



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

透明回采工作面模型构建技术及智能化应用

王晓辉 刘再斌 陈宝辉 马良 高耀全 张东亮 杜易明 雷晓荣 晏俊生

引用本文:

王晓辉, 刘再斌, 陈宝辉, 等. 透明回采工作面模型构建技术及智能化应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 214–222.

WANG Xiaohui, LIU Zaibin, CHEN Baohui. Construction technology and intelligent application of transparent working face model[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 214–222.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究

Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/623337c8-793e-4eeb-acf6-95ef8f50260e>

透明工作面智能化开采大数据分析决策方法及系统研究

Research on big data analysis and decision system of intelligent mining in transparent working face
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 252–262 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/62bf9949-9d39-4600-9c2c-da0b68533560>

智能化高强度开采超长工作面围岩灾变预警技术

Early warning technology of surrounding rock in high-intensity mining of intelligent ultra-long working face
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/893edac6-5c75-4f84-82c2-ab5502e11332>

薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术

Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 67–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4115181f-fba2-4a87-84d1-3cc2f05bb6ac>

透明工作面的概念、架构与关键技术

Concept, architecture and key technologies for transparent longwall face
煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f838cbdb-97e6-42ff-a404-e3b0bb607dd9>

综采工作面智能化关键技术现状与展望

Status and prospect of key technologies of intelligentization of fully-mechanized coal mining face
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 1–22 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1068bd67-9101-4126-a0a2-67e54d451404>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王晓辉, 刘再斌, 陈宝辉, 等. 透明回采工作面模型构建技术及智能化应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 214–222.

WANG Xiaohui, LIU Zaibin, CHEN Baohui, *et al.* Construction technology and intelligent application of transparent working face model[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 214–222.

透明回采工作面模型构建技术及智能化应用

王晓辉^{1,2,3,4}, 刘再斌^{1,2,3,4}, 陈宝辉^{3,4}, 马良^{2,3,4}, 高耀全^{3,4}, 张东亮^{3,4}, 杜易明^{3,4}, 雷晓荣^{3,4}, 晏俊生^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 西安煤科透明地质科技有限公司, 陕西 西咸 712000; 4. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013)

摘要: 回采工作面模型是指导煤矿安全高效生产的重要前提, 对实现煤炭精准开采和地质保障具有重要意义。特别是在复杂地质条件下, 回采工作面模型若不能准确描述构造与地层之间的关系, 将会影响煤矿生产过程中的采区规划、采掘工艺及生产效率等方面。以某复杂地质条件的矿井回采工作面为例, 开展高精度回采工作面模型构建技术及智能化应用研究。首先, 提出地层和断层的构建技术, 成功解决了特殊地质现象及逆断层三维空间重值的难题。同时, 引入动态更新技术实现了模型的局部动态修正, 大幅提升了模型的准确性与实用性。其次, 结合实时监测数据, 提出智能规划截割与智能地质预测技术, 能够有效提高生产决策的精准性与及时性。随后, 构建了 I030903 回采工作面静态模型, 并融入局部动态更新技术, 将该动态模型应用于煤矿透明地质保障系统, 取得了显著的应用效果。结果表明: 该建模技术能够快速、准确地模拟任意复杂地质体, 为处理地层不整合、地层尖灭、煤层分叉和断层切割等问题提供便利。经验证, 模型误差值均处于 0.2 m 以下, 且 0~0.1 m 范围内占整体 97%。基于透明回采工作面模型的智能规划截割技术有效指导了采煤机的精准开采, 而智能地质预测技术则能够在异常情况下自动生成预警信息并及时传达相关人员。该方法为煤矿智能化开采提供了技术支持和保障。

关键词: 回采工作面模型; 动态更新; 智能化; 精准开采; 地质保障

中图分类号: TD163; P628 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)11-0214-09

Construction technology and intelligent application of transparent working face model

WANG Xiaohui^{1,2,3,4}, LIU Zaibin^{1,2,3,4}, CHEN Baohui^{3,4}, MA Liang^{2,3,4}, GAO Yaoquan^{3,4}, ZHANG Dongliang^{3,4}, DU Yiming^{3,4}, LEI Xiaorong^{3,4}, YAN Junsheng^{1,2,3,4}

(1. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 2. China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. CCTEG Xi'an Transparent Geology Technology Co., Ltd., Xixian 712000, China; 4. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China)

Abstract: The working face model is an important prerequisite for guiding safe and efficient production in coal mines and holds significant importance for achieving precise coal mining and geological security. Especially under complex geological conditions, if the working face model cannot accurately describe the relationships between geological structures and strata, it will impact the planning of mining areas, mining and excavation processes, and production efficiency. Taking the working face of a mine under complex geological conditions as an example, this study conducts research on high-precision working face modeling technology and its intelligent application. First, a construction technology for strata and faults is proposed, successfully solving the challenges of special geological phenomena and the three-dimensional spatial recalculation of reverse faults. Additionally, dynamic updating technology is introduced to achieve local dynamic corrections of the model, significantly improving its accuracy and practicality. Secondly, by integrating real-time monitoring data, intel-

收稿日期: 2024-07-15 策划编辑: 常琛 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2024-1024

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42374176); 中国煤炭科工集团国际合作资助项目(2023-2-TD-KJHZ005)

作者简介: 王晓辉(1999—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生。E-mail: cctegwxh@163.com

通讯作者: 刘再斌(1982—), 男, 江苏徐州人, 研究员, 博士生导师, 博士后。E-mail: liuzhaibin@cctegxian.com

ligent planning for cutting and intelligent geological prediction technologies are proposed, which effectively enhance the precision and timeliness of production decision-making. Subsequently, a static model of the 1030903 working face was constructed, incorporating local dynamic updating capabilities. This dynamic model was applied to the transparent geological security system for coal mines, achieving significant application results. The results indicate that the modeling technology can quickly and accurately simulate any complex geological body, providing convenience for handling issues such as stratigraphic unconformities, strata pinching out, coal seam bifurcation, and fault cutting. Verified data show that model errors are within 0.2 m, with 97% of errors falling within the 0-0.1 m range. The intelligent cutting planning technology, based on the transparent working face model, effectively guided the precise coal extraction by the shearer, while the intelligent geological prediction technology could automatically generate warning information in abnormal situations and promptly communicate it to relevant personnel. The research results demonstrate the advancement and feasibility of this method, providing solid technical support and assurance for intelligent coal mining.

Key words: working face model; dynamic updating; intelligence; precision mining; geological security

0 引言

煤炭作为我国主体能源和重要工业原料,在能源产业链中发挥着至关重要的作用^[1]。煤炭智能化开采作为实现煤炭工业高质量发展的核心技术,已经成为煤炭工业技术革命升级发展的必然要求^[2-3]。在此背景下,地质透明化作为实现煤炭智能化开采的基础和关键技术之一,对实现煤炭精准开采和安全高效地质保障具有重要意义^[4-6]。特别是透明回采工作面在指导煤矿安全高效智能开采方面起着基础作用^[7]。通过多源地质数据构建可视化三维地质模型,详细展现回采工作面地质条件、地质结构和煤层赋存规律,为煤炭智能化开采过程提供重要的数据支撑。

近年来,随着人工智能技术的迅速发展,智能矿山、透明地质及透明工作面等领域受到了越来越多的关注^[8-9]。学者们不断提出多种技术手段,以实现智能化开采的目标。王国法等^[10]提出利用工作面动态地质数字模型构建相对“透明”的开采环境,通过动态地质数据对采煤机记忆截割模板进行修正,实时调整设备状态,以实现智能开采。程建远等^[11-12]根据不同勘查阶段的地质数据,将回采工作面地质模型分为黑箱模型、灰箱模型、白箱模型和透明模型4个层级,逐步提升模型的精度。王存飞等^[13]在分析煤矿企业自动化智能化开采要求的基础上,提出了建设透明工作面的四层全域模型。刘万里等^[14]提出了一种煤层三维模型的动态精细修正技术,提升煤层三维模型局部的精度,实现工作面的局部透明化。此外,刘再斌等^[15]提出了透明回采工作面多属性动态建模方法,所构建的模型满足工作面智能化开采需求。这些研究表明,构建高精度三维地质模型实现回采工作面地质信息透明化已成为煤矿智能化发展的重要任务之一。尽管回采工作面建模技术日趋成熟,但实际应用案例仍然相对不足。目前,

智能开采技术主要依赖于采煤机的记忆截割、工作面自动找直以及远程视频监控等手段,这些技术在地质条件相对简单的回采工作面得到了初步应用^[16]。然而,在复杂地质条件下却面临诸多挑战,采煤机难以适应复杂环境导致智能化水平整体降低。因此,透明回采工作面在支撑能力保障方面表现明显不足,智能化开采尚处于初级阶段^[17]。

基于此,笔者在深入分析智能化开采工作面模型需求的基础上,选取一个地质条件复杂的矿井工作面作为研究对象。根据该工作面收集整理的相关地质资料,利用地层和断层建模技术构建静态地质模型,借助动态更新技术实现模型的自动更新,详细展现了该工作面9号煤层上下30m的地层、岩层、煤层及构造空间形态与展布规律。将该模型应用于煤矿透明地质保障系统中,实现智能规划截割和智能地质预测。这项研究提高了工作面模型的准确性和应用性,为煤炭智能化开采提供了数据支撑。

1 工作面模型构建及动态更新

1.1 地层构建技术

1.1.1 地层模型构建原理

地质体的显著特征之一是其层状结构。然而,地层的演化受多种因素影响,常呈现出不规则的层状结构。为了更灵活地表达这些地层结构,广义三棱柱 (Generalized Tri-Prism, GTP) 模型被广泛应用,如图1所示。具体而言,构建GTP模型的过程通常包括以下几个步骤:首先,以已知坐标网格格点为基准点,通过逐点插值法生成不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN) 模型,以有效表达各个地层层面之间的拓扑关系。其次,在遵循地层层序的基础上,确定每一层的顶部标高作为GTP模型上三角形的顶点坐标,底部标高作为其下三角形的底部坐标,并将地层岩性作为其内部属性,从而完成对三维地质体GTP模型的全面构建。最后,合并具有

相同属性且相邻侧面的模型单元,旨在消除重复的侧面四边形,并对边界上的侧面四边形进行三角化处理,以完成地层模型的构建过程。通过上述方法,能够更加准确和详细地表达地层的三维结构及其复杂性。

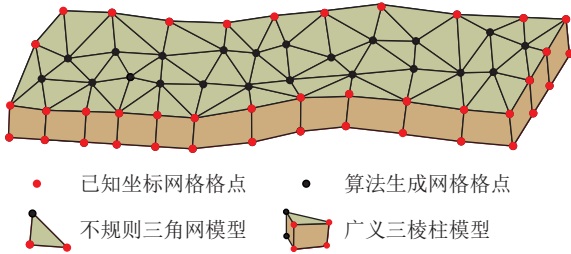


图 1 地层构建原理

Fig.1 Stratigraphic construction principle

1.1.2 特殊地质现象处理

GTP 模型作为一种灵活且适用性强的三维空间模型,尤其适用于处理特殊地质现象。该模型能够通过 TIN 面退化为四面体 (Tetrahedral Element Network, TEN) 模型,以表达地层的分叉结构;同时,通过侧边退化为金字塔 (Pyramid) 模型,以表达地层的尖灭结构,如图 2 所示。这种灵活性使得 GTP 模型能够更加准确地反映复杂的地质现象。因此,GTP 模型不仅能够提高地层模型的精度,还为处理特殊地质现象提供了有效的解决方案。

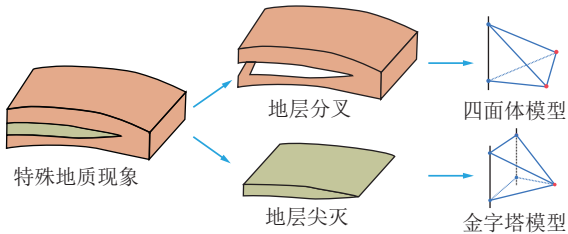


图 2 GTP 模型退化表达特殊地质体

Fig.2 GTP model degradation expression of special geologic bodies

1.2 断层构建技术

1.2.1 断层模型构建原理

回采工作面常常发育着不同程度的断层,导致地质体及其空间关系相对复杂,同时也使模型数据结构和拓扑关系异常复杂。图 3 为断层模型构建原理。含断层的地层模型涉及上下盘共 4 个层面、断距和倾角(图 3a)。若 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 为断层下盘顶面断层线上的 2 个控制点,则 A 点在上盘顶面对应点坐标 $A^*(x, y, z)$ 计算公式为

$$x = x_1 + \frac{H_1 + H_2}{\tan \theta} \sin \left[\arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \right] \quad (1)$$

$$y = y_1 + \frac{H_1 + H_2}{\tan \theta} \cos \left[\arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \right] \quad (2)$$

$$z = z_1 - H_1 - H_2 \quad (3)$$

式中: θ 为断层倾角, ($^\circ$); H_1 为地层厚度, m; H_2 为断距, m。

为了准确有效地模拟断层的复杂形态,需按照以下步骤操作:首先,将断层面两侧的地层面视为整体,利用逐点插值法生成地层面的 TIN 模型。其次,根据断层的走向、倾向和倾角生成断层面的 TIN 模型。最后,通过布尔运算求出断层面与地层面交线——共有准边缘线。根据上述得到的控制点与其对应点之间关系,对断层上下盘的准边缘线进行调整,从而得出上下盘实际边缘线。利用实际边缘线作为约束,对原始 TIN 模型进行修改,生成符合实际地质现象的断层模型。该方法能够真实表达断层的复杂形态及其空间关系(图 3b)。

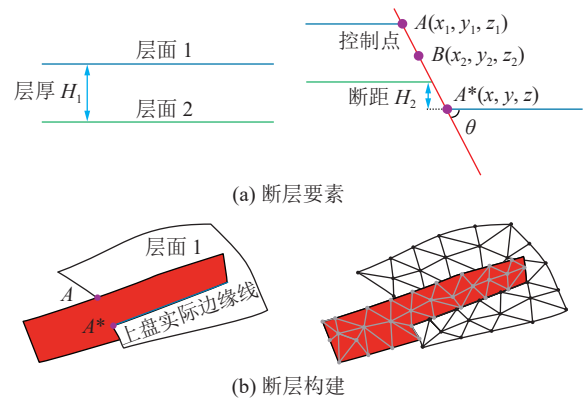


图 3 断层模型构建原理

Fig.3 Fault model construction principle

1.2.2 逆断层处理

逆断层的精准构建是当前三维地质建模的难点之一。逆断层的特点是上盘相对下盘上升,导致同一位置存在多个高程值,造成断层等高线的投影图中上下盘部分区域重叠。因此,采用空间分割技术对逆断层区域进行分区,并根据等高线的变化情况判断其重叠次序,将区域分为 a 区和 b 区 2 部分,如图 4 所示。最后,利用上述断层建模原理构建 TIN

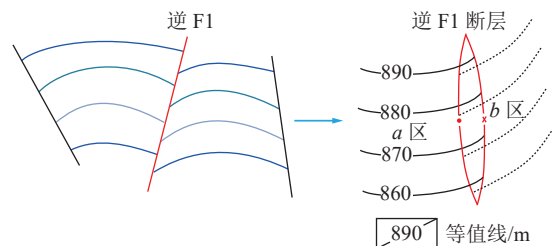


图 4 逆断层处理方法

Fig.4 Reverse fault processing method

模型用来表达逆 F1 断层。

1.3 动态更新技术

基于静态地质数据构建的工作面地质模型是静态的。然而,随着回采作业的进行,工作面局部地质体及其结构会发生变化。因此,利用最新的揭露数据、探测数据和监测数据来更新静态模型的数据结构和拓扑关系,可以显著提升模型的准确性和可靠性。为了快速定位到需要实时更新的三维地质模型位置,需要对 GTP 模型进行空间划分和索引化。当新增数据点时,通过该索引可以准确定位需要更新的空间区域。局部的 GTP 模型可以细分为更小的单元,以替换原有的模型部分,从而实现三维空间模型的局部更新,如图 5 所示。

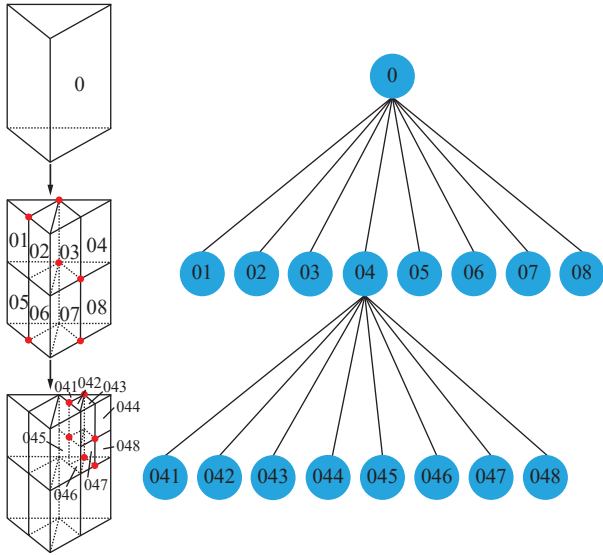


图 5 GTP 模型空间划分与索引化

Fig.5 GTP model space partitioning and indexing

在获取动态修正的新增数据点和索引空间后,利用光滑离散插值算法对影响范围内的未知数据点或待插值点进行重新插值计算^[18]。随后进行重复的迭代运算,实现工作面模型的局部动态更新。其算法流程如下:

首先,建立网格节点 φ 最优解的目标函数:

$$R^*(\varphi) = R(\varphi) + \rho(\varphi) \quad (4)$$

式中: $R(\varphi)$ 为全局粗糙度函数, $\rho(\varphi)$ 为线性约束违反度函数。

使目标函数式无限逼近最小值,需要达到以下 2 个条件:

①通过求解全局粗糙度函数,使任意节点上的函数值逼近该点邻域内节点的均值,实现网格节点尽可能平滑:

$$R(\varphi) = \sum_k \left\{ \mu(k) \left| \sum_{\alpha \in N(k)} v^\varphi(k) \varphi(\alpha) \right|^2 \right\} \quad (5)$$

式中: $\mu(k)$ 为在 Ω 上给定的非负权系数, $N(k)$ 为节点 k 的领域, $v^\varphi(k)$ 为给定的权系数,其值为整数。 $\varphi(\alpha)$ 为节点 α 处的真实值。

②通过违反度函数对节点进行约束,使线性约束的违反度最小化,实现线性约束符合程度最大化:

$$\rho(\varphi) = \sum_i w_i^2 |A_i \varphi - b_i| \quad (6)$$

式中: w_i^2 为正系数, A_i 为 n 维矩阵, b_i 为常数。

$$A_i \varphi \cong b_i \quad (7)$$

式中: “ \cong ” 代表 $|A_i \varphi - b_i|$ 应尽可能小,从而使相关节点 φ 值尽可能接近采样数据。

2 智能化应用

2.1 智能规划截割

智能规划截割技术通过引入人工智能、机器学习和优化算法,旨在自动优化采煤机的截割轨迹并动态调整工作参数,以实现更高效、安全的采煤作业。由于采煤机的工作环境复杂多变,涉及地质条件、机械状态以及其他操作参数,这些因素共同构成了一个连续的状态空间。因此,采煤机的运行需要多种可调控参数,如截割头转速、进给速度、截割深度和位置调整等,系统必须实时调整这些参数以适应不断变化的工作条件。在此背景下,基于奖励机制的深度强化学习算法成为一种有效的算法之一。其中, DQN-NAF 算法^[19] 在性能方面表现优越,相较于其他算法更适合于复杂环境下的动态调整与优化。 DQN-NAF 算法是一种结合了深度强化学习和优势函数的算法,主要用于连续动作空间的强化学习问题。传统的 DQN 算法主要针对离散动作空间,而在连续动作空间下,直接使用 DQN 会面临一些挑战。 NAF 通过将优势函数归一化,使得策略的选择更加稳定和高效。优势函数 $A(s, a)$ 描述了在给定状态 s 下,选择动作 a 的相对优越性。 NAF 利用一个高斯策略来建模动作选择,这种策略的均值由神经网络输出,而方差是固定的,从而解决了连续动作选择的问题。在 DQN-NAF 中,价值函数 $Q(s, a)$ 可以分解为

$$Q(s, a) = V(s) + A(s, a) \quad (8)$$

式中: $V(s)$ 为状态价值函数,表示在状态 s 下的期望回报,而 $A(s, a)$ 是归一化后的优势函数。

通过构建回采工作面动态地质模型,实现未采区域的精准预测,随后采用 DQN-NAF 算法生成虚拟规划截割曲线。利用工业环网或 5G 网络将截割曲线下发至集控中心的采煤机控制系统,以智能调节采煤机的参数,如倾角、坡度、俯仰角、采高和挖底量^[20]。当参数传达至采煤机后,系统会根据预设

的标准和生产工艺自动实现精准截割,调整滚筒高度和行走速度,并实时反馈地质条件信息至地面。其中,地质条件信息包括煤层厚度、煤层顶底板标高、煤层地质构造等。通过回采工作面模型的局部动态更新,系统将更新后的模型与收到采煤机运行信息再次输入算法模型中,模型不断修正调整截割曲线,并将修正后的截割曲线再次下发,实现循环优化。通过这一过程,不仅提高了采煤机截割的效率和精确度,也实现了基于回采工作面模型的智能规划采煤作业(图 6)。

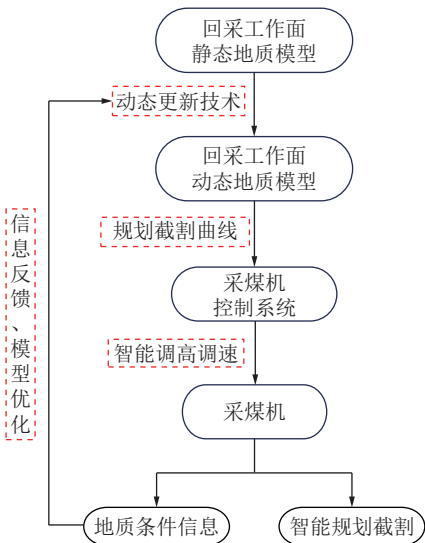


图 6 基于回采工作面模型的智能规划截割

Fig.6 Intelligent planning and cutting based on working face model

2.2 智能地质预测

矿井水害、冲击地压、煤与瓦斯突出、采区火灾以及顶板垮落等重大灾害事故,一直是制约煤炭智

能开采的隐蔽致灾因素。为提高煤炭智能开采安全性和效率,将人工智能引入到回采工作面模型的构建和更新中,通过实时数据分析和预测,增强对灾害风险的预警能力。首先,利用电法监测、微震监测和随采地震等先进技术,实时获取底板奥灰承压水水位状态和开采前方应力变化等信息,并将这些信息融入到回采工作面模型中。采用深度学习算法分析这些复杂的时空数据,自动检测异常变化和潜在的灾害模式。例如,通过对微震数据的深度学习模型分析,能够识别出冲击地压的早期迹象并做出预警。其次,在工作面甲烷传感器、分布式光纤测温及液压支架的应力监测数据的基础上,使用随机森林算法进行特征提取和模式识别。通过与工作面模型中的地质属性进行关联,人工智能系统能够掌握实时地质属性信息。例如,当液压支架的应力传感器检测到异常压力变化时,人工智能模型可以结合甲烷传感器的数据,分析判断可能存在的瓦斯突出风险,并实时调整支架压力和采煤机的操作参数。

为了更精准地预测和应对隐蔽致灾因素,基于人工智能的三维地质预测体系至关重要。该体系通过融合多源数据与深度神经网络,构建一个能够实时更新的预测模型,将其搭载至回采工作面模型中。该预测模型可以根据实时监测数据和历史地质数据,学习不同地质条件下的致灾模式,处理多维数据之间的非线性关系,比传统方法更准确地预测水害、冲击地压、煤与瓦斯突出、采区火灾和顶板垮落等致灾因素。该体系不仅增强了煤矿的综合地质保障能力,而且显著提高了灾害预测的准确性,为现场决策提供了更为可靠的支持(图 7)。利用人工智能的深度

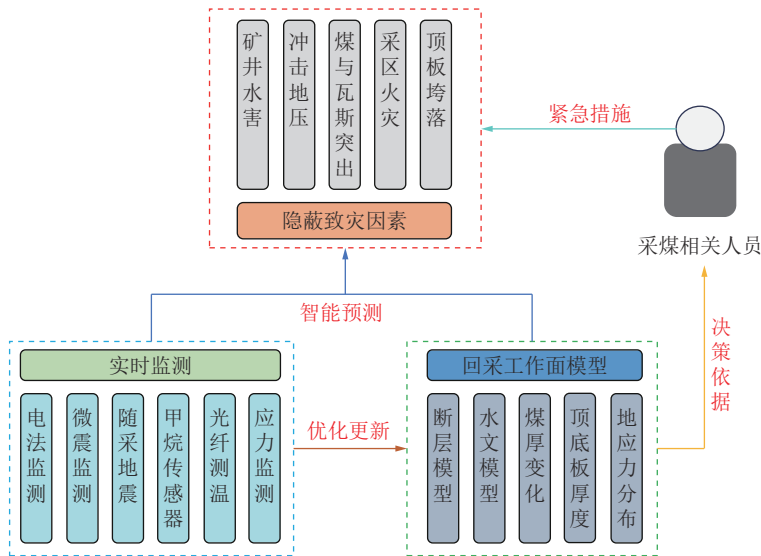


图 7 基于回采工作面模型的智能地质预测

Fig.7 Intelligent geological prediction based on working face model

学习和实时分析能力,智能化的地质预测体系显著推动了煤炭开采的智能化和安全性。

3 工程实践

3.1 工作面概况

试验矿井隶属于桌子山煤田,位于内蒙古自治区鄂尔多斯盆地西缘北区。煤矿含煤地层为石炭系太原组和二叠系山西组,含煤 5~8 层^[21]。其中主要可采煤层为山西组 9 号煤层与太原组 16 号煤层,I090303 工作面长 1.8 km,所采 9 号煤层赋存较稳定、煤层结构复杂,含 1~2 层炭质泥岩,厚度 2.47~4.16 m,平均 3.10 m。煤层倾向 WN,倾角平均-5°。据矿井地质资料分析,工作面内无老空区、陷落柱和岩浆侵入体分布及古河床冲刷现象,影响工作面回采的主要地质因素为断层构造。根据该工作面回风巷、运输巷及开切眼已揭露的资料,共计揭露断层 16 条,其中正断层 12 条,逆断层 4 条。

3.2 工作面模型构建

工作面模型构建的过程中,主要包括数据收集及处理和模型构建。首先,需要对收集的地质数据进行多源数据融合处理,建立统一标准的地质信息数据库。其次,构建回采工作面静态地质模型,以此为底座融入动态监测数据,实现模型的动态更新,详细的构建流程如图 8 所示。

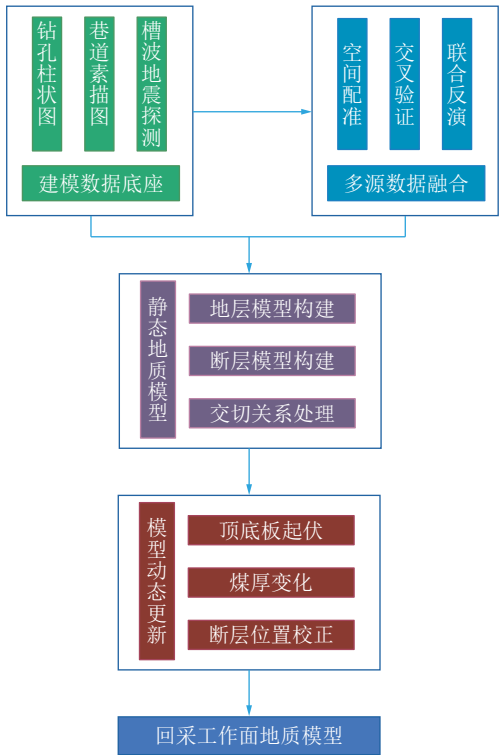


图 8 回采工作面模型构建流程

Fig.8 Flow chart of working face model construction

3.2.1 建模数据及处理

根据现场地质资料和验证结果,整理工作面模型构建所使用的数据,见表 1。

表 1 数据来源与作用

Table 1 Data sources and functions

阶段	数据来源	作用
数据底座	钻孔柱状图	采取煤岩心、获取地层剖面
	巷道素描图	揭露地层、构造和煤层
	槽波地震探测	探测断层、陷落柱、冲刷带等
模型更新	回采揭露	获取工作面内构造信息
	随采地震监测	探测开采工作面前方构造异常
	微震监测	监测围岩位移、应力变化

地质建模数据具有多源性、异构性和复杂性等特点,在建模之前必须使数据保持一致。在统一坐标系下,对多源数据进行空间配准是数据融合的基础,不同属性的数据需要先进行域转换,再通过平移或旋转统一基准点。交叉验证是数据融合的关键,可以弥补单属性数据解释的不足并提高数据质量^[14]。在此基础上进行联合反演,如井震联合反演、多参数联合反演可以提高综合探测成果的定量分析能力。图 9 为多源数据融合处理流程。

3.2.2 静态地质模型

通过地层及断层构建技术,基于工作面的钻孔柱状图、巷道素描图和槽波地震探测数据,构建 9 号煤层上下 30 m 的地层和断层,图 10 为 I030903 工作面静态地质模型。

3.2.3 动态地质模型

通过动态更新技术,基于回采揭露成果、随采地震和微震监测数据,对回采工作面静态模型进行实时更新,构建能够实时局部修正的 I030903 回采工作面动态地质模型。

3.2.4 模型检验

将构建的 I030903 回采工作面动态地质模型与利用的数据资料进行对比分析,得出模型与利用资料误差散点图和模型与利用资料误差分布统计直方图,如图 11 所示。从分布图中可以看出所有约束点误差值均在 0.2 m 以内,其中 97% 的误差在 0~0.1 m 范围内,满足智能化开采所需工作面模型精度的要求。

3.3 智能化实践

工作面开采模型中虚拟截割曲线是对构建的工作面模型进行剖切,以规划设计采煤机割煤的路径曲线^[22]。通过工作面动态地质模型的等间距切割,并结合三机装备的姿态和环境坐标转换,实现截割

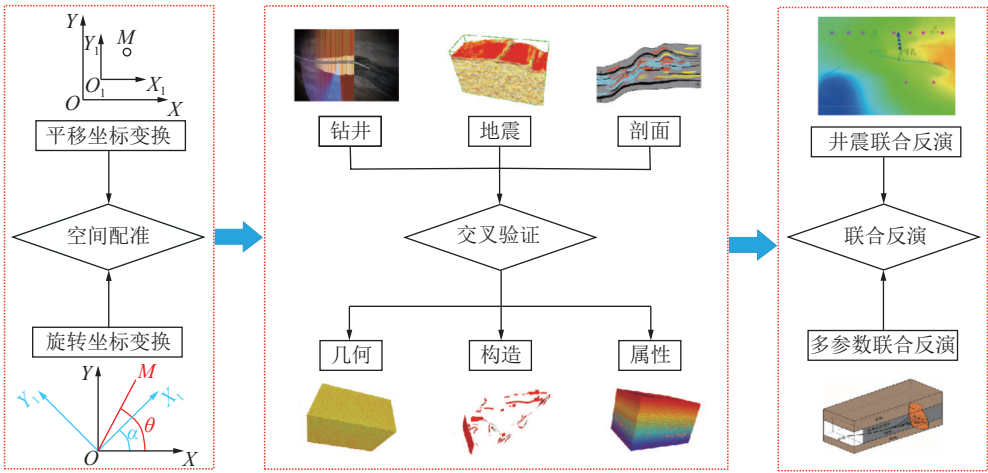


图9 多源数据融合处理
Fig.9 Multi-source data fusion processing

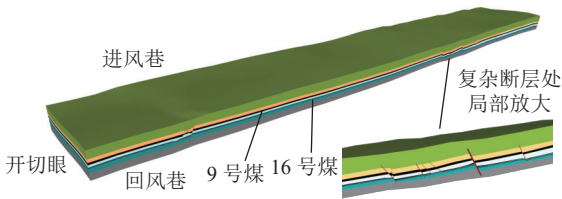


图10 I030903回采工作面静态地质模型
Fig.10 Static geological model of I030903 working face

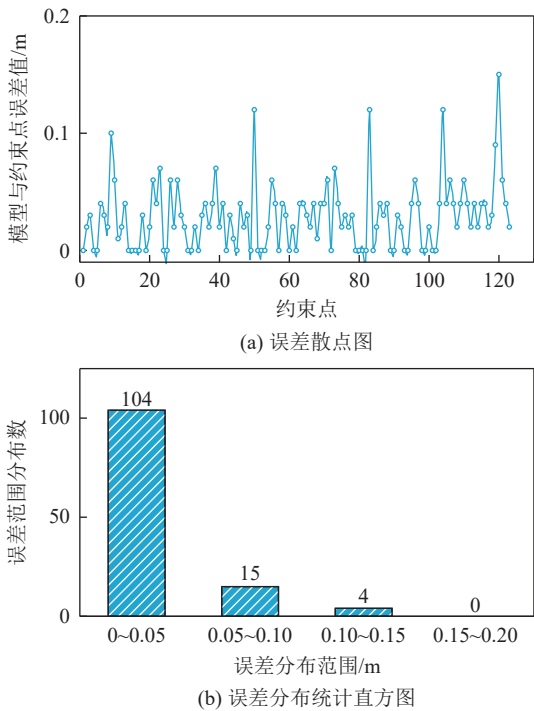


图11 I030903回采工作面模型与利用资料误差图
Fig.11 I030903 working face model and utilization information error map

曲线与开采生产的实时协调。规划截割曲线是根据采煤工艺需求,在回采工作面前方特定范围内计算最优的虚拟截割曲线,并与采煤机集中控制系统进

行数据交换,指导采煤机完成开采作业。回采过程中,采煤机的运动包括左右牵引速度和方向的调节,以及摇臂的旋转以实现滚筒调高^[23]。同时,建立采煤机整体模型,对左右滚筒和摇臂增加相应约束条件,实现虚实交互和同步映射,从而实现回采工作面实现智能化开采,如图12所示。

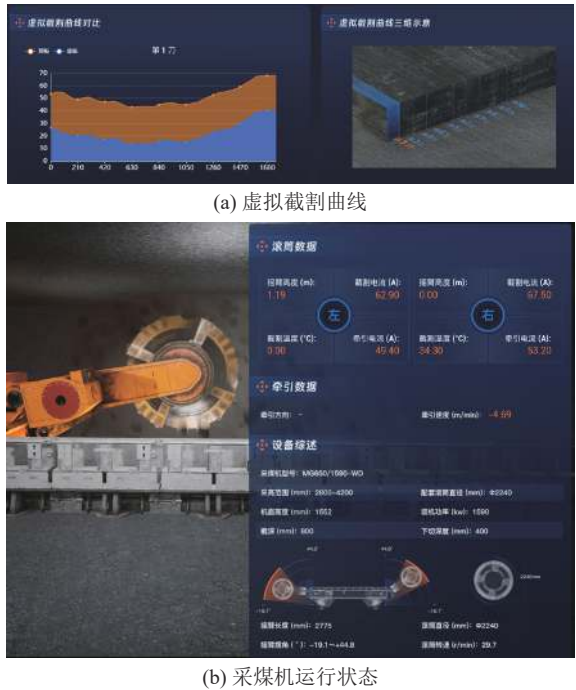


图12 智能化开采
Fig.12 Intelligent mining

通过收集工作面工程地质、水文地质、瓦斯地质和火区地质等监测数据,综合分析回采位置与致灾体空间三维距离关系,建立警戒线、探查线和边界线等三线立体预警机制。利用实时监测数据,并结合数据分析、数据挖掘和风险预警指标体系,实现各模块自动计算当前开采位置与致灾体空间

的距离,同时在模型上标记地质异常的三维坐标及属性信息,从而实现开采地质预报的智能化。根据三线立体预警机制,自动发布预测信息和预

警信息,为相关业务人员提供决策支持,推动地质保障管理专业化,提升隐蔽致灾因素的精准预测,如图13所示。

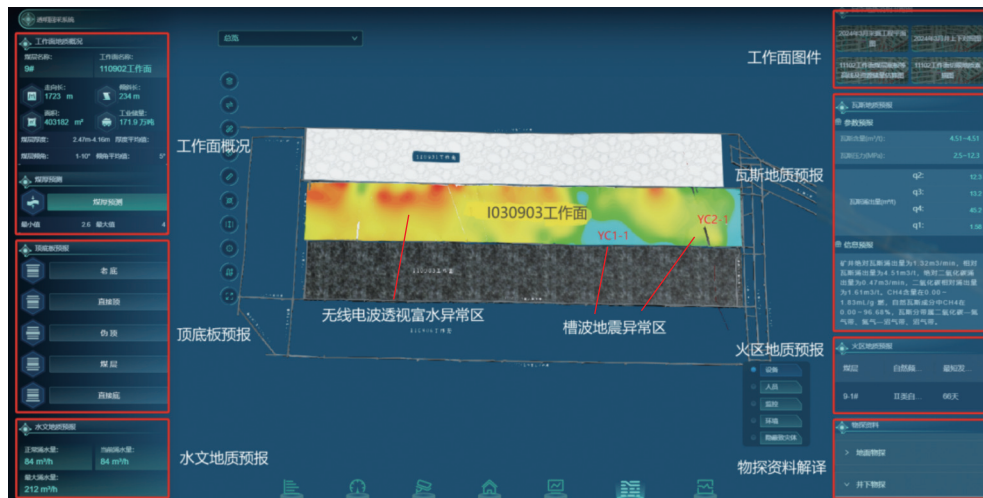


图13 地质灾害预测

Fig.13 Geological hazard prediction

4 结 论

1)针对地质条件复杂的回采工作面,提出了复杂地层及断层构建技术,解决了特殊地质现象和逆断层难以构建的难题。同时,提出了动态更新技术,实现了回采工作面模型的实时局部修正。

2)构建了 I030903 工作面模型,误差值均在 0.2 m 以内,其中 97% 的误差值在 0~0.1 m,验证了建模技术的合理性与动态更新的必要性,为工作面模型构建探索了一条可行的技术路径。

3)通过高精度工作面模型和地质监测数据实时更新,实现了智能规划截割和智能地质预测等功能,显著提高了回采效率并保障矿井安全生产。

4)模型构建过程耗费大量的人力,未来仍需不断优化建模算法和技术,以提高模型构建的速度与精度。此外,工作面前方地质透明化的程度还需进一步提高,未来的研究应着重于高精度地质探测技术的发展以提高模型的精度,为智能开采提供可靠的地质保障技术。

参考文献(References):

- [1] 王国法,张建中,薛国华,等.煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 12-26.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, et al. Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 12-26.
- [2] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技

术, 2022, 50(1): 1-27.

WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.

- [3] 王国法,张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 459-467.

WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459-467.

- [4] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.

- [5] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.

PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.

- [6] 董书宁,刘再斌,程建远,等. 煤炭智能开采地质保障技术及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 21-31.

DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, et al. Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 21-31.

- [7] 刘再斌,董书宁,李鹏,等. 智能开采透明工作面技术架构与展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 46-51.

- [8] 王国法,庞义辉,任怀伟,等. 矿山智能化建设的挑战与思考[J]. 智能矿山, 2022, 3(10): 2-15.

- [9] 袁亮,张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346-2356.

YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal[J].

- Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2346–2356.
- [10] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1–36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1–36.
- [11] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285–2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285–2295.
- [12] 程建远, 刘文明, 朱梦博, 等. 智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 118–126.
CHENG Jianyuan, LIU Wenming, ZHU Mengbo, et al. Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 118–126.
- [13] 王存飞, 荣耀. 透明工作面的概念、架构与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 156–163.
WANG Cunfei, RONG Yao. Concept, architecture and key technologies for transparent longwall face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 156–163.
- [14] 刘万里, 张学亮, 王世博. 采煤工作面煤层三维模型构建及动态修正技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1973–1983.
LIU Wanli, ZHANG Xueliang, WANG Shibo. Modeling and dynamic correction technology of 3D coal seam model for coal-working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1973–1983.
- [15] 刘再斌, 刘程, 刘文明, 等. 透明工作面多属性动态建模技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2628–2635.
LIU Zaibin, LIU Cheng, LIU Wenming, et al. Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2628–2635.
- [16] 王新苗, 韩保山, 宋焘, 等. 智能开采工作面三维地质模型构建及误差分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 93–101, 109.
WANG Xinmiao, HAN Baoshan, SONG Tao, et al. 3D geological model construction and error analysis of intelligent mining working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 93–101, 109.
- [17] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 1–11.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Analysis and countermeasures of ten “pain point” of intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1–11.
- [18] 安林, 韩保山, 李鹏, 等. 面向透明工作面的地质建模插值误差分析[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 184–189.
AN Lin, HAN Baoshan, LI Peng, et al. Research on interpolation error analysis of geological modeling of intelligent working face[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 184–189.
- [19] 苗丙, 葛世荣. 采煤机数字孪生导航截割运动规划理论与方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(8): 1–13.
MIAO Bing, GE Shirong. Theory and method of shearer digital twin navigation cutting motion planning[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(8): 1–13.
- [20] 刘结高, 程建远, 疏义国, 等. 唐家会煤矿透明地质保障系统构建及示范[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 1–9.
LIU Jiegao, CHENG Jianyuan, SHU Yiguo, et al. Construction and demonstration of the transparent geological guarantee system in Tangjiahui Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 1–9.
- [21] 张国俊, 黄金荣, 鲁欣, 等. 基于构造物理模拟实验的桌子山煤田棋盘井井田奥灰边界构造因素分析[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(2): 10–13, 18.
ZHANG Guojun, HUANG Jinrong, LU Xin, et al. Ordovician limestone boundary structural factor analysis in qipanjing mine-field, zhuzozishan coalfield based on tectonic physical simulation experiment[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(2): 10–13, 18.
- [22] 李鹏, 程建远. 回采工作面煤层三维建模技术及其在智能开采中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 156–161.
LI Peng, CHENG Jianyuan. 3D modeling technology of coal seam in working face and its application in intelligent mining[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 156–161.
- [23] 雷晓荣, 李明星, 岳辉, 等. 透明工作面数字孪生系统关键技术及实现[J]. 智能矿山, 2022, 3(7): 50–56.