

文章编号: 1671-251X(2024)09-0020-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18211

综放工作面围岩控制与智能化放煤技术现状及展望

庞义辉¹, 关书方², 姜志刚², 白云³, 李鹏⁴

(1. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013; 2. 开滦(集团)有限责任公司, 河北 唐山 063000;
3. 中国信息通信研究院, 北京 100191; 4. 陕西彬长矿业集团有限公司, 陕西 咸阳 712046)

摘要: 分析了厚及特厚煤层智能化综放工作面围岩控制技术与智能化放顶煤技术发展现状及存在的问题, 从巷道围岩高效支护、工作面超前支护、坚硬特厚顶煤冒放性、液压支架位姿监测及智能化放顶煤5个方面提出了工程实际需求。针对综放工作面实现安全、高效、智能化开采存在的技术难题与工程需求, 对综放工作面围岩控制技术、智能化放煤技术进行了研究: 构建了坚硬特厚煤层顶煤悬臂梁力学模型, 研发了提高顶煤冒放性及放煤率关键技术, 实现了坚硬特厚煤层超大采高综放开采; 研发了单元式超前液压支架顶梁可旋转自复位装置, 实现了液压支架顶梁根据巷道顶板倾斜角度自动旋转支护, 有效提高了单元式超前液压支架对巷道顶底板的适应性; 提出了采用巷道支护液压支架替代传统锚网支护结构的思路, 具有支护效率高、成本低、节省工作面超前支护等优点; 开发了基于立柱与尾梁千斤顶行程的综放液压支架支护姿态监测装置与算法, 提高了液压支架支护姿态解算效率与精度; 提出了基于透明地质模型、煤量监测装置与煤矸识别装置融合的智能放煤控制方法, 可有效解决多夹矸层特厚顶煤智能化放煤技术难题。提出智能地质保障技术、机器视觉精准测量与智能感知技术、综放工作面设备智能精准自适应控制技术、综放工作面数字孪生技术等是智能化综放开采技术与装备的发展趋势。

关键词: 特厚煤层; 综放开采; 综放工作面; 围岩控制; 智能化放煤

中图分类号: TD823.49

文献标志码: A

Current status and prospects of surrounding rock control and intelligent coal drawing technology in fully mechanized caving face

PANG Yihui¹, GUAN Shufang², JIANG Zhigang², BAI Yun³, LI Peng⁴

(1. CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 2. Kailuan (Group) Limited Liability Corporation, Tangshan 063000, China; 3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China; 4. Shaanxi Binchang Mining Group Co., Ltd., Xianyang 712046, China)

Abstract: This paper analyzes the current status and existing issues in the control technology of surrounding rock and intelligent top coal caving technology for thick and ultra-thick coal seams in fully mechanized caving faces. The study focuses on five aspects: efficient support of roadway surrounding rock, advanced support of working faces, the caving behavior of hard ultra-thick top coal, hydraulic support position monitoring, and intelligent top coal caving. To tackle the technical challenges and engineering demands for safe, efficient, and intelligent caving mining, research was conducted on surrounding rock control technology and intelligent coal caving technology. A mechanical model for cantilever beams of hard ultra-thick top coal was developed, and key technologies to enhance caving characteristics and extraction rate of top coal were created, facilitating large-height caving mining of hard ultra-thick coal seams. A modular advanced hydraulic support with a rotating self-resetting

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-09-12; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274154); 宁夏回族自治区重点研发计划重大项目(2023BEE01002)。

作者简介: 庞义辉(1985—), 男, 河北定州人, 研究员, 主要从事综采工作面围岩控制与智能化开采技术装备研发工作, E-mail: pangyihui0909@163.com。

引用格式: 庞义辉, 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.



扫码移动阅读

device was developed, allowing the hydraulic support's beam to automatically rotate based on the inclination angle of the roadway roof, significantly improving its adaptability to the roof and floor of roadway. The idea of replacing traditional bolt-mesh support with hydraulic supports for roadway support was proposed, offering high support efficiency, low cost, and savings on advanced support. A monitoring device and algorithm for the support posture of fully mechanized caving hydraulic supports based on the stroke of the jacks of columns and tail beams were developed, enhancing calculation efficiency and accuracy. An intelligent coal drawing control method integrating transparent geological models, coal volume monitoring devices, and coal and gangue identification devices was proposed, effectively addressing the challenges of intelligent coal drawing from ultra-thick top coal with multi-gangue layers. The paper concludes that trends in intelligent fully mechanized caving mining technology and equipment include intelligent geological assurance technology, precise measurement and intelligent sensing via machine vision, adaptive control technology for fully mechanized caving mining equipment, and digital twin technology.

Key words: ultra-thick coal seam; fully mechanized caving mining; fully mechanized caving face; surrounding rock control; intelligent coal drawing

0 引言

长期以来,煤炭一直是保障我国能源安全稳定供给的压舱石与稳定器。2023年我国原煤产量达47.1亿t,进口煤炭4.74亿t,分别同比增长3.4%与61.8%^[1-2]。厚及特厚煤层的产量占比超过50%,因此,实现厚及特厚煤层智能、安全、高效开采是保障我国煤炭稳定供给的关键。

综采放顶煤开采方法是实现厚及特厚煤层安全高效开采的有效技术途径之一。我国自1982年首次引进综放开采技术装备以来,在综放工作面围岩稳定控制、提高顶煤冒放性、煤壁片帮防控、放煤工艺参数优化等方面取得了显著成效^[3-5],实现了综放开采技术装备由引进到自主研发再到出口的阶段性跨越。单个综放工作面年生产能力超过1500万t,但综放工作面仍然存在用人较多、工人劳动强度较大、自动化和智能化水平较低等问题,尤其是放煤工艺流程难以实现智能化,人工放煤不仅效率低、作业环境差,还极易发生欠放或过放等情况,导致煤炭资源回收率低且煤质难以保障^[6-7]。综放工作面放煤工艺流程智能化已经成为现阶段制约厚及特厚煤层实现安全高效开采的技术瓶颈。

针对综放工作面智能化放煤技术难题,国内外学者进行了深入研究,部分学者采用视频、音频、射线、超声波等传感技术^[8-12]对综放工作面后部刮板输送机上的煤矸进行识别,从而控制放煤口的关闭,在工程现场应用中取得了一定效果,但受制于井下综放工作面煤层厚度变化大、夹矸层多、高粉尘、低照度等复杂恶劣环境,智能化放煤仍难以实现常态化应用。本文从围岩控制、智能割煤、智能放煤等方

面分析了智能化综放开采技术发展现状及存在的问题,提出了智能化综放开采技术装备的发展趋势。

1 智能化综放开采技术难题与工程需求

我国综采放顶煤开采技术于1982年从国外引进,并针对国内煤层赋存条件进行了改进,1984年在沈阳焦煤股份有限公司蒲河煤矿特厚煤层进行实验^[13],但工程实践效果不佳。在充分吸收蒲河煤矿综放开采经验教训的基础上,于1984年在甘肃兰州窑街矿务局急倾斜特厚煤层首次成功实施了水平分段放顶煤开采,取得了较好的应用效果。此后逐渐将特厚煤层综放开采技术在国内进行了大范围推广应用^[14]。

经过四十余年的开采实践,综放工作面一次开采煤层厚度越来越大,如在鄂尔多斯市国源矿业开发有限责任公司龙王沟煤矿实现了近30m特厚煤层大采高综放开采;综放工作面的机采高度越来越大,如在兖矿能源金鸡滩煤矿实现了综放工作面最大机采高度6.5m,液压支架最大支撑高度达7.0m,单个工作面的年生产能力超过1500万t;综放液压支架的架型结构逐渐由四柱支撑掩护式向两柱掩护式发展,后部刮板输送机逐渐由端卸向交叉侧卸过渡,控制方式逐渐由手动控制向电液控制迈进。综放工作面智能化放煤的探索实践取得了一定应用效果,但仍然存在诸多不足,主要表现在以下方面。

1) 综放工作面普遍存在巷道掘进效率低、围岩控制效果差等问题,受顶煤厚度大、稳定性差等因素影响,需要布设较多锚杆、锚索,传统锚杆、锚索施工工艺复杂,施工效率低,且极易发生冒顶等安全事故,工程现场亟需开展巷道围岩安全高效控制技术

装备研发,提高巷道围岩控制与支护效率。

2) 综放工作面回采过程中需要进行超前支护,传统单体液压支柱支护方式存在支护效率低、工人劳动强度大、有效支护力低、支护效果差等问题,传统“两片式”结构的超前液压支架则存在整体顶梁面积大的问题,难以避开锚杆、锚索等主动支护结构,在移架过程中易对顶板锚杆、锚索及围岩结构造成破坏,极易导致围岩发生损伤破坏失稳,工程现场亟需开发对顶板无反复支撑破坏的高效支护装置。

3) 西部矿区浅埋深、坚硬、特厚煤层的顶煤冒放性差,传统综放开采技术与装备适应性差,导致煤炭资源回采率低,顶煤冒放结构与煤壁片帮机理不清晰,导致综放开采效果不理想。工程现场亟需揭示浅埋深、坚硬、特厚煤层顶煤冒放机理,优化综放工作面开采工艺参数,提高顶煤冒放性及放出效率。

4) 综放工作面前部基本实现了采煤机记忆截割、刮板输送机智能变频调速运输,但液压支架的支护姿态监测困难,难以对液压支架的支护状态进行智能调控。工程现场亟需研发综放液压支架支护姿态监测系统,对液压支架的支护姿态进行实时监测,为实现液压支架自适应控制提供决策支撑。

5) 由于受工作面煤层厚度变化、高粉尘、低照度等因素影响,综放工作面实现常态化智能放煤难度较大,传统综放工作面放煤过程主要依靠工人经验,即工人采用听声音或固定时间间隔等方式进行放煤,放煤效率低,极易发生过放或欠放。工程现场亟需研发综放工作面智能放煤技术装备,实现顶煤垮落放出的智能控制。

针对综放工作面实现安全、高效、智能化开采存在的技术难题与工程需求,笔者及研发团队对综放工作面围岩控制技术、智能化放煤技术进行了研究,为综放工作面实现安全、高效、智能化开采提供技术与经验借鉴。

2 综放工作面围岩控制技术

采场围岩稳定控制是实现综放工作面安全高效开采的基础,国内外学者针对综放工作面覆岩断裂结构及顶煤放出体结构进行了深入研究,提出了组合悬臂梁-铰接岩梁结构^[15]、“台阶岩梁”结构^[16]、“切落体”结构^[17]等,并基于顶煤冒放结构研究了煤岩分界线移动规律、放煤步距、放煤方式等^[18-21],对提高放顶煤开采效率、资源回采率、安全开采水平等具有重要意义,但对西部浅埋深、坚硬、特厚煤层顶煤冒放结构及提高资源回采率技术研究较少,相关技术亟待突破。

2.1 坚硬煤层顶煤冒放结构与冒放性

我国西部神府矿区赋存有大量埋深较浅、煤质坚硬、厚度较大的煤层,采用传统综放开采技术存在顶煤冒放性差、放出块度大、放煤效率低、回采率低等问题,如图 1 所示。



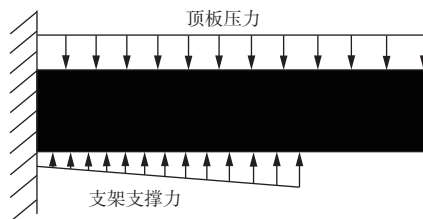
图 1 坚硬特厚煤层顶煤放出情况

Fig. 1 Caving of hard ultra-thick top coal

分析浅埋深、坚硬、特厚煤层赋存情况及顶煤冒放结构可知,由于煤层埋深较浅、顶煤硬度较大,传统综放开采技术在工作面前方形成的支承压力难以对顶煤造成破坏,液压支架上方顶煤仍然保持较好的完整状态,形成了悬臂梁结构,如图 2 所示。



(a) 液压支架上方顶煤



(b) 坚硬顶煤悬臂梁力学模型

图 2 坚硬特厚煤层顶煤冒放结构

Fig. 2 Caving structure for hard ultra-thick top coal

分析坚硬特厚煤层顶煤冒放结构发现,顶煤厚度越大、悬臂越短、顶板压力越小,则顶煤形成的悬臂梁结构越难发生断裂。因此,应采取措施减小顶煤厚度、增加悬臂梁长度、提高工作面前方的矿山压力。增加综放工作面采煤机的截割高度,不仅可减小支架上方顶煤厚度,增大超大采高综放支架的掩护梁长度,还可增大支架后方的悬臂梁长度;另外,机采高度增加还会导致综放工作面矿山压力显现更加剧烈,有利于提高支架上方顶煤压力,从而提高顶煤的冒放性。因此,针对浅埋深、坚硬、特厚煤层提出了超大采高综放开采技术。

顶煤的垮落放出不仅受矿山压力的影响,还受液压支架对顶煤反复支撑破坏的影响。通过实验及数值模拟分析发现,液压支架对顶煤的主动支护作用力(初撑力)可对顶煤产生一定破坏,且破坏深度与块度受初撑力大小与支撑次数的影响^[22],如图3所示。但液压支架对顶煤反复支撑造成顶煤破坏的深度一般不超过2 m,且支撑次数应大于4次。

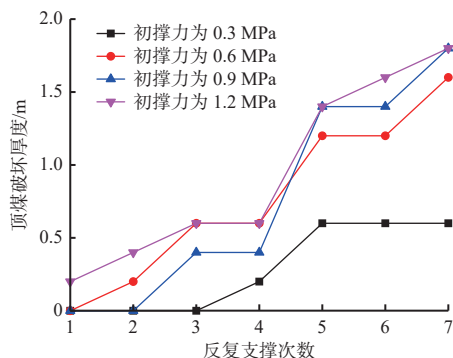


图3 液压支架初撑力与支撑次数对顶煤破坏深度的影响

Fig. 3 Influence of initial support force and support frequency on the destruction depth of top coal

基于上述理论研究成果,针对金鸡滩矿 2^{-2} 上坚硬特厚煤层研发了ZFY21000/35.5/70D型超大采高综放液压支架及配套装备^[23],采用超大采高综放开采技术,工作面采煤机最大割煤高度达6.5 m,有效提高了浅埋深、坚硬、特厚煤层的冒放性,工作面年生产能力超过1 500万t。

2.2 智能自适应支护超前液压支架

针对综放工作面超前支护区域采用单体液压支柱及“两片式”超前液压支架存在的问题,综放工作面逐渐发展应用单元式超前液压支架。由于巷道顶板与底板一般为非平行状态,即顶板相对底板一般存在一定夹角,导致单元式超前液压支架的顶梁难以接顶、单元式超前液压支架的有效支护力低、顶梁与立柱连接销轴易发生损坏等,如图4所示。

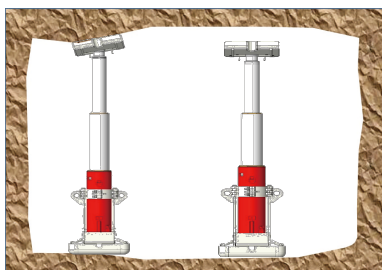


图4 单元式超前支架支护状态

Fig. 4 Support status of modular advanced support

针对上述问题,笔者研发了单元式超前液压支架顶梁可旋转自复位装置,如图5所示。当液压支架顶梁接触顶板岩层后,自复位装置可根据顶板岩层的倾斜情况自动发生旋转,促使支架顶梁与顶板

岩层充分接顶,从而提高单元式超前液压支架对顶板的有效支护作用力,同时避免支架顶梁与立柱的连接销轴发生折断。

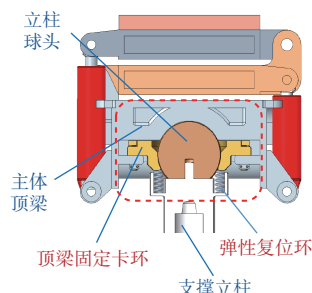


图5 单元式超前支架可旋转自复位装置

Fig. 5 Rotatable self-resetting device of modular advanced support

在支架顶梁与支撑立柱之间安装了顶梁固定卡环、弹性复位环,其中顶梁固定卡环可连接顶梁与立柱球头,防止二者发生脱离,弹性复位环保证支架顶梁在不受外力作用时保持与底座平行。当顶梁与顶板接触时,顶梁固定卡环压缩弹性复位环,使顶梁发生一定角度旋转,促使顶梁与顶板充分接触。当单元支架降架后,支架顶梁与顶板脱离,弹性复位环驱动顶梁固定卡环使单元支架的顶梁自动转正,防止由于单元支架顶梁歪斜导致倾倒事故。上述研究成果在国内部分矿区进行了推广应用,取得了较好的工程应用效果。

2.3 巷道快速掘进高效支护技术

由于综放工作面两侧巷道一般采用沿底掘进方式,巷道顶板强度较低、控制困难。为了提高巷道顶板的稳定性,需要在巷道顶板布置锚杆、锚索进行加强支护,部分锚索的长度达8~10 m,巷道掘进过程中施工工艺复杂,导致掘进效率低、支护难度大。

为了简化综放工作面巷道掘进支护工艺流程,笔者提出以巷道支护液压支架替代传统锚网支护工艺,即当掘进机掘进一段距离后,在掘进工作面安设巷道支护液压支架,如图6所示,用巷道支护液压支架替代传统的锚网支护工艺。

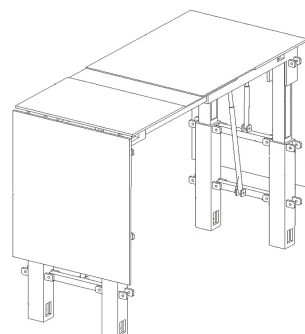


图6 巷道支护液压支架

Fig. 6 Hydraulic support for roadway

巷道支护液压支架可通过在掘进机上布设滑道进行运输,即掘进机新揭露巷道断面后,在掘进机上布设滑道,将巷道支护液压支架置于滑道上,通过滑道将巷道支护液压支架运输至新揭露的巷道断面处,对巷道顶板与巷帮煤壁进行支护,可有效解决传统锚杆、锚索支护方式存在的支护效率低、支护工艺复杂、护顶护帮效果差等问题。

综放工作面正常回采过程中,巷道支护液压支架可充当巷道超前液压支架,即不再需要重新布设超前液压支架,节省了超前液压支架布设时间与经费。工作面回采过后,可对巷道支护液压支架进行回收,以方便后续综放工作面重复使用。上述技术不仅节约了传统锚杆锚索支护时间与成本,而且对顶板与巷道的封闭式支护效果更好,同时减少了后续工作面超前支护工艺环节,通过重复利用可大幅降低巷道支护成本,具有显著的技术与经济优势。

3 综放工作面智能化放煤技术

智能化放煤技术主要涉及对液压支架支护状态的全面感知及基于煤矸识别的智能放煤控制。

3.1 综放液压支架位姿监测技术

综放液压支架位姿监测技术是实现综放工作面围岩自适应控制及智能化放煤的基础,传统液压支架位姿监测技术主要通过液压支架的结构参数及不同位置倾角传感器的监测值进行位姿解算。由于倾角传感器受井下环境因素影响较大,且掩护梁或连杆倾角较大时极易发生数据漂移,导致监测结果误差较大。另外,为了对液压支架顶梁前端的支护高度进行监测,一般还需要在液压支架顶梁安装 1 个测高传感器。上述传统监测技术存在传感器数量多、成本高、维护量大、数据处理困难等显著不足^[24-27]。

针对上述传统液压支架位姿监测技术存在的不足,提出了基于立柱与尾梁千斤顶行程的综放液压支架位姿及支护高度监测方法。通过对液压支架进行运动学分析,构建了液压支架主体结构骨架模型,将传统对液压支架主体结构的几何关系求解转变为对液压支架主要铰接点的坐标关系求解^[28],得出了液压支架支护姿态、支护高度求解的数学表达式。

综放液压支架的立柱、尾梁千斤顶行程值与液压支架的支护姿态存在单一的映射关系,通过提取综放液压支架的骨架结构模型,开发了基于牛顿-拉夫逊方法、弦割法、布罗伊登法的综放液压支架支护姿态与支护高度求解算法,实现了对综放液压支架顶梁、掩护梁、四连杆、尾梁相对于底座倾角的高效精准解算,同时可解算出液压支架顶梁前端的支

护高度,有效提高了解算效率与精度,为液压支架支护姿态、支护高度监测提供了新方法。

3.2 智能放煤控制方法

目前,制约综放工作面实现智能化的主要因素是如何准确判断液压支架放煤口的最佳开闭时间,现有技术主要依靠放煤过程中形成的经验(如通过监测放煤过程中产生的声音、放煤时间等差异)来进行控制^[29-30],部分学者尝试采用基于机器视觉的煤矸识别装置、振动感知装置等对煤矸界面进行识别^[31-32],但由于煤层厚度一般存在一定程度的变化,且顶煤放出过程一般会进行多次、多轮放煤,放煤口关闭时间难以准确把握,经常导致工作面欠放或多放,造成煤炭资源损失或煤炭含矸率较高,难以实现智能化放煤。

针对上述问题,笔者提出了基于工作面地质模型与煤量监测的智能放煤控制方法,主要步骤如下。

1) 在工作面运输巷、回风巷、切眼处向顶煤进行钻探打孔,将运输巷中线与切眼中线交叉点作为坐标原点,运输巷中线的长轴为 x 轴,切眼中线的长轴为 y 轴,与水平面垂直方向为 z 轴,建立工作面地质模型坐标系。

2) 根据顶煤钻孔获得的顶煤厚度信息,采用差值计算方法建立工作面顶煤厚度变化的三维地质模型,基于三维地质模型信息,采用离散元数值模拟方法建立顶煤垮落过程的数值计算模型,三维地质模型与数值计算模型的坐标系均采用工作面地质模型坐标系。

3) 在采煤机机身中部位置安装地质雷达装置,在液压支架的尾梁上安装煤量扫描装置与煤矸图像识别装置。

4) 在采煤机割煤移动过程中,利用地质雷达装置对顶煤与顶板岩层分界面进行探测,根据探测结果对三维地质模型与数值计算模型进行超前修正。

5) 采煤机完成割煤后,开启液压支架的放煤口进行放煤。利用修正后的数值计算模型对液压支架上方的顶煤垮落体形态与顶煤放出量进行模拟分析,然后利用煤量扫描装置扫描确定刮板输送机上的煤流量。

6) 当煤量扫描装置扫描到的顶煤放出量达到数值计算模型模拟确定的顶煤放出量的 80% 时,启动煤矸图像识别装置对刮板输送机上的煤流进行煤矸识别。若煤矸图像识别装置检测到煤流中混有大量矸石,则关闭放煤口。

7) 当煤量扫描装置扫描到的顶煤放出量达到数值计算模型模拟确定的顶煤放出量时,无论是否检

测到煤流中混有大量矸石,均关闭放煤口。

上述智能放煤控制方法将透明地质、煤量监测、煤矸识别技术进行融合,利用地质雷达对工作面上方较完整的顶煤与顶板岩层界面进行识别,基于识别结果对三维地质模型与数值计算模型进行实时修正,利用离散元数值计算模型模拟顶煤放出量,采用煤量扫描装置确定顶煤实际放出煤量,辅助采用煤矸图像识别装置对放出体进行智能识别,从而确定最佳放煤口关闭时间,有效解决了现有技术与装备难以确定综放工作面放煤口最佳关闭时间的问题,为实现综采放顶煤工作面智能化、无人化开采提供了一种有效的技术途径。

4 结语与展望

综放工作面围岩控制与智能化放煤是实现厚及特厚煤层安全高效开采的关键,随着我国煤炭开发战略重心西移,西部矿区厚及特厚煤层的产量及开发强度将进一步增强,智能化综放开采技术的需求将进一步增大。基于我国智能化综放开采技术现状、存在的问题及工程技术需求,提出了未来我国智能化综放开采技术与装备的发展趋势:

1) 我国西部矿区赋存有大量特厚煤层,存在地质条件复杂、围岩控制难度大、地质灾害突出等问题,亟需对大采高综放工作面采动应力演化规律、覆岩断裂结构、顶煤冒放结构、煤壁片帮防控机理、近距离多煤层综放开采技术、煤柱留设尺寸、综合防灾治灾技术等系统进行研究,保障综放工作面实现安全高效开采。

2) 智能地质保障技术。智能地质保障技术是实现综放工作面安全高效开采的基础,虽然近年来提出了“透明地质”技术,但受地质探测技术装备探测精度限制,目前还很难实现地质透明。因此,亟需开发智能地质保障技术,为综放工作面灾害超前预测预警、超前治理及智能化开采奠定基础。

3) 机器视觉精准测量与智能感知技术。综放工作面前部需要实现采煤机智能截割,因此需要对工作面液压支架的位姿、护帮板伸缩状态、煤壁等进行精准测量感知,开发工作面视频拼接技术,以及基于机器视觉的空间位姿智能感知技术,为综放工作面实现常态化智能开采提供技术支撑。

4) 综放工作面设备智能精准自适应控制技术。研发适用于井下复杂恶劣作业环境的精准控制装备,实现采煤机自适应截割、液压支架智能自适应支护、刮板输送机智能调速运输、顶煤智能高效放煤。

5) 综放工作面数字孪生技术。基于高精度地质

模型、综放工作面装备模型及围岩损伤破坏机理模型,构建综放工作面数字孪生模型,充分结合5G+VR/AR等技术,研发综放工作面智能人机交互模式及远程控制方法,实现综放工作面智能化开采技术常态化无人/少人运行。

参考文献(References):

- [1] 孙宝东,滕霄云,张帆,等. 2024 年中国能源供需形势研判[J]. 中国煤炭, 2024, 50(4): 20-26.
SUN Baodong, TENG Xiaoyun, ZHANG Fan, et al. Research on China's energy supply and demand situation in 2024[J]. China Coal, 2024, 50(4): 20-26.
- [2] 陈延安,龚大勇. 2024 年煤炭价格走势预测及区域特点[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(3): 55-59.
CHEN Yan'an, GONG Dayong. Prediction of coal price trends and regional characteristics in 2024[J]. Coal Economic Research, 2024, 44(3): 55-59.
- [3] 钱鸣高,许家林,王家臣,等. 矿山压力与岩层控制[M]. 3 版. 徐州:中国矿业大学出版社, 2021.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen, et al. Mine pressure and strata control[M]. 3rd ed. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2021.
- [4] 樊运策,毛德兵. 缓倾斜特厚煤层综放开采合理开采厚度的确定[J]. 煤矿开采, 2009(2): 3-4, 38.
FAN Yunce, MAO Debing. Reasonable mining height of full-mechanized caving mining in softly inclined and extra-thick coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2009(2): 3-4, 38.
- [5] 王家臣,刘云熹,李杨,等. 矿业系统工程 60 年发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 261-279.
WANG Jiachen, LIU Yunxi, LI Yang, et al. 60 years development and prospect of mining systems engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 261-279.
- [6] 杨秀宇,刘帅,刘清,等. 智能化综放工作面顶煤厚度探测方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 79-83, 123.
YANG Xiuyu, LIU Shuai, LIU Qing, et al. Top coal thickness detection method for intelligent fully-mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 79-83, 123.
- [7] 张守祥,张学亮,刘帅,等. 智能化放顶煤开采的精确放煤控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2008-2020.
ZHANG Shouxian, ZHANG Xueliang, LIU Shuai, et al. Intelligent precise control technology of fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2008-2020.
- [8] 李庆元,杨艺,李化敏,等. 基于 Q-learning 模型的智能化放顶煤控制策略[J]. 工矿自动化, 2020, 46(1): 72-79.
LI Qingyuan, YANG Yi, LI Huamin, et al. Intelligent control strategy for top coal caving based on Q-learning

- model[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(1): 72-79.
- [9] 张彩峰. 塔山煤矿综采放顶煤工作面智能化开采技术的探讨及应用[J]. *煤矿机电*, 2018, 39(2): 68-73.
ZHANG Caifeng. Study and application of intelligent mining technology for fully mechanized caving top coal working face in Tashan Coal Mine[J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2018, 39(2): 68-73.
- [10] 李富强, 李昕. 放顶煤工艺中声学场景识别研究[J]. *中国煤炭*, 2023, 49(2): 82-88.
LI Fuqiang, LI Xin. Research on acoustic scene recognition in top-coal caving process[J]. *China Coal*, 2023, 49(2): 82-88.
- [11] 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.
- [12] 郭喜仓, 张学亮, 阮进林, 等. 保德煤矿智能综放工作面建设关键技术研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(2): 141-148.
WU Xicang, ZHANG Xueliang, RUAN Jinlin, et al. Research on key technology of intelligent fully mechanized caving face construction in Baode Coal Mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(2): 141-148.
- [13] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 7-39.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 7-39.
- [14] 王国法, 庞义辉, 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.
- [15] 闫少宏, 尹希文, 许红杰, 等. 大采高综采顶板短悬臂梁-铰接岩梁结构与支架工作阻力的确定[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(11): 1816-1820.
YAN Shaohong, YIN Xiwen, XU Hongjie, et al. Roof structure of short cantilever-articulated rock beam and calculation of support resistance in full-mechanized face with large mining height[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(11): 1816-1820.
- [16] 侯忠杰. 对浅埋煤层“短砌体梁”、“台阶岩梁”结构与砌体梁理论的商榷[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(11): 1201-1204.
HOU Zhongjie. Concept of both short voussoir beam and step beam in shallow seam and voussoir beam theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(11): 1201-1204.
- [17] 尹希文. 浅埋超大采高工作面覆岩“切落体”结构模型及应用[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 1961-1970.
YIN Xiwen. Cutting block structure model of overburden with shallow buried coal seam and ultra-large mining height working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1961-1970.
- [18] 谢德瑜. 急倾斜三软煤层综放采场覆岩移动与顶煤放出规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
XIE Deyu. Study on overlying strata movement and top coal caving law in fully mechanized top coal caving face in steep three-soft coal seam[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2016.
- [19] 王家臣, 张锦旺, 陈祎. 基于 BBR 体系的提高综放开采顶煤采出率工艺研究[J]. *矿业科学学报*, 2016, 1(1): 38-48.
WANG Jiachen, ZHANG Jinwang, CHEN Yi. Research on technology of improving top-coal recovery in longwall top-coal caving mining based on BBR system[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 1(1): 38-48.
- [20] 白庆升, 屠世浩, 王沉. 顶煤成拱机理的数值模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(2): 208-213.
BAI Qingsheng, TU Shihao, WANG Chen. Numerical simulation on top-coal arching mechanism[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(2): 208-213.
- [21] 黄炳香, 刘长友, 程庆迎. 低位综放开采顶煤放出率与含矸率的关系[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(8): 789-793.
HUANG Bingxiang, LIU Changyou, CHENG Qingying. Relation between top-coal drawing ratio and refuse content for fully mechanized top coal carving[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(8): 789-793.
- [22] 庞义辉, 王国法. 坚硬特厚煤层顶煤冒放结构及提高采出率技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 817-824.
PANG Yihui, WANG Guofa. Top-coal caving structure and technology for increasing recovery rate at extra-thick hard coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 817-824.
- [23] 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.
- [24] 庞义辉. 液压支架支护状态感知与数据处理技术[J].

- 工矿自动化, 2021, 47(11): 66-73.
- PANG Yihui. Support state perception and data processing technology of hydraulic support[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(11): 66-73.
- [25] 万丽荣, 陈博, 杨扬, 等. 单颗粒煤岩冲击放顶煤液压支架尾梁动态响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2905-2913.
- WAN Lirong, CHEN Bo, YANG Yang, et al. Dynamic response of single coal-rock impacting tail beam of top coal caving hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2905-2913.
- [26] 宋庆军, 肖兴明, 张天顺, 等. 基于声波的放顶煤过程自动控制系统[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(11): 3123-3127.
- SONG Qingjun, XIAO Xingming, ZHANG Tianshun, et al. Automatic control systems in top-coal caving based on acoustic wave[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(11): 3123-3127.
- [27] 王昕. 基于电磁波技术的煤岩识别方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- WANG Xin. Research on coal and rock identification method based on electromagnetic wave technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [28] 庞义辉, 刘新华, 王泓博, 等. 基于千斤顶行程驱动的液压支架支护姿态与高度解析方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(6): 1231-1242.
- PANG Yihui, LIU Xinhua, WANG Hongbo, et al. Support attitude and height analysis method of hydraulic support based on jack stroke drive[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6): 1231-1242.
- [29] 许永祥, 王国法, 张传昌, 等. 特厚坚硬煤层超大采高综放开采合理采高研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 715-722.
- XU Yongxiang, WANG Guofa, ZHANG Chuanchang, et al. Investigation and practice of the reasonable cutting height at longwall top coal caving face with super-large mining height in hard and extra-thick coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 715-722.
- [30] 王家臣, 杨胜利, 刘淑琴, 等. 急倾斜煤层开采技术现状与流态化开采构想[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 48-59.
- WANG Jiachen, YANG Shengli, LIU Shuqin, et al. Technology status and fluidized mining conception for steeply inclined coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 48-59.
- [31] 张锦旺, 何庚, 王家臣. 不同混合度下液体介入难辨别煤矸红外图像识别准确率[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1370-1381.
- ZHANG Jinwang, HE Geng, WANG Jiachen. Coal/gangue recognition accuracy based on infrared image with liquid intervention under different mixing degree[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1370-1381.
- [32] 王家臣, 潘卫东, 张国英, 等. 图像识别智能放煤技术原理与应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 87-101.
- WANG Jiachen, PAN Weidong, ZHANG Guoying, et al. Principles and applications of image-based recognition of withdrawn coal and intelligent control of draw opening in longwall top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 87-101.
- 核地质科学, 2023, 40(4): 1002-1008.
- WANG Junhu, WU Ding, GUO Bangjie, et al. A new smoothness function for temperature and emissivity separation of rocks at different temperature states[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(4): 1002-1008.
- [22] 周维卫, 传秀云, 王时麒. 营口蛇纹石玉红外发射功能及其影响因素[J]. 矿物学报, 2011, 31(4): 750-756.
- ZHOU Weiwei, CHUAN Xiuyun, WANG Shiqi. Infrared emission function and its influencing factors of Yingkou Serpentine Jade[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(4): 750-756.
- [23] 李文军, 徐永达, 郑永军. 红外热像仪与表面热电偶测量发射率的匹配法[J]. 中国测试, 2017, 43(6): 12-15.
- LI Wenjun, XU Yongda, ZHENG Yongjun. Match method of emissivity measurement based on infrared thermal imager and surface thermometer[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(6): 12-15.

(上接第 19 页)

- [19] 吴宇颂, 田博宇, 李辉, 等. 半球向全发射率测量实验教学系统设计与开发[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(1): 165-170.
- WU Yusong, TIAN Boyu, LI Hui, et al. Design and development of an experimental teaching system for measuring hemispherical total emissivity[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(1): 165-170.
- [20] 沈久利, 张玉存. 不同发射率下红外热图像的非稳态温度场测量研究[J]. 计量学报, 2019, 40(5): 810-815.
- SHEN Jiuli, ZHANG Yucun. Study on non-steady temperature field measurement of infrared thermal image under different emissivity[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(5): 810-815.
- [21] 王俊虎, 武鼎, 郭帮杰, 等. 一种新的适用于不同温度状态下岩石温度与发射率分离的平滑度函数[J]. 世界