

复杂矿体高效建模技术与应用

高 崙¹, 杨新锋², 郑 斌¹, 钱兆明¹, 王 卓³, 陈小康⁴

(1. 刚波夫矿业股份有限公司, 上加丹加 利卡希 1004131; 2. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410083;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 4. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330031)

摘要: 复杂矿体通常具有几何形态多变、分支多、断层相互切割等特征, 针对这类复杂矿体矿山的设计, 传统逐条手工拼接线框的二维绘图方式存在效率低、主观性强等问题。为此, 本文基于矿体轮廓线距离场构造与轮廓线拼接法, 提出一种可兼顾自动化与边界精度的“多线框自动一次建模—局部连线框修正—零星外推建模”的高效建模方法。以刚果金复杂矿区为工程示例, 经DIMINE平台验证, 建模周期由传统方法的230~440 h缩短至46~67 h, 同时成功构建了170余个矿化模型(约 $1.91 \times 10^7 \text{ m}^3$)与180余个矿体模型(约 $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$)。封闭性与拓扑有效性检测表明, 模型误差在可接受范围。该方法既提高了复杂矿体建模的自动化效率, 又通过二次修复保持了局部突变处几何精度, 为类似复杂矿床的工程建模提供了可复用的技术路径与实现方案。

关键词: 矿体三维建模; 自动建模; 矿体轮廓线; 复杂矿体建模; 距离场构造

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.014

中图分类号: TD8 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0146-09

受工程与经济决策对高精度空间信息迫切需求的驱动, 以及在计算能力与数字地质数据的支撑下, 矿山设计正由传统二维绘图向三维建模加速演进。矿山三维模型逐渐成为智能矿山系统应用的基础, 其中矿体模型是资源评估、矿山管理及开采设计的重要依据^[1-4], 其模型构建的合理性十分重要。利用建模软件快速构建矿体模型并在生产与补充勘探过程中实现实时更新的能力不足, 是当前矿山建模实践中的核心瓶颈, 亟须在自动化流程、数据接口与更新策略上改进^[5-8]。

矿体三维建模是矿业软件(如国外的Vulcan, Datamine, Surpac, MineSight, Micromine等, 以及国内的DIMINE, QuantityMine, 3DMine等)中的核心功能^[9-10], 目前主要采用轮廓线拼接法(显式建模)和等值面法(隐式建模)。轮廓线拼接法^[11-14]通过人工选择并拼接矿体轮廓线, 逐步重建矿体表面模型。该方法在几何上轮廓线严格吻合, 适用于规则矿体的形态表达, 但是操作的主观性强, 并且需要用户手动选择和调整轮廓线, 建模结果可能因操作者经验而异, 难以统一把控矿体的整体形态。同时, 该方法处理复杂矿体能力有限, 在分支、复合或断层

等复杂矿体条件下, 建模过程繁琐, 难以保证模型的几何和拓扑完整性。隐式建模技术^[15-20]主要通过离散地质信息进行空间插值, 产生连续的标量场并以等值面表示矿体边界。该技术的高自动化特性使其在处理连续延伸矿体时效率显著优于人工拼接法。但由于缺乏几何域约束, 忽略了矿体的实际几何边界(矿化分布的有效空间范围), 导致模型与实际矿体形态存在较大偏差, 尤其在矿体形态复杂或矿化区域多变的情况下, 效果很不理想。毕林等^[21]提出的基于矿体轮廓线距离场构造的矿体建模方法, 是一种结合轮廓线拼接法和体数据等值面法的三维建模方法, 其核心思想是利用距离函数将矿体轮廓线空间数据转化为距离场数据, 通过提取等值面自动生成三维矿体模型。但是这种方法难以完整刻画矿体产状突变处的矿体轮廓。

本文基于矿体轮廓线距离场构造方法与轮廓线拼接法, 研究并实践了一种复杂矿体高效建模的方法, 利用地质报告中矿体分类与编号的先验知识, 可实现矿体主体快速自动建模、边缘突变处二次修复、零散小矿体独立外推, 从而高效构建完整的矿体模型。该建模策略在刚果金某矿区复杂构造条

收稿日期: 2025-06-20; 修订日期: 2025-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC2909500; 2022YFC2904105)资助

作者简介: 高崙飞(1993—), 男, 陕西榆林人, 本科, 工程师, 研究方向: 勘查找矿、矿山地质、水文地质等, E-mail: 546126211@qq.com; 通信作者: 杨新锋, 高级工程师, E-mail: yangxinfeng@dimine.net

件下的多类矿体上得到应用,借助DIMINE软件实现了高效且精细的模型构建,显著降低了建模工作量,并保证了资源量评价的准确性与可靠性。

1 基于矿体轮廓线距离场构造的矿体建模方法

基于矿体轮廓线距离场的建模,是将轮廓线拼接的几何约束与等值面隐式重建相结合,实现由剖面二维轮廓向连续三维矿体表面的自动化重构。先以轮廓线作为关键输入,承载各断面的二维几何信息。然后将轮廓线的几何信息通过距离场函数映射为三维空间中的标量场,标量场值表示点到最近轮廓线的符号距离。最后通过在距离场中提取等值面(即距离为0的点集合),自动生成矿体的三维表面模型。

1) 定义距离场函数

通过符号距离函数建立距离场,为后续等值面提供基础,将三维建模从几何线性操作转换为连续标量场。按式(1)定义空间中任意点 $P(x,y,z)$ 到最近轮廓线的符号距离。

$$d(P) = \begin{cases} 0 & P \text{ 位于轮廓线上} \\ +d_{\min} & P \text{ 位于轮廓线内} \\ -d_{\min} & P \text{ 位于轮廓线外} \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

式中, $d_{\min}$ 是 P 到最近轮廓线的最短欧氏距离。

符号判定规则:采用射线法判定点位于矿体内部或外部。从点出发,朝某一方向发射射线。若射线与轮廓线的交点数为奇数,则该点位于矿体内部,其符号取正;若交点数为偶数,则该点位于矿体外部,其符号取负。

2) 高效计算距离场

为避免传统方法对每个点遍历计算所有轮廓线距离的高复杂度,采用了以下优化策略:

非欧氏距离变换(DT)。仅计算离散网格点的距离,避免连续计算的高复杂度;利用扫描法,逐层处理网格,更新网格点的最短距离值。

分治法。将相邻轮廓线分组处理,构造局部距离场并逐步合并;对轮廓线间距差异较大的区域,采用局部调整策略,减少冗余计算。

设计非平直四棱柱单元。传统建模方法中常使用规则体素单元,但实际矿体轮廓线形态复杂且间距

不均匀,规则单元会引入几何误差。为此设计了一种非平直四棱柱单元,该单元的顶面和底面分别由相邻轮廓线的网格点构成,如图1(a)所示。顶点位置通过投影平面计算,底面点根据实际位置进行修正。

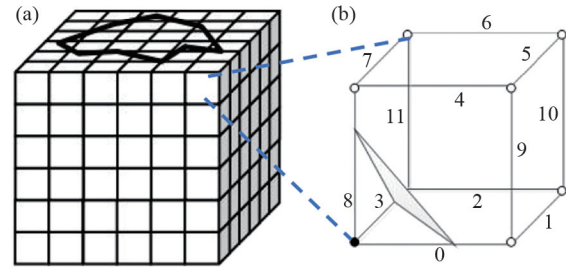


图1 (a)体数据与(b)等值曲面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) volumetric data and (b) equivalent surface

非平直四棱柱单元的生成步骤:①将相邻轮廓线投影到其平均拟合面上;②根据投影结果生成顶面网格点;③底面点根据实际空间位置进行修正,以避免几何扭曲;④形成非平直四棱柱单元。与规则体素相比,该方法能够有效降低几何误差。

3) 等值面提取

等值面是距离场中值为0的点集合,表示矿体的表面形态,如图1(b)所示。对每个四棱柱单元的8个顶点,依次比较距离场值与等值面的阈值(通常为0)。如果某边两个端点分别在等值面内外,则通过线性插值计算交点坐标,并使用预定义查找表确定每个单元中等值面交线形成的三角形面片,连接所有体素等值面三角形面片,形成等值曲面。同时,使用双曲线渐近线算法解决 Marching Cubes (MC) 算法中的二义性问题,确保等值面拓扑的正确性。

4) 分层建模与合并

对所有相邻轮廓线重复进行距离场计算与等值面提取,逐层生成三维矿体模型的表面。将各层生成的等值面合并为整体三维模型,并简化三角形面片,以优化存储和渲染性能。

2 复杂矿体高效建模策略

本策略基于DIMINE软件实体建模功能,综合运用多线框法、线框法、外推法,并结合前文基于矿体轮廓线距离场的建模方法,完成复杂矿体高效建模。其中多线框法采用上述基于矿体轮廓线距离场的

建模方法,可实现多剖面多线框快速一次建模,但算法中网格参数设置会影响矿体三角面片的分辨率。若网格尺寸过大,会导致矿体突变处与轮廓线不能较好地吻合;若网格尺寸过小,会导致模型数据急剧增大。所以,对于整个矿床中分散的分支小矿体,采用传统的线框法和外推法进行建模。具体策略方法如下:

1) 矿体轮廓线分组

先根据地质报告、勘探线剖面图等资料中矿体类型与编号的规定,对不同矿体的圈矿线框划分大类,并利用DIMINE的数据管理功能存储至不同图层,以便快速查询与选择,如图2所示。主要矿体通常跨越多条勘探线,且存在不同的分支复合状态,这会导致勘探线剖面上的圈矿线框复杂多变。为此,采用多线框建模方式对划分好的同一类线框一次性自动建模。

然后对模型进行空间合理性分析,不合理区域通常对应零星小矿体,需采用其他建模方式完成矿体模型构建。对圈矿线框进行筛选和分组,各组采用不同建模方法完成建模。

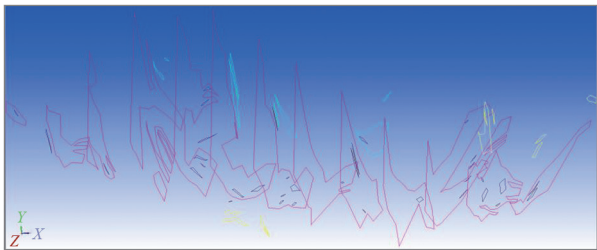


图2 矿体轮廓线分组示意图
Fig. 2 Schematic diagram of grouping of ore body contour lines

2) 多线框自动建模

根据圈矿线框分组,采用多线框自动建模方法对矿床中的几类主要矿体建模。如图3所示,先选择不同剖面和平面上的线框,根据需要调整参数,最后完成建模。其中:“间隔容差”是当两个剖面不平行时,剖面间的距离容差;“封闭端部”是将模型两端线框封闭(或不封闭)为面;“格网大小”是生成三角面片的网格大小,格网越小,矿体轮廓越贴合线框,表面越平滑自然,但三角面片数显著增加,模型自动生成的时间也相应增加。参数选择完成后执行自动建模,完成矿体的模型重建。

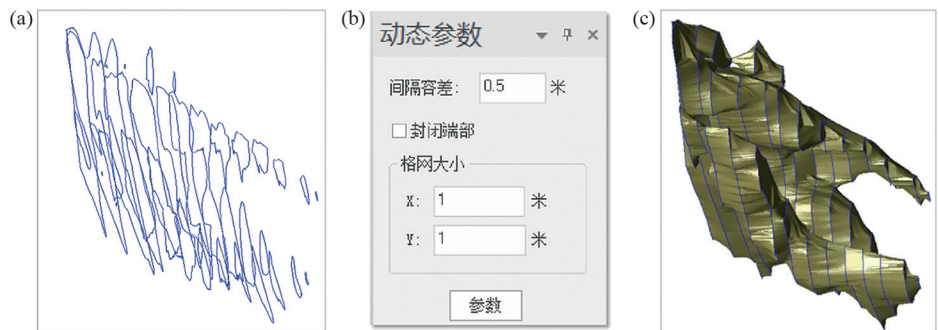


图3 多线框自动建模示意图: (a) 建模前线框; (b) 动态参数; (c) 自动建模后模型
Fig. 3 Schematic diagram of automatic modeling with multiple wireframes: (a) Wireframes before modeling; (b) Dynamic parameters; (c) Automatic modeling

3) 线框建模

受格网参数选择的影响,自动建模对矿体产状突变及分散薄矿脉区域的建模效果欠佳。为此,将线框建模作为自动建模的补充。根据圈矿线框分组,线框建模主要针对两个方面(图4):一是延续多个勘探线的细长矿体的建模;二是上一步自动建模后产生的少量不合理区域的修正。所指细长矿体和不合理区域多位于矿体边缘位置。

4) 外推建模

自动建模和线框建模未包含的剩余线框多为

小矿体,且绝大部分相邻剖面无对应解译线。针对这部分矿体,采用单剖面外推1/2剖面间距尖灭到点或线的方式进行建模,如图5所示。矿体解译长度超过30 m时,按1/2解译长度线尖灭形成楔形体;否则按点尖灭,形成锥形体。

5) 模型合并

将针对剖面连线框所建模型进行合并,形成封闭实体模型。

实体模型须具备以下条件:地质体模型必须是闭合的,每个实体有对应的体积。各矿体间不相交

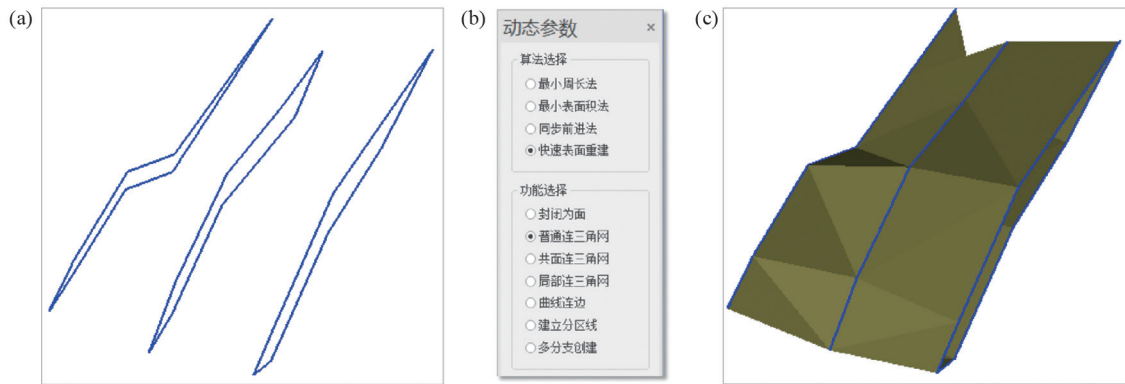


图4 线框建模示意图: (a)建模前线框; (b)动态参数; (c)建模后模型

Fig. 4 Schematic diagram of wireframe modeling: (a) Wireframes before modeling; (b) Dynamic parameters; (c) Post modeling model

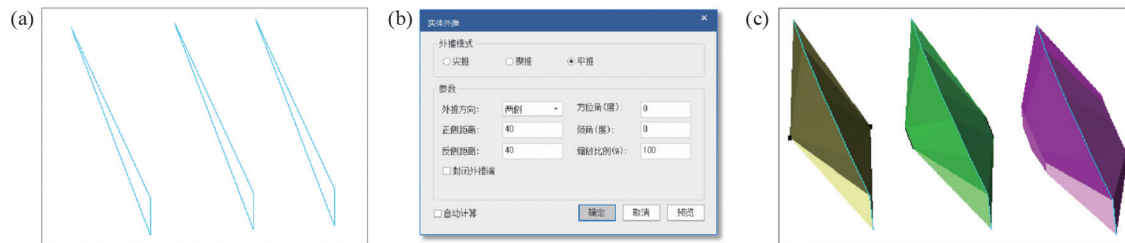


图5 外推建模示意图: (a)建模前线框; (b)实体外推参数; (c)外推后模型

Fig. 5 Extrapolation modeling diagram: (a) Wireframes before modeling; (b) Entity extrapolation parameters; (c) Extrapolation model

或相交矿体可以进行布尔运算。最终模型不能有三角面片交叉、重复。

最后校验矿体实体模型的有效性。若检测出存在相交及无效边,则分析原因并进行修正,处理方法主要有修改圈矿线框点、增加辅助点线、编辑模型面片。

3 工程实践

3.1 矿山地质概况

刚果金某矿区由一个轴向北倾的大型向斜组成,向斜南翼接近直立出露于地表,矿体赋存标高0~510 m,北翼接近水平赋存,矿体赋存标高430~520 m,整个矿体呈“L”形。

矿体赋存于逆冲推覆断层中的“卡莫亚-坎博韦推覆体”内。该推覆体受推覆作用形成多个不同规模的地质块体。矿区内除主体推覆构造外,在推覆体内亦形成多级多层次的次级构造,主要为两组接近平行的北西-南东向构造:第一组为背斜构造;第二组为北西-南东走向的走滑断裂构造,受此断裂控制的矿床为主体矿床。

矿区主要发育4条断裂,分别为逆冲推覆断裂

(F1)、层间滑脱断裂(F2)和层间断裂(F3, F4)。

矿区含矿层位主要分3个矿化层位,如图6所示。

第一矿化层位跨三个地层层位。赋矿岩性为泥质白云质粉砂岩、条带状白云岩、条带状硅质白云岩、硅化结晶白云岩。该矿化层厚度通常为5~15 m。矿化主要为星点状-浸染状-脉状的黄铜矿、硫铜钴矿,以及后期叠加改造的辉铜矿、斑铜矿等。该区的自然铜主要富集于矿化层的上部。

第二矿化层位跨两个地层层位。赋矿岩性为硅化结晶白云岩、含炭质白云岩、含炭质白云质页岩。该矿化层厚度通常为10~18 m,矿化强度较好。矿化主要为细脉状-纹层状、浸染状、星点状的黄铁-黄铜矿,硫铜钴矿等,以及后期叠加改造的斑铜矿、辉铜矿等。该矿化层的下部偶有自然铜出现。

第三矿化层位的矿化主要是在硅质白云岩及含炭质白云岩页岩内的星点状、斑点状黄铁-黄铜矿化和孔雀石化,局部可见纹层状矿化。该段的矿化厚度不均匀,仅部分地段达到工业矿体的要求,且矿体连续性较差。

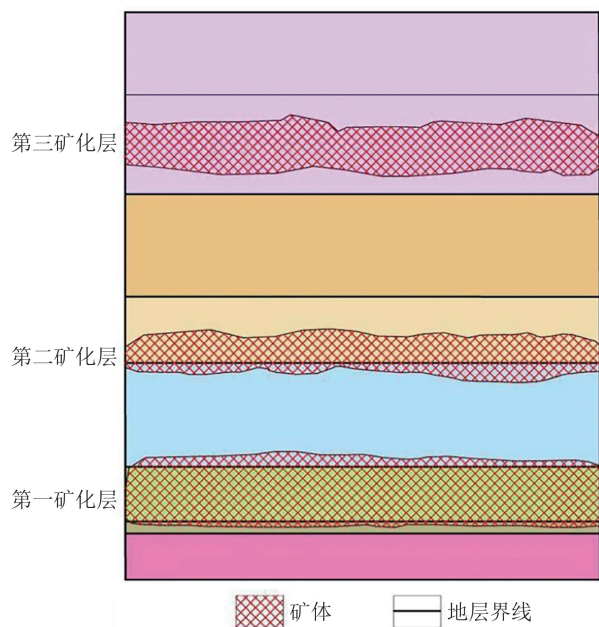


图6 各矿化层位空间关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spatial relationship between various mineralized layers

3.2 原始资料整理分析

1) 地质勘探钻孔数据库

地质勘查工作开始于1917年。1917—1943年形成第一批编号KW1-100的钻孔51个。露天开采过程中,形成第二批编号KW100以后的地表勘探钻孔43个,之后转地下开采形成KWF系列的生产勘探钻孔170个和KWS系列的生产勘探钻孔116个,其他生产勘探钻孔33个。2021年1—4月,实施补充勘查形成编号ZK开头的15个钻孔,全区累计勘探钻孔428个。通过对勘探工程信息的收集整理和校核修改,以及对部分钻孔信息进行数字化还原后,得到汇总钻孔数据所需的相关资料,并利用孔口表、测斜表、样品表组成(岩性信息缺失严重,未单独建表)直接建立钻孔数据库,形成了三维钻孔数据库。

钻孔数据库是基于钻孔孔口坐标信息、测斜信息、样品信息、岩性信息,采用轨迹生成算法形成的空间轨迹数据库。钻孔数据库中含孔口表信息439行,测斜表信息1175行,样品表信息11605行。

2) 勘探线剖面图

收集到西起390W,东至300E的地质勘探线剖面图纸资料3套。其中,1981年图纸1套,1985—1986年图纸1套,1987年图纸1套。

比对多套剖面图纸发现,在生产与勘探的推进过程中,技术人员对图纸上的勘探工程、井巷工程、地层与断层界限、矿岩边界及当年采场边界等信息进行了持续更新。1987年的最新图纸经矢量化后可作为地质建模的重要参考,但该图纸存在300 m水平以上解译缺失、数字化后与钻孔数据库存在显著空间偏差等问题。另因当时金属价格偏低,基于当期圈矿指标得到的资源模型不适合用于新一轮开发评估。因此,本研究在保留图纸参考价值的同时,调整圈矿指标并基于完整的钻孔数据库(含2021年补充勘探资料)重建了新的矿体模型。

3.3 基于钻孔数据库圈矿

1) 圈矿指标

通过矿化模型可以建立更为准确的约束矿体产状,同时可以计算出低品位矿石量及品位。为了在金属价格较高时合理利用资源,通过综合考虑Cu金属市场价格,将圈矿中单钻矿作为低品位矿石处理,并在矿化建模时定位Cu品位 $\geq 0.5\%$,Co品位 $\geq 0.3\%$,作为圈定矿化范围的重要指标。

2) 单工程圈矿

按矿化指标Cu品位 $\geq 0.5\%$ 或Co品位 $\geq 0.3\%$ 进行单工程圈矿,进行矿段组合。

3) 剖面圈矿

基于勘探线剖面视图进行剖面圈矿。圈矿时打开断层及地层界限作为圈矿约束。同一矿化层矿体圈定为同一个矿体。遇到断层时进行尖灭处理。未见矿工程及无工程控制区域按1/2工程间距进行尖灭处理。

4) 剖面投影

将圈定的矿化线框投影到勘探线剖面上,并将矿化层矿体A, B, C, D, E按图层保存。不同图层设置不同颜色。

完成矿化线后,进行矿体剖面圈矿。由于矿石中Co品位较低,按当前行情,其经济价值无法有效利用,故矿体圈矿采用Cu指标。以矿体圈矿指标Cu品位 $\geq 1\%$ 进行单工程圈矿。在矿体模型圈矿过程中,除以地层及断层线作为约束外,还要以矿化范围作为约束,使矿体模型范围小于矿化模型,圈矿更合理。如图7所示。

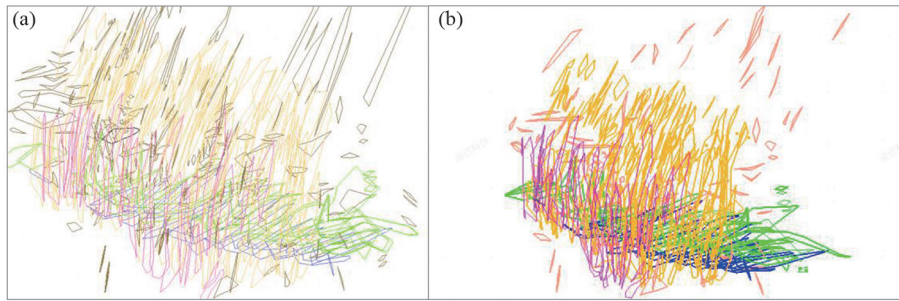


图7 (a)矿化及(b)矿体解译线

Fig. 7 (a) Mineralization and (b) ore body interpretation line

3.4 基于剖面平行线框构建矿体模型

基于点、线、线框联合建立地质体模型,并根据不规则三角网格的原理,使地质体模型成为封闭的空间实体或空心体。根据对地质解译圈矿资料的分析结果,结合DIMINE软件的多线框建模、线框建模及外推建模功能,合理建立矿区模型,完成矿体实体模型的构建。

1) 矿体按对应关系分组

将不同矿体的圈矿线框按属性划分大类,完成自动建模。然后根据空间关系,分析模型的合理性,将模型不合理区域的圈矿线框移存为图层。移存部分一般对应零星小矿体,需采用其他建模方式完成矿体模型构建。通过上述筛选方法将圈矿线框进行分组后,对不同组内线框分别采用不同建模方法完成建模。

分组结果表明:主矿体部分的A, B, C矿体厚大且分散,宜采用多线框自动建模法建模;D矿体及部分E矿体为层状矿体,矿体较薄,宜采用常规连线框建模法建模;区域内小矿体宜采用直接两边外推建模法建模。这样可以达到建模效率高、模型形态准确合理的效果。

2) 平行剖面多线框自动建模

通过研究分析矿体产状及对应关系,发现A, B, C矿体分支结构复杂。特别是C矿体,受断层影响,相邻剖面地质解译的对应矿体数量变化极大。如果采用传统剖面连线框方法对这些矿体建模,难度大,精度低。

为此,选用DIMINE软件的多线框建模方法完成模型创建,如图8所示。采用这种方法建模时,网格尺寸越小,所得模型的表面越光滑,也越接近地质体真实值,但占用内存也越大。综合考虑模型

体积及电脑承载能力,将多线框建模的单元网格长宽尺寸设计为X方向1 m, Y方向1 m,经实际验证,建模误差可控制在1‰以内。

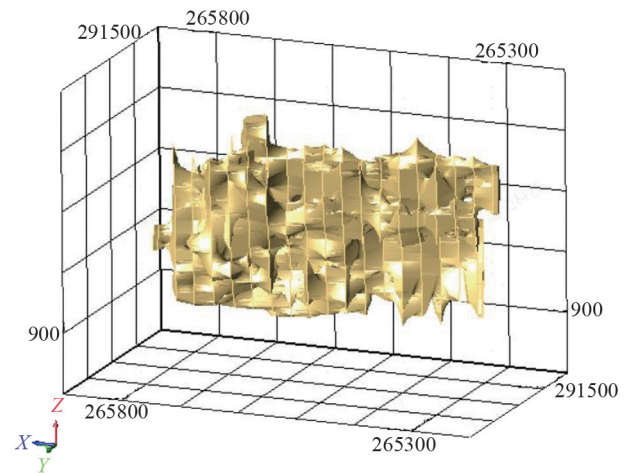


图8 多线框自动建模

Fig. 8 Multi-wireframe automatic modeling

3) 剖面连线框建模

检查自动建模后矿体位置,针对局部突变矿体、产状细长矿体等处未能自动连接的矿体轮廓线框,理清剖面间轮廓线的对应关系,再用三角面片连接这些轮廓线,完成端部处理,最后合并形成地质体模型。

4) 外推建模

E矿体及小矿体绝大部分相邻剖面无对应解译线。针对这部分矿体,采用单剖面外推1/2剖面间距尖灭至点或线的方式建模。如图9所示。

5) 模型合并及异常数据处理

多线框自动建模成果为独立矿体,无需模型合并,且无异常数据。对于剖面连线框及外推建模的数据,需按照矿体单元进行实体合并,同时进行有

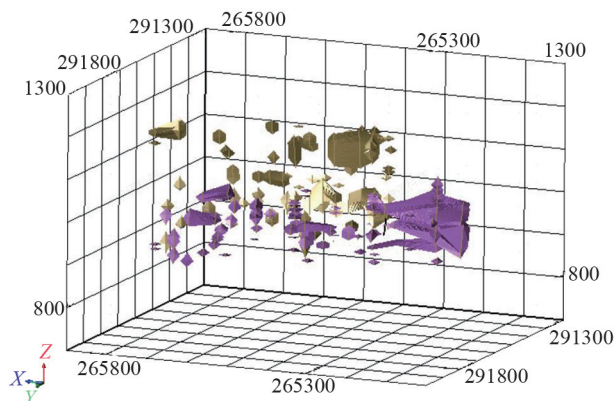


图9 剖面连线框及外推建模
Fig. 9 Profile wireframe and extrapolation modeling

效性检测。检测中常出现无效边及交叉三角面，此类问题多由解译线框点异常导致，需在检查及修改线框后以连线框法和外推法重建模型。模型重建后需再次进行模型合并及有效性检测。如此往复，直至有效性检测无异常，才表明模型建立成功。

基于以上建模方法及模型处理方法，先完成矿化模型建立，再结合矿化模型约束建立矿体模型，如图 10 所示。此次建立的矿化模型 170 余个，总建模

体积 19127769 m³；矿体模型 180 余个，总建模体积 13082120 m³。根据成矿规律可知，1 个矿化模型中可能包含多个矿体，故矿体模型数量多于矿化模型。

3.5 建模效率评估

对比传统建模总耗时，以整个建模、修正到最终检测通过的总耗时缩减量作为本研究建模效率的评价指标(表 1)。该效率参数可作为后续储量估算等工作中预估耗时的基准。由于建模时间受工程师技术熟练程度、矿体复杂程度等多种因素影响，难以定量计算效率提升幅度。因此，本文基于上述建模过程，对建模总时间进行工程经验性对比，为相关研究人员提供量化参考。

4 结 论

本文针对复杂矿体三维建模中几何形态复杂、多分支复合导致的建模效率低下及精度不足问题，提出并实践了一种基于矿体轮廓线距离场构造的高效建模策略。主要研究内容与结论如下：

1) 通过整合隐式建模(基于轮廓线距离场构造)与显式建模(轮廓线拼接法)的优势，构建了“多线

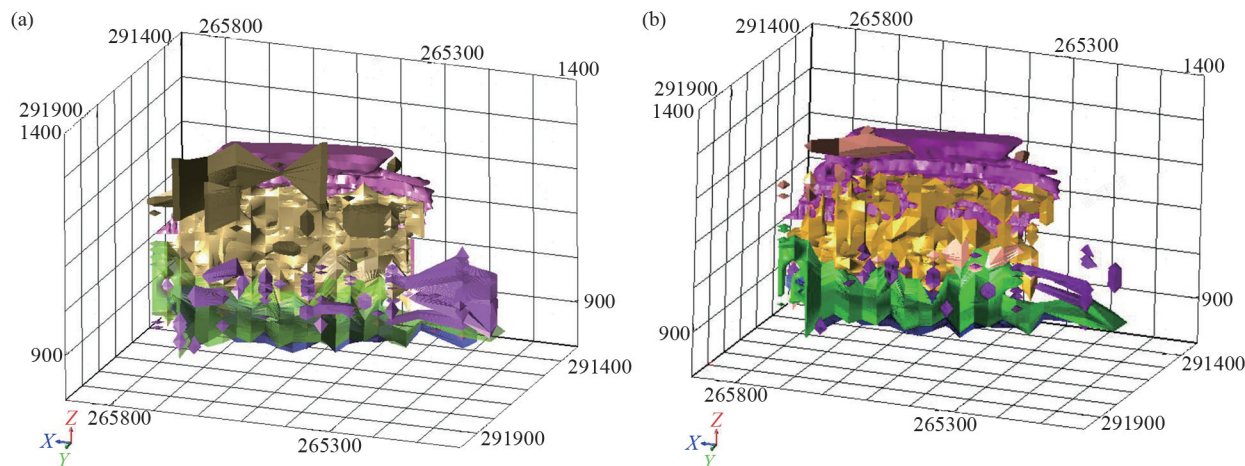


图 10 (a)0.5% 和(b)1% 矿化模型(紫红色为 A 矿体、黄色为 BC 矿体、绿色为 D 上矿体、蓝色为 D 下层矿体、紫色为 E 矿体)

Fig. 10 (a)0.5% and (b)1% mineralization model (purple red: ore body A; yellow: ore body BC; green: upper ore body D; blue: lower ore body D; purple: ore body E)

表 1 建模效率评估

Table 1 Modeling efficiency assessment

	矿体轮廓线圈定时间/h	剖面连线框建模时间/h	有效性检测及异常修改时间/h	总计时间/h
传统建模方法	30~40	150~300	50~100	230~440
本文建模方法	35~45	1~2	10~20	46~67
耗时缩减量	~ 15%	99%	80%	80%

框自动建模—局部连线框修正—零星矿体外推建模”的分级建模体系。该方法实现了主体矿体高效自动化建模、局部突变精准修复与零星矿体模型快速构建。

2) 本研究模型构建方法效率高, 模型精度可靠。基于DIMINE平台, 以刚果金某复杂矿区(含多级推覆构造、断裂及3类矿化层位)为对象进行了建模实践验证。全流程时间由传统方法的230~440 h缩短至46~67 h, 其中主体矿体多线框自动建模仅需1~2 h。成功构建了170余个矿化模型(体积1912.8万 m^3)和180余个矿体模型(体积1308.2万 m^3)。经实体闭合性、拓扑有效性检测, 以及基于原始剖面图建立的模型与矿山提供的资源量及采空区消耗资源量进行对比, 发现误差均在5%以内, 证明模型误差可控。同时, 经刚果金专家利用Micromine验证, 证明此次建立的模型可靠。

3) 本研究通过矿体编号分组、圈矿线框分类管理等途径总结出的建模策略可适配不同产状矿体的建模需求, 为国内外类似复杂矿床(如多分支、薄矿脉、断层切割矿体)建模提供了可复用的技术路径。

4) 未来可通过进一步优化距离场算法的自适应网格划分机制, 提升突变区域自动化处理能力, 并可通过探索人工智能驱动的地质解译线生成技术, 实现全流程智能化建模。

参考文献:

- [1] 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, 72.
- [2] 贺宇昊, 陈勇, 苗作华, 等. 矿体三维建模方法研究进展[J]. 金属矿山, 2015(3): 1-7.
- [3] 熊涛. 基于三维模型的基建探矿设计实例[J]. 有色冶金设计与研究, 2025, 46(1): 1-4, 22.
- [4] HODGKINSON J H, ELMOUTTIE M. Cousins, siblings and twins: a review of the geological model's place in the digital mine [J]. Resources, 2020, 9(3): 1-10.
- [5] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 地质科学大数据背景下的矿体动态建模方法探讨[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 59-68.
- [6] 荆永滨, 王李管, 毕林, 等. 复杂矿体的块段模型建模算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 97-100.
- [7] 朱学礼. 基于DGSS体系的数字地勘及矿体三维建模技术在新城金矿中的应用[J]. 黄金科学技术, 2011, 19(6): 65-68.
- [8] 邵文星, 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.
- [9] 习龙, 倪玉根, 何健, 等. 基于GMS软件的海砂矿体三维地质建模和资源量估算[J]. 地质与勘探, 2022, 58(2): 429-441.
- [10] 罗周全, 鹿浩, 刘晓明, 等. 矿山三维实体建模[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007(4): 9-15.
- [11] 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.
- [12] WU Z H, BI L, ZHONG D Y, et al. Orebody modeling method based on the coons surface interpolation [J]. Minerals, 2022, 12(8): 1-15.
- [13] IRAKARAMA M, LAURENT G, RENAUDEAU J, et al. Finite difference implicit structural modeling of geological structures [J]. Mathematical Geosciences, 2021, 53(5): 785-808.
- [14] GROSE L, LAURENT G, AILLÈRES L, et al. Structural data constraints for implicit modeling of folds [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 104(2): 80-92.
- [15] LI B Y, ZHONG D Y, WANG L G. Repair of geological models based on multiple material marching cubes [J]. Mathematics, 2021, 9(18): 1-13.
- [16] 郭甲腾, 吴立新, 周文辉. 基于径向基函数曲面的矿体隐式自动三维建模方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2130-2135.
- [17] 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.
- [18] YANG Z X, CHEN Q Y, CUI Z S, et al. Automatic reconstruction method of 3D geological models based on deep convolutional generative adversarial networks [J]. Computational Geosciences, 2022, 26(5): 1135-1150.
- [19] GONÇALVES I G, KUMAIRA S, GUADAGNIN F. A machine learning approach to the potential-field method for implicit modeling of geological structures [J]. Computers & Geosciences, 2017, 103(6): 173-182.
- [20] HILLIER M J, SCHETSELAAR E M, DE KEMP E A, et al. Three-dimensional modelling of geological

surfaces using generalized interpolation with radial basis functions [J]. Mathematical Geosciences, 2014, 46(8): 931-953.

[21] 毕林, 刘晓明, 陈鑫, 等. 一种基于矿体轮廓线的三维建模新方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1359-1365.

Refined and Efficient Modeling Technology and Application for Complex Ore Body

GAO Yufei¹, YANG Xinfeng², ZHENG Bin¹, QIAN Zhaomin¹, WANG Zhuo³, CHEN Xiaokang⁴
(1. Kambove Mining SAS Co., Ltd., Likasi 1004131, Congo; 2. Changsha Dimine Technology Co., Ltd., Changsha 410083, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 4. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330031, China)

Abstract: Complex orebodies often exhibit intricate geometries, extensive branching and fault truncation, and the traditional practice of manually stitching wireframes one by one is inefficient and highly subjective. This paper proposed a refined and efficient modeling strategy tailored to complex orebody geometries. It formalized a signed distance field (SDF) definition and an efficient construction method based on contour lines, and implemented a hierarchical workflow—multi-wireframe automatic one-step modeling, local wireframe correction, and sporadic extrapolation modeling—that balanced automation with boundary fidelity. The method was validated on a structurally complex concession in the Democratic Republic of the Congo using the DIMINE platform. The overall modeling cycle was reduced from 230~440 h to 46~67 h. Over 170 mineralization models ($\approx 1.91 \times 10^7 \text{ m}^3$) and more than 180 orebody models ($\approx 1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$) were successfully produced. Obtained models passed closure and topological validity checks with controllable errors. Results demonstrated that the proposed approach substantially improved automation for complex orebody modeling while retaining geometric accuracy at local mutation zones via secondary repairs, and thus offered a general technical path and implementation scheme for similar complex deposits.

Key words: 3D modeling of ore body; automatic modeling; ore body contour; modeling of complex ore body; distance field construction

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.014

引文格式: 高翥飞, 杨新锋, 郑斌, 钱兆明, 王卓, 陈小康. 复杂矿体高效建模技术与应用[J]. 铜业工程, 2026(1): 146-154.
GAO Yufei, YANG Xinfeng, ZHENG Bin, QIAN Zhaomin, WANG Zhuo, CHEN Xiaokang. Refined and efficient modeling technology and application for complex ore body[J]. Copper Engineering, 2026(1): 146-154.