运算

实体布尔运算是计算机图形学运算数学方法通过对实体模型进行交、差、并来逼近矿床实体模型实际空间形态的一种边界切割取舍的方法。在复杂实

体建模中需要进行实体模型的布尔运算,通过这种切割取舍运算,还原实际空间上相切的不同地质实体的空间关系。布尔运算能够使不同实体间的吻合空间关系表现的淋漓尽致。图4为断层对矿体进行穿插切割和错动的空间关系。

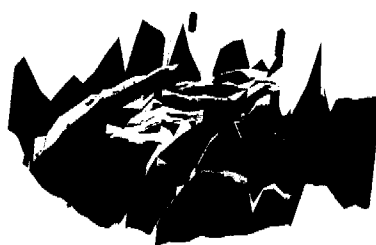


图3 断层和矿体实体线框模型

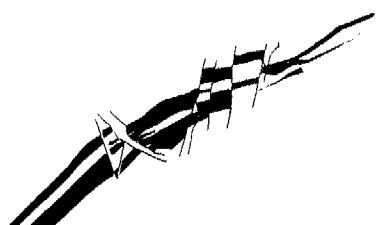


图4 矿体与断层地质实体剖面体

在大红山铜矿地质实体建模中,断层有48条之多,断层的穿插切割将整个矿床分割成183个小矿块,因此建立模型过程中,每个小矿块都需要和周围相切的断层进行布尔运算,保留断层内部的部分,舍弃出露断层外面的小部分。建模中可以发现有些矿体实际上应该和断层相切,而建模过程中由于剖面切割的有限性使圈定和连接出来的矿体实体模型根本没有和断层相交,因此需要通过修改三角网,延伸矿体穿越断层,再进行断层和矿体间的布尔运算,切掉人为延伸超出断层的部分,使矿体和断层边界达到完全吻合。地质实体建模的好坏将直接影响到后面的资源评价和采矿设计,特别是对地质和采矿设计出图的质量有很大影响。因此,尽管复杂地质矿床建模工作十分繁琐,但它是地质数学经济模型以及采矿设计能否完美完成的基础。

## 5 结论

复杂地质矿床是断层、褶皱等地质构造繁多的矿床,由于地质体几何形态的复杂性,因此,三维地质体的建模和可视化一直是三维地质数学经济模型建立中的一个难点<sup>[12]</sup>。本文在讲述了三三维地质模型建立理论的基础上,介绍了大红山铜矿复杂地质三维的建模实践。得出结论:

(下转第74页)

### 3 结 论

(1) 不同的钢渣稳定化预处理工艺会对钢渣的成分、稳定性、物相组成、矿相形貌及矿相颗粒大小等理化特性产生影响。

(2) 热泼法处理后的钢渣含大量不稳定的较大颗粒硅酸三钙相, 这些硅酸三钙易分解为硅酸二钙和游离氧化钙, 因而不宜将热泼渣直接资源化利用。

(3) 滚筒水淬法处理后的钢渣消化较完全, 结构稳定, 以硅酸二钙与铁铝酸钙为主要矿物, 利于直接资源化利用。

(4) 风碎法处理后的钢渣结构稳定性较好, 以硅酸二钙和铁酸钙为主要矿物, 矿物粒度细小而均匀, 对直接资源化利用也较有利。

### 参 考 文 献

- [1] 陈盛建, 高宏亮. 钢渣综合利用技术及展望[J]. 南方金属, 2004 (5): 1-5.
- [2] 黄晓燕, 王芳群. 钢渣的湿法处理与综合利用述评[J]. 中国锰业, 2001, 19(3): 39-41.

- [3] 李永治, 李文翔. 钢渣风碎技术研究[J]. 炼钢, 1994, 10(5): 40-44.
- [4] 李惠光. 宝钢钢渣加工技术与世界发展水平之比较[J]. 钢铁, 1994, 29(2): 70-74.
- [5] 于功德, 高怀峰. 安钢废钢厂的钢渣加工与综合利用[J]. 河南冶金, 1994, 4(13): 29-32.
- [6] 陈 伟. 转炉钢渣的处理和利用[J]. 湖南有色金属, 2000, 16(4): 36-38.
- [7] 甄长胜, 王继俊, 高玉英. 唐钢转炉钢渣处理工艺与效果[J]. 河北冶金, 1994, 79(1): 55-56.
- [8] Ortiz N, Pires M A F and Bressiani J C. Use of steel converter slag as nickel adsorber to waste water-treatment[J]. Waste Management, 2001, 21(7): 631-635.
- [9] 曹致栋, 谢良德. 宝钢滚筒法液态钢渣处理装置及与生产实绩[J]. 宝钢技术, 2001(3): 1-3.
- [10] 聂永丰. 三废处理工程技术手册: 固体废物卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 504.
- [11] 德国钢铁工程师协会. 渣图集[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 41.

(收稿日期 2006-10-10)

(上接第 49 页)

(1) 复杂地质矿床建模是一项非常复杂的工作, 不仅需要熟练的软件操作技巧, 而且要求建模者有丰富的地质工作经验, 同时能够通过软件提供的建模工具将自己的实际经验融合其中, 建立起符合实际的复杂地质矿床模型;

(2) 三维地质模型的建立需要通过软件的一些核心功能(实体布尔运算)对不同地质体之间的空间关系和边界进行修正, 使建立出来的模型具有合理性和实用性;

(3) 复杂地质矿床建模是创建虚拟现实矿山和最终实现数字矿山的基础, 通过软件提供的一些工具和软件实体布尔运算功能, 建立符合实际的复杂地质矿床模型已经具备了技术基础, 关键是在建模实践中需要将地质及采矿工程师的工程经验充分、有效地考虑进来, 从而建立一个“真实”的矿床模型。

### 参 考 文 献

- [1] 曾新平, 吴健生, 郑跃鹏, 等. 用于固体矿产勘探和开发的地质体三维可视化系统设计——基于混合数据模型[J]. 矿产与地质, 2004(6): 598-603.

- [2] Ai T, Oosterom P Van. A Map Generalization Model Based on Algebra Mapping Transformation[C]//Aref W G. Proceedings of the 9th ACM-GIS. Atlanta, GA, 2001: 21-27.
- [3] Worboy M F. GIS: A Computing perspective, Taylor and Francis, London.
- [4] 王福建, 吴国雄, 孙 勇. 三维实体模型在公路设计中的应用研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2002(1): 7-11.
- [5] 王英杰, 袁勘省, 余卓渊. 多维动态地学信息可视化[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 符铎砂. 公路计算机辅助设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 38-67.
- [7] 中华人民共和国交通部. 公路摄影测量规范(JTJ065. 97)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 46-107.
- [8] 潘 炜, 刘大安, 钟辉亚, 等. 三维地质建模以及在边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 597-602.
- [9] 李衷怡, 张瑾玉, 李利军. OpenGL 在工程地质体三维可视化中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2005(10): 80-84.
- [10] 夏艳华, 白世伟. 层状地质体与地下工程开挖三维可视化[J]. 岩土力学, 2004(12): 1928-1932.
- [11] 王李管, 何昌盛, 贾明涛. 三维地质体实体建模技术及其在工程中的应用[J]. 金属矿山, 2006(2): 58-62.
- [12] 罗周全, 刘晓明, 苏家红, 等. 基于 Surpac 的矿床三维模型构建[J]. 金属矿山, 2006(4): 33-36.

(收稿日期 2006-10-08)