

“特厚煤层超大采高开采技术与装备”专题

特厚煤层 10 m 超大采高综采关键技术及装备

康红普^{1,2}, 雷亚军⁴, 赵福堂⁵, 徐刚^{1,2}, 李增林⁴, 李明忠³, 王锐⁴, 黄志增^{1,2}, 刘江斌⁴,
马英^{1,2}, 韩存地⁴, 冯彦军^{1,2}, 张震^{1,2}, 张金虎^{1,2}, 任建超⁴, 宋业杰^{1,2}, 曾明胜^{1,2}, 程利兴^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 3. 北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399; 4. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000; 5. 陕西煤业化工集团有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 超大采高综采技术是我国 6~10 m 特厚煤层实现高产、高效、高回收率开采的有效途径。在分析国内超大采高综采技术及装备研究现状的基础上, 围绕陕煤集团曹家滩煤矿 10 m 特厚煤层超大采高工作面开采地质条件, 从超大采高采场围岩控制、关键开采装备、智能协同控制 3 个方面分析了存在的难题, 并提出了解决路径。经过 5 a 的技术攻关, 取得一系列创新成果: ① 提出“主动强力支撑与防护+区域压裂弱化卸压”的支-卸协同超大采高工作面围岩控制策略, 研发出 5 m³/min 大流量井下水力压裂成套技术与设备, 实现了超大采高工作面强矿压的有效防控。② 研发出 10 m 超大采高强力液压支架, 创新设计了“双层伸缩梁+三级护帮”机构, 实现了超大采高工作面顶板和超高煤壁的安全防控; 采煤机分区润滑与分布式冷却方案提高了大仰角长摇臂采煤机截割可靠性; 高可靠中部槽、下链道悬链及慢变动力启动提高了超大运量刮板输送机对超大采高工作面煤流运输的适应性。系统集成世界首套特厚煤层 10 m 超大采高综采成套装备。③ 提出 10 m 超大采高液压支架运行状态智能控制策略, 采煤机自动控制策略, 通过应用粗糙神经网络技术, 构建了超大采高采煤机与刮板输送机的协调控制系统。形成了超大采高重型开采装备群智能控制模式及控制逻辑。④ 构建了基于“微震-岩层移动-应力-水文”的超大采高工作面多场多参量协同监测融合分析系统, 实现了工作面覆岩破坏、地表移动变形、地下水流场和矿压显现间的多元异构数据融合分析。研究成果在曹家滩煤矿得到成功应用, 实现了 10 m 特厚煤层高产、高效、高回收率开采, 取得了显著经济效益, 引领了国内外特厚煤层高效智能开采技术的发展方向。

关键词: 特厚煤层; 10 m 超大采高; 围岩控制; 支-卸协同; 关键开采装备; 智能控制; 多参量监测

中图分类号: TP028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-1849-27

Key technology and equipment for fully mechanized mining with extra-large shearing height of 10 m in extra-thick coal seam

KANG Hongpu^{1,2}, LEI Yajun⁴, ZHAO Futang⁵, XU Gang^{1,2}, LI Zenglin⁴, LI Mingzhong³, WANG Rui⁴,
HUANG Zhizeng^{1,2}, LIU Jiangbin⁴, MA Ying^{1,2}, HAN Cundi⁴, FENG Yanjun^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, ZHANG Jinhu^{1,2},
REN Jianchao⁴, SONG Yejie^{1,2}, ZENG Mingsheng^{1,2}, CHENG Lixing^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 4. Caojiatan Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Yulin 719000, China; 5. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

收稿日期: 2024-12-27 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1617

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907501, 2023YFC2907502, 2023YFC2907505)

作者简介: 康红普 (1965—), 男, 山西忻州人, 中国工程院院士, 博士生导师, 博士。E-mail: kanghp@163.com

引用格式: 康红普, 雷亚军, 赵福堂, 等. 特厚煤层 10 m 超大采高综采关键技术及装备[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 1849-1875.

KANG Hongpu, LEI Yajun, ZHAO Futang, et al. Key technology and equipment for fully mechanized mining with extra-large shearing height of 10 m in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 1849-1875.



移动阅读

Abstract: Fully mechanized mining technology with extra-large shearing height is the optimal technical approach to achieve high-yield, high-efficiency and high-recovery mining for 6–10 m ultra-thick coal seam in Chinese coal mines. Based on the analysis of the current status of fully mechanized mining technology and equipment with extra-large shearing height at home, focusing on the geological condition of fully mechanized working face with ultra-large shearing height of 10 m in extra-thick coal seam in the Caojiatan Coal Mine, Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., the existing technical problems were analyzed and the associated solutions were given from three aspects: surrounding rock control, key mining equipment and intelligent collaborative control. After nearly five years of scientific research, a series of innovative achievements have been achieved: ① The surrounding rock control strategy with coordination of support and destressing for ultra-large shearing height working faces, namely “active strong support and protection + regional hydraulic fracturing weakening and stress relief”, was proposed, a complete set of underground hydraulic fracturing technology and equipment with large flow of 5 m³/min was developed. Effective prevention and control of strong mining-induced activities in ultra-large shearing height working face has been realized. ② The strong hydraulic shields with ultra-large shearing height of 10 m were developed, and the “double-layer telescopic beam + three-level side guard” mechanism was innovatively designed to achieve safe protection of working face roof and ultra-high coal wall; the zoned lubrication and distributed cooling scheme improves the cutting reliability of the shearer with large angle of elevation and long rocker; the high-reliability middle trough, lower chain catenary and slow-changing power start-up improve the adaptability of the ultra-large capacity scraper conveyor to the coal flow transportation of the working face with ultra-large shearing height. The systematic integration has formed the global first set of comprehensive mining equipment with extra-large shearing height of 10 m. ③ An innovative intelligent control strategy for the operation status of the hydraulic shields with 10 m ultra-large shearing height, and the automatic control strategy for the shearer were proposed. A coordinated control system for the shearer with ultra-large shearing height and the scraper conveyor was constructed by applying the rough neural network technology. An intelligent control mode and control logic for heavy equipment groups with ultra-large shearing height were formed. ④ A multi-field and multi-parameter collaborative monitoring and integrated analysis system for the working face with ultra-large shearing height based on “microseism-rock movement-stress-hydrology” was constructed, realizing the multivariate heterogeneous data integrated analysis among damage of overburden rock above working face, surface movement and deformation, groundwater flow field and mining-induced activities. The research results were successfully applied in the in Caojiatan Coal Mine, achieving high-yield, high-efficiency and high-recovery mining in 10 m ultra-thick coal seam, getting significant economic benefits, and leading the development direction of high-efficiency and intelligent mining for extra-thick coal seam at home and abroad.

Key words: extra thick coal seam; extra-large shearing height of 10 m; surrounding rock control; coordination with support and destressing; key mining equipment; intelligent control; multi-parameter monitoring

0 前 言

2024 年我国煤炭产量达 47.8 亿 t, 其中晋陕蒙新占 81.7%^[1]。陕西榆林与内蒙古鄂尔多斯地区产量约占 30.1%, 对于保障我国煤炭供应与能源安全尤为重要。厚及特厚煤层是我国煤矿高产高效开采的主体煤层, 储量占 45% 以上。8 m 以上的特厚煤层分布广泛, 尤其在我国西部煤炭主产区, 特厚煤层储量丰富。目前, 我国千万吨矿井有 81 处, 90% 以上在西部, 且矿井的主采煤层多为厚及特厚煤层。

8~10 m 特厚煤层有 3 种开采工艺: 分层综采、综放开采及一次采全高综采, 3 种开采工艺在条件适宜的矿井均取得了较好的技术经济效益, 但还存在不

少问题。分层开采存在层位难控制、采掘接续紧张, 下分层开采时顶板、水、火等安全隐患大等问题; 综放开采对于煤厚的变化适应性较好, 但是回采率的提高是以增加含矸率为代价, 含矸率的增加对于煤质、分选压力 and 环境保护产生较大影响, 尤其当煤层硬度较大时, 综放开采的低回收率、高含矸率问题将更加突出; 一次采全高综采工艺简单、煤质易控制, 近 10 a 来我国大采高综采不断取得新的突破^[2-6]。兖矿金鸡滩煤矿开发出支架高度 8.2 m 的超大采高综采技术与装备, 神东上湾煤矿又将支架高度提高到 8.8 m, 实现了 8 m 左右煤层的高效开采。但对于 10 m 特厚煤层, 目前的技术与装备还不能满足高效、高回收率开采的要求。

榆神矿区建有我国最大规模千万吨级矿井群,其储量丰富、煤层稳定、煤质优良、地质构造简单、开采技术条件优越。矿区探明普查地质储量 301.7 亿 t,主采煤层 2-2 煤平均厚度在 10 m 左右,是该矿区最主要的可采煤层。据统计,榆神矿区煤层厚度在 8~10 m 内煤层储量约 120 亿 t,其中陕煤集团曹家滩煤矿约 15 亿 t,煤层硬度系数在 2~3 间,属于坚硬特厚煤层。目前,曹家滩煤矿采用大采高综采放顶煤开采工艺,由于煤层坚硬,导致顶煤冒放性较差,回收率低、含矸率高。为了解决这些问题,2019 年陕煤集团提出特厚煤层 10 m 超大采高开采技术需求,并在曹家滩煤矿进行试验与应用。2020 年陕煤集团将“特厚煤层 10 m 超大采高综采关键技术及装备”列为重大项目,设置开采工艺、岩层控制、开采装备、智能控制及综合监测等 7 个课题,联合中国煤炭科工集团、天地科技股份有限公司、郑州煤矿机械公司、西安煤矿机械有限公司等进行集中攻关。经过近 5 a 的研究与试验,建成了世界首个特厚煤层 10 m 超大采高综采工作面,各项技术经济指标达到国际领先水平,实现了 10 m 特厚煤层高产、高效、高回收率开采,引领了国内外特厚煤层智能高效开采技术的发展方向,推动了煤炭开

采高端装备制造的进步。

笔者对该项目进行详细介绍,包括 10 m 超大采高工作面地质条件,超大采高开采面临的技术难点,围岩控制技术,开采装备,智能控制系统,井下试验与应用情况。

1 超大采高开采技术及装备现状

本文将截煤高度达到 6 m 及以上的工作面定义为超大采高工作面。国外于 20 世纪 60 年代开始开发大采高开采装备,受开采工艺及条件影响,装备适应能力基本在 6 m 采高以下^[7-8]。我国超大采高工作面开采始于 2007 年^[9-12],在该年神东上湾煤矿建成了世界首个 6.3 m 超大采高综采工作面。2009—2013 年研发了 7 m 超大采高综采成套技术与装备,在陕煤集团红柳林煤矿得到成功应用,综采工作面年产达到 1 200 万 t。之后,神东补连塔煤矿建成 8.0 m 超大采高综采工作面。2015 年在兖矿金鸡滩煤矿研发应用了 8.2 m 超大采高综采成套技术与装备,工作面年产量突破 1 500 万 t。2018 年,神东上湾煤矿建成 8.8 m 超大采高综采工作面,生产能力达到 1 600 万 t/a。表 1 为我国主要的超大采高综采工作面矿井分布情况。

表 1 我国主要超大采高综采工作面

Table 1 Main fully mechanized working faces with extra-large shearing height in China

支架最大高度/m	所在矿区(矿井)
8.8	神东上湾矿
8.2	兖矿金鸡滩矿
8.0	神东补连塔矿
7.2	潞安王庄矿, 陕煤红柳林矿, 中煤新集口孜东矿
7.0	神东(上湾矿、大柳塔矿、补连塔矿), 国神三道沟矿, 曹家滩矿
6.5	阳泉(一矿), 邢台矿(东庞矿), 焦作(赵固二矿)
6.3	神东(上湾矿、大柳塔矿、柳塔矿、补连塔矿, 布尔台矿), 陕煤(红柳林矿、张家峁矿), 宁煤(羊场湾矿), 淮北(许疃矿)
6.2	晋城(寺河矿、长平矿、成庄矿、赵庄矿), 阳泉(新元矿)

超大采高工作面开采装备,包括液压支架、采煤机及刮板输送机等,是工作面实现高产高效的关键。我国液压支架经过 50 多年的引进、消化吸收、发展创新等阶段,自 21 世纪初开始研发 5~6 m 大采高综采装备,并在此基础上开启了国产煤机装备蓬勃发展新阶段。先后研制成功 6、7 及 8 m 级的一系列超大采高液压支架^[13-17]。如 2009 年神东补连塔煤矿使用的 ZY16800/32/70D 型液压支架,立柱缸径 500 mm,支架中心距由原来的 1.75 m 增加到 2.05 m,提高了支架的稳定性。ZY21000/38/82D、ZY26000/40/88D 等 8 m 级超大采高液压支架的成功研发,进一步提高了工作

面采高^[18]。随采高增加,超大采高液压支架需要提供对应的超大开采空间支护、超高煤壁防护方法及装置,而在工作阻力和支撑高度增大的同时,对液压支架自身结构强度、立柱抗冲击能力、支架稳定性、可靠性、智能感知与控制等多方面也提出了更高要求,同时由于体量增加造成的安装、运输难题,进一步限制了液压支架支护性能的提升。

国内开展超大采高采煤机的研发比较早,但前期在采煤机可靠性及系统稳定性等方面存在较多问题,超大采高工作面大多采用国外的采煤机。2018 年,神东上湾煤矿采用中国煤炭科工集团上海研究院的

MG1100/2925-WD 型采煤机及西安煤矿机械有限公司的 MG1000/2800-GWD 型采煤机,将工作面截煤高度提升至 8.6 m,但这 2 种机型都是对国外采煤机的升级改造。2019 年,国内自主研发的采煤机最大采高突破 8.8 m,包括上海研究院研制的 MG1100/3050-WD 型采煤机、西安煤矿机械有限公司研制的 MG1100/3030-GWD 型采煤机,解决了原来改造进口采煤机技术参数匹配差、性能弱、自动化功能不足等问题,在井下应用效果良好,确立了国产采煤机在特厚煤层开采中的领先地位^[19-20]。但一次截煤高度的增加,意味着采煤机摇臂加长、滚筒质量增加,而随之带来机身稳定性下降、传动机构润滑与冷却困难、行走系统高承载可靠性低、智能化程度不足等难题,因此 8 m 以上采高采煤机亟需克服整机稳定性问题、长摇臂在大仰角状态下润滑与冷却问题、机身过重问题、关键零部件高性能新材料的开发等多重难题。

近几年,综采工作面运输装备发展迅速,特别是重型刮板输送机得到了突飞猛进的发展。目前,宁夏天地奔牛实业集团有限公司、中煤张家口煤矿机械有限责任公司、江苏天明机械集团有限公司等国内主要制造商都具备生产 8.8 m 及以下一次采全高成套刮板输送设备的能力,输送能力达 6 500 t/h,装机功率 $3 \times 1\,600$ kW,中部槽槽宽 1 400 mm^[21]。超大采高条件下,刮板运输装备需要进一步适应重载启动、零部件磨损

加重、大块煤垮落造成的运输载荷突变及煤流转运等工况。因此超大采高条件下运量的进一步提升,要求运输装备提高复杂工况下的可靠性和使用寿命的同时,具备高适应性启动、链条自动张紧、多电机协同等智能化功能。

总之,随着特厚煤层采煤技术的快速发展,国内超大采高综采技术与装备取得诸多突破,装备结构与技术参数不断完善,形成系列化和成套化产品,促进了我国高端煤机制造的创新与发展。但是如何保障 10 m 超大采高工作面围岩的有效控制,实现工作面超大、超重装备突破和智能化协同控制,仍存在诸多难题。

2 10 m 超大采高开采关键技术难题及解决路径

2.1 10 m 超大采高工作面开采地质条件

2.1.1 工作面概况

10 m 超大综采试验点选在曹家滩煤矿 122104 工作面。曹家滩煤矿主采 2-2 煤层,分东、西翼开采,122104 超大采高工作面位于 12 盘区东翼,北侧为未开采的实体煤,南侧为 122106 采空区,工作面布置如图 1 所示。工作面长度 300 m,推进长度 5 977 m,可采储量约 23.5 Mt。

工作面煤层埋藏深度 268~356 m,可采厚度

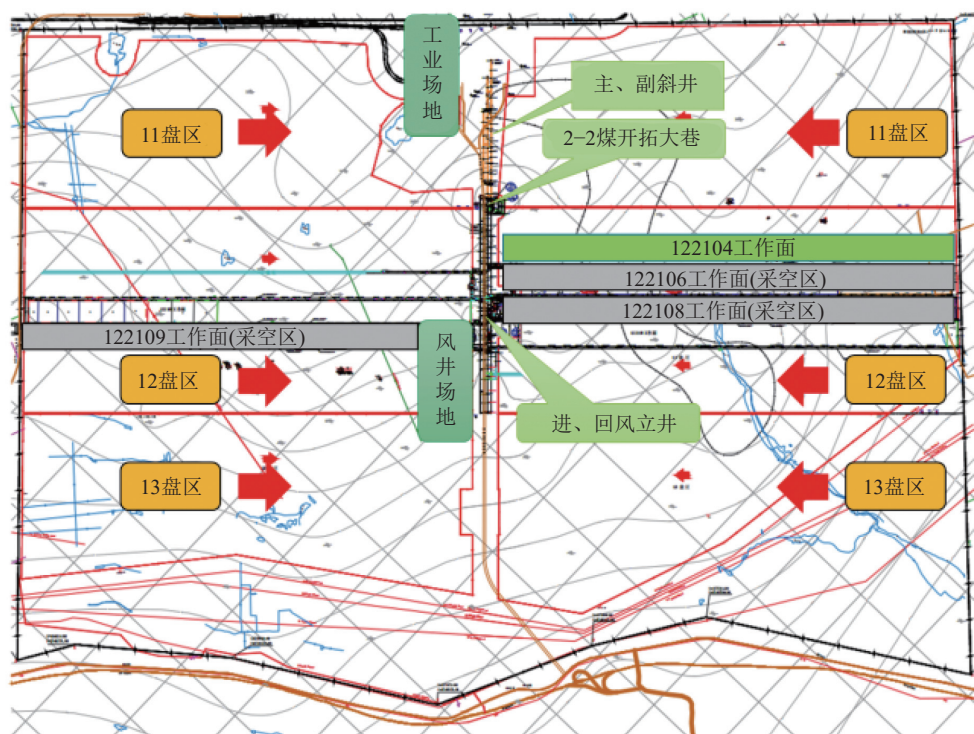


图 1 10 m 超大采高工作面布置

Fig.1 Layout of working face with 10 m extra large shear height

7.2~12.3 m, 平均 10.5 m。图 2 为超大采高工作面煤层厚度变化, 可知工作面煤层厚度自开切眼向终采线方向, 整体呈增厚趋势。煤层倾角 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$, 煤层硬度

系数 2~3。煤层直接顶主要为粉砂岩、中粒砂岩, 直接顶上方 100 m 范围内赋存有多层厚度为 10~30 m 的砂岩顶板, 层理不发育。

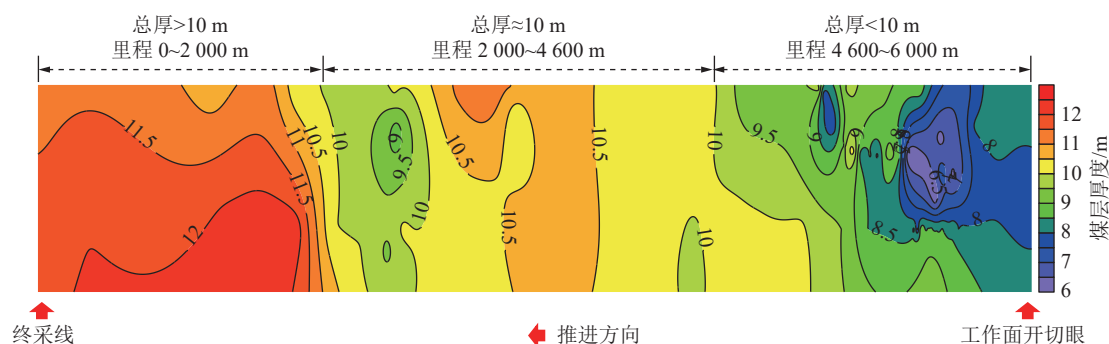


图 2 10 m 超大采高工作面煤层厚度变化趋势

Fig.2 Change trend of coal seam thickness in working face with 10 m extra-large shearing height

2.1.2 多层厚硬顶板赋存特征

为全面掌握曹家滩煤矿 10 m 超大采高工作面多层厚硬顶板岩层赋存状态, 采用井下巷道围岩强度触探测定装置及电子钻孔窥视仪^[22-24], 在工作面辅助运

输巷及回风巷布置探测孔 22 个, 对工作面煤层上方 100 m 范围内顶板岩层强度及节理裂隙情况进行了全方位测试。

探测孔布置如图 3 所示。

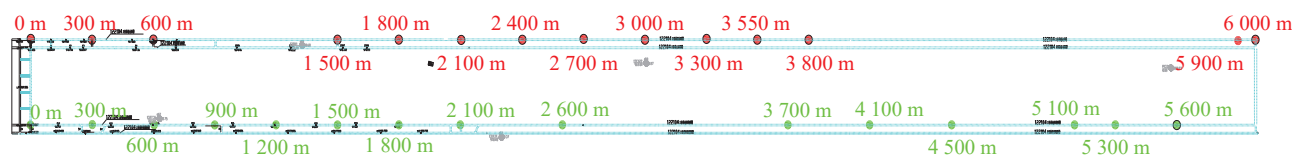


图 3 10 m 超大采高工作面顶板原位测试点平面布置

Fig.3 In-situ test point layout for roof above working face with 10 m extra-large shearing height

1) 顶板岩层强度。图 4 为辅助运输巷 6000 m 里程处顶板岩层强度分布。顶板上方 100 m 范围内有多层厚硬顶板, 其中距煤层 11.8 m 处赋存 14.1 m 厚的细砂岩, 平均单轴抗压强度为 69.1 MPa, 最大抗压强度接近 100 MPa; 距煤层 35.6 m 处赋存 14.2 m 厚

的粉、细砂岩互层, 平均抗压强度为 58.8 MPa; 距煤层 59.7 m 处赋存 13.7 m 厚的粉、细砂岩互层, 平均抗压强度为 59.8 MPa; 距煤层 78.7 m 处赋存 10.1 m 厚的中粒砂岩, 平均抗压强度为 68.3 MPa。

2) 岩层结构。图 5 为 122104 超大采高工作面顶板岩层综合测试剖面。工作面煤层上方 100 m 范围内存在多层 10~33 m 厚硬岩层组, 工作面顶板岩层整体呈现明显的“高+中+低位厚硬顶板”分布特征, 且坚硬岩层厚度沿工作面推进方向有明显的变化。

图 6 为辅助运输巷距回撤通道 600 m 处的顶板钻孔窥视图。工作面上方岩层完整性较好, 顶板致密坚硬, 节理裂隙较少, 层间裂隙不明显。其中, 除顶板上方 0~15、56.5、64.5 m 处存在弱面外, 其余层位岩层完整、致密坚硬。

2.2 技术难题

10 m 超大采高综采是我国特厚煤层高效开采工艺与技术又一次新的探索, 工作面超大开采空间、超高煤壁及超高煤流量的开采特性, 决定了工作面将面临围岩控制、关键装备及智能化协同控制等一系列世界级难题。

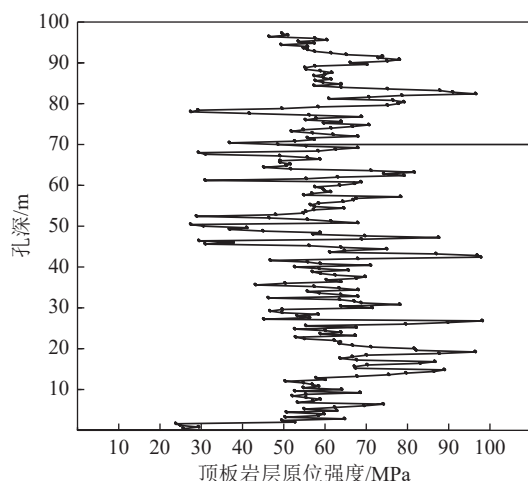


图 4 辅助运输巷顶板岩层原位强度分布

Fig.4 In-situ strength distribution of roof rock above auxiliary transport gate

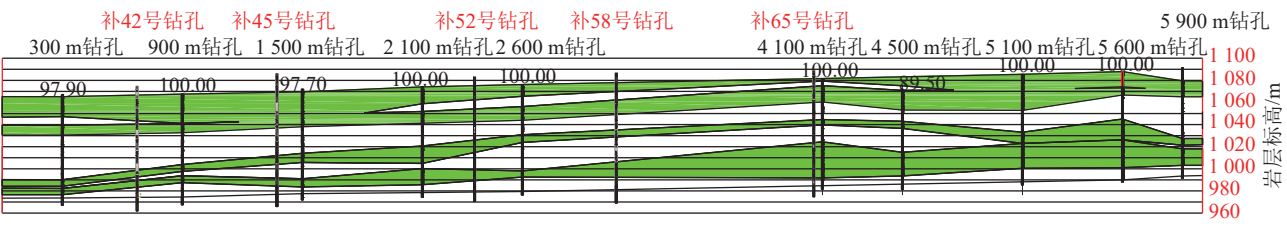
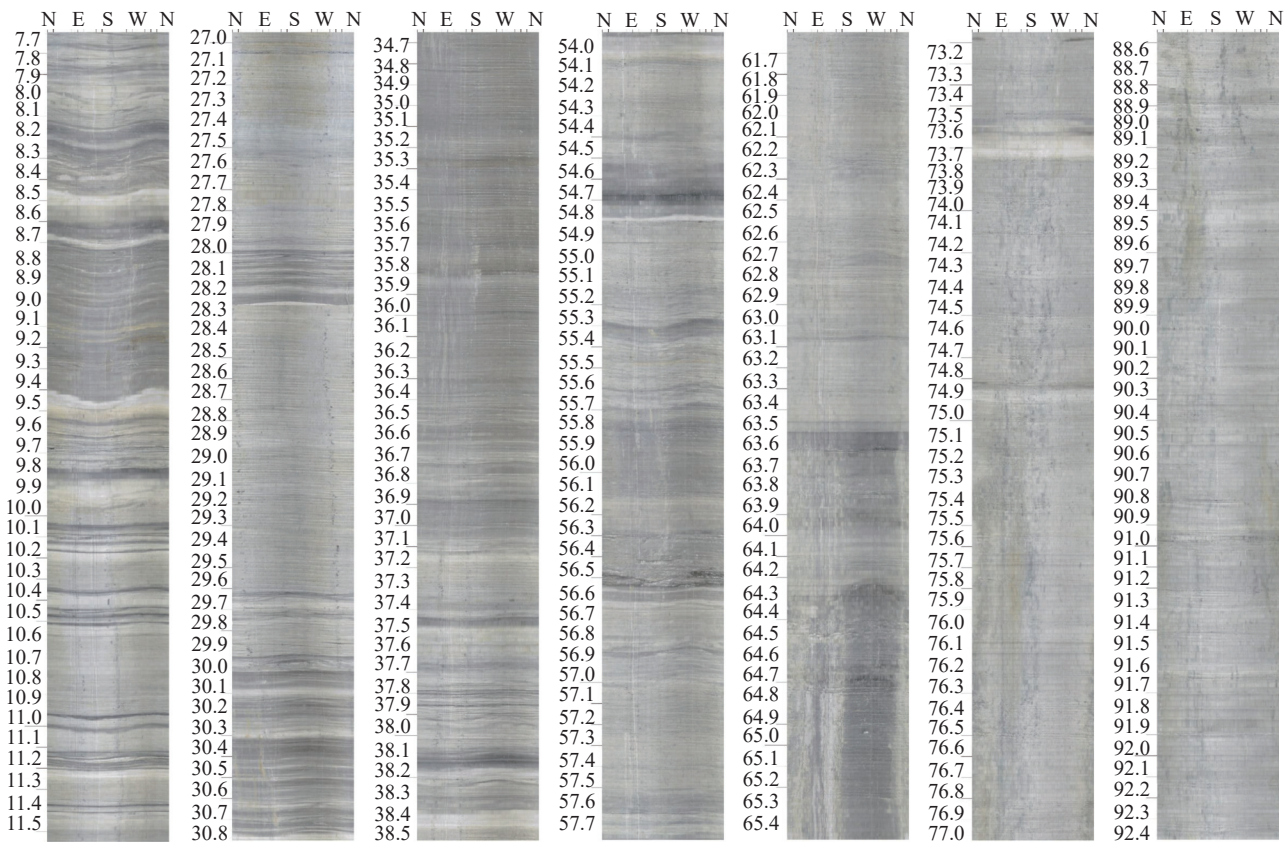


图 5 10 m 超大采高工作面顶板厚硬岩层分布

Fig.5 Distribution of thick and hard rock layers above extra-large working face with 10 m extra-large shear height



注：图中数值为煤层上方钻孔深度，m。

图 6 辅助运输巷顶板钻孔窥视图

Fig.6 Borehole observation images in roof rock above auxiliary transport gate

2.2.1 覆岩活动规律不清及围岩控制难度大

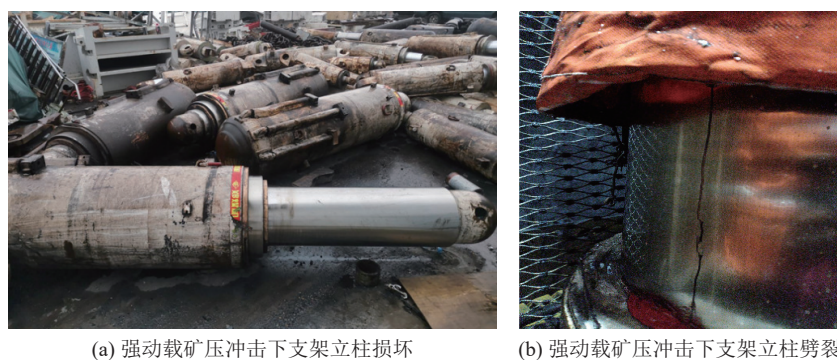
一般情况下，综采工作面随采高增大矿压显现程度呈明显增大趋势，工作面岩层控制难度急速攀升^[25-29]。榆神矿区很多煤矿虽然开采深度不深，但工作面产量大，且煤层上方赋存多层厚硬顶板，致使工作面矿压显现比较强烈^[30-32]，液压支架损坏严重，如图 7 所示。该矿区 6.0 m 超大采高综采实践表明，开采初期顶板大面积悬顶，初次来压步距达 150 m 以上，周期来压期间动载系数 1.5 以上，支架下缩量 0.4~1.0 m。10 m 超大采高工作面高强度开采下，一次采出空间大，工作面围岩控制的尺度效应愈加突出^[33-35]，工作面强矿压、煤壁片帮漏顶成为必须攻克的难题。以往超大采高覆岩活动规律及围岩控制的研究成果

多集中于 8.0 m 以下^[36-39]，这些研究成果可为 10 m 超大采高工作面围岩控制提供参考，但必须深入研究采高增加到 10 m 以后围岩活动的新特征、新规律。

2.2.2 10 m 超大采高工作面关键装备研制难度大

10 m 超大采高工作面关键装备多为世界首创，如 10 m 超大采高液压支架，10 m 超大割煤高度采煤机，8 000 t/h 运量刮板输送机等。研制过程中面临材料、工艺、技术等多重难题。

1) 超大采高工作面开采形成的超大空间、强动载，容易导致支护系统失稳，造成片帮和冒顶，现有支护装备及关键元部件尚不能满足超大开采空间、强矿压和超高煤壁的稳定性控制要求；支架配套的立柱缸径大、伸缩比大、可靠性要求高，立柱的侧向力、整体强



(a) 强动载矿压冲击下支架立柱损坏

(b) 强动载矿压冲击下支架立柱劈裂

图7 曹家滩煤矿强动载来压导致支架立柱损坏情况

Fig.7 Damage of hydraulic support columns caused by strong dynamic Mining pressure in Caojiatan Coal Mine

度、缸筒可靠性、级间密封性等均面临较大的难题。

2) 10 m 超大割煤高度采煤机机身高度超过 4 m, 运行速度超过 10 m/min, 在高强度割煤工况下, 采煤机整机稳定性及机身联接刚性控制难度高; 采煤机摇臂不仅是承载系统而且是传动系统, 承受负载复杂, 摇臂不仅要轻量化而且还要高可靠性, 摇臂结构设计以及在大仰角情况下的润滑系统设计均存在较大难题。

3) 10 m 超大采高工作面煤流大幅增加, 现有 1.4 m 中部槽无法满足运量及可靠性需求; 工作面瞬时落煤量大, 造成刮板输送装备负载不均衡, 重载启动频繁, 大块煤易堵塞煤流通道; 此外, 链条及刮板组件的尺寸跃升严重影响刮板输送装备空载运行功率, 保持链条与刮板组件可靠性的同时降低整机质量也是刮板输送装备研发的难题。

2.2.3 10 m 工作面装备智能化协同控制难度大

超大采高工作面面临超高煤壁状态和刮板输送机瞬时煤流的精准识别难题。在通过激光雷达与摄像头 AI 算法实现煤壁及煤流的非接触检测中, 如何提高智能负荷控制的检测精度、控制的响应时间以及为后续主动护帮提供控制决策依据是非接触感知手段的技术难点。

随着工作面采高增加, 煤壁片帮的概率增大, 超大采高工作面采用双层伸缩梁及三级护帮板结构, 增加了液压支架本体的执行结构件数量; 采煤机装机功率及动作结构件质量也相应增加, 增大了对电网的冲击和结构件惯性, 如何通过智能化控制逻辑和动作执行顺序解决以上问题是智能化控制的难点。

2.3 解决路径

为解决 10 m 超大采高工作面开采面临的难题, 项目综合考虑超大采高工作面围岩控制、关键开采装备、智能协同控制技术, 提出需解决的关键科学问题与核心技术。项目总体研究思路与技术框架如图 8 所示。针对超大开采空间强矿压、超高煤壁稳定性控制, 提出“主动强力支撑防护+区域卸压弱化+全方位

监测预警”三位一体、支-卸协同围岩控制策略; 针对 10 m 超大采高工作面核心关键装备, 采用系统化设计思路开展配套装备研发, 研制抗冲击增容缓冲大缸径立柱, 超大直径轻型耐磨滚筒采煤机, 超大运量刮板输送机; 针对工作面装备智能化协同控制难度大的特点, 开发适用超大采高的智能化控制系统及相关的算法逻辑, 实现工作面从单机智能化到系统智能化。

3 10 m 超大采高开采覆岩活动规律与围岩控制技术

10 m 超大采高开采围岩控制技术包括超大断面巷道支护技术、超大采高工作面支护技术及顶板厚硬岩层压裂、卸压技术。

3.1 超大断面巷道支护

巷道是确保超大采高工作面正常回采的必要通道, 采煤工作面快速推进对巷道提出支得住、支得快的要求^[40-41]。工作面布置有主运输巷、辅助运输巷及回风巷, 断面形状均为矩形。由于 10 m 超大采高开采装备的尺寸大、功率大、吨位大, 要求巷道断面也超大, 其中开切眼断面为 12.5 m×6.8 m(85 m²)、主运巷 7.5 m×5.5 m、辅助运输巷与回风巷 6.5 m×5.5 m(35.75 m²), 如此超大断面的回采巷道在国内外都较为罕见。

3.1.1 超大断面巷道支护方案设计

超大断面巷道临近煤层底板掘进, 留厚度 1 m 左右的底煤, 顶板为比较稳定的煤层。超大断面巷道采用高预应力锚杆与锚索主动支护, 抑制巷道围岩离层与变形, 保证巷道围岩稳定性^[42]。此外, 在回采前对工作面上方厚硬顶板实施水力压裂卸压(3.3 节), 会降低工作面超前支承压力对巷道的影响, 起到一定的卸压作用。图 9 为主运输巷和支护布置。主运巷与辅助运输巷煤柱宽度为 25 m, 巷道采用高预应力锚杆锚索支护, 顶板与煤柱帮锚杆为直径 22 mm、长 2.4 m 的左旋螺纹钢锚杆, 锚索长度分别为 8.3 和 5.0 m, 锚索规格均为直径 21.8 mm、1×19 股钢绞线, 其中帮锚

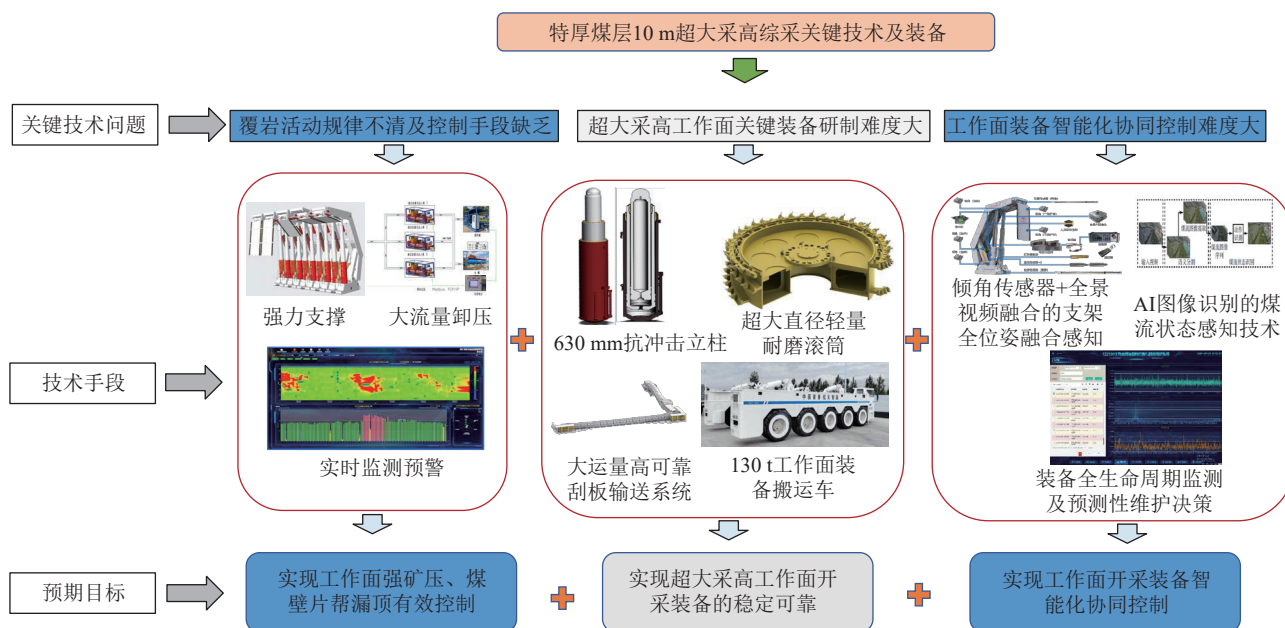


图8 项目研究思路与技术框架

Fig.8 Research approach and technology framework

索匹配 W 钢带支护,工作面回采帮采用直径 27 mm、长 2.4 m 的玻璃钢锚杆,锚杆排距均为 1 000 mm,锚索排距 2 000 mm,螺纹钢锚杆与玻璃钢锚杆预紧扭矩分别不低于 200、80 N·m,锚索初始张拉力不低于 250 kN。切眼掘进断面达到了 85 m²,分 2 次掘进成巷,锚杆排距均为 1 000 mm,回采帮采用直径

27 mm、长 3 500 mm 玻璃钢锚杆,煤柱帮与顶板采用直径 22 mm、长 2.4 m 的左旋螺纹钢锚杆,帮锚杆间距 950 mm,顶板锚杆间距 1 000 mm,匹配 W 钢带支护。顶板锚索长 9 300 mm,煤柱帮锚索长 5 000 mm,间排距均为 2 000 mm。开切眼锚杆锚索预紧参数与主运输巷相同。

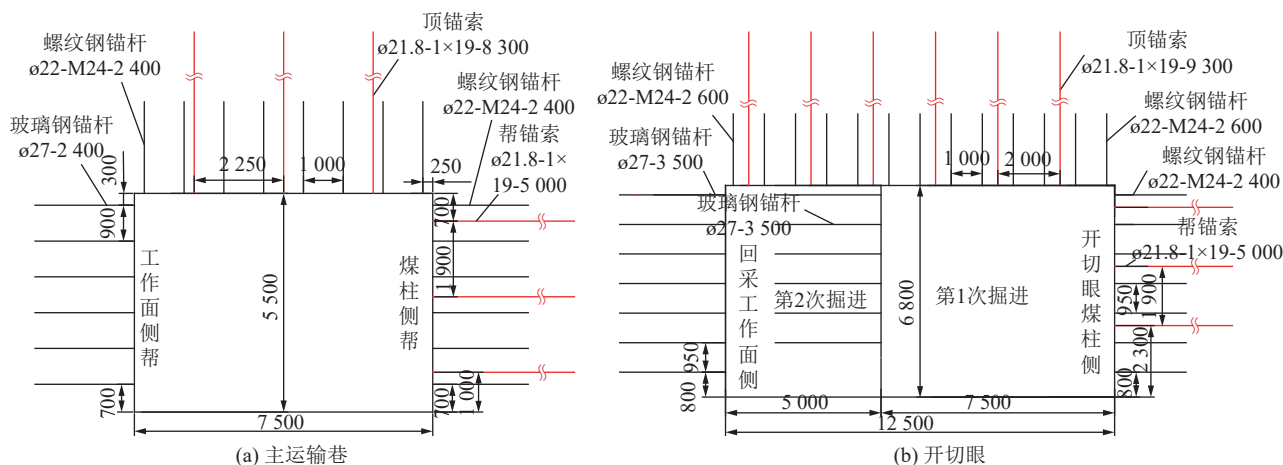


图9 超大采高工作面回采巷道锚杆支护布置

Fig.9 Design of rock bolts and cables for entries in working face with extra large shearing height

3.1.2 超大断面巷道矿压监测预警与反馈系统

为综合分析超大断面巷道围岩控制效果,在回采巷道内布置了综合矿压测站,构建了曹家滩巷道矿压监测预警系统,如图 10 所示。采集了工作面回采过程中超大断面巷道锚杆(索)受力、巷道表面位移、顶板离层及煤柱应力数据,对巷道支护状态进行实时反馈与效果评价。

3.2 超大采高工作面围岩控制

液压支架是工作面围岩控制的核心装备,支架支护强度是保证超大采高工作面围岩稳定性的关键参数。超大采高工作面一次开采空间大,要求工作面必须配备强有力的主动支撑。此外,由于煤层顶板赋存多层厚硬岩层,采后难及时垮落,形成较长悬顶,引起工作面强矿压,因此,在采取强力支护的同时,还应

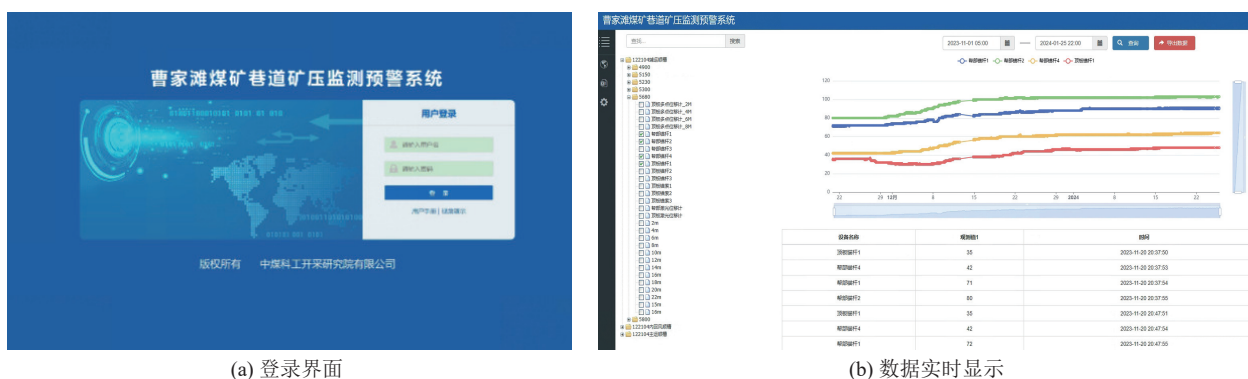


图 10 巷道矿压监测与预警系统

Fig.10 Mining pressure monitoring and early warning system for roadways

厚硬顶板进行弱化、卸压。为此,笔者提出超大采高工作面围岩“支-卸”协同控制理念,采用强力支护与水力压裂卸压共同控制工作面围岩变形与破坏,保持开采空间围岩的稳定性。

3.2.1 液压支架支护强度与护帮结构

综采工作面支护强度与采高存在正相关关系,统计国内类似条件下综采工作面采高与支架支护强度的关系,如图 11 所示。随着采高的增大,支架支护强度基本呈线性增长,尤其是当采高大于 6.0 m 后更是如此。根据统计的工作面支架支护强度与采高的拟合关系,初步确定 10 m 超大采高工作面支架所需支护强度将达到 1.9 MPa 以上。

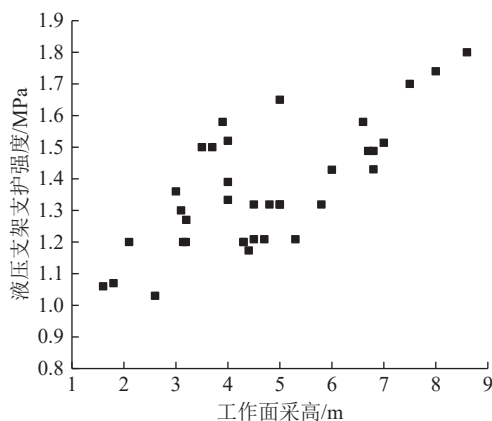


图 11 工作面支护强度与采高关系

Fig.11 Relationship between support strength and mining height of working face

超大采高工作面煤层上方赋存多层厚硬顶板,应力拱扩展受坚硬顶板影响,应力拱纵向发展临时中断,横向跨度增加,形成了前、后两端为半拱状、中部为梁的“拱-梁”结构;多层厚硬顶板下超大采高工作面开采上覆岩层呈叠合“拱-梁”结构,其中中上部“拱-梁”破断造成大周期来压,其连贯性破断造成聚集性大周期来压,破断后岩块呈铰接状态。破断结构模型如

图 12 所示。

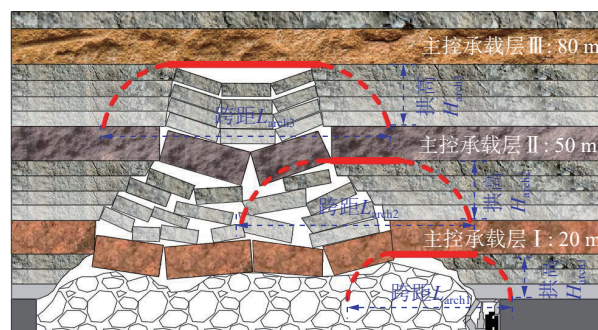


图 12 超大采高采场“叠合拱-梁”结构模型

Fig.12 “Superimposed arch-beam”structure model of extralarge shearing ing height stope

建立中位“叠合拱-梁”力学模型,如图 13 所示。其中, M_2 为主控承载层 II 的厚度, m; h_{s2} 为主控承载层 II 下方软弱岩层厚度, m; 假设应力传递路径受到应力拱约束, q_{s2} 和 q_{c2} 分别为从煤层沿着应力拱迹线向上传递至主控承载层的支架及煤体载荷, MPa; q_{g2} 为主控承载层 II 上覆软弱岩层对主控承载层的自重应力作用, MPa; l_{g2} 为主控承载层 II 小周期破断末端至 q_{s2} 末端的距离, m; θ_{21} 为 q_{c2} 范围内主控承载层 II 的

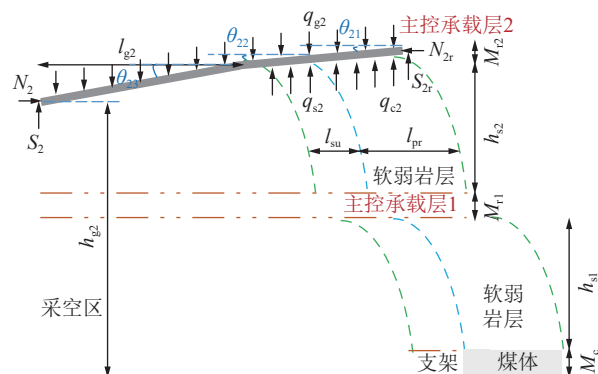


图 13 中位“叠合拱-梁”大周期来压力学模型

Fig.13 Medium “Superimposed arch-beam” model for large period weighting

变形角度; θ_{22} 为 q_{s2} 和 q_{c2} 范围内主控承载层Ⅱ的变形角度; θ_{23} 为 q_{s2} 和 q_{c2} 范围外在 q_{g2} 作用下主控承载层Ⅱ的变形角度, rad; S_2 和 N_2 分别为矸石对主控承载层Ⅱ的支撑力作用的竖向和水平分力, kN; S_{2r} 和 N_{2r} 分别为前方岩层对主控承载层Ⅱ作用的竖向和水平分力, kN; h_{g2} 为主控承载层Ⅱ末端离煤层底面的距离, m。

主控承载层Ⅱ断裂回转, 此时岩层力学分析模型如图14所示。

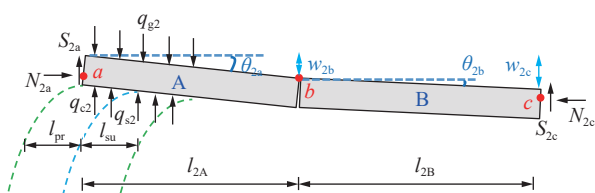


图14 主控承载层Ⅱ失稳模型

Fig.14 Instability model of the main control bearing layer II

假设 q_{c2} 及 q_{s2} 对应的主控承载层Ⅱ变形与其下方煤岩体变形一致, 结合采空区后方变形协调方程及图14中整体结构水平及竖向方向受力平衡方程、整体对 a 点取力矩平衡方程、B岩块 b 点力矩平衡方程, 求得中高位铰接梁滑落及回转变形失稳判据为

$$N_{2a}(q_{s2})\tan\varphi \leq S_{2a}(q_{s2}) \quad (1)$$

$$N_{2a}(q_{s2}) \geq a_2\eta\sigma_c \quad (2)$$

式中: $\tan\varphi$ 为岩块间的摩擦因数; N_{2a} 为岩块在煤壁前方断裂铰接处的水平分力; S_{2a} 为岩块在煤壁前方断裂铰接处的竖向分力; N_{2a}/a_2 为岩块接触面上的挤压应力, MPa; $\eta\sigma_c$ 为岩块在端角挤压强度, η 可取 0.3; σ_c 为岩块的单轴抗压强度, MPa。

通过计算得到中位岩层滑落及回转变形失稳时所需支架支护强度分别为 2.32 和 1.91 MPa, 高位岩层滑落及回转变形失稳时所需支架支护强度分别为 2.90 和 2.14 MPa。鉴于目前国内支架制造能力、搬运能力、巷道断面大小等方面的因素考虑, 在采取有效的顶板弱化技术基础上, 确定支架支护强度 1.88~1.95 MPa, 额定工作阻力为 29 000 kN。

10 m 超大采高工作面煤壁超高, 煤壁稳定性差、极易片帮, 是影响工作面正常生产的关键因素。为解决煤壁片帮难题, 设计了“双层伸缩梁+三级护帮”机构, 如图15所示, 在有效控制顶板的同时, 对超高煤壁进行强有力的主动防护。通过护帮结构优化, 增大煤壁的防护面积、提高护帮力和护帮响应及时性, 抑制煤壁的变形破坏和片帮煤的滑落。

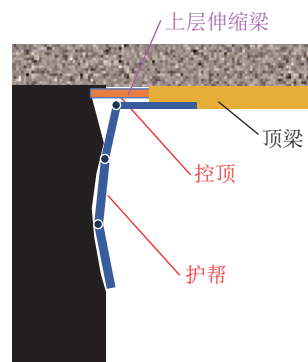


图15 双层伸缩梁控顶护帮示意

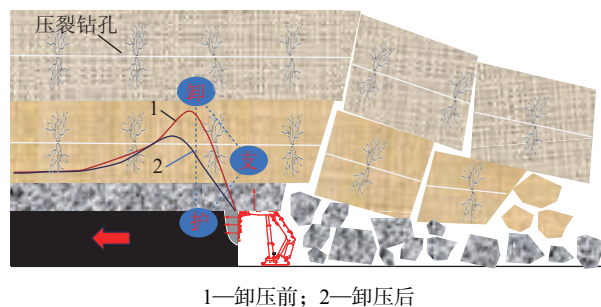
Fig.15 Schematic diagram of the double-layer telescopic beam for roof and coal side control

3.2.2 顶板岩层压裂卸压及“支-卸”协同控制原理

为减小厚硬顶板引起的强矿压对工作面顶板与煤壁稳定性的影响, 在超高阻力液压支架强力支护的同时, 采用井下水平长孔区域压裂技术对厚硬岩层进行弱化、卸压^[43-44], 实现顶板和煤壁的稳定可控, 保障超大采高工作面的安全开采。

井下水平长孔区域水力压裂主要是对顶板中低位厚硬岩层 (顶板以上 10~60 m) 进行主动弱化、卸压, 减小厚硬顶板分层厚度、破断块度和悬顶距, 提高采空区顶板矸石的碎胀性和充填程度, 改善采场应力环境, 改变覆岩破断结构, 减小厚硬顶板破断失稳对采场支架-围岩系统的动载冲击作用。

超大采高工作面围岩支-卸协同控制原理 (图16) 主要体现在: 一是采用超高阻力液压支架对超大采出空间近场顶板进行主动支护, 对煤壁进行主动防护, 通过液压支架的超高支护阻力和护帮机构抑制近场顶板的下沉、离层及片帮, 提升支架-围岩系统的整体刚度, 维持采场近场围岩结构的稳定, 避免顶板在煤壁附近切顶, 通过作用于顶板的超高支护力, 促使顶板切顶线后移, 改变近场顶板的破断位置和悬顶状态, 减小顶板回转对煤壁的压力; 二是采用水力压裂对远场顶板厚硬岩层进行主动弱化、卸压, 调控远场覆岩



1—卸压前; 2—卸压后

图16 超大采高工作面围岩支-卸协同控制示意

Fig.16 Schematic diagram of Surrounding rock destressing collaborative control extra large shearing height working face

结构,减小采后悬顶长度,减小工作面初次来压与周期来压步距,进而有效控制工作面强矿压。支护主要在近场,卸压主要在远场,远近场结合、支-卸协同作用,维护超大采出空间的稳定性。

3.3 井下大流量水力压裂卸压技术与装备

水力压裂技术是坚硬顶板弱化、围岩卸压的有效方法。按水力压裂装备地点可分为地面压裂和井下压裂。前者压裂设备放置在地面,从地面打钻孔至目标岩层进行压裂;后者压裂设备放置在井下巷道或硐室中,向目标岩层打孔并压裂。根据曹家滩煤矿开采深度、岩层赋存特征、地面条件及井下状况,确定采用井下压裂的方式。由于目前井下压裂设备流量小,不能满足超大采高工作面顶板多层厚硬岩层大规模压裂的要求,需要开发井下大流量水力压裂装备,同时需确定合理的压裂层位与参数,保证压裂效果满足安全生产的要求。

3.3.1 井下大流量水力压裂装备

根据超大采高工作面顶板岩层压裂要求,开发了大流量压裂泵组,如图 17、图 18 所示。单套压裂泵

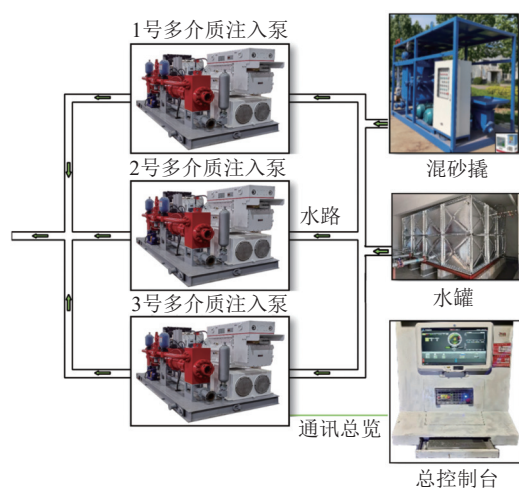


图 17 井下大排量压裂泵组

Fig.17 Large displacement fracturing pump used in underground coal mine



图 18 井下压裂用大容量拼接水箱

Fig.18 Large capacity splicing water tank for underground fracturing

组的流量设计为 $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$,可 2 套或多套并联增大输出流量。开发的泵组流量达到 $1.5 \sim 5.0 \text{ m}^3/\text{min}$,较当前煤炭行业使用的压裂泵组流量大幅度提升。同时,由于采用钻孔群布置,岩层相同范围内注入的水量可以达到或超过地面水力压裂,规模效应明显。

针对曹家滩煤矿地层厚硬砂岩顶板赋存特征,研制出小直径硬岩旋锤振冲式孔底螺杆马达工具,并借鉴石油钻井长期耐磨需求,优选多翼 PDC 钻头提高钻切成孔效率,如图 19 所示。



图 19 旋锤振冲式孔底马达及钻头

Fig.19 Rotary hammer vibration punching bottom motor and drill bit

3.3.2 顶板岩层压裂参数设计

10 m 超大采高工作面长度 300 m,走向长度为 5 977 m,设计工作面全宽、全长顶板压裂。压裂主要分为 2 个区域:初采初放区域,5 600~5 977 m(开切眼);其他区域,0~5 600 m。

1) 初采初放区域。为实现煤层弱化及顶板充分预裂弱化效果,根据钻孔施工层位及方式的不同,工作面初放压裂钻孔设计为 3 类,如图 20 所示。

(1) 穿层普通钻孔(图 20a):在开切眼施工,A、B、C 类钻孔倾角分别为 18° 、 35° 和 62° ,C 与钻孔 A 位置重叠,钻头直径 85 mm,孔间距离 30 m。

(2) 本煤层普通钻孔(图 20b):在开切眼施工,共施工 3 个钻孔 E-1、E-2、E-3,水平钻孔间距 60 m,倾角 1° ,层高 4 m。

(3) 顶板定向钻孔(图 20c):在辅助运输巷 5 600 m 里程施工 11 个钻孔,钻孔孔径 120 mm,压裂层位为 13、30、80 m。在回风巷 5 900 m 里程布置 2 个沿工作面长度方向的钻孔,压裂层位为距顶板 5 m。在开切眼轴线方向设置 1 个钻孔,距顶板 20 m。

2) 其他区域。初采初放区域结束后,进入正常开采阶段。3 780~5 600 m 区域的顶板定向钻孔布置如

图 21 所示,此区域共设置 5 个压裂钻场。为了研究不同压裂层位与参数对压裂效果的影响,在不同的地

段采用了不同的压裂参数,下面介绍典型的压裂参数设计。

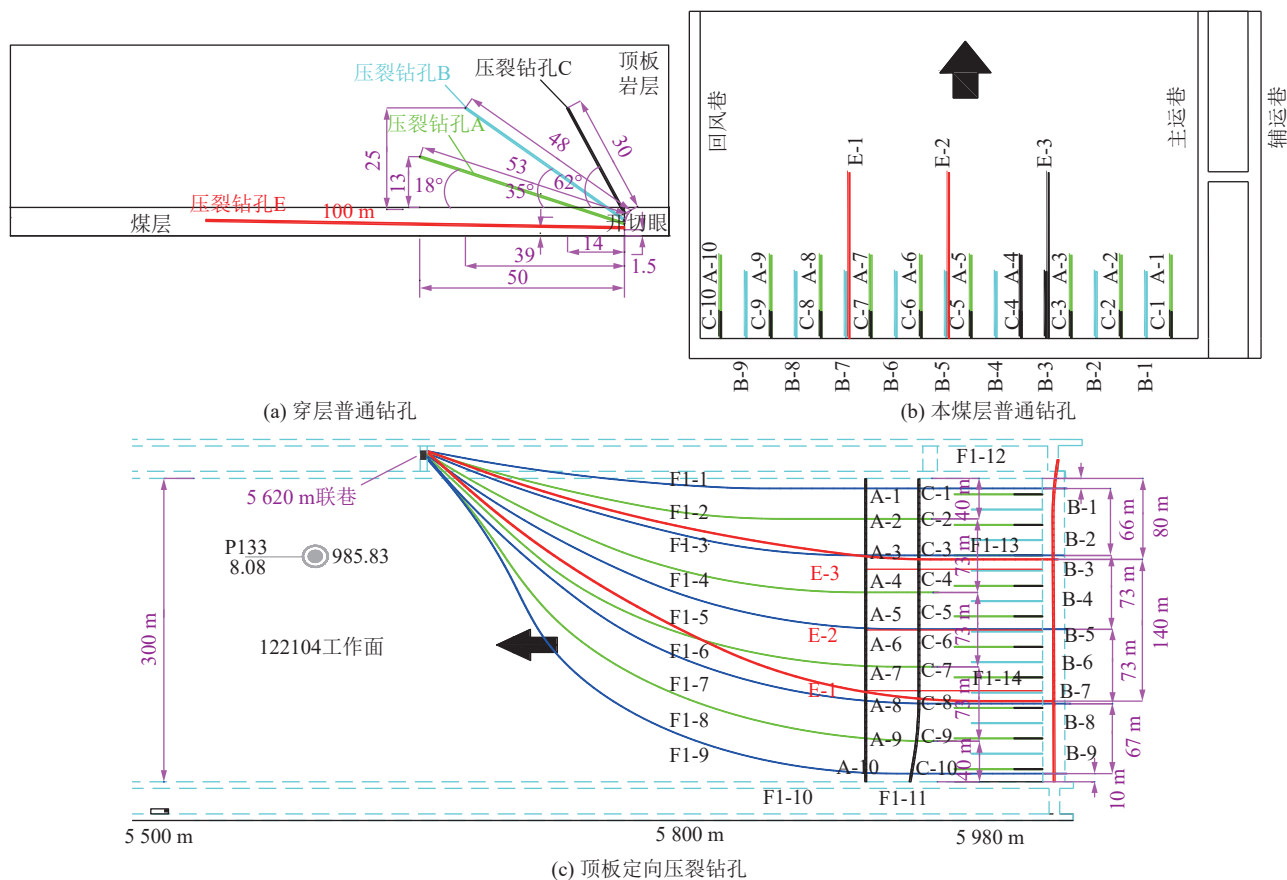


图 20 超大采高工作面初采区域压裂钻孔布置

Fig.20 Layout of fracturing boreholes for initial mining in working face with extra large mining height

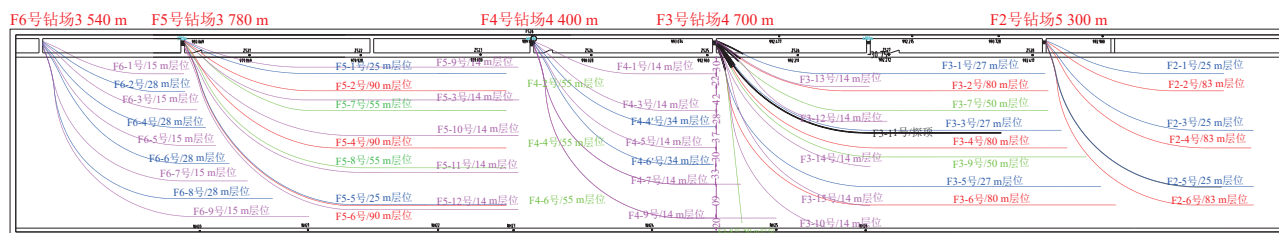


图 21 超大采高工作面正常区域压裂钻孔布置

Fig.21 Layout of fracturing boreholes for normal mining in working face with extra large shearing height

(1) F2 钻压场 (5 300 m 联巷): 共设置 2 个压裂层位: 25 和 83 m, 6 个顶板定向长钻孔, 25 m 层位钻孔间距为 99 m, 83 m 层位钻孔间距为 100 m; 单孔压裂间隔为 30 m, 压裂时长 90 min, 瞬时压力平均为 33 MPa, 平均流量为 180 m³/h。

(2) F3 钻压场 (4 700 m 联巷): 共设置 4 个压裂层位: 14、27、55 和 80 m, 15 个顶板定向长钻孔 (其中包括 1 个探顶孔)。单孔压裂间隔为 50 m, 压裂时长为 120 min, 瞬时压力平均为 30 MPa, 平均流量为 185 m³/h。

(3) F4 钻压场 (4 400 m 联巷): 共设置 3 个压裂层位: 14、34 和 55 m, 10 个顶板定向长钻孔。设置 14 m 层位钻孔间隔为 60~65 m, 34 m 层位钻孔间距为 67 m, 55 m 层位钻孔间距为 100 m; 55 m 层位钻孔单孔压裂间隔为 30 m, 压裂时长为 40 min, 瞬时压力平均为 18 MPa, 平均流量为 160 m³/h; 其他层位钻孔单孔压裂间隔为 15 m, 压裂时长为 40~60 min, 瞬时压力平均为 18 MPa, 平均流量为 160 m³/h。

3.4 工作面矿压实时监测与预警

采用 KJ21 顶板灾害监测预警平台对 10 m 超大

采高工作面矿压进行实时监测预警,并对工作面矿压进行全程跟踪分析,在开采过程中及时掌控工作面矿压显现情况与液压支架实时工况,如图 22 所示。122104 工作面每台支架立柱、平衡千斤顶、护帮板千斤顶均安装了压力传感器,支架顶梁、四连杆和底座安装了倾角传感器,间接测量计算支架高度和立缩下缩量,实现了液压支架立柱、平衡千斤顶、护帮板受力和采高的全方位监测。预警平台具有顶板来压的分级预警功能,按照来压强度划分为 4 个等级,指导现场根据不同来压强度的预警结果采取相应的处置手段,尤其是通过周期性强来压的及时预测预警,指导井下及时采取提高支架初撑力、合理优化推进速度和采高等措施,大幅降低顶板灾害的发生几率,并通过周期来压规律分析为水力压裂卸压效果的评价及压裂参数的优化提供可靠依据。另外,KJ21 顶板灾害监测预警平台具有液压支架工况多参量综合评价与预警功能,能够及时发现支架初撑力不足、立柱不保压等不良工况,保障超大采高液压支架达到良好的支护性能。

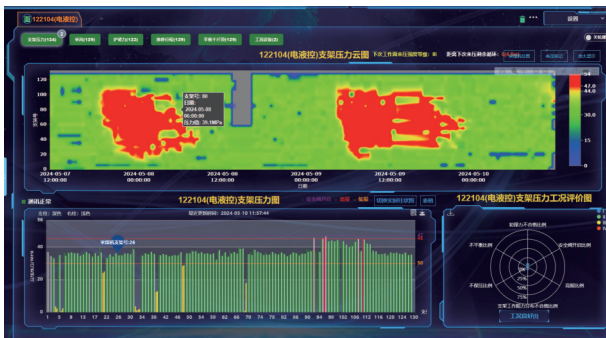


图 22 KJ21 顶板灾害监测预警平台实时监测界面

Fig.22 KJ21 real-time monitoring interface of roof disaster monitoring and early warning platform

4 10 m 超大采高综采关键装备

4.1 工作面开采装备整体配套

10 m 超大采高工作面开采装备均为创新性研发,需通过全面整体的一体化配套,确定装备技术参数及结构型式^[45],且工作面采高与巷道高度之间存在约 4.5 m 高度差,现有配套模式无法指导 10 m 超大采高综采工作面装备开发。根据工作面煤层赋存及超大采高开采工艺,进行了工作面支护系统、采煤系统及运输系统选型及配套。

工作面中部液压支架选择 ZYA29000/45/100D 型两柱掩护式支架,过渡支架型号为 ZYG29000/42/90D (A/B),工作面端头处采用 ZYT29000/35/62D 型端头支架支护,采用“头四尾三”配置,两侧巷道通过 ZTC28000/

35/58D 型支架及 12 组 ZTC14000/35/58D 型超前支架实现稳定支护。为避免普通台阶逐级过渡造成的端头上方三角煤区域的资源浪费,开发了“大梯度+小台阶”综合过渡方式,如图 23 所示,过渡区域采高缓慢降低约 1 m 后垂直过渡到巷道高度,支护时通过 5 架支架逐级适应缓慢过渡,再设置 9 m 高大梯度过渡支架,支架靠端头侧设置大梯度侧护板,与端头支架搭接,形成完整的端头区域围岩支护,端头区域可多回收煤炭 102 万 t。

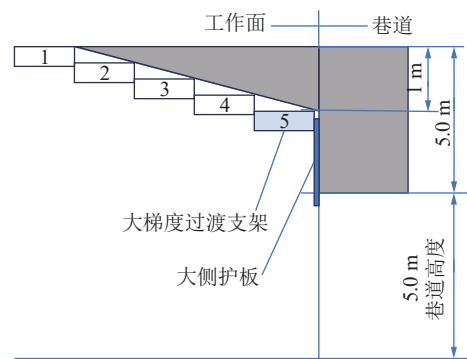


图 23 “大梯度+小台阶”液压支架过渡方式

Fig.23 “large gradient + small step” shield transition mode

采煤机为 MG1200/3350-GWD 型双滚筒电牵引采煤机,总装机功率 3 350 kW,滚筒直径 4.8 m,工作时前、后滚筒分别负责截割顶部和底部煤层,中间煤层通过煤机扰动后在自重作用下垮落。行走系统采用 201 mm 节距,保障系统可靠性的同时有效提升牵引效率。

工作面煤流运输采用 SGZ1600/3×2000 型刮板输送机,中部槽宽度 1 600 mm,运量可达到 8 000 t/h,机头布置交叉侧卸卸载方式,采用“变频电机+减速器”驱动机构,保障系统可靠性。机头 2 部电机分别为平行及垂直布置,机尾电机平行布置;配套 SZZ1800/1200 转载机及 PLM7500 破碎机。

工作面采用 5 台 1 250 L 乳化液泵、4 台 1 000 L 喷雾泵及泵站集中控制系统等,构成工作面集成供水系统。

工作面装备采用三维一体化配套方法,建立三维虚拟样机,在空间条件下模拟装备配套关系,如图 24 所示。通过系统化配套后,机面高度约 4.5 m,过煤空间高度达到 1.8 m,两端头卧底量超过 480 mm,最低采高 7 m,该条件下过机空间超过 1 000 mm,采煤机截深 865 mm,设备配套梁端距 900~1 010 mm,满足仰采 5°工况开采,输送机采用单推移耳座与支架推移杆通过“Y”形连接件呈十字联结,保障联结强度的同时加强输送机推进过程中的卧底能力,201 mm 节距

下输送机及采煤机啮合更稳定, 1 600 mm 中部槽宽度提升了采煤机跨度, 同时采煤机重心偏向煤壁, 进一步提升了开采过程中设备稳定性。运输巷道超前支架直接与转载机连接, 配合交叉侧卸式运输机机头提升了工作面装备整体性, 更利于工作面及巷道内装备协同推进, 设备整体配套产能达到年产 1 800 万 t。

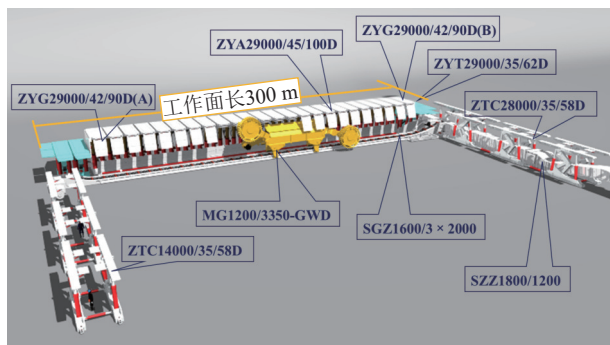


图 24 工作面装备配套图

Fig.24 Matching diagram of working face equipment

4.2 10 m 超大采高强力液压支架

10 m 超大采高工作面中部液压支架为 ZYA29000/45/100D 型两柱掩护式液压支架, 如图 25 所示。支架支护强度 1.88~1.95 MPa, 支撑高度为 4.5~10.0 m, 是目前世界上最高、支撑吨位最大的液压支架。采用整体顶梁支护型式, 并创新设计“双层伸缩梁+三级护帮板”结构, 实现护顶与护帮动作互不影响, 提高了支架护帮和护顶的能力和及时性。在提升围岩支护效

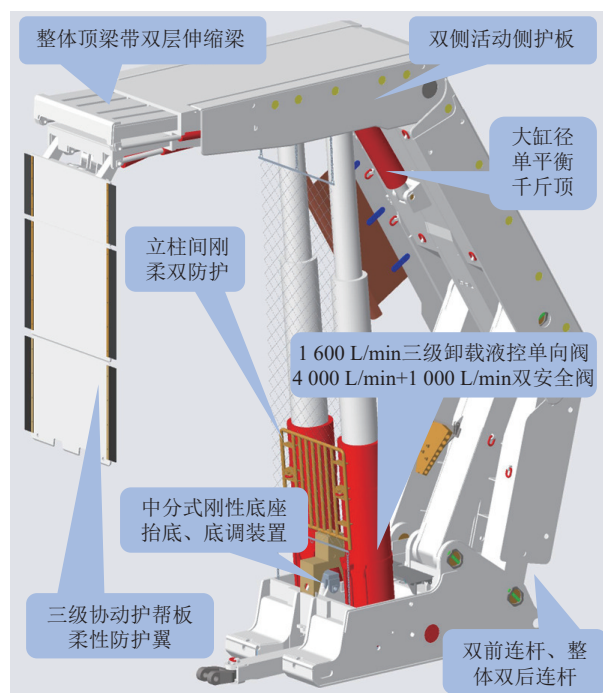


图 25 ZYA29000/45/100D 型超大采高液压支架

Fig.25 Type ZYA29000/45/100D hydraulic shield with extrar large shearing height

率的同时, 有效增加了护帮面积, 为超大采高煤壁防护、控制片帮提供了有效手段。为形成安全有效的防护空间, 支架双侧安装活动侧护板、掩护梁侧安装“L”形挡矸板、立柱间安装刚性防护栏、立柱前挂全断面防护网、护帮板两侧安装橡胶柔性防护翼, 防止煤壁及上方煤矸落入人员作业区域。支架采用 2.4 m 大中心距架体、微隙准刚性四连杆机构, 横向极限倾倒角度达到 12°, 顶梁、底座分别设置防倒、调偏机构, 保证支架群组稳定性。

支架采用新研发的 $\phi 630$ mm 抗冲击立柱, 采用“高强度缸筒+大容量腔体”提升柱体冲击缓冲性能。系统受到瞬时动态载荷时, 可通过 1 600 L/min 大流量三级卸载液控单向阀和 2 个大流量安全阀卸载。1 000 L/min 小安全阀减小系统响应时间, 4 000 L/min 大安全阀有效提高抗冲击能力。立柱配置 1 000 L/min 超大流量底阀保证立柱升降柱时间小于 10 s, 配合初撑力自动保持系统, 实现工作面围岩的可靠支护。

支架关键结构部件采用 Q890、Q960 高强钢板焊接, 静电吸附粉末喷涂表面处理工艺, 提高部件在井下潮湿环境中的防腐防锈性能, 整架通过 63 000 次耐久性疲劳测试, 满足超大采高支护条件下强度和寿命要求。

4.3 10 m 超大采高大功率采煤机

10 m 超大采高 MG1200/3350-GWD 型采煤机如图 26 所示。由于工作面最大割煤高度达到 10 m, 采煤机面临整机稳定性保障、大仰角长摇臂润滑冷却等技术难题。在分析现有大采高采煤机摇臂摆角数据及其特点的基础上, 优化整机布置型式, 采用调高油缸下置式布置, 在保证调高范围的同时, 有效降低机面高度及机身重心, 配合机身“T”型截面、箱型拉杠预紧、多级顶推预紧螺栓等技术, 有效提升了整机稳定性。采煤机滚筒直径为 4 800 mm, 采用 5 头螺旋叶片, 一线五齿布置, 提高截割能力, 设计变厚度连接盘及减重孔, 在易磨损区域加焊更多耐磨能力强的特殊耐磨材料, 以增强耐磨性能。针对超大采高条件下, 摇臂仰角大、润滑效果差的难题, 采用高速腔、惰轮腔、

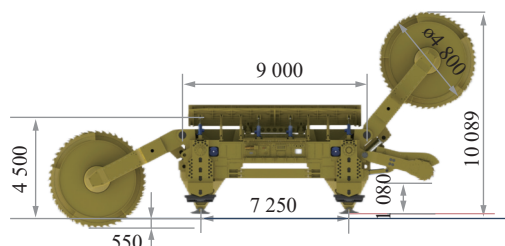


图 26 MG1200/3350-GWD 型大功率采煤机

Fig.26 Type MG1200/3350-GWD shearer with large power

行星腔隔封设计,三腔分别润滑,可靠性高,系统发热量小,润滑效果良好。整机集成了高强度轻量化的牵引部框架式结构、201 节距鼓形齿轨轮、多态融合自动控制系统,研发出首台 10 m 超大采高大功率、重载截割采煤机。

4.4 超大运量刮板输送机

工作面刮板输送机通过研发复合框架重型中部槽及其千兆帕级槽帮材料保障刮板输送机中部槽的可靠性,槽帮采用最新研制的添加钒合金元素高强度耐磨合金铸钢材料,耐磨性较常用材料提高 15%,强度提高 30%。如图 27 所示,创新设计下链道悬链结构,对链条、刮板与中部槽接触面进行干预,减缓链条对底板的磨损,增加输送机底板和链条的寿命。研发准渐开线内凹球面齿形,牵引轮实现自对中,减少销排的横向受力、提高传动效率;创新链条张力调控技术,实现链条张紧力的敏捷动态调节;针对超大采高工作面输送机重载启动困难、运输负载不均衡等难题,

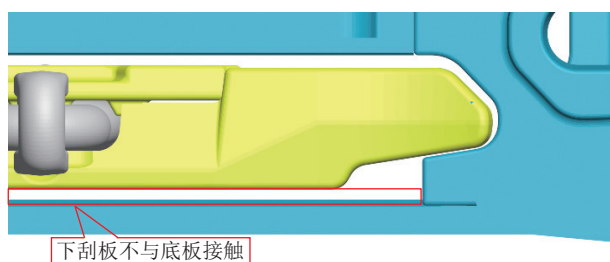


图 27 刮板输送机下链道悬链结构

Fig.27 Catenary structure of lower chain of scraper conveyor

研发了慢变动力特性启动方法及基于煤量分布模型的刮板输送机智能控制方法,装备输送能力达到 8 000 t/h,满足 10 m 超大采高综采工作面高效生产煤流运输需求。

上述装备系统集成,形成世界首套 10 m 超大采高工作面综采成套装备,在地面进行了联合试运转,如图 28 所示。装备总装机功率达 20 000 kW,总质量达 20 000 t。



图 28 10 m 超大采高工作面成套装备

Fig.28 Complete set of equipment for working face with 10 m extra large shearing height

5 综采装备群智能协同控制技术

5.1 智能控制模式与控制逻辑

如图 29 所示,以工作面成套装备总控制网络为核心,单机装备为执行机构,形成超大采高装备群智能控制模式及控制逻辑。结合超大采高开采工艺,融合采煤机记忆截割、液压支架自动跟机、工作面运输

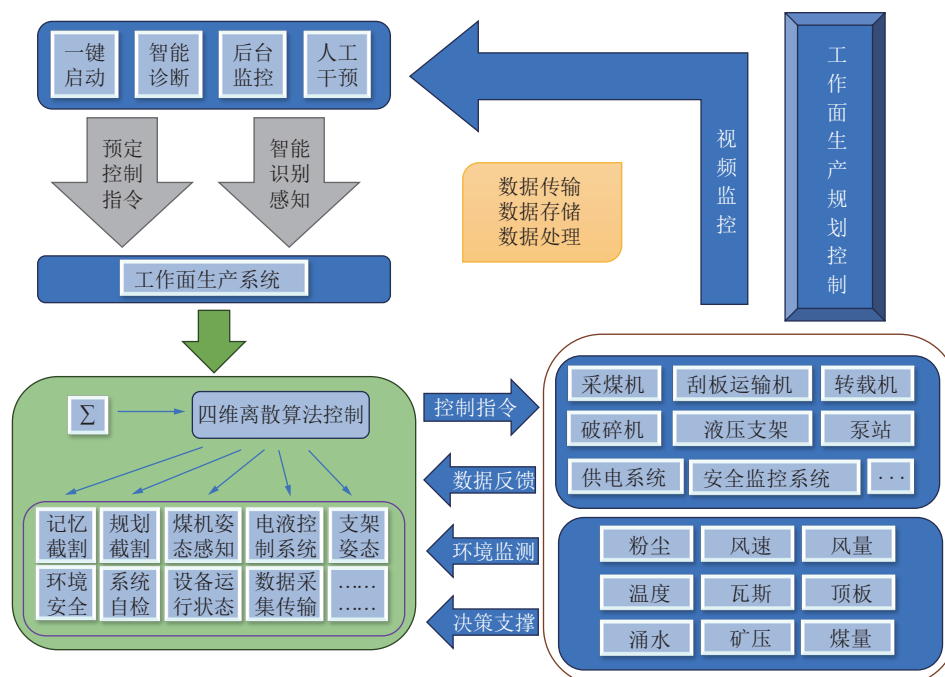


图 29 智能控制逻辑流程

Fig.29 Flowchart of intelligent control logic

系统煤流平衡、集成供液、工作面可视化视频监控、远程启停、远程遥控等多项技术,实现超大采高工作面装备群的智能协同控制^[46]。

在装备群核心协同动作方面:提出 10 m 超大采高液压支架跟机控制与采煤机速度、供液系统、设备工况、顶底板条件、采煤工艺等多因素耦合控制的跟机自动化控制逻辑策略,如图 30 所示。解决了传统跟机控制逻辑程序化与系统静态参数难以适应实际工作面顶底板条件、设备实时运行状态和工作面成套装备协同的问题。

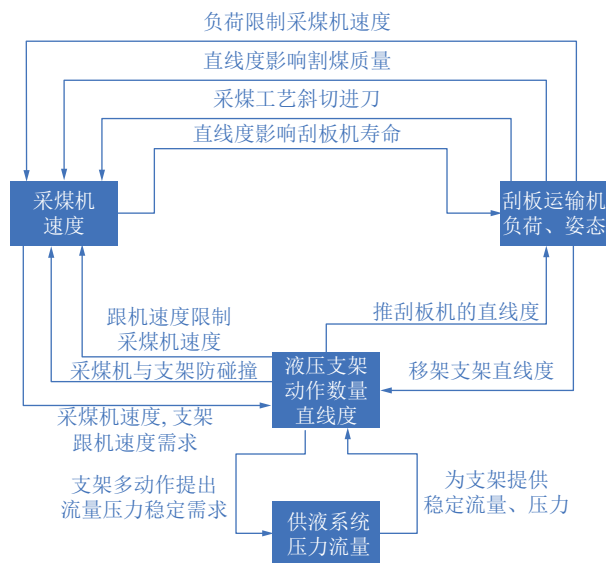


图 30 工作面“三机”高效协同跟机控制

Fig.30 High-efficiency coordinated follow-up control for shields, shear and conveyor in working face

5.2 采煤机控制方法

提出采煤机自动控制策略,如图 31 所示。利用地质模型对采煤机的截割路径进行规划,并在开采过程中根据工作面揭露的最新地质资料动态修正三维地质模型。将三维动态地质模型与采煤机开采规划算法耦合,提出可自适应煤层变化的采煤机开采控制基线规划算法,实现对采煤机推进方向的俯仰采控制与牵引方向的截割控制,完成地质模型更新、开采基线规划与采煤机滚筒调整之间的高效协作。

5.3 刮板输送机控制方法

应用粗糙神经网络技术,构建了一套超大采高采煤机与刮板输送机的协调控制系统^[47],如图 32 所示。该系统基于深度 LSTM 粗糙神经网络,将单层 LSTM 网络扩展为多层,以提高对采煤机速度的预测精度。不仅建立了采煤机与刮板输送机之间的协同调速物理体系,还形成了两者协调运行的模式,显著提升了超大采高工作面的整体运输效率。同时,该系统还整合了数据采集、清洗处理、特征参数确定、基于改进 k -

means 聚类离散、粗糙集理论的知识发现、最佳属性约简集的确定、基于属性重要度的约简算法、初始决策表的创建以及特征选择数据集的生成等多个环节,确保了超大采高采煤机和刮板输送机的高效协同作业。

5.4 液压支架控制方法

提出基于顶板管理、煤壁管理、支架防滑与防倾倒控制、多级护帮联动控制、跟机自动化控制的 10 m 超大采高液压支架运行状态智能控制策略,实现了 10 m 液压支架的自动控制。开发出基于接触式与非接触式超大采高液压支架工况监测技术与仪器,提高了液压支架工况状态的实时感知水平及控制质量。控制策略将顶梁承载曲线、顶梁俯仰极限角和立柱长度与平衡千斤顶长度关系式作为数据库,以顶梁俯仰角和承载合力作为判断依据、立柱长度与平衡千斤顶长度关系为控制指令,提出液压支架的智能控制方式和控制策略^[48],如图 33 所示。

5.5 供液系统

首先构建了 10 m 超大采高供液系统仿真模型,完成了工作面支护系统动态特性分析。其次构建了 10 m 超大采高支架与大流量泵站联动控制逻辑,如图 34 所示。以随机森林和提升树为基础,通过组合多个决策树,建立理论与实际结合的大采高支架与大流量泵站可视化集成学习模型。通过单泵变频多泵联动算法模块,实现了恒压按需供液的最优控制效果,提高供液系统响应速度。形成大流量多泵站控制系统,实现了泵站控制系统与支架电液控系统的高效稳定通讯,优化变频联动控制效果,实现了柔性变频控制。

5.6 供电系统

以短路跳闸和漏电跳闸的理论分析为依据,采取光纤信号闭锁方案,通过矿用保护装置 PA63 和井下电力监控分站实现了井下供电系统的防越级跳闸保护。采用故障监测终端、高频传感器、远程故障监测主站与光纤通信,实现了井下 10 kV 电缆的故障快速识别和故障点的精准定位,大大缩短了运维人员对电缆故障的排除时间,有效提升了电力供应的连续性和可靠性。

5.7 综采工作面协同控制系统

智能开采工艺是智能控制系统的主线和驱动引擎,提出基于煤厚变化的截割高度规划、快速跟机移架、防碰撞技术的控制策略,实现采-支协同;基于直线度检测和推移行程调控技术,实现支-运协同;基于刮板输送机煤量的采煤机割煤阻抗的双机速度互馈调整方法,实现采-运协同;通过工作面端头及超前一

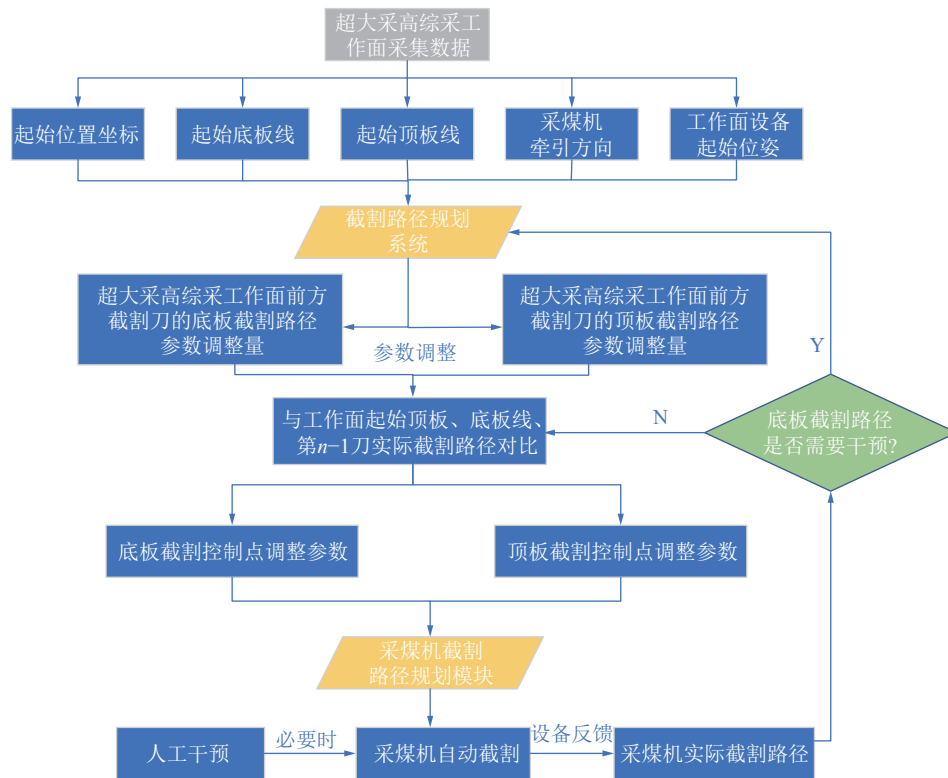


图 31 地质模型与采煤机截割规划算法耦合

Fig.31 Coupling diagram between geological model and planning cut algorithm

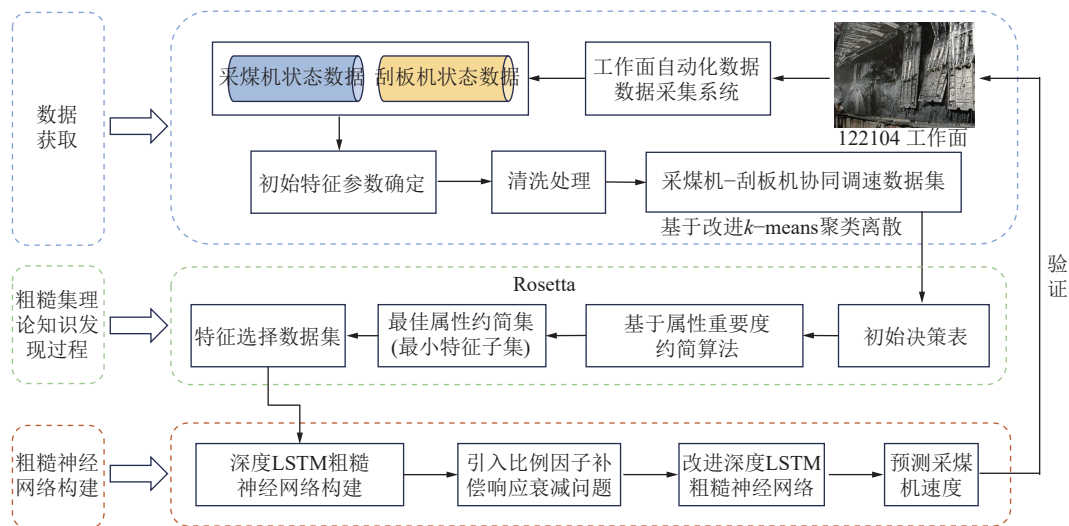


图 32 协同调速模型构建流程

Fig.32 Construction process of collaborative speed regulation model

体化协同推进工艺,实现工作面和超前区域的协同。

采-支协同:采支协同重点解决自动跟机移架控制问题,以及采煤机和支架护帮板干涉问题。根据采煤机速度、移架时间和顶底板特性,移架方式可选择依次顺序式,分组间隔交错式或成组整体依次顺序式类型,同时根据移架工艺制定移架策略。通过结合超大采高工作面液压支架载荷变化特征、采煤机机身振

动信号特征和工作面起伏态势构建采-支协同工艺工况划分准则,利用聚类分析实现工况辨识。针对不同工况,建立以截割牵引速度为优化目标,以液压支架同步移架数量、移架速度、煤壁片帮风险等关键参数为约束条件的非线性优化模型;同时,对于液压支架群组支护策略,针对不同工况采取“适应支护”、“增强支护”和“稳定支护”的支架群组协同支护方法,

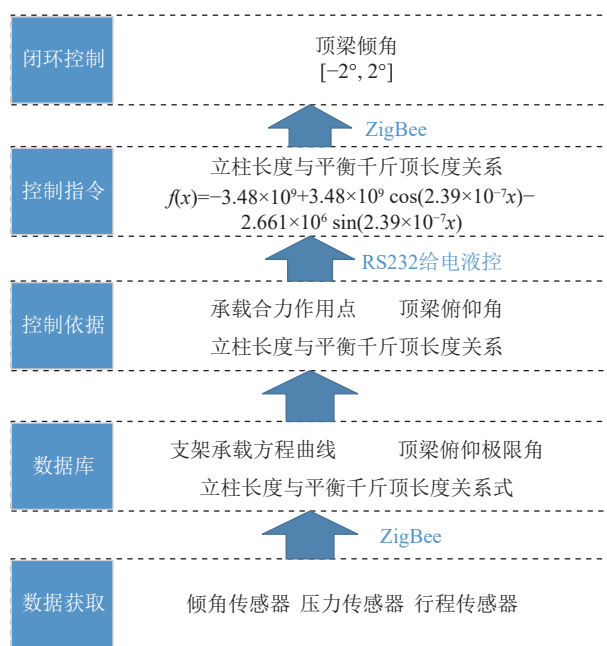


图 33 支架状态智能控制策略

Fig.33 Intelligent control strategy for shield status

实现动态态势下的支架自适应协同推进、静载态势下的支架状态保持,从而实现采-支协同(图 35)。

采-运协同:刮板输送机是矿井运输系统中与采煤机直接配合的设备。刮板输送机与采煤机的协同运行直接影响着煤炭的开采效率和运输效率。采煤机的不合理运行可能导致刮板输送机负载变化大,甚至过载等问题的发生。对采煤机速度进行有效的调节,可以有效解决上述问题。由此,对于刮板输送机、采煤机之间协同关键在于 2 个设备的协同调速,即刮板输送机的刮板链速与采煤机截割速度、牵引速度的动态调节、匹配、协同控制关系。因此,提出基于刮板

输送机煤量的采煤机割煤速度调整工艺,采用 CAN-open 通信方式实现刮板输送机机头、机尾电机变频控制,通过直接转矩控制法调节机头及机尾电机转矩,确保稳定运行期间各电机功率平衡。提出自适应煤量调节方法,在煤量大的时候采煤机降速,实现采-运协同。

支-运协同:“三直一平”是对采煤工作面的基本要求。支-运协同面临的主要问题在于制定合理的跟机移架工艺和直线度控制方法。在跟机移架工艺方面,应用自动跟机后,支架丢架、推溜不到位的情况时有发生,根据超大采高工作面装备动作特点,制定包括测量刀和调直刀在内的跟机工艺,改善自动跟机效果,保证自动跟机常态化运行。在直线度控制方法方面,研究基于直线度检测和推移行程调控技术,实现支-运协同。建立基于惯导的自动调直反馈控制方法,由惯导反馈的刮板输送机直线度坐标,计算得到每架液压支架下一刀的推移量,实现工作面直线度自动调整。针对液压支架、刮板输送机之间存在的销轴间隙影响跟机移架控制精度问题,提出一种基于粗糙神经网络的工作面调直控制方法,将粗糙集理论和深度学习相结合,实现在每个割煤周期内工作面直线度相对稳定,保证工作面自动调直系统常态化运行。

10 m 超大采高工作面智能开采工艺通过采-支-运三大协同系统的有机联动,构建了智能化矿井的高效生产体系。在采-支协同中,创新性的护帮板动态调控策略与移架工艺优化,有效攻克了 10 m 超大采高工作面片帮治理难题;采-运协同依托变频调速与煤流联动机制,实现了刮板输送机功率平衡与煤量自适应调节的双重突破;支-运协同则通过惯导自动调

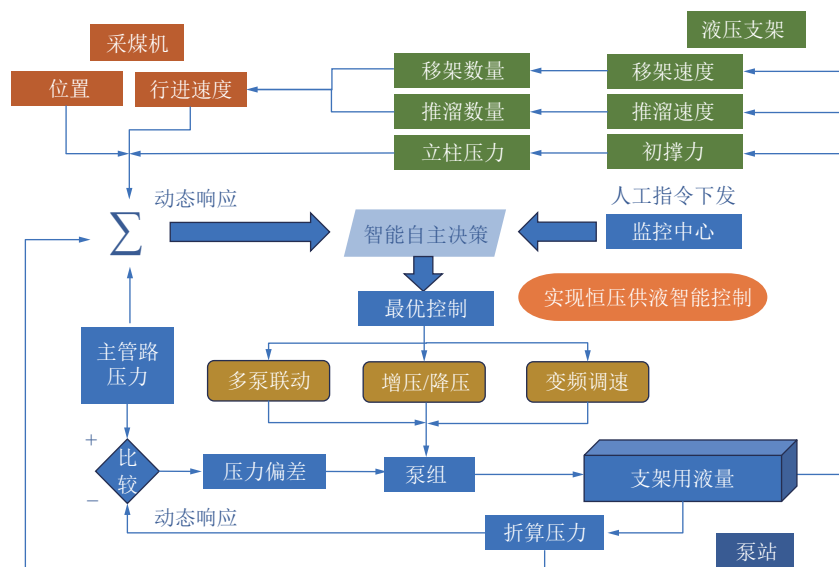


图 34 液压支架与大流量多泵泵站联动控制逻辑

Fig.34 Control logic of shields and large flow multi-pump station linkage

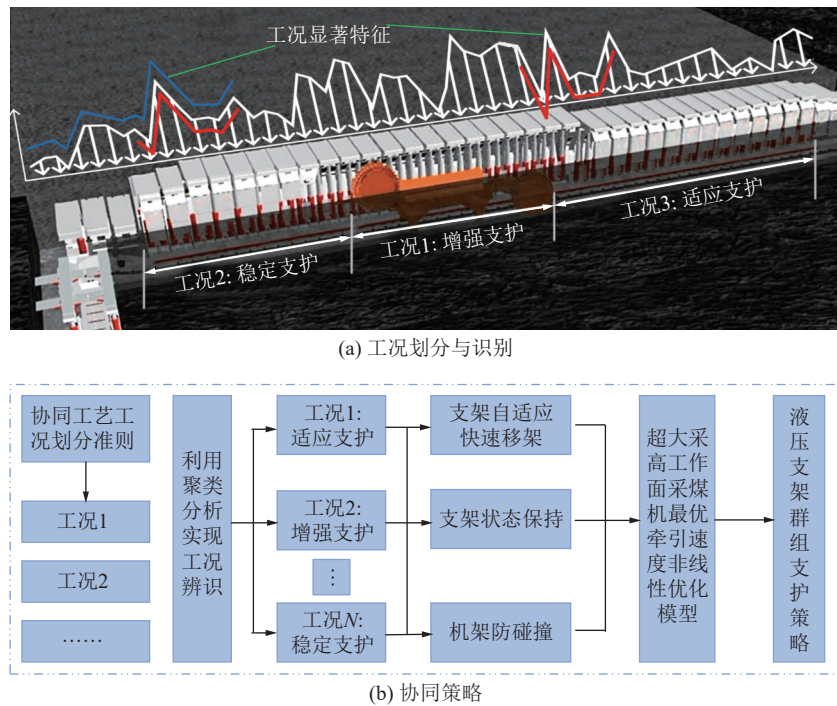


图 35 采-支协同工艺策略

Fig.35 Mining-support coordination process strategy

直与粗糙神经网络算法,将工作面直线度控制精度提升至毫米级。这些技术的深度融合不仅构建了“三直一平”的动态保障体系,更形成了以数据驱动为核心的生产闭环,标志着煤炭开采从综合自动化向智能化发展方向。随着数字孪生、边缘计算等技术的深度应用,该协同系统将持续优化,为构建安全、高效、绿色的智能矿山提供核心支撑。

6 “空-天-地-井”多参量协同监测与分析技术

6.1 总体监测方案

10 m 超大采高工作面开采后,会引起井上下岩层移动与破坏、地下水变化及支护体受力变形等现象。为此,对工作面采前-采中-采后全过程、覆岩与地表全方位“矿压+微震+岩移+水文”多场多参量进行动态协同监测,如图 36 所示。通过分析监测数据揭示超大采高工作面矿压显现特征、覆岩破坏规律、地表移动变形规律,以及与地下水流场间的相互影响、协同关系,建立多参量协同分析方法,形成基于“应力-微震-岩移-水文”的超大采高工作面多场多参量协同监测融合分析技术^[49-50],为 10 m 超大采高工作面安全高效开采提供保障。

6.2 超大断面巷道围岩变形监测及分析

超大断面巷道采用预应力锚杆与锚索支护后,进行了巷道表面位移监测。巷道在掘进期间均未发生

明显变形,顶板离层几乎为 0。回采期间,巷道在超前采动影响下围岩也未发生明显变形,主运输巷仅在超前工作面距离小于 10 m 的局部范围内,煤柱帮出现小范围底角片帮、底板裂缝。回风巷在进入超前支架内局部出现轻微底臃、底板中间出现裂缝。主运输巷、回风巷超前采动影响区两帮及顶板均未发生明显变形。辅助运输巷受煤柱侧向支承压力影响,滞后工作面 20 m 煤柱帮底角附近出现小范围片帮,在滞后工作面 50 m 左右时,底板局部出现裂缝,巷道整体变形较小,顶底板移近量 140 mm 左右。超大断面巷道均达到良好的围岩变形控制效果。

6.3 工作面矿压监测及压裂卸压效果分析

6.3.1 顶板压裂裂缝监测及矿压显现对比分析

地面微地震监测是定量评估压裂缝网展布的有效方法,可分析水力裂缝的长度、宽度、高度及方位等空间发育特征和压裂改造范围。采用地面三分量智能节点地震仪及其配套数字采集系统实时记录微震波形数据,并通过 4G 网络实时上传至云服务器,每分钟收到新的波形数据自动更新显示并检测该波形中是否包含压裂微震事件,如果检测到微震事件,处理软件将自动对该事件进行定位并计算矩震级和能量^[51-54]。

F1~F4 钻场压裂裂缝监测结果如图 37 所示。单个钻场整体改造区域水力裂缝网络缝长为 490.3~853.5 m,缝宽为 266.6~386.3 m,低层位孔缝高 30~53 m,高层位孔缝高 27~62 m,压裂裂缝覆盖了设计

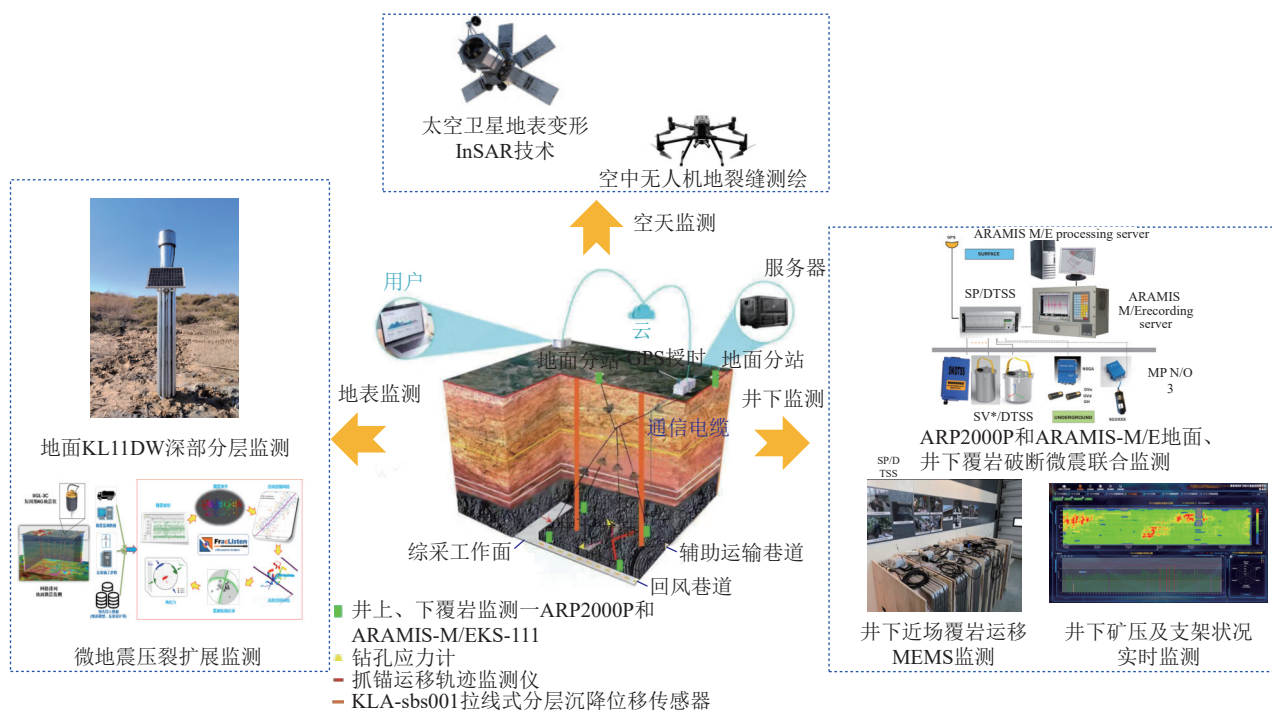


图 36 10 m 超大采高工作面多场多参量协同监测示意

Fig.36 Schematic diagram of multi-field and multi-parameter collaborative monitoring for working face with 10 m extra large shearing height

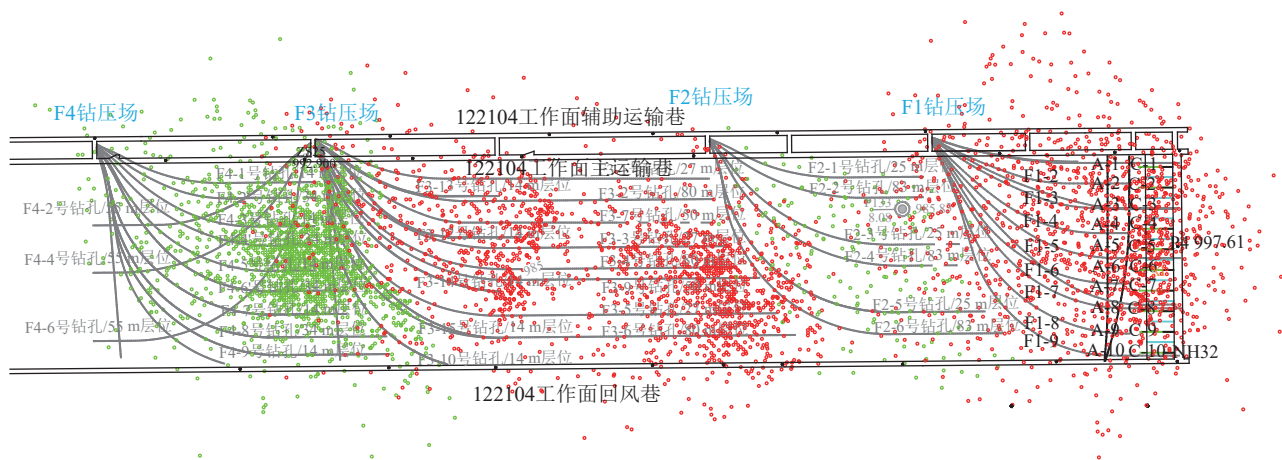


图 37 超大采高工作面 F1~F4 钻场压裂裂缝监测结果

Fig.37 Fracturing monitoring results of drilling field F1~F4 in working face with extra large shearing height

压裂的全部区域,达到了预期结果。

曹家滩煤矿 122106 和 122108 工作面初次来压步距均超过 150 m(图 38a),来压时能感受到小股飓风。实施水力压裂后的 122014 超大采高工作面初次来压步距缩小到 49.3 m(图 38b),工作面未发生动力现象。

另外,122104 工作面与未压裂的相邻工作面来压强度对比结果见表 2。压裂后周期来压步距均小于 25 m,未压裂工作面来压步距为 10~40 m,最大来压步距减少 37.5%;压裂后来压持续距离平均 8.35 m,未压裂工作面来压持续距离平均 11.5 m,来压持续距离减少了 27.4%;平均动载系数和最大动载系数分别降

低 13.3% 和 36.0%;支架平均不保压率降低 66.3%。

综上所述,压裂可有效减小工作面来压步距、来压持续距离和动载系数,改善支架工况,有效降低了强矿压风险,提高了液压支架的工作效率,进而保障了工作面的安全高效开采。

6.3.2 超高煤壁片帮特征分析

超大采高工作面所采煤层为脆性硬质煤层,煤壁片帮以拉裂式破坏为主,多呈现“半月”状和“斜台”状 2 种片帮形式(图 39)。“斜台”状片帮形式占比约 60%,半月状片帮形式占比约 40%,其中,工作面中部“斜台”状片帮形式明显多于工作面两侧,并且在来压

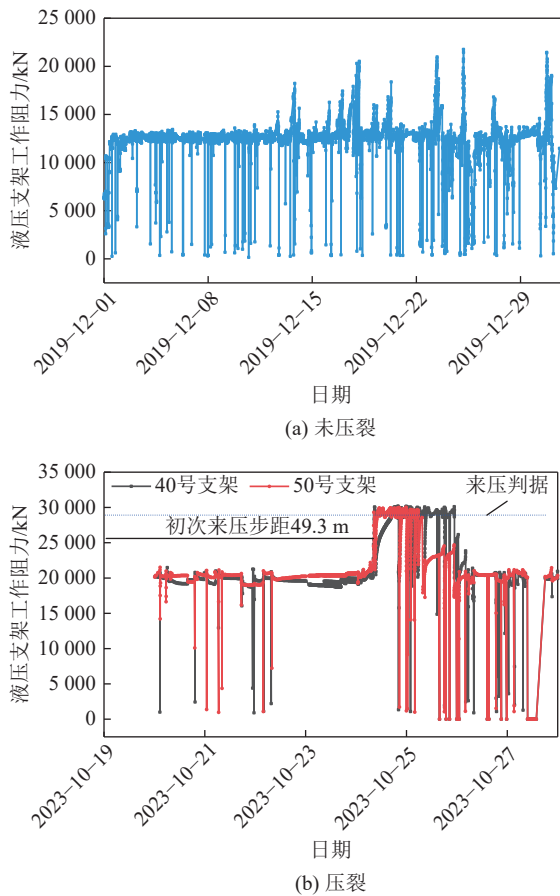


图 38 有无压裂液压支架阻力与来压步距分布

Fig.38 Distribution of shield load and weighting step distance with and without fracturing

期间煤壁上部煤体在顶板压力和动载作用下更容易发生滑移失稳。统计工作面煤壁片帮深度一般在 1.0 m 以下 (占比 91.8%), 通过超前拉架和及时护帮能够有效防控片帮; 压裂不充分的强来压期间, 工作面最大片帮深度为 2.0 m 左右。煤壁片帮在超大采高工作面回采过程中普遍存在, 通过顶板岩层压裂可明显缓解顶板高应力对超高煤壁的作用, 减小煤壁片帮程

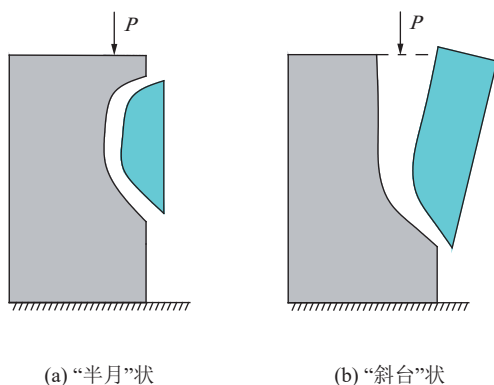


图 39 10 m 超大采高工作面煤壁片帮形式

Fig.39 Coal wall spalling forms in working face with 10 m extra large shearing height

表 2 10 m 超大采高工作面与相邻工作面来压强度对比
Table 2 Comparison of weighting strength between face with 10 m extra large shearing height and adjacent one

项目	未压裂	压裂
周期来压步距/m	10~40	小于25
来压持续距离/m	11.50	8.35
平均动载系数	1.66	1.41
最大动载系数	2.5	1.6
支架不保压率/%	3.5~28.2	0.7~10.0
支架平均工作阻力/kN	15 000~18 000	13 500~17 000

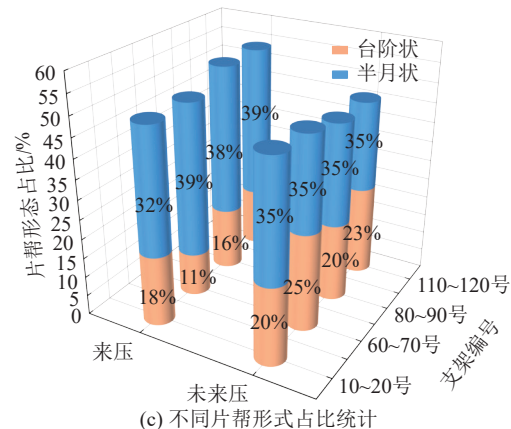
度和大块片帮煤的发生频次, 避免发生端面顶板冒落。

6.4 地表岩层移动监测及分析

地表移动监测主要利用无人机航测、卫星遥感和传统水准+全站仪测量等监测方式, 分别从剖面线和面域角度开展监测和分析。地表移动剖面线监测形式近似为直线型: 1 条长 1 188 m 的半走向观测线及长约 1 158 m 的 1 条倾斜观测线。现场布设观测点 129 个, 间距约 18 m, 控制点 6 个。地表移动观测点测桩高度 2.0 m。地表移动观测站累计进行日常高程水准观测 55 次, 平面全面观测 23 次。地裂缝分布形态采用 RTK 和钢尺观察。无人机航测采用大疆经纬 M300 RTK 高精度行业无人机, 激光雷达点云数据的获取采用大疆经纬 M300 无人机搭载禅思 L1 进行数据采集, 共完成 6 次无人机航测。遥感影像收集了 8 景覆盖曹家滩井田区域的 RADARSAT-2 卫星 SAR 影像。

根据工作面地表移动观测数据, 绘制地表移动和变形曲线, 其中, 各观测时段的走向观测线地表下沉曲线如图 40 所示。

1) 回采 1 000 m 区域内, 地表沉降主要分为 3 个区域: 开切眼上方地表到 A24 点, 范围长 39 m, 地表



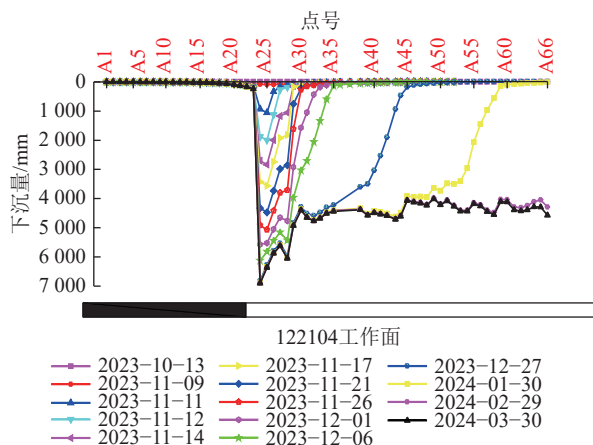


图 40 10 m 超大采高工作面走向观测线地表下沉曲线

Fig.40 Surface subsidence curves along strike line in working face with 10 m super large shear height

平均下沉约 211 mm; 距离开切眼 39~130 m 的 A24~A29, 平均下沉约 6 m, 最大下沉在 A24 点, 下沉量 6.9 m。距离开切眼 130~1 000 m 间的 A30~A66 点, 地表下沉量为 4.0 m~4.8 m, 平均下沉 4.4 m。可见, A24~A29 为回采 1 000 m 区域内地表下沉最大区域。

2) 开切眼附近 (A24~A29 点) 下沉曲线突变, 非常陡峭; 其他区域呈现连续渐变形态。

无人机航测第 5 期 (工作面推进 1 426 m) DEM 成果与第 1 期 DEM 相减结果, 得出地表沉陷变化云图, 如图 41 所示, 地裂缝结果如图 42 所示。

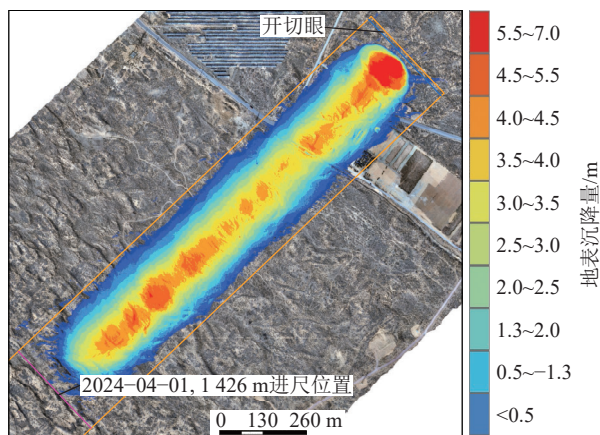


图 41 10 m 超大采高工作面地表下沉云图

Fig.41 Surface subsidence cloud map of working face with 10 m extra large shearing height

1) 地表沉陷范围沿开采方向不断呈环状扩大, 最大沉降量为 6.5 m 以上, 沿开采方向延伸约 30 m。

2) 地裂缝共 2 799 条, 最长 148 m, 最短 0.13 m; 长度在 50 m 以上的 19 条, 大体垂直于工作面开采方向; 裂缝最宽约 1 m, 分布在工作面范围的东北部。地裂缝分布形态近似椭圆, 长轴长度可达 1 050 m, 短轴约 280 m; 地裂缝间距在 15~50 m, 整体变化较小, 空

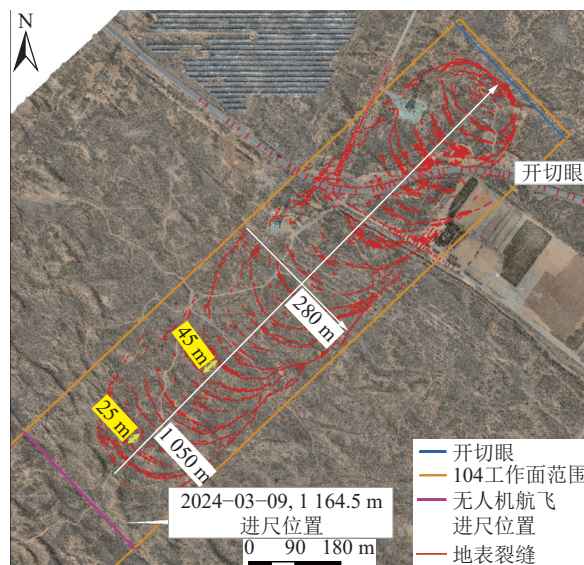


图 42 10 m 超大采高工作面地裂缝分布平面

Fig.42 Distribution plan of ground fissures in working face with 10 m extra large shearing height

间形态为圆弧形, 连续性较好。平行于开采方向的裂缝空间连续性较差, 长度集中在 20 m 以下。

6.5 多参量数据融合分析

6.5.1 覆岩运动与矿压融合分析

图 43 为 10 m 超大采高工作面中高位覆岩运动与工作面矿压显现关联对照。在测点进入采空区后方 33 m 之前, 煤层 13 m 以上岩层始终处于无位移量的悬顶状态, 其下方覆岩破断造成工作面发生二次小周期来压; 工作面推过测点 33 m 后, 煤层上覆 85 m 范围内顶板位移计从下至上依次开始发生缓慢下沉, 引发上方岩层从下至上依次发生下沉运动, 上覆岩层发生移时工作面发生大周期来压; 测点至采空区后方 42 m 时, 煤层顶板上覆 85 m 范围内岩层呈急剧下沉态势, 下沉量 329 mm, 工作面持续来压; 测点至采空区后方 45 m 处, 煤层上覆 85 m 范围内顶板进入暂时稳定阶段, 煤层顶板上覆 85~164 m 内岩层开始呈现急剧下沉趋势, 下沉量 282.3 mm, 下沉速度 256.6 mm/h, 工作面持续来压。

上述分析表明, 工作面煤层顶板上覆 13 m 以内岩层破断造成工作面小周期来压, 其上覆岩层在采空区后方处于长距悬顶状态, 中上部厚硬岩层同步破断运动, 造成工作面大周期来压。

6.5.2 地表裂缝与矿压融合分析

统计工作面 22 个周期来压位置的信息, 计算相邻二次来压的步距, 与相邻地裂缝间距对比, 工作面来压步距 12~45 m, 平均 23.10 m, 地裂缝间距 8~36 m, 平均 22.67 m, 工作面来压步距的变化趋势与地裂缝间距整体保持一致, 两者平均值接近, 表明随着

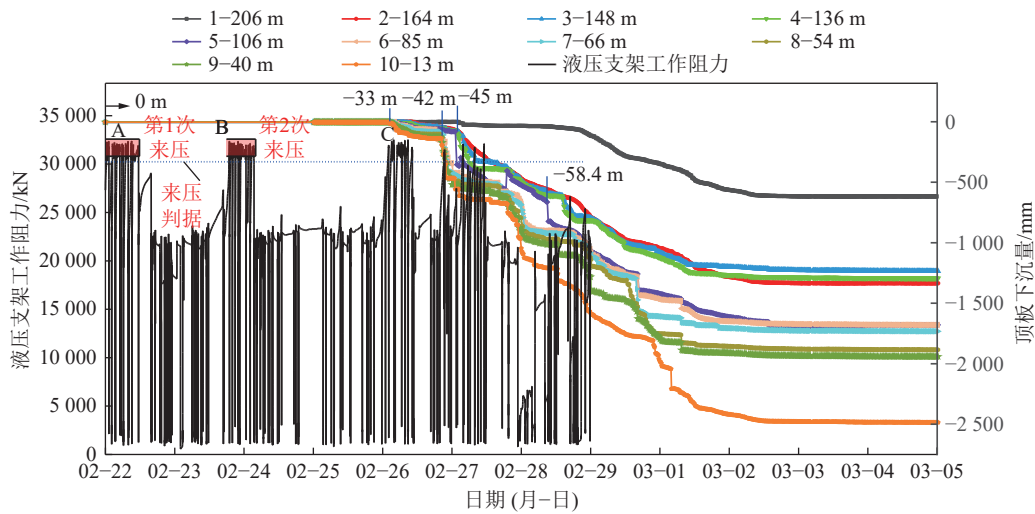


图 43 10 m 超大采高工作面覆岩运动与液压支架载荷协同分析曲线

Fig.43 Synergetic analysis curves of overburden movement and hydraulic support load on working face with 10 m extra large shearing height

工作面来压顶板岩层发生断裂,地表随之出现裂缝发育,且地裂缝发展滞后于工作面的推进位置。

10 m 超大采高工作面在推进过程中出现过数次强矿压现象,强矿压发生后地裂缝发育相对充分,如图 44 所示。当工作面推进至 254 m 时发生强矿压现象,此处位于地裂缝“O”型区的边缘,A 区裂缝明显发育密集,数量较多,但单条裂缝规模不大,裂缝长度不超过 20 m,宽度普遍小于 10 cm;当工作面推进至 440 m 时发生强矿压现象,导致 B 区地裂缝发育明显,同样表现为数量较多。

6.5.3 工作面矿压与水文融合分析

根据 10 m 超大采高工作面开采来压观测分析结果,对比工作面水文动态变化,发现工作面初次来压至回采二次见方期间,顶板来压与水文动态具有良好的

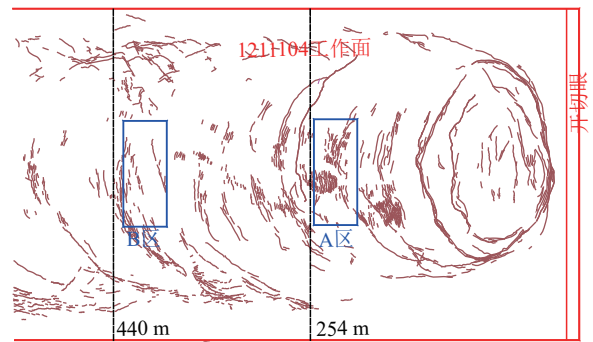


图 44 10 m 超大采高工作面强矿压位置与地裂缝位置关系

Fig.44 Relationship between the position of strong weighting and the position of ground fissures on working face with 10 m extra large shearing height

联动关系,如图 45 所示。工作面出现顶板来压之后

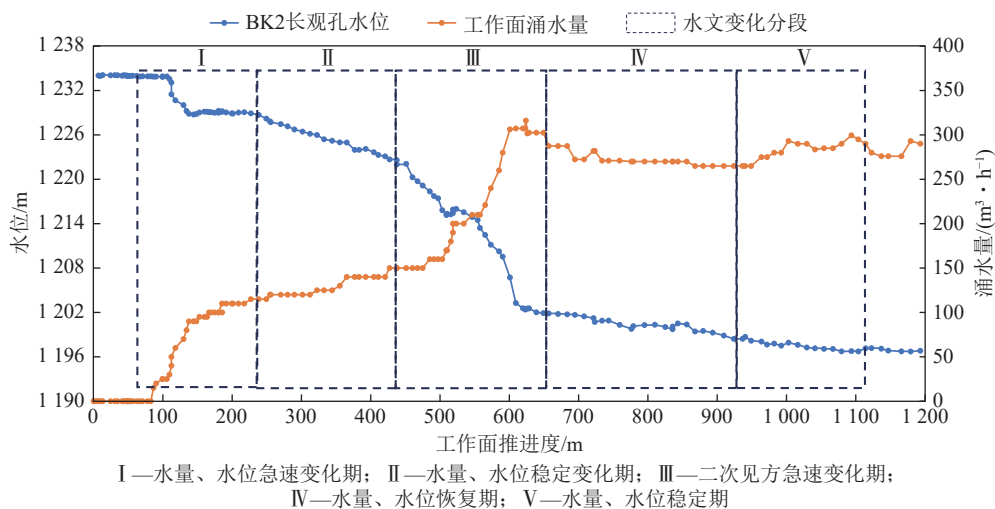


图 45 10 m 超大采高工作面推采期间涌水量及 BK2 基岩风化带观测孔水位变化曲线

Fig.45 Curves of water inflow and water level changes in the weathered zone aquifer on working face with 10 m super extra large shearing height

均出现了基岩风化带水位、工作面涌水量等水文动态的同步变化,尤其是各次顶板大周期来压前后均出现了基岩风化带含水层水位快速下降和涌水量较大增加。

7 10 m 超大采高工作面工业性试验情况

10 m 超大采高工作面从 2023 年 9 月开始试生产,2024 年 1 月正式生产。采用“支-卸”协同控制技术对超大采高工作面的强矿压显现和煤壁片帮问题实现了有效管控,初次来压步距 49.3 m,周期来压步距控制在 25 m 以下,煤壁片帮深度控制在 1.0 m 以下,对正常生产影响不大;工作面配套设备运转状态良好,满足了工作面开采需求,液压支架为工作面提供了安全可靠的作业空间,推进期间顶板及煤壁可控,采煤机最大牵引速度达 13.4 m/min,运输机保障了煤流顺畅运输。“空-天-地-井”多参量协同监测分析技术对工作面安全回采提供了有效保障。截至 2024-12-31,工作面推进长度 4 448 m,生产原煤 1 602 万 t,工作面井下状况如图 46 所示。工作面最大采高达 9.75 m,常态化开采高度为 9.2~9.5 m,最高日产量 7.18 万 t,最高月产量超过 155 万 t,回收率最高达到 95.3%。与综放工作面相比,回收率提高 10%。122104 工作面采完可多采出原煤 235 万 t,减少矸石 94 万 t。10 m 超大采高工作面实现了特厚煤层高产、高效、高回收率开采,取得显著的经济效益。



图 46 10 m 超大采高工作面井下状况

Fig.46 Underground state of working face with 10 m extra large shearing height

8 结 论

1) 超大采高综采是特厚煤层有效的开采技术。针对陕煤集团曹家滩煤矿 10 m 超大采高开采条件,综合考虑超大采出空间围岩控制、关键开采装备、智能协同控制技术等,提出 10 m 超大采高综采面临的三大难题:覆岩活动规律不清及围岩控制难度大、工作面关键开采装备研发难度大、重型装备智能化协同控制难度大,并提出有效的解决途径。

2) 针对 10 m 超大采高工作面强矿压、超高煤壁

稳定性控制,提出“主动强力支撑与防护+区域压裂卸压”支-卸协同围岩控制策略。在强力支护与防护方面,研发了超高阻力液压支架,支护阻力达到 29 000 kN,创新设计了“双层伸缩梁+三级护帮”机构;在压裂卸压方面,开发了 5 m³/min 大流量压裂成套设备与技术,为 10 m 超大采高工作面围岩控制提供了有效手段。

3) 研发了世界首套 10 m 超大采高工作面综采关键装备。强力液压支架采用整体顶梁型式、直径 630 mm 的抗冲击立柱及配套阀组,显著提高了支架的抗冲击性能;采煤机分区润滑与分布式冷却方案提高了大仰角长摇臂采煤机截割可靠性;高可靠中部槽、下链道悬链及慢变动力启动提高了超大运量刮板输送机对超大采高工作面煤流运输的适应性。

4) 超大采高重型开采装备群智能协同控制技术从采煤机、刮板运输机、液压支架等设备的单体控制方法着手研究,设计了满足控制策略的供液和供电系统,提出了液压支架自适应跟机算法,建立了多机协同自适应控制模型,研发了超大采高工作面装备控制智能决策支持平台,支撑了工作面“三机一泵”的协调、调度与控制决策。

5) 构建了基于“微震-岩层移动-应力-水文”的超大采高工作面多场多参量协同监测融合分析系统,实现了工作面覆岩破坏、地表移动变形、地下水流程和矿压显现间的多元异构数据融合分析。

6) 10 m 超大采高工作面关键技术与装备在曹家滩煤矿得到成功应用,实现了 10 m 特厚煤层高产、高效、高回收率开采,取得了显著的经济效益,推动了开采高端装备制造的升级,引领了国内外特厚煤层高效智能开采技术的发展方向。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html. 2025-02-28.
- [2] 康红普, 徐刚, 王彪, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 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.
- [3] 王国法, 杜毅博, 徐亚军, 等. 中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践: 纪念《煤炭科学技术》创刊 50 周年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1-18.
WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, et al. Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publication of Coal

- Science and Technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1–18.
- [4] 杨俊哲. 8 m 大采高综采工作面关键回采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 9–14.
YANG Junzhe. Research on key mining technology of fully-mechanized working face with 8 m large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 9–14.
- [5] 徐刚, 张震, 杨俊哲, 等. 8.8 m 超大采高工作面支架与围岩相互作用关系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1462–1472.
Xu Gang, ZHANG Zhen, YANG Junzhe, et al. Interaction between support and surrounding rock in 8.8 m super mining height working face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1462–1472.
- [6] 杨俊哲. 8.8 m 智能超大采高综采工作面关键技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 116–124.
YANG Junzhe. Key technologies and equipments for 8.8 m intelligent super large mining height fully-mechanized mining face mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 116–124.
- [7] SINGH R. Staggered development of a thick coal seam for full height working in a single lift by the blasting gallery method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 745–759.
- [8] PENG Syd S. 长壁开采[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] 丁飞. 超大采高综采工作面支护技术与装备研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
DING Fei. Research on supporting technology and equipment in ultra large height mining face[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [10] 高有进. 6.2 米液压支架关键技术研究及优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
GAO Youjin. Key technology investigation and optimizational design of 6.2 m hydraulic support[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [11] 袁永, 屠世浩, 王瑛, 等. 大采高综采技术的关键问题与对策探讨[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 4–8.
YUAN Yong, TU Shihao, WANG Ying, et al. Discussion on key problems and countermeasures of fully mechanized mining technology with high mining height[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 4–8.
- [12] 刘涛. 厚煤层大采高综采技术现状[J]. 煤炭工程, 2002, 34(2): 4–8.
LIU Tao. Present situation of large mining height fully mechanized mining technology in thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2002, 34(2): 4–8.
- [13] 王国法. 大采高技术与大采高液压支架的开发研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(1): 1–4.
WANG Guofa. Research on mining technology with high mining height and development of powered support for high mining height[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(1): 1–4.
- [14] 韩会军, 王国法, 李明忠, 等. 超大采高综采工作面支护技术及装备研究现状[J]. 煤矿安全, 2024, 55(5): 213–221.
HAN Huijun, Wang Guofa, Li Mingzhong, et al. Present situation of support technology and equipment in fully mechanized mining face with supermining height[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(5): 213–221.
- [15] 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.
- [16] 庞义辉. 超大采高液压支架与围岩的强度耦合关系[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
PANG Yihui. Hydraulic support and surrounding rock strength coupling relationship in ultra large mining height face[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [17] 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.
- [18] 高有进. 8.8 m 液压支架设计与制造关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 15–20.
GAO Youjin. Study on design and manufacturing key technology of 8.8 m hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 15–20.
- [19] 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.
- [20] 王忠宾, 李福涛, 司垒, 等. 采煤机自适应截割技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 296–311.
WANG Zhongbin, LI Futao, SI Lei, et al. Research progress and development trends in adaptive cutting technology for shearers[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 296–311.
- [21] 黄忠, 黄志增, 范志忠. 我国大采高综采技术与装备发展现状及展望[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 22–30.
HUANG Zhong, HUANG Zhizeng, FAN Zhizhong. Development and prospect of large mining height longwall mining technology and equipment in China[J]. Coal Engineering, 2024, 56(10): 22–30.
- [22] 康红普. 煤岩体地质力学原位测试及在围岩控制中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] 康红普, 司林坡. 深部矿区煤岩体强度测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1312–1320.
KANG Hongpu, SI Linpo. Test and analysis of coal and rock mass strength in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1312–1320.
- [24] 康红普, 司林坡, 苏波. 煤岩体钻孔结构观测方法及应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1949–1956.
KANG Hongpu, SI Linpo, SU Bo. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1949–1956.

- [25] 弓培林. 大采高采场围岩控制理论及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
GONG Peilin. Surrounding Rock control theory and application study of the coal face with greater mining height[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.
- [26] 弓培林, 靳钟铭. 大采高综采采场顶板控制力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 193–198.
GONG Peilin, JIN Zhongming. Mechanical model study on roof control for fully-mechanized coal face with large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 193–198.
- [27] 弓培林, 靳钟铭. 大采高采场覆岩结构特征及运动规律研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 7–11.
GONG Peilin, JIN Zhongming. Study on the structure characteristics and movement laws of overlying strata with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 7–11.
- [28] 徐刚, 范志忠, 张震, 等. 综采工作面顶板灾害防控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [29] 徐刚, 黄志增, 范志忠, 等. 工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 1–11.
XU Gang, HUANG Zhizeng, FANG Zhizhong, et al. Types, monitoring and prevention technology system of roof disasters in mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 1–11.
- [30] 黄庆享, 马龙涛, 董博, 等. 大采高工作面等效直接顶与顶板结构研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 541–546, 610.
HUANG Qingxiang, MA Longtao, DONG Bo, et al. Research on equivalent immediate roof and roof structure of large mining height face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(5): 541–546, 610.
- [31] 黄庆享, 刘文岗, 田银素. 近浅埋煤层大采高矿压显现规律实测研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(3): 58–59, 118.
HUANG Qingxiang, LIU Wengan, TIAN Yinsu. Field measurement study on mine pressure behavior law of large mining height in near shallow coal seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003(3): 58–59, 118.
- [32] 黄庆享, 刘建浩. 浅埋大采高工作面煤壁片帮的柱条模型分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 187–191.
HUANG Qingxiang, LIU Jianhao. Vertical slice model for coal wall spalling of large mining height longwall face in shallow seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 187–191.
- [33] 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.
- [34] 尹希文, 闫少宏, 安宇. 大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 222–225.
YIN Xiwen, YAN Shaohong, AN Yu. Characters of the rib spalling in fully mechanized caving face with great mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 222–225.
- [35] 尹希文. 我国大采高综采技术及围岩控制研究现状[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 37–45.
YIN Xiwen. Research status of strata control and large mining height fully-mechanized mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 37–45.
- [36] 许家林, 鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1547–1556.
XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1547–1556.
- [37] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵, 等. 7.0 m 支架综采面矿压显现规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 344–350, 356.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Strata behavior of fully-mechanized face with 7.0 m height support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 344–350, 356.
- [38] 杨胜利, 孔德中. 大采高煤壁片帮防治柔性加固机理与应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1361–1367.
YANG Shengli, KONG Dezhong. Flexible reinforcement mechanism and its application in the control of spalling at large mining height coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1361–1367.
- [39] 杨胜利, 王兆会, 吕华永. 大采高采场周期来压顶板结构稳定性及动载效应分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 315–322.
YANG Shengli, WANG Zhaohui, LYU Huayong. Analysis of structure stability of main roof and dynamic loading effect during periodic weighting in a large mining height stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 315–322.
- [40] 康红普, 姜鹏飞, 刘畅. 煤巷智能快速掘进技术与装备的发展方向[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(2): 5–7.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, LIU Chang. Development of intelligent rapid excavation technology and equipment for coal mine roadways[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 5–7.
- [41] 康红普, 姜鹏飞, 刘畅, 等. 煤巷锚杆支护施工装备现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 1–18.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, LIU Chang, et al. Current situation and development trend of rock bolting construction equipment in coal roadway[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 1–18.
- [42] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1–30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1–30.
- [43] 康红普, 冯彦军, 张震, 等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 31–44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 31–44.

- [44] 康红普, 冯彦军, 赵凯凯. 煤矿岩层压裂技术与装备的发展方向[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 5–8.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHAO Kaikai. Development trends in hydraulic fracturing technology and equipment for strata control in underground coal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 5–8.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 赵娇娇. 基于粗糙神经网络的采煤机-刮板输送机协同调速方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
ZHAO Jiaojiao. Research on the cooperative speed regulation method of shearer and scraper conveyor based on rough neural network [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [48] 欧阳敏. 两柱放顶煤液支架顶梁承载状态及智能监控技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
OUYANG Min. Research on bearing state and intelligent monitoring technology of top beam of hydraulic support for two-pillar top coal caving[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [49] 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 402–413.
LI Quansheng, LI Xiaobin, ZHANG Kai, et al. Rock strata mining damage monitoring and application based on “space-sky-surface” integrated technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 402–413.
- [50] 张玉军, 尹希文, 邓伟男, 等. 采煤沉陷区灾害空天地孔一体化监测技术与平台[J]. 智能矿山, 2022, 3(3): 46–52.
ZHANG Yujun, YIN Xiwen, DENG Weinan, et al. Integrated space-air-ground-hole monitoring technology and platform for mining subsidence disasters[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(3): 46–52.
- [51] 徐刚, 陈法兵, 张振金, 等. 井上下微震联合监测震源垂直定位精度优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 80–88.
XU Gang, CHEN Fabing, ZHANG Zhenjin, et al. Study on optimization of vertical location accuracy of seismic source based on joint monitoring of surface and underground micro-seismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 80–88.
- [52] 王书文, 智宝岩, 杜涛涛, 等. 厚硬顶板潜在矿震风险地面压裂预控技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 1–11.
WANG Shuwen, ZHI Baoyan, DU Taotao, et al. Ground fracturing pre-control technology for potential mine seismic risk of thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 1–11.
- [53] 张军, 赵琛, 王建立, 等. 不同倾角煤层气井的水力压裂微震监测[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1166–1175.
ZHANG Jun, ZHAO Chen, WANG Jianli, et al. Microseismic monitoring for hydraulic fracture of coalbeds with different dips[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1166–1175.
- [54] 温颖远, 郭志刚, 曹安业, 等. 基于微震数据评价的顶板深孔爆破卸压效果分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 57–63.
WEN Yingyuan, GUO Zhigang, CAO Anye, et al. Analysis of pressure relief effect of roof deep hole blasting parameters based on micro-seismic data evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 57–63.