



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 煤炭科学技术

## 工作面智能供液技术进展与应用

李然 刘波 王大龙 陈敬斌 王统诚 周如林 王剑强 赵康康 于远征 秦怀新 刘明亮 王超

### 引用本文:

李然, 刘波, 王大龙, 等. 工作面智能供液技术进展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 247-253.

LI Ran, LIU Bo, WANG Dalong. Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 247-253.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0487>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 综采工作面智能供液技术及发展趋势

Intelligent fluid supply technology in fully-mechanized coal miningface and its development trend

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a09b94e8-42ca-45b8-b4b1-3308c69ebb8d>

#### 特厚煤层综放工作面智能控制关键技术研究

Study on key technology of intelligent control in fully-mechanized top coal caving face in extra thick seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/74be4f1f-0ac0-4a87-9049-cf0b22e6bd95>

#### 综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用

Key technology and application of intelligent perception and intelligent control in fully mechanized mining face

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 28-39 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.004>

#### 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术

Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c6b1c720-d198-479d-95e2-28af30c4f8ed>

#### 综采工作面智能开采关键技术实践

Key technology practice of intelligent mining in fully-mechanized coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9adfabb1-c68f-4a26-99d6-2cfbde228b3>

#### 薄煤层智能开采技术研究现状与进展

Current situation and development of intelligent mining technology for thin coal seams

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7aa9378c-a13b-499c-8c85-cedc4e865375>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李 然, 刘 波, 王大龙, 等. 工作面智能供液技术进展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 247-253.

LI Ran, LIU Bo, WANG Dalong, *et al.* Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 247-253.

## 工作面智能供液技术进展与应用

李 然<sup>1</sup>, 刘 波<sup>1</sup>, 王大龙<sup>1,2</sup>, 陈敬斌<sup>1</sup>, 王统诚<sup>1</sup>, 周如林<sup>1</sup>, 王剑强<sup>1</sup>, 赵康康<sup>1</sup>, 于远征<sup>1</sup>, 秦怀新<sup>1</sup>, 刘明亮<sup>1</sup>, 王 超<sup>1</sup>

(1. 北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 工作面智能供液技术是智能化开采的核心技术之一。为解决工作面智能化开采中感知、决策、控制环节中对高数据传输速率、高传输稳定性和高数据处理能力的要求, 研制了基于百兆工业以太网的集中分布式泵站控制系统, 研究了故障预测与健康管理及智能按需供液控制技术, 提升了智能化控制功能; 分析了工作面液压系统工作介质质量综合保障技术的发展需求, 创新了井下一体式反渗透(RO)水处理技术、高效多级过滤技术、全自动化乳化液自动配比及浓度矫正技术等关键技术。攻克高强度抗腐蚀材料、纯水介质吸排液可靠性技术、纯水电阻率保障技术等关键技术难题, 研制适用于纯水工作面的智能供液系统, 推进了绿色开采技术的发展。攻克了无人值守智能安全控制技术、及时快速供液和回液中继技术、综合多参数监测的远距离供液管路安全监控技术等核心技术难题, 解决了复杂地质条件矿井远距离安全、高效供液难题。上述成果在国家能源集团神东矿区、中煤能源山西矿区、山东能源兖矿矿区的薄煤层和中厚煤层的综采、综放工作面进行了推广应用, 满足现阶段智能化开采发展的对供液技术及装备的需求。

**关键词:** 智能开采; 智能供液技术; 智能控制; 故障预测与健康管理; 纯水供液技术; 远距离供液

**中图分类号:** TD42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2022)12-0247-07

### Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face

LI Ran<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, WANG Dalong<sup>1,2</sup>, CHEN Jingbin<sup>1</sup>, WANG Tongcheng<sup>1</sup>, ZHOU Rulin<sup>1</sup>, WANG Jianqiang<sup>1</sup>, ZHAO Kangkang<sup>1</sup>, YU Yuanzheng<sup>1</sup>, QIN Huaixin<sup>1</sup>, LIU Mingliang<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>

(1. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 2. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Intelligent fluid supply technology in working face is one of the core technologies of intelligent mining. In order to solve the requirements of high data transmission rate, high transmission stability and high data processing ability in the intelligent work face, a centralized-distributed emulsion station control system based on the 100 megabit industrial Ethernet was developed, fault prediction and health management technology and intelligent on-demand liquid supply control technology were studied, which improves intelligent control function, and the development demand of the working media quality assurance technology of the work face hydraulic system was analyzed, and key technologies such as underground integrated reverse osmosis (RO) water treatment technology, high-efficiency multi-stage filtration technology, fully automated emulsion automatic ratio and concentration correction technology and other key technologies were innovated. In order to overcome the key technical problems such as high-strength corrosion-resistant materials, reliability technology of the suction and discharge valves under pure water medium and pure water resistivity assurance technology, the development of intelligent fluid supply system under pure water condition has promoted the development of green mining technology. The core technical problems such as unattended intelligent safety control technology, timely and rapid liquid supply and return relay technology, integrated multi-parameter safety monitoring of long-distance supply pipeline technology with integrated multi parameter monitoring have been overcome, and the problems of remote safe and efficient liquid supply in mines with complex geological conditions have been solved. This achievement has been popularized and applied in the fully mechanized mining and fully mechanized caving working faces of thin and medium thick coal seams

收稿日期: 2022-01-17 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0487

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2018-TD-ZD015, 2020-TD-ZD015)

作者简介: 李 然(1984—), 男, 河北唐山人, 研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: liran@tdmarco.com

in Shandong Mining Area of National Energy Group, Shanxi Mining Area of China Coal Energy Group, and Yankuang Mining Area of Shandong Energy Group, meeting the demand for liquid supply technology and equipment in the development of intelligent mining at this stage.

**Key words:** intelligent mining; intelligent fluid supply technology; intelligent control; fault prediction and health management; pure water supply technology; long-distance fluid supply technology

## 0 引言

我国煤矿智能化建设的高速发展,对综采/综放工作面成套装备智能化的创新提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。智能集成供液系统是为液压支架提供工作介质的电液动力装备,是整个工作面液压系统的“心脏”。随着工作面智能化水平的不断提升,智能供液技术的重要作用也愈加凸显。大量的研究工作和创新成果<sup>[2-5]</sup>,推动着智能供液技术及装备取得了长足的进步,离着《中国制造 2025-能源装备实施方案》明确提出的“智能化清洁高效集成供液系统”战略目标也更进一步。

近年来,围绕着煤矿智能化生产的实际需求,智能供液技术面临许多亟待解决的新课题。随着自主感知、自主决策、自动控制功能的应用研究,高数据传输速率、高传输稳定性和高数据处理能力对控制系统架构提出了更严格的要求,对系统故障预测与健康管理和、工作面按需供液功能方面的需求迫切;工作介质保障系统中,对矿井原水前处理、多级过滤、乳化液配比等工作介质制备的各阶段的自动化、集成化、高效化程度的需求也愈加强烈;生态脆弱的矿区已经将环境友好性作为硬性约束,超前提出了工作面液压工作介质纯水化的思路,并进行了先导性工程实践<sup>[6-8]</sup>。随着开采深度的增加,地质条件复杂变化,亟需安全、高效、智能化供液技术及装备的创新支撑。

针对工作面智能供液技术的主要难题,国内外企业和高校开展了深入的研究。国外传统泵站厂家在大流量泵站及其控制系统进行了研究,开发了更高流量等级的超大流量泵站,并通过对其控制算法和故障诊断技术的创新,实现了泵站的快速响应和精确控制;国内的高校及企业采用自主创新或引进国外的方式对超大流量泵站进行了攻关,随着智能化泵站控制系统的普及、变频控制与电磁卸荷技术的深度融合以及高精端传感器的应用和智能诊断功能的日趋完善,高压大流量乳化液泵站整体技术水平不断进步,同时国内高校和厂家还在工作介质保障系统领域进行了广泛深入的研究,扩大了工作面智能供液的适应范围,提高了成套设备的使用寿

命,目前国内工作面智能供液产品已在全国主要煤炭生产单位进行了广泛的推广应用。

结合行业发展的技术目标和煤炭智能化生产需求,依靠笔者所在单位在综采智能供液领域十几年的技术积累,创新研制了基于百兆工业以太网平台的集中分布式控制系统,提升了数据传输速率、稳定性及数据处理能力,研究开发泵站故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)系统及按需供液控制技术;创新了井下一体式反渗透(Reverse Osmosis, RO)水处理技术、高效多级过滤技术、全自动化乳化液自动配比及浓度矫正技术,优化了工作介质的保障体系;开发了成套纯水供液系统,满足制水电阻率  $10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  以上的技术要求,并在国能集团神东矿区示范推广 3 套;针对复杂地质条件矿区推广远距离供液/配液技术,攻克了无人值守智能安全控制技术、及时快速供液和回液中继技术、综合多参数监测的远距离供液管路安全监控技术等核心技术难题,实现 2 000 m 以上远距离供液工程示范。

## 1 智能供液控制技术

### 1.1 网络型控制系统

控制系统作为整套集成供液装备的智能化控制核心,负责设备运行状态实时监测、控制逻辑综合决策及执行、数据存储分析传输等功能,对整套系统自动运行效果起到关键作用<sup>[9]</sup>。创新研制了基于网络型平台的集成供液控制系统,采用集中分布式设计架构,融合实时工业以太网通讯架构,集成传感采集、人机交互、逻辑控制等功能,对不同排布方案具有良好的适应性,具备灵活扩展性及第三方对接能力,提升了集成供液系统智能控制效果。

关键研究内容具体如下:①双总线实时冗余通讯技术,如图 1 所示,采用实时工业以太网为主通讯链路,辅以高速工业现场总线,解决了单一工业总线实时性和健壮性不足的难题,建成集成供液系统高速通讯链路,实现了“一网到底”。工业实时以太网通讯速率达到 100 Mbps,网络延迟时间低于 100 ms,高速工业现场总线通讯速率由 33.3 kbps 提升至 500 kbps;②研制了全功能综合决策中心,由于整套集成供液设备列车排布距离长、设备监测点多、控制

逻辑复杂,操作人员需要在监控中心控制主站位置总览设备全貌,因此将控制主站打造成功能强大的综合决策中心。全方位提升硬件参数,设计了包含传感监测、通信状态、参数设置、故障诊断、历史曲线等功能的全套软件系统,解决了监控信息不全面、远程操控不便捷等问题;③研制了多功能远程监控终端,由于系统内各设备监控需求存在差异、设备间排布距离不等,因此将控制分站打造成互换性强的多功能远程监控终端。采用低功耗嵌入式技术,实现本安型设计,具备丰富的外设接口,内置可切换式软件,具备良好的设备兼容性,解决了互换性、兼容性差等难题。

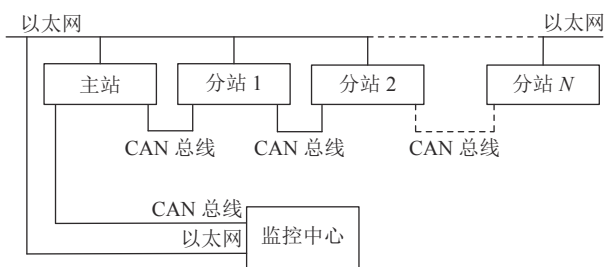


图1 网络型控制系统架构

Fig.1 Framework of ethernet-based control system

## 1.2 故障预测与健康管理技术

泵站作为集成供液系统的核心设备,需要长时间连续不间断运行,对设备的高稳定性、低故障率有严格要求。泵站系统包含了旋转运动、往复运动和非线性运动等一系列复杂的运动模式<sup>[10]</sup>,工作介质和润滑介质理化性能不同,长期处于满负荷运转状态,如出现故障将造成严重损失。故障预测与健康管理技术能够为高强度、高精密度、高价值设备提供良好的运行安全保障。创新开发泵站 PHM 系统,系统架构如图 2 所示,通过频谱分析、大数据综合分析、数学模型解析等技术,提升了高压大流量泵站的故障预测与健康管理水平。

关键技术具体如下:①油液品质监测技术,通过对泵站曲轴箱中齿轮油多参量实时监测,分析齿轮油介质状态,从多维度为泵站故障诊断提供依据。采用水含量传感器、密度传感器、介电常数传感器、颗粒度传感器,对齿轮油中微水含量、含水率、密度、运动粘度、介电常数、固体颗粒度、金属磨屑等进行实时采集,利用云平台物联网诊断分析系统对监测数据实时计算,云平台包括数据采集层、网络传输层、计算资源层、云管理层等,将现场采集的油质数据远程传输至云计算服务器进行分析,实现对泵站齿轮油的多参量直接动态观测,提升曲轴箱故障诊断能

力;②振动监测分析技术,由于泵站内部存在齿轮啮合、轴承滚动、阀芯冲击等多种运动形式,因此内部状态直接观测非常困难,通过高频工业加速度监测技术,对泵站内部旋转运动部件和往复运动部件进行振动幅值、速度、加速度实时监测,通过自适应和准正交的信号分解方法,对主轴转速、齿轮啮合频率、柱塞动作频率等敏感特征提取,对振动信号进行频域分析,实现对泵站的振动监测;③故障库综合分析技术,通过故障注入实验获取故障库样本,采用神经网络等智能算法进行模型训练,建立故障诊断模型,采用数据仓库技术,建立面向主题的多维数据立方体,实现建立故障库、专家库、数据模型。

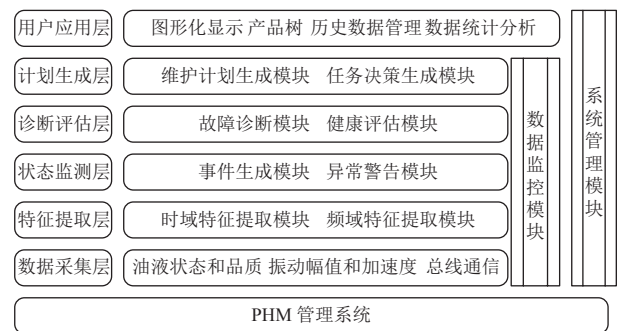


图2 故障诊断与健康管理系统架构

Fig.2 Architecture of prognostics and health management system

## 1.3 智能按需供液控制技术

综采工作面液压支架主要动作包括降/升柱、移架、推溜、伸/收护帮板。采煤机牵引速度、支架动作速度、供液流量和系统压力之间存在耦合关联关系<sup>[11]</sup>。支架各动作对流量的需求差别较大,造成供液系统压力瞬变特征明显,压力陡降影响设备推进速度,压力陡升增加设备故障率。如图 3 所示,通过建立支架供液数学模型、泵站群协同管理、压力控制专用算法等方面创新,系统压力波动范围由 17~34 MPa 稳定在 26~32 MPa,提升了智能按需供液控制效果。

关键技术具体如下:①采煤成套设备数学模型,结合综采工作面液压支架自动化采煤工艺、供液系统和支架动作速度关系,对支架液压系统进行参数化分析,分别从稳态特性和瞬态特性角度对支架液压系统实现建模计算;②泵站群组协同管理技术,由于多台泵站同时运行,各泵站同时动作会加剧系统压力波动,因此通过阶梯式压差控制技术、泵站均衡磨损技术,优化各泵联动效果,解决各泵动作区间重叠导致系统压力波动大的问题;③随压变频控制技术,由于支架动作会造成用液需求流量和系统压力的突变,通过变频卸荷联动技术、故障自动切换技术、

随压自动启停技术等系列专用算法,有效提升了系统压力稳定性。

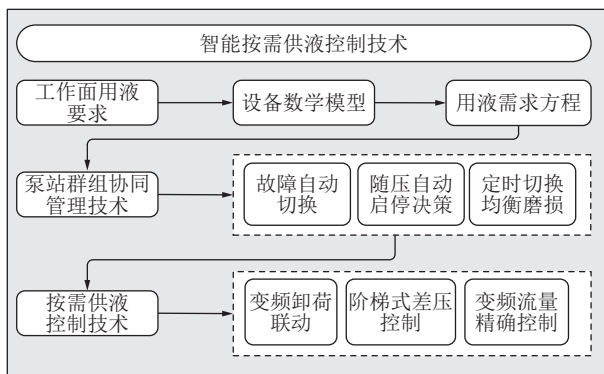


图3 智能按需供液控制技术

Fig.3 Intelligent on-demand fluid supply control technology

## 2 工作介质质量综合保障技术

### 2.1 井下一体式水处理技术

井下水处理技术,作为综采液压工作介质质量综合保障的前处理阶段,重点解决由于恶劣水质引发的乳化液皂化、滤芯结垢堵塞、阀件生锈等问题,有效降低硫酸根和氯离子,保证高质量供给乳化液配比用水<sup>[12]</sup>。创新研制了井下一体式反渗透(RO)水处理装置,如图4所示,将制水、储水、供水、加药、电控等功能集成,采用RO分级制水、供水,适用不同井下供水工况,实时监测设备运行和产水状态,实现自动控制和无人值守。

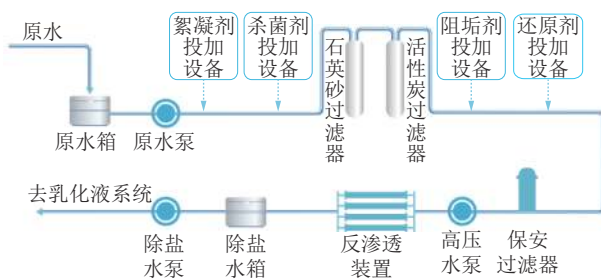


图4 井下一体式反渗透水处理装置原理示意

Fig.4 Schematic of underground integrated reverse osmosis water treatment

关键研究内容具体如下:①开发了基于全国各矿井水质数据库的水处理工艺选型软件系统,因矿制宜量身定制水处理系统;②研究了自清洗过滤、精密过滤、保安过滤和反渗透四级水处理工艺流程,水质理化指标可达到:电导率 $<200 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,溶解性总固体(TDS)质量分数 $<150 \times 10^{-6}$ ,浊度 $<0.1 \text{ NTU}$ ;③反渗透环节,通过反渗透膜组器的优化配置,能够实现不同工况下高效高质量供水,为适应于大采高工作面

10 t/h以上供水能力需求,通过三段反渗透膜组进行分级产水保证供水效率;④电控方面采用PLC控制,实现制水、供水、过滤器反冲功能,并能够对产水流量、产水水质、药剂存量进行监测和预警;⑤针对进口水压 $>1.5 \text{ MPa}$ 工况,研制高稳定性进水减压装置及原水蓄水装置两种技术方案进行解决,从而满足不同工作面进口水压工况。

### 2.2 多级过滤技术

工作面液压系统由于各元部件的生锈、磨损、失效等原因,容易引起液压系统的污染。液压系统液质清洁度关系工作面支护安全、质量和效率,工作面液压系统需要实现安全高效的清洁度保障<sup>[13]</sup>。多级过滤系统是乳化液工作介质清洁度保障的关键装置。通过优化滤网结构、强化滤网骨架、引入电液控制二次排污、研究回液反冲结构等方面,提升了高压过滤和回液过滤的可靠性和可维护性。

关键技术具体如下:①高可靠性过滤滤网技术,由于煤矿工作面复杂液质条件,过滤设备多采用成熟可靠的孔隙式过滤方式,其过滤性能稳定,纳垢能力和可维护性较强,目前以多层金属编织折波滤网和楔形网等结构为代表的高可靠性过滤滤网,为供液系统提供稳定可靠的过滤效果;②全压差滤网强化技术,由于煤矿供液系统结构庞杂,无法做到相对稳压过滤,因此滤网需具备全压差的绝对滤芯强度,特别是高压过滤站需承受 $37.5 \text{ MPa}$ 以上耐压条件,通过强化内骨架和外骨架结构,优化多层滤网的内外支撑金属网编织工艺,解决了滤网超压破损击穿等问题;③高压自动反冲洗技术,通过滤网压差自动监测,高可靠性大流量电磁控制阀和排污二次过滤等方式方法,构建了高效可靠的工作面高压进液段过滤屏障;④高效回液反冲洗技术,引入高压反冲液,旋转喷杆结构通过切向力自转进行喷射式滤网反洗,优化整体布局,操作维护性强。

### 2.3 全自动乳化液自动配比及浓度矫正技术

乳化液浓度合理性和稳定性对综采液压支护设备的可靠性和煤炭生产效益的影响显著。为解决煤矿常用的Conflow机械式乳化液自动配比装置<sup>[14]</sup>需人工调节配比浓度范围的应用问题,创新研制了基于折光法乳化液浓度高精检测技术的全自动乳化液自动配比及矫正系统<sup>[15]</sup>。

关键研究内容具体如下:①攻克乳化液浓度模糊控制算法,采用负载敏感比例控制技术和变频和伺服控制技术相结合的方式,混合精度全量程连续可调,介质流量精准控制,实现浓度值实时动态平衡。

②试验研究了 2 种(GND 型和 ADE 型, 简称 G 和 A)基于折光法的浓度传感器在乳化液不同浓度及不同温度条件下的测量结果和糖量仪结果对比分析测量精度, 从而确定适合的传感装置, 试验结果如图 5 所示; ③开发了手机终端 APP 及数据采集上传系统, 手机终端通过内网实时访问服务器数据, 工作人员可移动中监测乳化液浓度数据; ④引入安全人机工程学设计, 优化了控制器的操作位置, 增加了清洗孔助拆装置, 操作空间增加了防碰撞设计, 优化了吊装结构, 从而方便人员安全操作和维护, 如图 6 所示。

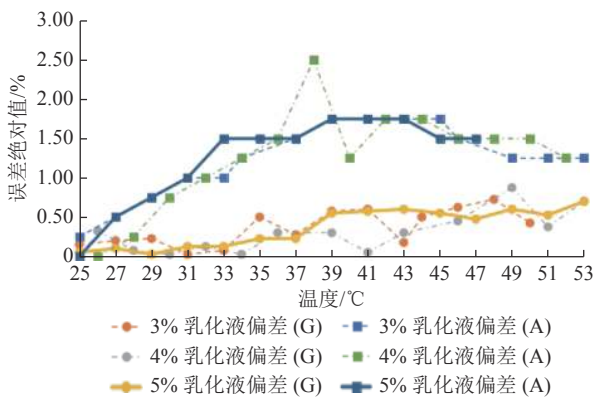


图 5 两种传感器不同浓度及温度条件的对比

Fig.5 Comparison of two kinds of sensors with different concentration and temperature conditions



图 6 乳化液自动配比装置

Fig.6 Fully automated emulsion automatic ratio device

### 3 纯水供液技术

纯水作为工作介质的本质安全环保性, 使纯水压液技术成为近年来煤炭绿色开采技术的研究热点之一。将纯水环境下应用基础的技术难题, 转化为研发的需求, 重点攻克了高强度抗腐蚀材料、纯水介质吸排液可靠性技术、纯水介质高压密封技术、大流量泵阀故障诊断技术、纯水电阻率保障技术等关键技术难题<sup>[6]</sup>, 研制了工作面成套纯水供液系统<sup>[16]</sup>。

关键研究内容具体如下: ①研究了多种锈钢材料的力学及防锈性能, 发现马氏体不锈钢和双相不

锈钢材料抗拉强度均高于 800 MPa, 满足高压应用环境, 中性盐雾试验抗锈蚀性超过 1 200 h, 适用于纯水介质应用; ②研究了物理热渗透+不锈钢, PTFE 涂层+不锈钢, 微弧氧化+钛合金三种表面处理和材料组配用于泵阀耐久性测试, 其中物理热渗透+不锈钢效果, 并经过 3 个月工业性试验验证; ③试验研究了黑四氟芳纶、白四氟芳纶、白四氟角线以及黑四氟角线盘根的密封性能测试和动态密封寿命, 结果黑四氟芳纶盘根、白四氟芳纶盘根最大动态泄漏量均小于  $8 \times 10^{-5}$  (Pa·m<sup>3</sup>)/s, 往复循环次数(测试寿命)均高于  $4.5 \times 10^4$  次, 更适合于纯水介质的应用; ④开发了基于 LVDT 传感器的泵阀阀芯故障诊断系统, 通过对阀芯运动轨迹的监测, 当阀芯或弹簧出现故障, 阀芯位移将出现较大的变动, 将在诊断系统的上位机软件进行故障提示及报警; ⑤发明了多级圆柱形液箱+多级浮顶结构, 减少浮顶发生变形或是错位倾斜, 降低空气进入纯水内的机率, 制水阶段水质电阻率可达到 10 MΩ·cm 以上。

### 4 远距离供液技术

远距离供液技术, 将传统综采工作面的安装回撤工艺、设备列车重量、供电总负荷等方面进行优化再造, 解决复杂巷道环境的适用性和拉移设备列车安全风险控制难题<sup>[17]</sup>。重点攻克了可视化远程安全控制技术、远距离及时供液技术、回液背压治理技术、远距离管路液体参数监控技术, 开发了远距离管路动态仿真模型及参数分析软件。

关键研究内容具体如下: ①研究了融合全景摄像技术、噪音、振动多感官监测监控技术、公里级远距离通讯的多备份冗余自切换技术、基于 Lora 技术的远程手持终端主动干预方法, 实现无人值守智能安全控制模式。②提出了近工作面蓄能稳压装置及时快速供液的方案, 实现精准及时供液, 解决远距离供液系统响应速度慢、压力波动大的问题; ③研制回液中继系统, 通过液箱液位的数据信号采集对增压泵的启停进行控制, 保证回液液位稳定性, 解决下行供液回液背压过大造成的工作面回液不畅问题及降柱速度慢的问题; ④研究一种基于水力模型、综合多参数监测的远距离供液管路安全监控技术方案, 攻克了针对水锤、爆管、漏损、阻塞等问题的多参数管路监测难题, 实现对远距离供液管路的异常评估和风险预警; ⑤开发了远距离管路内流体工作过程动态仿真模型, 优化远距离供液的沿程压力损失计算方法。建立了管路沿程压力损失数学模型, 开发了

远距离供液参数计算分析软件,实现了远距离供液参数自动计算。

## 5 供液工作面工程示范

1)薄煤层示范项目:国家能源集团神东石圪台煤矿 22<sub>上</sub>303-1 工作面<sup>[18]</sup>,平均煤厚 1.4 m,采高 1.2~1.4 m,工作面长度 200 m。该工作面采用 GUL-500 型等高式采煤机, ZY18000/25/45D 型液压支架。工作面供液系统采用双进双回环形供液,配置 6 泵 3 箱智能集成供液系统,其中 4 台 630 L/min、37.5 MPa 型乳化液泵站, 2 台 800 L/min、16 MPa 型喷雾泵站,为了适应薄煤层限高要求,发明了有轨移动式泵站列车。成套乳化液泵组采用变频控制技术,供液流量可在 315~1 890 L/min 按需供液。在高效智能供液的有效支撑下,等高薄煤层工作面,月均生产原煤 12.4 万 t,年生产能力 150 万 t,生产效率达到国内领先水平。

2)中厚煤层示范项目:中煤能源华晋王家岭煤矿 12309 智能化综放工作面<sup>[19]</sup>,采高 3.1 m,放煤高度 3 m,循环进度 0.865 m。该工作面采用了 SAC 型电液控制系统, SAM 型综采自动化系统及 SAP 型智能集成供液系统。供液系统采用 9 泵 4 箱配置,包括 3 台 630 L/min、37.5 MPa 型乳化液泵站, 6 台 500 L/min、16 MPa 型喷雾泵站,保证自动化移架、放煤喷雾。供液系统布置在距离工作面 2 000 m 以外的固定硐室中,采用无人值守智能安全控制技术,实现远距离安全供液。同时 SAP 系统采用与 SAC\SAM 系统相同的系统控制平台,各系统之间能够互联互通,可根据支架移动信号及流量需求,提前使泵站运转到特定速度,提供准确的压力和流量。

3)纯水工作面示范项目:首套纯水集成供液系统于 2018 年 8 月在国家能源集团神东锦界煤矿 31408 综采工作面应用<sup>[6-8]</sup>,实现水质电阻率可达到 2 M $\Omega$ ·cm 常态化运行;第 2 套系统于 2020 年 11 月在国家能源集团神东哈拉沟煤矿 22411 综采工作面应用,实现制水阶段水质电阻率可达到 10.9 M $\Omega$ ·cm;第 3 套系统于 2021 年 6 月在国家能源集团神东锦界煤矿 31214 超纯水综采工作面应用,制水阶段水质电阻率 17 M $\Omega$ ·cm。通过优化改进提升适用性,在可靠性、耐久性、电阻率保障等方面满足纯水工作面对供液系统的要求。

4)远距离供液示范项目:山东能源兖矿鲍店煤矿 7302 工作面,工作面走向长度 1 400 m,工作面长度 300 m,采用 7 泵 4 箱集成供液系统,其中 4 台

630 L/min、37.5 MPa 型乳化液泵站,实现最远供液距离 2 500 m。山东能源兖矿东滩煤矿 3302 综放工作面长度 225.75 m,巷道角度 11°~12°,采用 6 泵 4 箱集成供液系统,其中 3 台 630 L/min、37.5 MPa 型乳化液泵站,供液距离 1 700 m。

## 6 结 论

1)创新研制了基于百兆工业以太网平台的集中分布式控制系统,通讯速率达到 100 Mbps;开发了结合油质和振动分析的泵站 PHM 管理系统;研究了基于支架供液数学模型、泵站群协同管理、压力控制专用算法的智能按需供液控制技术。

2)创新了工作介质质量综合保障技术及装备。研制了井下一体式反渗透水处理装置,提升了多级过滤系统的可靠性及可维护性;攻克了乳化液浓度模糊控制算法,开发了手机终端 APP 及数据采集上传系统,研制了全自动乳化液自动配比及浓度矫正系统。

3)采用科学试验和应用研究相结合的方法,解决了纯水供液技术面临的防锈抗蚀材料及表面处理技术、泵阀故障诊断技术、纯水电阻率保障技术等关键技术难题;攻克了可视化远程安全控制技术、远距离及时供液技术、回液背压治理技术、远距离管路液体参数监控技术等关键核心技术,研制了适用于复杂地质条件的 2 000 m 以上远距离供液系统。

4)介绍了国家能源集团神东石圪台矿 1.4 m 等高薄煤层工作面、中煤华晋王家岭煤矿综放工作面、国家能源集团神东矿区纯水工作面及山东能源新矿和兖矿矿区远距离供液的智能供液工程实践。实践证明,智能供液技术作为智能化开采关键核心技术之一,经过近几年的发展,满足现阶段智能化发展对供液技术及装备的需求。

### 参考文献(References):

- [1] 王国法,刘 峰.中国煤矿智能化发展报告(2020)[R].北京:科学出版社,2020.
- [2] 李 然.综采工作面智能供液技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2019,47(9):203-207.  
LI Ran. Intelligent fluid supply technology in fully-mechanized coal mining face and its development trend[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 203-207.
- [3] 李 然.大采高工作面高压大流量乳化液泵的研制及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(12):145-149.  
LI Ran. Research and development as well as application of high pressure and high flow emulsion pump to large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 145-149.

- [4] 韦文术, 李 然, 王 伟, 等. 一种综采工作面智能供液方法及系统 [P]. 中国: ZL201810333524.0, 2018-09-11.  
WEI Wenshu, LI Ran, WANG Wei, *et al.* Intelligent pressure pumping method and system for fully mechanized coal mining face [P]. China: ZL201810333524.0, 2018-09-11.
- [5] 付 翔, 王然风, 赵阳升. 工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1471–1478.  
FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng. Investigation of hydraulic system simulation and fluid feeding technology with steady pressure of working face supports [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1471–1478.
- [6] 罗 宇. 超纯水介质液压支架改造的技术研究 [J]. *中国煤炭*, 2017, 43(8): 96–99, 137.  
LUO Yu. The technical research on ultrapure water medium hydraulic support modification [J]. *China Coal*, 2017, 43(8): 96–99, 137.
- [7] 李 然, 张启龙, 刘 昊, 等. 煤矿用纯水介质高压大流量柱塞泵关键技术研究 [J]. *液压气动与密封*, 2020, 40(5): 21–25.  
LI Ran, ZHANG Qilong, LIU Hao, *et al.* Research on key technologies of plunger pump under pure water medium condition [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2020, 40(5): 21–25.
- [8] 卢海承, 韦文术, 周如林, 等. 纯水液压系统在综采工作面应用中的关键技术研究 [J]. *煤矿机械*, 2019, 40(4): 136–139.  
LU Haicheng, WEI Wenshu, ZHOU Rulin, *et al.* Research on key technology of pure water hydraulic system in fully mechanized mining face [J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(4): 136–139.
- [9] 李首滨. 矿用乳化液泵站控制系统的现状及发展趋势 [J]. *煤矿机械*, 2011, 32(6): 3–4.  
LI Shoubin. Research Status and Development Trend of Mine-used Emulsion Pump Control System [J]. *Coal Mine Machinery*, 2011, 32(6): 3–4.
- [10] 李 然, 王 伟. 综采集成供液系统智能监测诊断技术现状与发展 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 91–95.  
LI Ran, WANG Wei. Status and development of intelligent monitoring and diagnosis technology for fully-mechanized integrated pressure pumping system [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 91–95.
- [11] 周如林, 李首滨, 韦文术, 等. 跟机液压系统压力流量耦合机理研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(5): 129–136.  
ZHOU Rulin, LI Shoubin, WEI Wenshu, *et al.* Study on coupling mechanism of pressure and flow in following hydraulic system of mining face [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(5): 129–136.
- [12] 顾大钊, 李 庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 11–18.  
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, *et al.* Current status and prospect of coal mine water treatment technology in China [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 11–18.
- [13] 田成金. 智能反冲洗高压过滤站的工作原理与控制模式 [J]. *煤矿开采*, 2015(6): 44–46.  
Tian Chengjin. Working principle and control mode of intelligent backwash high-pressure filter station [J]. *Coal Mining Technology*, 2015(6): 44–46.
- [14] 赵文才, 付国军. 煤矿智能化技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2020.  
ZHAO Wencai, FU Guojun. Coal mine intelligent technology [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2020.
- [15] 安美珍, 王剑强, 何正刚, 等. 乳化液全自动实时配比和浓度矫正控制方法 [P]. 中国: ZL201610315991.1, 2016-09-07.
- [16] 李首滨, 田成金, 王剑强, 等. 一种水介质矿用集成供液系统 [P]. 中国: ZL201911356382.0, 2020-06-05.
- [17] 王国法, 庞义辉, 徐压军, 等. 综采成套技术与装备系统集成 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.  
WANG Guofa, PANG Yihui, XU Yajun, *et al.* Longwall mining technology and equipment system integration [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2016.
- [18] 罗 文, 杨俊彩. 神东矿区薄煤层安全高效开采技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(3): 68–74.  
LUO Wen, YANG Juncai. Study on safety and efficient mining technology of thin coal seam in Shendong Mining Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 68–74.
- [19] 张学亮, 刘 清, 郎瑞峰, 等. 厚煤层智能放煤工艺及精准控制关键技术研究 [J]. *煤炭工程*, 2020, 52(9): 1–6.  
ZHANG Xueliang, LIU Qing, LANG Ruifeng, *et al.* Intelligent coal drawing process and the key technologies of precise control for thick coal seam top-coal caving [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(9): 1–6.