文章编号:1005—6157(2011)02—0100—5

三维地质模拟在深部找矿勘探中的应用

周涛发,袁　峰,张明明,李晓晖,李修钰,贾　蔡

(合肥工业大学资源与环境工程学院,　安徽 合肥　230009)

摘　要:我国矿产资源形势严峻,使深部找矿勘探工作的重要性大大提高。三维地质模拟作为一种新型有效技术,利用立体建模的方式建立矿床三维模型,可定量定位地表达各种地质信息,有效地恢复矿区的深部与浅部的构造形态,这些地质信息共同存在于相同的三维空间中,受钻孔等直接信息数据的约束,更接近现实世界。本文论述了三维地质模拟在深部找矿工作中的广泛应用,包括深部矿床等地质体建模、综合分析、多种图件的自动绘制等,可为矿床储量估算、成矿规律总结、深部成矿预测和矿山生产等工作提供直观、快速的数据和技术支持。

关键词:三维地质模拟;资源预测;深部找矿勘探

中图分类号:P628.3　　**文献标志码**:A

0　引言

在我国经济快速发展阶段,矿产资源需求日益增加,消耗速度加快,过去已探明的矿产资源经过多年开采,形成了大批"危机矿山"(吕古贤等,2004;赵鹏大等,2004;王金亮等,2010),资源保障形势日趋严峻,必须加大矿产资源找寻。广泛利用新技术寻找深部隐伏矿床已成为当前找矿工作的重点(翟裕生等,2004;赵鹏大等,2004,2007;曹新志等,2009;王金亮等,2010)。将三维地质模拟技术应用于深部找矿勘探(杨晓坤等,2008; 龚元翔等,2007),可帮助地质人员更直观精确地重建深部各类地质对象的结构,分析各种地质现象之间的相互关系,了解地质体的三维空间分布形态,从而更有效地进行地质研究和找矿预测(Marcus,2006;Hardy,2000)。而以模型为基础进行的矿床地质图件自动绘制和快速方便的储量估算,也可直接为提交勘探报告服务,大大缩短勘探资料的整理时间,提高找矿勘探效率。

1　三维地质模拟技术的产生及作用

上世纪80年代的《矿床模型》(Cox,1986)一书总结了很多国家的大量矿床资料及矿床的描述性模型,提出了矿床综合资料的模型化表达,为矿床立体模型的研究提供了重要的参考依据,使深部地质体的可视化有了理论基础。近年来,三维地学表现方法在理论和实践上都取得了显著进展(肖克炎等,2004,2006),地学三维可视化技术的一些基本方法逐渐成熟,包括空间数据库的建立、三角网生成、三角网面模型构建、地质体边界的圈定和连接、储量计算以及采矿工程设计等。 随着科学技术的不断发展,特别是计算机图形学、人工智能、计算机网络技术、三维仿真技术的发展(Simon,1994),三维地质模拟技术也逐渐发展成熟,该技术是由勘探地质学、数学地质、地球物理、矿山测量、矿井地质、GIS、图形图像学、科学可视化等学科交叉而形成的一门新型学科(Simon,2000),自出现以来在地学领域即得到广泛应用(Su et al,2010; An et al,2010)。

深部找矿勘探需了解深部地质特征,但地质特征要素在三维空间中复杂多变,很难通过二维平面图件对其进行详细描述(吴健生等,2004),基于三维地质模拟可快速、形象地建立地质信息的三维模型,重现矿体的不规则边界和空间几何特征等地质信息,从而详细描述各种地质信息之间的相互联系和空间关系(曹代勇等,2001;芮小平等,2001)。本文论述的三维地质模拟技术在深部找矿勘探中的重要应用,涉及多种地质体的建模、地质图件的绘制及矿床储量的快速估算等。这一技术

收稿日期:2011-05-18

基金项目:本文得到"十一五"国家科技支撑计划项目(编号:2009BAB43B02),安徽省自然科学基金项目(编号:090415213),国家自然科学基金项目(批准号:40830426),国土资源部公益性行业科研专项项目(编号:201011047-07),国家"深部探测技术与实验研究专项计划"专题(编号:SinoProbe-03-02-05)、安徽省公益性地质工作项目(编号:2009-13,2007-1)和新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0324)资助。

作者简介:周涛发(1964-),男,安徽庐江人,教授,博导,现从事矿物学、岩石学、矿床学专业教学工作。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方法的成功应用，将大幅提高地质工作者的工作效率，节约在制图、地质资料应用和管理过程中的大量精力和时间消耗，可使找矿勘探的全过程在真三维环境中可视、可跟踪，从而将降低资源勘查过程的风险，产生巨大的经济效益和社会效益，同时，更可以将众多地质问题从二维平面上升至三维立体的高度进行更为透彻的研究，有效指导找矿勘探和矿业生产，从而实现传统地质工作向现代地质工作的飞跃。

2　地质体建模方法

矿床的三维地质模拟可通过模拟对象的形态特点分为钻孔的三维模拟、层状地质体的三维模拟和地质实体的三维模拟等，其中，层状地质体的三维模拟又可根据具体要求分为断层、地表等的三维模拟，地质实体的三维模拟又可分为地层、岩浆岩、矿体、脉岩、夹石的三维地质模拟等。

2.1 钻孔的三维模拟

钻孔的三维模拟旨在三维空间中提供一套惟一的坐标参考，需在钻孔数据库的基础上建立并显示，这也是进行矿床储量估算的依据。钻孔数据库至少需包含四张强制表的内容，其中井口表需包含钻孔编号、北坐标、东坐标、高程、终孔深度、轨迹类型、勘探线号等字段，测斜表需包含钻孔编号、方位角、倾角等字段，样品表需包含钻孔编号、样号、开始深度、结束深度、样长、品位信息、样柱等字段，岩性分层表需包含钻孔编号、开始深度、结束深度、层厚、岩性等字段，这些表格通过公共的钻孔编号字段进行连接，同时为出图等实际需要，还可增加其他字段。

将所有钻孔数据按照标准格式整理入库后，即可建立钻孔的三维模型，各钻孔根据数据库可设置显示岩性及分层等信息。

2.2 地层、岩浆岩的三维模拟

地层、岩浆岩模型可通过实体建模实现（图1）。实体模型具有完整的实体拓扑结构和几何信息，对比起其他模型具有许多的优点，如能自动进行边界检测，不会出现裂缝或其他不完整信息，能进行多种属性的计算，如体积、面积、重心等，能进行自动进行结构分析，如有限元分析等等（赵宏坚和周翠英，2010）。

2.3 断层的三维模拟

断层模型对于地质勘探、生产和科学研究都具有重要意义。由于断层需结合地质工程师剖面解译的成果，因此为了能够跟准确地表达断层的延伸方向、空间位置等信息，本文采用经过矢量化空间配准转换的断层线串对断层模型进行建模。需要注明的是：由于部分断层未在勘探线地质剖面图中体现，只能从区域地质图中获取其平面延伸范围，从而无法获取地表下的延展方向，因此为了表达断层的存在，本文采用垂直断面的方法对其进行建模，结果如图2所示。

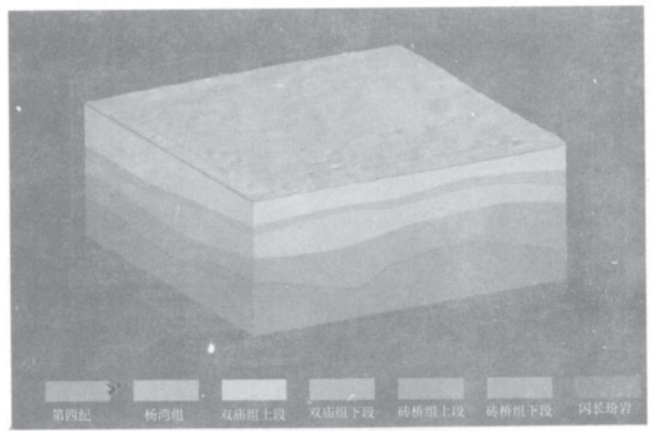


图1　地层、岩浆岩的三维模拟
Fig.1 3D simulation of stratigraphy and igneous rocks

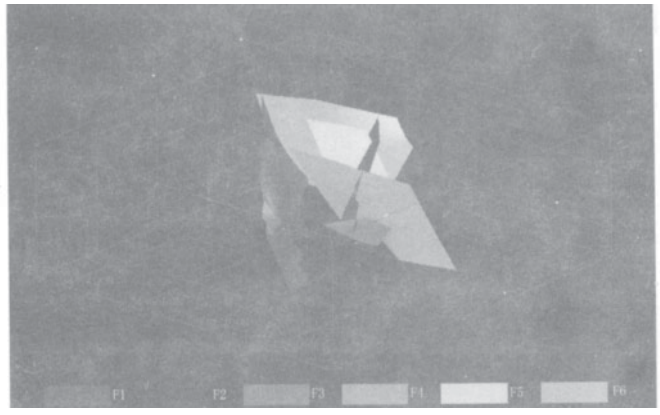


图2　断层的三维模拟
Fig.2 3D simulation of a fault

2.4 矿体的三维模拟

矿体模型的构建可以准确的掌握矿体的几何空间形态，分析矿体的产出位置，并可以通过矿体模型获取空间任意位置的矿体剖面信息。更为重要的是，矿体模型可以为后期的储量计算提供重要依据，约束估值的空间范围，从而准确计算出矿体的体积、吨位、品位和储量。

矿体模型是一个封闭的具有体积属性的三维模型。矿体形态复杂多样，一般通过将各个剖面的矿体解译线相连的方法来构建。理想情况下，相邻剖面之间的矿体几何形态上相似，通过Surpac软件即可自动将其连接并构建实体。然而矿体的空间赋存形

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

态常很不规则，剖面间的解译线段常会出现分叉合并，边缘具有锯齿状边角，同时矿体可能受到脉岩或断层影响，所以建立矿体模型不仅需要地质工作者耐心的解读，还需要灵活运用三维面的连接方式和技巧。

通常情况下，矿体模型的建立需要通过以下三个步骤：(1)在三维环境下，根据钻孔实际空间位置，对各个剖面的各个矿体的边界进行精准解译；(2)对任一矿体，将各个剖面的解译线段相连成实体；(3)实体有效性检验，对于建立好的实体模型进行检查修正。

某矿体模型如图3所示。

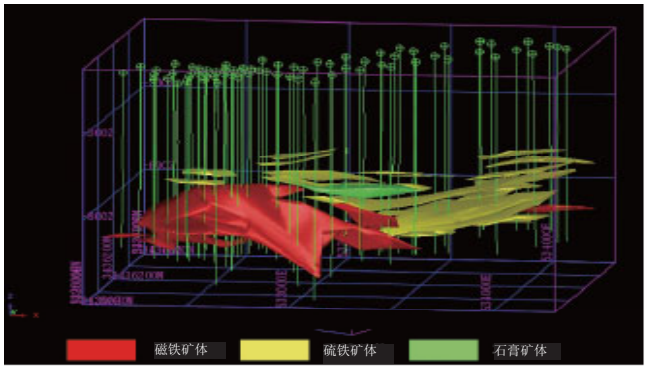


图3 矿体及钻孔的三维模拟
Fig.3 3D simulation of an ore body and a borehole

2.5 蚀变的三维模拟

蚀变模型的建立对成矿规律的总结有重要的意义，对深部找矿工作的进一步进行具有指示作用。图4将蚀变带与矿体的空间分布进行对比，可清楚显

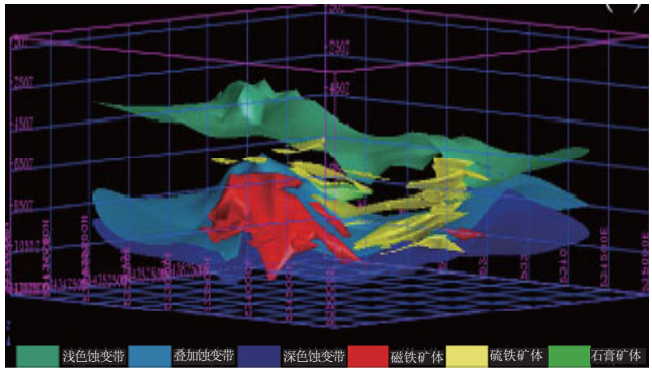


图4 蚀变界限三维模拟与矿体对比分析
Fig. 4 Comparing analysis of alteration bound 3D simulation and ore body

示某铁矿床磁铁矿体蕴含在深色蚀变带内，黄铁矿主要发育在浅色蚀变带内。

2.6 地质体的综合分析

单个地质体三维模拟很难进行地质研究，分析成矿规律和进行成矿预测。因此，需将两个或两个以上地质体进行综合对比分析，得出其空间分布的相关关系。三维地质模拟可以根据需要，将多个地质体进行各种形式的现实对比，用可视化的方法迅速、简便地进行成矿规律的找寻，大大节约了地质工作者阅读二维图件后进行立体想象的时间和精力。图5举例说明了已知矿体和地层、磁异常在三维空间中的对比关系分析，从图上可以看出，该矿床矿体主要位于闪长玢岩岩体内部或与地层接触带附近(图5a，图5b，图5c)，与磁异常有明显的对应关系(图5d)。

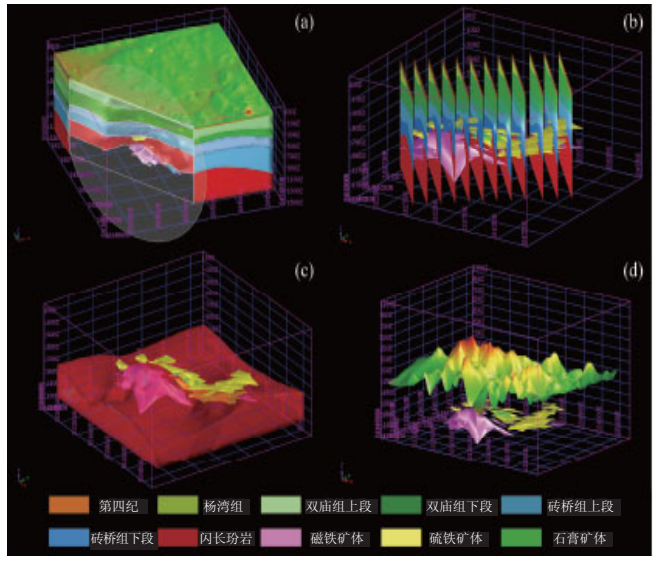


图5 各地质体空间关系对比分析
Fig. 5 Comparing analysis of spatial relations between geological bodies
(a)地层、岩浆岩与矿体关系切角示意图；(b)地层、岩浆切片与矿体关系示意图；(c)岩浆岩与矿体空间分布对比关系图；(d)磁异常与矿体空间分布对比关系图

3 图件的自动绘制

3.1 控制性剖面图的绘制

控制性剖面图的绘制过程完全参照地质工程师对各种地质要素(矿体、脉岩、夹石、地层、断层等)的解译结果，绘制流程如图6所示。

由于在绘制控制性剖面图之前，需要根据地质工程师确定的解译结果在Surpac软件真三维空间里予以再现，从而使所有的地质要素都具有固定的空间坐标及属性。因此，相比于传统的绘制过程，通过Surpac软件绘制的控制性剖面图精度更高，数据集成度也更强。

为了弥补Surpac软件同国内标准之间的差异，更好地满足国内地质勘查制图的规范和标准，在控制性剖面图自动绘制结束后，需要对各幅地质剖面图进行修饰和完善，最终绘制得到符合勘探规范要求

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的控制性剖面图。

3.2 其他图件的绘制

室内整理及成果提交的综合图件，如地质平面图、中段平面图、预测系列图件等均按照3.1中的自动制图的方法进行。在三维空间中给出相应截面，

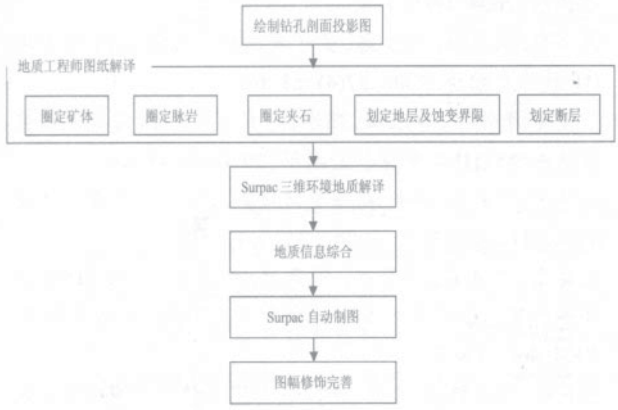


图6 控制性剖面图绘制流程

Fig. 6 Flow chart for drawing of a controlling profile

直接对三维地质体进行切片，获取切面上的信息，再进行后期修饰以符合国内标准。其中中段平面切片过程如图7所示。

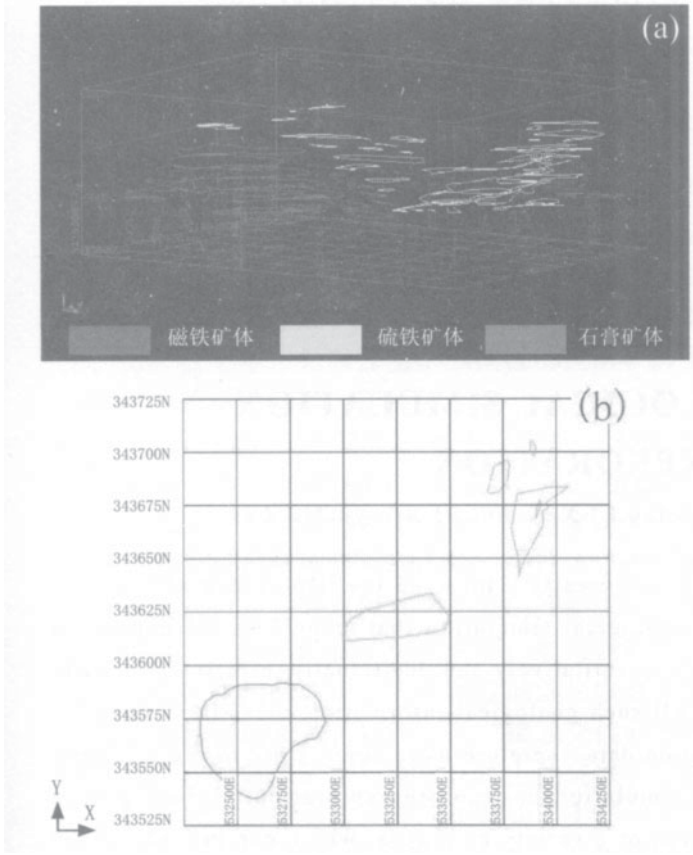


图7 中段平面自动制图过程示意图

Fig.7 Sketch showing the process of automatic generation of a midplane

(a)深度等距中段切片示意图；(b)中段平面自动成图

4 储量估算

矿床的资源/储量估算是在已建立的矿体实体模型的基础上，对样品进行统计分析（图8），根据实体模型可划分一定长、宽、高的“块”，再对矿体内部的各个“块”进行估值得到的。

为了使各矿体的储量计算结果可以依据各种地质可靠程度进行分类统计，可根据地质工程师确定的地质可靠程度范围，以铅垂面的方式在三维空间中分别建立各矿体不同可靠性块段的块体约束模型，在对各个矿体内部的块模型估值结束后，只要通过与矿体约束模型进行“与”运算即可以得到各地质可靠程度范围内的储量。

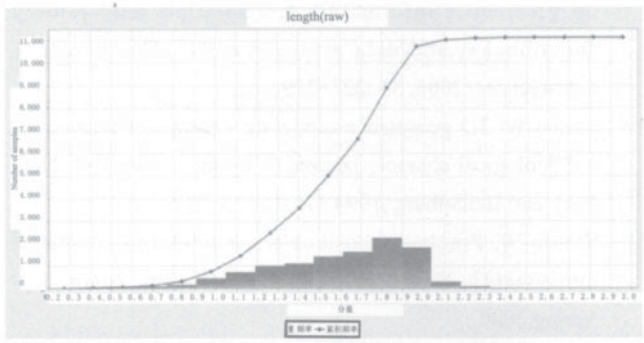


图8 样品统计分析

Fig. 8 Statistic analysis of samples

5 结论

我国在找矿勘探工作中已积累了大量的实践经验，三维地质模拟技术的发展又推动了深部找矿勘探工作在真三维空间中的综合表达，这种高效快速的矿床建模技术在很大程度上提高了地质工程师的工作效率，使其对勘查区的地质综合资料有了更深入的理解。本文阐述的三维地质模拟技术方法，已成功运用于长江中下游的多个金属矿床的深部找矿勘探工作中，并取得了明显效果，大大提高了深部找矿勘探的效率，缩短了提交勘探报告的时间，并为地质人员的进一步工作提供了数字化、可视化、智能化的辅助工具、良好的数据分析和处理方法，同时也为下一步的矿山开采设计、矿床经济评价提供精确的数字模型，为深部找矿、勘探和矿床开采提供了新的科学方法和强大的技术支持。

致谢：撰写此文庆贺常印佛院士80华诞，衷心感谢常院士的长期指导和关怀！本项研究工作还得到唐永成、李建设、高道明、吕庆田、吴明安等专家的大力指导和支持，野外工作得到安徽省地质调查院、五矿勘查开发有限公司、华东冶金勘察设计院马鞍山综合地质大队等单位的支持和帮助，在此一并致以

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

衷心的感谢!

参考文献:

[1] An Congrong, Liu Zhan, Bai Yongliang, et al.Research on the key technologies of three-dimensional stratum modeling[J].2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010),2010:354~357.

[2] Cox D P. Singer D A.,Mineral deposit model[M].Geological Survey Bulletin 1693, 1986:7~9.

[3] Hardy Pundt,Klaus Brinkkotter-Runde.Visualization of spatial data for field based GIS[J].Computers & Geosciences, 2000, 26 :51~56.

[4] Marcus Apel.From 3d geomodelling systems towards 3d geoscience information systems:Data model,query functionality,and data management[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32 :222~229.

[5] Simon W. 3D geoscience modeling - computer techniques for geological characterization[J]. Springer - Verlag , New York and Heidelburg ,1994,31(01):135~137.

[6] Simon W. Practical geostatistics, modeling and spatial analysis[J]. New York and Heidelburg ,Springer - Verlag,2000.

[7] Su Xing,Huang Linping. Research of 3D Geological Body Modeling Methods Based on TEN[J].2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS),2010:4.

[8] 曹代勇, 李青元, 朱小弟, 等. 地质构造三维可视化模型探讨[J] . 地质与勘探,2001, 37 (4) :60~62.

[9] 曹新志,张旺生,孙华山.我国深部找矿研究进展综述[J].地质科技情报,2009,28(2):104~108.

[10] 龚元翔,王李管,贾明涛,曾庆田,尚晓明,宋明军.金川矿区复杂地质体三维可视化建模技术研究[J].中国矿山工程,2007,36(6):8~11.

[11] 李仲学,李翠平.矿床仿真及体视化技术[J]. 计算机仿真,2000,17(5):6~8.

[12] 吕古贤,郑大瑜.资源型危机矿山的概念与分类[J].地质找矿论从, 2004, 19(1):1~4.

[13] 芮小平, 余志伟, 许友志. 关于构建矿山三维 GIS 的思考[J] .地质与勘探. 2001, 37(4) :63~67.

[14] 王金亮,李俊平,李永峰,郑洪涛. 危机矿山深部找矿研究现状与建议[J].矿产保护与利用,2010,(2):45~49.

[15] 吴慧欣,卢才武,乔长录.基于离散算法的三维建模技术及其应用[J]. 金属矿山,2004,(342):47~50.

[16] 吴健生, 朱谷昌, 曾新平, 张普斌, 和志军. 三维GIS技术在固体矿产勘探和开发中的研究与应用[J]. 地质与勘探,2004, 40(1):68~72.

[17] 肖克炎,李景朝,陈郑辉. 中国铜矿床品位吨位模型[J] . 地质评论,2004 ,50 (1) :50~56.

[18] 肖克炎,丁建华,刘锐. 美国"三步式"固体矿产资源潜力评价方法评述[J], 地质论评,2006,(06): 793~798.

[19] 杨晓坤,秦德先,冯美丽,胡志军,伍伟,刘晓玮.基于 Surpac 的矿山三维地学模型及综合信息成矿预测研究[J].地质与资源,2008,17(1):61~64.

[20] 翟裕生,邓军,王建平, 彭润民,刘家军,杨立强.深部找矿研究问题[J].矿床地质,2004, 23(2):142~149.

[21] 赵宏坚, 周翠英. 基于实体建模的三维地层构造[J]. 岩土力学, 2010, 1(4) :1257~1264.

[22] 赵鹏大,张寿庭,陈建平.危机矿山可接替资源预测评价若干问题探讨[J].成都理工大学学报(自然科学版).2004,31(2): 111~117.

[23] 赵鹏大.成矿定量预测与深部找矿[J].地学前缘,2007,14(5):142~149.

APPLICATON OF 3D GEOLOGICAL SIMULATION IN DEEP ORE EXPLORATION

ZHOU Tao-fa, YUAN Feng,ZHANG Ming-ming,LI Xiao-hui,LI Xiu-yu,JIA Cai

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract:Grim situation in the sector of mineral resources has greatly reinforced the importance of deep ore exploration in China. As a new effective technology, 3D geological simulation that models an ore deposit in three dimensions can express various geological information quantitatively and positionally, effectively rebuild structural form of a mine at both deep and shallow level. All such geological information coexists in same 3D space and is confined by borehole and other direct information data, therefore more being close to the actuality. This paper described wide applications of 3D geological simulation in deep ore exploration, including deep ore body modeling, integrated analysis, automatic generation of a variety of graphs, which can provide visual and quick data and technique in support of ore deposit reserve estimate, metallogenic law summarization, deep metallogenic prognosis and mine production.

Key words: 3D geological simulation; resource prognosis; deep ore prospecting

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net