



推荐阅读:

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

靳德武,李 鹏,赵春虎,等.采场三维充水结构地质建模及动态可视化实现[J].煤炭科学技术,2020,48(7): 143-149. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.014

JIN Dewu,LI Peng,ZHAO Chunhu,*et al.* Geological modeling and implementation on dynamic visualization of three-dimensional water filling structure in stope of underground mine[J].Coal Science and Technology,2020,48(7):143-149. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.014

采场三维充水结构地质建模及动态可视化实现

靳德武¹,李 鹏^{1,2},赵春虎¹,王玺瑞³

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054;

3.冀中能源股份有限公司,河北 邢台 054000)

摘 要:为了精细刻画采场水文地质结构和跟踪充水要素的动态变化信息,提高矿井水害监测预警技术水平,笔者提出了三维充水结构可视化概念。三维充水结构由静态模型和动态可视化模型组成,静态模型是实体模型,动态可视化模型是在静态模型基础上嵌套充水水源和充水通道时空变化信息的可视化模型。静态模型依据地质、物探、水文地质等勘探数据,在三维开源几何内核 Open CASCADE 与 DSI 离散光滑插值算法、克里金插值算法相结合基础上构建而成的,用来展示采场尺度水文地质结构体的静态特征。动态可视化模型是根据工作面推采过程中水压、水温、应力-应变、视电阻率、破裂范围等动态信息,形成水压导升面、破坏深度包络面等动态衍生信息,在静态模型上嵌入上述动态衍生信息,实现充水要素(充水水源与充水通道)时空展示功能,该模型对数据更新响应时间少于 10~20 s;以底板“下三带”理论为基础,提出依据“水压导升面”与“破坏深度包络面”是否叠置作为建立突水预警判据的技术思路。以葛泉矿东井 11916 工作面为例,通过采集地质、物探、水文地质、采掘工程信息,并融合传感器、网络连续电法、微震等充水要素动态监测信息,构建了采场三维充水结构可视化模型,将其应用于底板突水综合监测预警工程实践中,为 11916 工作面底板水害监测工程设计及智能化预警提供了新的技术平台。

关键词:三维充水结构;静态模型;动态可视化模型;水压导升面;破坏深度包络面

中图分类号:TD67;P641

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)07-0143-07

Geological modeling and implementation on dynamic visualization of three-dimensional water filling structure in stope of underground mine

JIN Dewu¹,LI Peng^{1,2},ZHAO Chunhu¹,WANG Xirui³

(1.Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2.College of Geology and Environment,Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3.Jizhong Energy Resources Co., Ltd., Xingtai 054000, China)

Abstract:In order to obtain detailed dynamic changing information on both hydrogeological structure and water filling factors from a stope of mine, thus improve the monitoring and early warning technology against mine water disaster, a concept of visualizing 3D structure of water filling is proposed. This three-dimensional structure includes a static model and a dynamic visualization model with the static model being a model of real body, and the dynamic visualization model is a visualized model from embedding the static model with temporal and spatial change information of water filling source and water filling channel. The static model is constructed based on exploration data such as geological, geophysical, and hydrogeological on data using the open-source geometry kernel Open CASCADE combining DSI discrete smooth interpolation algorithm and Kriging interpolation algorithm.The static model is created to demonstrate the static characteristics of the hydrogeological structure in a stope scale. On another hand, the dynamic model relies on a range of dynamic information such as water pressure, water temperature, stress-strain, apparent resistivity and fracture range, to generate derivative dynamic data such as hydraulic

收稿日期:2020-02-11;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804103);天地科技股份有限公司科技创新基金资助项目(2018-TD-MS072);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2018XAYZD11-1)

作者简介:靳德武(1966—),男,陕西蓝田人,研究员,博士生导师,现任中煤科工集团西安研究院有限公司副总工程师。E-mail:jindewu@cctegxian.com

lifting surface and the floor failure surface. In the dynamic model, above dynamic parameters are embedded with the static model to illustrate the changes in time and space for water source and channel. The maximum response time for data updating of the dynamic model should be 10~20 s. Based on the theory of “three zones under the bottom” of the floor, we propose a new technical idea to create a water inrush early warning criterion based on whether the “water pressure rising surface” and “floor failure surface” are overlapped. The dynamic model was tested in No.11916 working face of east shaft of Gequan Mine. After collecting geological, geophysical, hydrogeological and mining engineering information, and by integrating essential dynamic monitoring information of water filling such as sensors, network continuous electrical method and microseism, a three-dimensional water filling structure visualization model of the stope is constructed, which is applied to the comprehensive monitoring and early warning system of the floor water inrush, and provides a new technical platform for designing the monitoring system of floor water hazard and the intelligent early warning for No. 11916 working face.

Key words: three dimensional water filling structure; static model; dynamic visualization model; water level rise surface; failure depth envelope surface

0 引言

水害是煤矿5大灾害之一,给国家财产和人民生命造成了重大损失,预防水害事故是煤矿安全生产中的一项重要课题^[1-2]。突水监测预警^[3]是预防和降低水灾事故损失的重要防线,矿井充水条件动态可视化及其预警功能的实现是提升防治水安全技术管理和智能化水平的重要标志。自从三维地质建模概念提出以来,在石油、工程地质等领域获得广泛应用,但在水文地质领域的应用起步较晚,尽管如此,已经取得有一定影响力的研究成果。颜辉武等^[4]建立了常州-武进地区第四系三维水文地质模型;刘天霸等^[5]提出基于剖面数据的多源信息建模方法,建立了华北平原三维水文地质模型;张渭军^[6]建立了孔隙含水层的三维水文地质模型;王建军等^[7]建立了基于沉积相特征的深部水文地质结构模型。纵观这一技术的研究及应用,利用三维地质建模技术构建矿井(或采场)充水结构模型却鲜有报道。随着计算机软硬件技术的飞速发展,三维地质建模技术在“透明矿井”、“水文地质可视化”等热点问题研究中受到普遍重视^[8-9],极大地推动了矿井充水结构三维建模的步伐。

为了精确刻画矿井水文地质结构的三维特征,提高矿井水害监测水平,笔者基于三维地质建模技术构建了采场充水结构可视化实体,并在其中嵌入水害监测信息,开发出集模型展示、数据查询等模块于一体的采场三维充水结构可视化模型,在煤层底板突水综合监测与智能预警系统的构建中发挥了重要作用。

1 采场三维充水结构可视化概念

采场三维充水结构可视化是基于地质、物探、水文地质及采掘工程信息,综合应用三维地质建模和可视化技术,提取充水水源、充水通道等矿井充水要素静态和动态信息,实现充水结构的三维可视化表

达。从水文地质角度,采场三维充水结构基于含水层、隔水层的结构特征,既包含含水层、隔水层空间展布特征,又包含地下水位(压)等水文地质动态信息,水文地质结构体及其属性信息是第1特征;从地质构造角度,裂隙、节理、断层、褶皱轴部(或核部)是表征重点,构造是其第2特征;从采掘扰动角度,力求刻画充水水源和充水通道的空间响应特征,在静态模型基础上描述动态条件的时空变化,采掘扰动形成含、导水条件的空间变异是第3特征。

构建采场三维充水结构模型的主要目的就是精细刻画其空间形态及其组合关系,厘清水文地质结构类型,从“体结构”及“体特征”2个层面,揭示采场水文地质结构体在充水过程中的空间变异规律,进而为水害监测预警提供决策支持平台。

2 三维地质建模理论与算法

2.1 三维地质建模理论

三维地质建模^[10-11]是应用计算机技术,在三维环境下将空间信息管理、空间分析和预测以及图形可视化等工具结合起来,用于地质结构研究的一门技术。三维地质建模以钻孔、剖面、地形图、地质图、物探数据、水文地质监测数据等为基础,建立能够反映地质构造形态及地质体内部属性变化规律的数字化模型。使用适当的可视化方式,该数字化模型能够以虚拟的形式展现真实的地质场景。同时,基于模型的数值模拟和空间分析,辅助用户进行矿井灾害风险分析与科学决策。

三维地质建模中,根据应用领域和问题描述的不同,原始数据可以分为空间数据和属性数据2大类。空间数据用于建立三维地质几何模型,刻画出模型的空间形态和结构特征;属性数据用于建立三维地质预测模型,反映地质属性的空间变化特征。几何模型通过分解自身的体元,将细化后的体元作为预测模型中地质属性的空间结构载体,以克服无法刻

画地质体内部非均一性特征的缺点;预测模型则通过对已知采样点进行插值计算来预测未采样点的空间属性值,通过几何模型对预测过程进行控制和约束。

2.2 三维地质建模算法

地质建模中的算法主要应用于空间特征的构建,即数据插值和网格生成。采场三维充水结构地质模型构建过程中几何模型外形构建的数据插值算法主要使用 DSI 离散光滑插值^[12],对水文地质属性的空间插值使用克里金插值^[13-14];网格生成算法主要使用三角网格构建的 Delaunay 算法^[15]。

1)数据插值算法。在计算机绘图学中,地质界面被称为空间曲面,通过钻探、物探等手段可以得到描述其形态的离散点信息。曲面插值方法主要有反距离加权插值(IDW)^[16]、趋势面(最小二乘法)插值^[17]、薄板样条插值、克里金(Kriging)插值与离散光滑插值(DSI)。

在三维充水结构模型构建过程中,水文地质属性的插值主要应用克里金(Kriging)插值,这种插值方法基于地质统计学思想,以“区域性变量”来描述含(隔)水层标高、水位(压)等连续性变化的指标变量。

几何模型构建过程中对表面数据主要使用离散光滑插值(DSI),这种算法是一种递归插值方法,其运算速度主要取决于算法的收敛速度。

2)网格构建算法。空间曲面是由一系列离散点构成并通过三角形相连而成的曲面。本文使用的是 Delaunay 三角剖分生成算法,算法基本思想是按照剖分规模将边界离散成有序线段,然后,从边界出发,依次以边界线段为三角形的1条边,在边界点与内部点中寻找合适点组成三角形,选取组成三角形顶角最大的点为最终三角形顶点;将已形成三角形的边界线段从边界链表中删除,形成新边界;重复上述过程,直到除边界外,三角形边的两侧均有三角形为止;最终将所有三角形相连,就构成三角网曲面。

3 采场三维充水结构建模及动态可视化关键技术

3.1 采场三维充水结构静态建模技术

采场三维充水结构模型分为3个层次(图1),模型框架层主要是构建整个三维模型的地层架构,数据来源为钻探和地震勘探资料;静态数据层主要对煤层、含水层、隔水层三维结构进行甄别,数据来源为钻探取心、测井、抽水试验、简易水文地质观测等数据;动态数据层是在水文地质结构模型基础上嵌入充水水源、充水通道等充水要素^[18]的动态信息。矿井充水水源包括底板水、顶板水等,充水通道

包括断层、陷落柱、封闭不良钻孔、顶板导水裂隙带、底板破坏带等。

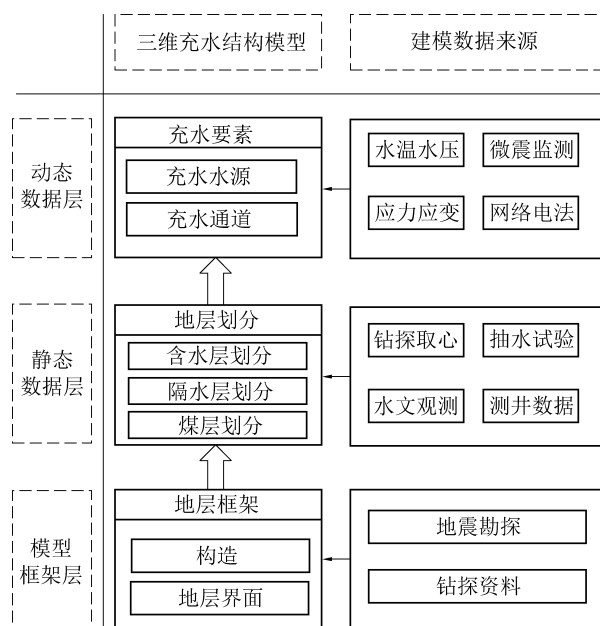


图1 三维充水结构建模框架

Fig.1 Framework of three-dimensional water filled structure

采场三维充水结构模型主要包含静态模型和动态可视化模型。静态模型构建流程如下(图2):①利用地震资料解释的地层数据、断层数据构建地质模型框架,利用钻孔数据对地层界面进行控制;②以钻探、测井资料为依据对含水层、隔水层进行划分;③构建并加入含水层地下水初始水位(压)面;④融合物探异常区、构造发育区。

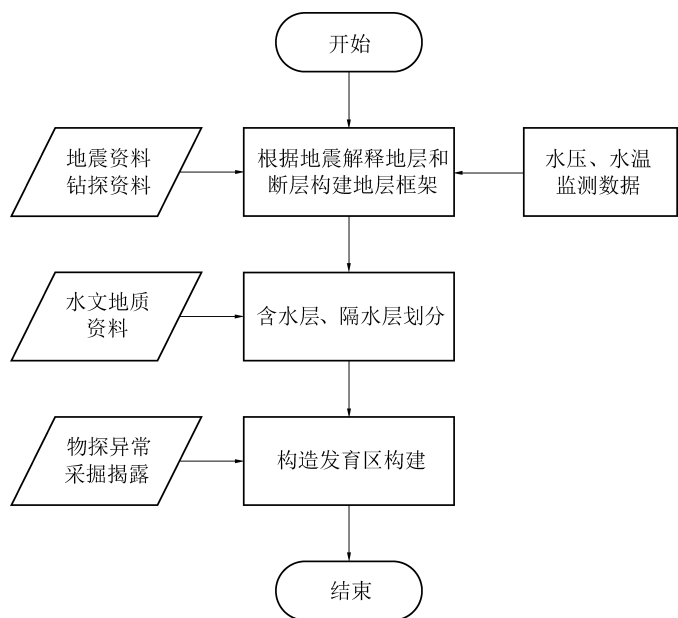


图2 静态模型构建流程

Fig.2 Static model construction process

采场三维地质建模所涉及的数据为多源异构数据,按照其来源,划分为地质、地球物理、水文地质3

大专业数据库。地质数据库包括钻孔信息,钻孔主要用于地层框架的构建;地球物理数据库包括地震勘探、电法勘探等获取的构造、含导水异常数据;水文地质数据库是构建采场三维充水结构的主要数据源,主要包括含(隔)水层划分的钻孔勘探数据、测井数据、抽(放)水试验数据。系统将这些基础数据矢量化为点、线、面文件进行存贮。

3.2 动态可视化建模技术

矿井充水要素(充水水源、充水通道)动态可视化是指以数字、曲面的形式对水位(压)、底板破坏深度、水压导升面等在充水结构静态模型上交互显示的过程。本文充水水源是底板水,通过水压监测、网络电法监测数据反映其动态变化特征;充水通道指底板破坏深度范围,通过微震监测反映裂隙发育程度及动态变化。

在底板突水监测中包括 3 种动态数据(图 3):①工作面回采过程中,煤层底板岩体中应力、应变、水温、水压对采煤活动的响应,通过在煤层底板埋设对应的传感器监测其变化,实时捕捉突水发生的前兆信息,在模型中作为空间点数据,反映充水水源变化情况;②网络电法系统用来监测底板隔水层的视电阻率变化,利用克里金插值方法绘制视电阻率曲面图,反映底板承压水的导升情况;③微震监测系统对采场底板岩石破裂点进行监测定位,形成底板破坏深度包络面,实现对底板充水通道时空变化的连续监测。

动态可视化模型构建流程如下(图 3):①在三维充水结构静态模型上增加应力、应变、水温、水压传感器,并在模型上实时显示(数据更新间隔 10~20 s);②从网络电法监测系统提取代表底板承压水导升高度的“水压导升面”,根据网络电法系统的数据处理时间进行动态更新(数据更新时间 20~30 min);③从微震监测系统中提取底板岩石破裂事件,以三维散点图形式显示在模型上,并在所有有效事件三维散点图上构建包络曲面,形成“破坏深度包络面”;根据“水压导升面”与“破坏深度包络面”是否叠置,按照“下三带”理论形成突水判据,(其数据更新间隔为 10~20 s),并进行警情发布。

模型动态更新示意如图 4 所示。图中最上层半透明体为煤层,红色面模型为根据微震监测数据构建的底板破坏深度包络面,绿色面模型为根据网络电法监测数据构建的底板水压导升面。图 4a 显示 t_1 时刻无突水危险性时的面结构特征,图 4b 显示 t_2 时刻,当“水压导升面”与“破坏深度包络面”叠置形成底板突水时面结构特征。

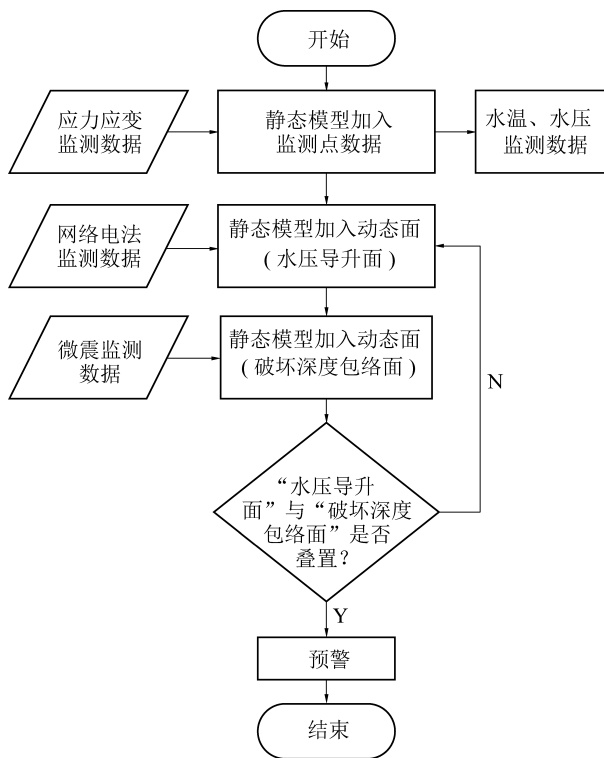


图 3 动态可视化模型构建流程

Fig.3 Construction process of dynamic visualization model

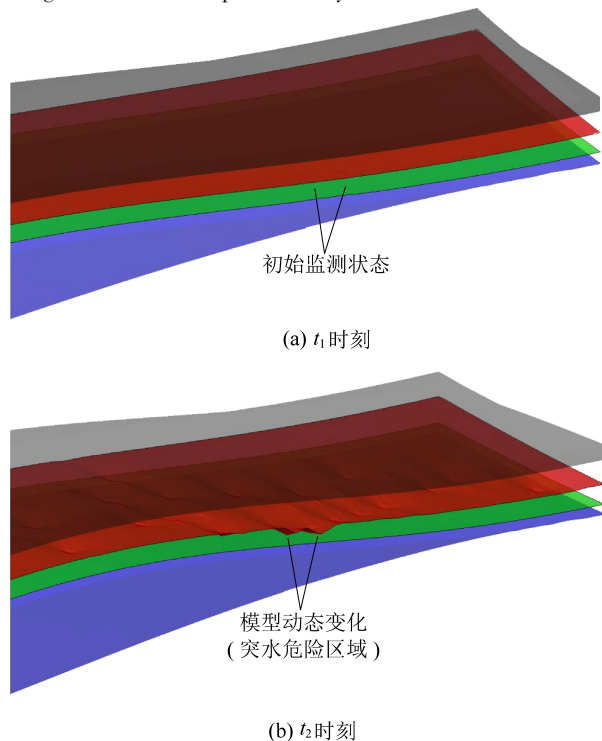


图 4 充水结构模型动态更新

Fig.4 Model dynamic update of water filled structure

采场三维充水结构动态可视化模型需要可视化平台来承载展示,可视化平台架构设计分为 4 层,支撑层、数据层、业务层、界面(UI)层。支撑层是利用

面向服务的体系架构、空间数据库、关系数据库等技术,通过数据和服务融合,提供采场三维充水结构监测预警平台所需的服务和共享资源;数据层是通过分析矿井地质、物探、水文地质、采掘等多源数据信息,利用支撑层建立采场充水结构多源数据库,实现钻孔、地层、断层、陷落柱、水位/水温、底板破坏深度、水压导升面等存储功能;业务层在服务器端通过三维开源几何内核 Open CASCADE^[19]与 DSI 离散光滑插值、克里金插值算法结合,实现空间查询等功能供 UI 层调用;UI 层是基于 PHP 和 WebGL 技术开发 B/S 架构的三维地质模型,同时,在线构建实时监测预警平台。

平台基于采场充水结构多源信息,以三维可视化软件为建模平台,通过数字化处理地质、物探、水文地质监测等资料,基于三角网格动态生长算法,依据充水水源、充水通道等信息,构建三维充水结构三维可视化模型;采用物联网技术将监测数据实时传输到三维充水结构模型平台上,将水温、水压、应力-应变等监测“点”数据、网络电法和微震等监测“面”数据与三维充水结构静态模型相融合,形成能够动态更新并含有时间维度的“点-面”结合的采场三维充水结构动态可视化模型。

4 应用实例分析

4.1 模型构建

葛泉矿东井 11916 工作面呈单斜构造,倾角 $7^{\circ} \sim 21^{\circ}$,煤厚 4.2~6.6 m,平均厚度 5.0 m。9 号煤层底板至本溪灰岩间距平均 19 m,至奥灰顶界面平均间距 40 m,对工作面掘进有影响的断层主要有 SF1 断层。

为了构建采场三维充水结构模型,设计开发了在 CAD 几何操作核心上加入地质统计学插值算法的三维充水结构建模软件。基于采场三维充水结构多源信息数据库,通过对井田地球物理勘探资料的数字化处理,提取断层、褶皱、陷落柱等构造信息,基于三角网动态生长算法,形成采场充水结构三维可视化模型。采用离散光滑插值算法对地面勘探钻孔数据、注浆钻孔的岩性数据、巷道测量数据、采掘揭露的煤层顶底板数据、断层数据、推测陷落柱数据、电法异常点数据进行几何模型构建,形成了包含煤层、奥灰、本灰、巷道、断层、陷落柱、采前电法勘探异常点的采场充水结构静态模型(图 5);基于实时监测数据,采用克里金插值算法动态构建底板破坏深度包络面、水压导升面(图 6)。

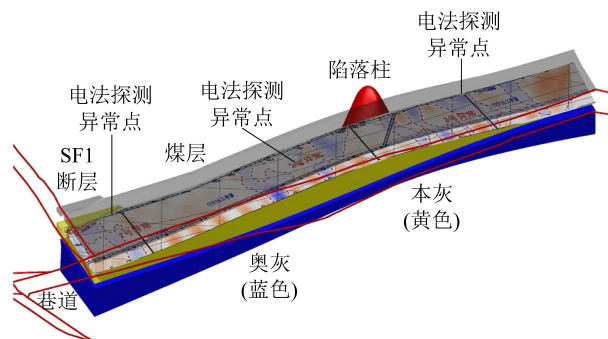


图 5 采场充水结构静态模型

Fig.5 Static model of water filled structure in working face

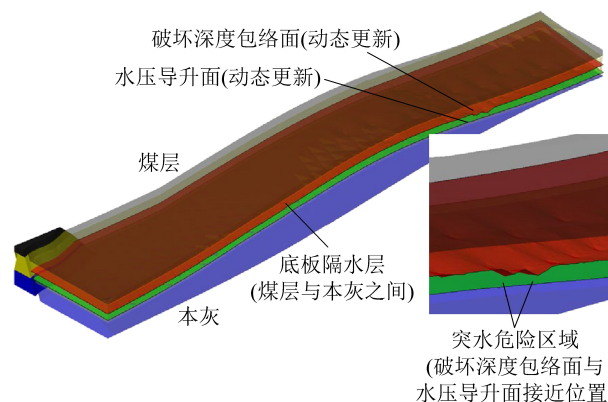


图 6 采场充水结构动态可视化模型

Fig.6 Dynamic model of water filling structure in working face

4.2 模型应用

东翼轨道大巷一侧的工作面底板隔水层厚度变化不大,如图 7 所示,工作面西北侧剖面如图 8 所示,工作面东北部分隔水层厚度最大,从东北部到西南部隔水层越来越薄。根据采场三维充水结构模型,分析 11916 工作面开采煤层底板岩层厚度变化特征,识别出工作面煤层底板隔水层变薄区。同时,工作面直流电测深法和音频电穿透法存在 3 个异常区(图 5)。将煤层底板隔水层薄弱区、隐伏构造发育区及物探异常区作为监测预警重点区段,以监测点、监测层位、监测范围等为分析重点,形成工作面重点区段 1、2 与正常区段分区监测设计方案(图 9):将区段 1 作为重点区段的原因是该区域存在电法勘探异常点、并靠近 SF1 断层;区段 2 作为重点区段是因为该区域靠近陷落柱位置,底板承压含水层在该区域明显变厚,煤层底板隔水层变薄,相对于其他区域危险性较高。在工作面上、下巷外帮浅孔埋设多频连续电法电极 120 个,微震传感器分别布署于地面 4 个、巷道垂深 1.5 m 浅孔 25 个和井下垂深 20 m 孔中 14 个,并对工作面中部陷落柱附近和断层附近进行了传感器加密布设。

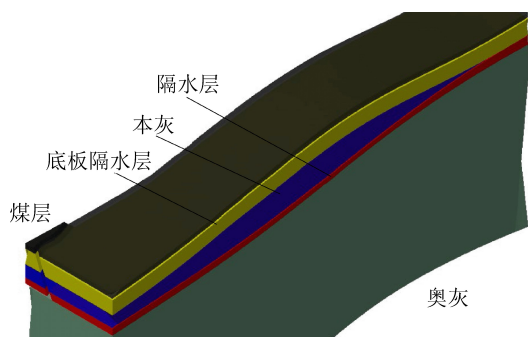


图7 工作面东南侧剖面

Fig.7 Southeast profile of working face

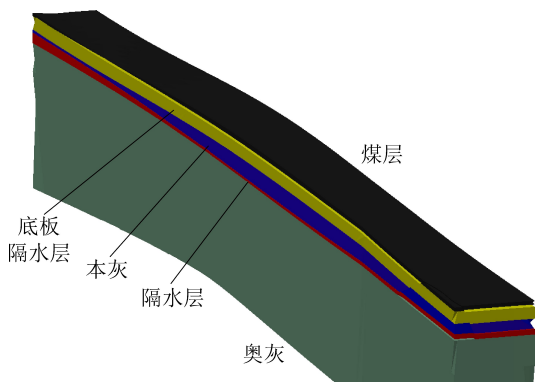


图8 工作面西北剖面

Fig.8 Northwest profile of working face

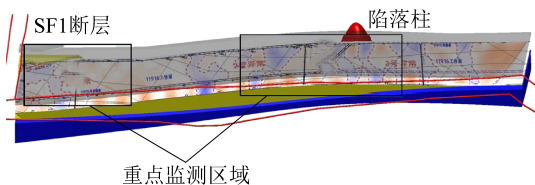


图9 突水监测预警区段划分

Fig.9 Division of monitoring and early warning sections for water inrush

为了更直观地显示实时监测数据,使用 Echarts 图表绘制 2019 年 2 月 21 日至 2020 年 1 月 20 日的水压监测曲线(图 10)。以采场三维充水结构动态可视化模型为基础,当“水压导升面”与“破坏深度包络面”叠置时,按照“下三带”理论形成突水预警判据,监测水压变化剧烈,并出现明显波动。

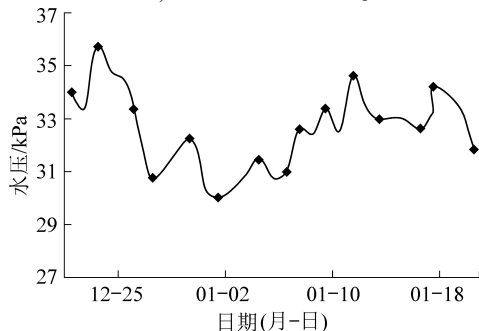


图10 水压实时监测曲线

Fig.10 Real time monitoring curve of groundwater pressure

5 结 论

1) 提出了三维充水结构可视化概念,将三维充水结构划分为静态模型和动态可视化模型,静态模型是水文地质实体结构模型,用来展示采场原生含、导水异常体,是底板突水监测监测方案设计的依据。动态可视化模型是在静态模型基础上嵌入充水要素的动态监测信息,直观显示突水监测预警的前兆信息。

2) 在研究三维地质建模理论和算法的基础上,提出了三维充水结构的建模框架及流程。根据多源异构数据源的特点,形成了三维充水结构平台系统架构方案,采用物联网技术将监测数据实时传输到三维充水结构模型平台上,实现了监测点-面信息的有机融合和时间维度上的动态更新。

3) 以葛泉矿东井 11916 工作面为例,利用自行开发软件构建了包含煤层、奥灰、本灰、巷道、断层、陷落柱、采前电法勘探异常点的采场充水结构静态模型;采用实时监测数据构建了包含动态变化底板破坏深度包络面、水压导升面的采场充水结构动态可视化模型,根据突水危险性划分了监测预警区段,为底板水害综合监测方案设计和智能预警提供了有力的技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 靳德武. 我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5):141-147.
Jin Dewu. New development of water disaster prevention and control technology in China coal mine and consideration on methodology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 141-147.
- [2] 靳德武,刘英锋,刘再斌,等. 煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1):25-29.
JIN Dewu, LIU Yingfeng, LIU Zaibin, et al. New progress of study on major water inrush disaster prevention and control technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 25-29.
- [3] 靳德武,刘英锋,冯 宏,等. 煤层底板突水监测预警系统的开发及应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11):14-17.
JIN Dewu, LIU Yingfeng, FENG Hong, et al. Development and application of monitoring and early warning system to seam floor water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 14-17.
- [4] 颜辉武,马晨燕,费立凡. 地下水流场的 3 维数值模拟及可视化研究:以常州-武进地区为例[J]. 中国图象图形学报, 2004 (12):97-101.
YAN Huiwu, MA Chenyan, FEI Lifan. The research on 3D numerical simulation of the groundwater flow field and its visualization: take the Changzhou-Wujin District as an example [J]. Journal of Image and Graphics, 2004(12): 97-101.
- [5] 刘天霸,张永波,费宇红,等. 华北平原三维水文地质建模及其

- 可视化研究[J]. 水科学与工程技术, 2007, 28(2): 44-46.
- LIU Tianba, ZHANG Yongbo, FEI Yuhong, *et al.* Study on the 3D hydrogeological modeling & its visualization of North China Plain [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007, 28(2): 44-46.
- [6] 张渭军. 孔隙水文地质层三维建模与可视化研究[J]. 金属矿山, 2010(8): 128-131.
- ZHANG Weijun. 3D modeling and visualization for interstitial geohydrology succession[J]. Metal Mine, 2010(8): 128-131.
- [7] 王建军, 陈兵, 刘延锋, 等. 基于沉积相特征的深部水文地质结构模型构建[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 124-129.
- WANG Jianjun, CHEN Bin, LIU Yanfeng, *et al.* Deep hydrogeological structure model building based on characteristics of sedimentary facies[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 124-129.
- [8] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10-17.
- JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, *et al.* Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 10-17.
- [9] 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 Chonglong, LIU Gang. Current situation, existent problems, trend and strategy of the construction of “Glass Earth” [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1280-1287.
- [10] 武强, 徐华. 数字矿山中三维地质建模方法与应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(12): 1996-2006.
- WU Qiang, XU Hua. Three-dimensional geological modeling and its application in digital mine [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(12): 1996-2006.
- [11] 李青元, 贾慧玲, 王宝龙, 等. 三维地质建模的用途、现状、存在问题与建议[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(11): 74-78.
- LI Qingyuan, JIA Huiling, WANG Baolong, *et al.* 3D geological modeling usage, status quo, existing problems and suggestions [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(11): 74-78.
- [12] 王长海, 陈碧宇. 基于离散光滑插值的三维地质体构造网格模型[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2014, 31(6): 600-607.
- WANG Changhai, CHEN Biyu. 3D geological grid model based on discrete smooth interpolation [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2014, 31(6): 600-607.
- [13] 谭继强, 丁明柱. 空间数据插值方法的评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2004(4): 11-13.
- TAN Jiqiang, DING Mingzhu. Anevaluation of spatial data interpolation methods [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004(4): 11-13.
- [14] 王长虹, 朱合华, 钱七虎. 克里金算法与多重分形理论在岩土参数随机场分析中的应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 386-392.
- WANG Changhong, ZHU Hehua, QIAN Qihu. Application of Kriging methods and multi-fractal theory to estimate of geotechnical parameters spatial distribution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 386-392.
- [15] 管镭, 孟宪琦, 魏生民. Delaunay三角网格化算法及实现[J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(1): 138-142.
- GUAN Lei, MENG Xianqi, WEI Shengmin. Delaunay triangulation algorithm and implementation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1996, 14(1): 138-142.
- [16] 余小东, 武莹, 何腊梅. 反距离加权网格化插值算法的改进及比较[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 900-904.
- YU Xiaodong, WU Ying, HE Lamei. Improvement and comparison of inverse distance weighted grid interpolation algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(6): 900-904.
- [17] 管仁荣. 趋势面分析在地球物理勘探中的应用研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 474-478.
- GUAN Renrong. Application of trend surface analysis in geophysical exploration [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 474-478.
- [18] 虎维岳, 赵春虎. 基于充水要素的矿井水害类型三线图划分方法[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 1-8.
- HU Weiyue, ZHAO Chunhu. Trilinear chart classification method of mine water hazard type based on factors of water recharge[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 1-8.
- [19] 苑国强, 张渊. 采用 Open CASCADE 的三维建模平台的开发研究[J]. 工程图学学报, 2008(4): 146-149.
- YUAN Guoqiang, ZHANG Yuan. Development of 3D modeling platform based on Open CASCADE [J]. Journal of Graphics, 2008(4): 146-149.
- [20] 易敏. 面向服务架构(SOA)的空间信息服务研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- YI Min. Research on GIS service based on service-oriented architecture(SOA) [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.