



我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考

袁智 蒋庆友 庞振忠

引用本文:

袁智, 蒋庆友, 庞振忠. 我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 189–198.
YUAN Zhi, JIANG Qingyou, PANG Zhenzhong. Application status and development thinking of intelligent mining technology and equipment in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 189–198.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国矿井物探技术及装备的发展现状与思考

Development quo-status and thinking of mine geophysical prospecting technology and equipment in China
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 1–15 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9514b820-6c65-4c87-8ab6-6c1cd9740ec6>

煤矿智能化开采技术研究现状及发展展望

Research status and development prospect of intelligent mining technology in coal mine
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c342388d-4bc8-4414-b8a8-f102c677d83a>

我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术

Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/69648235-011b-4939-9122-84f0e5a03966>

综采装备单机智能化向智能协同模式转型的探索研究

Exploration and research on transformation from intelligent single machine equipment to intelligent synergy in coal mine
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 169–175 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.020>

智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向

Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4fc06163-cca2-4ad8-b84e-581af4126882>

我国矿井通风技术现状及智能化发展展望

Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dbe9d65c-874e-43d6-89d2-d621859dfa53>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

袁 智, 蒋庆友, 庞振忠. 我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 189–198.

YUAN Zhi, JIANG Qingyou, PANG Zhenzhong. Application status and development thinking of intelligent mining technology and equipment in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 189–198.



40 余篇, 申请专利 30 余件, 获省部级科技进步奖 20 余项。

袁智, 男, 内蒙古乌兰察布人, 正高级工程师。国家能源局、国家矿山安全监察局煤矿智能化专家库专家, 煤炭工业突出贡献总工程师, 全国煤矿智能化卓越专家, 中国煤炭工业协会设备管理分会副会长, 煤机装备智能化产业联盟副理事长。研究方向: 煤矿机械、智能开采技术与装备。主要成果: 长期从事煤矿采掘装备研发及智能化技术研究工作, 先后主持完成 30 余项煤矿综采成套设备总体方案设计, 组织实施国家重点研发计划、国家能源局补强能源技术装备短板项目、国家“863”课题、国家“973”课题、国家发改委低碳项目等 10 个国家级项目, 牵头建设运行国家能源煤矿采掘机械装备研发(实验)中心, 发表专业论文

我国煤矿智能化综采开采技术装备应用现状与发展思考

袁 智^{1,2}, 蒋庆友^{1,2}, 庞振忠^{1,2}

(1. 中国中煤能源有限公司装备事业部, 北京 100120; 2. 中国煤矿机械装备有限责任公司, 北京 100011)

摘 要: 煤矿智能化技术是煤炭工业实现高质量发展的核心技术支撑, 而煤矿智能开采技术与煤机装备是煤矿智能化建设的关键。在详细分析我国煤矿智能化建设初级阶段现状和煤矿智能化技术发展制约因素的基础上, 剖析了采煤机自适应规划截割控制、刮板输送设备智能化综合控制、液压支架电液控制、透明工作面地质保障、工作面直线度监控、工作面人员精确定位及主动防护、工作面 AI 识别监测等煤矿智能化开采技术的优势和不足, 分析结果表明: 煤矿智能化建设需求为高端煤机装备产业发展和产业升级带来了前所未有的机遇, 现代信息技术与高端煤机装备的深度融合将革新我国煤炭的智能化生产方式, 但各种技术瓶颈依旧制约着其高质量发展, 距离煤矿实现“少人化、无人化”开采仍存在较大差距。煤矿智能化建设作为一项“人、机、环、管”协同的系统工程, 笔者提出了由打破传统的“单兵作战”理念向秉承“有机智能协同”建设理念来破解当前技术瓶颈的建议, 例如: 加强高端煤机装备向新-数-智转变攻关、完善地-边-端三级垂直安全管控技术、规划感知引导装置由叠加扩充向有机融合转变、建立设备全生命周期数字化管理系统、引导单机智能向群组协同智能转变等建议, 以此推动我国煤矿智能化开采煤机装备技术的高质量发展。

关键词: 智能化开采; 煤机装备; 信息化技术; 综采

中图分类号: TD67 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)09-0189-10

Application status and development thinking of intelligent mining technology and equipment in coal mines in China

YUAN Zhi^{1,2}, JIANG Qingyou^{1,2}, PANG Zhenzhong^{1,2}

(1. Equipment Business Department of Middling Coal Energy Co., Ltd., Beijing 100120, China; 2. China Coal Mining Machinery Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: The intelligent technology of coal mines is the core technical support for the high-quality development of the coal industry, and the intelligent mining technology and coal machine equipment of coal mines are the key to the intelligent construction of coal mines. On the basis of a detailed analysis of the current situation of the primary stage of intelligent construction in China's coal mines and the constraints on the development of intelligent technology and equipment in coal mines, this article analyzes the advantages and disadvantages

收稿日期: 2024-07-20 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.12438/cst.2024-1054

基金项目: 中煤重大科技专项资助项目(2022-ZB-22-03)

作者简介: 袁 智(1970—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授级高级工程师。E-mail: yuanzhi@chinacoal.com

of intelligent mining technologies such as adaptive planning and cutting control of coal mining machines, intelligent comprehensive control of scraper conveying equipment, hydraulic support electro-hydraulic control, geological guarantee of transparent working faces, straightness monitoring of working faces, precise positioning and active protection of working face personnel, and AI recognition monitoring of working faces. The analysis results show that the intelligent construction of coal mines has brought unprecedented opportunities for the development and upgrading of the high-end coal mining equipment industry. The deep integration of modern information technology and high-end coal mining equipment has greatly innovated China's coal production mode. However, the bottleneck of intelligent mining technology still restricts its high-quality development, and there is still a significant gap between achieving "less manpower, unmanned" mining in coal mines. As a collaborative system engineering of "human, machine, environment, and management", the intelligent construction of coal mines is proposed by the author to break the traditional concept of "individual combat" and adhere to the construction concept of "organic intelligent collaboration" to solve the current technological bottleneck. For example, strengthening the transformation of high-end coal mining equipment to new digital intelligence, improving the three-level vertical safety control technology of ground edge end, transforming the planning perception and guidance device from superposition expansion to organic integration, establishing a digital management system for the entire life cycle of equipment, and guiding the transformation of single machine intelligence to group collaborative intelligence are suggested to promote the high-quality development of coal mining equipment technology in China's coal mines.

Key words: Intelligent mining; coal machine equipment; information technology; fully-mechanized mining

0 引言

煤炭作为我国能源安全的“压舱石”，对国家经济发展和保障能源战略安全起着重要作用。煤炭“安全、高效、绿色、智能”开采已成为行业高质量发展方向，煤矿智能化技术作为支撑煤炭工业高质量发展核心技术已成为行业共识，而煤矿智能开采是煤矿智能化建设关键所在和核心支撑。当前，我国煤炭开采正由机械化向自动化、智能化、数字化方向快速迈进，国家相关部委、地方政府陆续出台指导意见、建设指南、技术标准等文件，加速推动煤矿智能化建设步伐，煤矿智能化技术与装备加速迭代升级，智慧煤矿和智能化矿井概念以及智能化建设标准正逐步清晰完备，其成果为我国煤炭行业智能化开采技术推广和智能化矿井建设提供了有力的保障^[1-5]。煤矿智能化建设目前主要集中在网络通讯、数据中心、视频监控、管控平台、大屏集显、智慧园区等信息化基础建设和固定场景智能化应用方面，但煤矿智能化技术仍处于初级阶段，对于煤炭开采的核心环节采掘工作面常态无人开采仍存在较大的瓶颈、难点和痛点，仍有大量的关键技术与装备需要攻关突破^[6-9]。

笔者在详细分析国内外智能开采技术应用基础上，结合我国井工煤矿智能化建设现状和制约因素，系统分析了智能开采技术与煤机智能装备应用现状以及技术瓶颈，并就未来智能化开采发展方向提出了相关建议。

1 煤矿智能化开采技术装备发展现状分析

1.1 智能化开采技术发展

国外长壁式自动化开采主要有采煤机开采和刨

煤机开采 2 种技术途径。滚筒采煤机开采技术应用广泛，德国艾柯夫和美国 JOY 公司均研究开发了具有自动化功能的滚筒采煤机综采工作面计算机控制系统，同时在澳大利亚综采长壁自动化指导委员会提出的惯性导航调直系统（简称 LASC 技术），实现了采煤机的三维定位、工作面设备自动拉直、采高自动控制等，形成了“全自动化为主，人工干预为辅”的开采模式，2020 年澳大利亚橡树溪北煤矿（Oak Creek North）进行了连续 6 周的工作面无人开采试验。针对厚 1.6 m 以下煤层，德国在全自动刨煤机技术与装备方面取得了较大成功，工作面刨头采用圆环链变频牵引，电控系统均布置在区段巷道，工作面真正意义上实现了无人，该技术在德国得到广泛应用，实现了薄煤层自动化年产超 100 万 t 的高效开采^[10-11]和地面远控的常态化应用。

近年来，我国煤矿智能开采技术与装备取得了巨大的进步^[12-17]。2008 年神华神东榆家梁煤矿基于进口设备进行了综采工作面的自动化开采研究和试验。2009 年晋城古书院煤矿开始探索基于国产采煤机记忆截割的自动开采。2010 年中煤唐山沟煤矿实现了薄煤层全工艺段自动化少人开采的成功应用，确定工作面视频跟机切换、采煤机记忆截割、多工艺段划分灵活组合、全工艺段自动化无人操作的自动化开采模式，为后续煤矿智能化开采奠定了基础。2012 年煤炭行业机电装备制造领域首个“863”重点项目“煤矿井下采掘装备遥控关键技术”启动，中国矿大与中煤装备公司承担的“薄煤层开采关键技术与装备”课题成功验收，实现了采煤机、掘进机的远控；2014 年 9 月黄陵中厚煤层自动开采成功，推出了“一键启停、记忆截割、少人巡视”的智能化开采黄

陵模式。2016年LASC技术首次在转龙湾煤矿试验应用,开启了惯性导航技术在智能化开采中的应用;2018年国能榆家梁煤矿开展了基于精准三维地质模型的自主智能割煤系统的应用探索;2019年中煤门克庆煤矿在大采高工作面实现了高达15 m/min智能开采;2020年9月黄陵一号井基于透明地质规划截割的智能开采系统通过验收;2023年山东能源杨村、滨湖煤矿含硫化亚铁结核体薄煤层工作面依托采煤机半悬式机身设计实现自动化年产120万t;2023年中煤大海则煤矿全系统智能化系统投入运行,为行业智能化发展树立了新的标志。

1.2 高端煤机装备智能制造

智能化装备及技术的不断发展,推动煤矿发展进入新阶段,相关单位结合我国煤层开采条件的差异性,系统研制了适应于不同煤层厚度的成套高端智能煤机装备,例如:中国中煤张煤机刨煤机成套关键技术与装备的成功研制,对我国薄极薄煤层实现“面内无人”智能开采提供了有力保障;450~500 m超长运距智能输送机,8~10 a不升井强力液压支架,大功率高效能智能采煤机等研制成功,上湾煤矿8.8 m和曹家滩煤矿10 m超大一次采全高成套煤机装备成功投入应用,进一步提高了煤炭采出率^[18-19]和开采效率,满足矿井单面年产1500万t开采需求;中国中煤北煤机出口澳大利亚液压支架可实现12万次工作循环;中国煤科太原研究院研制的“煤海蛟龙”掘支运一体化快速掘进系统已经创造了掘进月最高进尺3088 m的世界纪录。刮板输送机应用高强耐磨材料、变频永磁驱动技术、自张紧高强耐磨耐腐蚀矿用链条、自诊断哑铃、数字马达紧链系统、大功率减速器、大块煤破碎装置、运行工况在线监测系统等技术实现突破;采煤机采用高强优质中合金钢摇臂、高精度齿轮加工工艺、变频行走驱动装置、齿轮壳体材料,其核心器件、装机功率、整机性能、开机率、可靠性、寿命指标、电液控制等全面接近进口采煤机,实现了全系列自主开发、国产化替代,国产煤机装备的技术先进性、可靠性、适应性均有大幅提升;液压支架应用高强度机构设计、高强高韧性焊接、立柱千斤顶激光熔覆、大流量安全阀、防腐防锈技术、高可靠密封、大伸缩比立柱、辅助增压补压系统、位姿位移数字传感器、工业以太网电液控制系统等技术,其适应性、可靠性、可控性、高寿命大幅提升。远距离供电供液系统、主辅助运输系统、通风给排水、超前支护系统等配套系统同步提升。煤机装备正从机械化、自动化向高端化、成套化、智能化方向发展。

1.3 新一代数智技术赋能煤矿智能开采

随着中国制造2025计划的提出,工业发展与智能技术、信息技术深度融合是大势所趋。智能化矿山建设是在工业4.0基础上实现煤炭行业高质量发展的重要方向和途径。目前,工业物联网、5G通信、大数据、云平台、人工智能等信息化技术的迭代升级为矿井智能化建设提供了捷径^[20-21]。经过10a的发展,一张网、一朵云、一个湖、多系统融合的智能化煤矿架构初步建立,“云、大、物、移、智”与“机、电、液、频、磁”技术深度融合,新一代数智技术与高端煤机装备融合赋能、不断迭代升级,煤矿智能化开采技术装备性能水平得到了较大提升,基本实现了移动设备远程控制、固定设备集中控制、群组设备智能联动、部分岗位无人值守、作业面少人无人-机器人替代;煤机装备由单机自动运行向本体智能化运行,集中控制系统由原来的集显向地面集控发生转变,开采工艺由记忆截割向规划截割和自适应规划截割演变,地面远程控制由简单的顺序启停向工作面内部群组协同控制进化。煤矿智能化需求推动了煤机装备及智能技术突破升级,同时煤机装备及智能化技术的持续进步支撑了煤矿智能化发展。

2 煤矿智能化开采技术装备的制约因素分析

我国煤矿智能化技术取得了较大进步,但仍有较多制约因素,主要表现为:

1)地质环境复杂多变。目前,我国煤矿主采区分布区域广泛,且各区域所面临的开采环境差异显著,其主要表现为构造多样、灾害复杂多变、围岩和岩性强度不同等现象;例如,两淮地区因地质构造复杂、矿井灾害频发,进而造成了矿井智能化建设较为困难;蒙、陕、新疆矿区由于其成煤期较短、地质条件简单、煤层厚度均为中厚煤层或者厚煤层,存在冲击地压或具有冲击地压倾向,对煤机装备提出了更高的要求。因此,我国煤矿智能化建设受限于地质环境的差异性,智能化开采技术装备很难实现普世。

2)系统融合能力不到位。当前,煤矿智能化建设已经由快速发展期进入到稳步攻关期,但由于建设初期并未对其建设进行统一规划和顶层设计,导致各设备、系统厂家多源异构,标准不统一、协议不统一、群组设备及系统配套性、兼容性弱,工作面各系统“单兵作战”,智能开采系统多呈现出多点松散的配合状态,各设备各系统协同管理、智能联动、数据共享差,进而导致智能化矿井建设出现了“单兵强、群组弱”的现状。

3)培养综合素质人员建设力度不足。目前,随着智能化矿井建设,矿井工作面虽引入了大量的新装备和新技术,但对矿井一线工作人员进行系统性、综合性的培训力度不足。煤矿智能化建设作为一项系统性工程,其不仅需要熟知机电液磁,也要掌握信息技术,而原现场工作人员很难满足该项要求。故而,思想认识、知识结构、专业素养、考核机制都对智能化建设运行团队人员的综合素质培养提出了更高要求。

4)智能化标准指导性不强。近年来,相关科研发学者、企业、地方政府陆续发布了关于煤矿智能化建设的标准规范,各大能源协会组织相关专家编制了智能化矿井相关团标、行标、标准体系研究,并取得了初步研究成果^[22]。但是很多标准推出时间短、质量不高,标准的科学性、严谨性、可操作性、对现实的指导性和行业公信力有待进一步提高。

5)智能化发展重心偏移。煤矿智能化生产的核心在采掘工作面,然而行业智能化发展更多的围绕智能园区、大屏、基础信息建设等展示部分和辅助系统,忽视了煤机装备本体可靠、高端、具身智能的重要性,也忽略了矿工的接受程度和适应性,造成工人幸福指数远未达到预期。

3 煤矿智能化开采关键技术装备应用分析

3.1 高端煤机装备智能技术

煤机装备技术发展水平与煤矿智能化建设水平彼此相辅相成,即矿井智能化发展需求推动煤机装备及技术不断突破升级,同时煤机装备智能化水平的提高有力支撑了煤矿智能化发展。

3.1.1 采煤机自适应规划截割技术

随着智能化技术不断升级迭代,采煤机的截割控制方式经历了由邻机遥控干预向记忆截割方式、远程规划截割控制方式转变。采煤机自适应规划割煤技术^[23]主要对原有记忆截割控制系统、精准地理信息系统和工作面既往开采历史数据进行深度融合分析,自动生成实时规划截割曲线,指导采煤机截割。

地理信息数据模型化处理主要通过通过对矿井钻孔勘测数据、三维地震数据、井下槽波数据和两巷掘进数据的融合解析,生成工作面顶底板较准确数据,并进行原始数据的存储。随着工作面的开采推进,地理信息系统接收控系统下发的工作面开采高度数据对三维模型进行动态修正,并在一定时间范围内通过对工作面开采实况进行写实验证,为自适应规划截割提供了良好的数据基础。智能集中控制系统

通过对地理信息数据、前期开采数据、支架高度、伸缩距离等参数的深度融合和分析,按照工作面配套和开采工艺,制定了多刀提前规划、提前一刀细规划和开采过程实时调等三级规划截割曲线控制,可自动生成全工作面自适应规划割煤曲线,集控系统可随时将该曲线值写入采煤机内存,并控制采煤机进行自适应规划割煤。

采煤机自适应规划截割技术的成果应用,为无人化采煤奠定基础。但是,工作面智能开采初期,为确保现场安全开采,仍需要采煤机司进行跟机作业和动态修正截割曲线。因此,准确的地理信息数据、前期开采数据、支架高度、伸缩距离等参数的深度融合和分析,对实现采煤机自适应规划截割技术的安全高效应用至关重要。

3.1.2 刮板长运距输送调速控制技术

从刮板输送机软启动方式发展的角度看,先后经历了单速电机、双速电机、双速电机+液力耦合器、分体变频、变频一体到变频永磁启动的技术演进^[24]。目前应用的变频软启动、多电机功率平衡、过载保护等技术,可有效减少对链轮、链条及电网的冲击,提高过载能力和重载启动性能,充分发挥电机及传动系统效率,减小设备体积、延长整机运转周期和使用寿命。随着槽帮、中板、链条等关键机械部件不断采用新材料和新工艺,刮板输送机的机械性能有了质的飞跃。刮板输送设备智能控制系统主要分为工况检测、过程优化、智能运行。工况检测主要是通过安装在“三机”设备上的各传感器和视频监控进行数据采集,过程优化主要是通过多部电机协同控制、变频调速控制、自移机尾控制、自动润滑控制、链条张紧控制等子系统完成,智能运行主要是通过对大数据分析系统、健康管理系统、姿态控制系统等综合数据对刮板输送机进行智能启停。刮板输送设备智能化控制系统如图1所示。

目前,刮板输送设备智能化控制系统虽取得了成功应用,但受限于机头尾传动部在工作面两端分散布置,中部为多节可弯曲柔性蛇形连接,各中部槽间可在一定范围内活动,造成中部槽的位姿监控成为工作面开采过程中控制难点。链条传动具有弹柔性特性,刮板卡阻、链条自动张紧及断裂监测等监控技术成熟度不高。此外,自适应变频调速、永磁直驱、片帮大块煤压溜停机等技术亟待攻关解决。

3.1.3 液压支架电液控制技术

随着开采方式开采的演变,支架的操控方式由最初的手动片阀控制向电液控系统控制演变^[25]。目

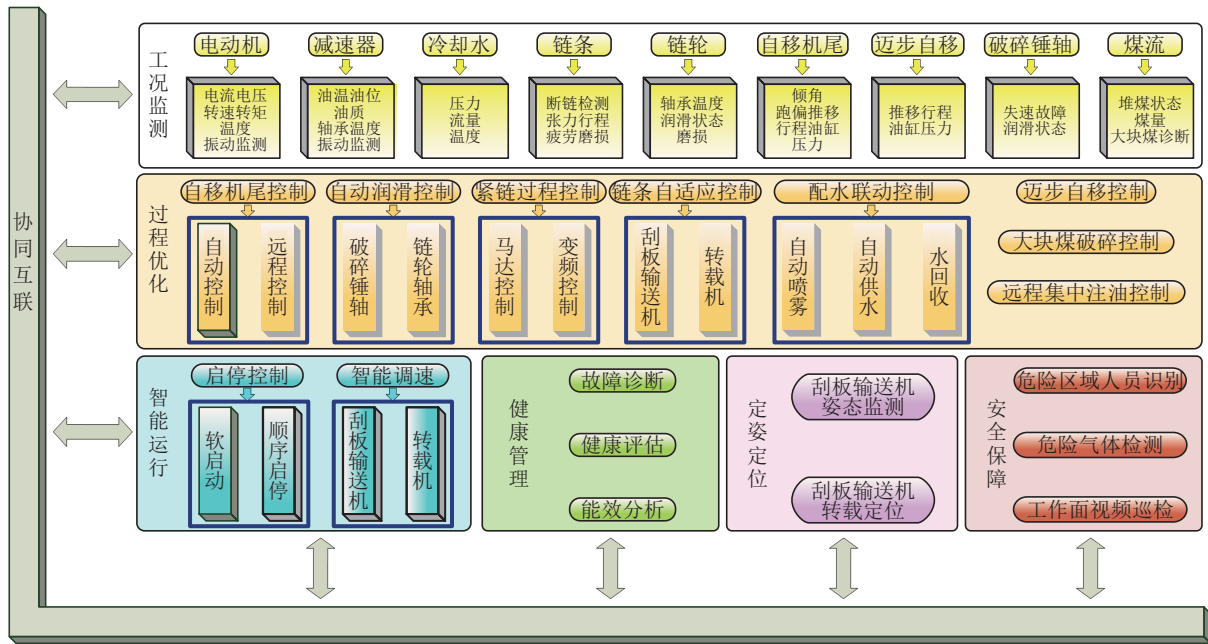


图 1 刮板输送设备智能化控制系统

Fig.1 Intelligent control system diagram of scraper conveyor equipment

前, 电液控制系统作为实现跟机移架功能的核心技术, 其主要通过如图 2 所示的液压支架电液控制系统进行执行。电液控制技术可实现压力、位移、倾角、高度等姿态监测和本地临架、隔架、成组、单架特殊

功能联动、循环移架、自动补压和自动跟机等监控功能。液压支架电液控制系统基本具备了工作面调直、人员精确定位、主动防护、防倒防滑等控制, 提升了液压支架工况的全面监测及人员防护水平。

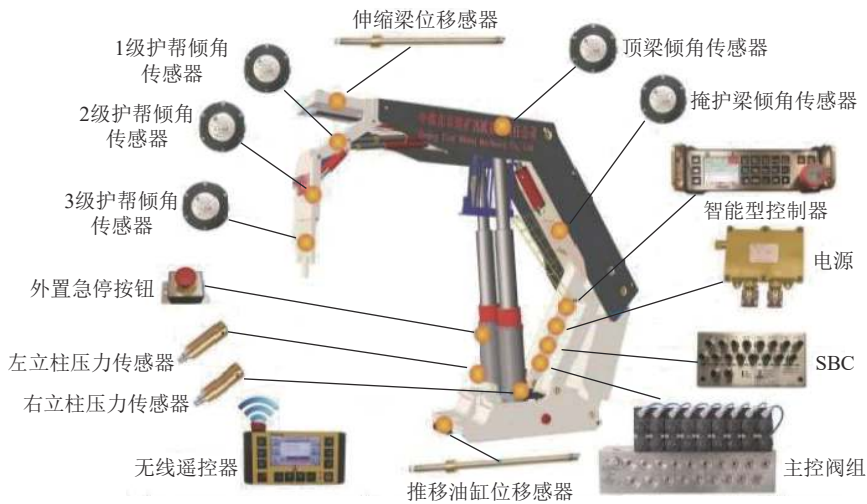


图 2 液压支架电液控制系统

Fig.2 Hydraulic support electro-hydraulic control system diagram

但是, 由于电液控制系统内的传感器对于矿井工作面恶劣环境的自适应性的感知差异性, 导致液压支架在姿态调整、精准推移、端头自动化开采、工作面直线度控制、上窜下滑调整存在问题; 同时, 两巷超前架与工作面中部支架智能联动还未形成统一整体、协同控制能力亟待提高。

3.2 综采工作面智能化开采关键技术分析

随着物联网、大数据、人工智能、5G 通讯、机器

视觉等技术的快速发展, 以集中控制系统为核心深度融合各系统, 实现各设备有机协同控制已成为可能。因此, 加强新一代数智技术研究, 并赋能于煤机装备, 将成为智能开采核心技术。

3.2.1 工作面透明地质保障技术

工作面透明地质保障技术作为综采工作面智能化建设的重要支撑技术之一, 其动态更新模型的建立主要依据采前和采中的勘探、钻探等数据资料, 以

回采过程中产生的精细探测和回采数据为驱动,采用局部更新技术,不断对推采前方一定距离的地质模型进行动态构建,并形成动态更新地质模型^[26-27];透明地质服务器按照生产需求将新的模型按照要求进行截割曲线提取,并传送至生产设备,实现综采工作面的规划截割。

目前,三维透明地质模型对生产规划截割虽有一定的指导作用,但受限于探测精度、勘探成本、探测装备以及人工勘测修正数据带来的误差等因素制约,仍无法精准地应用与综采智能化工作面,主要表现为:①透明地质模型多为静态模型,无法与采动应力场影响范围内的地质开采环境进行深度融合,导致静态模型与现场实际工况存在偏差;②受限于多种地质数据解析、融合等处理标准差异性和探测手段的局限性,静态地质模型精度与回采需求仍有一定差距;③现有精探技术与装备无法与采动环境直接关联融合,精探数据无法支撑地质模型及时动态更新;④工作面实时采集的地质信息目前只能更多依靠地质工作者根据工作经验进行人工修正,模型实时更新时间远滞后于生产需求,无法实现实时指导采煤机规划生产。因此,如何实现三维地质模型由“观看型”模型转为“应用型”模型转变是亟需解决的问题。

3.2.2 工作面直线度调直技术

工作面直线度监控技术主要是通过安装在采煤机身上安装惯性导航系统及数据采集箱,对采煤机行走过程中的震动数据进行采集,建立震动滤波频谱,并对采煤机震动对惯性导航系统带来的误差进行滤波处理。技术工作原理主要为:采煤机惯性导航系统采集采煤机在水平、俯仰、横滚等3个方向的运行轨迹,并将其轨迹传输到工作面集中控制系统;集中控制系统通过算法模型对惯性导航装置数据加工处理,生成调直控制数据与曲线,并将处理后的数据传输至集中控制系统内部的调直模型;集控系统对全工作面数据分析、计算,得出每一台支架在下一个动作环节的拉架行程值,并与电液控制系统联动,将拉架行程值发送给电液控制系统;电液控制系统按照该行程值对支架动作进行控制,进而实现对工作面的调直^[28-29]。

目前,工作面直线度监测技术虽然可满足现场使用的需求,但随着工作面的不断推进,惯性元件受采动过程震动影响而出现位置漂移,并导致定位误差累积增大;此外,受限于现场地质条件、液压支架与刮板机结构、开采工艺和无法多刀连续自动化运

行所限等因素,采煤机经过数次循环割煤后,调直控制率降低,定位精度难以满足智能化工作面建设要求,需要人工及时修正调整,进而影响综采工作面开采效率。因此,如何实现复杂开采条件下工作面直线度调直问题,并满足工作面“三直两平”要求,是智能化煤矿建设过程中所需重要解决问题之一。

3.2.3 工作面人员精确定位与主动防护技术

矿井人员定位尤其是工作面人员定位,已成为人员安全监测的一项主要抓手。从技术角度讲,UWB 相对射频、zigbee 和蓝牙等技术具有更明显的优势,对于需要高精度定位的场景,UWB 技术是最佳选择,其定位精度可达 10~30 cm,完全满足现场定位的使用需求^[30]。目前,基于 UWB 精确定位技术,主要是通过每个液压支架上安装多功能定位传感器(基站),基站与读卡器一体化设计,通过工作面人员身上携带的定位识别卡对工作面人员位置信息进行扫描、定位,实现工作面人员与基站之间相互的距离精准定位。同时,以工作面三维地理信息与设备模型为基础,将人员位置信息三维模型化,建立统一的工作面设备、环境、人员模型,实现不同系统数据的统一标准化处理,将“人-机-环”建立在统一维度内,实现三者的精准定位。将人员定位的位置信息与集中控制系统进行交互,实现在集中控制系统内的人员位置显示,同时将该信息传输给电液控制系统,电液控制系统根据人员位置信息闭锁人员所在位置对应支架的动作,防止支架的动作对人员造成伤害,为人员安全保护提供保障。工作面人员定位防护系统如图 3 所示。

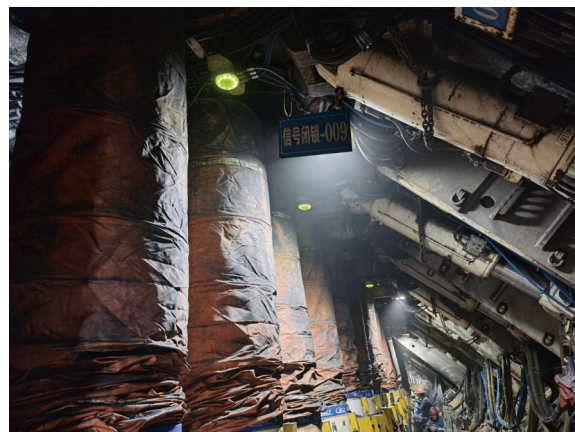


图3 工作面人员定位防护系统

Fig.3 Diagram of positioning and protection system for working face personnel

目前,经过现场程序反复的优化和完善,工作面人员定位防护系统基本实现了工作面人员精确定位

及支架闭锁保护功能。即：当人员处于支架中部时仅闭锁当前支架，当人员处于支架边缘时将自动闭锁相邻两台支架，当人员经过正在动作的支架时暂定所有动作进行人员安全保护，当人员离开后自动恢复正在执行的智能化动作，大幅提高智能开采效率和人员安全保障。但受商业因素影响，工作面人员定位系统与矿井定位系统不是同一场景时，标识号便无法再两套定位系统中融合使用，导致进入采区作业人员需佩戴两张标识卡，为现场应用带来较大困扰。因此，需要各生产商家标准统一、协议开放，进而为实现矿井智能化建设和保障人员安全提供技术支撑和应用便利。

3.2.4 工作面视频 AI 识别监测技术

随着智能 AI 识别技术的不断发展，现综采智能化工作面可通过视频 AI 识别技术对多维度、多角度的视频图像进行统计、分析、对比和识别，实现对护帮收回状态识别、片帮识别、人员越界识别、不戴安全帽和未穿防冲服等情况的 AI 识别。识别结果与智能集控系统相融合，实现给予视觉传感的工况、设备与人员的监测、判断和防护等功能。同时，为保障视频系统能够实时进行上传，科研学者提出采用千兆有线网络与 5G 互为备用并发的视频传输方式，并对井上下有线传输进行了结构优化，使井下视频传输至地面延时可低至 200 ms。工作面护帮板实时动态识别现场图如图 4 所示。

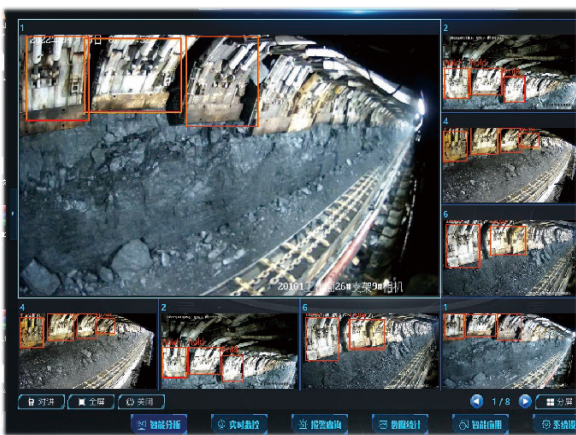


图 4 工作面护帮板 AI 识别图

Fig.4 AI recognition diagram of working face guard plate

目前，工作面视频 AI 控制技术能够实现摄像头随采煤机行走进行“自动跟机”作业，实现回采全过程监测控制。同时，液压支架推移过程中，视频 AI 识别技术可实现检测支架掩护板是否及时支护，第一时间发现异常并预警；根据采煤机提供的位置信号判断前后滚筒所在的支架位置，识别前滚

筒的前面 4 个护帮为收起状态，后滚筒的 4 个支架要放下状态，并根据状态监测是否完成到位；提高了工作面作业环境的安全监管监控效果。但是，受 AI 算法模型技术水平和现场环境的特殊性限制，场景识别率仍有较大的提升空间；同时，受限于工作面恶劣环境影响，视频采集视角影响，无法观测到工作面的全貌，也无法判断刮板输送机的平直情况，导致远程干预割煤工程质量因视线问题时好时坏，无法常态化运用^[31]。

4 煤矿智能开采技术装备发展展望

根据上述对我国目前煤矿智能化先进技术应用分析可知，数智技术与煤机装备的深度融合虽在减人、增安及功能性建设方面虽然取得了一定成果，但依旧存在着亟需解决的技术瓶颈问题。本节结合制约煤矿智能化发展因素和关键技术应过程中遇到的现阶段暂未解决的问题，笔者认为煤矿智能化开采技术装备的未来发展可从下述 5 方面进行攻关突破。

4.1 高端煤机装备向新-数-智转变

根据上述 1.2 和 3.2 节论述的内容可知，煤机行业通过大力实施科技创新，突破了一批关键核心技术，煤机装备制造能力和供给质量明显提升。但由于我国相关产业基础薄弱，行业整体自主创新能力不足，一些关键零部件、关键材料、核心控制器等对外依存度仍然较高，国产设备性能和稳定性较国外仍有较大差距。因此，需要积极推动高端煤机装备向新-数-智转变，具体措施如下：

1)持续优化支撑装备生产的新材料、工艺、结构设计等，保障设备的可靠性。例如：更改煤机装备焊接工艺，逐步用大型机器人激光跟踪焊接替换传统人工焊接，不仅可以减少工人劳动强度，还可以确保焊接质量的一致性^[32]。

2)加速融合煤机装备高端化与新一代信息技术，提升装备的本体智能化水平。例如：通过矿鸿该系统将设备之间的数据接口和数据协议标准进行统一，实现设备间互联与信息互通，并且作业人员可以通过智能防爆手机实现对设备的掌控^[33]。用人工智能等技术提高设备本体的控制逻辑，提高设备的自适应性和协同控制能力，实现本体智能。

3)通过加大设备运行工况和各类传感器数据样本，不断训练设备自身决策模型，持续提升单机设备自感知、自调节、自适应、自保护能力，满足设备常态化应用能力。

4.2 地-边-端三级垂直安全远程管控技术

为有效解决地面智能化无法急停控制的行业难题,并实现由井下集控到地面远控中心工作方式的转变,笔者利用 PLC 自身运行安全、稳定、可靠的特性和安全控制模块控制响应的时效性,提出地-边-端三级垂直安全管控技术解决方案(图 5)。系统主要将地面远控中心和井下数据处理中心采用主从分布结

构,地面远程操控指令通过 PLC 从站发送至 PLC 主站进行控制,其控制实效性更高;PLC 安全模块通过 EtherCAT 通讯协议进行安全校验,安全校验时间小于 10 ms,急停控制系统响应周期不大于 50 ms,系统远程控制 and 地面急停控制时延均能很好的满足现场应用需求,同时还可在设备端进行急停控制,最终实现地面-设备列车与工作面三处的垂直安全管控。

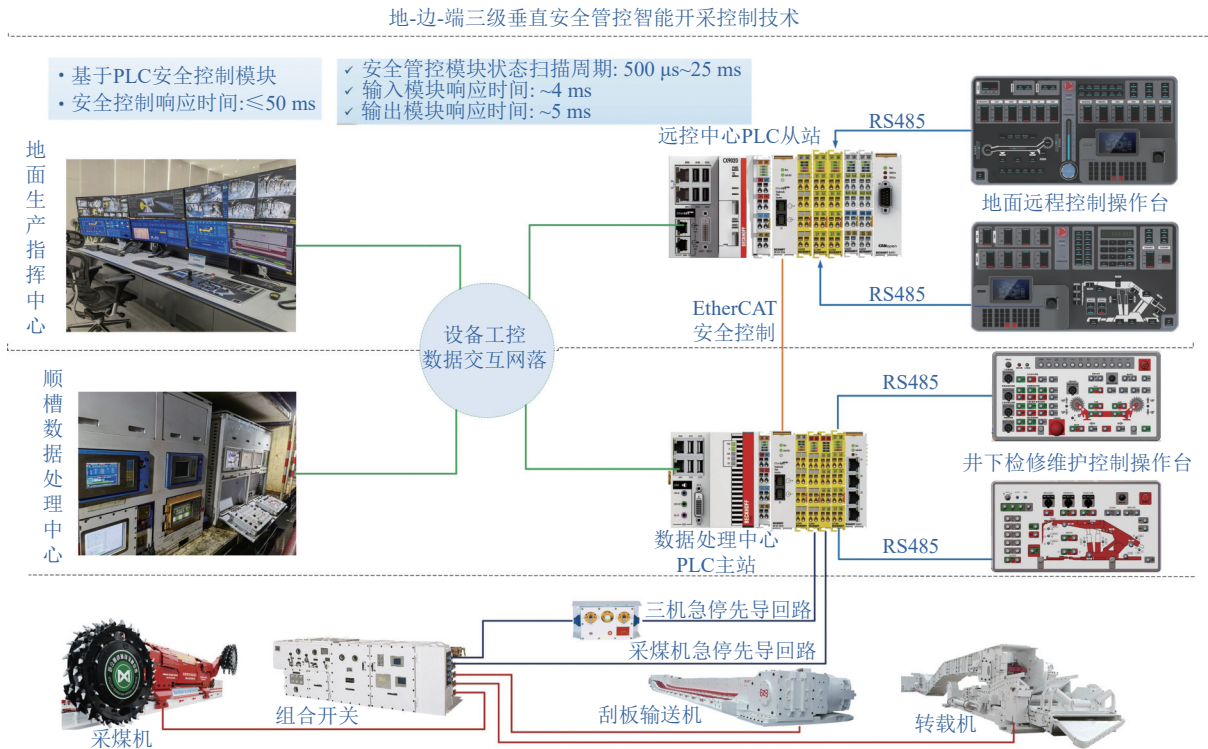


图5 地-边-端三级垂直安全管控架构

Fig.5 Ground-edge-end three-level vertical security management and control architecture diagram

4.3 感知装置由叠加扩充向融合一体转变

根据 3.3.4 节工作面视频 AI 识别监测技术内容分析可知,目前随着机器视觉技术的不断发展,通过基于机器视觉的 AI 多场景感知技术已经实现对工况环境感知、设备姿态精准感知、设备运行工况状态智能测量,但受限于使用环境影响,其应用价值仍未得到充分释放。因此,结合低功耗传感和无线传输技术的发展,通过少量视觉传感与无线传感装置的深度融合,可实现工作面全面监测,例如:现工作面的调直监控主要依赖于惯导装置,而该项技术也可通过工作面视频 AI+算例模型深度计算方式进行解决。其主要路径为:通过工作面现有视频传感装置拍摄的工作面全息画面,深度挖掘和学习刮板输送机与液压支架推移关系模型,并基于工业数字孪生、工作面设备定位、5G 视频传输、局部动态更新和传感技术,实现工作面刮板输送机直线度的分析和整

体动态调整展示,进而不仅可以解决现有传感器布置数量多、线缆结构复杂、安装位置不便利、损坏风险高、维护工作量大等问题,而且可以实现“一机多用”的目的,进而减少智能化运行成本。

4.4 设备现场运维管理向远程数字赋能转变

根据上述煤矿智能化开采技术装备的制约因素分析可知,受限于矿井工作人员对于新技术的认知和操作能力的不足,严重制约了智能化工作面先进技术装备的应用。因此,通过设备现场运维管理向远程数字赋能工作方式的转变,建立云端服务中心形成“线上+线下”一体化服务模式,通过平台为客户提供包括煤机设备产品的源数据管理、设备全生命周期跟踪服务、产品改良和技术升级、故障诊断与生产辅助服务、技术支持和输出、备品备件计划等,完成知识共享。技术优势主要表现为:

1)充分利用云计算能力,降低单项建设成本;远

程诊断中心作为数据存储和算力中心,以大数据中心为基础对采集的传感器信息继续在线监测、故障建模和AI分析。

2)充分利用专业知识:由设备厂家专业技术人员,对设备状态进行远程诊断、原因排查和问题处理,实现知识共享,提高故障处理的效率和质量。

3)用户与装备生产企业共建良性生态链:由“端到云”,构建“云、边、端”线上线下一体化模式,建立良好的设备研发制造和使用服务生态,实现价值最大化、成本最低和共赢。

4.5 单机智能向群组协同智能发展

因综采智能化开采环境和工艺复杂,涉及人、机、料、法、环和安全等多个系统,单设备智能化虽能在单点解决一定的问题,但要实现安全、高效、连续、稳定的常态化智能开采,除设备本体智能外,更需要群组智能有机协同以应对复杂的外部环境和生产需要。而一体化供给系统性最强,交钥匙工程,可大大减少矿方在设备配套、通讯对接、联合调试过程中的各类协调沟通问题,而且可大幅提升多系统协同的安全性、稳定性和高效性。

5 结 论

1)通过对我国煤矿智能化开采技术装备发展现状分析可知,目前煤矿智能化技术取得了较大进步,但仍受地质环境复杂多变、系统融合能力不到位、培养综合素质人员建设力度不足、智能化标准指导性不强、智能化发展重心偏移等因素制约。

2)煤矿智能化建设作为我国煤炭工业领域进步的必由之路,现煤矿智能化开采关键技术装备改变了原有工作模式和提高了安全保障,但仍需结合新一代信息技术充分挖掘煤机装备数据资源,不断优化决策模型,突破煤机装备智能感知、智能诊断、智能调控等众多行业难题,进而助力矿井早日实现“少人化、无人化”的远景目标。

参考文献(References):

- [1] 王国法.《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》——从编写组视角进行解读[J].智能矿山,2022,3(6):2-10.
WANG Guofa. 'Intelligent demonstration coal mine acceptance management measures (trial)' -interpretation from the perspective of writing group[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(6): 2-10.
- [2] 葛世荣,张晞,薛光辉,等.我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J].中国工程科学,2023,25(5):146-156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Research on the development of intelligent technology and equipment of coal mine in China[J]. China Engineering Science, 2023, 25(5): 146-156.
- [3] 刘峰,曹文君,张健明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Progress of science and technology innovation in China's coal industry and development direction for the 14th five year plan[J]. Journal of Coal Science, 2021, 46(1): 1-15.
- [4] 李首滨.智能化开采研究进展与发展趋势[J].煤炭科学技术,2019,47(10):102-110.
LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 102-110.
- [5] 范京道.煤矿智能化开采技术创新与发展[J].煤炭科学技术,2017,45(9):65-71.
FAN Jingdao. Innovation and development of intelligent mining technology in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 65-71.
- [6] 赵坤.到2025年我国大型煤矿基本实现智能化[N].中国电力报,2024-05-29(001).
ZHAO Kun. By 2025, China's large-scale coal mines will basically achieve intelligence [N]. China Electric Power News, 2024-05-29 (001).
- [7] 张明,张健明.加快煤矿智能化建设 推进煤炭高质量发展[J].煤炭经济研究,2024,44(4):1.
ZHANG Ming, ZHANG Jianming. Accelerating the intelligent construction of coal mines and promoting high quality development of coal[J]. Coal Economy Research, 2024, 44(4): 1.
- [8] 张科利,曹豪.煤矿智能化建设的系统思考[J].中国煤炭工业,2024(2):72-73.
ZHANG Keli, CAO Hao. Systematic Thinking on Intelligent Construction of Coal Mines[J]. China Coal Industry, 2024(2): 72-73.
- [9] 张闯,张超力,崔涛,等.煤矿智能化开采技术现状及展望[J].能源与节能,2024(1):186-189.
ZHANG Chuang, ZHANG Chaoli, CUI Tao, et al. Current status and prospects of intelligent mining technology in coal mines[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(1): 186-189.
- [10] 范志忠,裴印昌,刘天习,等.1.0m以下薄煤层智能化刨煤开采关键技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(3):39-45.
FAN Zhizhong, PEI Yinchang, LIU Tianxi, et al. Research on key technology of intelligent coal ploughing mining in thin coal seam below 1.0 m[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 39-45.
- [11] 王一然,王兵,陈龙高.澳大利亚莫拉本煤矿长壁智能化工作面现状及思考[J].中国煤炭,2020,46(5):113-118.
WANG Yiran, WANG Bing, CHEN Longgao. The current state and reflection on intelligent longwall face of Moolarben Coal Mine in Australia[J]. China Coal, 2020, 46(5): 113-118.
- [12] 铁旭初.我国煤机装备制造70年发展成就与展望[J].中国煤炭,2019,45(11):5-12.
TIE Xuchu. Development achievements and prospects of coal machinery equipment manufacturing in China over the past 70 years[J]. China Coal, 2019, 45(11): 5-12.
- [13] 闫少宏,徐刚,范志忠.我国综合机械化开采50年发展历程与展望[J].煤炭科学技术,2021,49(11):1-9.
YAN Shaohong, XU Gang, FAN Zhizhong. The 50-year development history and prospect of comprehensive mechanized mining

- in China[J]. Coal science and technology, 2021, 49(11): 1-9.
- [14] 马晓敏. 标准引领推动矿山智能化建设[N]. 中国矿业报, 2023-09-05(004).
MA Xiaomin. Standards lead the promotion of mine intelligent construction[N]. China Mining Daily, 2023-09-05(004).
- [15] 李志强, 李根. 煤矿智能化建设探索与实践[J]. 中国煤炭, 2022, 48(1): 46-52.
LI Zhiqiang, Li Gen. Exploration and practice of coal mine intelligent construction[J]. China Coal, 2022, 48(1): 46-52.
- [16] 霍昱名. 厚煤层综放开采顶煤破碎机理及智能化放煤控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
HUO Yu's name. Study on top coal crushing mechanism and intelligent caving control in fully mechanized caving mining of thick coal seam [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [17] 梁鑫, 程海. 特厚煤层智能化综放开采技术与装备瓶颈综述[J]. 矿产勘查, 2021, 12(6): 1434-1440.
LIANG Xin, CHENG Hai. Summary of bottleneck of intelligent fully-mechanized caving mining technology and equipment for extra-thick coal seam [J]. mineral exploration, 2021, 12(6): 1434-1440.
- [18] 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]. Intelligent mine, 2024, 5(3): 7-11.
- [19] 张强. 神东上湾煤矿 8.8m 超大采高工作面安装技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
ZHANG Qiang. Research on installation technology of 8.8 m super-large mining height working face in Shendong Shangwan Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [20] 马冠超. 大海则特大型煤矿全矿井智能化关键技术与应用[J]. 智能矿山, 2024, 5(3): 39-43.
MA Guanchao. Key technology and application of intelligent whole mine in Dahanze super large coal mine [J]. Intelligent mine, 2024, 5(3): 39-43.
- [21] 郭奋超, 凌鹏涛, 强辉. 红柳林煤矿智能化生产经营管理体系建设研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(4): 59-64.
GUO Fenchao, LING Pengtao, QIANG Hui. Research on the construction of intelligent production and operation management system in Hongliulin Coal Mine [J]. Coal Economy Research, 2024, 44(4): 59-64.
- [22] 王国法, 庞义辉, 刘峰, 等. 智能化煤矿分类、分级评价指标体系[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 1-13.
WANG Guofa, PANG Yihui, LIU Feng, et al. Intelligent Coal Mine Classification and Grading Evaluation Index System [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 1-13.
- [23] 司宁, 苏传洋. 浅谈煤矿采煤机的自动化与智能化技术[J]. 中国设备工程, 2024(9): 48-50.
SI Ning, SU Chuanyang. Discussion on automation and intelligent technology of coal mine shearer [J]. China Equipment Engineering, 2024(9): 48-50.
- [24] 林壮. 大功率永磁变频一体机在煤矿的应用[J]. 煤矿机械, 2024, 45(3): 128-130.
LIN Zhuang. Application of high power permanent magnet variable frequency machine in coal mine [J]. Coal mine machinery, 2024, 45(3): 128-130.
- [25] 迟焕磊, 袁智, 胡登高, 等. 煤矿智能化工作面远程供电供液配套技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(S2): 146-152.
CHI Huanlei, YUAN Zhi, HU Denggao, et al. Remote power supply and liquid supply supporting technology for intelligent coal mine working face [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2): 146-152.
- [26] 王嘉伟, 王海军, 吴汉宇, 等. 基于三维地质建模技术的煤矿隐蔽致灾因素透明化研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(3): 71-81, 121.
WANG Jiawei, WANG Haijun, WU Hanning, et al. Research on Transparency of Hidden Disaster Factors in Coal Mines Based on 3D Geological Modeling Technology [J]. Industrial and Mining Automation, 2024, 50(3): 71-81, 121.
- [27] 董书宁, 刘再斌, 程建远, 等. 煤炭智能开采地质保障技术及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 21-31.
DONG Shuning, LIU Zaibin, CHENG Jianyuan, et al. Technologies and prospect of geological guarantee for intelligent coal mining [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 21-31.
- [28] 杜超恒. 基于惯导系统的综采工作面自动调直技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(23): 49-51.
DU Chaoheng. Automatic straightening technology for fully mechanized mining face based on inertial navigation system [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023(23): 49-51.
- [29] 李文俊. 基于惯导系统的综采工作面自动调直技术[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(4): 130-133, 146.
LI Wenjun. Automatic straightening technology for fully mechanized mining face based on inertial navigation system [J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(4): 130-133, 146.
- [30] 喻川. 基于 UWB 精确定位技术的掘进工作面人员接近防护系统[J]. 智能矿山, 2024, 5(2): 79-83.
YU Chuan. Personnel approach protection system for excavation working face based on UWB precise positioning technology [J]. Intelligent Mine, 2024, 5(2): 79-83.
- [31] 迟国铭, 郑铁华, 刘孝军, 等. 基于全景视频拼接的自适应截割智能化工作面无人开采技术及应用[J]. 智能矿山, 2024, 5(3): 59-63.
CHI Guoming, ZHENG Tiehua, LIU Xiaojun, et al. Adaptive Cutting Intelligent Working Face Unmanned Mining Technology and Application Based on Panoramic Video Splicing [J]. Intelligent Mining, 2024, 5(3): 59-63.
- [32] 王国法, 杜毅博. 德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. German Industry 4.0 and the Development of Intelligent Manufacturing of Coal Machinery Equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 1-9.
- [33] 张国恩, 严超超, 王毅颖. 矿鸿操作系统在智能化综采工作面的应用研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(3): 84-88.
ZHANG Guoen, YAN Chaochao, WANG Yiyang. Research on the Application of Mining Hong Operating System in Intelligent Comprehensive Mining Face [J]. Coal Engineering, 2023, 55(3): 84-88.