中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



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.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.03.002

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.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.03.002

移动扫码阅读

# 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望

靳德武[1,2],乔 伟[1,2],李 鹏[1],樊 娟[1]

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077;2.陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710077)

**摘 要**:为了解决煤矿充水条件的精准探测、有效预测、动态监测和水害的可靠治理问题,人工智能和信息化技术在我国煤矿水害防治技术和装备中获得广泛应用并取得重要进展。依据智能感知、智能判断和智能执行等智能化技术三要素,将煤矿防治水智能化定义为水害致灾因素的有效筛选、自动识别和精准控制的过程。从 5 个方面系统地总结了煤矿防治水智能化技术现状:即探测装备的智能化芯片应用及数据处理智能算法、含水层富水性分区的信息融合法及煤层底板突水预测的统计学习法、基于智能化传感器及智能算法的矿井水情(害)实时监测预警系统、水害治理工程的信息化设计及智能控制注浆系统、紧急避灾最优路径搜索及突水水源快速识别。结果表明:水害探测装备及解释方法的智能化提高了装备的抗干扰能力,实现了探测数据的快速准确处理;煤层底板突水预测的统计学习法使突水预测精度由 82%提高到 91%;网络并行电法监测仪在五沟煤矿提前 2 d 成功预报了工作面底板突水;智能化注浆系统形成了高度定制化的制浆-注浆数字化解决方案,实现全自动造浆 30 $m^3/h$;避灾抢险智能化为矿井灾害情景下的井下人员合理疏散和应急救援提供了辅助决策支持平台。提出随着智慧矿山、透明矿井技术的不断发展与完善,多源时空智能化探(监)测、玻璃水文地质、水害监测大数据挖掘、井下救援机器人等将会成为热点研究方向,并最终形成煤矿防治水智能化技术体系。

**关键词**:充水条件;智能矿井;多源时空监测;玻璃水文地质;救援机器人;水害预警;透明矿山

**中图分类号**:TD67;TD12 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)03-0010-08

# Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control

JIN Dewu[1,2],QIAO Wei[1,2],LI Peng[1],FAN Juan[1]

(1.*Xi'an Research Institute,China Coal Technology and Engineering Group Corp.,Xi'an* 710077,*China*;
2.*Shaanxi Key Lab of Mine Water Hazard Prevention and Control,Xi'an* 710077,*China*)

**Abstract**:In order to solve mine water filling problems including accurate detection,effective prediction,dynamic monitoring and reliable management of water hazard,artificial intelligence and information technology have been widely applied in coal mine water controlling technology and equipment in China and great progress has been made.Based on the three elements of artificial intelligence technology,namely intelligent perception,intelligent judgment and intelligent execution,this paper defines the intelligent control of coal mine water as the process of effective screening,automatic identification and precise control of water hazard factors.Then the current intelligent coal mine water control technology is summarized from the following five aspects:detection equipment of intelligent chips and intelligent data processing algorithms,information fusion method of water-rich aquifer partition and statistical learning-based approaches of coal floor water inrush prediction,mine water situation real-time monitoring and warning system based on intelligent sensor and arithmetic,informationalized design and intelligent control grouting system of water hazard control engineering,searching for the optimal path for emergency avoidance and rapid identification of water inrush sources.The results show that the intelligentalization of water hazard detection equipment and interpretation methods have greatly improved the equipment anti-interference abilities and the calculation of parameters detected has been acceler-

**收稿日期**:2018-11-12;**责任编辑**:赵 瑞

**基金项目**:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804103);国家自然科学基金资助项目(41807221)

**作者简介**:靳德武(1966—),男,陕西蓝田人,研究员,博士生导师。E-mail:jindewu@cctegxian.com

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



ated.The application of statistical learning methods in coal seam floor water inrush prediction improves the water inrush prediction accuracy from 82% to 91%.In Wugou Coal Mine,the network parallel electrical monitoring instrument successfully predicted the water inrush from working face floor two days in advance.In addition,the intelligent grouting system has formed a highly customized digital pulping-grouting solution scheme and realized automatic pulping 30 $m^3$/h.Disaster prevention and rescue intelligentalization provides an auxiliary decision-making support platform for reasonable evacuation and emergency rescue of underground personnel under the mine disaster scenario.With the development of intelligent coal mine and transparent coal mine technologies,multi-source spatial-temporal intelligent monitoring,glass hydro-geology,big data mining for groundwater hazard situation monitoring,and underground rescue robots will become hotspsrt research fields in the future,and an intelligent technology system of coal mine water control will finally come into shape.

**Key words**:water filling conditions; intelligent mine; multi-source space-time monitoring; glass hydro-geology; rescue robot; water hazard warning;transparent mine

## 0 引 言

煤炭是我国的主体能源,是保障国民经济健康稳定发展的重要基石。煤矿水害是与瓦斯、煤尘、火和顶板灾害并列的 5 大灾害之一,突水不仅影响矿井正常生产,而且会造成重大财产损失与人员伤亡,因此,预防和控制矿井水害事故的发生是保障国家能源安全和维持经济社会可持续发展的一项重要任务[1]。近年来,随着物联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展,矿山智能化技术正在逐步改变传统的煤矿水害防治模式,推动煤矿防治水技术不断创新与升级[2-3]。

智能化是指使对象具备灵敏准确的感知功能、正确无偏的判断功能以及行之有效的执行功能而进行的关联工作。煤矿防治水智能化就是在水害探测、预测、监测、治理等装备、方法和工艺中,通过自动化、信息化和数字化“三化”融合策略,结合信息感知、智能算法、数据挖掘等先进技术,对水害致灾因素进行有效筛选、自动识别和反馈控制的过程。目前,煤矿防治水智能化技术仍然处于细分领域的探索阶段,尚未形成智能化技术体系,主要表现在探测装备及解释方法智能化、水害预测评价技术智能化、监测预警技术智能化、水害治理和避灾抢险技术智能化 5 个方面。

## 1 煤矿水害探测装备及解释方法智能化

煤矿水害探测技术及装备主要针对断层和陷落柱、含水层的富水性、隔水层的厚度等参数进行探测。近年来,随着集成电路、计算机、人工智能等技术的高速发展,煤矿水害探测技术及装备向着高分辨率、自动化、智能化的方向迈进。

### 1.1 矿井高分辨三维地震勘探技术

为了提高采集信号的信噪比和装备的抗干扰能力,三维地震勘探装备采用具有自适应、自我调整增益功能的智能检波器。在断层识别中,通常采用的方法是技术人员在三维地震数据的剖面图上进行手动解释,周期长、主观性强。为了克服这一缺点,学者们采用了多种人工智能算法进行断层识别:①使用“人工蚂蚁”方法压制不连续属性体中的噪声[4];②使用融合地质经验知识的信号处理技术实现断层自动提取[5];③应用人工神经网络生成断层概率体,实现断层的半自动识别[6]。

### 1.2 瞬变电磁探测技术

瞬变电磁技术对低阻体敏感,对场地适应能力强,施工效率高,是目前煤矿水害防治中隐蔽致灾水源探查的主要手段。为了提高瞬变电磁仪的抗干扰能力和数据处理精度,一些学者将多种智能化技术应用于瞬变电磁仪和解释方法中,例如,为了减小环境干扰,采用智能化芯片,实现干扰信号的自动滤除;为了提高反演速度和定位精度,应用神经网络等人工智能算法进行反演。

### 1.3 高密度电法探测技术

在高密度电法数据处理和解释方面,谢林涛等[7]应用人工神经网络算法实现了视电阻率数据的快速反演,提高了数据处理的速度;马斌等[8]开展了基于 BP 神经网络高密度电阻率数据反演研究,取得了一些重要进展;张凌云等[9]联合蚁群算法与 BP 神经网络算法提高了反演精度;戴前伟等[10]结合混沌振荡粒子群算法和 BP 神经网络算法开展高密度电法非线性反演,将基于汉南-奎因信息准则应用于资料解释中[11],相对于单纯应用 BP 神经网络的处理方法在很大程度上提高了数据处理的准确性和反演成图的质量。

## 2 矿井水害预测评价智能化技术

### 2.1 三维充水结构可视化技术

三维可视化地质建模旨在弥补地质信息模拟与表达方法上的缺陷和不足,借助计算机和科学可视化手段,从 3D 空间角度,以数字化形式表征、再现充水水源和充水通道赋存的地质环境,进而对突水危险性

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



进行动态评价和风险分级,同时,对监测、疏降和注浆等防治水工程进行辅助设计与决策(图 1)。

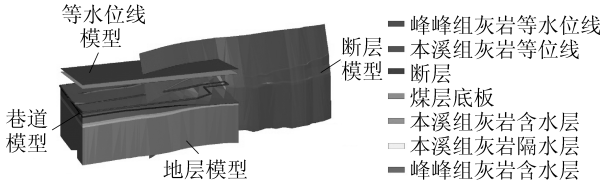



图 1　某煤矿三维充水结构可视化模型

Fig.1　Visualization model of three-dimensional water-filled structure in a coal mine

三维充水结构是基于水文地质建模思想,构建反映阻(隔)水层、充水通道空间展布特征,及其在采掘活动过程中动态演化特征的三维地质体。三维充水结构建模包括静态和动态 2 种模态,动态建模就是融合采掘活动过程中致灾危险源动态辨识并实现模型重构功能的过程。

### 2.2　含水层富水性规律与分区技术

含水层富水性规律及其分区技术主要采用模糊预测、灰色理论、人工神经网络、GIS 技术等方法对井田内主要充水含水层的富水性进行分区。

武强等[12]在分析确定影响含水层富水性主控因素基础上,提出基于 GIS 多元信息融合的“富水性指数法”,应用于含水层富水性分区。赵宝峰[13]根据含水层的沉积和构造特征,选取砂岩厚度、层数、砂地比以及断层与褶皱分维值等评价指标,采用灰色关联度分析各评价指标与富水性之间的相关性,并应用语气算子比较法和模糊综合评价法对含水层富水性进行分区。

### 2.3　煤层底板突水区域预测的统计学习理论与方法

煤层底板突水是多种因素综合作用的结果,依据案例自学习原理,对突水事件及其主要影响因素之间的关联模式进行识别,建立了非线性数学模型,从而对未采区突水危险性进行区域性预测,为防治水工程设计提供决策依据。文献[14-16]在煤层底板突水因素分析的基础上,构建了突水预测指标体系,将信息分析、人工神经网络、支持向量机及决策树等技术方法应用于煤层底板突水预测中,使突水预测精度由 82%提高到 91%。

## 3　煤矿水情-水害监测预警技术智能化

### 3.1　矿井水情远程监测

1)智能芯片和传感器的应用推动了水情温测系统进一步升级。矿井水情监测系统由传感器(液位、水压和流量传感器等)、井下数据采集分站、隔爆电源、地面通信适配器、地面遥测分站、监控主机等组成(图 2)。




图 2　矿井水情监测系统

Fig.2　Mine water monitoring system

煤矿水情远程监测是煤矿生产信息化的重要手段,通过实时采集、实时显示、远程分析,全面掌握矿井水文地质规律,为煤矿防治水规划提供决策依据,其技术进展主要体现在以下方面。

矿井水情实时监测系统,基于智能芯片和自适应传感器设计,对煤矿地面水文地质长观孔水位、水温以及井下水文地质长观孔水温、水压、水沟(管道)流量等进行超远距离实时动态监测。

2)互联网技术的融合真正实现了远程监控与维护。互联网的广泛应用带动了水情监测系统的升级,配备了互联网数据服务器,便于数据的随时随地查询和处理。近年来,中煤科工集团西安研究院有限公司开发设计了一套基于“互联网+”的远程水情监测系统,实现了互联网数据传输与存储、移动端随时查询水情数据、远程控制、远程故障维护、自动故障诊断、专家远程技术支持等功能,已为榆神矿区建立起实时水情监测系统,在煤矿防治水技术保障体系中发挥着重要作用。

### 3.2　煤矿排水自动控制系统

煤矿排水自动控制系统是指在无人值守情况下矿井排水设备能够自动运行的井下排水系统。水泵自动控制系统包括闸阀开合控制、排水参数自动监控、远程传输、水泵故障自动诊断等。

水泵自动控制系统的智能化主要体现在可对水泵启停次数、运行时间长短、水仓水位和管路流量等参数进行自动记录分析;根据水仓水位自动启停水泵;根据水位的不同级别控制水泵启停的台数;根据水泵的电动机轴承温度、电动机绕组温度、电流等水泵与电动机的工况参数以及水泵运行状态做出分析;自动设定备用泵及检修泵,控制各水泵之间的交

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



替工作,降低故障率,实现主排水系统自动控制。煤矿排水自动控制系统综合了工业控制技术和现代软件技术,保证了系统的稳定性和可靠性,并与全煤矿自动化系统进行联网,是全煤矿自动化系统的一个子系统。天地科技股份有限公司对陕北一些矿井进行了设计改造,实现了排水系统固定岗位无人值守、有人巡视的智能化管理和应用。

### 3.3　微震监测技术

微震监测是依靠检波器接收地下岩体破裂时发出的微地震波信息,对这些微震事件发生的时间、位置、能量进行分析,进而做出地质、水文地质解释的一种技术方法。微震监测系统的构成如图 3 所示,主要由单分量传感器、三分量传感器、井下监测分站、隔爆电源、通信网络、地面监测分站、微地震信号处理主机等组成。

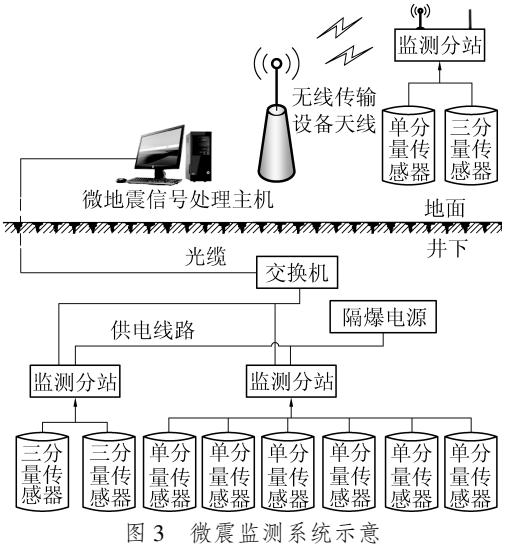



图 3　微震监测系统示意

Fig.3　Schematic of microseismic monitoring system

微震监测在煤矿防治水中的应用主要是通过研究微震事件在煤矿采掘空间中的时空分布和演化规律,监测导水裂隙带发育高度和底板破坏深度、注浆浆液扩散范围及路径。其智能化应用主要集中在震源定位和信号初至拾取 2 个方面,周民都等[17]采用遗传算法对模拟和真实地震事件进行定位,并与 Powell 等方法进行对比,发现遗传算法给出的定位结果在发震时刻和震源深度上更为可靠,并且对非包围地震定位效果较好。

### 3.4　网络电法监测技术

网络电法监测技术是继常规电法和高密度电法后发展起来的新一代电法技术,可实时监测矿井富水区的变化情况,能够提供一种更直观的水害监测手段。网络电法监测系统主要由井下分布式智能电极、供电电源、通信网络和地面监测主站构成(图 4)。

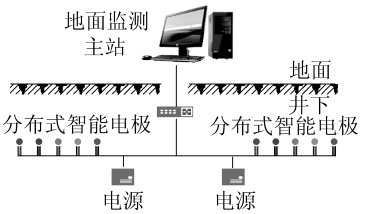



图 4　网络电法监测系统

Fig.4　Network electrical monitoring system

网络电法仪的智能化主要体现在:①智能电极与数据传输系统结合,实现了在线网络电法监测,大幅降低了电法数据采集的时间成本和人力成本;②全电场数据采集,实现远程控制、无人值守。刘盛东等[18]研制的网络并行电法仪应用于多个煤矿,在五沟煤矿提前 2 d 成功预报了工作面底板突水;王传盈等[19]将网络电法应用于工作面注浆改造效果检测;吴超凡等[20]应用网络并行电法对矿井采空区积水进行实时监测,并分析计算积水区变化范围。

### 3.5　煤层底板突水监测预警系统

在采掘活动过程中,矿井水害的形成和发生有一个从孕育、发展到发生的演变历程,在不同阶段,应力、应变、水压(位)、水温等指标均会存在变化,及时、准确地捕捉这些变化的前兆信息,建立矿井水害监测预警技术体系,对于预防重、特别重大水害事故发生具有重要的理论意义和工程实用价值。

靳德武等[21]以华北型煤田煤层底板突水监测预警为例,对可监测性、理论基础、监测条件及其适用范围、预警准则及临突预报判据等开展了系统性研究,研制开发了一套基于光纤光栅通信和传感技术为一体的新型煤层底板突水监测预警系统。

目前,结合“十三五”国家重点研发计划,正在开展“矿井水害智能监测预警技术与装备”的研究,通过大数据挖掘技术和深度学习智能方法,构建水害智能预警云平台,形成矿井水害智能预警新技术、新方法。

## 4　煤矿水害治理技术智能化

煤矿水害治理技术涉及多个学科领域,其智能化主要体现在水害防治工程信息化设计和地面注浆站智能控制 2 个方面。

### 4.1　水害防治工程信息化设计

矿井水害治理涉及水文地质学、岩石力学、流体力学等多个学科领域,如何把水害治理工程与信息化、智能化进行有机融合,从而更安全、高效地开展工作,是目前矿井水害治理工程信息化设计的焦点问题。

为了更加立体化、智能化开展煤矿注浆工程设计,方便快捷指导施工,周明瑞等[22]设计了一套煤矿注浆三维模拟评价系统,形成了高度定制化的数

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



据解决方案,建立了高可靠性的预注浆模拟试验平台,并应用于赵固一矿底板注浆改造工程中。

中煤科工集团西安研究院有限公司借鉴 BIM 技术中工程设计、建造、管理的数字化设计思想,应用 surpac 三维矿山建模软件进行煤层底板注浆改造和金属矿山帷幕注浆工程设计(图 5),将钻探、物探、化探等多源、多维地学数据全面融合进三维充水结构可视化模型中,提高了设计施工效率、节约了勘探成本、缩短了施工周期。

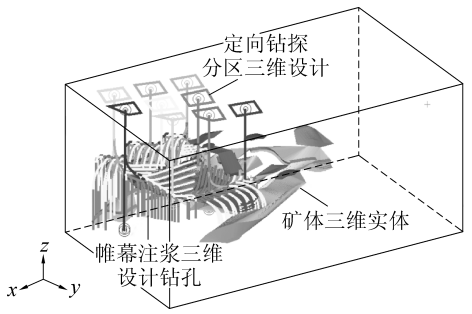



图 5　某铁矿定向帷幕注浆工程三维设计示意

Fig.5　Three-dimensional design diagram of directional curtain grouting engineering for an iron mine

### 4.2　煤矿地面注浆站智能化技术

传统的煤矿地面注浆系统存在工艺单一、计量粗略、制浆效率低、布局不合理等问题。中煤科工集团西安研究院有限公司通过现场试验,优化、改进了制浆、输浆、注浆工艺及配套设备,开发了注浆系统自动化控制软件,形成集感知、计算、控制于一体的智能化闭环系统,将注浆工艺流程打包组合成多个模块,形成标准化工艺单元,从而按需进行优化组合。在储浆池中安装在线浆液密度检测仪及超声波液位计,根据监测数据动态调整物料配比和制浆速度。采用智能称重控制仪、在线浆液密度检测仪和配套的控制算法,使煤矿注浆系统操作实现了一体化智能控制。采用通信模块将 PLC 与计算机连接起来(图 6),实现了人机交互功能。

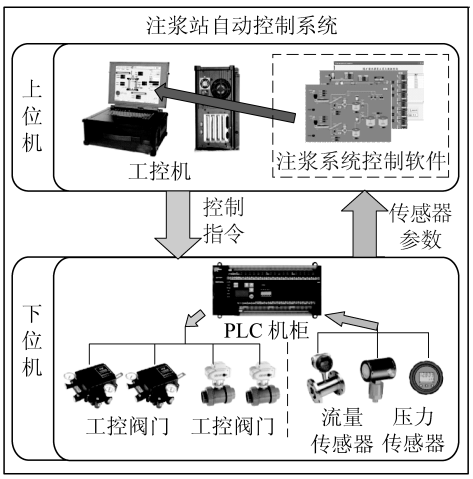



图 6　注浆站自动控制系统的组成

Fig.6　Composition of automatic control system of grouting station

采用“1+1+2”全自动化模式,即一条标准生产线设置 1 个泥浆类制浆模块、1 个灰浆类制浆模块和 2 个注浆模块,实现全自动造浆 30 $m^3/h$,为煤矿地面制浆-注浆规模化、确保注浆工程效果提供了可靠的技术保障。

## 5　煤矿水害避灾抢险智能化

水害应急救援智能化技术主要涉及煤矿井下紧急避(水)灾最优路径搜索及突水水源快速判别 2 个方面。

### 5.1　煤矿井下紧急避灾路径搜索

煤矿井下紧急避灾路径相关研究,旨在找出水灾条件下最优避灾路径,主要包括 Dijkstra 算法、$A^*$ 算法、Bellman 算法、Floyd 算法等经典算法,以及蚁群算法、粒子群算法等群体智能算法。其中,Dijkstra 算法流程简单易实现、适用性强,被广泛应用于各种安全网络系统逃生领域。

赵作鹏等[23]在 Dijkstra 算法的基础上,提出了一种从源节点到其他所有逃生节点的前 $N$ 条最优路径的新方法,并通过 MATLAB 仿真实现。王玉琨等[24]从减少搜索范围和提高搜索效率 2 个方面出发,研究出基于扇形优化的 Dijkstra 算法,将起点和终点连线作为中心轴线,在其形成的扇形区域范围内搜索最短路径。武强等[25]根据矿山突(透)水灾害应急疏散模拟需求及各种复杂影响因素分析,通过突(透)水点及其相关信息获取、巷道水流模拟、人员逃生行为模拟以及智能动态路径搜索,生成了安全快速的井下人员最优疏散路径,为矿井灾害情景下的人员合理疏散、应急救援和人员培训等提供了辅助决策支持平台。乔伟[26]采用蚁群算法模拟煤矿突发水灾时的最佳避灾路径,为井下人员避灾和煤矿应急救援提供了新的技术手段。

### 5.2　突水水源快速判别

准确而快速地判别矿井突水水源,是煤矿防治水工作的一项重要内容。

一些学者从以往的简单水质类型对比分析、特征组分判别等,逐渐发展了神经网络等智能化分析方法,取得了较好的实际应用效果。李彩惠等[27]利用模糊数学方法,开发了水质快速分析与水源快速识别计算机管理系统,对邢台矿业集团所辖的 5 对生产矿井水样进行判别,判别结果有效率达 95%以上;孙亚

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



军等[28]利用模糊综合评判模型进行矿井突水水源快速判别,该模型可高效准确地完成未知突水水样的水源判别,为煤矿水灾抢险提供了决策依据。

## 6 煤矿防治水智能化技术展望

纵观煤矿防治水智能化技术研究现状,从建立和完善智能化技术体系角度出发,在未来一段时间内,应在以下 4 个方面开展持续研究。

### 6.1 多源时空智能化探(监)测技术

智能感知技术的快速发展,将改变传统矿井水害探测模式,推动水害探测和监测方式的创新与变革。机器人观测与控制、智能化信息处理-存储-管理,智能水害监测预警专家系统将有待实现。三维地震领域使用探测机器人,已经开始了人工智能在地球物理领域的应用探索。在矿井水害智能化监测领域,将使用多种类型传感器构建全网式数据采集平台,通过地电、地磁等自动观测机器人和可穿戴设备,获取矿井水害海量数据。

### 6.2 玻璃水文地质

玻璃水文地质作为玻璃地球的一个分支,其核心技术在于可视化空间分析和空间数据挖掘。建立地质信息系统,开展多源、异构和异质地质时空数据采集、管理、集成、融合、处理和分析,并采用可视化技术进行三维全息多尺度建模,可有效透视地下地质结构,直观感知深部水文地质体、水文地质现象和水文地质过程,监测水害孕育过程,实现对矿井水害形成条件的动态辨识和有效控制。

### 6.3 基于人工智能的水害监测大数据挖掘技术

随着探测和监测手段的不断丰富和完善,与水害有关的数据量呈现几何级数增长,为多元异构大数据挖掘与融合分析带来新的机遇和挑战。如何在复杂的水害监测时空大数据中快速准确地挖掘出有价值的信息是今后亟待解决的问题。“人-机-物”三元融合映射出一个庞大的时空数据空间,为透明矿井时空数据关联挖掘创造了有利条件。随着计算机技术的发展,人工智能在矿井防治水技术上的应用范围也在逐步扩大,不仅能够对矿井水害大数据进行快速批量处理,还能够根据时空数据体建立全方位、高精度的矿井水害预测模型。

### 6.4 煤矿水灾事故井下救援机器人

灾后救援是减灾、控灾的重要环节,煤矿发生水灾后,不仅井下环境十分复杂,而且极易发生次生灾害,危及救援人员生命安全。通过井下无线通信网络自动快速构建、复杂条件下矿井融合定位、多维雷达生命搜救等关键技术装备的研究,研发具有越障清障、精准定位、自主导航、无线通信的井下水陆两栖救援机器人具有重大意义。井下救援机器人装备由通信设备、摄像头、履带底盘、水下推进器、生命探测器等组成,代替救援人员深入事故现场执行侦测救援任务,实现救援信息可视化全息交互,为煤矿水灾事故应急救援提供新的技术手段。

## 7 结 论

1)水害隐蔽致灾因素的精准探测、有效预测、动态监测和可靠治理是煤矿防治水技术中智能化三要素(智能感知、智能判断、智能执行)的基本特征,煤矿防治水智能化就是对水害致灾因素进行有效识别和精准控制的过程。

2)三维地震勘探装备、瞬变电磁仪中智能检波器和人工智能芯片等硬件设备以及压制噪声、提高探测精度的人工智能算法构成智能化探测技术硬、软件 2 个重要的方面,在水害隐蔽致灾因素的精准探测方面发挥着重要作用。

3)基于地质建模思想的三维充水结构是融合采掘活动过程中致灾危险源动态辨识的辅助决策平台;基于多元信息融合的含水层富水性分区方法、煤层底板突水预测的统计学习方法充分体现了数据挖掘、信息整合的智能化学习思想,是实现水害致灾因素识别的有效途径。

4)基于“互联网+”的远程水情监测系统、煤矿排水自动控制系统、煤层底板突水监测预警系统等是互联网、自动控制与人工智能相结合的产物,实现了 24 h 全天候远程监测与控制功能,提高了监测系统的可靠性和科学化决策水平。

5)在水害治理技术智能化方面,借鉴 BIM 技术中工程设计思想,将多维地学数据全面融合进三维充水结构可视化模型中,优化了勘探设计,节约了勘探成本;开发形成的集感知、计算、控制于一体的注浆站智能化闭环系统,实现了物料配比和制浆速度的动态化控制。

6)以安全网络系统逃生思想为基础,研究了水灾条件下最优避灾路径的多种智能搜索算法,为井下人员避灾和煤矿应急救援提供了新的技术手段。开发的水源快速识别计算机管理系统,为煤矿水灾抢险提供了决策依据。

7)多源时空智能化探(监)测、玻璃水文地质、水害监测大数据挖掘、井下救援机器人等,将会成为未来一段时期内煤矿防治水智能化技术持续研究的方向。

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



**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] 陈晓晶,何　敏.智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):208-212,236.
CHEN Xiaojing,HE Min.Framework system and key technology of intelligent mine construction [J].Coal Science and Technology,2018,46(2):208-212,236.

[3] 韩　茜.智慧矿山信息化标准化系统关键问题研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.

[4] RANDEN T,PEDERSEN S I,SONNELAND L.Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data[C].71st Annual International Meeting,SEG,expanded Abstracs,2001(1):550-554.

[5] DORM G A,JAMES H E .Automatic Fault Extraction(AFE) of faults and a salt body in a 3-D survey from the Eugene Island Area,Gulf of Mexico[J].Search & Discovery,2005(4):96-108.

[6] TINGDAHL K M,ROOIJ M.Semi-automatic detection of faults in 3D seismic data[J].Geophysical Prospecting,2005,53:533-542.

[7] 谢林涛,付志红,谢品芳,等.基于神经网络的视电阻率快速算法[J].地球物理学进展,2009,24(4):1527-1532.
XIE Lintao,FU Zhihong,XIE Pinfang,*et al*.A fast algorithm of apparent resistivity based on neural networks [J]. Progress in Geophys,2009,24(4):1527-1532.

[8] 马　斌,祃艳双,王永会,等.基于 BP 神经网络的高密度电阻率数据反演方法[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010,26(3):599-603.
MA Bin,MA Yanshuaug,WANG Youghui,*et al*.High-density resistivity data inversion method based on BP neural network[J]. Journal of Shenyang architecture University: Natural Science,2010,26(3):599-603.

[9] 张凌云,刘鸿福.ABP 法在高密度电阻率法反演中的应用 [J].地球物理学报,2011,54(1):227-233.
ZHANG Lingyun,LIU Hongfu.The application of ABP method in high-density resistivity method inversion [J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(1):227-233.

[10] 戴前伟,江沸菠.基于混沌振荡 PSO-BP 算法的电阻率层析成像非线性反演[J].中国有色金属学报,2013(10):2897-2904.
DAI Qianwei,JIANG Feibo .Nonlinear inversion for electrical resistivity tomography based chaotic oscillation PSO-BP algorithm [J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2013(10):2897-2904.

[11] 戴前伟,江沸菠,董　莉.基于汉南-奎因信息准则的电阻率层析成像径向基神经网络反演[J].地球物理学报,2014,57(4):1335-1344.
DAI Qianwei,JIANG Feibo,DONG Li.RBFNN inversion for electrical resistivity tomography based on Hannan-Quinn criterion [J].Chinese Journal of Geophysics,2014,57(4):1335-1344.

[12] 武　强,樊振丽,刘守强,等.基于 GIS 的信息融合型含水层富水性评价方法:富水性指数法[J].煤炭学报,2011,36(7):1124-1128.
WU Qiang,FAN Zhenli,LIU Shouqiang,*et al*. Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: water richness index method [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(7):1124-1128.

[13] 赵宝峰.基于 AHP-模糊综合评判法的矿井水害威胁程度研究[J].安全与环境学报,2013,13(3):231-234.
ZHAO Baofeng.On the AHP-fuzzy comprehensive evaluation of threatening degree caused by mining water floods[J].Journal of Safety and Environment,2013,13(3):231-234.

[14] 靳德武.华北型煤田煤层底板突水预测信息分析理论、方法及应用[J].中国岩溶,2003,22(1):41-46.
JIN Dewu,Theory,method and application in analyzing the forecasting information of water inrush from the bottom coal layer in northern China coalfield[J].Carsologica Sinica,2003,22(1):41-46.

[15] 刘再斌.基于数据挖掘分类技术的煤层底板突水预测[D].北京:煤炭科学研究总院,2008.

[16] 李　颖.基于支持向量机的煤层底板突水预测方法研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2007.

[17] 周民都,张元生,张树勋.遗传算法在地震定位中的应用[J].地震工程学报,1999,19(2):167-171.
ZHOU Mindou,ZHANG Yuansheng,ZHANG Shuxun.Application of the genetic algorithm to seismic location [J].China Earthquake Engineering Journal,1999,19(2):167-171.

[18] 刘盛东,王　勃,周冠群,等.基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):267-272.
LIU Shengdong,WANG Bo,ZHOU Guanqun,*et al*.Experimental research on mine floor water hazard early warning based on response of geoelectric field in groundwater seepage[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):267-272.

[19] 王传盈,朱海锋.网络并行电法技术在受水威胁工作面注浆改造前后中的应用[J].山东工业技术,2016(15):140-140.
WANG Chuanying,ZHU Haifeng.Application of network parallel electric method in water hazard threaten face before and after grouting[J].Shandong Industrial Technology,2016(15):140-140.

[20] 吴超凡,刘盛东,邱占林,等.矿井采空区积水网络并行电法探测技术[J].煤炭科学技术,2013,41(4):93-95.
WU Chaofan,LIU Shendong,QIU Zhanlin,*et al*.Technology of network parallel electric method applied to detection of water ponding in mining goaf [J].Coal Science and Technology,2013,41(4):93-95.

[21] 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.

[22] 周明瑞,仲淑姮,徐忠忠.基于 JME 的工作面底板注浆三维模

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net



拟评价系统[J].煤矿安全,2015,46(11):97-103.
ZHOU Mingrui,ZHONG Shuheng,XU Zhongzhong.Three-dimensional simulation evaluation system for floor grouting based on Java Monkey Engine [J].Safety in Coal Mines,2015,46(11):97-103.

[23] 赵作鹏,宋国娟,宗元元,等.基于 D-K 算法的煤矿水灾多最优路径研究[J].煤炭学报,2015,40(2):397-402.
ZHAO Zuopeng, SONG Guojuan, ZONG Yuanyuan, *et al*. Research on the multi-optimal paths of coal mine floods based on the D-K algorithm[J].Journal of China Coal Society,2015,40(2):397-402.

[24] 王玉琨,吴　锋.矿井应急救援中最佳避灾路线的 Dijkstra 算法的改进实现[J].工矿自动化,2008,34(5):13-15.
WANG Yukun,WU feng.Implementation of improved Dijkstra algorithm for choosing the best escape route in mine's emergency rescue[J].Industry and Mine Automation,2008,34(5):13-15.

[25] 武　强,徐　华,杜沅泽,等.矿山突(透)水灾害应急疏散模拟系统与工程应用[J].煤炭学报,2017,42(10):2491-2497.
WU Qiang, XU Hua, DU Yuanze, *et al*. Emergency evacuation simulation for water bursting disaster in mine [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(10):2491-2497.

[26] 乔　伟.基于蚁群算法的煤矿水害避灾路径研究[J].西部探矿工程,2017(8):126-128.
QIAO Wei. Research on route for escaping coal mine water disaster based on ant colony algorithm [J].West-China Exploration Engineering,2017(8):126-128.

[27] 李彩惠,牛相锋,任素珍,等.水质快速分析及水源快速判别系统[J].煤田地质与勘探,1998(3):43-46.
LI Caihui,NIU Xiangfeng,REN Suzhen,*et al*.A System for fast water quality analysis and fast water source discrimination[J].Coal Geology & Exploration,1998(3):26-28.

[28] 孙亚军,杨国勇,郑　琳.基于 GIS 的矿井突水水源判别系统研究[J].煤田地质与勘探,2007,35(2):34-37.
SUN Yajun,YANG Guoyong,ZHENG Lin.Distinguishing system study on resource of mine water inrush based on GIS[J].Coal Geology & Exploration,2007,35(2):34-37.



靳德武(1966—),陕西蓝田人,煤矿防治水专家,研究员,博士生导师。1988 年 6 月本科毕业于中国地质大学(武汉)水文地质专业;1993 年 6 月毕业于煤炭科学研究总院矿产普查与勘探专业,获硕士学位;2004 年 6 月毕业于长安大学地质工程专业,获博士学位,2004 年 12 月至 2008 年 1 月进入西安理工大学土木工程博士后流动站从事科研工作。现任中煤科工集团西安研究院有限公司副总工程师、陕西省煤矿水害防治技术重点实验室副主任。中国煤炭工业安全科学技术学会水害防治专业委员会委员、中国地质学会矿山水防治与利用专业委员会委员、煤炭行业煤矿安全标准化技术委员会水害防治及设备分会委员、中国煤炭学会资深会员、国际矿井水协会(IMWA)会员、国际水文地质学家协会(IAH)会员、《煤炭科学技术》和《煤田地质与勘探》编委。《煤矿防治水手册》编委,《煤矿防治水规定》及其释义起草人之一。

主持完成科技部社会公益专项课题、“十一五”国家科技支撑计划项目、“十二五”国家科技支撑计划子课题各 1 项,目前正在主持“十三五”重点研发计划项目“矿井水害智能监测预警技术与装备”。首次提出煤层底板突水预测泛决策分析的理论与方法,形成并发展了信息分析、人工神经网络、非线性动力学、支持向量机、决策树等突水预测方法。建立了煤矿防治水技术体系的基本框架(“三探”、“三测”),提出了基于地质工程学的矿井水害防治方法论和水害预防“五原则”,即绕避、改造、降势、适应及隔离。建立了应力强度因子和警情直接指数两级突水预警判据,开发并形成了基于光纤光栅通信和传感技术集数据实时采集、远程分析、警情发布等功能于一体的煤层底板突水实时监测预警系统。在滑坡地质灾害防治方面,应用积分类比法推导并建立了冻土斜坡模型试验相似指标和相似判据,完成国内首例斜坡冻融模型试验;根据有效应力原理和 Lagrange 插值方法,推导并建立了不同渗流条件下无限斜坡安全系数的统一形式,提出青藏高原多年冻土区热融滑塌地质灾害形成的滞水润滑效应机理。

获国家科技进步二等奖 1 项,省(部)级一等奖 1 项,二等奖 1 项,三等奖 3 项。发表学术论文 60 余篇,出版专著(合著)5 部。