

融合“地质-数值”模型的透明工作面平台 构建及应用

张玉婷¹, 张方树¹, 牛和平¹, 杜文刚^{2,3,4}, 左开永^{5*}

(1. 内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 014016;

2. 西安煤科透明地质科技有限公司, 陕西 西安 712000;

3. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 陕西 西安 712000;

4. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;

5. 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对特厚煤层综放工作面采掘过程中存在的地质条件复杂、开采风险高等问题,以内蒙古蒙泰不连沟煤矿特厚煤层综放工作面为工程案例,采用多源异构数据融合,整合静态、动态与实时地质数据的方法,并结合动态仿真和可视化技术,构建了涵盖地表、地层、巷道和地质构造的高精度三维模型,将地质模型的几何框架与地层属性转化为数值仿真的边界条件与岩层分区,建立了以地质信息为约束、能动态更新的“地质-数值”融合模型,开发了特厚煤层综放开采透明工作面可视化平台。结果表明:通过对比实时支架压力与数值模型预测的围岩应力分布,实现顶板灾害风险预警;同时可交互式查看不同工作面推进距离下的覆岩垮落特征、岩层位移演化的规律,显著提升了特厚煤层综放开采的安全性和效率,降低事故风险;在三维地质可视化研究平台的安全保障与指导作用下,综放工作面回采效率提升3%,综放工作面累计多回收煤炭约230 000 t,顶板管理和智能化水平得到了提升,为工作面创造了安全开采环境,也为透明工作面可视化平台在矿井安全管理、资源高效利用及智能化转型中提供了广阔的应用前景。

关键词:特厚煤层;多源异构数据;三维仿真模拟;透明工作面;可视化平台

中图分类号:TD32 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-055X(2026)03-0025-12

收稿日期:2025-07-30

基金项目:陕西省重点研发计划“强矿压灾害前兆信息识别及多源监测数据融合AI中台构建”(2024GX-YBXM-492);陕西省自然科学基金基础研究计划“脉冲型双震源混合算子构造及其波场分离影响研究”(2024JC-YBQN-0272)。

作者简介:张玉婷,女,内蒙古鄂尔多斯人,主要从事煤矿储量及地质探查管理研究;张方树,男,内蒙古鄂尔多斯人,主要从事煤矿水害防治及地质探查管理研究;牛和平,男,甘肃甘谷人,主要从事煤矿水害防治及地质探查管理研究;杜文刚,男,陕西西安人,工学博士,主要从事煤矿透明地质研究;左开永,男,贵州六盘水人,主要从事矿压数据智能化分析研究。

***通信作者:**左开永

煤炭资源是我国能源体系的核心支柱^[1],特厚煤层综放开采的优势在于规模大、效率高,但缺点是覆岩垮落较为频繁且强度大,给矿井安全生产带来显著影响^[2]。2015年6月,国家安全监管总局推出了“机械化换人、自动化减人”的科技强安专项行动^[3],目的是让采煤作业人员从高风险的工作面转移到相对安全的巷道监控中心甚至地面调度中心,实现无人化开采,透明矿井开采模式。因此,打造综放开采透明工作面辅助特厚煤层开采,有着重要的现实意义。

截至当前,不同学者对煤层综合开采透明度进行了研究。王家臣^[4]指出未来综放开采领域需重点发力于工作面全域智能化建设、智能放煤技术攻关,聚焦端头顶煤采出效率的提升、覆岩运动统一场理论的构建以及低碳技术路径的探寻;庞义辉等^[5]围绕安全高效智能化开采面临的现实难题,重点研发了工作面围岩控制与智能化放煤相关核心技术;于斌等^[6]研发高精度惯导监测与控制技术,实现了对采煤机、液压支架及刮板输送机的实时位姿监测与协同调控;苟科学等^[7]提出借助透明地质、智能物联网及多传感器融合等前沿技术,推动智能化综放工作面稳步向少人化、无人化发展;王国法等^[8]对我国重点产煤区的智能化建设现状、关键技术、成效与不足进行了系统分析;范京道等^[9]界定了“智能化建井,建智能矿井”的内涵与核心要义,并点明现阶段在基础理论、装备研发与工程技术领域面临的现实挑战;李伟等^[10]构建出适配于千米深井开采场景的智能化综合管控体系,成功实现了多源灾害数据的融合处理与集中管控;毛善君等^[11]研究了工作面透明化系统的构建与动态更新、5G通信技术、采煤机与地质模型的智能耦合以及基于时态GIS的“一张图”管控平台等关键核心技术,完成了多维可视化软件系统的开发与硬件系统的高度集成;问永忠^[12]利用多源数据融合技术,构建综放工作面多属性模型,实现了综放工作面基于透明地质的智能开采和放顶煤;吕延森等^[13]搭建了有限透明开采的智能综放技术体系,依托透明开采模式打造出“采-支-识-放-运”各环节自适应的智能化综放工作面。

虽然现有文献在智能化关键技术集成构建、实时监测、智能控制机制等方面取得了丰富成果,但在多源异构数据融合、动态参数自适应调整和复杂地质条件下的安全保障研究还存在不足。基于此,依托三维仿真技术,以不连沟煤矿综放工作面作为研究对象,融合该工作面真实地质数据,运用多源异构数据融合技术,搭建涵盖地表、地层、巷道及地质构造的多属性模型,进而构建融合多要素的综放工作面三维“地质-数值”融合模型,实现综放工作面地质信息的透明化呈现,建成煤矿三维地质可视化系统,为煤矿安全高效生产提供技术支撑。

1 多源异构数据融合

1.1 架构设计

传统煤炭地质工作主要致力于查明煤层赋存、水文与构造等地质条件,其成果普遍应用于资源勘查、井田划分及采区设计等环节^[14],属于定性或半定量范畴,但相较于智能化开采所要求的高精度煤层厚度、顶底板起伏及隐伏构造等信息的查明标准,仍存在一定差距,现有的数据精度明显不足,需对多源异构地质数据进行综合利用^[15],多源异构地质数据提取与融合架构如图1所示。

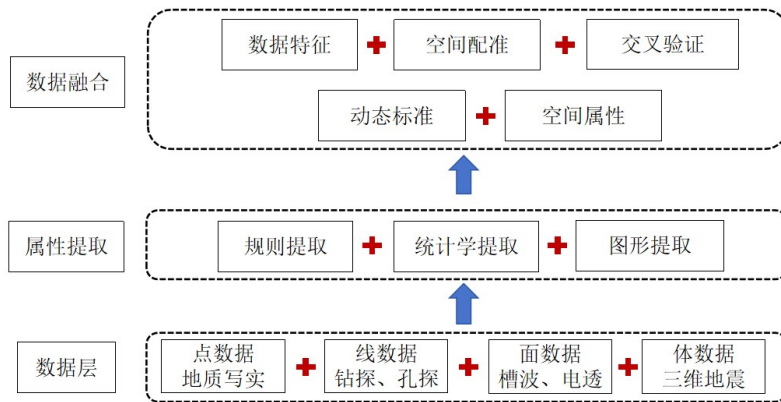


图1 多源异构地质数据提取与融合架构

图1展示数据包含点、线、面、体4类核心数据,按专业维度划分,涵盖钻探、三维地震、地质写实等数据类型。充分挖掘各类数据的独有价值,进而提高数据空间位置的绝对精度与动态预测的精确性。

1.2 数据融合方法

1.2.1 数据分类

矿山探测、监测数据分类如图2所示。

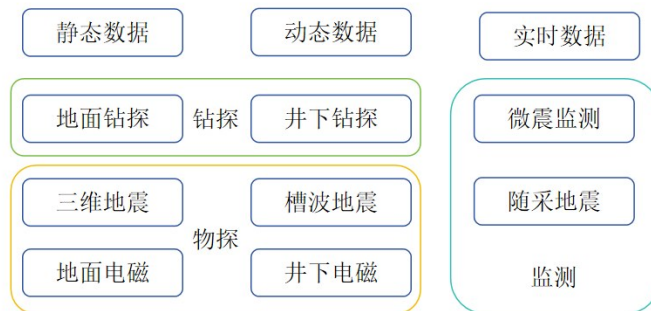


图2 矿山探测、监测数据分类

依据数据生成的阶段与更新频率,矿山探测与监测相关数据可划分为静态、动态和实时3大类。静态数据主要在矿山及巷道掘进前期采集,涵盖地面钻探、物探等相关数据;动态数据主要依靠人工采集的方式进行更新,如井下钻探、物探及巷道揭露等数据;实时数据来源于掘进及回采阶段的持续监测、随采地震、微震监测等数据。

1.2.2 数据空间配置

将多源异构数据置于统一坐标系中进行空间配置,是多量纲、多尺度属性融合的前提,对于矿井中产生的多源异构数据,需在深度域内将其配置至统一的坐标系。钻探数据通过大地坐标和井斜数据,计算出各个岩性分层的三维空间坐标;物探、地质写实类数据,则以精准定位锚点为起始点,通过距离和高程传递方式进行测量和探测,形成自由的平面相对坐标系。以探煤厚度数据为例,形成统一坐标系的具体步骤。

设探煤厚度数据坐标组合为 $(P_{x_i}, P_{y_i}, z_i)_{i < k}$, k 为探煤厚度数据总数,其中 P_0 为基准点,该点相

对坐标值为 (Px_0, Py_0, z_0) 。

平移:对所有相对坐标进行平移得到 (x_i, y_i, z_i) ,平移方式见式(1):

$$x_i = Px_i + (x_0 - Px_0); y_i = Py_i + (y_0 - Py_0) \quad (1)$$

对 x_i 顺时针旋转 α 得到 Rx_i ,旋转方式见式(2):

$$Rx_i = (x_i - x_0) \times \cos \alpha + (y_i - y_0) \times \sin \alpha + x_0 \quad (2)$$

y_i 顺时针旋转 α 得到 Ry_i ,旋转方式见式(3):

$$Ry_i = (y_i - y_0) \times \cos \alpha - (x_i - x_0) \times \sin \alpha + y_0 \quad (3)$$

对 x_i 逆时针旋转 α 得到 Rx_i ,旋转方式见式(4):

$$Rx_i = (x_i - x_0) \times \cos \alpha - (y_i - y_0) \times \sin \alpha + x_0 \quad (4)$$

y_i 逆时针旋转 α 得到 Ry_i ,旋转方式见式(5):

$$Ry_i = (x_i - x_0) \times \sin \alpha + (y_i - y_0) \times \cos \alpha + y_0 \quad (5)$$

当多源地质数据完成统一的三维空间配准后,需开展交叉验证^[16]工作,以此填补单一属性数据在解释过程中存在的局限性问题。多源数据交叉验证如图3所示。

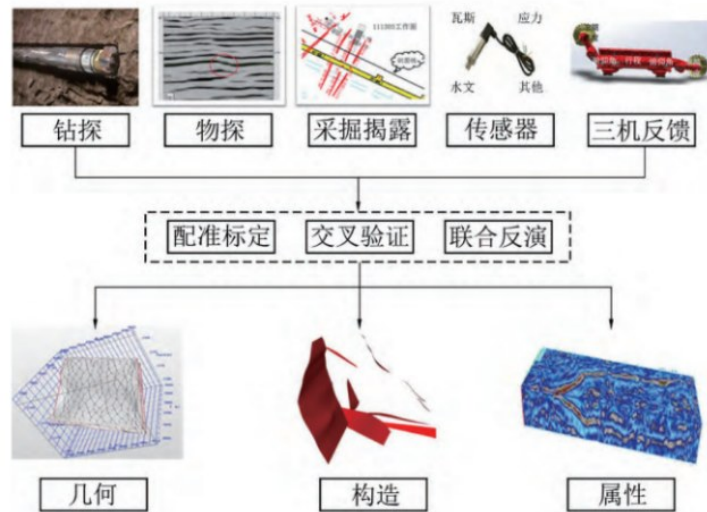


图3 多源数据交叉验证

交叉验证是指对多属性数据进行综合解释,要求地层几何形态、构造特征及属性特征在统一地质框架下,不同专业的解释结论能够彼此验证与补充。这既有助于评估数据可靠性,又能提升对工作面地层、构造及属性特征的解释精度,从而丰富解释成果。

2 矿井多地层多属性建模

为实现矿区地质体的高精度三维可视化与空间分析,需遵循“由表及里、先整体后局部、先主体后构造”的逻辑顺序构建多属性模型。地表模型作为三维空间的最顶界面,为后续建模提供宏观地形约束。以钻孔数据为核心,构建地层模型,确立煤层及其顶底板岩层的空间分布,形成未受构造破坏的初始地层序列。在此基础上,将断层、陷落柱等地质构造作为对连续地层的切割与改造进行建模,确保构造面与地层面在几何上的严格一致性。最后基于统一的全局坐标系,将巷道工程模型精准嵌入已构建的地质体模型中,从而形成完整统一的多地层多属性三维地质模型。

2.1 地表建模

等高线节点进行加密及过滤处理如图4所示。

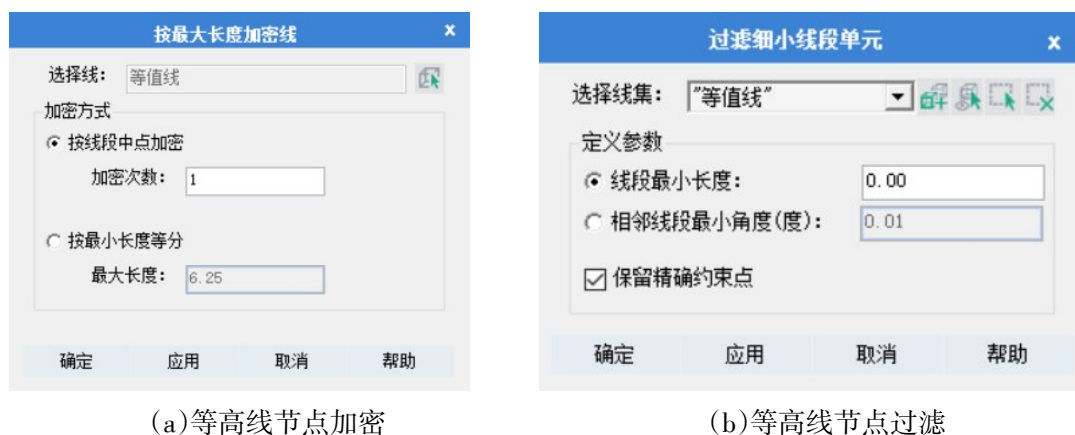


图4 等高线节点进行加密及过滤处理

常用于地表三维建模的资料有地形等高线图、数字高程资料及航拍图形等。对于等高线图,需采用人工或借用软件工具半自动赋予等高线相应的高程属性,并进行节点加密及过滤处理。

地表模型如图5所示。

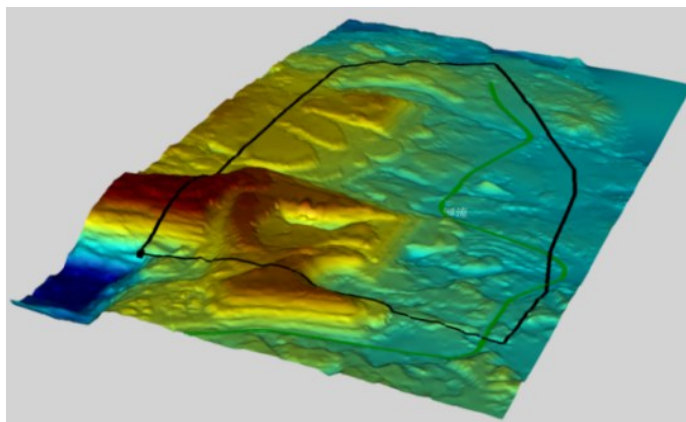


图5 三维建模地表模型

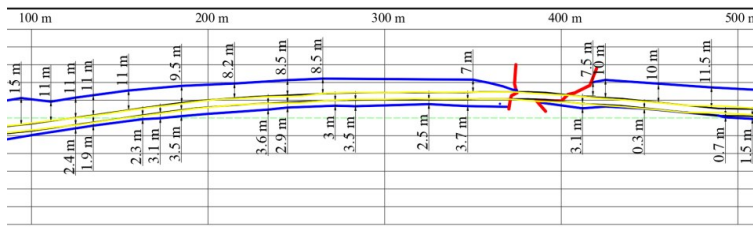
等高线数据统一坐标后导入建模软件并对数据进行预处理,进行节点加密后生成散点数据,删除重复点或过近点等。后根据散点数据生成简单的平均高程面,设置高程面的边界约束和控制点约束,通过平均高程面多次剖分及迭代离散光滑插值生成地形等高面。

2.2 地层模型

钻孔数据是获取三维地质信息最基础、最可靠的途径,借助钻孔数据构建的三维地质建模,在现代化矿山建设中发挥着关键作用。通过钻孔岩芯可直接获取详细的地层分布信息,主要包括地层数据、各岩层岩性说明、地层厚度及埋深等内容。工作面钻孔柱状图^[17]及100~500 m之间的二维剖面图如图6所示。

| 层序号 | 柱状 | 累深/m | 层厚/m | 岩层名称 |
|-----|----|--------|--------|---------|
| 1 | | 18.24 | 18.24 | 黄土 |
| 2 | | 153.81 | 135.57 | 砾岩 |
| 3 | | 174.81 | 19.61 | 含砾砂岩 |
| 4 | | 180.92 | 6.11 | 粗砂岩 |
| 5 | | 183.90 | 2.98 | 砂质泥岩 |
| 6 | | 184.83 | 0.93 | 粗砂岩 |
| 7 | | 187.81 | 2.98 | 砂质泥岩 |
| 8 | | 201.58 | 13.77 | 粗砂岩 |
| 9 | | 206.40 | 4.82 | 泥岩/砂质泥岩 |
| 10 | | 222.33 | 15.93 | 6号煤层 |
| 11 | | 224.83 | 2.50 | 泥岩 |
| 12 | | 233.68 | 8.85 | 砂岩 |

(a) 钻孔柱状图



(b) 工作面剖面图

图6 F6110工作面钻孔数据

利用钻孔数据进行三维地质建模时,第1步为钻孔数据处理,明确钻孔位置坐标与各节点坐标信息;第2步运用不规则三角网(TIN)技术方法,实现各地层表面的曲面构建工作;第3步是对模型的检验对比。基于钻孔数据,构建而成的三维地层模型如图7所示。

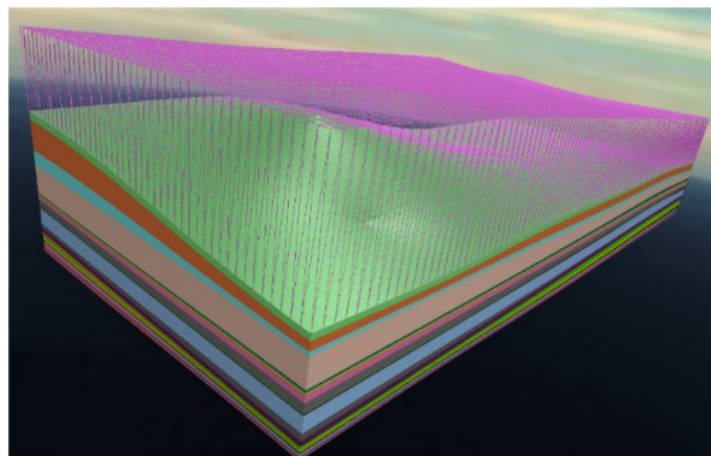
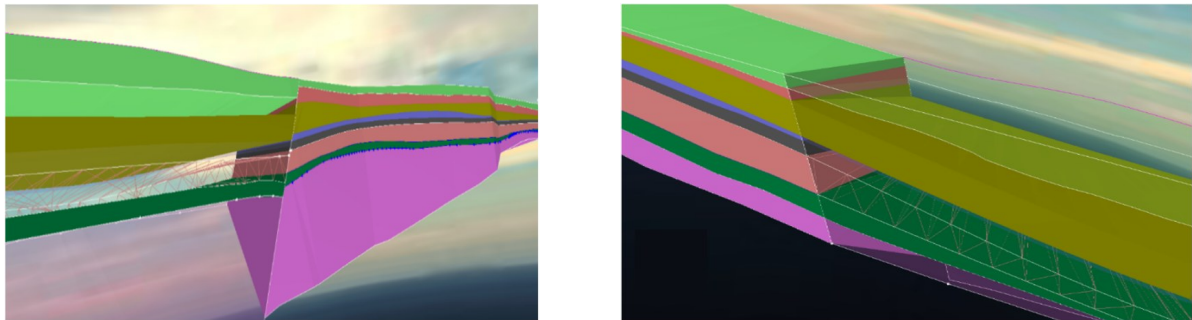


图7 三维地层模型

2.3 地质构造模型

矿井数据存在采集的稀疏性与离散性,数据认知的不确定性较强,给精细刻画、建模带来了难题。由于地质构造可以通过开放或者封闭曲面来描述,因此主要应用不规则 TIN 开展地质构造建模。

地质数据主要为点、线和面数据,点、线数据主要由地面钻探、井下钻探、瞬变电磁、槽波探测、孔中物探、地质写实等手段获取,数据特征为离散化二维分布,需基于这些数据及断层的走向、倾向、倾角、延展等情况,对断层三维面进行构建。由于数据的稀缺,构建的断层面模型断面不光滑、不规则。面数据主要为钻探、井巷揭露、三维地震解释获取,数据特征为规则化、网格化的分界线,由2个正交方向的分界线构成,数据本身可具有定量的走向、倾向、倾角、延展长度,并不需借助经验参数,该方法构建的断层模型能够满足变化较大的陷落柱与逆、走滑断层,断层延展变化范围较大,更逼近真实的矿井断层。基于局部点、线、面数据的地质构造建模如图8所示。



(a)基于局部点、线数据构建的断层模型

(b)基于精细网络数据构建的断层三角网面模型

图8 基于点、线、面数据的地质构造建模

2.4 巷道模型

在煤矿工程平面图上,需要采集导线点数据并选定巷道断面及相关参数。基于导线点向中心线逼近,将巷道断面图元加载到巷道底板中心线上,参数设置^[18]如图9所示。

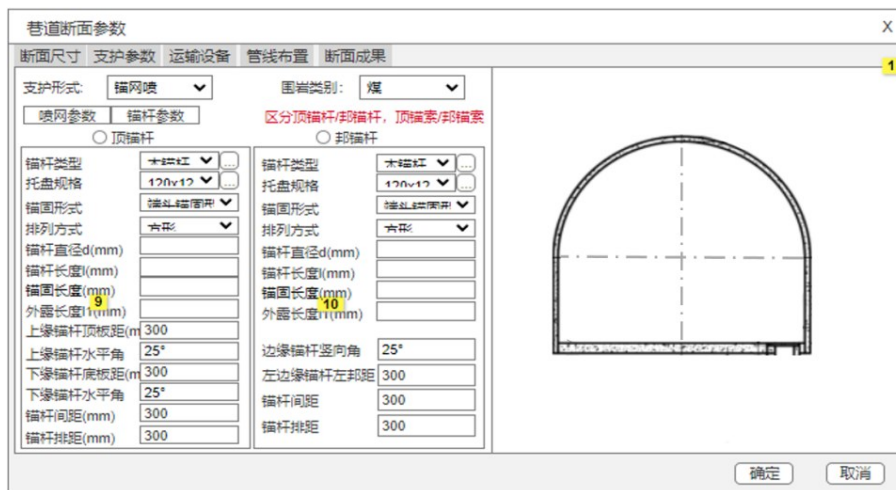


图9 巷道断面参数设置

依托巷道间的拓扑关联关系确定定位点的空间坐标,并在此基础上搭建三维巷道模型框架。针对巷道底板、顶板支护结构、通风设备等各类构筑物,分别设定精细化的特征参数并完成配置,实现巷道的高精度精细建模,效果如图10所示。

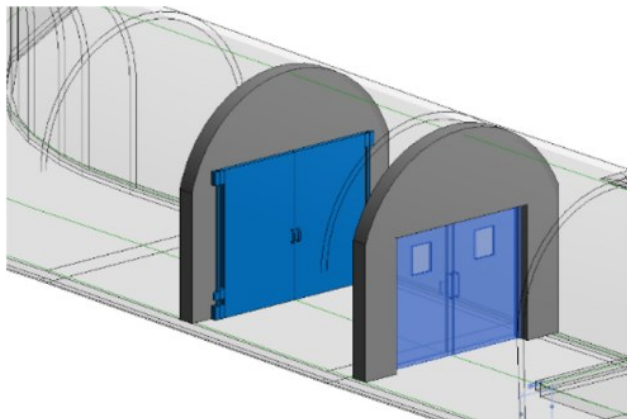
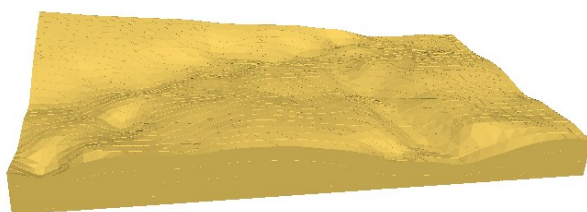


图10 精细巷道建模

3 “地质-数值”融合模型建立

根据三维建模的坐标信息以及相同地质钻孔柱状图、地质剖面图建立融合多要素的三维“地质-数值”融合模型,构建具有应力场、位移场、裂隙场的三维数值仿真模型如图11所示。



(a)地表



(b)地层



(c)巷道

图11 F6110工作面数值模型

对数值仿真模型赋予相应的材料参数进行仿真工作面推进,跟现场真实工作面推进位置进行数据联动,配合完成现场工作面推进过程与相应数值结果的仿真推演。当工作面推进具体位置时,数值模型也走到相应位置,通过查看仿真模型垂直应力分布、岩层位移大小以及覆岩垮落形态,从而达到井下安全生产的目的。具体实施效果如图12所示。

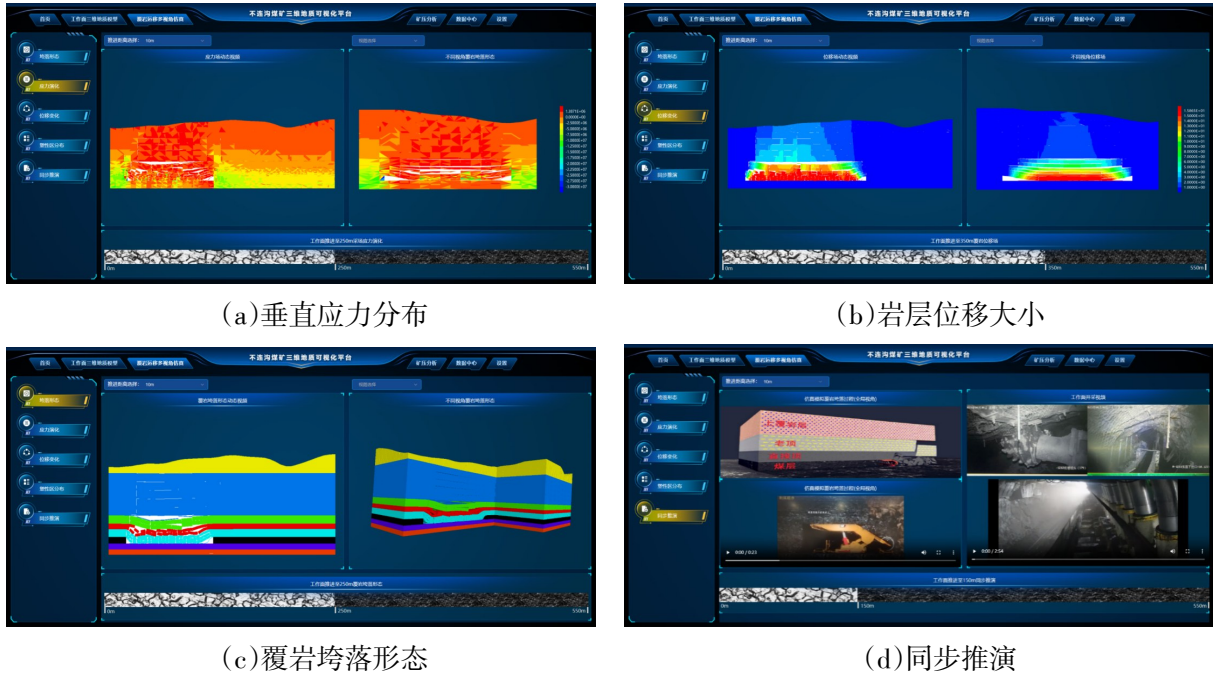


图12 “地质-数值”模型实施效果

4 应用实例

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司不连沟煤矿核定年生产能力达18 000 000 t,6号煤层为其主采煤层。煤层平均总厚为15.93 m,净煤厚度11.80 m,夹矸厚度为4.13 m,埋深平均222.33 m,煤层倾角平均5°,煤层赋存较稳定,含夹矸3~9层,多集中在煤层的中、上部。F6110综放工作面煤层属于稳定煤层。

为实现F6110综放工作面地质信息透明化,建立的三维地质可视化平台如图13所示。

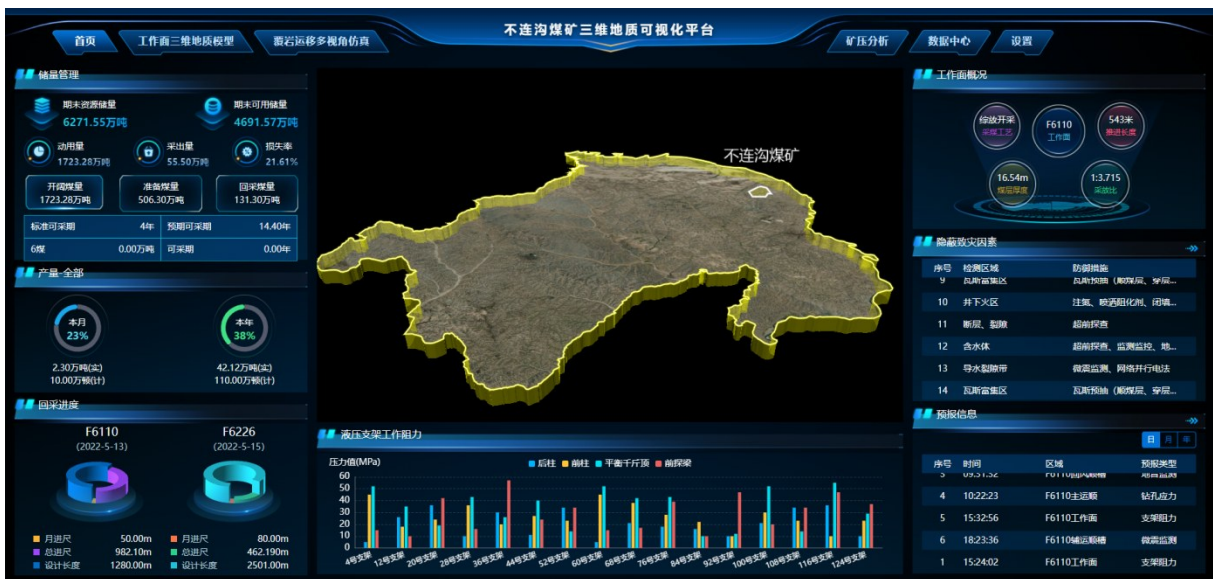
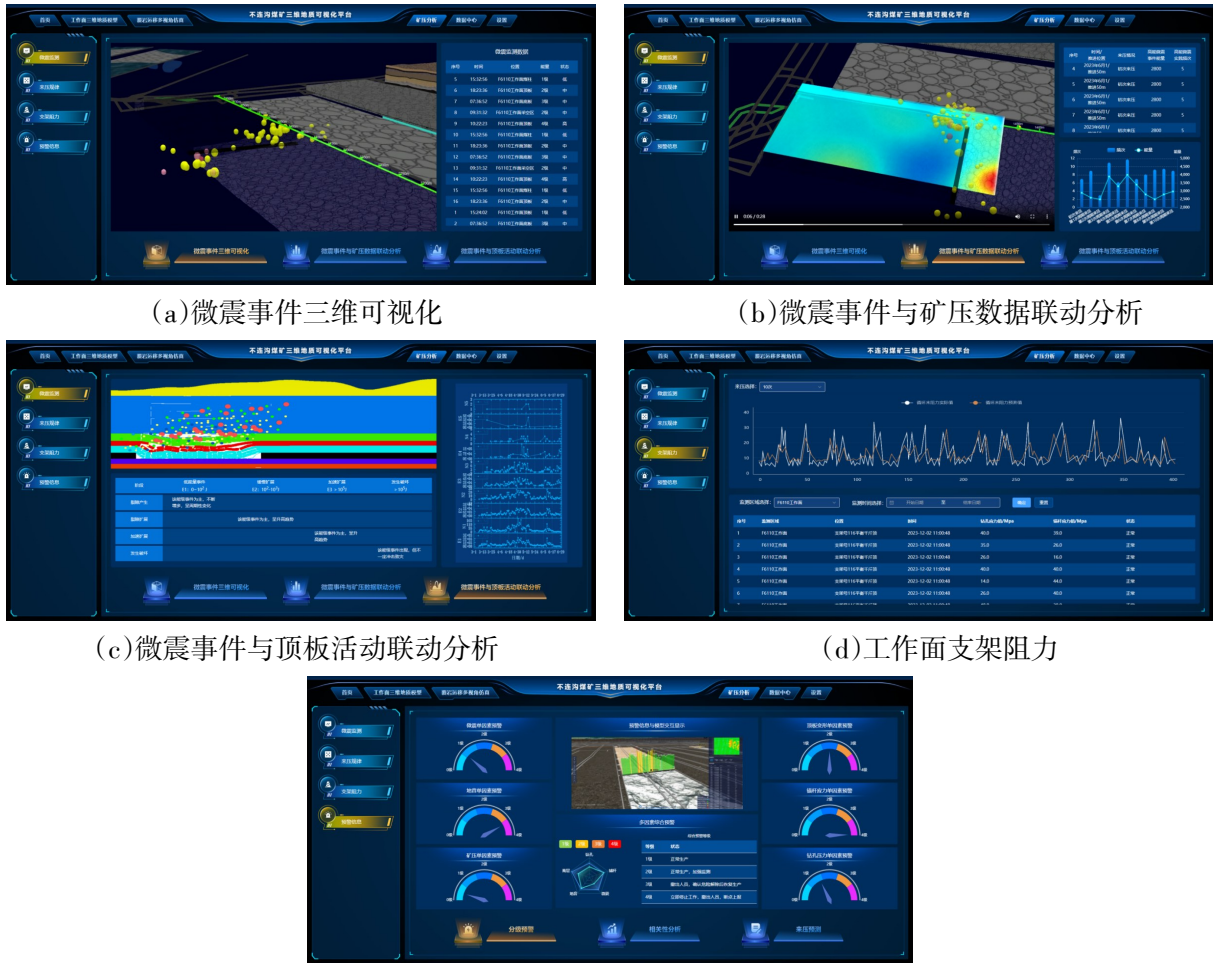


图13 不连沟煤矿透明工作面可视化平台

平台多级预警逻辑包括微震事件三维可视化、微震事件与矿压数据联动分析和微震事件与顶板活动联动分析。利用平台分析井下工作面来压情况、高维微震事件能量和事件频次,并展现出相应的折线图,再与顶板活动联动,能量事件和破坏的能量事件是否出现冲击致灾,并用动画形式为井下安全开采提供保障,预警逻辑如图14所示。



(a)微震事件三维可视化

(b)微震事件与矿压数据联动分析

(c)微震事件与顶板活动联动分析

(d)工作面支架阻力

(e)平台预警信息

图14 平台多级预警逻辑

平台的顶板灾害风险预警并非依赖单一参数,而是基于“微震—矿压—模型”联动分析构建的多级预警逻辑。其具体判断规则为:实时监控微震事件能量与事件频次,当某一区域在单位时间内累计微震能量超过 10^5 J,且事件频次同步出现突增时,则判定该区域进入“岩层异常活跃”状态,触发一级预警,系统在三维模型中对该区域进行黄色闪烁标识。在一级预警基础上,平台启动“地质—数值”融合模型,以当前应力状态为初始条件,模拟未来数个推进循环内该异常区域的顶板破坏与能量释放过程,同时调取该区域液压支架工作阻力数据,若支架阻力持续上升并接近额定值,且阻力变化趋势与模型模拟的应力集中区演变相符,则满足全部预警条件,系统触发二级预警,平台将预警信息推送至调度中心,指导人员提前干预。

在三维地质可视化研究平台的安全保障与指导作用下,融合支架阻力、微震监测、回采巷道围岩变形等实现了F6110综放工作面回采的地质透明化。现场实验结果统计和《2025

年不连沟矿经济效益报告》显示,F6110综放工作面回采效率提升了3%,单一年度综放工作面累计多回收煤炭约230 000 t。

5 研究结论

第一,基于多源异构地质数据融合架构,通过数据分类、空间配准及交叉验证等方法,整合了静态地质数据、动态数据和实时监测数据,解决了传统地质数据精度不足的问题,实现了多源异构数据的空间统一与交叉验证,为高精度三维建模奠定了数据基础。

第二,基于多源异构数据融合成果,实现了地表、地层、地质构造及巷道的高精度三维建模,实现了矿区地质数据的三维直观展示、空间测量分析及多源异构数据交互分析等功能,为智能化开采提供了数据支撑。

第三,根据三维建模的坐标信息,构建数值仿真模型,建立了融合“地质-数值”的多属性模型,并构建了特厚煤层综放开采透明工作面可视化平台,通过现场试验结果,F6110综放工作面回采效率提升了3%,累计多回收煤炭约230 000 t,为矿井安全高效开采及智能化转型提供了技术支撑,展现了三维可视化平台在矿井资源高效利用与安全管控中的实际价值。

6 参考文献

- [1] 韩会军,王国法,许永祥,等. 6~10 m厚煤层超大采高液压支架及其工作面系统自适应智能耦合控制[J]. 煤炭科学技术,2024,52(5): 276-288.
- [2] 王明星,孙浩,于海涛,等. 厚煤层综放工作面覆岩破断及矿压显现规律分析[J]. 煤炭技术,2025,44(2): 52-56.
- [3] 刘振江,邸春生,张友博. 浅谈数字矿山建设的关键事项[J]. 内蒙古煤炭经济,2018(20): 48-50.
- [4] 王家臣. 我国综放开采40年及展望[J]. 煤炭学报,2023,48(1): 83-99.
- [5] 庞义辉,关书方,姜志刚,等. 综放工作面围岩控制与智能化放煤技术现状及展望[J]. 工矿自动化,2024,50(9): 20-27.
- [6] 于斌,郜阳,徐刚,等. 千万吨级综放工作面智能化放煤理论及关键技术[J]. 煤炭科学技术,2024,52(9): 48-67.
- [7] 苟科学,刘阳. 智能化综放工作面无人开采技术在彬长矿区应用与思考[J]. 陕西煤炭,2021,40(S1): 177-187.
- [8] 王国法,庞义辉. 煤炭工业发展关键技术突破与超级煤矿建设[J]. 煤炭工程,2024,56(10): 1-11.
- [9] 范京道,黄克军,李川,等. 我国煤矿智能化技术十年发展与实践[J]. 煤炭科学技术,2025,53(7): 1-24.
- [10] 李伟,孙希奎. 深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践[J]. 煤炭科学技术,2024,52(1): 52-64.
- [11] 毛善君,鲁守明,李存禄,等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用[J]. 煤炭学报,2022,47(1): 515-526.
- [12] 问永忠. 综放工作面基于透明地质的智能协同开采技术[J]. 陕西煤炭,2024,43(5): 1-6.
- [13] 吕延森,张学亮,阮进林,等. 保德煤矿智能综放开采关键技术及展望[J]. 煤炭科学技术,2022,50(S1): 233-243.
- [14] 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.

- [15] 邱芹军,田苗,吴麒瑞,等. 基于多源异构数据的地质知识图谱构建与应用[J/OL]. 地学前缘, 1-17[2025-12-10]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.11.69>.
- [16] 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.
- [17] 牛和平,杜文刚,张方树,等. 基于全尺度建模的不连沟煤矿特厚煤层综放开采覆岩运移规律[J]. 六盘水师范学院学报,2025,37(3):29-39.
- [18] 张珂,杨应迪,刘学通,等. 矿井通风系统三维模型的构建与应用[J]. 工矿自动化,2020,46(2): 59-64.

Construction and Application of Transparent Working Face Platform Integrating Geology-Numerical Model

Zhang Yuting¹, Zhang Fangshu¹, Niu Heping¹, Du Wengang^{2,3,4}, Zuo Kaiyong^{5*}

(1.Inner Mongolia Mengtai Buliangou Coal Industry Co., Ltd., Ordos 014016, China;

2.Xi'an Coal Transparent Geology Technology Co., Ltd., Xi'an 712000, China;

3.State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Xi'an 712000, China;

4.Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;

5.College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex geological conditions and high mining risk in the mining process of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam, taking the fully-mechanized caving face of extra-thick coal seam in Buliangou Coal Mine as the engineering background, a high-precision three-dimensional model covering surface, stratum, roadway, and geological structure was constructed using multi-source heterogeneous data fusion, integrating static, and dynamic and real-time geological data, combined with dynamic simulation and visualization technology. The geometric framework and stratigraphic attributes of the geological model are transformed into the boundary conditions and rock layer partitions of numerical simulation, and a "geological-numerical" fusion model which can be dynamically updated with geological information as constraints is established. A transparent working face visualization platform for fully mechanized caving mining in extra-thick coal seams is developed. The field test results show that through the linkage analysis between the underground working face and the fusion model simulation working face, the real-time support pressure is compared with the stress distribution predicted by the numerical model to warn the roof risk, and the overlying rock caving form and rock displacement distribution of different advancing distances are interactively viewed, which significantly improves the safety and efficiency of fully mechanized caving mining in extra-thick coal seams and reduces the risk of accidents. Under the the safety guarantee and guidance of the three-dimensional geological visualization research platform, the mining efficiency of the fully mechanized caving face is increased by 3%, and a total of approximately 23,000 tons of coal has been recovered accumulatively from the fully mechanized caving face. The roof management and intelligentization level of Buliangou Coal Mine have been enhanced, creating a safe mining environment for the working face. Meanwhile, this transparent working face visualization platform offers broad application prospects in mine safety management, efficient resource utilization, and intelligent transformation..

Keywords: Extra-thick coal seam; Multi-source heterogeneous data; Three-dimensional simulation; Transparent working face; Visualization platform

[责任编辑:杨 洪 江 伟]