

基于三维可视化技术的矿产资源储量动态管理方法研究及应用

钱兵^{1,2,3}, 毕林^{1,4}, 陈鑫^{1,2}, 徐杨¹

- (1. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410011;
2. 矿山透明地质与数字孪生技术国家矿山安全监察局重点实验室, 湖南 长沙 410011;
3. 中国地质大学(武汉) 地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;
4. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为精确统计和计算固体矿产资源储量,以固体矿产勘查与开发过程中的探矿工程、采矿设计和工程实测等数据为基础,通过三维数字化方法和可视化技术分别构建三维地质属性模型、设计采出模型和采矿工程三维模型,并将资源储量的统计计算与这些三维实体模型关联,提出了适应于固体矿产资源储量的三维统计计算方法与数据管理内容。结果表明,运用三维数字化方法能够准确、精细统计和计算资源储量与生产矿量,精确统计资源储量类型,并且能够根据不断增加的矿体控制点信息进行资源储量的动态更新,有效提升了固体矿产资源储量动态管理的效率。实际应用案例进一步证实了固体矿产资源储量三维数字化动态管理方法的可行性与有效性。

关键词: 三维地质模型;三维统计计算;资源储量分类;数据动态更新;资源储量管理

中图分类号: P964 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0048-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.05.14

矿产资源储量具有独特的三维特性及动态变化性^[1-3],其几何形态和空间关系的复杂程度极高,采用常规二维平面图和统计表格的管理方法管理矿产资源储量存在明显局限性^[4-5]。局限性主要表现在:1)统计计算精度低。目前大部分矿山用于统计计算资源储量的图形/模型和数据管理逻辑分离,无法描述矿体空间的内部特征及组成部分之间的拓扑关系。2)资源储量分类统计难度大。常规方法难以对矿山开采损失和设计损失进行精确统计,导致矿山无法按照《固体矿产资源储量分类》(GB/T 17766—2020)要求对资源量和储量进行分类统计。3)动态更新过程复杂。难以根据不断增加的矿体控制信息动态修正统计计算的模型/图形,不能及时掌握矿山的开采变化情况。4)数据管理内容不明确。统计模型与数据管理之间的关联性较差,大部分矿山对资源储量过程数据的管理内容不甚明确,导致矿业集团及管理部门无法对资源储量数据进行追溯和验证。

随着数字矿山技术的不断进步,矿山管理正在逐步从二维向三维转型,三维地质建模与可视化技术已成为构建数字矿山的关键^[6-8]。这些技术能够实现矿山资源储量的动态化、规范化管理^[9-10]。运用三维地质模型与可视化技术进行资源储量的动态管理已成为行业发展的重要趋势^[11-14]。笔者通过三维数字化方法和可视化技术分别构建三维地质属性模型、设计采出模型和采矿工程三维模型,以期将资源储量的统计计算与三维实体模型相关联,提出适应于固体矿产资源储量的三维统计计算方法与数据管理内容。

1 矿产资源储量三维动态管理概述

矿产资源储量三维动态管理是指在矿产地质勘查与开发过程中,针对资源储量的变化,通过三维数字化技术持续开展资源储量数据的统计计算、更新、审查与核实的过程,这一管理方式是适时、准确掌握矿山资源储量保有与变化情况的重

收稿日期: 2025-05-30;修回日期: 2025-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC2909503)

要基础性工作。

近年来,随着三维数字化、可视化技术和矿产勘查与开发技术的不断进步^[15-16],国内矿山在三维地质建模、数字开采等信息化建设方面取得了显著进展^[17-20]。《固体矿产资源量估算规程》(DZ/T 0338—2020)、《固体矿产勘查三维地质建模技术要求》(DZ/T 0383—2021)、《矿山资源储量管理规范》(DZ/T 0339—2022)等的陆续实施,对资源量的估算、管理和三维地质建模发挥了重要作用。然而,资源储量动态管理领域仍存在数据质量参差不齐、动态监管难度较大等问题^[21-22]。如何将现有成果有效整合并应用于资源储量的动态管理,是亟待解决的挑战。

通过深入调查复杂地质条件下的固体矿产勘查与开发过程,结合《固体矿山矿产资源储量三维动态管理技术要求》(DZ/T 0478—2024),提出了一种新的资源储量管理思路(图1)。在考虑固体

矿产资源储量动态管理的可行性、通用性和适用性的基础上,首先,矿山企业根据矿产勘查与开发各阶段的探矿工程数据,构建三维地质结构模型和三维地质属性模型;其次,在资源储量统计单元内,利用采矿设计数据、采掘或采剥工程实测数据,分别构建设计采出模型、采矿工程三维模型;然后,通过设计采出模型、采矿工程三维模型对三维地质属性模型进行约束,以统计计算资源储量,包含动用量、开采损失量、非开采损失量、重算增减资源储量及生产矿量;随着开采活动的推进,还需根据矿山基建探矿和生产探矿数据,以及矿床工业指标变化信息,按照矿山统计周期持续进行三维地质属性模型及资源储量的调整或更新;最后,管理部门可通过管理过程与结果数据、建模与估算参数,实现矿产资源储量的查询、追溯与验证。本方法适用于固体矿山矿产开发阶段的资源储量三维动态管理工作。

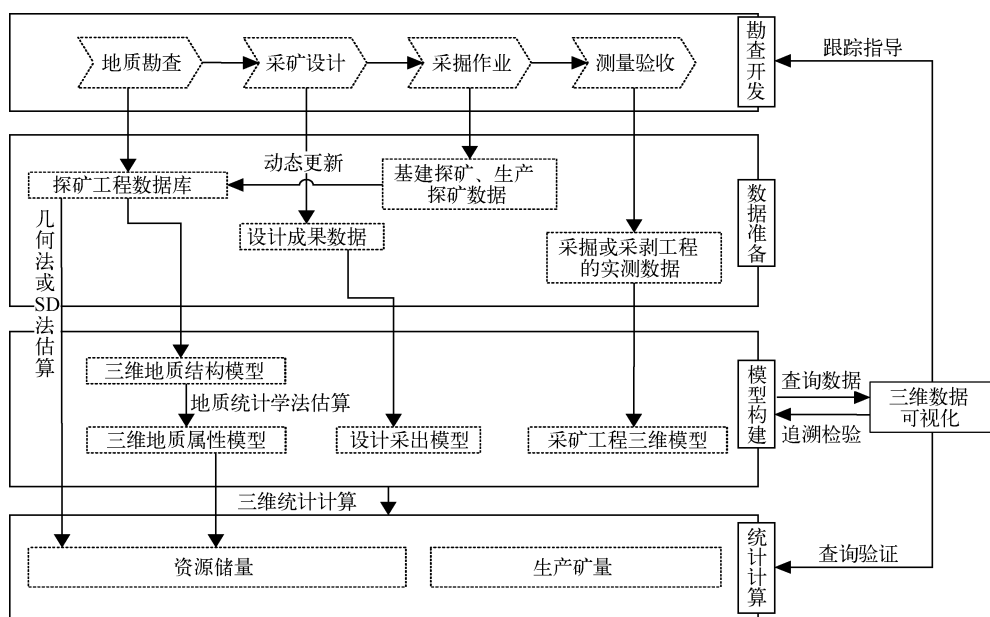


图1 固体矿产资源储量三维动态管理流程

Fig. 1 3D dynamic management flowchart of solid mineral resources and reserves

2 矿产资源储量三维模型构建技术

在三维模型构建方面,三维地质属性模型、设计采出模型和采矿工程三维模型的构建,是实现矿产资源储量三维动态管理的关键。推荐性建模方法为固体矿山矿产资源储量的三维动态管理提供了有效技术支撑,在确保数据准确性和模型精

度的同时^[23-24],也为实现资源有效管理与可持续利用提供了重要参考。

2.1 基于探矿数据的三维地质属性模型构建

三维地质属性模型是用于描述地质实体(包括矿体及其破坏性构造或岩浆岩等)的内部物理和化学属性参数的三维表示。该模型依托于体元数据结构,以三维地质结构模型(亦称“矿床三维

模型”或“三维矿体模型”)的界面为依据,整合了地质构造、岩性、矿化、地球物理、地球化学等属性信息。

目前,一般采用体素法和分层网格法技术路径构建三维地质属性模型^[25-26]。体素法依据勘探数据和地质信息等,构建出包含矿体、断层、岩性单元等的三维地质结构模型^[27-28],进而建立三维空间网格^[29],每个网格单元(体素)代表一个具体的体积单元。随后,通过应用插值技术(如线性插值、常量插值、克里金插值等),将勘探点的数据插值到三维空间网格中^[30],将插值得到的属性值赋给每个体素,这些属性值可以是矿物含量、体重、岩石类型、孔隙度等(图 2a)。这一过程确保了三维地质属性模型能够精确反映地质实体的内部特征。分层网格法是通过隐函数插值建模技术创建三维网格(图 2b),这些网格单元可以是规则的立方体或六面体,或者是根据地质数据定制的非规则状。通过为这些单元插值矿物含量、体重、岩石类型等属性,分层网格法能够构建出既反映地质结构又包含地质属性信息的三维模型。

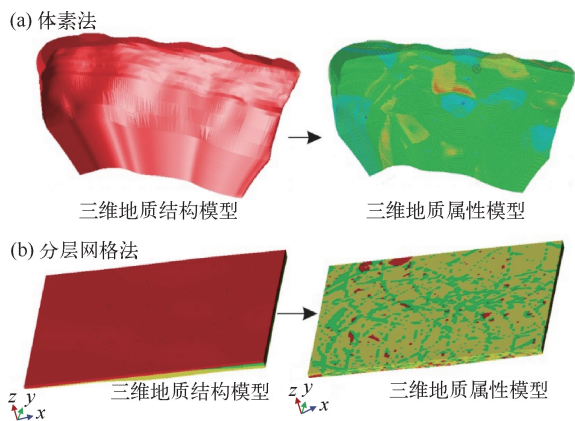


图 2 分层体素法和分层网格法构建三维地质属性模型

Fig. 2 3D geological property models constructed using layered voxel method and layered grid method

在地质建模领域,体素法因其在统计分析和数值计算方面的高效表现而受到推崇,它能够详细描述复杂的地质结构;但该方法在单元格拼接时可能无法精确表示地质体边界。而分层网格法在数值计算和地质结构表达上更加高效,尤其在处理体素法难以适应的薄层状矿体时表现尤为突出;但在表达复杂地质结构时,分层网格法可能存在一定的局限性。因此,在实际应用中,应根据矿

体的具体形态和特性,谨慎选择最适合的三维地质属性建模方法。

除体素法和分层网格法,矿山企业可根据实际情况和三维地质属性模型的具体要求,探索和采用其他建模技术。矿山企业可结合勘探数据的详细程度、地质体的复杂性,以及预期的模型精度等因素,选择或开发最适合其特定需求的建模方法。无论是采用现有的体素法、分层网格法,还是创新的混合建模技术,关键在于确保所构建的三维地质属性模型能够准确反映地质实体的内部结构和属性特征,从而为资源储量的精细化管理和动态更新提供坚实的数据支撑。

2.2 基于开采设计数据的设计采出模型构建

设计采出模型是本研究定义的一种三维数字化模型,用于表征采矿设计中预定采出的矿产资源空间范围。该模型的构建与矿产开采规划和设计紧密联系,其核心目标是为矿产开采活动提供精确的空间几何范围。

在实际开采中,设计采出模型用来表示露天矿的设计开采边界、设计爆破范围及地下矿采场的相关信息。该模型为采矿单元提供必要的空间几何范围,也为资源储量统计工作提供可靠的数据基础。

2.2.1 设计采出模型的建模数据分类

建模数据通常为矿产的空间范围和采矿单元的设计边界。根据数据来源的不同,用于构建设计采出模型的建模数据可以划分为露天矿设计数据和地下矿设计数据。露天矿设计数据主要用于确定或影响露天采剥边界的位置,确保采矿活动在规定的范围内进行;这类数据包括坡顶线(界定矿坑顶部边界)、坡底线(辅助确定矿坑的底部边缘)和道路线(控制矿体边界)。地下矿设计数据则包含矿产开采的具体规划和设计信息,用于明确需要采掘的矿产空间范围;这些数据通常涵盖中段运输巷、斜坡道、溜井、切割巷、天井、盲沟等设计工程数据,以及炮孔等设计开采数据。

2.2.2 设计采出模型的构建方法

因采区类型和可用数据源的不同,相应设计采出模型的构建方法也有差异。露天矿和地下矿的构建方法各有特点。

对于露天矿,设计采出模型的推荐构建方法主要包括:1)坡顶线和坡底线构建。利用坡顶线和坡底线的设计数据,通过辅助设计软件精确构

建这些线条,以准确表示矿坑的上下边界。2)道路线绘制。道路线数据一般通过测量工具获取。3)连线框和约束三角网构建。这些方法主要用于构建地形和矿坑表面,将坡顶线、坡底线和道路线等数据转化为三维模型(图 3a)。

对于地下矿,设计采出模型的推荐构建方法包括:1)连接线绘制。利用开拓设计、采准设计或回采设计的数据,手动或自动绘制连接线,以确定地下采区的边界。2)闭合面创建。为了确保地下采区边界的正确封闭,创建闭合面代表未开采区域与开采区域之间的分界。3)连线框的使用。连线框工具可以用于构建地下采区的三维模型,将连接线、闭合面等数据转化为可视化模型(图 3b)。

在资源储量三维动态管理过程中,矿山企业应根据地质条件、采矿技术要求及资源储量管理的具体需求,灵活选择或创新设计采出模型的构建方法。推荐方法提供了标准化的框架;但企业在实际操作中应结合自身实际情况,自主开发和优化建模流程,以确保设计采出模型能够精确反映矿山的实际开采条件。

设计采出模型的范围应与资源储量统计范围相匹配,确保资源估算和矿产开采计划的一致性。模型的精确表达对于采矿过程中的决策制定和资源储量管理至关重要,能够为矿山企业提供准确的采矿设计空间范围信息,从而实现资源储量的有效管理和开采计划的优化。

2.3 基于工程实测数据的采矿三维模型构建

采矿工程三维模型是本研究定义的一种基于实测数据构建的三维数字化模型,旨在准确描绘采矿工程与掘进工程的空间范围。该模型为采矿工程领域的决策制定、资源管理、安全监测和工程规划提供了可视化工具,涵盖了露天采区的采场状况、台阶形态,以及地下矿井的井巷结构、采空区形状等空间信息。基于实测数据构建的采矿工程三维模型,能够精确反映采矿工程和掘进工程的实际状况^[31],从而提升采矿活动的效率与安全性。

2.3.1 采矿工程三维模型的建模数据分类

采矿工程三维模型的建模数据通常来源于工程实测数据,包括露天矿和地下矿的多种采矿工程实测数据。

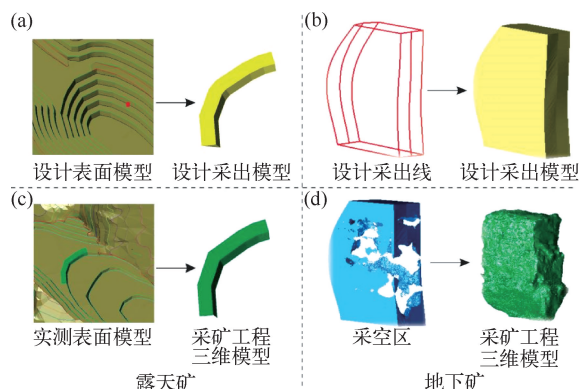
对于露天矿,建模数据通常包括采场现状数据(如开采深度、坡度、坑壁形状等)、台阶数据(表征采矿逐层进展)、测点数据(构建地表和坑壁的

三维模型)、点云数据(构建高精度地形和坑壁模型)、影像和差分 POS 数据(用于纹理贴图 and 模型的视觉增强)。

对于地下矿,建模数据通常包括井巷三维数据(描述地下矿井的井筒、巷道和通道的几何形状和位置)、采空区数据(描述地下矿井中已开采的空区和未开采的矿石或岩石)、测点数据(确定不同位置的地理坐标)和点云数据(通过三维激光扫描获得,构建地下井巷和采空区的高精度模型)。

2.3.2 采矿工程三维模型的构建方法

构建采矿工程三维模型的方法较多,需根据可用的数据和项目需求选择合适的方法。露天采矿工程三维模型的构建方法包括:1)连线框和约束三角网。这是一种传统方法,根据实测的坡顶线、坡底线和道路线等数据,构建地表的三维模型。2)点云重建。利用点云数据,采用点云重建算法,生成地表和坑壁的三维模型。3)实景建模。利用常规摄影或倾斜摄影测量获得的影像和差分 POS 数据,创建具有真实感观的模型(图 3c)。地下采矿工程三维模型的常用构建方法包括:1)插值和连线框。根据测点数据和井巷三维数据,使用插值方法估计地下采矿工程的形状和空间位置,连线框方法可连接不同的地下元素,如井筒和巷道。2)点云重建。利用点云数据构建地下采矿工程三维模型,提供高精度的地下结构信息。3)封闭面。使用封闭面技术创建准确的采空区模型,用于分析地下稳定性和管理资源(图 3d)。



(a)露天矿设计采出模型;(b)地下矿设计采出模型;
(c)露天矿采矿工程三维模型;(d)地下矿采矿工程三维模型。

图3 设计采出模型和采矿工程三维模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the designed mine-out model and 3D excavation engineering model

采矿工程三维模型的范围要与资源储量统计范围相匹配,确保资源统计和工程实测的一致性。该模型能准确地表达采剥或采掘工程的空间范围,为采矿工程和掘进工程的监测和管理提供支持。

上述建模方法仅为推荐性指导,旨在为矿山企业提供科学的建模参考。鉴于每个矿山的地质结构、开采条件及技术需求可能存在显著差异,矿山企业可根据特定需求,使用更为个性化的建模策略,以确保所构建的三维模型能够精准映射资源储量的空间分布、采矿工程的详细特征等。

3 矿产资源储量三维统计方法研究

统计计算是矿产资源储量三维动态管理的核心环节,它涵盖资源储量统计计算方法的选取、数据管理的规范化等方面。旨在通过科学的方法,实现资源储量的精确统计和高效管理,从而为矿山企业的运营决策提供坚实的数据支撑。

3.1 资源储量三维统计计算方法及其体元集确定

资源储量三维统计计算方法是通过利用设计采出模型、采矿工程三维模型等空间范围,约束三维地质属性模型,从而获取资源储量统计体元集,并对该体元集中的体元进行矿石量或有用组分量统计。确定资源储量统计体元集的方法(图4)有:a)分别使用设计采出模型和采矿工程三维模型来约束三维地质属性模型,确定各自的体元集;然后,通过空间运算处理这2种体元集,合并得到最终的资源储量统计体元集。b)通过设计采出模型和采矿工程三维模型的空间运算,以确定待统计计算量的空间范围;利用该空间范围来约束三维地质属性模型,进而确定资源储量统计体元集。

资源储量的矿石量和有用组分量的统计计算公式分别见式(1)~式(2)。

$$Q_s = \sum_{i=1}^n V_i \times D_i, \quad (1)$$

式中: Q_s —矿石量; V_i —第*i*个体元体积; D_i —第*i*个体元的体积质量。

$$P_s = \sum_{i=1}^n V_i \times D_i \times C_i, \quad (2)$$

式中: P_s —有用组分量; C_i —第*i*个体元的品位。

3.2 基于三维模型的资源储量分类统计

在国际矿产资源分类领域,诸如澳大利亚的JORC(Joint Ore Reserves Committee)标准和加

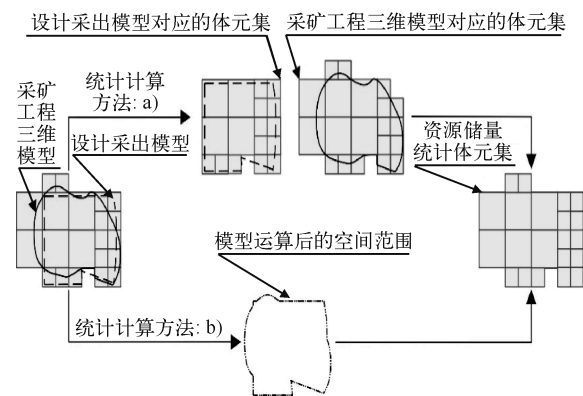


图4 矿产资源储量统计体元集的三维计算过程

Fig. 4 3D calculation for mineral resources and reserves statistical voxel set

拿大的NI 43-101标准等,均提供了矿产资源分类和评价指导。这些标准不仅为资源量和储量的分类提供了明确框架,还对分类过程提出了严格的要求。相较之下,中国在资源储量分类方面面临较大挑战。

随着《固体矿产资源储量分类标准》(GB/T 17766—2020)的实施,资源储量的分类和管理逐渐与国际接轨^[32-33]。依据该国家标准,固体矿产资源的储量被明确划分为资源量与储量两大类,资源量根据地质可靠性的不同,从低到高依次细分为推断资源量、控制资源量和探明资源量3个等级;而储量则专指那些在经济上可行、从探明资源量或控制资源量中可被开采的部分。在分类过程中,必须充分考虑矿石损失和贫化的可能性,据此,储量可进一步细分为可信储量与证实储量2个子类。

本次采用三维数字化技术对资源储量类型进行统计,主要依据采矿设计、矿山勘探、预可行性研究,以及可行性研究等阶段确定的资源储量类型范围,对三维地质属性模型中的体元进行精确的资源储量类型赋值;在统计计算阶段,根据体元的资源储量分类属性信息,对不同类型进行统计分析,以实现资源储量类型的精确统计计算。

3.3 资源储量三维统计计算的实现

3.3.1 三维统计的应用分析

三维统计依托于三维模型,通过数字采矿工具对资源储量统计计算体元集进行统计计算,直接得出资源储量。该方法涵盖动用量、开采损失量、非开采损失量、重算增减资源储量、查明矿产资源及生产矿量。按照《矿山资源储量管理规范》

的相关定义,动用资源量指在未开采资源范围内,设计采出模型与采矿工程三维模型的并集空间范围内的资源量;开采损失量指设计采出模型与所有采矿工程三维模型外部交集空间范围内的资源量;非开采损失量指设计采出模型外部空间范围内的资源量(图5)。

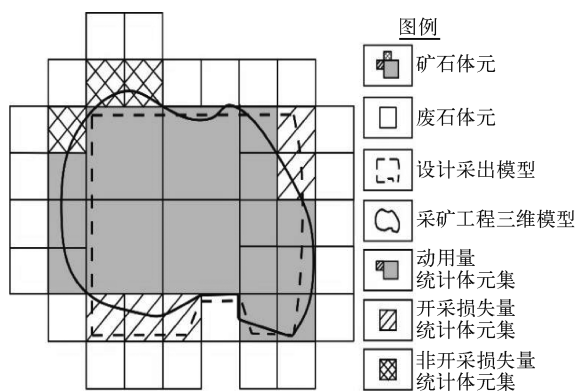


图5 动用、开采损失量和非开采损失量统计体元集示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the statistical voxel set for mined resources and reserves, mining losses, and non-mining losses

重算增减资源储量为重算后与重算前未开采资源储量之差。其中,未开采资源储量是指上一管理周期末,设计采出模型外部与采矿工程三维模型外部交集空间范围内的资源储量。查明矿产资源储量可通过几何法、SD法、距离幂反比法或地质统计学法等方法进行估算。在无法获取采空区工程实测数据的采矿方法(如无底柱分段崩落法)中,可利用设计采出模型来统计计算动用量。生产矿量是在开拓、采准与备采的空间范围基于相应工程的完成情况确定,开拓矿量、采准矿量、备采矿量分别对应于开拓空间、采准空间与备采空间内的储量。

3.3.2 算术计算的应用分析

算术计算基于三维计算数据,并遵循《矿山资源储量管理规范》(DZ/T 0399—2022)等相关规定,通过加减等算术运算得到,该方法包含累计查明矿产资源量、保有资源储量、开采量、非开采损失扣减量等指标。

4 矿产资源储量数据管理与动态更新

构建动态管理机制对于实现资源储量的实时

监控和有效管理至关重要。为及时了解资源储量的变化,须建立完善的动态监测体系,运用现代监测技术和信息技术对矿山开采活动进行实时监控。

在资源储量的统计计算中,对资源储量数据进行动态管理的要素包括但不限于:三维地质结构模型、资源储量分类、设计采出模型、采矿工程的三维模型、样品长度组合数据、矿化趋势面的三维模型,以及三维地质属性模型的基本参数、资源量估算参数、空间参照系信息和统计计算结果。

矿山应根据勘探和开采工作的进展、监管部门的要求、矿山管理的需要或者市场和技术条件变化,定期(如每月、每季度或每年)对资源储量进行动态更新。矿山及其管理部门可以利用管理数据中的信息和参数,通过三维可视化技术对资源储量进行验证;采用三维可视化统计计算方法对资源储量进行查询和验证;根据资源储量在各统计周期内的变动情况,对资源储量的过程数据进行追溯和检验;并根据资源储量的动态变化,对矿产勘查与开发活动进行指导和监管。

5 三维可视化技术在矿产资源储量管理中的应用实例

某矿山作为中国重要的铁、铜等大宗紧缺矿产资源的供应基地^[34-35],采用房柱法进行地下开采。为了实现矿山资源储量的精细化统计管理,该矿山引入了DIMINE数字采矿软件,实施了资源储量的三维动态管理,以此提高矿产资源的开采效率和利用效果。

本研究利用该矿山地质测量、地球物理、地球化学、钻孔等勘探工程数据,采用克里金法对铁铜品位进行了三维空间插值建模,构建了三维地质结构模型(图6a)和三维地质属性模型(图6b)。此外,结合该区域的采矿设计数据,如开采方案、采场布置和采矿参数等,采用Delaunay三角剖分法对设计采出范围进行了三维空间建模,创建了设计采出模型(图6c、6d)。同时,利用该区域的工程实测数据,包括巷道和采场等,通过三维激光扫描仪对采矿工程进行了三维空间测量,构建了采矿工程的三维模型(图6e、6f)。最终,结合三维实体模型,运用布尔运算和体积计算等方法,对资源储量进行三维统计计算(图6g),并依据《固体矿产资源储量分类》(GB/T

17766—2020)进行了资源储量分类统计,将资源储量与相应的三维实体模型相联系,构建了资源储量数据库。

随着矿山开采活动的不断推进,该矿山依据新产生的基建勘探和生产勘探数据,定期(按季

度)对三维地质属性模型及资源储量进行调整或更新。同时,根据统计周期,对资源储量的过程与结果数据、建模与估算参数进行管理,实现了资源储量的可视化查询、追溯与验证(图 7),从而确保资源储量数据的准确性和时效性。

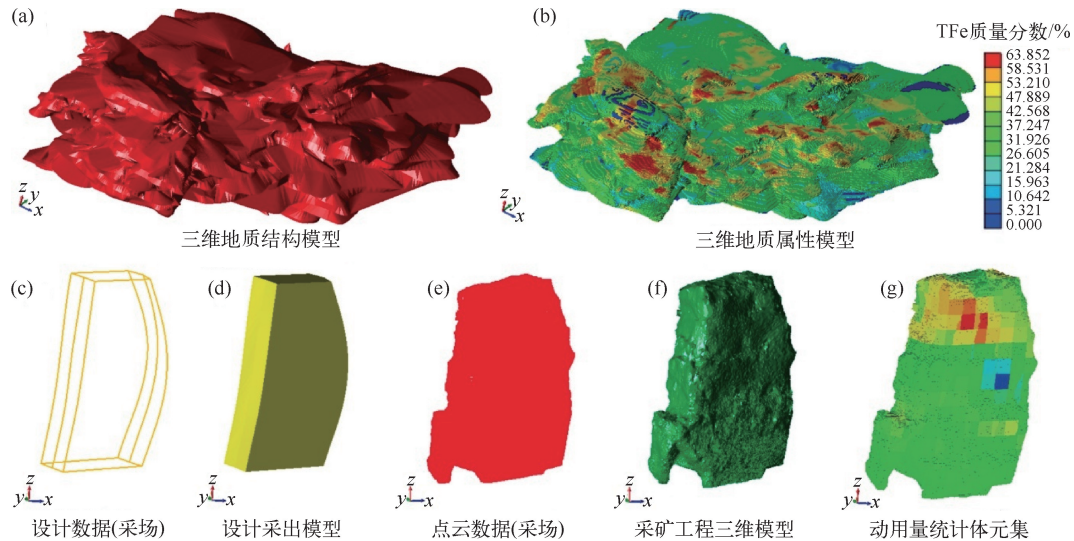


图 6 某矿山资源储量三维动态管理过程数据

Fig. 6 Schematic diagram of 3D dynamic management process data for mineral resources and reserves in a mine



图 7 某矿山资源储量三维动态管理系统界面

Fig. 7 Interface of the 3D dynamic management system for mineral resources and reserves in a mine

6 结论与展望

矿产资源储量三维动态管理是数字矿山建设的重要内容,精细、动态、准确地管理矿产资源储量能够为矿产资源合理开发和有效利用提供指导。以固体矿产勘查与开发过程中的探矿工程、采矿设计和工程实测等数据为基础,在精确构建三维地质属性模型、设计采出模型和采矿工程三维模型的基础上,深入分析了适应于固体矿产资源储量三维动态管理方法,并通过实例验证了该管理方法的可行性和有效性。研究结果为固体矿产资源储量动态管理提供了新思路。

尽管本研究在方法设计上充分考虑了固体矿山矿产开发过程中的多种实际应用场景,但仍存在一些局限性。当矿产资源储量更新频率较高时,三维模型的快速更新可能会对建模方法和效率提出较高要求,尤其是在大规模矿山场景中。复杂的矿体形态和地质条件也可能对模型精度提出更高要求,从而影响资源储量动态更新效率。未来可通过优化三维建模算法,探索更高效的数据处理和传输技术,实现基于三维可视化技术的矿产资源储量的动态高效管理。

参考文献:

- [1] 赵鹏大. 数字地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [2] SADEGHI B, MADANI N, CARRANZA E J M. Combination of geostatistical simulation and fractal modeling for mineral resource classification [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 149: 59-73.
- [3] 袁峰, 李晓晖, 田卫东, 等. 三维成矿预测关键问题[J]. *地学前缘*, 2024, 31(4): 119-128.
YUAN Feng, LI Xiaohui, TIAN Weidong, et al. Key issues in three-dimensional predictive modeling of mineral prospectivity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(4): 119-128.
- [4] 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 Baoyi, SHANG Jianga, WU Hongmin, et al. Application of 3D geological modeling and visualization in solid mineral resource estimation [J]. *Geology and Exploration*, 2007, 43(2): 76-81.
- [5] 张明明, 周涛发, 袁峰, 等. 长江中下游地区玢岩型铁矿床资源储量估算研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(7): 1215-1222.
ZHANG Mingming, ZHOU Taofa, YUAN Feng, et al. Reserves estimation of porphyry iron deposit in the middle-lower reaches of Yangtze River area, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(7): 1215-1222.
- [6] WU Q, XU H. Three-dimensional geological modeling and its application in digital mine [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57: 491-502.
- [7] 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): 1895-913.
WU Zhichun, GUO Fusheng, LIN Ziyu, 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.
- [8] 花卫华, 曾新灵, 郭丹阳, 等. 基于构造恢复理论的含复杂断层三维地质建模方法[J]. *地球科学*, 2024, 49(4): 1411-1420.
HUA Weihua, ZENG Xinling, GUO Danyang, et al. 3D geological modeling method based on tectonic restoration theory [J]. *Earth Science*, 2024, 49(4): 1411-1420.
- [9] SECCATORE J, MARIN T, DE TOMI G, et al. A practical approach for the management of resources and reserves in small-scale mining [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 803-808.
- [10] 刘伟. 某露天铀钼矿资源储量可视化动态管理研究[J]. *铀矿冶*, 2024, 43(4): 44-51.
LIU Wei. Research on visual dynamic management of resource reserves of a open-pit uranium molybdenum mine [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2024, 43(4): 44-51.
- [11] 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.
- [12] 吴冲龙, 何珍文, 翁正平, 等. 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术[J]. *地质通报*, 2011, 30(5): 642-649.
WU Chonglong, HE Zhenwen, WENG Zhengping, et al. Property, classification and key technologies of three-dimensional geological data visualization [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5): 642-649.
- [13] CAO X, LIU Z, HU C, et al. Three-dimensional geological modelling in earth science research: An in-depth review and perspective analysis [J]. *Minerals*, 2024, 14(7): 686.

- [14] 王亚文,高莹超,白德威.石头梅露天煤矿资源动态管理系统应用研究[J].铀矿冶,2025,44(1):85-92.
WANG Yawen, GAO Yingchao, BAI Dewei. Research on the application of dynamic resource management system in Shitoumei open-pit coal mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1): 85-92.
- [15] 武强,徐华.三维地质建模与可视化方法研究[J].中国科学:D辑,2004,34(1):54-60.
WU Qiang, XU Hua. Research on 3D geological modeling and visualization methods[J]. Science in China(Series D), 2004, 34(1): 54-60.
- [16] 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.
WANG Liguan, HE Changsheng, JIA Mingtao. 3D geological solid modeling technology and its application in engineering [J]. Metal Mine, 2006 (2): 58-62.
- [17] WU Q, XU H, ZOU X. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers & geosciences, 2005, 31(1): 35-43.
- [18] 向中林,王妍,王润怀,等.基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化过程研究[J].地质与勘探,2009,45(1):75-81.
XIANG Zhonglin, WANG Yan, WANG Runhuai, et al. 3D geological modeling and visualization process of mines based on borehole data[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(1): 75-81.
- [19] 袁峰,李晓晖,张明明,等.隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法[J].地质学报,2014,88(4):630-643.
YUAN Feng, LI Xiaohui, ZHANG Mingming, et al. Three dimension prospectivity modelling based on integrated geoinformation for prediction of buried orebodies [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (4): 630-643.
- [20] WANG G, LI R, CARRANZA E J M, et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 592-610.
- [21] 张丽丽,霍晨琛.地浸矿山四维资源储量动态管理方法研究[J].铀矿冶,2021,40(3):179-185.
ZHANG Lili, HUO Chenchen. Study on four-dimensional dynamic management method of resource and reserves in in-situ leaching mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40 (3): 179-185.
- [22] 赵凯培,张丽丽,霍晨琛,等.某铀矿山资源储量动态监测及资源利用研究[J].铀矿冶,2024,43(4):1-13.
ZHAO Kaipei, ZHANG Lili, HUO Chenchen et al. Dynamic monitoring of resource reserves and research on resource utilization in a uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 1-13.
- [23] 程朋根,刘少华,王伟,等.三维地质模型构建方法的研究及应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(2):309-313.
CHEN Penggen, LIU Shaohua, WANG Wei, et al. Study and application of a new 3D geological model construction method [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(2): 309-313.
- [24] 张渭军,王文科.基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J].大地构造与成矿学,2006,30(1):108-113.
ZHANG Weijun, WANG Wenke. 3D modeling and visualization of geological layers based on borehole data [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30 (1): 108-113.
- [25] JALLOH A B, KYURO S, JALLOH Y, et al. Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(4): 581-585.
- [26] TAGHVAEENEZHAD M, SHAYESTEHFAR M, MOAREFVAND P, et al. Quantifying the criteria for classification of mineral resources and reserves through the estimation of block model uncertainty using geostatistical methods: A case study of Khoshoumi uranium deposit in Yazd, Iran [J]. Geosystem Engineering, 2020, 23(4): 216-225.
- [27] 毕林,贾明涛,陈鑫,等.基于八叉树的复杂矿体块段模型高效构建[J].华中科技大学学报(自然科学版),2016,44(6):123-127.
BI Lin, JIA Mingtao, CHEN Xin, et al. Rapid and robust creation of block model based on octree from complex orebody model [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 123-127.
- [28] 陈柏平,崔凡,刘波,等.基于地质统计学反演的透

- 明化矿山岩性建模参数研究及应用[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(4): 427-436.
- CHEN Baiping, CUI Fan, LIU Bo, et al. Research and application of inversion parameters based on geological statistics inversion in transparent mines rock major modeling[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4): 427-436.
- [29] 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.
- BI Lin, LIU Xiaoming, CHEN Xin, et al. An Automatic 3D modeling method based on orebody contours[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(10): 1359-1365.
- [30] TURNER A K. Challenges and trends for geological modelling and visualisation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65: 109-127.
- [31] 张丽丽, 赵凯培, 肖诗伟, 等. 内蒙古某地浸铀矿山地质-开采模型对比研究与剩余资源量评价[J]. 铀矿冶, 2024, 43(4): 52-59.
- ZHANG Lili, ZHAO Kaipei, XIAO Shiwei et al. Comparative study of geological-mining models and evaluation of remaining resources of an in-situ leaching mine in Inner Mongolia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 52-59.
- [32] 李剑, 朱洋洋, 刘勇强, 等. 我国固体矿产资源储量分类与 CRIRSCO 分类定义术语对比[J]. 中国矿业, 2020, 29(2): 11-15.
- LI Jian, ZHU Yangyang, LIU Yongqiang, et al. Mapping between national standard "classification for resources/reserves of solid fuels and mineral commodities" and the classification system of CRIRSCO template from the view of definitions and terminologies [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(2): 11-15.
- [33] 孙远强, 陈建平, 范洪海, 等. 我国最新固体矿产资源储量分类标准与 JORC 2012 规范差异分析[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 23-27.
- SUN Yuanqiang, CHEN Jianping, FAN Honghai, et al. Differences analysis between the latest classifications for mineral resources and mineral reserves in China and JORC Code 2012 [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(11): 23-27.
- [34] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 1992, 11(1): 1-12.
- ZHAI Yusheng, YAO Shuzhen, LIN Xinduo, et al. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River [J]. Mineral Deposits, 1992, 11(1): 1-12.
- [35] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 109-119.
- MAO Jingwen, SHAO Yongjun, XIE Guiqing, et al. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of middle-lower Yangtze Valley metallogenic belt[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(2): 109-119.

(下转第 106 页)

