

煤炭高效开采数智技术与成套装备研究及应用

王国法¹, 张金虎^{2,3,4}, 任怀伟^{2,3,4}, 杜毅博^{2,3,4}, 张德生^{2,3,4}, 闫汝瑜^{2,3,4}, 于翔^{2,3,4}

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 天地科技股份有限公司, 北京 100013;
4. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘 要:总结了煤炭数智化技术在现阶段的发展状况, 分析了煤炭高效开采数智技术与成套装备研究及其应用所面临的新形势和新要求, 针对不同煤层赋存条件面临的高强度开采围岩-设备状态全面感知、装备群一体化协同推进与联动控制等难题, 将物联网、云计算、大数据分析和高精度惯导等先进信息技术与煤矿开采技术深度融合, 实现了对采煤设备的状态监测和数据集成管理, 通过精准感知、实时数据分析和智能控制, 改善了煤矿开采过程中对设备的监测、管理和决策效率, 提高了开采成套装备对不同煤层赋存条件的适应性。为解决中厚煤层超长工作面装备群一体化推进、协同控制等难题, 通过地理信息动态感知与模型实时更新技术, 实现了回采前方地质信息的同步映射, 研发了适应超长工作面的大功率快速推进设备, 构建了涵盖支-采-运各个环节的多区域同步推进工艺体系, 形成了超长工作面支护装备群的联动机制, 实现了装备群之间协同控制, 显著提升中厚煤层开采效率和资源回收率。针对深部厚煤层复杂地质条件, 研发了支架控制精细化、装备群组智能协同控制技术, 实现了设备之间感知协调和自适应精准控制, 提高了系统的可靠性和效率。针对 8~10 m 超大采高工作面超大开采空间煤壁防护、工作面围岩动载强烈、煤流载荷变化大等难题, 提出了液压支架与围岩耦合自适应控制技术, 增强了设备对超大采高工作面环境的适应性, 研发了护帮板监测系统、采煤机稳定性自适应截割技术以及煤流负荷平衡和链条动态张紧控制等关键技术, 使得设备能够在煤层厚度变化较大和强矿压条件下实现高效开采。针对煤矿高效开采数智化成套装备在海外的推广过程中, 煤矿条件、安全要求、技术标准存在差异等难题, 通过对技术装备的定制化调整, 研发了集成监控和大数据分析系统, 提高了对异常情况的响应能力, 实现了工作面内设备群的自主感知、高可靠数据传输、智能分析决策、精准控制与执行。建立了适应不同工况的煤炭高效开采数智化成套装备技术体系, 并在工程实践中取得了良好的效果, 为煤矿智能化高质量发展提供支撑, 为解决煤矿智能化建设的关键技术难题提供了解决方案。

关键词:煤矿智能化; 煤炭高效开采; 数智技术; 开采成套装备; 超长工作面; 超大采高

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0043-22

Research and application practice of digital intelligent technology and complete set of equipment for efficient coalmining

WANG Guofa¹, ZHANG Jinhu^{2,3,4}, REN Huaiwei^{2,3,4}, DU Yibo^{2,3,4}, ZHANG Desheng^{2,3,4},
YAN Ruyu^{2,3,4}, YU Xiang^{2,3,4}

收稿日期: 2024-11-14 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1402

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907503); 中煤科工开采研究院有限公司科技创新基金重点基金资助项目 (KCYJY-2023-ZD-01)

作者简介: 王国法 (1960—), 男, 山东文登人, 中国工程院院士。E-mail: wangguofa@tdkcsj.com

通讯作者: 张金虎 (1986—), 男, 山东德州人, 研究员, 博士。E-mail: 18810836118@126.com

引用格式: 王国法, 张金虎, 任怀伟, 等. 煤炭高效开采数智技术与成套装备研究及应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 43-64.

WANG Guofa, ZHANG Jinhu, REN Huaiwei, et al. Research and application practice of digital intelligent technology and complete set of equipment for efficient coalmining[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 43-64.



移动阅读

(1. China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. CCTEG Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Summarizing the current development status of intelligent and digital technologies in the coal industry, analyzing the new situations and requirements for research and application of intelligent technologies and complete sets of equipment for efficient coal mining. Addressing challenges such as comprehensive perception of the state of high-strength mining surrounding rock and equipment under different coal seam conditions and integrated coordinated advancement and linked control of equipment groups, the paper explores the deep integration of advanced information technologies such as the Internet of Things, cloud computing, big data analytics, and high-precision inertial navigation with coal mining technologies. This integration has enabled condition monitoring and data integrated management of coal mining equipment, improving monitoring, management, and decision-making efficiency in the coal mining process through precise perception, real-time data analysis, and intelligent control. It has also enhanced the adaptability of complete mining equipment sets to different coal seam conditions. To address the challenges of integrated advancement and coordinated control of equipment groups in ultra-long workfaces for medium-thick coal seams, the paper introduces synchronous mapping of geological information ahead of the mining face through dynamic perception of geographical information and real-time model updating technology. High-power rapid advancement equipment suitable for ultra-long workfaces has been developed, and a multi-area synchronous advancement process system covering all aspects of support, mining, and transportation has been established. This forms a linked mechanism for support equipment groups in ultra-long workfaces and achieves coordinated control among equipment groups, significantly improving mining efficiency and resource recovery rates for medium-thick coal seams. For complex geological conditions in deep thick coal seams, refined control of supports and intelligent coordinated control technologies for equipment groups have been developed, enabling perceptual coordination and adaptive precise control between equipment, thus improving system reliability and efficiency. Addressing challenges such as coal wall protection in ultra-large mining spaces, intense dynamic loads on surrounding rock in the workface, and significant variations in coal flow loads in 8–10 m ultra-high mining height workfaces, the paper proposes adaptive control technology for coupling hydraulic supports with surrounding rock, enhancing the adaptability of equipment to ultra-high mining height workface environments. Key technologies such as a guard plate monitoring system, adaptive cutting technology for shearer stability, coal flow load balancing, and dynamic chain tensioning control have been developed, enabling efficient mining under conditions of significant coal seam thickness variations and strong mining pressure. In the overseas promotion of intelligent and digital complete sets of equipment for efficient coal mining, the paper addresses challenges such as differences in coal mine conditions, safety requirements, and technical standards through customized adjustments to technical equipment. An integrated monitoring and big data analytics system has been developed, improving the response to abnormal situations and enabling autonomous perception, high-reliability data transmission, intelligent analysis and decision-making, precise control and execution among equipment groups within the workface. A technical system for intelligent and digital complete sets of equipment for efficient coal mining adaptable to different working conditions has been established and has achieved good results in engineering practice. This provides support for the high-quality development of coal mine intelligence and solutions to key technical challenges in coal mine intelligent construction.

Key words: intelligentization of coal mines; efficient coal mining; digital and intelligent technology; complete mining equipment sets; ultra-long workfaces; extremely large mining heights

0 引 言

随着新一代信息技术与矿山开采深度融合,煤炭行业正经历以数字化、智能化为驱动的新技术变革,这不仅提升了煤炭开采的效率和安全性,也为煤炭产业的可持续高质量发展提供了新动能。煤炭高效开采数智化技术与装备加快创新发展,赋能煤炭生产方

式的转型升级,成为煤炭新质生产力的核心要素^[1-3]。经过近年来的探索与实践,我国煤矿智能化建设已走在世界前列,煤矿智能化建设的技术路径已日趋明朗^[4-9],截至 2024 年 4 月底,全国累计建成智能化采煤工作面 1 922 个、智能化掘进工作面 2 154 个。截至目前已建成国家级示范煤矿近 60 处、省级(央企级)示范煤矿 200 余处,逐步形成了不同区域、不同建设

条件的智能化建设模式^[10]。据初步统计,重点煤矿企业智能化采煤工作面单班作业人员减少6人以上,劳动工效提高20%以上。

煤矿数智技术与装备的研究不仅关注单一设备的智能化,更强调整个开采系统的集成和协同作业能力,以实现工作面内设备群的自主感知、高可靠数据传输、智能分析决策、精准控制与执行^[11-12]。近年来,科研工作者们针对煤炭数智化开采技术与相关装备开展了大量研究及实践应用,使该领域在短期内取得了长足进步。

煤炭资源数智化开发^[13]构想的提出,旨在通过采矿与信息技术、数据分析技术的交叉融合,构建“分级抽取-关联分析-虚实映射”的数字煤矿智慧逻辑模型,实现对煤炭开发全过程全面感知、深度分析和智能决策,并建立了智能化控制方法;基于数字孪生理念与XR技术构建的煤矿XR智能运维系统^[14],提升了煤矿操作员与机器人间的协作效率,实现了虚拟空间与物理空间的协同感知、决策与控制;针对煤炭资源安全高效开发中地质条件透明化的需求,煤矿透明地质模型动态重构^[15-16],通过集成不同阶段的点、线、面、体信息,形成了透明工作面、透明采区、透明煤矿动态地质模型体系;针对采煤机智能调高调速控制^[17]难题,基于5G+云边端协同技术的采煤机智能调高调速控制系统,实现了采煤机与控制中心之间的高效数据传输和协同控制;多源信息感知、大数据清洗、集成及存储方法等技术的应用,煤矿设备大数据管理^[18];综放工作面液压支架的智能化控制与监测^[19],显著提升了液压支架支护姿态的解算效率与精度,数字孪生和机器学习技术^[20]应用于煤矿支架载荷预测。

通过科研工作者的不懈努力,我国煤炭高效开采数智技术迈上了新的台阶,但理论成果的应用场景仍需要针对不同煤层赋存条件的特点做进一步的研发,以满足各类矿井的高效数智化发展的要求。

1 煤矿高效开采数字化和智能化基础

1.1 煤炭高效开采数智技术难题

地下采矿受限空间场景复杂,涉及要素众多,具有非结构化和不确定性等特点,通常的工业数字化模型、理论基础、数据处理方法和技术标准无法满足煤矿复杂巨系统的控制要求。

由于我国煤层赋存条件多样,传统开采技术难以支撑不同煤层赋存特征煤炭的安全高效智能开发,因此迫切需要在搭建煤炭数智化高效开发基础体系之上,针对不同煤层赋存条件开展煤炭数字化与智能化高效开采技术方面的重大创新。

1) 针对我国中厚煤层矿井,合理加长工作面长度,是实现“一人一面一千万吨”的高产高效综采工作面愿景的有效途径。然而,超长工作面缺乏适用于中厚煤层的大功率快速推进成套装备,且由于工作面加长,工作面装备数量增多,装备群之间的智能联动和协同控制难度随之增大。

2) 深部煤炭赋存条件复杂,一方面,井下采场存在高地压、强矿压和围岩失稳的情况,另一方面,无法实现全面感知工作面围岩-设备状态、液压支架缺乏自适应控制能力,导致片帮冒顶现象频发,难以实现高效综采,传统的综采参数确定方法及配套工艺难以适用于深部厚煤层。

3) 对于特厚煤层,采用“分层”或“掏芯”开采会导致大量资源浪费,且存在较大的安全隐患,综合考虑煤炭资源回收率与绿色开采的理念,超大采高综采是厚煤层开采的合理技术方案之一,但由于缺乏超大采高工作面支架-围岩耦合控制理论,导致传统的液压支架设计方法和制造技术难以适应特厚煤层的开采,同时超大采高工作面支架缺乏有效的姿态监测方案;采煤机滚筒直径、机身也随采高相应增大,导致其难以实现与工作面围岩条件相协调的自适应截割;由于煤流量增大,超大运量刮板输送机呈现煤流量感知难,重载启动难、能耗大、寿命低,大型装备与环境的智能协同等问题。

4) 在海外煤矿高效开采数字化和智能化成套高端装备及技术体系的推广过程中,由于煤层赋存及地质条件、政策规定和技术标准等方面的差异,对于技术装备存在定制化需求,亟需开展采煤机记忆截割、液压支架自动跟机移架、工作面设备自动拉直等工作面少人化、智能化开采技术,以符合当地产业政策的相关要求。

1.2 煤矿高效开采数智技术基本要素

煤矿数智化高效开采基于物联网、云计算、大数据、人工智能、机器人等技术的深度融合^[12],实现装备自主感知、数据稳定传输、自主决策、精准控制与执行,促进工人向安全作业环境转移。目前,“无人操作、少人巡视”的智能化工作面已广泛推广,成为煤矿安全高效开采的新模式。

煤矿高效开采数智化技术的核心要素包括自主感知系统、高可靠性传输网络、智能分析决策系统、精准控制与执行系统、数字孪生系统5个方面^[13,21],如图1所示。其中,自主感知系统实现了设备运行状态与地质环境的实时感知;高可靠性传输网络保障了数据稳定传输与控制指令的高效下发;智能分析决策系统通过对开采多源异构数据的融合处理,将控制工

艺固化为机器语言,形成控制处置知识库,实现工作面自主决策控制;精准控制与执行系统通过高可靠性控制、变频控制、大流量液压控制,形成开采设备群智能协同作业控制系统;数字孪生系统作为上述感知、

分析、决策、控制的可视化载体,构建数字世界与物理实体的映射,实现地理信息与强约束关系设备群耦合推进控制的直观表达与动作规划仿真,提升数智化开采的人机交互与决策控制能力。

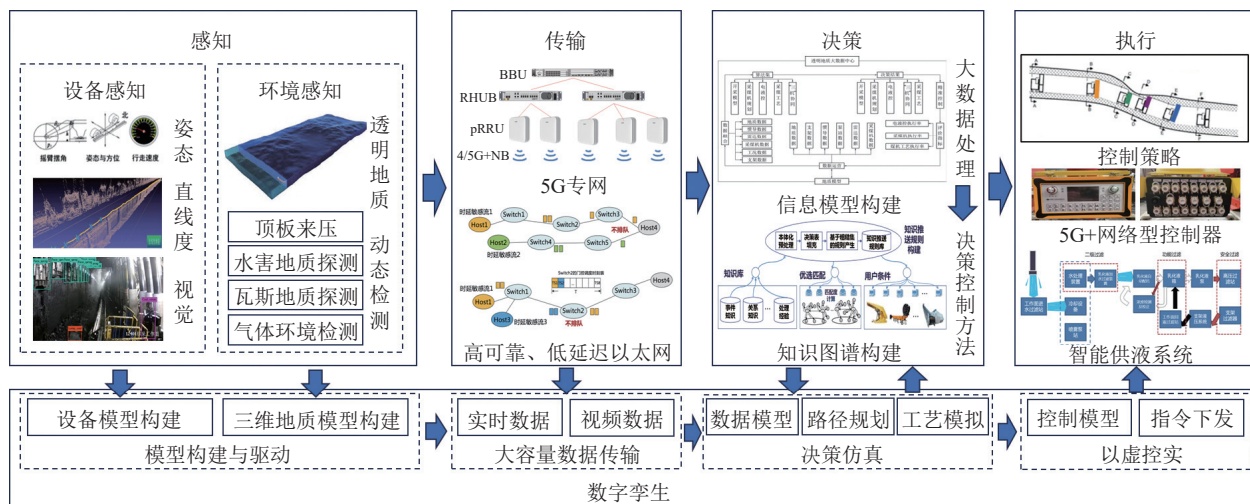


图1 煤矿高效开采数智化技术体系架构

Fig.1 Digital intelligent technology system architecture for efficient coal mining

1.3 煤矿高效开采感知技术

实现液压支架、采煤机、刮板输送机等设备群的协同自主控制,是构建数智化采煤工作面的基础,而工作面全域感知技术则是实现装备群协同自主控制的前提。因此,亟需建立包括地理信息感知、开采环境感知、设备姿态及受力状态实时监测、工作面设备群整体运行态势感知等感知监测技术在内的工作面全域感知技术^[22-23]。

1.3.1 工作面设备状态感知

随着采煤工作面智能化的快速推进,工作面设备状态感知系统已较为完善,构建了装备姿态监测、工作面惯性导航等技术在内的装备群全位姿测量系统及方法,开发了装备群全位姿变换及驱动关系建模方法^[4],实现了工作面装备群在任意时刻的空间状态描述。

采煤机通过搭载高精度编码器、调高油缸位移传感器、红外接收器、倾角传感器、压力传感器等传感装置,实现了行走位置、速度、摇臂高度、摇臂倾角及机身倾角的感知检测,并对截割路径关键点姿态进行存储,以实现记忆截割。基于惯性导航系统,融合摇臂角速度、角加速度与编码器数据,生成采煤机截割行走轨迹,建立了工作面设备群运行态势感知与轨迹规划策略优化,进而实现自主导航定位。

液压支架通过搭载倾角传感器、测高传感器、推移油缸行程传感器、立柱压力传感器等传感装置,构建了包括检测姿态、受力状态、推移杆伸缩量等信息在内的感知网络,实现了控制动作质量反馈与支架—

围岩耦合状态反演,保障支护安全。

由于工作面设备众多,采煤过程中各设备移动频繁,有线传感器不仅安装维护工程量大,且常因设备相互错动导致断线,降低了系统可靠性。基于物联网技术的发展,有效推动了煤矿无线传感器的应用。然而,工作面各类变频电机易产生相互干扰,工作面金属设备众多,无线电磁波易发生多径反射,导致工作面电磁环境极为复杂。为实现工作面无线电磁波的有效传输,亟需完成无线传感器的核心传输频段设计与组网方式优化。

1.3.2 工作面机器视觉测量

机器视觉以非接触式、多目标检测及低维护量的优势,广泛应用于采掘工作面,煤矿井下构建了包括人员不安全行为检测、带式输送机煤量及异物检测、钻孔标准化作业流程检测等检测程序在内的机器视觉检测系统。

针对采煤工作面光线昏暗、尘雾及设备遮挡等问题,基于机器视觉的场景语义感知是实现工作面视频AI的有效路径。通过构建包括特征提取网络(backbone)、语义分割head及实例分割head在内的UPSNNet架构,实现工作面图像全景分割,通过无参数的全景分割head融合分割结果,并输出端对端结果。基于encoder-decoder结构,构建由深度残差网络(ResNet)和特征金字塔(FPN)组成的特征提取网络,通过高级与低级视觉特征融合,实现分割head多维度信息提取,如图2所示。

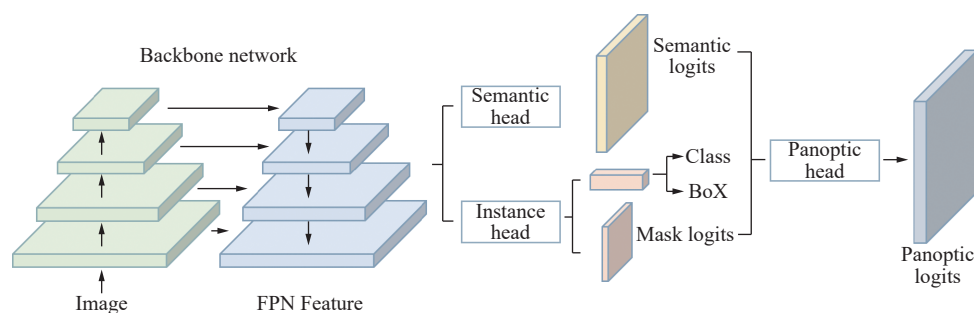


图 2 基于 UPSNet 的全景分割网络架构

Fig.2 Panoramic segmentation network architecture based on UPSNet

基于机器视觉识别技术,研发了高精度目标语义分割及检测算法,实现了综采工作面设备和场景的精细划分,包括人员、煤壁、顶板、底板、设备等类别的精准识别。基于对图像中目标及其关联信息的解读,推导场景语义信息,构建包括人员信息统计、人员区域入侵、刮板输送机大块煤异常识别、采煤机运行信息统计等功能在内的工作面应用。

基于视觉技术的工作面测量感知是实现工作面视觉 AI 应用的关键。通过视图几何算法的精密计算,获取设备的位置和姿态,确保采煤机、液压支架的精确定位与运行姿态监测。针对采煤机工作场景,研发了割顶梁防碰撞识别与预警算法,实现对液压支架位姿与采煤机滚筒空间位姿的监测。在开采工艺方面,开发了基于视觉技术的工作面直线度监测和液压支架运行模态监测方法,实现了对液压支架各运行模态的识别及状态的检测反馈。

视觉硬件方面,研发了视觉 AI 边缘处理一体化智能传感终端,实现了工作面控制系统低延迟、本地化的分析功能,以及集控系统对感知数据的参数控制。基于海思框架开发的井下目标识别视觉芯片,通过

YOLO 算法训练目标检测模型,完成 pytorch 模型→onnx 模型→模型简化→caffe 模型→量化→算法植入等流程,实现井下人员、采煤机、滚筒、护帮板等目标识别算法在海思芯片上的开发部署。

工作面视觉智能传感终端布置在液压支架上,首先识别采煤机的位置,以采煤机位置为中心,监测周围空间设备态势,确保开采作业的安全和效率。具体感知过程如下:基于视觉传感定位采煤机位置→基于视觉技术进行对象关键点空间检测→基于视场的采煤机与联动对象空间位姿统一描述→求解开采控制过程的设备运行状态→反馈控制动作执行情况。如图 3 所示,视场空间的局部坐标转换如下:工作面支架布置视觉传感终端,识别采煤机位置获得视觉采煤视场;采煤视场下空间位姿的转换关系可转换为相机位姿、号牌位姿、前梁位姿、摇臂位姿和滚筒位姿之间的相互转变表达。号牌、前梁和摄像仪均与液压支架固连,因此,他们之间的位姿关系在安装完成后就固定下来。在采煤视场下,以摄像仪位姿为基准进行统一位姿变换,在视场下依据视图几何的关联变换,确定视场内号牌、采煤机摇臂和滚筒的空间动态位姿。

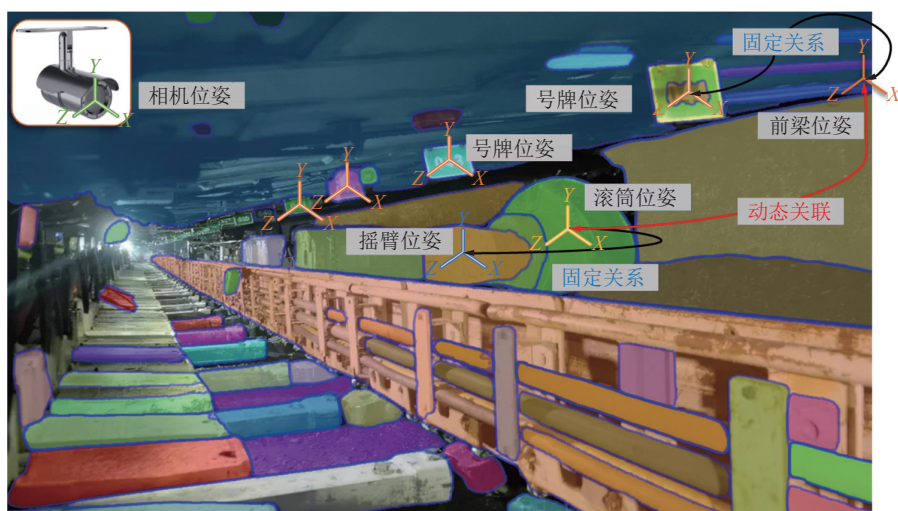


图 3 采煤视场空间局部坐标转换统一描述示意

Fig.3 Unified description of local coordinate transformation in coal mining field of view space

利用转移矩阵将动态位姿和固定位姿关系关联实现同视场下监测对象的统一表达。

1.3.3 透明地质开采

工作面智能化开采工艺受地质条件影响较大,因此,构建基于地质条件变化动态感知与模型实时更新的工作面三维地质模型,实现开采工艺参数的智能优化^[24-26]。

1) 透明工作面建模。为实现工作面地质透明化,需构建包括“煤层空间展布形态及煤层厚度分布”和“异常地质构造”的高精度工作面煤层静态地质模型,前者为采煤机截割煤层提供地质导航,后者优化截割路径,实现安全回采^[27-28]。基于煤矿综采工作面的煤岩赋存状态,结合实测数据,对煤层空间展布形态及煤层厚度分布、异常地质构造进行综合分析,融合优化建模插值算法,实现透明工作面三维地质模型的构建^[29-30],建模技术思路如图 4 所示。

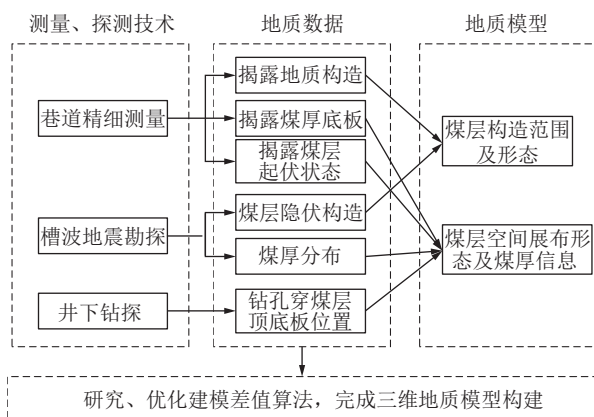


图 4 透明工作面建模技术思路

Fig.4 Transparent working face modeling technology ideas

2) 透明工作面数字化剖切。模型网格剖切与工作面截割跟机工艺相适应,是实现透明地质开采的前提,即工作面各地质模型切片均预置跟机工艺,将各个控制节点数据与地质模型单元格数据相融合。

透明工作面数字化剖切技术路线如下:① 设定采煤工作面走向和倾向上的网格步长,进而对煤层数字化模型进行网格划分,并将网格投影到二维水平面。② 将采煤机计划截割路线投影到网格平面投影图中,并将计划截割路线近似划分为有限个直线段。③ 将煤层顶、底板曲面投影至二维水平面,计算各直线段截割路线起始点和终点间的直线方程,进而计算直线段与网格线的交点平面坐标及该点对应的顶、底板标高,按照直线段方向顺序连接上述顶、底板控制点,即为顶、底板界面曲线。

3) 地理信息动态感知与模型更新。基于采前槽波勘探、音频电透视、孔中瞬变电磁、采中微震监测、

随采地震监测、孔中电阻率监测等监测信息的在线分析技术,实现工作面前方地质信息的同步映射^[31]。

通过工作面两回采巷道布设的地震传感器,如图 5 所示,实时接收震动信号,通过自动分析,识别采煤机震源信号,并自动提取有效地震波场,基于地震反演和成像技术实现采煤工作面内部成像;基于微震监测技术,实时预警底板破坏深度和顶板裂隙发育高度;电阻率监测实时反应底板富水异常变化;随采地震实时采集采煤机振动信号,动态分析工作面内部地质异常和应力变化,实现了工作面前方地质预测预报。

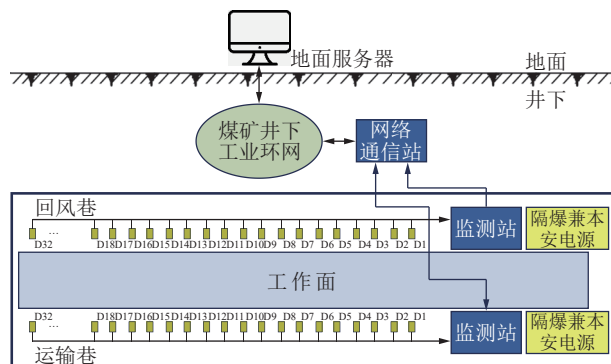


图 5 工作面随采随探布置示意

Fig.5 Layout of working face with mining and exploration

1.4 煤矿高效开采高可靠性网络传输技术

1.4.1 工作面 5G 传输网络

基于 5G 技术高速、低时延、大连接数的通信能力,可为工作面复杂工业环境提供高可靠性无线数据传输网络。构建包括地面核心网 (CN)、IP RAN 环网、基带控制单元 (BBU)、远端数据汇聚单元 (RHUB)、微型射频拉远单元 (pRRU) 等系统构成在内的矿用 5G 移动通信网络^[32]。

5G 核心网与 IMS 语音系统部署于矿区内机房,与矿区基站组成边缘计算的专网架构,实现矿区内生产数据就近传输、5G 系统间信令交互、物联网卡认证;基于“一张网”建设规范,规划 5G 承载网络的网络切片,实现 5G 无线接入网和核心网的网络连接、灵活调度、组网保护和管理控制等功能;基于基带控制单元 (BBU),实现基带信号的处理、光口到以太网接口的转换、下行信号分路、上行信号合路等功能;位于工作面两端分别部署 RRU,实现综采工作面中央覆盖,针对工作面设备众多,且煤壁对于电磁波吸收造成的信号衰减等情况,根据工作面长度在工作面中部补充布置 1~2 个 RRU 基站。

目前 5G 网络主要有“无线终端接入设备 (CPE, Customer Premise Equipment)”和“5G 模组”2 种接入模式。对比 2 种接入模式,采用 CPE 接入,便于在现

有设备基础上进行扩展,但在传输稳定性、网络 IP 管理等方面存在一定缺陷;采用 5G 模组接入,需要嵌入 5G 模组,对设备进行重新开发,但整体稳定性及网络管理能力优于 CPE。

1.4.2 工作面高可靠性时间敏感网络

时序控制作为各设备间协同控制的基础,其各设备控制器之间需完成高可靠性通信与时钟同步,确保工作面各设备的协同动作。

时间敏感网络 (TSN, Time Sensitive Networking) 是一种基于 IEEE 802.1 系列标准的网络技术,通过对网络流量的精确调度和同步管理,实现关键数据包的低延迟、无抖动传输。TSN 不仅继承了以太网的高带宽、灵活性和低成本优势,同时基于时间同步、流量调度、队列管理等技术,实现了对时间敏感流量的严格控制^[33]。

在时间敏感网络的协议体系中,新增了 IEEE802.1as 作为时间敏感网络时间同步的推荐协议,其定义了广义的精确时钟同步系统 (gPTP, generalized precision time protocol),用于时间敏感的桥接分组交换局域网;基于 IEEE1588-2008,对精确时钟同步协议 PTP 标准进行定义。802.1as PTP 完全基于二层网络,支持非 IP 路由协议,精简了二层无关机制,增强了二层时间同步机制。

1.5 煤矿高效开采数据分析决策技术

实现数据的集成分析与价值挖掘,是煤矿智能化运行的前提,进而为生产、安全、质量管理、运维管理等环节进行决策支持与优化赋能。目前采煤工作面数据呈现“重采集,轻分析”的态势,通过融合大数据及人工智能技术,实现工作面多源异构数据的融合与分析,提取数据特征信息进行关联,与知识库进行匹

配推理,进而实现煤矿少人化甚至无人化开采。

1.5.1 工作面大数据分析与数据治理

构建包括多源数据集成与清洗,数据存储,数据治理与管控,数据湖构建,数据融合分析,数据服务等在内的大数据分析系统,基于 Hadoop 大数据平台全套组件,实现实时数据流式采集,分布式存储,批式处理,分布式计算,集群调度与管理等功能^[34]。

针对工作面数据治理问题 (图 6),首先基于工作面业务控制逻辑,确定相应的主题域,其中主要包括设备分析主题域,生产分析主题域,安全分析主题域,自动控制分析主题域,在此基础上,针对具体业务,如采煤机、液压支架、地质环境、控制工艺等,基于识别物理对象及其相互关系,构建工作面信息模型,通过数据对象描述物理实体,形成基础数据模型基于业务主题域的分析需求、数据相互关联关系,构建业务分析宽表,实现场景化模块化的数据建模,建模过程中,加载算法模型,如通过算法模型将原始时序矿压数据识别出循环末阻力进行矿压预警分析等,形成分析结果数据,同时构建标准化数据共享服务接口,形成数据湖,实现数据高效分析处理与共享交互^[35-36]。

1.5.2 工作面 AI 知识图谱

1) AI 数据分析。煤矿开采数据分析以实时数据为主要分析对象,基于时间序列数据,通过人工智能算法为安全开采提供实时监测预警信息,是人工智能技术在煤矿数据处理的主要应用领域。主要采用以下两类模式进行分析预测:① 时序数据直接处理预测,以工作面矿压数据为例,由于井下工作面现场工况复杂,支架载荷变化的影响因素较多,支架可能同时处于多种工况之下,受现有的监测手段限制,传统方法难以进行支架载荷的预测。因此,基于无监督学习算

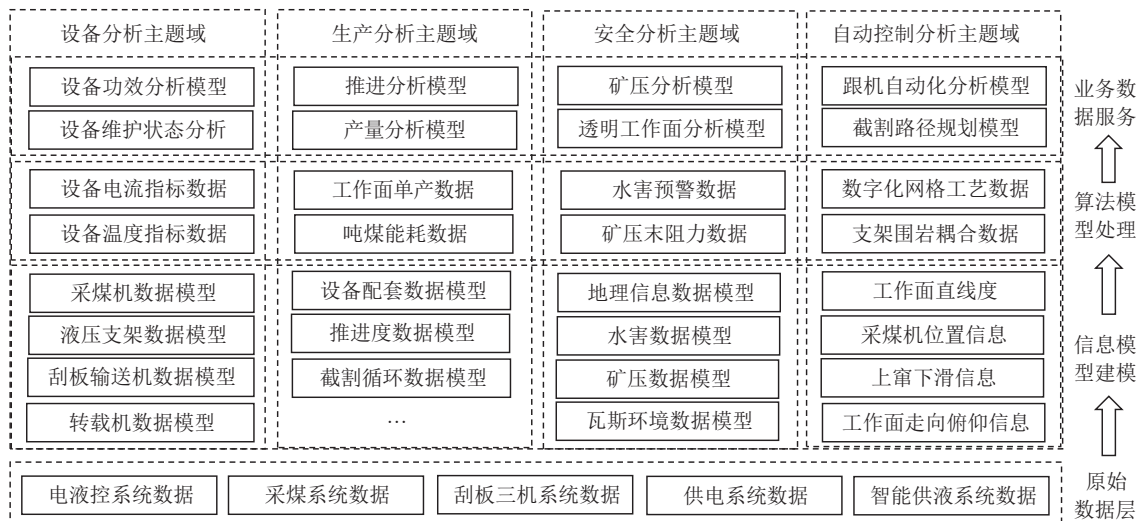


图 6 工作面大数据分析与数据治理流程

Fig.6 Big data analysis and data governance process of working face

法(聚类算法)的相关理论,根据采集数据自身特性进行数据挖掘,以相似性聚合进行聚类分析,找出同类子集,从而建立支架载荷的分类预测模型。通过反复试验,建立了液压支架的五种前后立柱压力组合模式,基于 K 均值聚类算法对支架载荷数据进行划分,进而采用 LSTM(图 7) 等算法进行支架载荷预测^[37]。② 时域数据图像转换分析预测,时域数据图像转换分析过程中,首先将工作面实时数据转换为特征图像,进而通过视觉算法对数据特征进行识别,有效解决因数据特征样本稀疏造成的识别精度低等难题。如设备故障诊断过程中,基于助格拉姆编码程序,将转速、负载与多维时域特征图像化,利用图像位置关系及点、线颜色差异弱化了工况信息对样本的影响,优化了深度残差收缩网络结构及参数,基于 GELU 激活函数及正则化技术,避免了梯度消失并抑制模型过拟合,有效提升了时变工况下综采设备健康状态评估的准确率^[38]。

2) 知识图谱。知识图谱旨在通过实体和实体间的关系来阐述客观世界的概念、对象及其关联性。将工艺控制、应急处置等知识进行流程固化,借助其推理技术,辅助煤矿设备故障诊断、不同地质条件下的控制参数调整、灾害事故模态预警与原因分析,并生成相应方案,实现了生产组织和运营管理的自主决策。

知识图谱可以分为传统知识图谱、时序知识图谱和多模态知识图谱 3 种类型^[39-40]。传统知识图谱通常基于非结构化的文本数据构建;时序知识图谱通常基于时间信息,实体和关系均存在时间约束;多模态知识图谱的构建中整合了文本、图像和视频等多种不同类型的数据。针对于工作面知识图谱应用,工作面数据以实时数据为主要分析对象:知识图谱以实体与关系三元组形成构建知识库,根据实时数据的值对应到知识图谱中的特定实体,如检测到液压支架初撑力低于设定值,即对应到知识图谱中的实体“液压支架初撑力过低”,进而基于知识图谱中实体之间的关系作进一步推断,如“液压支架初撑力过低”的原因可能为“管路泄露”“泵站异常”“控制不达标”等,当发现实时数据出现异常时,将其异常表现与知识图谱中对应的实体或关系进行匹配,实现动态分析和推理。

1.5.3 基于三维地质模型的自主截割

构建描述煤层的三维数字化 GIS 模型,结合已建模型中的工作面煤层厚度、顶底板赋存状态等信息,通过红外传感器监测采煤机位置坐标,结合采煤机摇臂的摆角,实时反映采煤机作业时,左右滚筒与 GIS 顶底板关系,避免采煤机截割顶、底板。

基于历次采煤机截割过程中的位姿信息,构建采煤机的截割模型,并与 GIS 系统建立的煤层模型进行

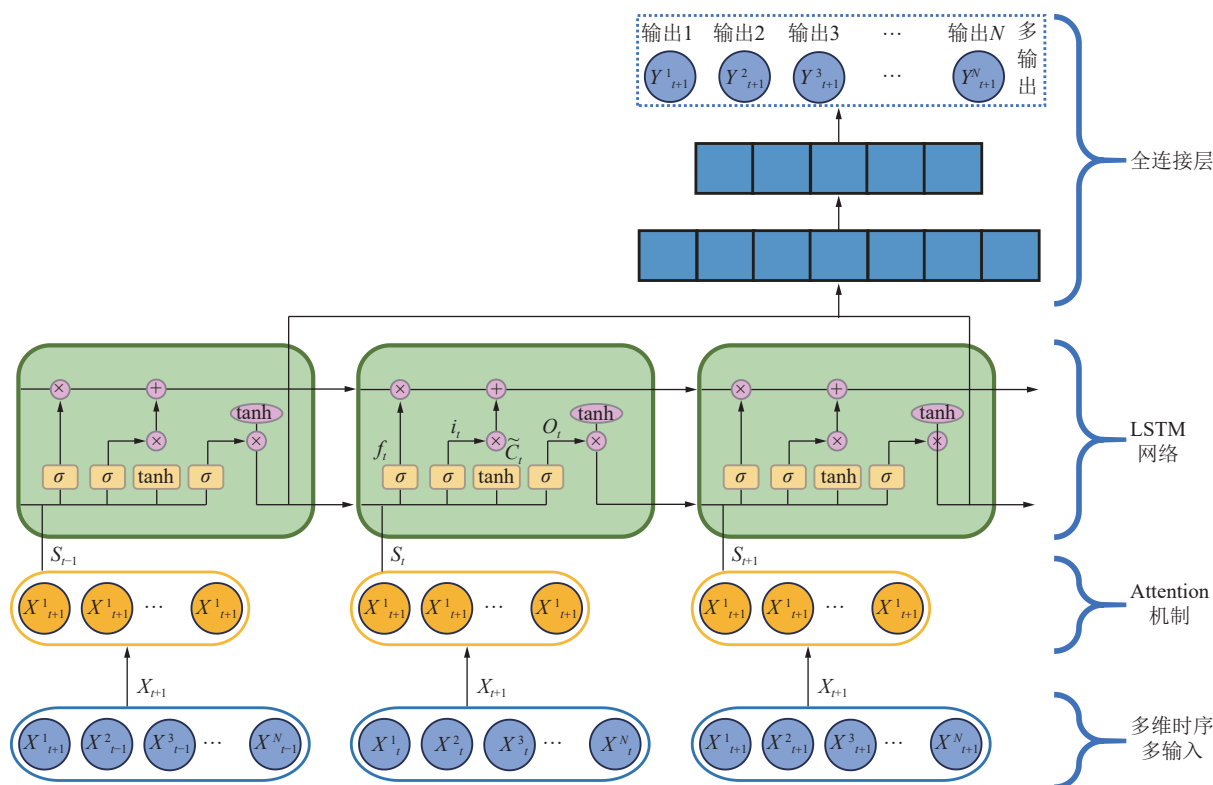


图 7 基于 LSTM 的时序数据预测分析流程

Fig.7 Time series data prediction and analysis process based on LSTM

比对,分析得出下一采煤循环时,摇臂的调高参数,同时基于记忆截割数据、截割负载变化、油缸压力和调

高系统 PID 比例闭环控制等技术,使其具备自主调高功能,实现采煤机自适应截割如图 8 所示^[41]。

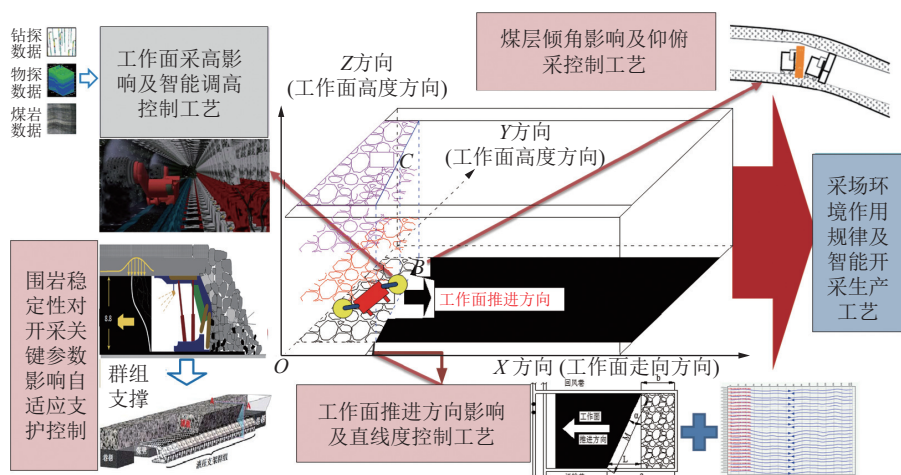


图 8 基于三维地质模型的自主截割规划控制示意

Fig.8 Control schematic of autonomous cutting planning based on three-dimensional geological model

1.6 高效开采精准控制与执行技术

智能化工作面将高精度、高可靠性的装备和控制系統深度融合,由控制器控制动力系统驱动执行装置实现自动运行,采煤工作面的动力控制系统主要包括变频控制系统(如采煤机、刮板输送机等)及供液控制系统。其中,大流量智能供液系統保障工作面支护系統装备的高效可靠运行。

1.6.1 工作面 5G+网络型电液控制

电液控制器在通信方式上主要采用 CAN 总线与以太网通信 2 种模式,控制模式主要采用发送控制命令给分控制器的集中控制形式。研发高速、高可靠性的 5G+无线控制器,实现分布式控制策略,是解决现有系統依赖集中控制的有效途径,同时可有效降低通信方式复杂性,提高系統稳定性、鲁棒性以及操作效率。

通过时间敏感网络 TSN 与 OPC UA 的深度融合,在基于 TSN 确保时间同步、延时保证等功能的基础上,控制器通过 OPC UA 客户端传输数据,实现控制器间数据实时互联互通与快速理解,形成去中心化的分布式控制模式,各控制器可根据周边控制器所提供的信息独立决策控制任务。

1.6.2 大流量液压系統

液压支架以液压为支撑动力,通过液压缸驱动进行动作。随着工作面开采高度、长度不断增大,工作面供液负荷不断提高,对液压动力系统提出更高要求。

1) 大流量输送稳压智能供液控制系统

构建了包括稳压变频控制系统、乳化液自动配比控制系统、多级过滤控制系统在内的智能供液控制系统。稳压变频控制系统采用多级控制,根据流量压力

需求,通过变频控制与工频控制,减小泵站供液压力脉动对卸荷阀的冲击;乳化液自动配比控制系统内置乳化液质量浓度模糊控制算法,采用负载敏感比例控制和变频伺服控制结合的方式,实现质量浓度实时动态平衡;构建包括清水过滤器、回液自动反冲洗过滤站、高压自动反冲洗过滤站和反渗透水处理装置在内的工作面过滤系統。

针对综采工作面液压泵站与支架用液工况不协调的难题,提出了分布式架间蓄能补偿方法,开发了分布式敏捷高效供液装置。基于高速数据采集系統,对支架压力波动曲线的数据进行采集,建立了压力-移架时间关系拟合模型,为分布式供液有效性提供了试验数据支撑;建立用液需求实时分析模型,开发了工作面单架分布式补偿装置,与泵站集中供液系統构成互补,构成提出了集中-分布式结合的供液体系。液压支架安装蓄能器后的运行数据表明,“蓄能器+单向阀”组合在换向阀启动初期有效隔离了系统的压力波动,可保持较高压力的工作状态,适应了液压支架的工作特性,有效提升了供液系統的整体性能。

2) 液压驱动高精度位置控制

液压支架电液阀为开关阀,存在时滞效应,现有的开环控制方式,造成停止信号发出后液压缸仍继续动作,导致误差产生。因此,研发了压力-位移一体化传感器的数字油缸,开发了压力-速度双参量调控算法及软件,基于常规电液换向阀自动设置提前控制量,实现了位置精准控制。

建立了高压大流量乳化液作用下液压缸各部件及液压系統整体数学模型,探究了液压缸位置控制精

度的主要影响因素,对液压系统关键参数进行识别;搭建了试验平台,揭示了基于电液换向阀的数字油缸在液压支架工作过程中的运动规律,建立数字液压缸运动特性理论模型;构建了基于迭代控制方法的液压缸位置精度修正算法,实验证明控制精度可达 ± 2 cm,有效解决了电液换向阀液压缸难以实现位置精确控制的问题。

1.7 高效开采数字孪生

数字孪生 (Digitaltwin, DT) 以数字化方法创建物理实体的虚拟模型,构建虚拟孪生体与物理实体的数字交互模式,实现以虚控实的智能运维,为煤矿高效

开采数智化运行提供了新路径^[42-44]。

数智化工作面虚拟孪生体应实现与物理实体的交互映射。物理实体主要包括围岩、煤体以及液压支架、采煤机、刮板输送机等设备实体,虚拟孪生体基于真实环境,对采场环境、设备结构及设备连接约束关系进行建模。将综采三机虚拟模型与虚拟煤层模型放置在同一时空,并以采煤机完成一次采煤循环的深度作为煤层推进方向的网格划分依据,构建虚拟工作面采场-装备双动态系统时序逻辑运动仿真系统,并以采集的历史位姿等数据驱动装备模型,实现采场与综采装备的仿真映射,如图 9 所示。

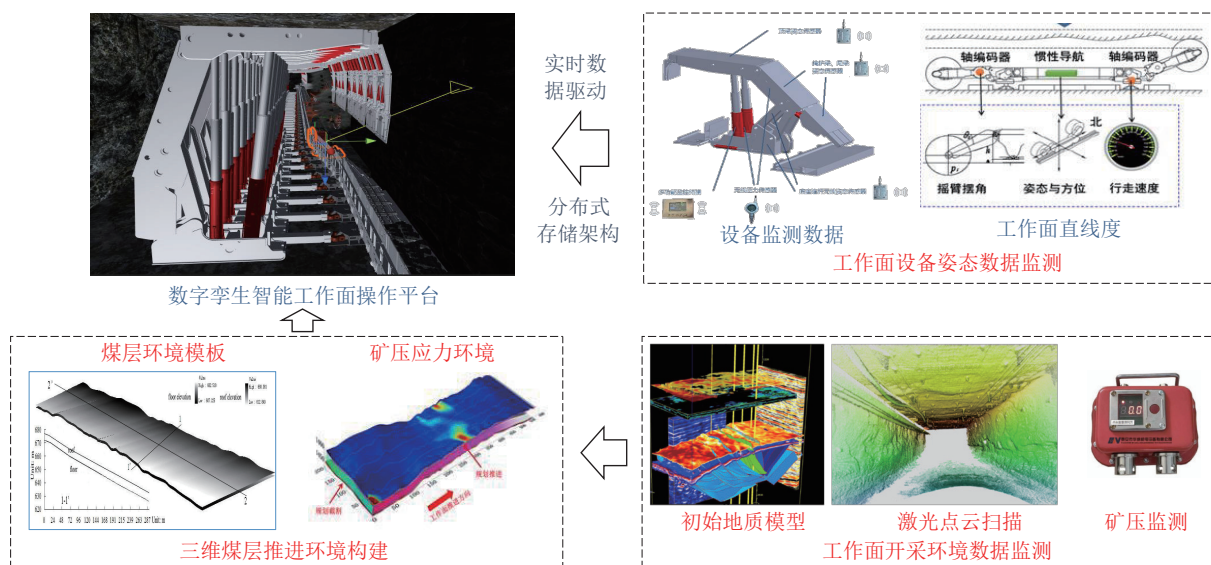


图 9 煤矿高效开采数字孪生架构示意

Fig.9 Schematic diagram of digital twin architecture for efficient coal mining

为构建虚拟综采装备,规划开采行为,开发了基于工作面自适应截割的“推进效果-策略可靠”双层机制评估系统,系统内嵌“虚拟煤层与综采装备模型耦合运行交互机制”和“综采工作面煤层厚度自适应截割路径优化模型”,可验证多种工况下综采装备的截割优化效果,并对优化效果进行评价。

2 超长工作面数智化高效开采成套技术与装备研发

2.1 超长工作面开采装备群一体化智能联动作业工艺研究

2.1.1 中厚煤层超长工作面装备群智能联动控制机制

1) 液压支架电液控制系统。液压支架电液控制系统属于机械设备联动控制系统的子系统,构建包括井下服务器、支架控制器、电磁阀驱动器、电磁阀组、隔离耦合器、压力传感器、行程传感器、电源箱、红外线发射器/接收器在内的电液控制系统。电液控制阀

组通过电磁先导阀与电磁主阀实现系统的自动控制,通过红外传感器探测采煤机位置以实现自动收护帮板和及时支护;电磁阀驱动器位于支架控制器和电磁阀组之间,负责电源引入和控制信号接收,执行通/断任务;隔离耦合器用于电气隔离相邻支架控制器,减少干扰,增强系统稳定性。

2) 采煤机远程控制机制。采煤机机载监控系统与监控中心通过双向通信实现数据实时交换,监控中心可实时监控采煤机运行参数,并具备远程启停控制功能。

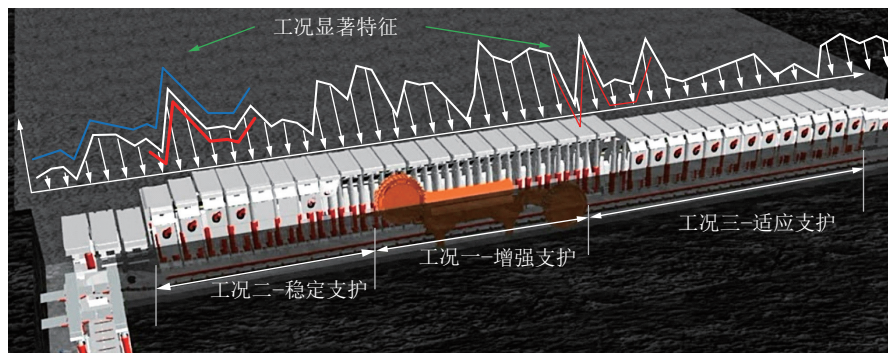
3) 采煤机、液压支架和大运量刮板机联动控制系统。联动控制系统采用分层架构,包括地面调度中心、巷道集中控制层和设备控制层,实现采煤工作面装备的多级协同管理。

2.1.2 中厚煤层超长工作面装备群智能联动控制技术

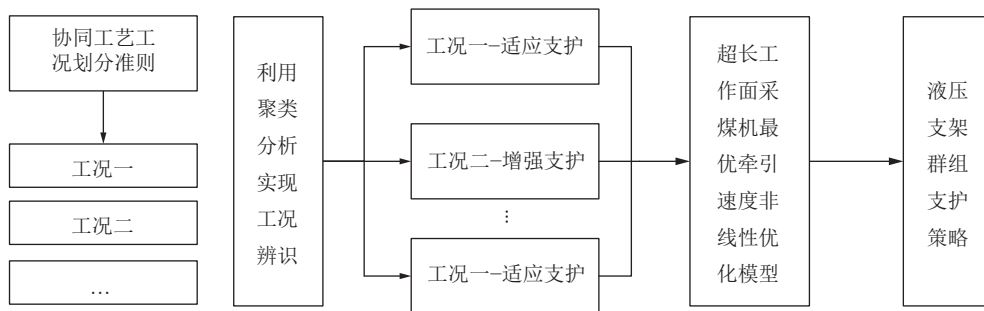
1) 回采-支护联动控制技术。煤矿井下工作面现

场环境复杂,采煤机面临因截割矸石、底板起伏、大面积堆煤而导致的滚筒载荷波动、牵引速度波动、机身振动等多种工况。因此,提出基于快速跟机移架和防碰撞的采煤机与液压支架控制策略(图10),根据超长工作面液压支架载荷特征、采煤机振动信号和工作面起伏情况,通过聚类分析进行工况辨识,构建回采-支护

护智能联动工况划分准则。针对各类工况,建立以截割牵引速度为优化目标的非线性模型,约束条件包括液压支架同步移架数量、速度和煤壁片帮风险。液压支架群组支护策略依工况采取适应、稳定或增强支护方法,实现动态态势下自适应协同推进和静载态势下状态保持,以达成回采-支护智能联动^[45,46]。



(a) 工况划分与识别



(b) 支采联动策略

图10 回采-支护联动控制技术策略

Fig.10 Mining-support linkage control technology strategy

2) 支护-运输联动控制技术。综采采场管理要求“三直两平”,其中主要包括保持刮板输送机的直线度,以确保设备运行平稳。液压支架通过推移杆与刮板机中部槽连接,推动刮板输送机前进,因此,液压支架与刮板输送机的联动控制是满足刮板机直线度的关键。提出基于直线度检测和推移行程调控的支护-运输智能联动工艺,如图11a所示。设定全局刮板输送机直线度目标,等距分解为以液压支架中心距为间距的散点目标,发送至液压支架推移杆控制器。利用行程传感器监测推移行程,将推移杆端点位置与整体直线度目标值对比,实现闭环控制。采用串级控制逻辑协调单个刮板输送机控制目标与整体直线度目标,如图11b所示。

刮板输送机直线度受液压支架推移行程影响,故以支架推移杆为执行器,支架推移行程为副控制对象,刮板输送机直线度为主控制对象。支护-运输智能联动同串级控制系统内环通过支架推移控制器实时

监测并控制推移行程,外环通过多个支架推移杆端点形成直线度的虚拟控制器对内环单个支架推移行程再次进行调控。系统各环节独立,可单独调整优化,具有稳定性高、响应速度快、适应性和可靠性强等优势。

3) 运输-回采联动控制技术。刮板输送机与采煤机联动运行对煤炭开采和运输效率至关重要,采煤机运行不当可能导致刮板输送机过载,通过调节采煤机速度可有效缓解该问题,刮板输送机与采煤机联动的关键在于带速与采煤机截割速度、牵引速度的动态匹配和联动控制,提出基于刮板输送机运煤量调整采煤机割煤速度的工艺,实现运输-回采智能联动,如图12所示。

通过煤量传感器和大块煤估算实现刮板输送机载煤量估算;基于刮板输送机运行电流、电机转矩等参数,建立载煤量与负荷超前预测模型,实现刮板输送机负荷软测量;构建以刮板输送机链速和采煤机牵

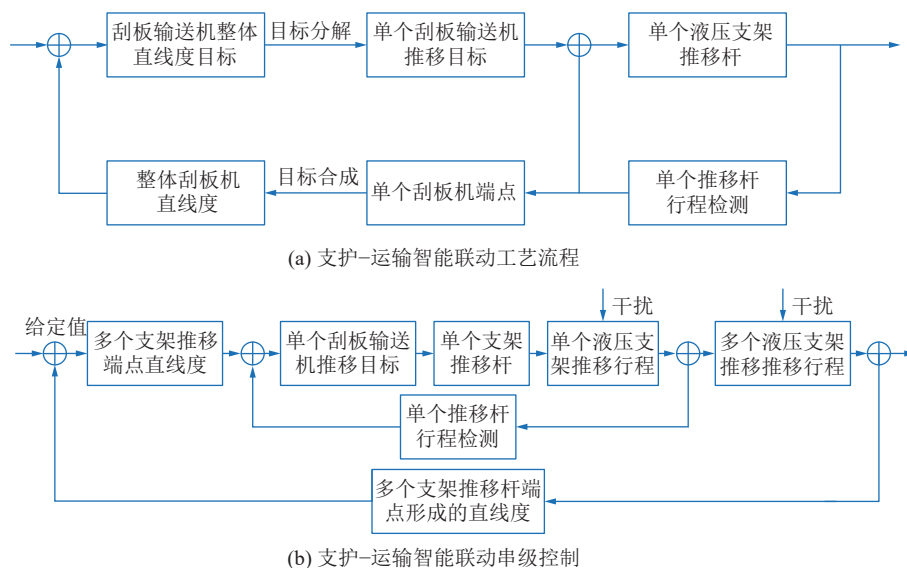


图 11 支护-运输智能联动技术框架

Fig. 11 Support-transportation intelligent linkage process system

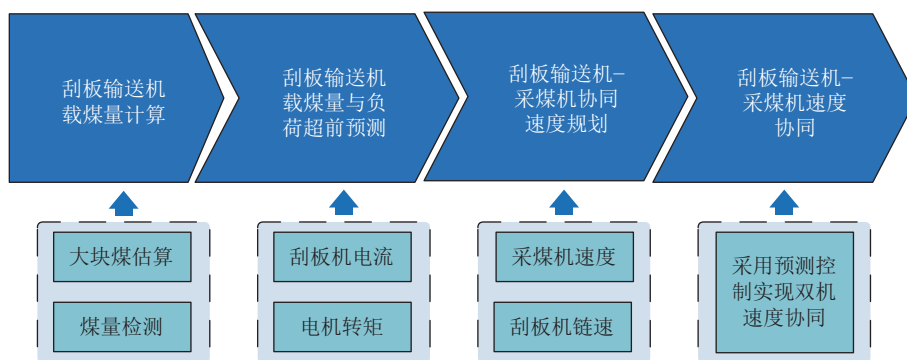


图 12 运输-回采智能联动工艺

Fig. 12 Transportation-mining intelligent linkage process

引速度为目标,以刮板输送机负荷、采煤机截割量等为约束的多目标优化模型,实现刮板输送机链速和采煤机牵引速度的最优协同;采用预测控制算法,基于优化方法求解控制问题,实现基于煤量调整采煤机速度。

4) 端头支护-超前支护智能联动技术。工作面端头支护和巷道超前支护是智能化工作面生产的关键环节,能有效防止围岩破坏。现有装备适应性差,影响采场推进效率和工作面智能化支护,提出工作面端头及超前一体化协同推进工艺,包括:① 超前支架位置感知:使用数字化油缸实现超前支架与转载机、推移千斤顶间的相对位置感知。② 超前支架姿态感知:利用倾角和高度传感器构建姿态模型,实时监测超前支架姿态。③ 超前支架位姿控制:将感知信息输入控制系统,调节超前支架组内动作。④ 超前区域压力感知与分析:监测分析超前区域压力变化。⑤ 端头支架与超前支架协同联动:构建端头支架与超前支架协同策略,实现推移和转载机前移的联动控制。

该技术工艺旨在提高采场安全推进效率,通过智能联动工艺实现工作面和超前区域的一体化推进。

2.1.3 中厚煤层超长工作面智能地质保障系统

陕西小保当矿业有限公司二号煤矿基于采前槽波勘探、音频电透视、孔中瞬变电磁、采中微震监测、随采地震监测、孔中电阻率监测等监测信息的在线分析技术,实现工作面地质条件有效超前探测技术、强约束条件下三维地质动态模型快速构建,进而实现超长工作面前方地质信息的同步映射,其中包括:

1) 实现了多源地质数据的集成与共享,构建了动态更新的地质模型,开发了矿井地质数据库,增强了数据分析和可视化能力,实现了地质信息的预测,提升了对大规模空间、属性和时态数据的管理与分析能力。

2) 基于智能回采工作面的三维地质建模技术,实现了地质模型的三维构建和动态更新,进而实现采煤机规划截割。

3) 建立矿井云 GIS 平台,基于地质模型实现灾害

智能分析和预测,具备实时数据采集、分析、管理和四维时空分析功能。

4) 构建了智能地质保障系统,提升了智能化建设水平,对煤矿地质条件和特征进行智能分析,实现了隐蔽致灾因素的预测预报。

2.2 450 m 超长工作面智能化开采系统集成配套设计及现场试验

2.2.1 450 m 超长工作面高端成套装备

针对小保当煤矿 450 m 超长工作面的特点,研发了 ZY16000/18/32D 大中心距轻量化快速移动液压支架,支护强度达到 1.25 MPa,液压支架采用整体式顶梁,支架柱缸径为 480 mm,支架设计了抬底机构,顶梁、掩护梁设计单侧活动侧护板,有效解决了支架扎底移架难、顶板破碎漏煤等问题。此外配套研发了 ZYG16000/22/40D 过渡支架、ZYT16000/22/40D 端头支架、ZTC3×2×2500/25/40D 运输巷超前支架、ZTC6×2×9000/23/40D 回风巷超前支架。

按照工作面长 450 m,考虑刮板机在两侧回采巷道的前伸量,刮板输送机铺设长度按照 456 m 进行设计,单面生产能力以 10 Mt/a 进行核算,研发了 SGZ1100/3×1600 型刮板输送机,采用中双链布置,刮板链规格为 $\phi 48\text{ mm} \times 152\text{ mm}$ 圆环链,机头部采用交叉侧卸,配备自动张紧装置^[47],运输能力可达 3500 t/h。

工作面同时配备了 MG750/1940-WD 型采煤机、SZZ1350/700 型转载机、PLM4500 型破碎机、EHP-5K400 型乳化液泵站等装备,成套装备地面联调试验如图 13 所示。



图 13 成套装备地面联调试验

Fig.13 Ground joint debugging test of complete sets of equipment

2.2.2 450 m 超长工作面工程实践

工程实践成果显示,小保当二号煤矿 450 m 超长综采工作面实现了多区域装备群智能联动控制,基于采煤机的实时精准定位,实现了装备群的顺序化及时支护与推进,以快速跟机移架和防碰撞为核心,有效解决了支架在多变工况下的适应性问题,推进速度提高 20%~60%。针对支护与运输、运输与采煤以及端头与超前支架的协同作业,开发相应的控制策略和工

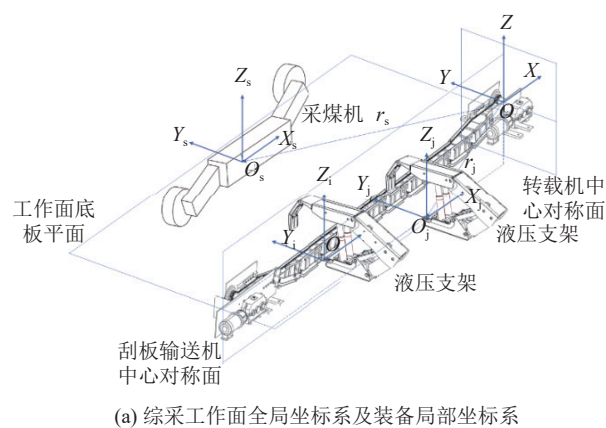
艺流程,提升了工作面整体的作业效率和安全性,工作面产能提高 100%~230%,回采率相比于常规 300 m 工作面提高约 5%,盘区多回收煤炭 110 万 t。由于工作面长度增长,盘区总掘进尺由 7.6 万 m 减少到 5.69 万 m,万吨掘进率由 19.8 m/万 t 下降到 13 m/万 t,降低了 34.3%,盘区少布置 3 个工作面,节约 3 次回撤费用约 1 亿元,逐步实现“一人一面一千万吨”,迈向“无人则安”的安全目标实现了安全、高产、绿色、降耗、节本、智能的生产愿景^[48]。

3 千米深井复杂煤层 6 m 大采高智能化综采技术与装备研发

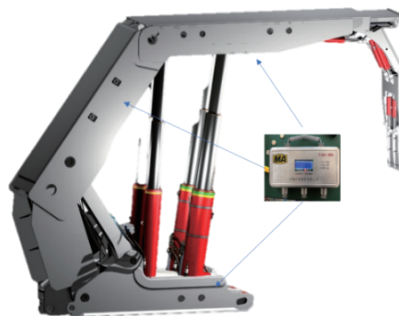
3.1 千米深井复杂条件工作面支护设备群组协同智能控制技术

3.1.1 复杂条件工作面围岩-设备状态全面感知

基于工作面液压支架局部坐标系、采煤机局部坐标系、刮板输送机局部坐标系和工作面全局坐标系的建立方式,构建了局部坐标系与全局坐标系的转换方法。在此基础上,开发了“有线+无线”井下综采数据传输系统,研发了基于 LORA 通信技术的“主控+分控+三无线倾角传感器”液压支架位姿监测系统,实现了工作面液压支架姿态监测(图 14)。



(a) 综采工作面全局坐标系及装备局部坐标系



(b) 基于LORA的液压支架位姿监测系统

图 14 综采工作面围岩-设备状态感知系统

Fig.14 Surrounding rock-equipment state perception system of fully mechanized mining face

3.1.2 液压支架自适应控制力学模型

基于液压支架运动学模型和动力学模型,分析带压移架工况下液压支架推移千斤顶所需推力与支架位姿、顶梁与顶、底板间的摩擦系数及顶梁载荷间的关系,揭示了在不同顶板压力和前端外阻力作用下,推移千斤顶移架所需推力随底板倾角的变化规律^[49-50]。在此基础上,构建了液压支架移架过程中,推移千斤顶活套杆的运动学参数、液压系统的液力参数及支架移架所需推力三者之间的数学关系。

3.1.3 支护设备群组协同智能控制技术

基于个体支架等刚度和岩梁两端弹性支座假设,建立了工作面长度方向液压支架群组的支护力学模型,分析工作面长度、采高、巷帮条件对顶板挠度、支架支护阻力的影响趋势。在此基础上,基于分布式控制方式和局部信息自主决策,提出工作面支护系统液压支架群组的自组织协同控制方法,采用围岩自适应控制和队列保持推进控制两个控制线程,解决了姿态一致及直线度控制难题。支护设备群组协调智能控制逻辑如图 15 所示。

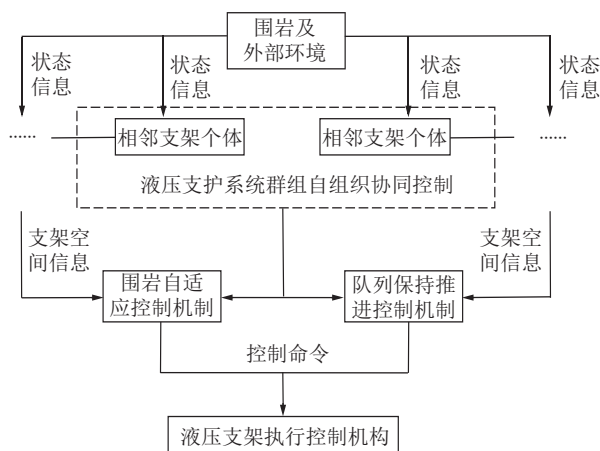


图 15 支护设备群组协同智能控制技术

Fig.15 Collaborative Intelligent Control Technology for Support Equipment Groups

3.1.4 开采数据分析与决策支持

基于口孜东煤矿工作面液压支架工作阻力实测数据,建立了四柱式液压支架受力分析模型,融合液压支架工作阻力、姿态数据推演了液压支架顶梁受力情况及演变趋势,实现了四柱式液压支架在不同地质环境下的工作状态实时精确描述;基于液压支架实时姿态数据反演工作面采高,生成工作面顶底板实时截割曲线(图 16);提出了工作面实时采高、支架受力状态和支架工作阻力综合分析算法,评估液压支架支护参数对复杂条件工作面的适应性,为液压支架群组协同控制提供决策支持。

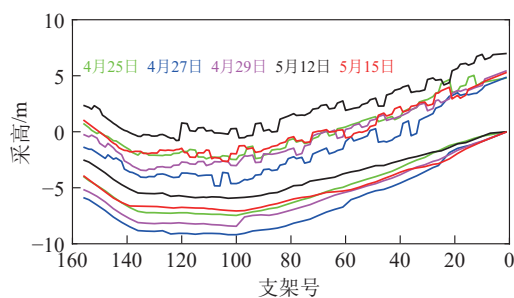


图 16 工作面顶底板实时截割曲线对比

Fig.16 Comparison of real-time cutting curves of roof and floor of working face

3.2 千米深井复杂煤层 6 m 大采高智能化综采装备研发

3.2.1 非等强四柱大采高液压支架支护系统

根据口孜东矿千米深井工作面俯采角度大、顶底板煤壁破碎等特点,研发了四柱式大采高非等强支护液压支架,支架工作阻力为 18 000 kN,支架前柱缸径为 440 mm,后柱缸径为 360 mm,设计了抬底机构、三级护帮板机构和架间侧护板机构,解决了支架扎底移架难、大采高工作面局部片帮防护难、顶板破碎漏煤的问题,同时,优化设计了支架行人通道的布局,保证了安全通畅^[51]。

3.2.2 工作面超前支护技术与装备研发

通过研发无反复支撑自移式超前支护装置,实现了工作面运输巷道狭小支护空间超前支护区域的无反复支撑与循环自移支护,具有体积小、支护效率高、支护与搬移工艺简单等显著优点。

3.2.3 工作面智能化开采系统的集成配套设计及现场试验

为提高深部煤层复杂条件工作面开采自动化、智能化水平,通过研究工作面综采设备参数匹配关系,设计了工作面系统配套及布置方案。示范工作面采煤机选用 MG1000/2590-GWD 型,刮板输送机采用 SGZ1250/3×1200 型,转载机采用 SZZ1350/1000 型,破碎机采用 PCM700 型,皮带自移机尾采用 ZY2700 型,提出了深部俯采大采高工作面连续稳定、安全高效运行的技术保障措施(图 17)。

开采系统成功应用于口孜东矿 140205 示范工作面,平均工作面每天可完成 5 次采煤循环,平均采高 5.5 m,最大采高 6.2 m,开采过程中现场实测液压支架前柱压力普遍高于后柱压力,占比 75% 以上,未发生拔后柱现象,支架整体支护强度达到 1.73~1.78 MPa,端头支架支护效果良好,形成了针对千米深井复杂条件工作面的高适应性、高可靠性、高稳定性支护系统,实现了连续稳定安全高效运行。



图 17 千米深井大采高成套综采装备

Fig.17 A complete set of fully mechanized mining equipment for large mining height in 1 000 m deep mine

4 8~10 m 超大采高数智化技术与成套装备研发

4.1 超大采高数智化开采技术

4.1.1 液压支架-围岩耦合控制及监测技术

液压支架支护应力场与围岩应力场相互叠加,共同构成了工作面应力场,实现顶板与煤壁的采动应力平衡,是构建稳定液压支架-围岩耦合关系的前提。基于顶板下沉和煤壁水平移位的双因素控制方法,护帮应力场依据防止煤壁“破坏-滑移”的片帮策略确定^[52-53]。基于液压支架智能控制终端,有效提高了采样频率和算力,实时监测支架姿态、支架工作阻力及围岩应力,通过智能控制中心调动电液系统,发出控制和预警指令^[54]。融合支架阻力与片帮数据,建立煤壁片帮预测模型;基于片帮时刻、位置和大小的预测结果,协同控制两层伸缩梁、三级护帮板的动作顺序、打开角度和护帮力大小^[55]。在支架抗动载方面,研发增容缓冲立柱(图 18),减小顶板动载载荷对支架的冲击,提高支护系统可靠性^[56]。

4.1.2 采煤机稳定性及自适应截割技术

超大采高工作面采煤机通过加宽机身、降低重心、紧固连接等结构优化,增强机身稳定性和整体刚度及强度,以适应超大采高工作面高强度截割并提升采煤机在强动载扰动下的适应性^[57]。工作面智能化建设方面,基于精准地质模型和截割模板数据库,集成工况监测、姿态监测、机载控制、精准定位、记忆截割、自动进刀、故障诊断、安全联动、机载视频、无线通讯、直线度检测、智能调高、防碰撞、煤流平衡等技术,使采煤机具备记忆截割、自动斜切进刀等自动化功能,实现超大采高采煤机自动截割^[58]。

4.1.3 煤流负荷平衡及链条动态张紧技术

在大功率、大运量刮板输送机的运行过程中,链条、链轮受力及刮板与溜槽磨损受链条张紧力影响显

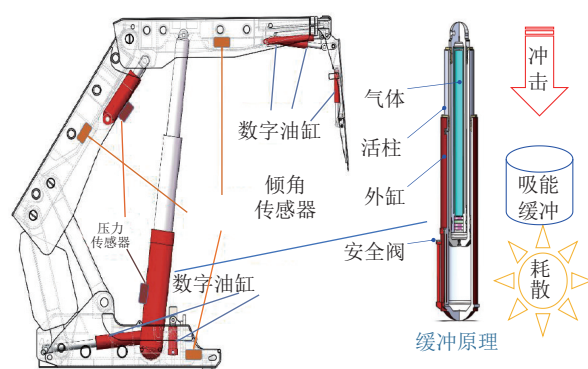


图 18 10 m 超大采高工作面监测系统

Fig.18 Monitoring system of 10 m super high mining height working face

著。通过构建深度学习模型实现煤流区域定位分割和状态动作识别,提出“空-半-满”三级煤流状态识别方法,支持智能决策。张紧技术通过机尾架液压缸实现,传感器实时监测压力及位移,反馈张紧程度,使链条张力保持在正常工作范围内。

4.2 超大采高综采成套装备研发及工程实践

4.2.1 8.2 m 超大采高成套装备及工程实践

基于金鸡滩煤矿 2-2 上煤层赋存条件及开采技术要求,设计研发了 8.2 m 超大采高综采成套装备,采煤机在 7LS8 型超大采高采煤机基础上,对密封、滑靴等进行改进优化设计,实现了采煤机的牵引力及可靠性的提升;研发了 ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架,支架中心距 2.05 m,采用缸径 530 mm 的大缸径双伸缩立柱;研发了 SGZ1400/3×1 600 重型刮板输送机成套装备地面联调如图 19 所示。



图 19 8.2 m 超大采高成套综采装备

Fig.19 8.2 m super high mining height complete set of fully mechanized mining equipment

此外,建立高压自动补偿系统及超大流量电液快速移架系统,有效提高工作面推进速度^[59];为适应超大采高工作面煤量变化大、片帮大块煤易压死刮板输送机等工况,刮板输送机配套了大块煤破碎装置,应用变频技术实现了无级软启动,改善了刮板输送机启动、运行过程中的性能^[60],保障了连续输送。

上述技术装备的研发,成功解决了超大采高工作面强扰动岩层运动导致的围岩控制、采煤机自适应截割、超大煤量自适应运输及大块煤破碎、装备系统协调运行及高效高回采率开采等难题,首套 8.2 m 超大采高综采装备,在金鸡滩煤矿成功应用,创造年产 1836 万 t 纪录^[61]。

4.2.2 10 m 超大采高成套装备及工程实践

针对曹家滩煤矿 2-2 煤层赋存条件,根据顶板下沉和煤壁水平移位的双因素控制方法,完善了超大采高工作面围岩-支架耦合理论,并基于此,研发了 10 m 特厚煤层一次采全高综采成套开采装备,研发了 ZYA29000/45/100D 型超大采高支架,中心距 2.4 m,护强度超过 1.9 MPa,设计了“双层伸缩梁+三级护帮板”结构,其中上层伸缩梁行程 1 100 mm,下层伸缩梁 900 mm,两端头支撑高度实现工作面中部 (10.0 m) 到两端头巷道 (5.5 m) 的“大梯度+小台阶”短缓过渡;研发 MG1200/3350-WD 型大功率超大采高采煤机,滚筒直径 4.8 m,采煤机机面高度约 4.5 m,过煤空间高度达到 1.8 m,两端头挖底量超过 480 mm,实现了采煤机多腔润滑,研发了轻量化耐磨滚筒;研发了 SGZ1600/3×2000 型刮板输送机,中部槽宽度 1 600 mm,采用交叉侧卸卸载,3 部驱动电机总功率 6 000 kW。10 m 超大采高成套装备地面联调如图 20 所示。



图 20 10 m 超大采高成套综采装备

Fig.20 10 m super high mining height complete set of fully mechanized mining equipment

此外,研发应用了具备精确采集液压支架姿态信息能力的液压支架数据采集系统,为实现液压支架的精确控制提供了必要的数据库。针对液压支架在高流量高压工作条件下的液压冲击与振动难题,采用集成式分级流量控制阀设计以及两阶段节流减压技术,该系统能够精确调控液压缸的流量,有效缓解了液压冲击和振动问题。

所开发的采煤工艺编辑软件,设计了多种截割模板的调整方法,构建了稳定的数据采集与分析系统,

引入人工干预机制以修正数据,确保截割数据更符合实际开采条件,可实现综合采煤工作面设备的协同控制,利用图形化编程方法和工艺表驱动技术,灵活编制采煤机的割煤工艺和电液控制跟机工艺,并实现参数化控制。

曹家滩煤矿 122104 工作面年产可达 1 800 万 t,设备满足煤层厚度 7~10 m 回采^[62]。实现超大开采空间安全支护、特厚煤层高效截割、超大运量煤流顺畅运输^[63]。

5 中国煤炭高效开采数智化技术装备的海外应用实践

5.1 高可靠性电液控制系统集成配套设计

高质量的综机装备是实现自动化智能化生产的基础,高可靠性的控制系统是保障生产系统安全高效运转的关键。兖煤澳洲公司基于一体化装备和电液控制系统,提升了工作面动力驱动器、液压支架、截割系统和辅助设备的集中控制能力,使其具备高级网络传输、可视化及自动化、智能化功能,可满足井下各类设备的自动化智能化控制需求。

构建了包括顶板支护系统(液压支架)、驱动器控制系统(电机)、可视化监控系统、节点交换机系统及可视化主控单元等控制系统在内的定制化控制单元,基于工作面设备定制化控制单元,建立了开放性自动化工作面电液控制系统(图 21),方便用户调整和校核。

基于“液压支架智能化”设计理念,工作面支架均配备液压支架控制器,可执行独立的逻辑运算与多项指令操作。当发生故障时,可通过邻架控制器快速确认故障,液压支架控制器均为同一配置,便于应急更换。液压支架控制器配备 LED 显示屏,用于数据设定、显示和查询,实时显示支架工作阻力、液压千斤顶行程、支架编号、采煤机位置及支架倾斜度等工作面参数。

工作面驱动控制器与启动变速器相结合,实现了刮板运输机的集中控制。该驱动控制器集成了启动与变速控制算法,广泛应用于矿井电机及减速机工作状态的实时监控。驱动控制器通过线缆连接至启动变速器接线盒,实时采集并监控离合器压力、冷却油压、油温、油位、输入和输出转速,同时计算润滑度,并通过高速电液阀自动控制离合压力。

基于电液控制系统的可视化功能,可实现驱动控制器设备运行参数的实时显示,供现场人员查询设备状态,并可进行系统配置参数的校正和修改。监控数据通过光纤传输至井下主控计算机或地面,实现监控数据在线浏览。

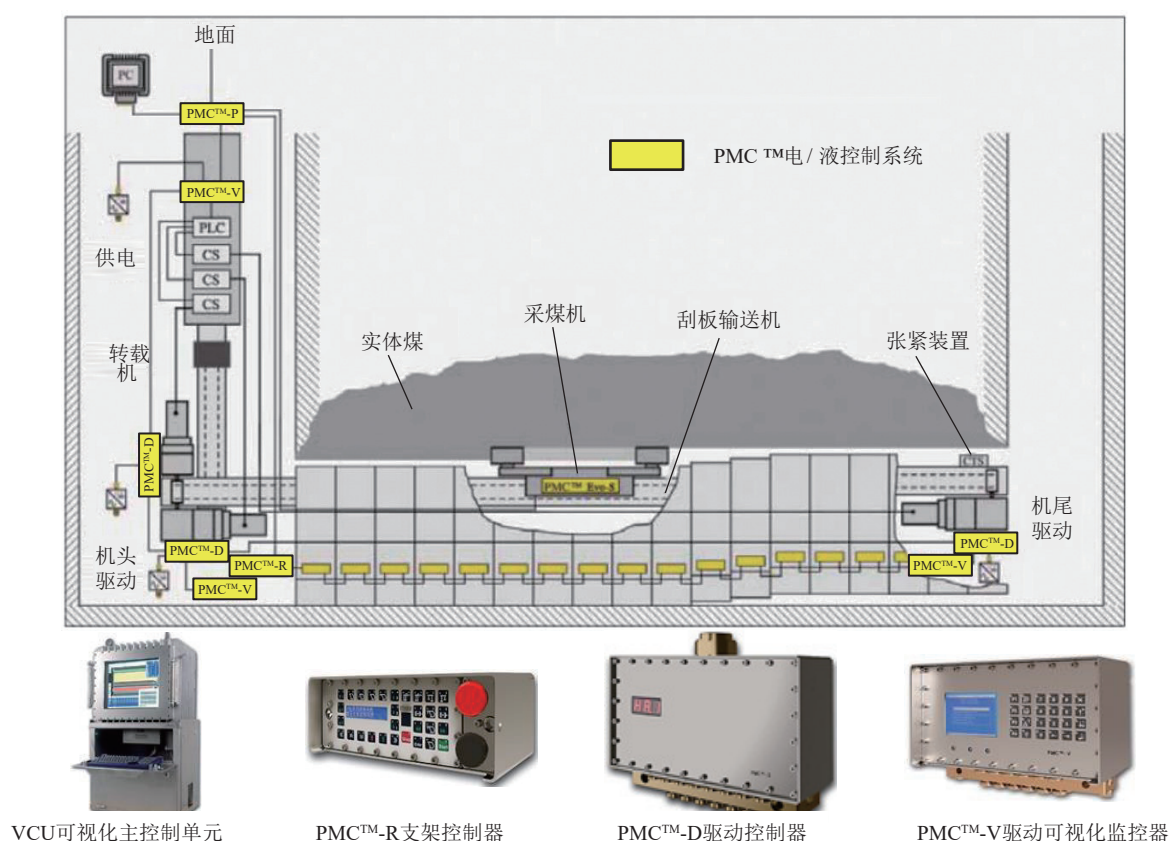


图 21 智能化工作面电液控制系统

Fig.21 Automatic electro-hydraulic control system for working face

工作面交换机系统通过整合井下电液控制、设备、工业网络及第三方系统接口,实现协议转换与数据传输至地面。该系统智能化调控工作面电气设备,如割煤量增加导致煤流量上升时,自动提升刮板输送机运输速度,反之亦然。

工作面可视化主控单元,基于可视化界面,将工作面控制系统和设备状态实时传输至井下计算机及地表。该主控单元可部署于工作面、巷道或地面,具备自动化生产控制中心功能,针对包括支架、采煤机、刮板输送机在内的设备,配置了监控程序,实现了设备参数实时显示、历史记录查询、3D 采场演示、视频回放、数据曲线监控及故障报警等功能。

5.2 综采工作面智能化开采技术

5.2.1 采煤机记忆截割

采煤机配置了可视化集成控制系统、滚筒角度传感器和位置编码器,搭载了基于状态控制的惯性导航系统,采煤机根据位置信息、摇臂角度信息等实现记忆割煤功能。

为实现精确控制采高,莫拉本煤矿长壁综采工作面采用了采煤机记忆截割功能,设置了“固定采高模式”、“沿底板割煤模式”及“复写模式”等多种截割模式。当滚筒高度与计划截割高度不一致时,采煤机

司机及时进行调整,调整后的数据记录至“复写模式”,用于指导下一阶段的采煤循环。如图 22—图 23 所示,采煤机搭载防颠簸程序,截割后的底板更为平滑,有效提升了设备运行的稳定性和可靠性。

5.2.2 液压支架自动跟机移架

基于可视化集成控制系统和自动化电液控制系统的深度融合,结合采煤机位置的实时定位,液压支架可自动进行降架、拉架、升架、伸护帮板、推溜等动作,实现液压支架跟机移架自动控制。此外,控制系统搭载防撞通信模块,通过支架控制总线和工业以太网,将监测信号实时反馈至采煤机,当采煤机滚筒接触护帮板或支架顶梁时,系统发送防撞信号,采煤机随即停止牵引并抑制摇臂调高功能,确保安全作业。

5.2.3 工作面设备自动拉直

基于智能化工作面设计,构建了包括 IMU 惯性测量单元、位置编码器、IPC4 工控机、集成接口和自动化长壁工作面顶板支护控制系统在内的液压支架端面对准系统。采煤机沿刮板输送机牵引的过程中,IMU 监测偏航角,位置编码器监测采煤机位置与几何姿态,数据传输至 IPC4 工控机,生成输送机的实际轮廓曲线,通过以太网传输至支护系统和监控程序,液

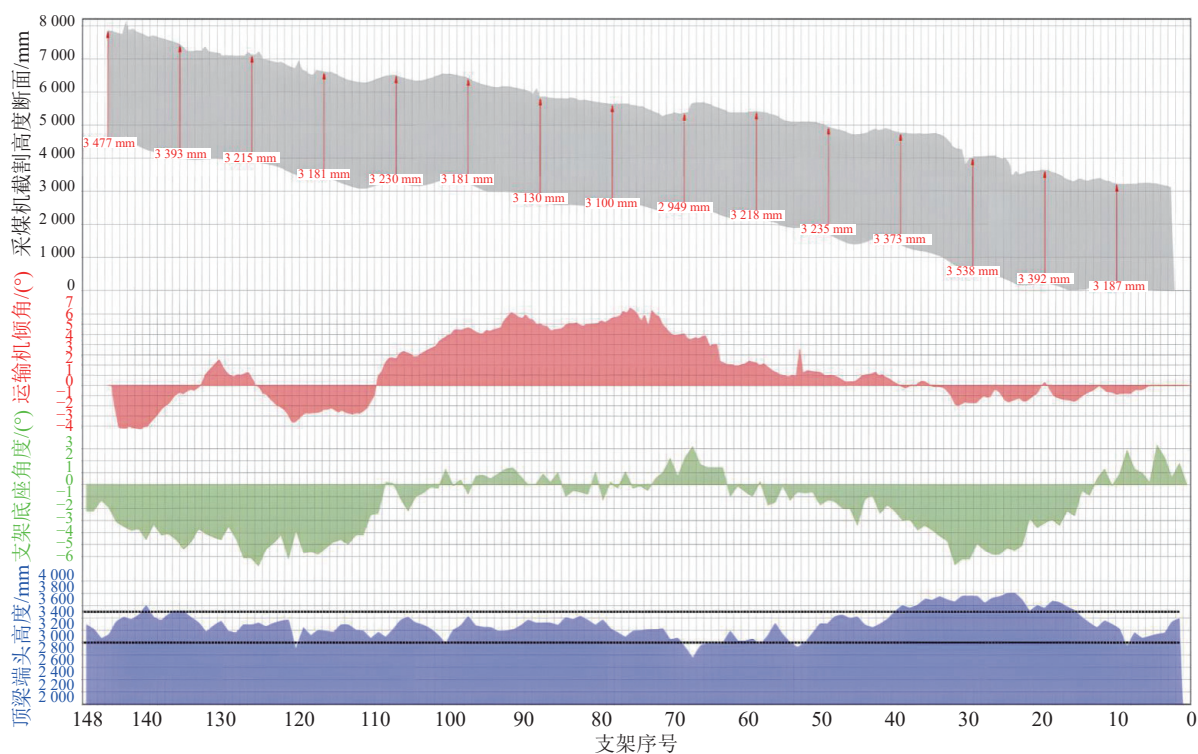


图 22 采煤机记忆截割系统数据可视化

Fig.22 Data visualization of shearer memory cutting system

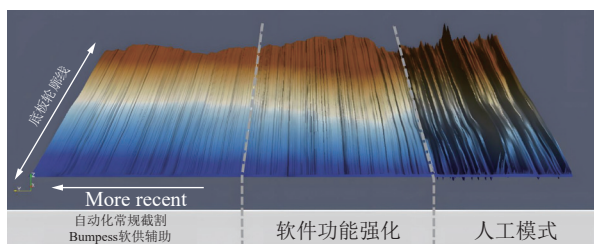


图 23 底板截割轮廓线

Fig.23 Coal seam floor cutting contour line

压支架基于实时更新的轮廓曲线进行自动对准操作,实现了工作面的自动化拉直和调面操作。此外,当检测到刮板输送机轮廓偏离时,操作员通过设定两端头进尺量实现工作面的自动拉直。为确保输送机的垂直位移,转载机机身配备了测量装置,配合自动拉直功能防止输送机的上窜和下滑,进一步提升了长壁工作面的智能化控制精度。

5.3 数智化技术装备海外应用工程实践

莫拉本煤矿智能化开采技术的实施有效提升了设备工作效率,采煤机牵引速度达 14 m/min,液压支架移架操作平均耗时 8.6 s,设备利用率达 92%,系统自动化使用率达 95%,创造了长壁面平均每米进尺 40 min、月产 83.6 万 t 的纪录。此外,减少操作人员数量,有效提升了矿井安全性,智能化技术提升了长壁系统的集约化程度,作业班组精简至 6 人。依托大数据技术,集成主风机、泵站、气体检测和人员定位系

统的数据至控制室监控屏,构建自动化预警和报告系统,及时向管理层传达异常信息,为高效、智能的矿井管理提供了保障。2019 年,该矿以 250 名员工实现年产 642 万 t,平均每人每日产出原煤 70.35 t,显著降低运营成本并提升盈利能力。莫拉本煤矿自动化开采工作面如图 24 所示。



图 24 莫拉本煤矿自动化长壁工作面

Fig.24 Automatic long wall working face of Moolarben Coal Mine

6 结 论

1) 通过信息技术与煤炭开采的深度融合,建立了包括自主感知、高可靠数据传输、智能分析决策、精准控制与执行以及数字孪生系统在内的煤矿数智化高效开采系统,明确了高效开采数字化和智能化技术

路径。

2) 研发了中厚煤层 450 m 超长工作面高端成套装备, 创建了超高工作面支护装备群联动机制, 构建了中厚煤层超长工作面装备群“回采-支护-运输”以及超前支护等多区域联动推进技术, 为中厚煤层超长工作面智能开采装备群智能联动及自适应推采奠定了基础。

3) 构建了千米深井复杂条件工作面支护设备群组协同智能控制技术, 研发了千米深井复杂煤层 6 m 大采高智能化综采装备, 通过在口孜东煤矿进行井下试验, 解决了千米深井超长工作面围岩控制及智能开采的工程难题。

4) 研发了 8~10 m 超大采高成套智能装备, 解决了超大采高液压支架与围岩耦合控制、煤壁片帮及护帮板监测、采煤机稳定性及自适应截割技术、煤流负荷平衡及链条动态张紧等技术难题, 实现了确立了超大采高开采数智化开采技术的发展路径, 突破采高极限, 实现了工作面年产 2 000 万 t 柔性产能。

5) 通过智能化控制系统、记忆截割、液压支架自动移架和工作面设备自动拉直等数智化技术, 显著提升了矿井的安全性和生产效率, 增强了系统的集约化程度, 通过集成监控和大数据分析, 提高了对设备异常情况的响应能力。成套高效开采数智技术在澳大利亚应用取得好效果, 展示了我国煤炭技术装备在海外的竞争力。

参考文献(References):

- [1] 刘峰, 郭林峰, 张建明, 等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [2] 王国法, 刘合, 王丹丹, 等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 23-37.
WANG Guofa, LIU He, WANG Dandan, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 23-37.
- [3] 王国法, 庞文辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181-202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 181-202.
- [4] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [5] 王国法, 徐亚军, 张金虎, 等. 煤矿智能化开采新进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, et al. New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [6] 金智新, 闫志蕊, 王宏伟, 等. 新一代信息技术赋能煤矿装备数智化转型升级[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 19-31.
JIN Zhixin, YAN Zhirui, WANG Hongwei, et al. The new generation of information technology empowers the digital and intelligent transformation and upgrading of coal mining equipment[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 19-31.
- [7] 范京道, 金智新, 王国法, 等. 煤矿智能化重构人与煤空间关系研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 243-253.
FAN Jingdao, JIN Zhixin, WANG Guofa, et al. Reconstructing human-coal space relationship through coalmine intellectualization[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 243-253.
- [8] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [9] 张博, 彭苏萍, 王佟, 等. 构建煤炭资源强国的战略路径与对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 88-96.
ZHANG Bo, PENG Suping, WANG Tong, et al. Strategic paths and countermeasures for constructing a “great power of coal resources”[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 88-96.
- [10] 王国法, 杜毅博, 任怀伟, 等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1909-1924.
WANG Guofa, DU Yibo, REN Huaiwei, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909-1924.
- [11] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 61-74.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Digital model and giant system coupling technology system of smart coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 61-74.
- [12] 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.
- [13] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1-16.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1-16.
- [14] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. 面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2124-2140.
WANG Xuewen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research on coal mine XR intelligent operation and maintenance system for complex collaborative tasks involving multiple humans and mul-

- multiple robots[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2124–2140.
- [15] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1–14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1–14.
- [16] 张平松, 焦文杰, 李圣林. 采煤工作面地质条件透明化技术现状与分析[J]. 智能矿山, 2023, 4(6): 2–13.
ZHANG Pingsong, JIAO Wenjie, LI Shenglin. Current status and analysis of transparency technology for geological conditions of coal mining face[J]. Journal of Intelligent Mine, 2023, 4(6): 2–13.
- [17] 崔耀, 叶壮. 基于 5G+云边缘协同技术的采煤机智能调速控制系统设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 205–216.
CUI Yao, YE Zhuang. Research on cloud-edge-terminal collaborative intelligent control of coal shearer based on 5G communication[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 205–216.
- [18] CAO Xiangang, DUAN Yong, WANG Guofa, et al. Research review on life-cycle health management and intelligent maintenance of coal mining equipment[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–21[2024-11-14]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0400>.
- [19] 庞文辉, 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.
PANG Yihui, GUAN Shufang, JIANG Zhigang, et al. Current status and prospects of surrounding rock control and intelligent coal drawing technology in fully mechanized caving face[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(9): 20–27.
- [20] 张帆, 李玉雪, 李昱翰, 等. 基于数字孪生的煤矿两柱式支架载荷预测方法[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–12[2024-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240513.0854.005.html>.
ZHANG Fan, LI Yuxue, LI Yuhuan, et al. SSA-RF: A novel prediction method for two-column supports in coal mines based on digital twins[J/OL]. Coal Science and Technology, 2024, 1–12[2024-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240513.0854.005.html>.
- [21] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34–53.
WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34–53.
- [22] 任怀伟, 李帅超, 赵国瑞, 等. 基于深度视觉原理的工作面液压支架支撑高度与顶梁姿态角测量方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 72–81, 93.
REN Huaiwei, LI Shuaishuai, ZHAO Guorui, et al. Measurement method of support height and roof beam posture angles for working face hydraulic support based on depth vision[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 72–81, 93.
- [23] 任怀伟, 赵国瑞, 周杰, 等. 智能开采装备全位姿测量及虚拟仿真控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 956–971.
REN Huaiwei, ZHAO Guorui, ZHOU Jie, et al. Key technologies of all position and orientation monitoring and virtual simulation and control for smart mining equipment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 956–971.
- [24] 张科学, 徐兰欣, 李旭, 等. 透明工作面智能化开采大数据分析决策方法及系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 252–262.
ZHANG Kexue, XU Lanxin, LI Xu, et al. Research on big data analysis and decision system of intelligent mining in transparent working face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 252–262.
- [25] 李森, 李重重, 刘清. 基于透明地质的综采工作面规划截割协同控制系统[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 175–184.
LI Sen, LI Zhongzhong, LIU Qing. Planned cutting and collaborative control system for fully-mechanized mining face based on transparent geology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 175–184.
- [26] 卢新明, 阚淑婷. 煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2296–2305.
LU Xinming, KAN Shuting. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2296–2305.
- [27] 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.
MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, et al. Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precise geodetic coordinates[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 515–526.
- [28] 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.
- [29] 程建远, 王保利, 范涛, 等. 煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 1–12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, et al. Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1–12.
- [30] 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.
- [31] 彭苏萍, 赵惊涛, 盛同杰, 等. 煤田绕射地震勘探现状与进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 1–20.
PENG Suping, ZHAO Jingtao, SHENG Tongjie, et al. Status and advance of seismic diffraction exploration in coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 1–20.
- [32] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16–23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16–23.
- [33] 魏春贤, 李涛, 连昶锦. 时间敏感网络在煤矿的应用[J]. 工矿自动化, 2024, 50(S1): 65–68, 99.
WEI Chunxian, LI Tao, LIAN Changjin. The application of time sensitive network in coal mine[J]. Industry and Mine Automation,

- 2024, 50(S1): 65–68, 99.
- [34] 杜毅博, 赵国瑞, 巩师鑫. 智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 177–185.
- DU Yibo, ZHAO Guorui, GONG Shixin. Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 177–185.
- [35] 王霖, 方乾, 张晓霞, 等. 智能化煤矿数据仓库建模方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 5–13.
- WANG Lin, FANG Qian, ZHANG Xiaoxia, et al. Intelligent coal mine data warehouse modeling method[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4): 5–13.
- [36] 杜毅博, 张乘风, 巩师鑫. 基于 OPC UA 的智能化综采工作面信息模型[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 42–48.
- DU Yibo, ZHANG Chengfeng, GONG Shixin. Information model of intelligent fully mechanized working face based on OPC UA[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 42–48.
- [37] 巩师鑫. 数据驱动的深井超长工作面支架载荷区域特征分析与分区预测[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 1–12.
- GONG Shixin. Data-driven regional characteristic analysis and partition prediction of support load in deep well and ultra-long working face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 1–12.
- [38] 樊红卫, 马宁阁, 马嘉腾, 等. 基于 EMDPWVD 时频图像和改进 ViT 网络的滚动轴承智能故障诊断[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 246–254.
- FAN Hongwei, MA Ningge, MA Jiateng, et al. Intelligent fault diagnosis of rolling bearing based on EMDPWVD time-frequency images and improved ViT network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(11): 246–254.
- [39] 王文广. 知识图谱: 认知智能理论与实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022: 4–7.
- [40] 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(3): 23–37.
- ZHANG Jixiang, ZHANG Xiangsen, WU Changxu, et al. Survey of knowledge graph construction techniques[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 23–37.
- [41] 巩师鑫, 任怀伟, 黄伟, 等. 复杂起伏煤层自适应开采截割路径优化与仿真[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 210–218.
- GONG Shixin, REN Huaiwei, HUANG Wei, et al. Optimization and simulation of adaptive mining cutting path in complex undulating coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 210–218.
- [42] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925–1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [43] 王学文, 谢嘉成, 郝尚清, 等. 智能化综采工作面实时虚拟监测方法与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1984–1996.
- WANG Xuewen, XIE Jiacheng, HAO Shangqing, et al. Key technologies of real-time virtual monitoring method for an intelligent fully mechanized coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1984–1996.
- [44] 尤秀松, 葛世荣, 郭一楠, 等. 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3265–3275.
- YOU Xiusong, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3265–3275.
- [45] 张金虎. 超长工作面采动应力演化规律及支架群组控制技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
- ZHANG Jinhu. The study on the evolution regularities of mining induced stress on ultra-long working faces and the control technology of supporting frame group[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2022.
- [46] ZHANG J H, CHENG Z H, XING Y W, et al. Roof stability analysis model of super-long fully mechanized working face and its application[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2024, 10(1): 189.
- [47] 李明忠. 大采高综放工作面交叉侧卸配套技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 94–98.
- LI Mingzhong. Cross side unloading matched technology and application to high cutting fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 94–98.
- [48] 李明忠, 赵文革, 闫汝瑜, 等. 超高与超长工作面高效综采关键技术及装备发展现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 199–209.
- LI Mingzhong, ZHAO Wenge, YAN Ruyu, et al. Development status and prospect on key technical equipment of high efficiency fully mechanized mining in super high and super long working face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 199–209.
- [49] 张金虎. 大采高综采异常矿压影响因素及支架适应性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 234–241.
- ZHANG Jinhu. Study on factors affecting abnormal mine pressure of large mining height fully-mechanized mining and support adaptability[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 234–241.
- [50] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 763–773.
- WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, et al. Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 763–773.
- [51] 王国法, 胡相捧, 刘新华, 等. 千米深井大采高俯采工作面四柱液压支架适应性分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 865–875.
- WANG Guofa, HU Xiangpeng, LIU Xinhua, et al. Adaptability analysis of four-leg hydraulic support for underhand working face with large mining height of kilometer deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 865–875.
- [52] PANG Y H, WANG G F, YAO Q L. Double-factor control method for calculating hydraulic support working resistance for longwall mining with large mining height[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(6): 252.
- [53] 王国法, 庞义辉, 许永祥, 等. 厚煤层智能绿色高效开采技术与装备研发进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 882–893.
- WANG Guofa, PANG Yihui, XU Yongxiang, et al. Development of intelligent green and efficient mining technology and equipment for thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 882–893.

- [54] PANG Y H, WANG H B, ZHAO J J, et al. Analysis and prediction of hydraulic support load based on time series data modeling[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8851475.
- [55] 张金虎, 李明忠, 杨正凯, 等. 超大采高综采工作面煤壁片帮机理及多维防护措施研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 487–495.
- ZHANG Jinhu, LI Mingzhong, YANG Zhengkai, et al. Mechanism of coal wall spalling in super high fully mechanized face and its multi-dimensional protection measures[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 487–495.
- [56] REN H W, ZHANG D S, GONG S X, et al. Dynamic impact experiment and response characteristics analysis for 1: 2 reduced-scale model of hydraulic support[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(3): 347–356.
- [57] 赵友军, 赵书斐, 赵亦辉, 等. 高效智能采煤机的研发与应用[J]. *智能矿山*, 2024, 5(2): 72–78.
- [58] 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.
- HAN Huijun, WANG Guofa, XU Yongxiang, et al. Adaptive intelligent coupling control of hydraulic support and working face system for 6~10 m super high mining in thick coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 276–288.
- [59] REN H W, LI S S, ZHAO G R, et al. Cooperative strategy for hydraulic synchronous lifting systems with industrial applications [C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). Shanghai, China. IEEE, 2020: 6890–6894.
- [60] 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.
- LI Wei, SUN Xikui. Key technologies and practices for safe, efficient, and intelligent mining of deep coal resources[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 52–64.
- [61] 王国法, 庞义辉. 8.2 m 超大采高综采成套装备研制及应用[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(11): 1–5.
- WANG Guofa, PANG Yihui. Development and application of complete equipment for fully mechanized mining with 8.2 m super-large mining height[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(11): 1–5.
- [62] 韩会军, 韩春福, 李明忠, 等. 10 m 超大采高智能化开采关键技术及装备研究[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(7): 82–90.
- HAN Huijun, HAN Chunfu, LI Mingzhong, et al. Research on key technologies and equipment for intelligent mining with 10 m super large mining height[J]. *China Coal*, 2024, 50(7): 82–90.
- [63] 雷亚军, 李增林, 韩存地, 等. 10 m 超大采高智能化综采成套技术与装备[J]. *智能矿山*, 2024, 5(3): 7–11.
- LEI Yajun, LI Zenglin, HAN Cundi, et al. 10 m super large mining height intelligent fully mechanized mining technology and equipment[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2024, 5(3): 7–11.