

文章编号:1671-251X(2018)10-0048-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018040042

基于属性驱动的矿体动态建模

周智勇, 陈建宏, 李欢, 肖玮

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:传统的矿体建模是基于结构条件驱动的,在边界属性变化时,所建立的模型难以随之动态变化,为解决这一问题,针对矿体的动态特点,提出了基于属性驱动的矿体动态建模方法。首先利用三维块体属性模型,按任意给定的边界属性条件,在块体模型中对所需单元块体进行动态提取,然后基于特征面求取和曲面光滑算法将矿体属性模型转换成几何结构模型,最后建立给定工业指标条件下的矿体三维几何模型。应用实例表明,该方法实现了在不同边界属性条件下动态提取、生成矿体的属性结构和几何结构,可精确构建光滑矿体模型,提高了矿体动态建模效率。

关键词:矿体模型; 动态建模; 结构驱动; 属性驱动; 边界属性; 几何模型; 块体模型

中图分类号:TD67 文献标志码:A

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180920.0916.002.html>

Dynamical modeling of orebody based on property-driven

ZHOU Zhiyong, CHEN Jianhong, LI Huan, XIAO Wei

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

Abstract: Traditional orebody modeling was driven by structure conditions. When boundary properties change, the established model was difficult to change dynamically. In order to solve the problem, a dynamic modeling method of orebody based on property-driven was presented. Firstly, 3D block property model was used to extract the required elements in the block model according to any given boundary property conditions. Then, orebody property model was transformed into geometric structure model based on the characteristic face calculation and surface smoothing algorithm. Finally, 3D geometric model of the orebody was established under the given industrial index conditions. The application example shows that the method can extract and generate property structure and geometry structure of orebody dynamically under different boundary conditions, can accurately construct a smooth orebody model and improve the efficiency of dynamic modeling of orebody.

Key words: orebody model; dynamic modeling; structure-driven; property-driven; boundary property; geometric model; block model

0 引言

通常建立矿体模型时先构建其结构模型,然后

再依据属性特性建立属性模型,轮廓线拼接法就是这种传统的矿山软件建模方法^[1]。但是在实际建模过程中,矿体的结构模型并不是一成不变的,当经济

收稿日期:2018-04-11;修回日期:2018-07-20;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504286, 51374242);中国博士后科学基金资助项目(2015M572270);湖南省科技计划项目(2015RS4004)。

作者简介:周智勇(1980—),男,江西上饶人,讲师,硕士研究生导师,博士,主要研究方向为数字矿山、矿业系统工程,E-mail:csuzzy@126.com。

引用格式:周智勇,陈建宏,李欢,等.基于属性驱动的矿体动态建模[J].工矿自动化,2018,44(10):48-54.

ZHOU Zhiyong, CHEN Jianhong, LI Huan, et al. Dynamical modeling of orebody based on property-driven[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(10): 48-54.

条件和技术水平等因素发生变化时会造成边界属性的变化,进而导致其结构模型的变化。通常结构模型会对属性模型造成限制作用,而在大多数情况下,属性模型对结构模型的影响更大些。矿体的几何形态是其内部的某种属性满足一定边界条件的集合。传统的先建立结构模型再建立属性模型的方法存在不足,因为它以矿体结构模型作为约束,构建矿体属性模型^[2-6]。矿体结构模型本身就容易变化且是矿区范围内矿石属性模型的表象,要想动态构建矿体模型就需要摒弃这种基于结构驱动的传统方法。

在三维地质建模中,如何动态高效地建立矿体模型一直是该领域科研工作者关注和研究的重点。目前,已有研究人员取得了一些成果。文献[7]对煤矿开采的流程进行了分析,改进和完善了煤层模型动态建立方法。文献[8]以 TIN(不规则三角网)动态生成为核心技术提出了一种简单地层模型的动态生成方法^[8]。文献[9-11]基于拓扑推理的方法对地质体的动态 3DGM(三维地质建模)问题进行了研究。文献[12-13]分别提出了人工智能、本体论等理论与方法。文献[14-16]通过分析钻孔、等值线、剖面等数据的生成和图形的转化,从理论方法的角度对矿体动态建模进行了积极的研究,并提出了一种矿体模型向实体模型转换的技术。以上这些方法在复杂矿体模型的动态生成方面还存在一定的局限,如无法保证任何情况下建模结果拓扑结构的有效性,在矿体属性模型向几何结构模型转换及动态建模的效率方面还需要进一步完善和提高。

针对上述情况,提出了一种基于属性驱动的矿体动态建模方法,将研究重点转到了矿体的属性模型向几何结构模型的精确转换,避免了通常情况下矿体边界属性发生变化时,复杂矿体结构模型的重构问题。通过规则化网格及数据归一化方法求取三维块体属性模型的等值线,可精确构建矿体边界。同时,给出了初始矿体模型粗糙表面对象的高效光滑处理方法,实现了给定工业指标条件下矿体模型几何形态的三维可视化表达。

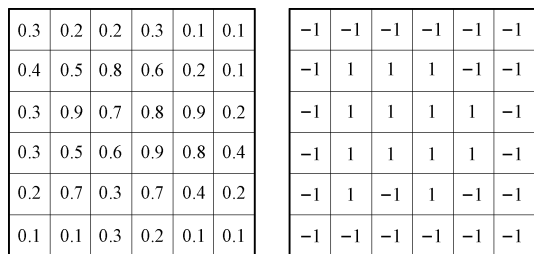
1 三维块体属性模型的等值线求取方法

实现矿体动态建模的关键是实现块体模型向矿体实体模型的精确转换,根据边界属性约束条件,将整体三维块体模型属性值进行归一化处理,提取出满足条件的块体模型,利用规则化网格求取等值线。

规则化网格单元与属性模型中块体节点完全重合,规则网格作为求取等值面的数据载体,从属性模

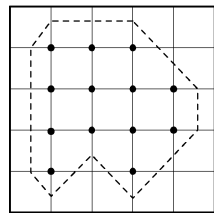
型中获取数据。数据归一化是针对属性分布不具有明显的连续性问题提出的解决方案,即对网格节点进行数据分区^[17]。按设定的边界属性值(M_c),将大于等于 M_c 的节点属性赋值为 1,小于 M_c 的节点赋值为 -1,将整个网格空间分为 1 和 -1 两个值域空间,进而求取值为 0 的等值线,即为所求的该剖面矿体轮廓线。属性模型是以中心点代表整个体素的属性的,而求取等值面法是以立方体的 8 个顶点作为数据参考进行处理的,因此,还必须对规则网格进行一次变形,即将规则网格向中心处缩小 1/2 单元格大小,即将原单元格的中心作为新规则网格单元格的顶点。

等值线提取过程如图 1 所示,先是规则化网格,接着以某一边界值(图 1 中以 0.5 为边界值)进行区间化,最终获得等值面模型。图 1(c)中黑点为满足条件的内部点,虚线为求取的等值线。



(a) 规则化网格

(b) 区间化结果



(c) 等值面模型

图 1 等值线提取过程

Fig. 1 Establishing process of contour line

2 基于矿体边界轮廓线的复杂表面模型建立

构建矿体三维可视化模型最基本的形式有 2 种:一是三角网在一个剖面内连接,二是三角网在不同的剖面间连接^[18]。基于三维块体属性模型求取的矿体边界轮廓线可看作是建立矿体表面模型的剖面,所以,可利用矿体边界轮廓线连接三角网,或在矿体边界轮廓线内部生成三角网来建立矿体几何模型。

2.1 基于线内长度等比法的轮廓线间三角网生成算法

基于线内长度等比法构建的三角网需要做如下

假设:

(1) 将线上的点按比例转换到同一个空间平面内,以减小轮廓线方向、形状、位置等的偏差。

(2) 轮廓线的总长为 100 cm,控制点的坐标按照步长与总长之比来分配,并且不考虑轮廓线的位置和形状。

(3) 以最近的控制点为基础建立三角网,分析拓扑关系,并以节点集合的实际坐标绘制连接后的网格,重构曲面模型。

相邻剖面轮廓线如图 2 所示,采用以上方法生成三角网时要对母线进行变换:从线 P 和线 Q 起始点 P_1 、 Q_1 开始,计算各点的步长值,步长值与线的总长相比得到比例值,这样就可以获得控制点的坐标^[18]。

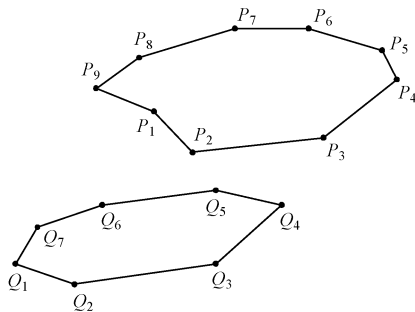


图 2 相邻剖面轮廓线

Fig. 2 Contour lines of adjacent sections

基于线内长度等比法的轮廓线间三角网连接过程如图 3 所示,有 2 条轮廓线 P 和 Q ,线 Q 上有 8 个控制点,需要从线 P 上的 10 个控制点中找到离其最近的点集,并连接成点对,最后形成 8 个集合。中间每一个集合都连接前一个集合的终点和下一个集合的起始点,中间的虚线连接点对,最后可得重构的三角网结构。所遵循的原则就是保证线 Q 上每个点都可在线 P 上找到最近的点形成点对,通过点对的真实坐标在空间中构建三角网。

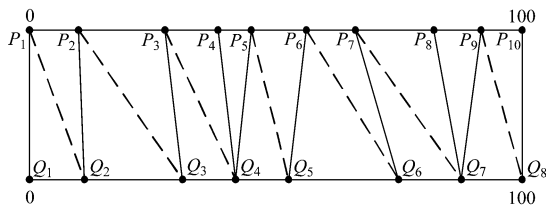


图 3 基于线内长度等比法的轮廓线间三角网连接过程

Fig. 3 Linking process of triangle mesh of contour lines based on method of proportion to the line length

2.2 复杂分支处理方法

由于相邻的剖面上有不相等的轮廓线,所以存在分支问题,需要对这些轮廓线进行处理,形成多条

过渡的轮廓线^[19]。

对分支问题的处理是将未分支轮廓线划分为多个区域,区域个数对应分支轮廓线个数。这样未分支轮廓线就和相应的区域对应起来,最后轮廓线之间就可以构建相应的三角网,如图 4 所示。但根据经验构造过渡线不够精确,需要多次修正才能使模型不断完善。通常采用线性插值中轴法来构建这种含有复杂分支的矿体表面模型,其过渡轮廓线构造流程如图 5 所示。

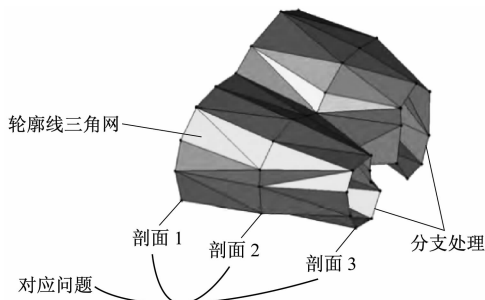


图 4 存在复杂分支的矿体表面模型

Fig. 4 Surface model of orebody with complex branches

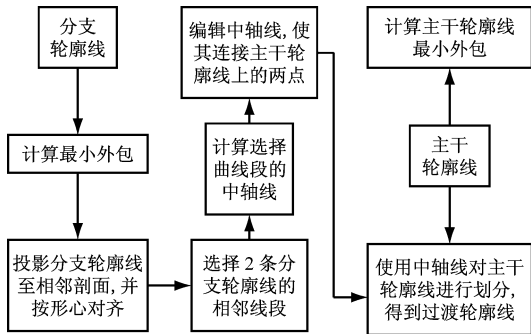


图 5 基于中轴法构造过渡轮廓线流程

Fig. 5 Flow of transition contour line constructed by central axis method

2.3 带约束条件的 Delaunay 三角网生成算法

封闭矿体两端轮廓线的表面建模主要采用带约束条件的 Delaunay 三角网生成算法,通过该算法可以完成三角网的自动连接^[20]。

2.3.1 分而治之的算法

采用分而治之的算法构建不带约束条件的 Delaunay 三角网,当在一个平面上的 N 个互不重合的点有数据集 V 时,按以下步骤建立三角网。

(1) 若坐标 $(X_i, Y_i) < (X_{i+1}, Y_{i+1})$,将 V 按升序排列,不等式成立的条件为 $X_i \leq X_{i+1}$,且 $Y_i < Y_{i+1}$ 。

(2) 将数据集 V 分为 V_L 和 V_R 两个部分, V_L 包含前半半的点, V_R 包含后半半的点,2 个部分大小相等。

(3) 同时建立 V_L 和 V_R 的三角网,并通过 Lawson LOP 完善建立的三角网。

(4) 分析 V_L 和 V_R 的凸闭包,得到这 2 个部分的公共切线,最后建立的三角网中也将包含这些公共切线。

(5) 以 V_L 和 V_R 的凸闭包下面的公共切线为起点,沿相邻边直到最上面的公共切线将 2 个三角网合并。倘若某一条相邻边的某个端点位于某一个三角形外接圆内,则需要删除此边,然后通过 Delaunay 法则选择正确的相邻边,避免在三角形的外接圆内还有相邻线的端点。

(6) 不断重复以上步骤,完成三角网的建立。

2.3.2 约束线段的插入

在建立无约束条件的 Delaunay 三角网后,就可以构建带约束条件的 Delaunay 三角网,约束线段的插入过程如图 6 所示。

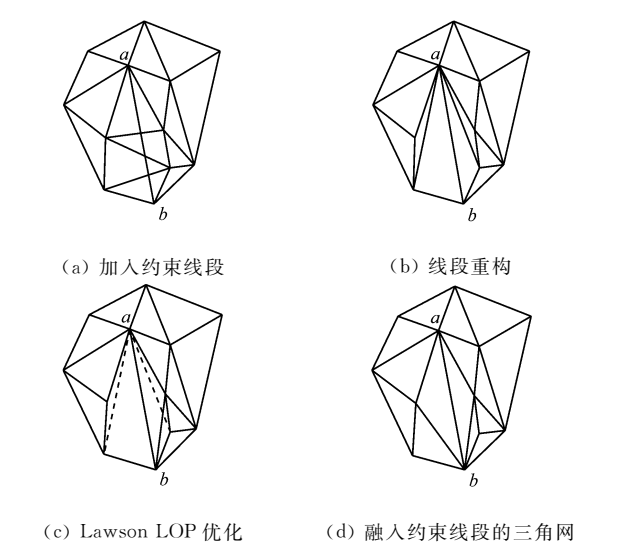


图 6 约束线段 ab 插入到已有 Delaunay 三角网的过程
Fig. 6 Process of the constraint segment ab inserted into the existing Delaunay triangulation network

(1) 将预先给定的约束线段加入到三角网中,找到边界与约束线段相交的三角形,若多个三角形中有公共边,就删除公共边,最后形成约束线段的影响多边形(图 6(a))。

(2) 连接约束线段起始节点和影响多边形的各顶点,如图 6(b)所示。

(3) 通过带约束条件的 Lawson LOP 优化与完善构建影响多边形的三角网,最终约束线段融入到三角网中(图 6(c)、(d))。

(4) 按照上述步骤插入约束线段,直到完成所有约束线段的插入。

3 初步矿体模型粗糙表面对象的光滑处理

由于用等值面轮廓线算法构建的矿体模型与实际模型相比存在一定的差距,表面起伏大,拟合效果差,所以,通过面模型光滑算法重构矿体模型,使矿体表面模型与实际更为符合,外观光滑,拟合程度高^[21]。

3.1 光滑算法的基本思想

(1) 用某一个平面对矿体进行切割,切割后得到的平面边界线是一条光滑的曲线。

(2) 用一个水平切割面 P 来切割矿体,得到 $P_{a1}, P_{a2}, P_{b1}, P_{b2}, P_{c1}, P_{c2}$ 等一系列截点,如图 7 所示。用一个垂直切割面来截剖矿体,如图 8 所示。在切割后获得的截面边界线中,一定存在一条同侧截点之间的光滑曲线是属于这条边界线的。在图 7 中可以看到,连接同侧截点 P_{a1}, P_{b1}, P_{c1} 的这条光滑曲线是在边界线上的,而连接 P_{a2}, P_{b2}, P_{c2} 的光滑曲线也是在边界线上的。

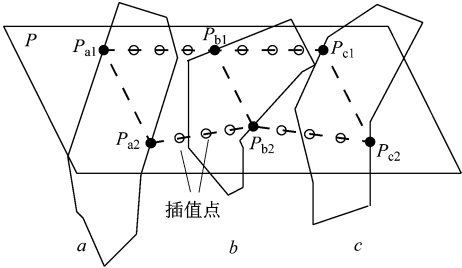


图 7 水平切割面
Fig. 7 Horizontal cut surface

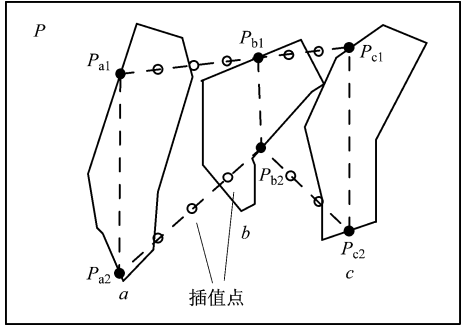


图 8 垂直切割面
Fig. 8 Vertical cut surface

(3) 对模型进行光滑处理需要遵循一定的规则。在截面边界线上包含有同侧截点的光滑曲线,通过在这条曲线上截取插值点就可以对矿体连接的三角面进行重构和完善。

(4) 一组水平切割面如图 9 所示,为了对整个矿体表面模型进行重构,需要获取到足够数量的插值点。通过一组平行的水平面和一组平行的垂直面

对矿体进行切割来获取轮廓线,这样就能在这些轮廓线中获得足够数量、广泛分布的插值点,最终完成对矿体表面模型的重构,使整个矿体表面模型光滑、美观。

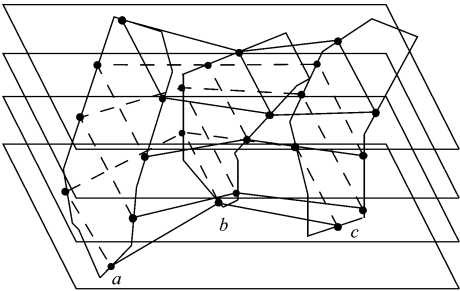


图 9 一组水平切剖面
Fig. 9 A set of horizontal cut surface

3.2 光滑算法的基本步骤

(1) 截点获取:通过一组水平面和一组垂直面的全方位立体切割,再经过分析计算得到一系列截点,这样就可以从中抽取有效的截点进行边界线的划分。

(2) 插值点获取:在一定规则下,通过这些有效的截点在截面边界线上生成光滑的曲线,再在光滑曲线上选取足够数量的插值点,为重构表面模型打下基础。

(3) 三角网重构:通过获得的插值点重新构建轮廓线,能够较好地模拟矿体表面模型,最后建立符合实际情况的、平顺光滑的矿体模型。

4 实例应用

根据上述理论方法,选取某煤矿实例数据,建立煤热量块体属性模型。先在研究区域内建立块体模型,每一个块体里面包含属性信息,块体属性模型通过已知属性数据对未知块体属性进行插值来建立。分别按 12 560.4,16 747.2,20 934 kJ 的煤热量边界属性值抽取块体模型,通过三维块体属性模型向矿体实体模型的转换,实现了基于属性驱动的矿体动态建模,如图 10 所示。

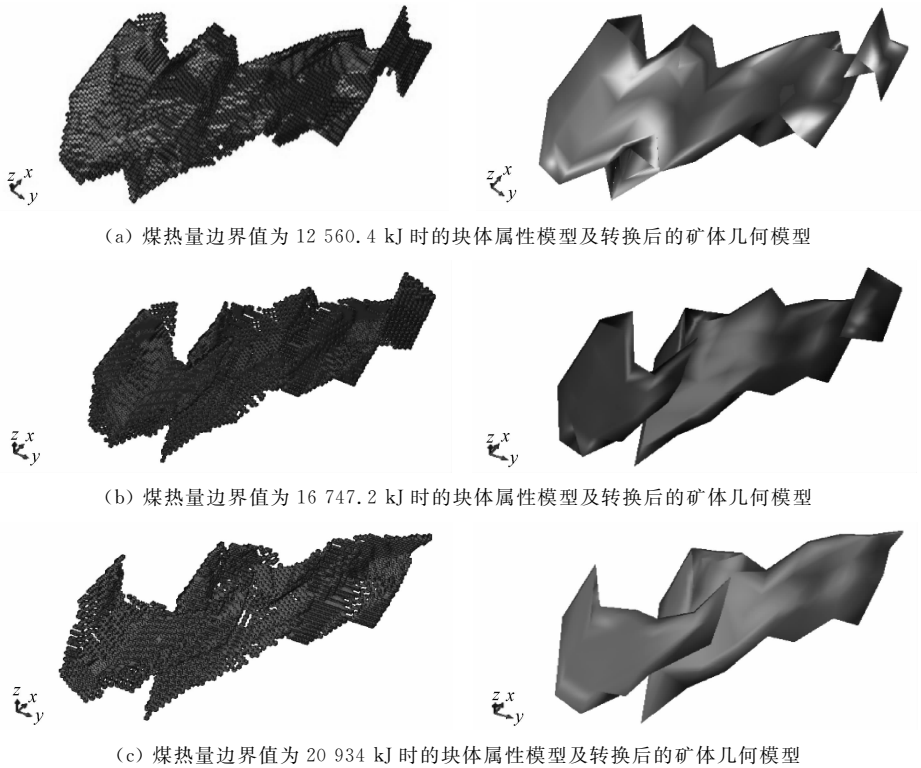


图 10 三维块体属性模型及转换后的矿体几何模型

Fig. 10 3D block property model and the transformed orebody geometry model

5 结论

(1) 针对矿体的动态性特点,提出了一种基于属性驱动的矿体动态建模方法,将研究重点转到了矿体的属性模型向几何结构模型的精确转换,解决

了通常情况下三维矿体模型动态构建时相对复杂的几何节点和拓扑结构动态调整问题,使得原本复杂的模型动态构建问题变得相对容易。

(2) 通过规则化网格及数据归一化方法求取三维块体属性模型的等值线,克服了传统算法直接求

取等值面时出现“絮状”、“空洞”等形态的缺点,实现了矿体边界的精确构建。

(3) 基于等值线连接形成的矿体表面模型,起伏比较剧烈,不光滑,为此,给出了一种面模型的光滑算法,通过插值法从光滑曲线上获得一系列插值点,借助这些插值点重新建立了平顺光滑的矿体表面模型。

(4) 基于特征面提取和曲面光滑算法提出了矿体属性模型向几何结构模型精确转换的方法,实现了在不同边界属性条件下动态提取、生成矿体的属性结构和几何结构。

参考文献(References):

- [1] MA X G, CARRANZA E J M, MEER F D V D, et al. Algorithms for multi-parameter constrained compositing of borehole assay intervals from economic aspects[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(7): 945-952.
- [2] 倪平泽, 刘修国, 李超岭, 等. 3D矿床建模技术在数字矿产勘查中的应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(3): 444-452.
NI Pingze, LIU Xiuguo, LI Chaoling, et al. 3D ore deposit modeling and application in digital mineral survey [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(3): 444-452.
- [3] 杨月平, 罗周全, 刘晓明, 等. 复杂矿床三维可视化建模与地质成图[J]. 矿冶工程, 2012, 32(3): 14-17.
YANG Yueping, LUO Zhouquan, LIU Xiaoming, et al. 3D visible modeling and geological mapping for complex deposit [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(3): 14-17.
- [4] 刘智宇, 肖克炎. 湖北樟村坪磷矿矿床三维地质建模及资源量估算[J]. 地质学刊, 2013, 37(4): 616-620.
LIU Zhiyu, XIAO Keyan. On 3D geological modeling and resources estimation for Zhangeunping phosphate deposit in Hubei[J]. Journal of Geology, 2013, 37(4): 616-620.
- [5] 吴健飞, 叶义成, 王其虎, 等. 某多层复杂矿床开采优化的三维地质建模[J]. 金属矿山, 2012(9): 124-128.
WU Jianfei, YE Yicheng, WANG Qihu, et al. Study on 3D geological modeling for mining optimization of a multilayer complex ore deposit[J]. Metal Mine, 2012(9): 124-128.
- [6] 龚国清, 刘修国, 倪平泽. 三维矿床建模技术在阿舍勒铜矿的应用[J]. 金属矿山, 2010(12): 120-122.
GONG Guoqing, LIU Xiuguo, NI Pingze. Application of 3D ore deposit modeling in Ashele copper deposit [J]. Metal Mine, 2010(12): 120-122.
- [7] 姜在炳. 煤层动态建模技术及应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 40-44.
JIANG Zaibing. Dynamic modelling technology of coal seam and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 40-44.
- [8] LEMON A M, JONES N L. Building solid models from borholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(5): 547-555.
- [9] 何珍文. 地质空间三维动态建模关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [10] CHIARUTTINI C, ROBERTO V, BUSOM. Spatial and temporal reasoning techniques in geological modeling[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23(3): 261-266.
- [11] WU L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 405-418.
- [12] ROBERTO V, CHIARUTTINI C. Modeling and reasoning techniques in geologic interpretation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1999, 29(5): 460-473.
- [13] PERRIN M, ZHU B, RAINAUD J. Knowledge-driven applications for geological modeling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(1-2): 89-104.
- [14] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 煤炭三维地质建模信息系统的研制及关键技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1117-1123.
LI Zhanglin, WU Chonglong, ZHANG Xialin, et al. Key technologies and development of a 3D coal geological modeling information system [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1117-1123.
- [15] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 基于三维块体模型的矿体动态构模方法[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(1): 60-63.
LI Zhanglin, WU Chonglong, ZHANG Xialin, et al. A dynamical 3D ore-body modeling method based on the block model [J]. Mining Research and Development, 2011, 31(1): 60-63.
- [16] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 带精细属性特征的矿体实体模型动态构建方法[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 990-994.
LI Zhanglin, WU Chonglong, ZHANG Xialin, et al. Dynamical constructing the solid model for an ore-body with refined attributes [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 990-994.

[17] 毕林. 数字采矿软件平台关键技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

[18] 杨成杰,吴冲龙,张夏林,等. 基于实体与块体混合模型的三维矿体可视化建模技术[J]. 煤炭学报,2012,37(4):553-558.
YANG Chengjie, WU Chonglong, ZHANG Xialin, et al. Modeling technology of 3D visualization orebody based on solid and block model[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):553-558.

[19] 荆永滨,刘晓明,毕林. 复杂矿床三维可视化建模关键技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3104-3110.
JING Yongbin,LIU Xiaoming,BI Lin. Key techniques for 3D visual modeling of complex mineral deposits [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(9):3104-3110.

[20] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.

[21] 王波. 基于三维地质模型的金属矿床动态储量计算技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2011.