复杂脉状矿体精细化三维建模方法探讨

李宏达[1,2]，吴志春[1*]，柏瑞[2]，董冲[2]，马粉玲[1]，李华亮[1]，贾飞[2]，李斌[1]，祝一丹[1]

1. 东华理工大学地球科学学院，南昌 330013；
2. 山东黄金地质矿产勘查有限公司，山东 莱州 261400

第一作者，E-mail：352436386@qq.com

* 通信作者，E-mail：563970964@qq.com

2024-02-05 收稿；2024-03-09 修回；2024-04-07 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41802247; 42472130)；江西省自然科学基金项目(20242BAB25183; 20212BAB211001)；核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(2022NRE14)；江西省博士后择优资助项目(2021KY52)；云南省地球系统科学重点实验室开放课题(ESS2021005)

中图分类号：TD163　　文章编号：2096-8523(2025)04-0379-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240050

摘　要：利用三维建模技术模拟地质体的三维形态，能够有效揭示地质体的空间分布特征。与隐式建模方法相比较，显式建模方法在小尺度的地质结构特征上刻画更加精准，然而对于形态复杂脉状矿体等地质体的大比例尺精细化三维建模，还存在建模速度慢、难度大、精度偏低等问题亟待解决。针对部分复杂脉状矿体，综合运用加密约束点、构建矿体劈分线、分段式建模、矿体缝合等技术，系统开展了分枝分岔复合矿体、存在无矿天窗矿体、含夹石矿体、断层切穿矿体 4 种复杂脉状矿体的显式三维建模方法研究，实现了复杂脉状矿体的高精度快速三维建模，对稀有、贵金属等复杂脉状矿体的精细化三维建模、矿产资源量估算、矿产资源开发利用方案制定等具有重要意义。

关键词：三维地质建模；复杂脉状矿体；精细化三维建模；显式建模方法

利用三维地质建模技术模拟地质体的表面构造和内部物性特征，为揭示地质资源的空间分布，进行资源量估算和资源开发等方面提供可靠依据，是“玻璃地球”建设的核心技术，也是地质时空大数据的重要载体[1-5]。三维建模技术在勘查过程中有力地推进了地质勘查“信息化、数字化、智能化”三化转变。目前，我国地质部门及矿山企业积极推进实施智慧矿山和数字勘查项目建设。其中，重点勘查项目和重要成矿带大型矿山已基本实现了三维可视化地质信息交互平台的搭建，通过融合地质、物探、化探、遥感等多源数据构建三维地质模型，对于矿区深、边部寻找隐伏矿体具有重要意义[6-9]。

20 世纪 90 年代至今，三维地质建模技术得到快速发展。在近十余年，研究人员提出了许多不同的建模方法，但对于复杂矿体精细化建模，依然存在诸多问题[10-14]。按照建模过程及数学原理分类，建模方法可分为显式建模方法和隐式建模方法[15-18]。在矿体显式建模方面，张宝一等[19]利用钻孔数据采用轮廓线重构技术成功构建了分岔矿体，该方法需要先逐条线段相连生成矿体界线，再通过对矿体界线相连构建三角网，操作较繁琐，建模效率低。邰文星等[20]采用“基于矿体增量模拟的三维建模”技术，通过对矿体上下边界线高程差的增量模拟，生成了新的拟合矿体边界面，确保上下边界面不会相交，在超薄型矿体的三维建模上效果较好。也有一些学者探索矿体隐式建模方法，如：王权等[21]采用模糊匹配算法，基于最大相似度匹配轮廓线层间形态插值的三维隐式建模方法，在数据稀疏情况下，不仅能够反映矿体轮廓线的层间局部起伏，还能避免由于层间信息缺失而导致的隐式建模不连续的现象。扶金铭

著录信息：李宏达，吴志春，柏瑞，等. 复杂脉状矿体精细化三维建模方法探讨 [J]. 地质科技通报，2025，44(4)：379-390.
LI Hongda, WU Zhichun, BAI Rui, et al. Discussion on fine 3D modeling method of complex vein-type ore body[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 379-390.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

等[22] 提出了基于 Stacking 集成策略的径向基曲面复杂矿体隐式建模方法，该方法能够有效利用矿体轮廓线的属性和几何特征，高效地建立三维复杂矿体模型，同时可减少人工交互操作。但是，当矿体存在分枝、断层切割等现象时，隐式建模难以精准构建。因此上述建模方法解决了一部分矿体三维建模存在的问题，但关于复杂脉状矿体的建模仍存在建模精度低、模型形态表达效果差等问题，难以满足目前矿山生产、资源量估算的需求。

与隐式建模方法相比，显式建模方法在刻画大比例尺精细地质体方面，不仅可以提高地质模型的精度和准确性，而且可以揭示更小尺度的地质结构和特征。对于稀有、贵金属等脉状矿体，其三维建模精度要求高[23-26]，脉状矿体局部常存在分枝分岔复合、无矿天窗、含夹石、断层切割等一系列复杂地质现象，使其建模难度增大、效率降低[27-29]。为了解决形态复杂脉状矿体建模难、速度慢、精度偏低等问题，笔者对分枝分岔复合矿体、存在无矿天窗矿体、含夹石矿体、断层切割矿体 4 种常见复杂脉状矿体的三维建模方法进行系统研究，基于实测数据的显式建模方法，构建复杂脉状矿体三维模型，不但可以获得细致的矿体三维信息，而且还能快速准确地掌握矿体分布规律，从而更好地指导勘查找矿工作[30-33]。

1　脉状矿体建模流程

选用澳大利亚 MAPTEK 公司研发的 Vulcan 软件进行矿体模型构建。该软件具有三维地质建模、资源量估算、岩土力学模拟、矿山开发设计等功能，目前广泛应用于矿山、地质勘查等相关单位。在三维建模之前，系统收集探矿工程数据，利用单个勘探线剖面中的探矿工程数据圈定矿体边界线，运用轮廓线重构方法在三维空间中依次缝合相邻勘探线剖面中的矿体边界线，从而构建出矿体三维地质模型。脉状矿体三维建模流程如图 1 所示。

1.1　原始数据处理

创建数据库之前需要从探矿工程数据资料中提取有用信息，分别创建工程信息表(COLLAR).CSV、工程测斜表(SURVEY).CSV、工程岩性表(GEOLOGY).CSV 和工程样品表(ASSAY).CSV(表 1)。将相应的地质信息录入表格用于定义矿层位置，方便后续在三维空间内圈定矿体边界线。

1.2　创建数据库

探矿工程数据录入，输入相应表格文件，建立矿区数据库。导入文件后进行逻辑错误检查，确保地质信息不存在重复、交叉、叠层等人为输入错误。避免在后续三维建模过程中，存在矿体圈定错误和矿块估值不准确等问题。

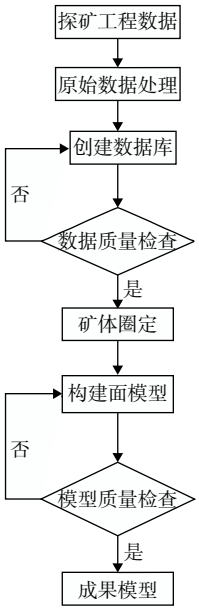


图 1　脉状矿体三维建模流程

Fig. 1　3D modeling process of vein-type ore body

表 1　探矿工程数据结构表

Table 1　Data structure table of prospecting engineering

表格名称	表头名称
工程信息表（COLLAR）.CSV	工程名称、工程坐标*X*-*Y*、高程、工程深度
工程测斜表（SURVEY）.CSV	工程名称、测斜深度、方位、倾角
工程岩性表（GEOLOGY）.CSV	工程名称、样品号、工程分层米数、分层厚度
工程样品表（ASSAY）.CSV	工程名称、样品号、取样回次、取样米数及样品结果

数据错误检查主要包括钻孔坐标验证、工程测斜检查、沿记录检查、单个字段检查等内容。所有检查内容可以同时选择和执行。数据库检查过程中遇到的所有错误都将会输出到错误报告文件中。该报告文件详细列出了每个错误的工程名称、失败的检查项目及所包含错误表格名称与字段内容，同时并列出导致错误的异常数据。

1.3　矿体圈定

建模数据库中，通过探矿工程数据的录入，在勘探线剖面中圈定矿体形态。沿矿体走向，分别在勘探线剖面中圈定矿体边界范围(图 2)，确定矿体的形状、大小、位置、方向，并利用不同勘探线剖面中的

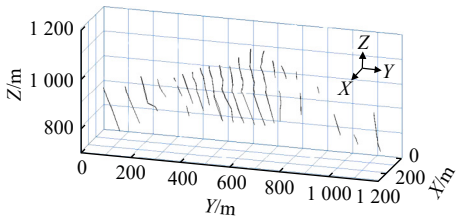


图 2　矿体边界线

Fig. 2　Ore body boundary line

矿体边界线构建矿体三维地质模型。

1.4　构建面模型

在三维可视化环境下，将矿体边界线旋转至合适的观察角度，通过缝合相邻勘探线剖面中的矿体边界线，构建矿体面模型(图 3)。当矿体形态相对简单时，可采用人机交互自动化缝合的方式，构建脉状矿体三维面模型。当矿体三维形态较为复杂时，如分枝分岔复合矿体，建模过程中需要采用局部加密约束点的方法，进行矿体形态约束，进而完成分岔矿体形态向复合矿体形态的构建；当存在无矿天窗矿体时，需要围绕无矿天窗依次构建矿体界面，即矿体的顶面和底面，再进行缝合组成矿体面模型，这样构建的模型更加精准且符合地质规律[34-37]。

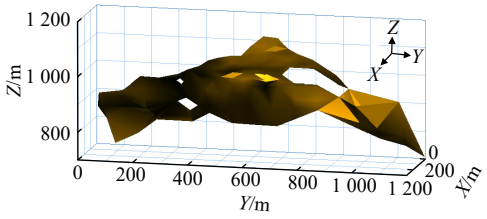


图 3　矿体面模型

Fig. 3　Ore body surface model

构建矿体面模型之后，需要对模型进行封闭性、一致性、自相交等检查，查看矿体缝合部位是否存在问题，如果有问题则对模型进行修改；如果没有问题，则矿体面模型构建完成。

2　简单脉状矿体建模方法

简单脉状矿体三维形态单一。从联合地质剖面来看(图 4a)，矿体由 1 组矿脉组成，受构造控矿相对稳定，矿脉结构变化较为统一。根据收集的探矿工程数据，在勘探线剖面中圈定脉状矿体边界线，沿矿体走向依次缝合相邻边界线，构建矿体面模型[38]。简单脉状矿体建模方法具体如下：(1)圈定勘探线剖面中矿体边界线；(2)构建矿体外推尖灭线；(3)构建矿体面模型。

2.1　圈定勘探线剖面中矿体边界线

在勘探线剖面中，根据探矿工程揭露见矿信息及分布规律，按照矿体边界品位数据，确定见矿工程的对应位置。在见矿工程中心点沿倾向两端做尖灭线外推处理，尖灭点遵循无限外推原则。外推距离按照勘查工程间距确定，外推方位和倾角则依据相邻见矿工程中心点连线的倾向趋势，构建矿体边界线尖灭点，连接矿体倾向两端尖灭点及见矿工程形态约束点圈定矿体边界线。

2.2　构建矿体外推尖灭线

基于已知矿体边界范围，通过外推的方法确定

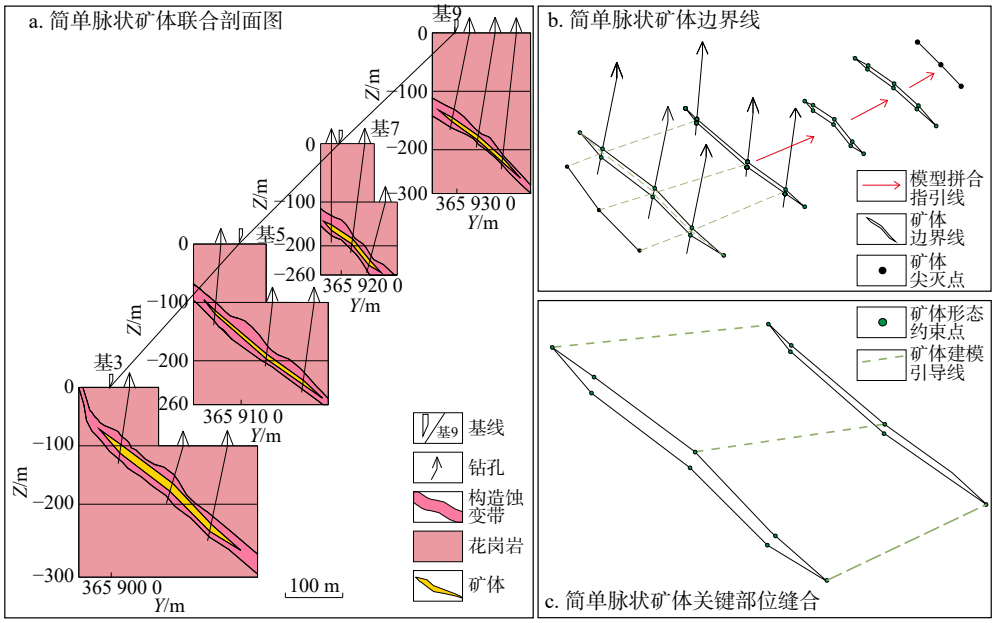


图 4　简单脉状矿体建模方法流程示意图

Fig. 4　Modeling method flow diagram of simple vein-type ore bodies

矿体延伸方向和距离。矿体外推分为尖推、平推 2 种类型。尖推是矿体沿走向逐渐减小，直至尖灭。平推是保持矿体大小不变，以矿体边界线的形状沿走向按一定距离外推。平推时，矿体三维模型的构建相对简单，本研究主要阐述矿体尖推时的构建方法。

沿矿体走向取边界 2 个相邻见矿工程中心点连线趋势，向无工程控制处无限外推构建矿体尖灭点，相邻尖灭点连线构建矿体尖灭边界。矿体尖灭点的外推距离、倾向、倾角的确定，与上述构建矿体边界线尖灭点类似。不同之处在于矿体尖灭点的倾向及倾角是沿矿体走向上相邻见矿工程中心点连线的趋势确定(图 4b)。

2.3　构建矿体面模型

沿矿体走向依次缝合矿体边界线(含矿体走向尖灭线)构建矿体面模型(图 4c)。矿体面模型完成之后，对矿体模型的封闭性、一致性、自相交等进行检查，无错误后则完成矿体面模型的构建(图 5)。

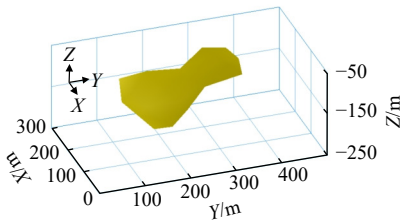


图 5　简单脉状矿体三维模型

Fig. 5　3D model of simple vein-type ore bodies

3　复杂脉状矿体建模方法

复杂脉状矿体主要有分枝分岔复合矿体、存在无矿天窗矿体、含夹石矿体、断层切割矿体 4 种常见类型[39-41]。这 4 种复杂脉状矿体的建模方法不同，下文分别对其进行详细介绍。

3.1　分枝分岔复合矿体

分枝分岔复合矿体形态较为复杂，局部呈膨胀状，部分矿体沿薄弱面裂隙侵入，形成分枝分岔状(图 6a)。分枝分岔复合矿体的建模难点在于如何精细呈现出矿体的分枝、分岔等特征。建模过程中需要运用加密约束点、构建矿体劈分线等方法，完成矿体分枝分岔复合部位的缝合。分枝分岔复合矿体建模方法具体如以下 4 步：

(1)圈定分枝分岔复合矿体边界线　在勘探线剖面中圈定矿体边界线时，需研究勘查区内地质构造背景，判断分枝分岔矿体岩石类型、矿体轴夹角等地质因素。确定分枝分岔矿体是否为厚大矿体在倾向、走向上的延伸，避免人为圈连过程中扩大矿体形态。

分枝矿体边界线圈连过程中，通常遵循以下原则圈定(图 6b)：剖面中若见矿工程 A 在矿体厚大部位沿倾向连接分枝矿体 B 时，若 A 的矿体厚度大于 B 矿体和夹石厚度，则进行分枝连接，反之按不同矿体进行圈定。

圈定分枝分岔复合矿体边界线时(图 6c)，分枝矿体边界线圈定相对困难。在分枝矿体剖面中，中间探矿工程(矿体厚大部位)取见矿中心点沿矿体倾向，至 2 分枝矿体见矿工程中心点连线的中点。根据 2 点的连线趋势，确定矿体分枝尖灭点的倾角及倾向。对 2 点实际距离做 1/2 尖推处理，确定矿体分枝尖灭距离，依次连接矿体形态约束点(含矿体边界线尖灭点)，圈定分枝矿体边界线。分岔、复合矿体边界线与简单脉状矿体边界线圈定方法相同。

(2)构建矿体形态约束点、劈分线，缝合复杂模型　矿体形态约束点、劈分线是复合矿体形态向分枝矿体形态、分枝矿体形态向分岔矿体形态建模时构建的特殊点、线。约束点一般位于矿体的见矿中心及矿体轮廓部位，模型复杂部位需添加约束点，完成矿体形态的约束。劈分线是矿体边界线倾向两端尖灭点及见矿工程中心点的连接线，主要用于复杂脉状矿体劈分，劈分后根据区域地质规律对分枝分岔复合矿体进行分段式建模。例如：分枝矿体向分岔矿体建模时，在分枝矿体的见矿工程中心点、矿体边界线倾向两端尖灭点及矿体分枝尖灭部位构建约束点，约束点连线则劈分分枝矿体。按照一般地质规律，上部劈分矿体缝合上部分岔矿体，下部劈分矿体缝合下部分岔矿体，完成矿体局部建模。分岔矿体向复合矿体缝合原理也相同，只需对复合矿体做劈分处理即可快速完成矿体的建模(图 6d)。

(3)构建关键复杂部位矿体形态　由于脉状矿体局部膨胀和收缩，使得构建矿体三维形态复杂。在矿体分岔复合建模过程中，脉状矿体分岔复合部位狭窄，2 个分岔矿体复合时，存在其中 1 个分岔矿体无法复合现象(图 7a)。为了构建分岔矿体向复合矿体模型的真实形态，采用局部加密约束点绘制劈分线方法(图 7b)，即在复合矿体边界线的倾向两端绘制 1 条矿体劈分线，通过观察分析矿体分岔复合的三维形态，将分岔矿体分别对应被劈分的复合矿体。由于分岔矿体其中 1 条较为狭窄，根据狭窄分岔矿体形态约束点，映射至复合矿体边界线范围内绘制劈分线。通过加密约束点的方法，在复合矿体劈分线上插入大量狭窄分岔矿体形态约束点，调整

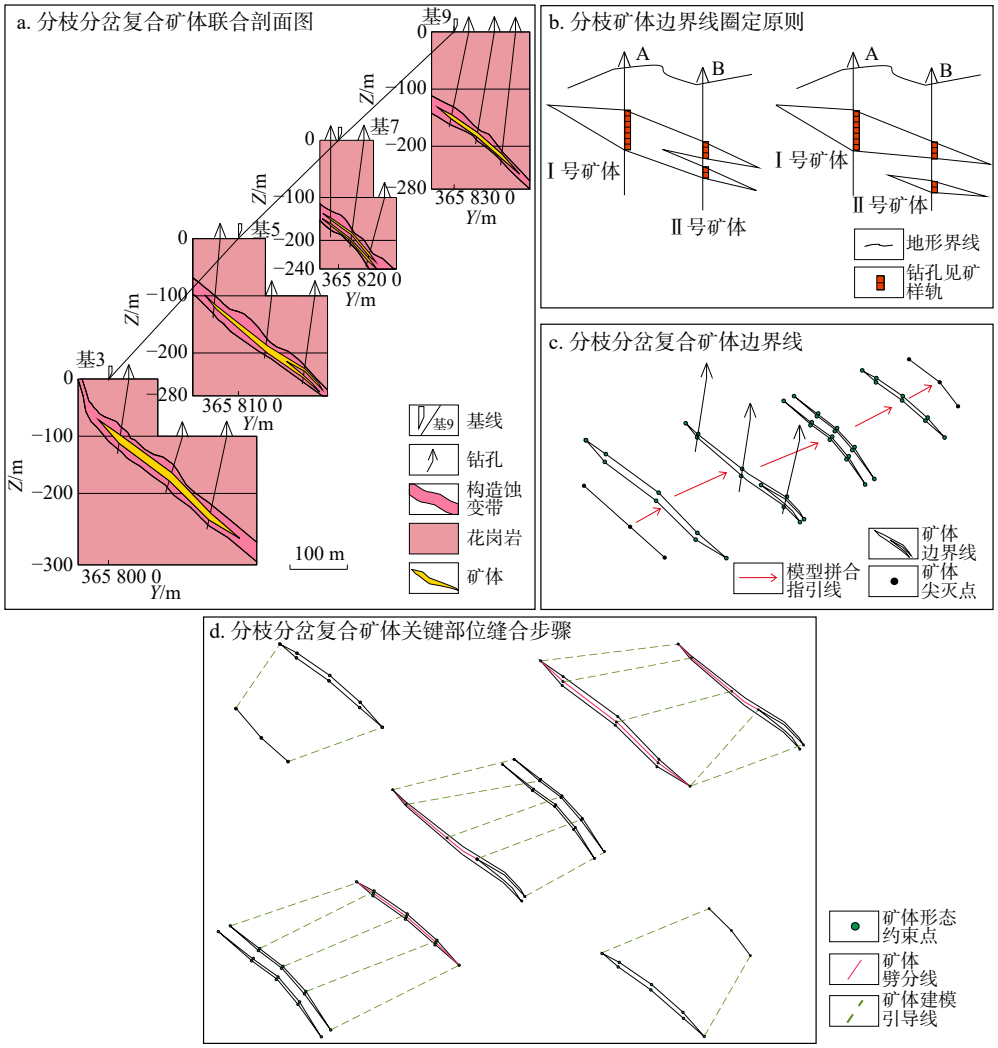


图 6　分枝分岔复合矿体建模方法流程示意图

Fig. 6　Modeling method flow diagram of branched and bifurcated composite ore bodies

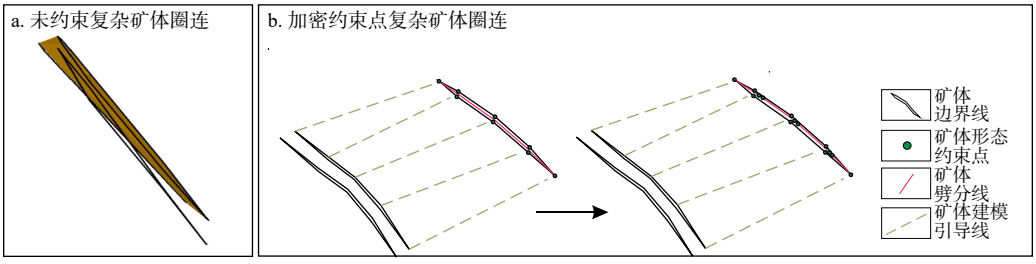


图 7　加密约束点构建关键复杂部位矿体形态

Fig. 7　Constructing ore body morphology of key complex parts based on densified constraint points

被劈分矿体形态使之对应狭窄分岔矿体。改变被劈分矿体的局部形态，实现复杂脉状矿体狭窄部位分岔复合，真实反映地质体的三维形态。

(4)缝合矿体面模型　按照矿体走向分段式建模。首先，将上述复合矿体向分枝矿体、分枝矿体向分岔矿体、分岔矿体向复合矿体依次缝合。然后，缝合矿体走向两端外推尖灭部分构建矿体面建模。最后，将模型设置成半透明显示，观察分枝部位向分岔部位缝合时，中间是否存在镂空状态(图 8a)。通过对模型切制剖面，检查矿体缝合处是否符合地质规律，同时对面模型进行有效性检查(图 8)。

3.2　存在无矿天窗矿体

矿体在走向、倾向上相对连续，但局部出现不见矿工程(图 9a)，在不影响矿体连续性的情况下，利用见矿工程到不见矿工程或矿化工程距离，圈定的空白区域叫作无矿天窗。存在无矿天窗矿体的建模难

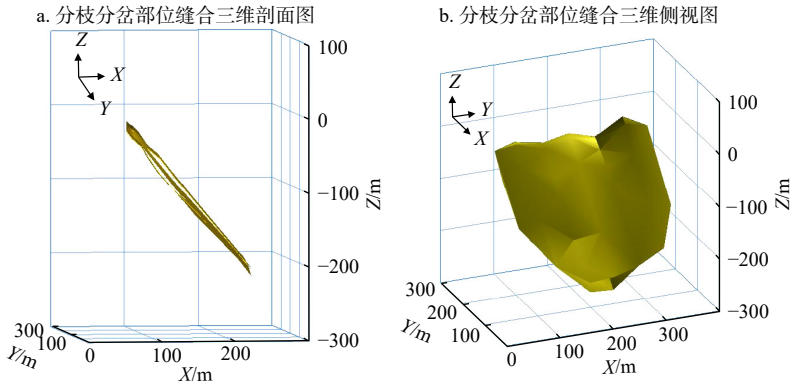


图 8　分枝分岔复合矿体三维模型图

Fig. 8　3D model of branched and bifurcated composite ore bodies

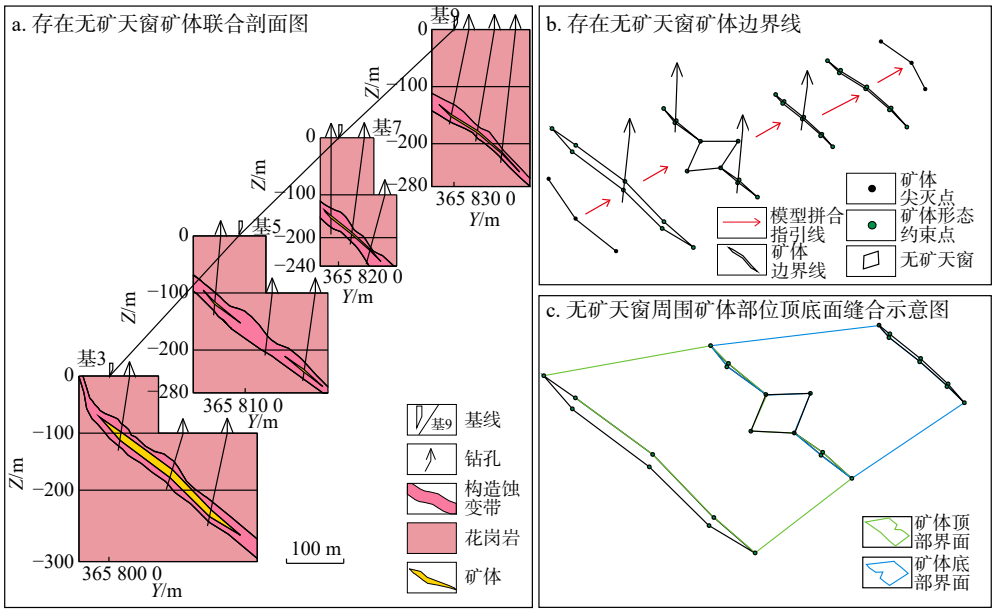


图 9　存在无矿天窗矿体建模方法流程示意图

Fig. 9　Modeling method flow diagram of ore bodies with barren windows

点，主要是构建无矿天窗边界线、天窗周围矿体顶、底界面及其缝合过程。脉状矿体由于局部较为狭窄，构建天窗周围矿体顶、底界面时较为困难，需要反复调整至合适的三维视角进行界面的构建。一旦顶、底界面端点连接错误，后期模型检查时就会出现三角网交叉、自相交等一系列问题，导致建模失败。存在无矿天窗矿体建模方法具体如以下 3 步：

（1）圈定无矿天窗边界线　首先，在无矿工程（矿化工程）剖面中，倾向两端的见矿工程根据矿体倾角及倾向，按照一定工程间距向无矿工程（矿化工程）构建外推尖灭点。若是无矿工程，则按实际勘查工程间距的 1/2 尖推；若是矿化工程，则按实际勘查工程间距的 2/3 尖推，确定尖灭距离。然后，在无矿工程（矿化工程）走向两端的见矿工程向无矿工程（矿化工程）做走向尖灭点。最后，连接倾向及走向外推尖灭点，即为无矿天窗边界线（图 9b）。

（2）构建天窗周围矿体顶、底界面　天窗周围矿体顶、底界面需分段式构建。利用矿体边界线上的形态约束点及无矿天窗边界线，依次沿矿体边界线顶、底部端点连线，分别构建无矿天窗周围顶、底界面。由于无矿天窗周围矿体较为狭窄，在连接矿体顶、底部端点时，容易存在错连现象。为了更好地观察圈连矿体界面，对无矿天窗周围的矿体边界线进行高程标注，显示高程后再构建顶、底界面，观察相对简单直观。在检查顶、底界面模型时，可以使用不同颜色进行区分，更容易查看界面是否存在交叉、端点连接错误等问题（图 9c）。

（3）缝合矿体面模型　构建天窗周围矿体顶、底界面，沿矿体走向依次缝合矿体边界线及天窗周围矿体顶、底界面（含矿体走向尖灭线），检查面模型与

实际地质现象是否相符(图 10a)。若存在问题，需要检查每个界面连接的准确性；若无问题，则对面模型有效性进行检查(图 10)。

3.3 含夹石矿体

矿体内部之间存在一定厚度的非矿岩石，其形状呈透镜状、层状或不规则状。开采矿体及资源量估算时需要对矿体中的夹石进行剔除处理，一般参照对应矿种规范中最小夹石剔除厚度/m 进行夹石圈定。含夹石矿体建模难点主要是圈定夹石范围，沿夹石倾向及走向两端构建夹石尖灭点，利用夹石边界线及夹石走向尖灭点构建夹石模型(图 11a)。含夹石矿体建模方法具体如下：

(1)*圈定夹石边界线，构建夹石尖灭点*　在夹石剖面中，确定矿体内部夹石厚度。按照矿体倾向及倾角，沿夹石中心点至倾向两端构建夹石尖灭点，尖灭点按照相邻工程勘查间距的 1/2 进行尖推。连接夹石尖灭点及夹石形态约束点圈定夹石边界线(图 11a)。若相邻勘探线矿体内部存在夹石，依据上述内容连续圈定(图 11b)。选择夹石中心点，沿矿体走向推至两端见矿工程中心点，按照相邻工程勘查间距的 1/2，确定夹石走向尖灭点。含夹石矿体边界线圈定与简单脉状矿体圈定步骤一致。

(2)*构建夹石、矿体面模型*　先沿夹石走向依次缝合夹石边界线(含夹石尖灭点)构建夹石模型，再沿矿体走向依次缝合矿体边界线(含矿体走向尖灭线)构建矿体面模型(图 11c)，最后检查夹石及矿体面模型有效性。

(3)*矿体剔除夹石*　夹石与矿体属于包含关系，利用布尔运算对矿体中的夹石进行剔除。剔除后在三维可视化界面中，将模型设置成半透明显示，检查

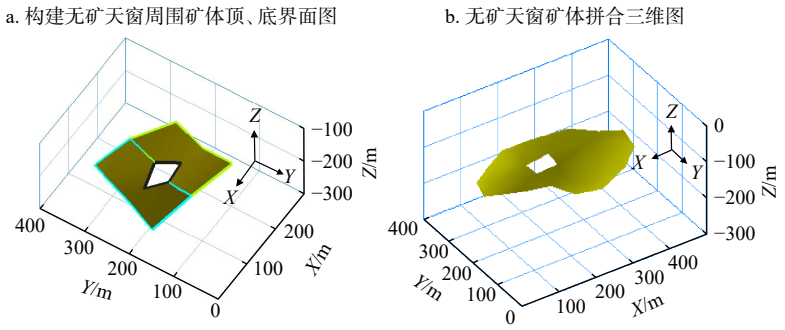


图 10　存在无矿天窗矿体三维模型图

Fig. 10　3D model of ore bodies with barren windows

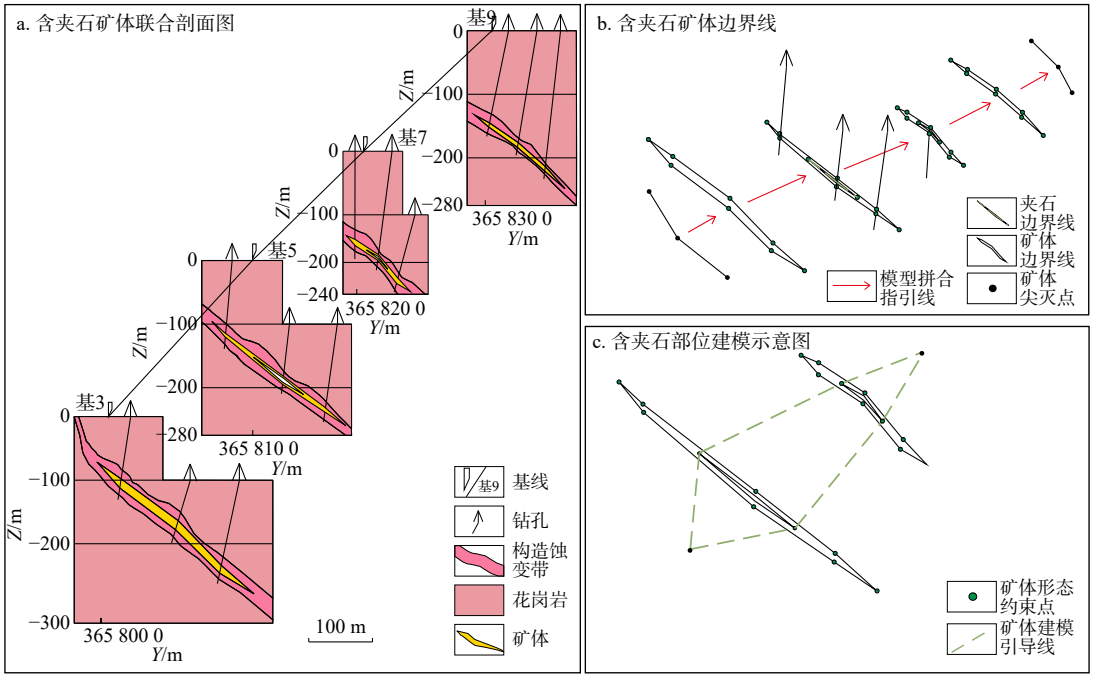


图 11　含夹石矿体建模方法流程示意图

Fig. 11　Modeling method flow diagram of ore bodies with intercalated rocks

矿体内部夹石是否完全剔除(图 12a)。也可以通过检查矿体体积,是否等于未剔除夹石矿体减夹石体积。若模型与实际地质现象不符,则证明之前构建夹石、矿体模型存在错误,需要检查夹石、矿体边界线圈定是否正确,有无交叉、错连等现象(图 12)。

3.4　断层切割矿体

受构造运动影响,沿断裂面两侧矿体发生明显位移,使矿体错位,破坏了矿体的连续性和完整性。根据断层是否完全切穿矿体的情况,可细分为断层切穿矿体和断层未完全切穿矿体 2 类。

3.4.1　断层切穿矿体

当断层切穿矿体时,模型构建相对简单,断层两侧的矿体边界线需分别圈定,沿断层面按矿体走向依次缝合断层两侧矿体(图 13a)。

(1)绘制断层线、圈定矿体边界线　根据地质图、剖面图等综合信息确定断层走向及倾向(图 13b),将剖面图中断层线顶、底两端点三维坐标录入数据库。在三维可视化界面中显示断层坐标点,通过连接坐标点及探矿工程约束点绘制断层线。根据探矿工程信息沿断层线倾向两侧,圈定断层切穿矿体边界线。断层切穿矿体边界线与简单脉状矿体边界线圈定方法相同。

(2)构建断层面和矿体面模型　利用绘制的断层线依次缝合构建断层面,沿矿体走向依次缝合矿体边界线构建矿体面模型。在建模过程中,还需从不同角度观察矿体与断层面是否贴合,检查矿体是否穿透断层界面(图 13c)。当矿体穿透断层面时,可用断层面裁切超出部分,剩余的矿体则能与断层面完全贴合;当矿体未穿透断层面时,应当使矿体向断层面方向延伸,确保矿体与断层面完全贴合。检查

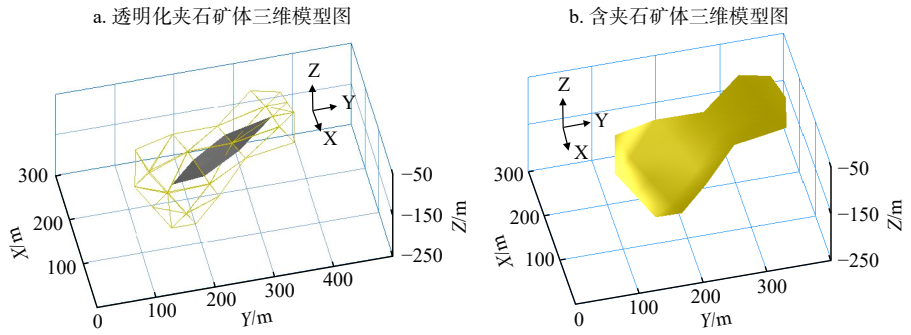


图 12　含夹石矿体三维模型图

Fig. 12　3D model of ore bodies with intercalated rocks

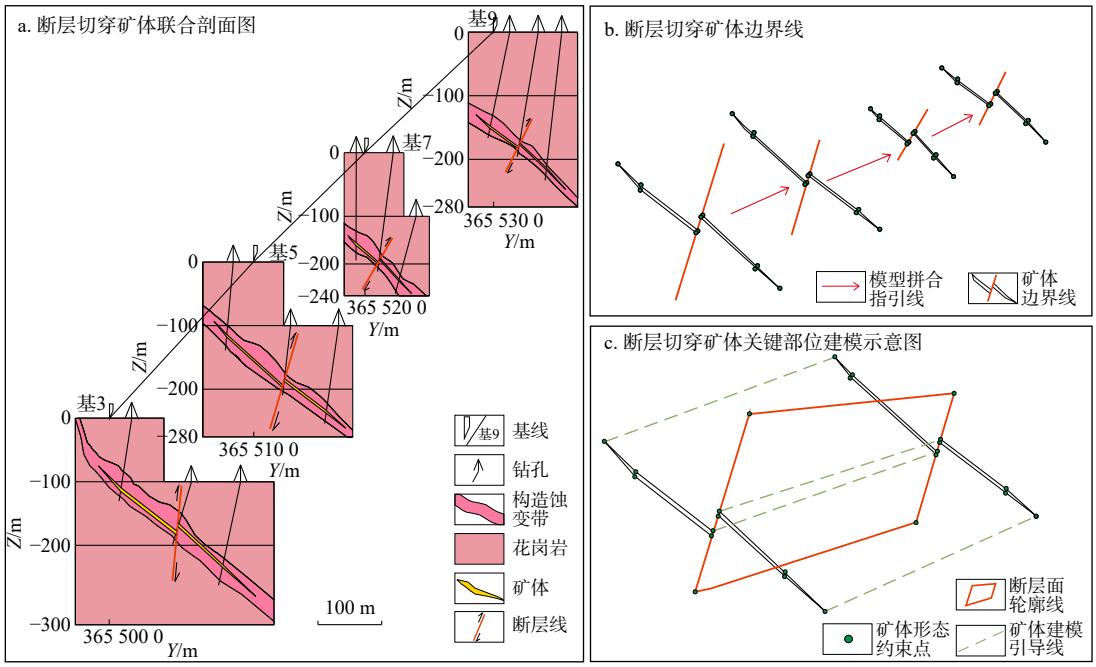


图 13　断层切穿矿体建模方法流程示意图

Fig. 13　Modeling method flow diagram of ore bodies cut by faults

后闭合实体构建矿体面模型(图 14)。

3.4.2 断层未完全切穿矿体

当断层未完全切穿矿体，且断层两侧矿体发生明显位移时(图 15a)，需要对矿体切割部位进行劈分处理，利用分段式建模、局部添加约束点、构建矿体劈分线等方法，构建矿体切穿形态模型。

(1)绘制断层线、圈定矿体边界线　依据上述绘制断层线和圈定矿体边界线的方法，完成断层线的绘制和矿体边界线的圈定(图 15b)。

(2)添加形态约束点构建断层面　断层沿走向至矿体未被切穿处，在未被切穿的见矿工程部位构建形态约束点，约束点连线做矿体劈分处理。构建断层面时，沿走向缝合断层边界线，在断层边界线上添加断层编录信息约束点控制断层面的形态。该方法有效避免了在后期出现断层和矿体模型错位、交叉等不符合地质规律的情况。

(3)利用劈分线刻画矿体切穿部位形态，缝合矿体面模型　矿体被断层局部切穿时，需要对断层上下盘矿体进行分段式建模。在断层两端未被切穿的矿体边界线上，利用劈分线技术，分别使走向两端的矿体劈分成 2 段。选定被劈分矿体的上部连接被断层切穿矿体的上盘，沿矿体走向依次缝合，下部劈分矿体按照上述步骤缝合被断层切穿矿体的下盘(图 15c)。缝合上下盘矿体后，沿矿体走向依次缝合(含矿体走向尖灭线)构建矿体面模型。重点检查断层与矿体切穿开叉部位模型是否贴合。若矿体存在端点交叉、错连、开裂等现象，则需要检查矿体边界线圈定是否正确，并修改矿体面模型(图 16)。

4 结　论

(1)系统介绍了分枝分岔复合矿体、存在无矿天

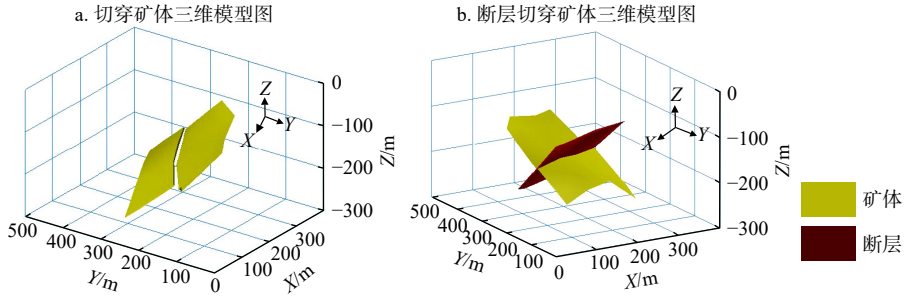


图 14　断层切穿矿体三维模型图

Fig. 14　3D model of ore bodies cut by faults

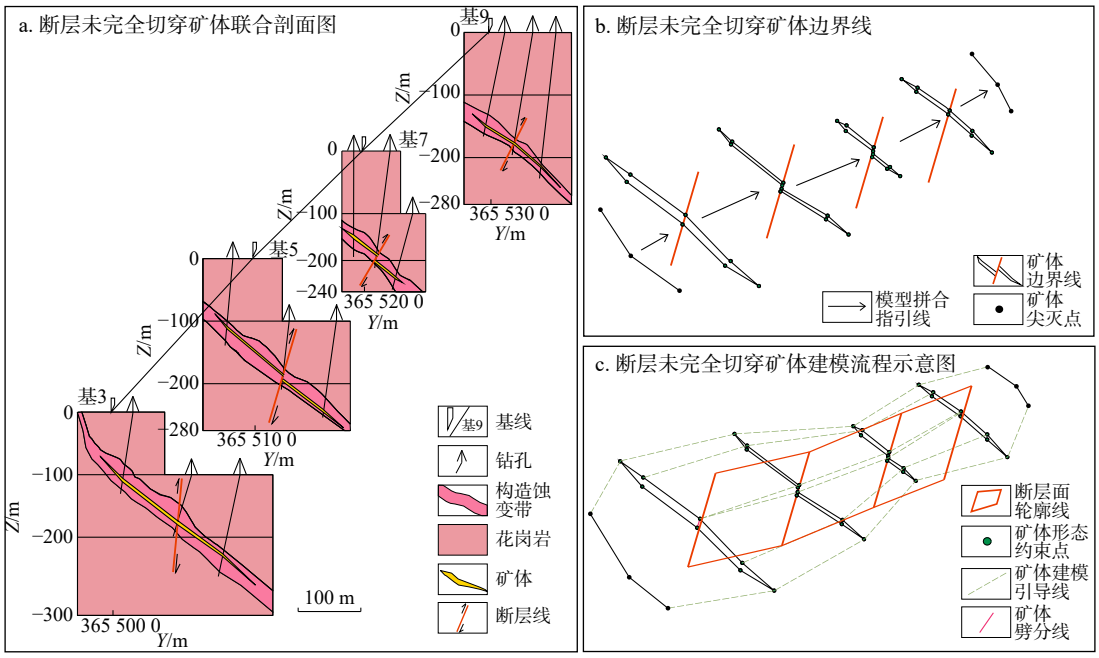


图 15　断层未完全切穿矿体建模方法流程示意图

Fig. 15　Modeling method flow diagram of ore bodies with not cutting through fault

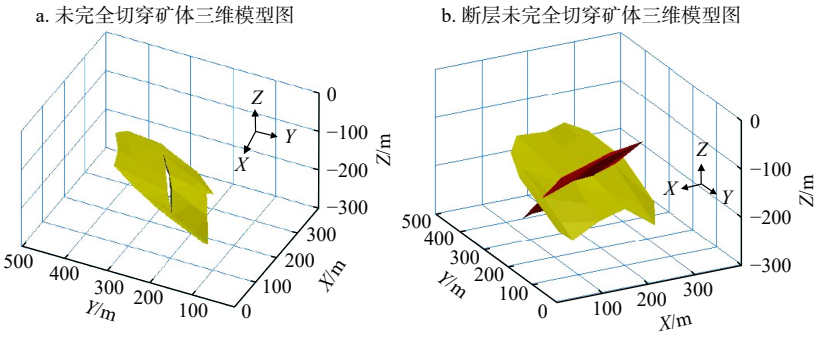


图 16　断层未完全切穿矿体三维模型图

Fig. 16　3D model of ore bodies with not cutting through fault

窗矿体、含夹石矿体、断层切穿矿体 4 种复杂脉状矿体的三维显式构建方法，有效解决了窄、薄、形态复杂脉状矿体建模难的问题。利用本方法可实现复杂脉状矿体的快速、精确构建。

（2）详细阐述了加密约束点、构建矿体劈分线、分段式建模、矿体关键部位缝合等建模技术，完善了不同复杂脉状矿体三维建模流程，构建的矿体模型在三维空间中呈多角度立体展示，并随着矿体轮廓重构还原矿体最真实的地质形态。

（3）基于实测数据显式建模方法，实际建模过程中可以运用 python、宏命令等计算机语言，把相对简单的模型界面如外推模型、夹石模型、天窗周围矿体顶、底界面数字集成化，只需人为在复杂关键部位进行形态约束即可完成模型的构建，可有效提升建模效率，节约大量人力。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] GORE A. The digital earth understanding our planet in the 21st century[J]. The Australian Surveyor, 1998, 43(2): 89-91.

[2] 董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 地球深部探测国际发展与我国现状综述 [J]. 地质学报, 2010, 84(6): 743-770.
DONG S W, LI T D, GAO R, et al. International progress in probing the earth's lithosphere and deep interior: A review[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 743-770. (in Chinese with English abstract)

[3] 花卫华, 宿紫莹, 朱玉华, 等. 大范围地质体分块建模方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 257-265.
HUA W H, SU Z Y, ZHU Y H, et al. Large-range geological block modeling method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 257-265. (in Chinese with English abstract)

[4] 吴冲龙, 刘刚. “玻璃地球”建设的现状、问题、趋势与对策 [J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1280-1287.
WU C L, LIU G. Current situation, existent problems, trend and strategy of the construction of "Glass Earth"[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1280-1287. (in Chinese with English abstract)

[5] CARR G, ANDREW A, DENTON G, et al. The 'Glass Earth': Geochemical frontiers in exploration through cover[J]. Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 1999, 28: 33-40.

[6] 唐骥, 蒋潇, 姜雪莲, 等. 矿体三维可视化建模技术在成矿模式分析中的应用 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 273-284.
TANG J, JIANG X, JIANG X L, et al. Application of three-dimensional visualization modeling technology of ore bodies in metallogenic mode analysis[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 273-284. (in Chinese with English abstract)

[7] KAUFMANN O, MARTIN T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(3): 278-290.

[8] 吴志春, 郭福生, 林子瑜, 等. 三维地质建模中的多源数据融合技术与方法 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1895-1913.
WU Z C, GUO F S, LIN Z Y, et al. Technology and method of multi-data merging in 3D geological modeling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(6): 1895-1913. (in Chinese with English abstract)

[9] 施玉娇, 刘雯婷, 王建超, 等. 利用多源数据融合在某铜金属矿山开展三维实体建模的研究 [J]. 中国矿业, 2024, 33(增刊 1): 195-198.
SHI Y J, LIU W T, WANG J C, et al. Study on 3D solid modeling in a copper mine by multi-source data fusion[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S1): 195-198. (in Chinese with English abstract)

[10] VELASCO V, GOGU R, VÁZQUEZ-SUÑÈ E, et al. The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(8): 2145-2162.

[11] HERBERT M H, JONES C B, TUDHOPE D S. Three-dimensional reconstruction of geoscientific objects from serial sections[J]. The Visual Computer, 1995, 11(7): 343-359.

[12] NAGAI Y, OHTAKE Y, SUZUKI H. Tomographic surface reconstruction from point cloud[J]. Computers & Graphics, 2015, 46: 55-63.

[13] XIAO K Y, LI N, PORWAL A, et al. GIS-based 3D prospectivity mapping: A case study of Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 611-632.

[14] 郭福钟, 郑博文, 祁生文, 等. 三维地质建模技术与方法综述 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 1143-1153.
GUO F Z, ZHENG B W, QI S W, et al. A review of 3D geological modeling technology and methods[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 1143-1153. (in Chinese with English abstract)

[15] ZHONG D Y, WANG L G. Solution optimization of RBF interpolation for implicit modeling of orebody[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13781-13791.

[16] GONÇALVES Í G, GUADAGNIN F, CORDOVA D P. Variational Gaussian processes for implicit geological modeling[J]. Computers & Geosciences, 2023, 174: 105323.

[17] 郭甲腾, 吴立新, 王江梅, 等. 基于隐式化 Coons 曲面的局部地质构造区域集成建模方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(1): 1-6.
GUO J T, WU L X, WANG J M, et al. A regional integrated geological modeling method based on the implicitization of coons surface[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, 34(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[18] BELE S. Explicit method in 3D modeling of orebody[J]. Journal of Petroleum and Mining Engineering, 2020, 3(8).

[19] 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 等. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用 [J]. 地质与勘探, 2007, 43(2): 76-81.
ZHANG B Y, SHANG J G, WU H M, et al. Application of 3D geological modeling and visualization in solid mineral resource estimation[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(2): 76-81. (in Chinese with English abstract)

[20] 邰文星, 周琦, 杨成富, 等. 黔西南者相金矿床三维地质可视化建模及应用 [J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4017-4033.
TAI W X, ZHOU Q, YANG C F, et al. 3D geological visualization modeling and its application in Zhexiang gold deposit, Southwest Guizhou Province[J]. Earth Science, 2023, 48(11): 4017-4033. (in Chinese with English abstract)

[21] 王权, 邹艳红. 基于轮廓线层间形态插值的三维地质隐式曲面重构 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 293-300.
WANG Q, ZOU Y H. Three-dimensional geological implicit surface reconstruction based on intermediate contour morphological interpolation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 293-300. (in Chinese with English abstract)

[22] 扶金铭, 胡茂胜, 方芳, 等. Stacking 集成策略下的径向基函数曲面复杂矿体三维建模方法 [J]. 地球科学, 2024, 49(3): 1165-1176.
FU J M, HU M S, FANG F, et al. Complex orebody 3D modeling using radial basis function surface incorporating stacking integration strategy[J]. Earth Science, 2024, 49(3): 1165-1176. (in Chinese with English abstract)

[23] WANG Y J, TAN S W, DONG W W, et al. Research on 3D modeling method based on hybrid octree structure[J]. The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2014, 8(1): 323-329.

[24] MAXELON M, RENARD P, COURRIOUX G, et al. A workflow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complex poly-deformed geological units[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(3): 644-658.

[25] 刘志斌, 张健桥, 杜晓峰, 等. 矿区复杂地质构造隐式三维集成建模 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(9): 1317-1325.
LIU Z B, ZHANG J Q, DU X F, et al. Implicit 3D integrated modeling of complex geological structures in mining areas[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(9): 1317-1325. (in Chinese with English abstract)

[26] GONG J Y, CHENG P G, WANG Y D. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 391-404.

[27] WU Q, XU H. Three-dimensional geological modeling and its application in digital mine[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(3): 491-502.

[28] 邹艳红, 刘雯, 黄望, 等. 面向矿床三维动态建模的地质勘探数据库增量更新方法 [J]. 地质学刊, 2016, 40(3): 372-383.
ZOU Y H, LIU W, HUANG W, et al. An incremental update method of geological prospecting database for 3D dynamic modelling in mineral deposits[J]. Journal of Geology, 2016, 40(3): 372-383. (in Chinese with English abstract)

[29] LI Y C, DU Y Z, WU Q, et al. A deductive approach of 3D complex fault modeling and application[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(12): 505.

[30] WU Q, XU H, ZOU X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43.

[31] 贾飞, 胡跃亮, 王永锋, 等. 基于 Vulcan 软件的山东莱州留村金矿区三维建模及资源量估值 [J]. 地质与勘探, 2022, 58(1): 12-23.
JIA F, HU Y L, WANG Y F, et al. 3D modeling based on Vulcan software and resource estimation for the Liucun gold deposit in Laizhou, Shandong Province[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(1): 12-23. (in Chinese with English abstract)

[32] XIAO K Y, LI C, FAN M J, et al. Quantitative prediction methods and applications of digital ore deposit models[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 168: 106049.

[33] 孙月成, 李永飞, 孙守亮. 高精度三维地质建模新方法与关键技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 241-248.
SUN Y C, LI Y F, SUN S L. Research on key technologies and new method of high precision 3D geological modeling[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 241-248. (in Chinese with English abstract)

[34] ZHONG D Y, WANG L G, BI L, et al. Implicit modeling of complex orebody with constraints of geological rules[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(11): 2392-2399.

[35] HAO M, LI M H, ZHANG J L, et al. Research on 3D geological modeling method based on multiple constraints[J]. Earth Science Informatics, 2021, 14(1): 291-297.

[36] ZHAO Y Y, BAI P, LIU X H. The application of ore surface model in computer state delineating method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99/100: 462-465.

[37] JI G J, CAI Z Z, LU Y, et al. Study on exploring the extraction of geological elements from 3D geological models within the constraints of geological knowledge[J]. Computers & Geosciences, 2024, 193: 105726.

[38] 孙立双, 毕天平, 马运涛, 等. 一种基于剖面轮廓线进行矿体三维建模的方法 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 653-658.
SUN L S, BI T P, MA Y T, et al. An orebody 3D modeling algorithm based on section contour lines[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(4): 653-658. (in Chinese with English abstract)

[39] 李江, 周长城, 刘修国. 密集陡倾斜薄脉状矿体三维建模方法 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(2): 1-5.
LI J, ZHOU C C, LIU X G. Intensive steeply-inclined thin vein orebody three-dimensional modeling method[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[40] CRISTALLINI E O, ALLMENDINGER R W. Pseudo 3D modeling of trishear fault-propagation folding[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(12): 1883-1899.

[41] ALLMENDINGER R W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds[J]. Tectonics, 1998, 17(4): 640-656.

Summary for “复杂脉状矿体精细化三维建模方法探讨”

Discussion on fine 3D modeling method of complex vein-type ore body

LI Hongda[1,2], WU Zhichun[1*], BAI Rui[2], DONG Chong[2], MA Fenling[1], LI Hualiang[1], JIA Fei[2], LI Bin[1], ZHU Yidan[1]

1. College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Shandong Gold Geology and Mineral Exploration Co., Ltd., Laizhou Shandong 261400, China

First author, E-mail: 352436386@qq.com

* Corresponding author, E-mail: 563970964@qq.com

Abstract: [**Objective**] The simulation of three-dimensional morphology of geological bodies through 3D modeling technology can effectively reveal the spatial distribution characteristics of geological bodies. Compared with implicit modeling methods, explicit modeling methods can depict the small-scale geological structure features more accurately. However, for the large-scale and fine 3D modeling of complex geological bodies such as vein-type ore bodies with complex shapes, there are still problems such as slow modeling speed, high difficulty, and low accuracy that need to be solved. [**Methods**] This study, focusing on some complex vein-type ore bodies, comprehensively applied techniques such as densified constraint points, construction of ore body splitting lines, segmented modeling, and ore body stitching, to systematically conduct research on the explicit 3D modeling methods of four types of vein-type ore bodies: branched and bifurcated composite ore bodies, ore bodies with barren windows, ore bodies with intercalated rocks, and ore bodies cut by faults. [**Results and Conclusion**] It achieved high-precision and rapid 3D modeling of complex vein-type ore bodies, which is of great significance for the fine 3D modeling of rare and precious metal vein-type ore bodies, estimation of mineral resources, and formulation of mineral resource development and utilization plans.

Key words: 3D geological modeling; complex vein-type ore body; fine 3D modeling; explicit modeling method

Received: 2024-02-05; Revised: 2024-03-09; Accepted: 2024-04-07

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240050