



神东矿区亿吨矿井群智能绿色开采研究与实践

张传玖 罗文 孟永兵 汪腾蛟 白正平 冯晓斌 曹军 任永强 李鹏 王巍

引用本文：

张传玖, 罗文, 孟永兵, 等. 神东矿区亿吨矿井群智能绿色开采研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 56–86.
ZHANG Chuanjiu, LUO Wen, MENG Yongbing. Research and practice of intelligent-green mining in the billion-ton mine cluster of Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 56–86.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2025-0698>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国能神东煤炭集团重大科技创新成果与实践

Major scientific and technological innovation achievements and practices of CHN Shendong Coal Group
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 1–43 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0008>

神东矿区薄煤层安全高效开采技术研究

Study on safety and efficient mining technology of thin coal seam in Shendong mine area
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a06f32fb-d464-4703-824a-dda985e50869>

深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践

Key technologies and practices for safe, efficient, and intelligent mining of deep coal resources
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 52–64 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1794>

神东矿区人工智能安全生产管控平台应用研究

Research on application of artificial intelligence safety production management and control platform in Shendong mining area
煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 275–283 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0102>

浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践

Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups
煤炭科学技术. 2024, 52(9): 19–30 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1095>

我国煤矿智能化技术十年发展与实践

Ten-year development and practice of coal mine intelligentization technology in China
煤炭科学技术. 2025, 53(7): 1–24 <https://doi.org/10.12438/est.2025-0594>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张传玖,罗文,孟永兵,等.神东矿区亿吨矿井群智能绿色开采研究与实践[J].煤炭科学技术,2025,53(8):56-86.

ZHANG Chuanjiu, LUO Wen, MENG Yongbing, et al. Research and practice of intelligent-green mining in the billion-ton mine cluster of Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 56-86.



张传玖,男,四川达州人,高级工程师,硕士。现任国能神东煤炭技术研究院院长、矿压研究重点实验室主任,兼任中国煤炭工业协会物探技术与装备工程研究中心副主任、中国矿山安全学会冲击地压防治专业委员会委员,河南理工大学、华北科技学院兼职教授。深耕煤矿开采技术与安全管理一线,聚焦矿压防治、冲击地压防控等核心领域,创新攻克富水坚硬顶板多场耦合条件下冲击地压防治技术难题,填补新疆地区复杂地质条件矿压防控技术空白,主持研究的冲击地压“六位一体”综合防治体系成果写入《煤矿安全规程》和《防治煤矿冲击地压细则》;主持省部级重点研发计划2项、国家能源集团重大科研项目10余项,系统性构建神东矿压智能监测与灾害防控技术体系,授权发明专利8项、软件著作权3项,主持申报省级工法1项,发表高水平论文25篇,参与制定行业技术标准2项;曾获中国煤炭青年科技奖及省部级、行业协会科技奖励8项(一等奖4项、二等奖4项)。

神东矿区亿吨矿井群智能绿色开采研究与实践

张传玖,罗文,孟永兵,汪腾蛟,白正平,冯晓斌,曹军,任永强,李鹏,王巍
(国能神东煤炭集团有限责任公司,陕西神木 719315)

摘要:为达成亿吨矿井集群的安全、智能高效及绿色开采的目标,神东公司依靠技术和管理创新,发展新型集约化生产模式,形成了世界第一大亿吨矿井群,为煤炭行业树立了煤炭工业现代化发展的先进典范。系统介绍了神东公司近10 a以来针对亿吨矿井群开发的科技创新成果:在亿吨矿井群安全生产技术方面,研制了超大采高综采面顶板控制技术,采用定向钻孔水压致裂技术软化顶板坚硬岩层,研发并推广了无煤柱开采技术,实现了近距离煤层群及复合区煤层的安全开采,开发了矿压预警平台,实现了富水顶板下的安全开采;在亿吨矿井群智能高效开采技术方面,神东公司研发了8.8 m超大采高综采工作面成套装备及技术,研制了双巷快速掘进技术工艺系统,创新了全断面盾构法施工斜井装备及技术,研发了短壁机械化开采技术和薄煤层等高式采煤技术,创新了智能化运输系统,形成了以跟机自动化、远程干预、智能割煤(记忆割煤-预测割煤-自主割煤)、线缆智能联动为核心特征的智能化开采技术,建成了上湾千万吨级智能化选煤厂示范点,形成了神东矿区全面建成智能化选煤厂规划框架,制定了“矿井设备数据接口与协议”数据通信标准,首次提出并实现了“一网一站”系统建设构想,率先引入了矿用鸿蒙操作系统,并构建了亿吨级智能生产管控平台;在亿吨矿井群绿色开采技术方面,构建了生态环境保护与修复技术体系,研发了微生物生态修复技术及多维度废物再利用技术,建成了多个国家级生态修复示范基地,实现了亿吨矿井群资源与环境的协调开发;在亿吨矿井群全面管理技术方面,建立了集质量(工作质量、服务质量、管理质量)、安全、健康、环保等为一体的标准化、精益化和专业化的综合性管理体系,形成了先进的煤炭行业全面管理技术,对亿吨矿井群的生产经营起到了重要作用。研究成果为煤炭工业实现自主创新提供了借鉴,为我国大型煤炭基地的规划、建设与发展起到了积极示范和引领作用。

关键词:国能神东煤炭集团;亿吨矿井群;安全生产技术;智能高效开采技术;绿色开采技术;全面管理技术

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)08-0056-31

收稿日期:2025-05-21 策划编辑:常琛 责任编辑:钱小静 DOI:10.12438/cst.2025-0698

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52474093);应急管理部重点科技计划资助项目(2024EMST070701);国家科技重大专项资助项目(2024ZD1700200)

作者简介:张传玖(1983—),男,四川达州人,高级工程师。E-mail:408269210@qq.com

Research and practice of intelligent-green mining in the billion-ton mine cluster of Shendong Mining Area

ZHANG Chuanjiu, LUO Wen, MENG Yongbing, WANG Tengjiao, BAI Zhengping,
FENG Xiaobin, CAO Jun, REN Yongqiang, LI Peng, WANG Wei

(Shendong Coal Group of China Energy Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

Abstract: In order to achieve safe, intelligent, efficient and green mining in the billion-ton mine cluster, Shendong relies on technological and management innovations, develops a new intensive production model, forms the world's first billion-ton mine cluster, and sets up an advanced model of modernization and development of the coal industry for the coal industry. Based on this, the scientific and technological innovations developed by Shendong in the past ten years for the billion-ton mine clusters are systematically introduced: In terms of safe production technology for ten million-ton mine cluster, it has developed the peripheral rock control technology for the extra-high comprehensive mining face, adopted the directional drilling hydraulic fracturing technology to soften the hard rock layer on the roof, developed and promoted the coal pillar-less mining technology to realize the safe mining of the coal seam cluster in close proximity and the coal seam in composite areas, developed the mine pressure early warning platform to realize the safe mining under the water-rich roof slab. In terms of intelligent and efficient mining technology for billion-ton mine cluster, Shendong has developed complete sets of equipment and technology for 8.8 m large-height comprehensive mining face, developed double-channel fast-digging technology and process system, innovated equipment and technology for inclined shafts constructed by the full-section shield method, and researched and developed mechanized mining technology for short-walls and contour-type coal-mining technology for thin seams, which has improved the efficiency of digging, and it has innovated an intelligent transportation system, formed intelligent mining technology with automation of following machines, remote intervention, intelligent coal cutting (memory coal cutting, predictive coal cutting and autonomous coal cutting) and intelligent linkage of cables as its core features. It has constructed a billion-ton intelligent coal processing plant demonstration site in Shangwan, and formed a planning framework for the comprehensive construction of intelligent coal processing plants in Shendong mining area, and formulated the data communication standard of “data interface and protocol for mining equipments”, For the first time, it proposed and realized the concept of “one network, one station” system construction, and taken the lead in introducing the Hongmeng operating system for mines, built a 100 – million – ton intelligent production control platform. In terms of green mining technology for billion-ton mine cluster, it has constructed an ecological environmental protection and restoration technology system, developed microbial ecological restoration technology and multi-dimensional waste reuse technology, and built a number of national ecological restoration demonstration bases, realizing the coordinated development of ten million tons of resources and the environment in the mine cluster. In terms of comprehensive management technology for billion-ton mine cluster, it has established a comprehensive management system integrating quality (work quality, service quality, management quality), safety, health, environmental protection, etc., formed an advanced comprehensive management technology in the coal industry, which plays an important role in the production and operation of ten million-ton mine cluster. The research results provide a reference for the coal industry to realize independent innovation, and play a positive demonstration and leading role in the planning, construction and development of large-scale coal bases in China.

Key words: Shendong Coal Group of China Energy; billion-ton mine cluster; safe production technology; intelligent and efficient mining technology; green mining technology; total management technology

0 引言

近年来,在国家“双碳”战略指引下,我国煤矿行业正经历由传统开采向现代化转型的深刻变革,随着安全高效煤矿建设的深入开展,煤矿的技术装备水平和安全保障能力有了显著提升^[1-3]。为推动高效、安全、绿色、智能的现代化安全高效煤矿建设体系的发展,国能神东煤炭集团有限责任公司(以下简称“神东公司”)深入践行习近平总书记“矿山行业绿色低碳,安全高质量发展”的重要指示精神,以建设安全高效现代化煤矿体系为突破口,通过系统性推进智能化升级、绿色化改造和安全保障能力建设,走

出了一条具有行业示范价值的高质量发展道路^[4-5]。基于此,神东公司依靠技术和管理创新,发展新型集约化生产模式,形成了世界第一大亿吨矿井群,通过集中管理,实现了大型矿区的规模化开采与资源的高效利用,保障了能源安全与稳定供应,推动了智能绿色化开采技术的应用,带动了区域经济发展,并为煤炭行业树立了煤炭工业现代化发展的先进典范。

目前,煤炭仍是我国主体能源,对保障经济社会平稳运行、支撑新能源发展、确保国家能源安全具有重要意义^[6-9],然而随着科学技术的发展,如何深化煤炭供给侧结构性改革、科学适度开发煤炭资源、确保煤炭供给体系质量以及提高煤炭资源的开采效率和

利用率成为神东公司必须面临的问题^[10-11]。同时,安全生产成为煤炭企业的核心,神东的安全管理虽然已经取得较大进步,但是还存在安全发展理念不牢固、安全基础总体薄弱等问题,矿井灾害预防方面缺乏安全智能预警系统,统筹发展和安全,实现亿吨矿井集群安全发展已成为神东公司建设的第一要务^[12]。此外,神东矿区地处黄土高原丘陵沟壑区与毛乌素沙漠过渡地带,原生环境十分脆弱,大规模煤炭开采与脆弱生态环境的矛盾突出,落实生态保护红线、黄河流域生态保护和高质量发展的任务十分艰巨,煤炭开采与生态环境保护成了急需解决的难题^[13-15]。而且新一轮科技革命和产业革命正在深入发展,在现有智能化技术和装备的基础上,助力神东矿区安全高效煤矿进入智能化发展快车道,推进智能化矿山建设,实现传统选煤向智能选煤的跨越,也成为神东公司未来发展的目标。

因此,实现亿吨矿井集群的安全生产、高效智能及绿色开采,成为解决这些问题的工作核心。为了达成这一目标,神东公司进一步创新了大采高国产成套综采装备及全断面快速掘进装备,研发了顶板弱化改性技术及矿压预警平台,开发了地下水资源

洁净储存、采损区生态修复及水土保持监测技术,推进了机器人技术、信息技术及智能管控技术的应用,建立了集质量、安全、健康、环保等为一体的综合性管理体系,这些措施有利于提高煤矿安全保障能力,提升煤炭企业的整体竞争力。基于此,文章系统地论述了神东公司近10 a以来针对亿吨矿井群开发的科技创新成果,总结了在亿吨矿井群安全开采、高效智能开采与分选、绿色开采、全面管理等技术方面开展的研究与应用。为煤炭工业实现自主创新提供借鉴,也为我国能源安全战略实施提供重要的技术支撑和工程示范。

1 神东矿区资源赋存条件与挑战

1.1 神东矿区资源赋存条件

神东矿区井田面积1 027.82 km²,截止2021年保有地质储量123.43亿t,可采储量77.17亿t,位于鄂尔多斯大型聚煤盆地的东北部,其井群分布如图1所示^[16]。煤田开采规划区内地面广泛覆盖着现代风积及第四系土,主要含煤地层中下侏罗统延安组(J1~2Y)分布广泛、含煤丰富。区内地质构造简单,全区总体以单斜构造为主,断层发育较少。煤层

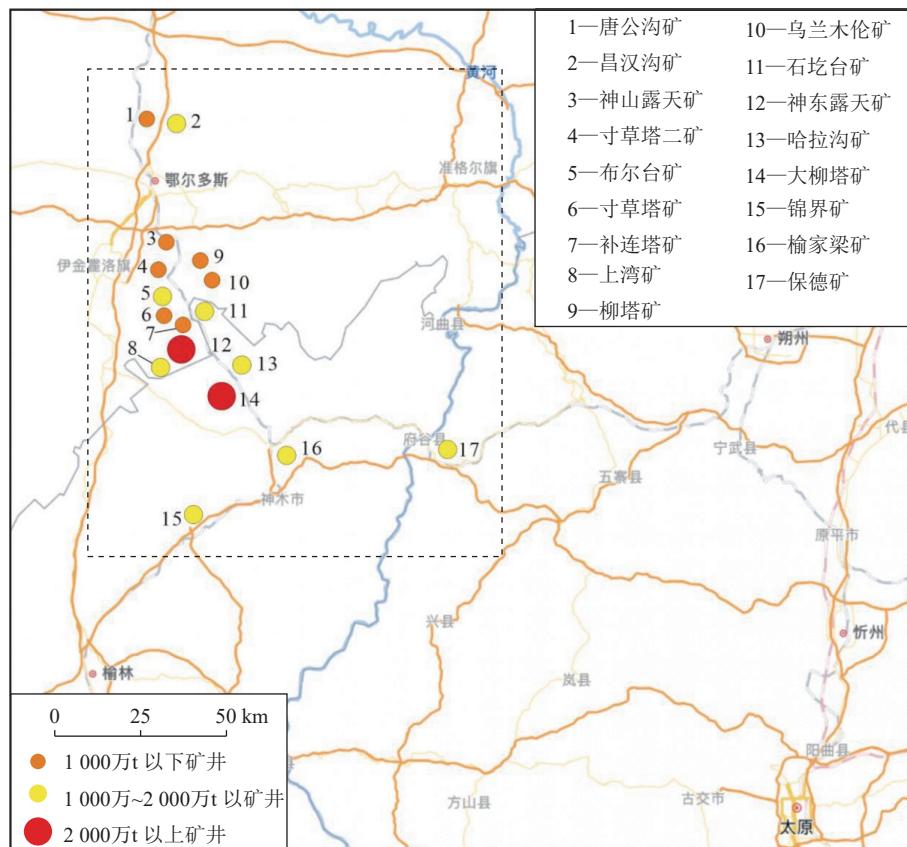


图1 神东集团亿吨矿井群

Fig.1 The billion-ton mine cluster of Shenhua Coal Group

埋藏浅, 平均地表以下 70 m 左右即可见到煤层。各主要煤层均属特低灰、特低硫、特低磷、中高发热量、高挥发分的长焰煤和不黏煤。该含煤地层延安组由中、厚层砂岩和中、薄层泥岩组成, 厚 150~280 m, 主采煤层一般 3~6 层, 主要是侏罗系一套绿色砂岩、泥岩与煤层的互层, 从上到下可分为 5 个含煤组, 有 13 个煤层, 其中可采煤层 7~9 个, 总厚度超过 30 m。且煤层赋存稳定, 主要可采煤层平均厚度 4~6 m, 煤层硬度大 ($f \geq 3$), 韧性高 (韧性系数达 8), 具有浅埋深 (30~245 m)、薄基岩、厚松、富潜水的赋存特点和易开采的优势。煤层上覆基岩主要由砂岩和泥岩组成, 多属于中等~难冒落型顶板, 适合建设特大型高产高效现代化矿井。

1.2 神东矿区面临的挑战

神东矿区亿吨矿井集群作为我国煤炭行业标杆性矿区, 在以下四方面仍存在亟待解决的系统性挑战:

1) 安全生产方面。① 亿吨矿井集群的灾害防治难度较大。随着开采深度的增加和规模扩大, 亿吨矿井集群面临顶板垮塌、透水、瓦斯超限、火灾等灾害风险, 且灾害耦合性增强, 防治难度加大; ② 应急救援体系智能化程度不足。缺乏智能化应急响应平台和装备支撑, 现有管理体系与工业互联网融合深度不够, 安全管理数字化水平也有待提升; ③ 监测设备适应性不足。亿吨矿井集群的矿井作业环境更为复杂, 如高温、高压等恶劣条件, 传统监测设备难以稳定运行, 且传感器网络部署复杂, 数据采集和传输困难, 难以满足实时、准确监测的需求。

2) 智能高效开采方面。① 装备智能化适配性较低。亿吨矿井群的煤层赋存条件更为复杂, 针对不同类型煤层的高效开采工艺标准化、智能化开采的关键技术尚未完全突破, 现有采掘设备对多样化地质条件的适应能力有限; ② 掘进效率与成本矛盾较为突出。万吨掘进率优化面临工艺革新与装备升级双重压力; ③ 亿吨矿井群的系统协同与集成存在难题。系统集成复杂度较高, 各部门的互联网平台整合具备一定的障碍, 各子系统存在“数据孤岛”, 无法统一; ④ 机器人应用场景存在局限性且井下特殊工况对智能装备的可靠性要求远超当前技术水平; ⑤ 缺少亿吨级矿井群协同运行的智能化标准体系。矿井集群中不同设备、系统之间的协同性差, 各设备控制系统厂家不同, 网口协议不统一, 难以实现各控制系统的数据相互调用和集中控制。

3) 生态环境协同治理方面。① 绿色开采技术研发不足。现有工艺不能完全适应亿吨矿井群的煤矿

高效绿色开采要求, 集中体现在地表沉陷、地下水破坏、煤矸石处理及生态修复技术等方面, 除此之外, 生态补偿机制与跨领域协同治理体系也亟待完善; ② 黄河流域生态保护与生产需求矛盾突出, 能源结构转型中传统能源与新能源协同机制缺失, 碳汇技术产业化受限于固碳效能的低经济转化尚不明确; ③ 生态成本的控制优化存在难题。传统开采方案未充分考虑生态成本, 难以控制煤矿开采对环境的损害以及量化生态保护成本与碳排放之间的关系。

4) 综合性管理方面。① 协同管理难度大。跨部门/跨矿区流程标准化缺失, 制度执行偏差率较高, 现有标准难以支撑新型技术体系的规模化应用, 容易出现信息不对称、责任不清、协调不畅等问题, 导致运营效率降低; ② 人员管理与培训体系不完善。亿吨矿井集群的智能化、绿色化发展对从业人员的素质要求提高, 但目前人员培训体系不完善, 关键岗位技能匹配度不足, 人才结构失衡; ③ 管理模式创新不足。传统管理模式难以适应智能化、绿色化亿吨矿井集群的管理需求, 缺乏与之相匹配的组织架构、管理流程和制度体系, 专业化管理技术创新滞后, 矿业资产组合的动态优化能力不足, 合理的规范化和专业化管理, 才能有效改善和提升生产经营管理水平, 亟需建立一种集质量、安全、健康、环保等为一体的综合性全面管理体系。

2 神东公司亿吨矿井群安全生产技术的研究与实践

针对亿吨矿井集群的顶板垮落、水害、瓦斯超限、粉尘爆炸及煤自燃等复杂灾害防治问题, 神东公司利用了多样化的顶板灾害防治技术, 开发了富水顶板防治水技术以及清污分离技术, 创建了“高产高效”模式压力下的 $4\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 大涌水量排水技术, 构建了亿吨矿井全生命周期煤与瓦斯协同开采与利用技术体系, 并根据各个产尘环节的不同特点形成了多重连环综合防尘技术体系, 以及采取了 JSG4 束管监测预报、以“快”防灭火、注浆、注氮等煤层自燃综合防灭火技术, 实现了不同开采方式下的顶板安全控制, 矿井水害的有效防治, 井下采空区、探放水等清水和矿井污水的清污分流, 维护了职员的安全健康, 防治了矿井群火灾的发生, 保障了神东矿区亿吨矿井集群的安全生产。

2.1 神东公司亿吨矿井群顶板灾害防治技术

2.1.1 超大采高综采面顶板控制技术

综采工作面的端面漏冒是煤矿生产中较为常见

的事故,它不仅直接影响到工作面的产量和安全生产,而且会增加煤炭的含矸率,对生产的危害较大^[17-18]。在采高较大的开采条件下,更易造成煤壁片帮加剧并引起端面空顶空间的增大,从而导致大采高综采工作面端面漏冒问题更为突出,如图2所示。

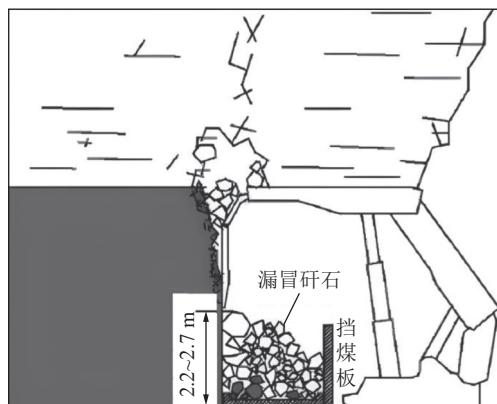


图2 端面漏冒示意

Fig.2 Schematic diagram of end face leakage

基于此问题,神东矿区经过数10 a的经验总结,形成一套能快速处理端部冒顶的技术手段,主要通过往顶板漏冒区域灌注马丽散。马丽散是一种低黏度,双组分合成高分子材料,在封堵裂隙加固煤岩层时,若不含水产品膨胀倍数为2~4倍;在遇水或掺水后十几秒内会发生反应,发生膨胀,能迅速封堵水流,形成的泡沫不溶于水,具有良好的抗压性能,在膨胀压力的作用下产生二次渗压(膨胀倍数可达到20~25倍),高压推力与二次渗压将马丽散压入并充满所有缝隙,从而达到止漏目的,此时其抗压强度介于25~38 MPa,为后续工作面的安全开采创造了有

利条件。

2.1.2 坚硬顶板弱化改性顶板控制技术

神东矿区煤层赋存具有埋藏浅、基岩薄、基本顶为单一关键层结构的特点,属典型浅埋煤层^[19]。综采工作面初采时,顶板坚硬难以及时垮落,容易在采空区形成大面积悬顶,一旦突然来压,顶板大面积垮落,会产生飓风,影响工作面的安全生产。因此,为有效降低围岩应力集中程度,神东公司开展了顶板水力压裂技术研究^[20-21],该项研究主要涉及顶板直孔水压致裂及顶板定向钻孔水压致裂(定向长钻孔分段水力压裂)2种技术。神东公司在布尔台煤矿多个工作面进行了顶板定向钻孔水压致裂工程示范应用,如图3、图4所示。

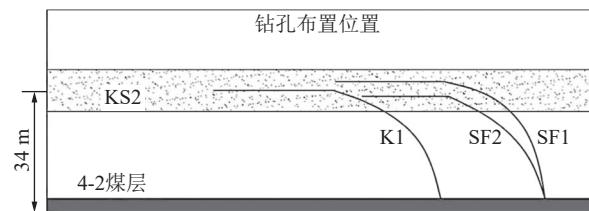


图3 布尔台煤矿顶板定向钻孔水压致裂工程钻孔布置位置

Fig.3 Buertai coal mine roof plate directional drilling hydraulic fracturing project drill hole layout location

分析图4可知,相较于未采取层间坚硬岩层致裂措施时的矿压显现,采取措施后的支架阻力、周期来压步距和持续距离都有明显减小。支架平均工作阻力由22 333 kN减小至19 616 kN,周期来压步距由22.25 m减小至17.65 m,来压持续距离由7.4 m减小至4.8 m。以上矿压显现监测结果表明,定向钻孔水压致裂层间坚硬岩层有效控制了工作面强矿压,

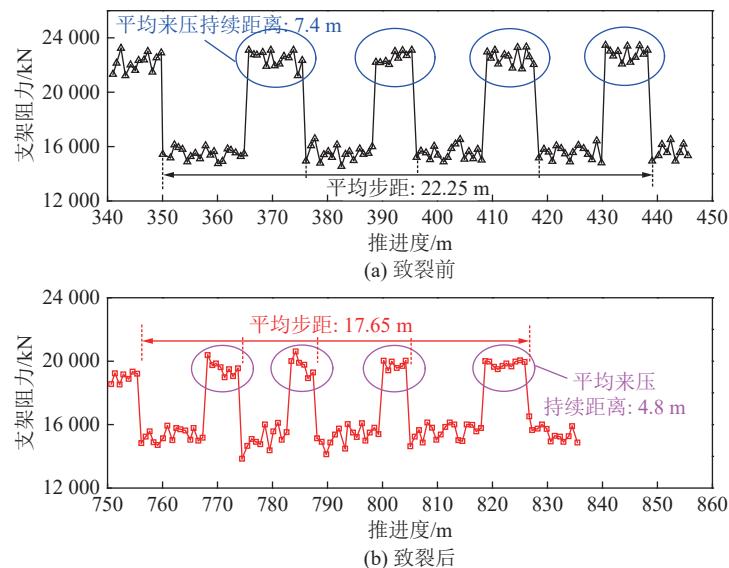


图4 顶板定向钻孔水压致裂前后来压分布

Fig.4 Incoming pressure distribution before and after hydraulic fracturing in directional drilling of the top plate

确保了该工作面的安全开采。

2.1.3 无煤柱开采顶板控制技术

1) 巷旁柔模混凝土支护沿空留巷技术。巷旁柔模混凝土支护沿空留巷技术是在采煤工作面后方沿采空区边缘,采用柔模混凝土墙作为巷旁支护将该工作面的顺槽保留下,给相邻工作面使用,如图5所示。同时,为保证巷旁支护墙体能紧随工作面及时快速构筑,采用了机械化程度高的快速巷旁充填工艺系统,且为防止回采过程中矿压显现对预留巷道的破坏,滞后临时支护采用单元支架支护方式,该工艺彻底代替了沿空留巷传统“一梁四柱”支护工艺,极大地降低了员工劳动作业强度,提高了现场施工效率。目前该技术已在柳塔矿成功使用,并使得沿空留巷支护工每班4人减少至2人,1d两班生产1个月可节约人工成本近6万元,根据柳塔矿22104工作面可采储量和服务年限计算,回撤该工作面可节约人工成本近50万元,减员增效效果明显。

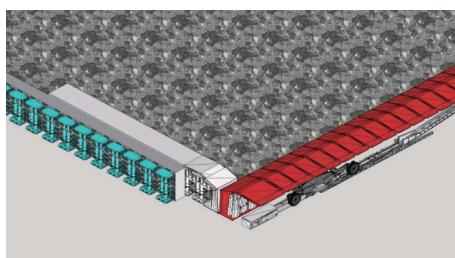


图5 巷旁柔模混凝土支护沿空留巷技术

Fig.5 Flexible molded concrete support along the side of the roadway to support the technology of staying in the air along the roadway

2) 巷旁柔模混凝土支护沿空掘巷技术。榆家梁煤矿52401综采工作面运输巷采用超前工作面浇筑柔模混凝土墙体的沿空掘巷方式。超前52401工作面200~300m,在运输巷沿副帮浇筑一道连续的柔模混凝土墙体,52401工作面回采结束后柔模混凝土墙体埋进采空区。采空区岩层垮落活动稳定后,紧贴柔模混凝土连续墙掘进52402工作面轨道巷,实现无煤柱开采。沿墙掘巷无煤柱开采技术原理如图6所示。该技术采用1m厚的柔模混凝土墙体替代了15m的护巷煤柱,大大减少了遗留在采空区的煤炭,多回收了煤炭资源,延长了矿井服务年限,有利于采空区防灭火管理,还可以减少掘进队伍,降低万吨掘进率。

3) 切顶卸压自动成巷技术。切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术主要是在回采巷道将要形成的采空区侧定向预裂,切断顶板的应力传递路径,缩短顶板悬臂梁的长度,减少采空区侧煤体受到回采动压的

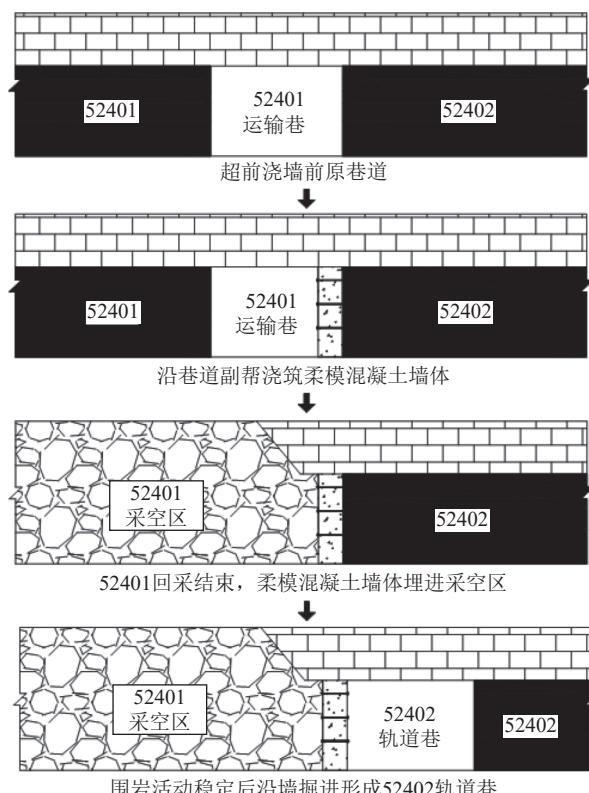


图6 巷旁柔模混凝土支护沿空掘巷技术

Fig.6 Alongside the flexible mold concrete support along the air excavation technology

影响^[22],如图7所示。

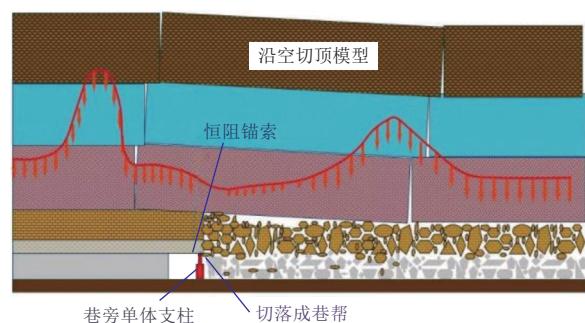


图7 切顶卸压自动成巷技术模型

Fig.7 Cutting top and unloading pressure automatic lane-forming technology model

该技术在哈拉沟煤矿12201工作面进行了示范应用,在靠近工作面侧顶板,采用双向聚能张拉成型爆破新技术沿巷道走向预裂切顶,解决了传统预应力锚固体存在的延伸率低、不能满足围岩大变形需要的问题。随着工作面回采,顶板来压使得煤层顶板沿预裂切缝自动垮落,形成巷道另一帮,极大的减小来自采空区压力,使在下一个工作面开采时可重复使用,实现无煤柱开采,与留煤柱护巷开采相比,该技术节约成本112.8万元。与10m宽的煤柱护巷相比,按照试验及推广采区工程计算,可以多采出13 041t煤炭,按照

吨煤市场价格380元/t计算,可创收881.6万元。

4)“支卸组合-泵充砼柱”快速沿空留巷技术。为实现“减人、降本、提效、增安”的目标,神东公司目前正在推进“支卸组合-泵充支柱”沿空留巷技术的工程试验,并在哈拉沟煤矿22523工作面建立了示范工作面。该技术将支护与卸压有机结合,以柱代墙,实现了“支-卸”平行作业,挡矸支架长距离护顶、单元支架及时高阻支护、云端无线矿压系统实时监测等系列技术、装备、工艺与材料成功配套,系统保障了工作面的安全快速推进。其总体技术方案包

括:长孔水力压裂卸压+巷道超前补强支护+挡矸支架切顶挡矸+自移式单元支架及时支护+强力墩柱巷旁支护+采空区高韧性喷浆材料密闭隔绝,如图8所示。示范工作面留巷长度3500m,基于矿井条件按采高5.3m计算,可回收煤柱资源达36.19万t,产生经济效益10854万元。对比当前留巷,作业人员降幅15%,商砼用量降低55%以上,综合成本降低15%。实现无煤柱开采,煤炭完全回收,能够有效解决巷道矿压,遗留煤柱自然发火等问题,长远上能够解决采掘接续紧张、采掘布局不合理等问题。

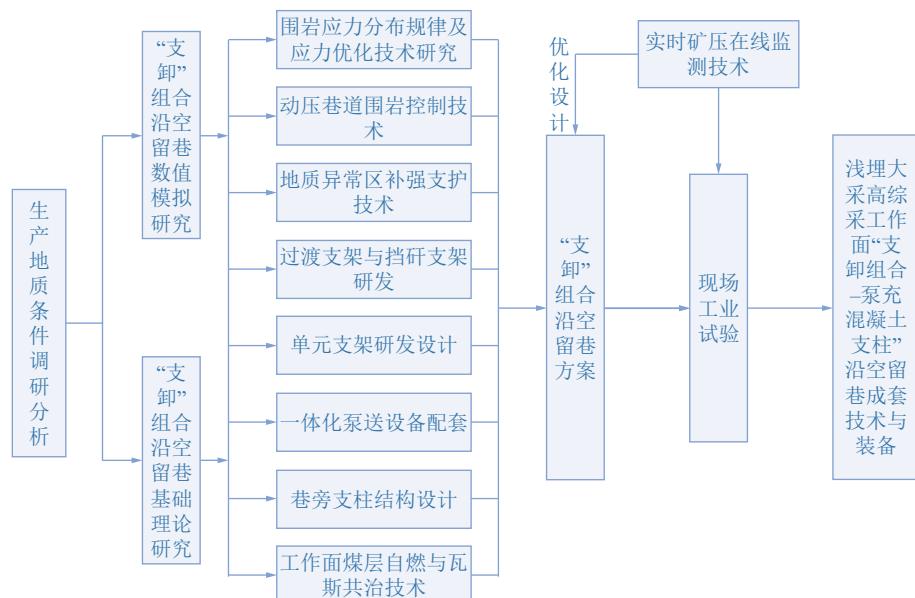


图8 “支卸组合-泵充砼柱”快速沿空留巷总体技术方案

Fig.8 Overall technical program of “support and unloading combination – pump filling concrete column” rapid along the air retaining lane

2.1.4 近距离煤层群开采顶板控制技术

针对近距离煤层群的巷道布置,神东公司于活鸡兔井三盘区1²上煤和1²煤浅埋极近距离煤层开展了宽煤柱下双巷布置的可行性研究与试验,在上覆1²上煤留设35m宽区段煤柱,下部1²煤双巷布置,如图9a所示。该技术使得实际巷道变形较小,确保了上下煤层工作面安全同采,并解决了工作面接续困难的局面。针对不同条件下的近距离煤层群回采工作面动载矿压情况,神东公司形成了沟谷地形下强矿压控制技术、采空区集中煤柱下动载矿压控制技术以及房采煤柱群下动载矿压控制技术,有效降低了工作面过沟谷地形、采空区集中煤柱以及房柱式采空区煤柱时的动载矿压强度,解除了工作面压架风险,不仅确保了工作面的安全生产,避免了人员伤亡和经济损失,而且为整个西北地区类似条件下的安全开采提供了参考,浅埋近距离煤层开采

动载矿压灾害防治思路如图9b所示。

2.1.5 复合区煤层开采顶板控制技术

神东公司活鸡兔井1²煤复合区二盘区煤层总厚度为9.63~10.35m,平均厚度为10.0m,倾角为1°~3°,埋深为76~106m,煤层普氏系数约为3,且节理裂隙不发育、韧性较好。为了更加合理安全开采此盘区下分层,提高煤炭资源回收率,在上分层已采的条件下对6m厚的下分层采用综放开采方法,采高4m,放顶煤2m。该2m厚煤层作为综放的顶板,不需要铺网,到了架后作为放顶煤进行回收,既保证了顶板安全,又回收了煤炭资源,下分层回综放工作面缩面巷道布置如图10所示。该技术自活鸡兔井12²206工作面使用以来,其应用取得了实质性的成果。目前已经成功回采了3个工作面,回收煤炭资源900多万吨,综放工作面回采率达到92.6%,取得了很好的回采效果。

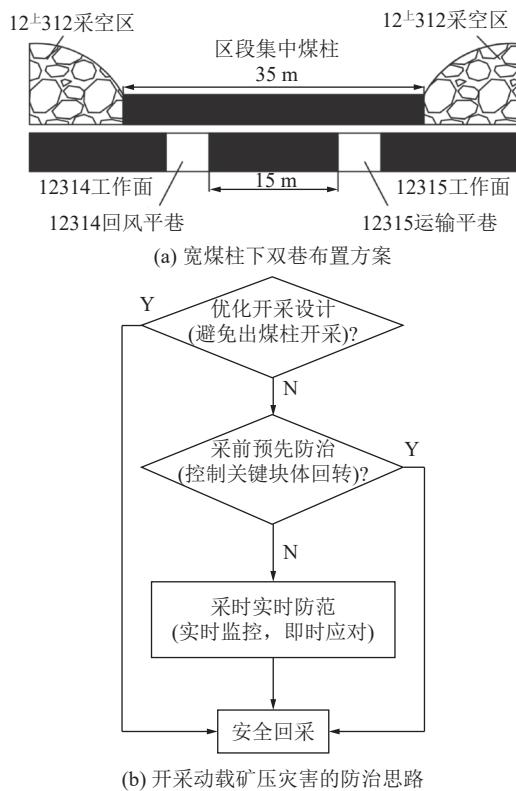


图 9 近距离煤层群安全开采技术

Fig.9 Safe mining technology for nearby coal seam groups

2.1.6 矿压监测预警技术

针对高瓦斯、强矿压等复杂条件矿井, 矿压监测预警是防治顶板灾害的核心手段, 通过实时数据采集、动态预警和科学决策, 可大幅降低顶板事故率^[23]。然而神东矿区矿压数据源集成信息多、技术指标复杂、预警阈值迥异, 以往矿压监测软件主要面向矿方

个别综采面开发, 缺乏实时响应决策和预警管理体系。在此背景下, 基于异构数据融合、微服务应用架构、云边协同计算等技术, 神东公司搭建了多源数据库高效动态预警云平台, 制定了矿压数据标准编码体系, 集成了5级矿压评判指标, 实现了集矿压实时云图展示、来压分级管理、步距分析和快速响应预警等30余项功能于一体, 能够及时下达支架管控反馈指标, 切实提升支架初撑力监控和来压预警的准确性, 有效指导了矿井综采面的安全开采。

自该系统运行以来, 已采集全公司7568个支架压力数据, 共有5100亿条监测值, 数据容量达到4.28 T, 系统查询速度达60万条记录/s, 综采面来压预警准确度达90%以上, 部分监测数据如图11所示。

2.2 神东公司亿吨矿井群水害防治技术

神东矿区采用数值模拟方法对锦界井田矿井涌水量进行预测预报。根据锦界煤矿2015—2024年采掘接续计划安排, 预测10 a内待采工作面涌水量大小。按照锦界煤矿2015—2024年采掘接续计划安排, 采用Visual Modflow软件建立数值模型(图12), 分别计算未来10 a内待采工作面及矿井总涌水量, 为矿井防排水系统的规划建设提供依据。

除此之外, 神东公司根据该矿区的实际条件, 深入开展了水文地质监测网的优化布局研究, 形成了富水顶板防治水技术以及清污分离技术, 创建了“高产高效”模式压力下的4000 m³/h大涌水量排水技术, 实现了矿井水害的有效防治, 以及井下采空区、探放水等清水和矿井污水的清污分流, 如图13所示。

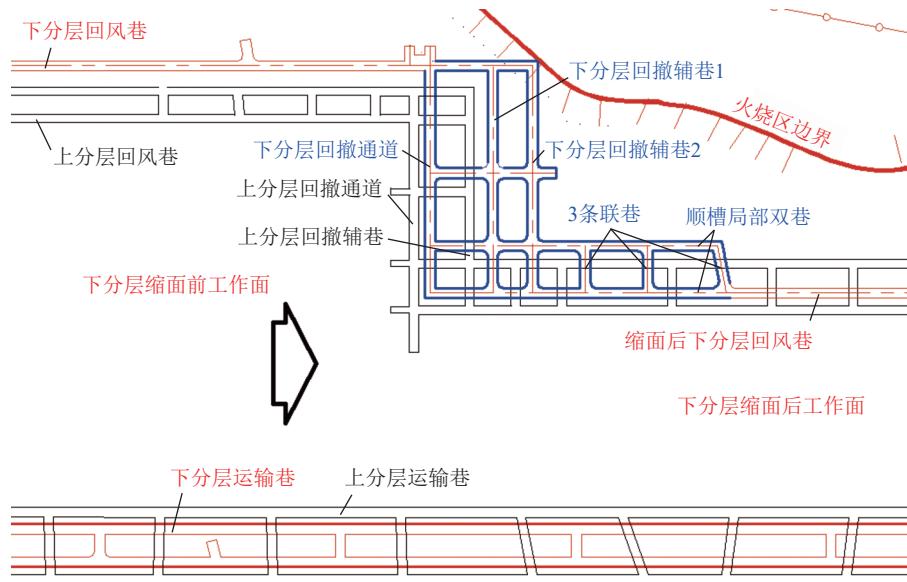
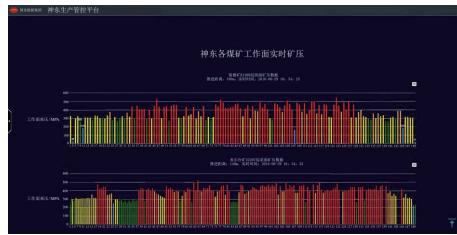


图 10 下分层回综放工作面缩面巷道布置示意

Fig.10 Schematic layout of the roadway of the reduced face of the lower layered back hewing face



(a) 实时矿压监测



(b) 支架工作阻力频率监测

图 11 神东公司亿吨矿井群矿压预警平台

Fig.11 Shendong company billion-ton mine cluster mining pressure early warning platform

2.3 神东公司亿吨矿井群瓦斯灾害防治技术

保德煤矿是神东公司唯一的高瓦斯矿井^[24]，在神东矿区亿吨矿井群创建中，为满足高瓦斯矿井安全、高效生产要求，经多年在瓦斯治理方面的探索、研究、总结，提出了高瓦斯矿井“大区域-超大区域”瓦斯治理理念，形成了以煤矿“开采前”瓦斯超前预抽采技术、“开采中”煤与瓦斯共采技术、“开采后”

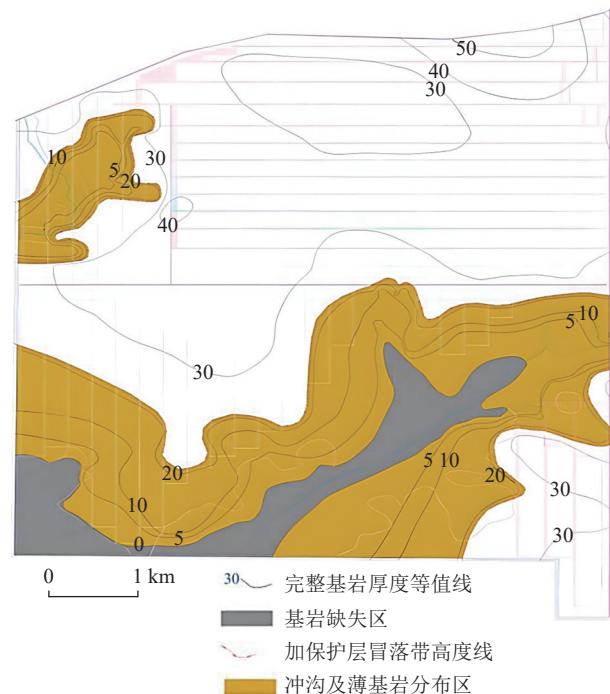


图 12 二盘区薄基岩分布范围

Fig.12 Map of the extent of thin bedrock distribution in the second disk area

老空区残余瓦斯抽采技术为特征的矿井全生命周期煤与瓦斯协同开采与利用技术体系，如图 14 所示，

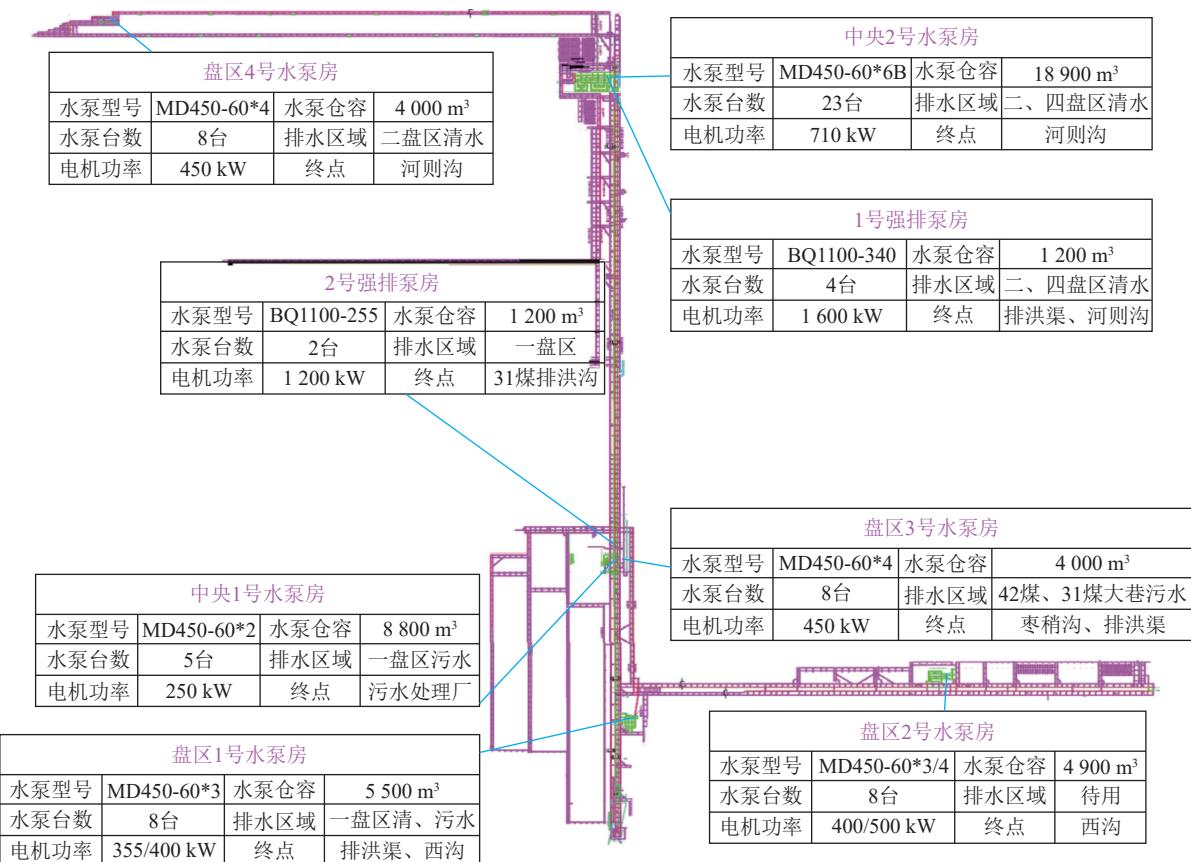


图 13 锦界煤矿供排水系统示意

Fig.13 Schematic diagram of water supply and drainage system of Jinjie Coal Mine

创造了井下顺层钻孔3353 m的深孔钻进世界记录，在瓦斯超前抽采治理中取得了良好效果，实现了高瓦斯矿井高产、高效和安全生产。

2.4 神东公司亿吨矿井群粉尘防治技术

随着神东公司对职业安全健康管理工作的不断

重视，粉尘防治技术手段进一步提升，资金投入不断加大。神东公司根据各个产生环节的不同特点，有针对性地采取相应技术进行治理，形成了多重连环综合防尘技术体系，取得了良好的效果。该技术体系主要包含采煤工作面综合防尘技术、大断面、快速

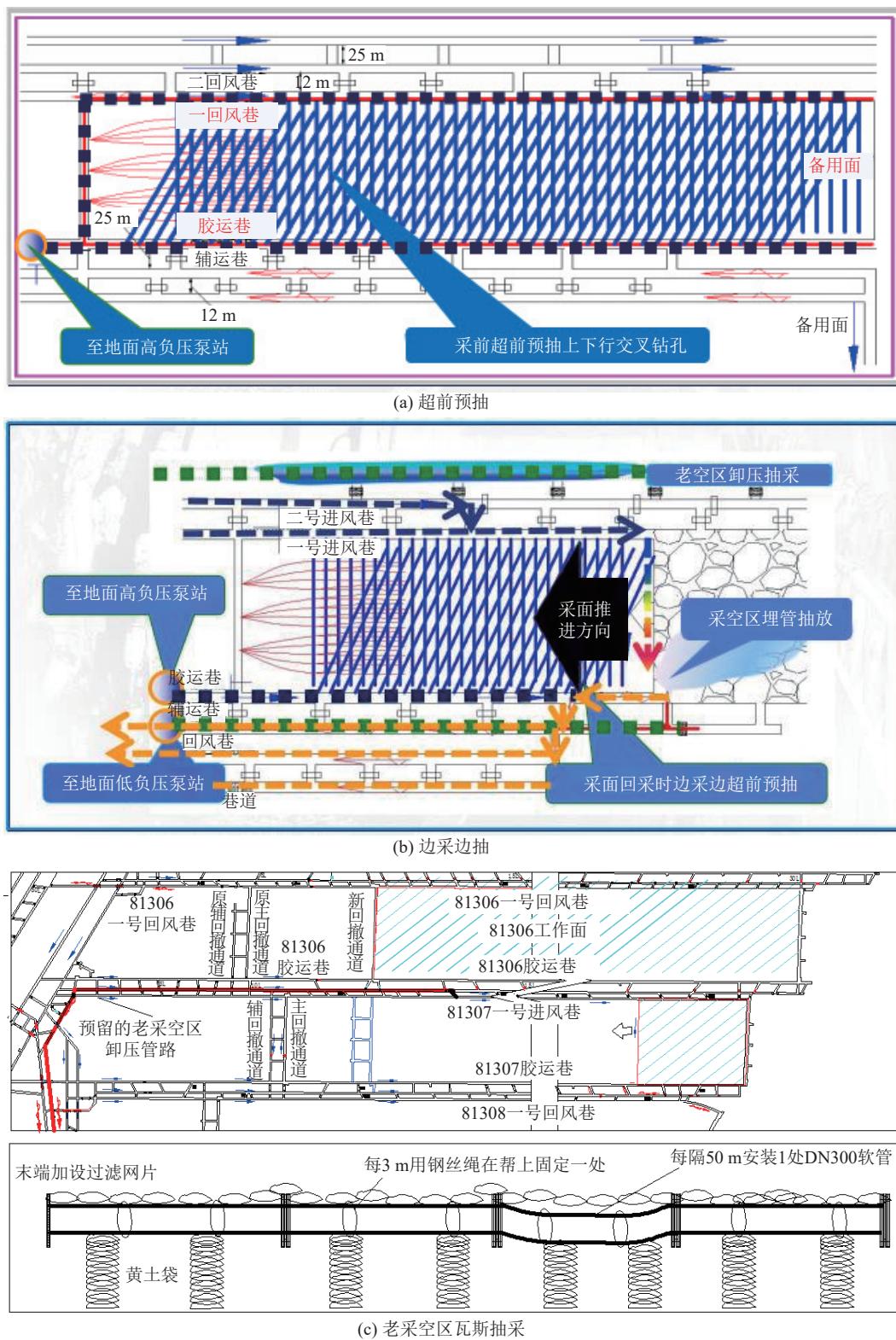


图 14 矿井全生命周期煤与瓦斯协同开采与利用技术体系

Fig.14 Mine life cycle coal and gas synergistic mining and utilization technology system

掘进防尘技术以及生产系统二次扬尘管控技术,如图15所示。其中,采煤工作面综合防尘技术主要利用采煤机高压喷雾除尘、负压诱导除尘以及湿式捕尘网除尘;大断面、快速掘进防尘技术主要涵盖连采机机载及高压喷雾除尘、回风湿式捕尘网除尘等。

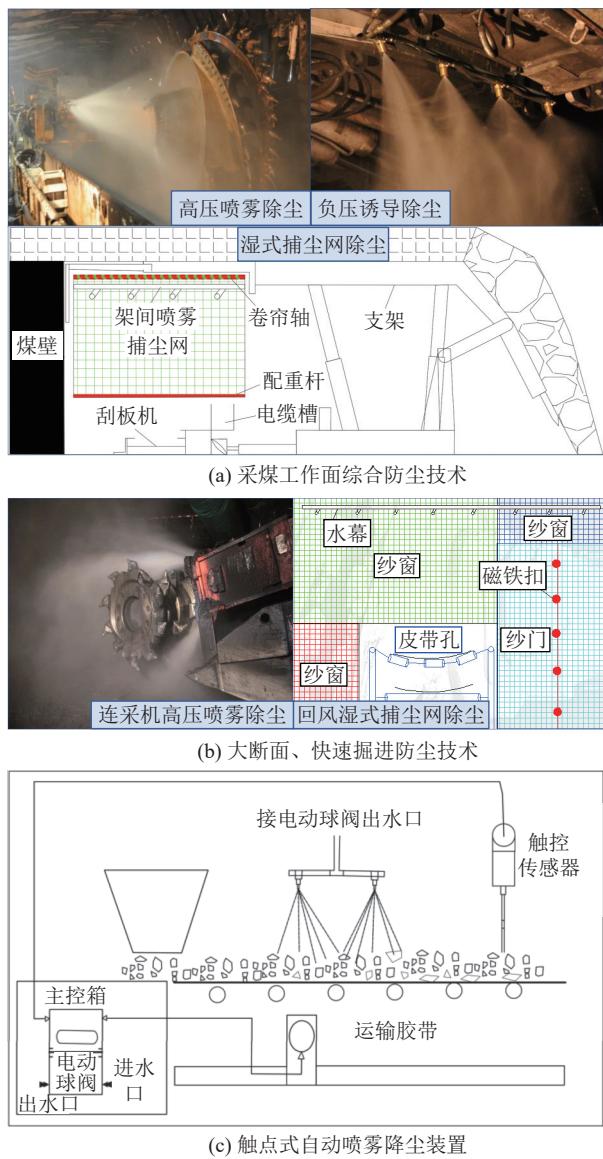


图15 多重连环综合防尘技术体系

Fig.15 Multi-linked integrated dust control technology system

2.5 神东公司亿吨矿井群火灾防治技术

神东公司大部分煤矿开采容易自燃煤层,这些煤层属于浅埋深、近距离、煤层群开采,在开采初期受采煤装备及地质条件限制,部分浅部薄煤层未采,厚煤层回采率低,工作面初采及末采期间遗煤较多,且许多矿井上层煤开采时,基本都未采取注浆等预防性措施,开采下层煤时,上层煤采空区存在自然发火危险,进而威胁到下层煤工作面安全开采^[25]。随着下层煤以及近距离煤层群的进一步开采,防灭火

问题将日益突出,针对这种情况,神东矿区采取了相应的防灭火技术,主要包含JSG4束管监测预报、以“快”防灭火、注浆、注氮等煤层自燃综合防灭火技术,如图16所示。其中,JSG4束管监测预报技术主要实时监测、采集采空区气体参数,通过光纤传输至地面主机,实现采空区火灾标志性气体的全天候实时监测、预警;以“快”防火技术包含快速开采、快速搬家、快速封闭,不仅达到了高产、高效的生产效果,还能有效缩短煤氧复合时间,以此控制煤炭自然发火;煤层自燃综合防灭火技术包含地面及井下堵漏风防灭火、合理留设煤柱、工作面“两线”注山砂防灭火、注浆防灭火和注氮防灭火等。神东公司通过综合应用多种防灭火技术,有效防治了矿区火灾发生,保障了矿区的安全生产。

3 神东公司亿吨矿井群智能高效开采技术的研究与实践

为有效提高亿吨矿井群开采设备的复杂地质适配性及智能化水平,解决系统之间存在的“数据孤岛”和协同性较差的问题,神东公司创新了采掘装备与技术,优化了快速准备与回撤搬家工艺,研发了智能运输、供电、分选系统,有机结合矿鸿操作系统并搭建了智能生产管控平台,形成了“矿井设备数据接口与协议”数据通信标准,在提高亿吨矿井群开采效率和机械化水平的基础上,还保障了煤矿生产的安全性。

3.1 智能高效采掘装备与技术

3.1.1 智能化采掘装备与技术

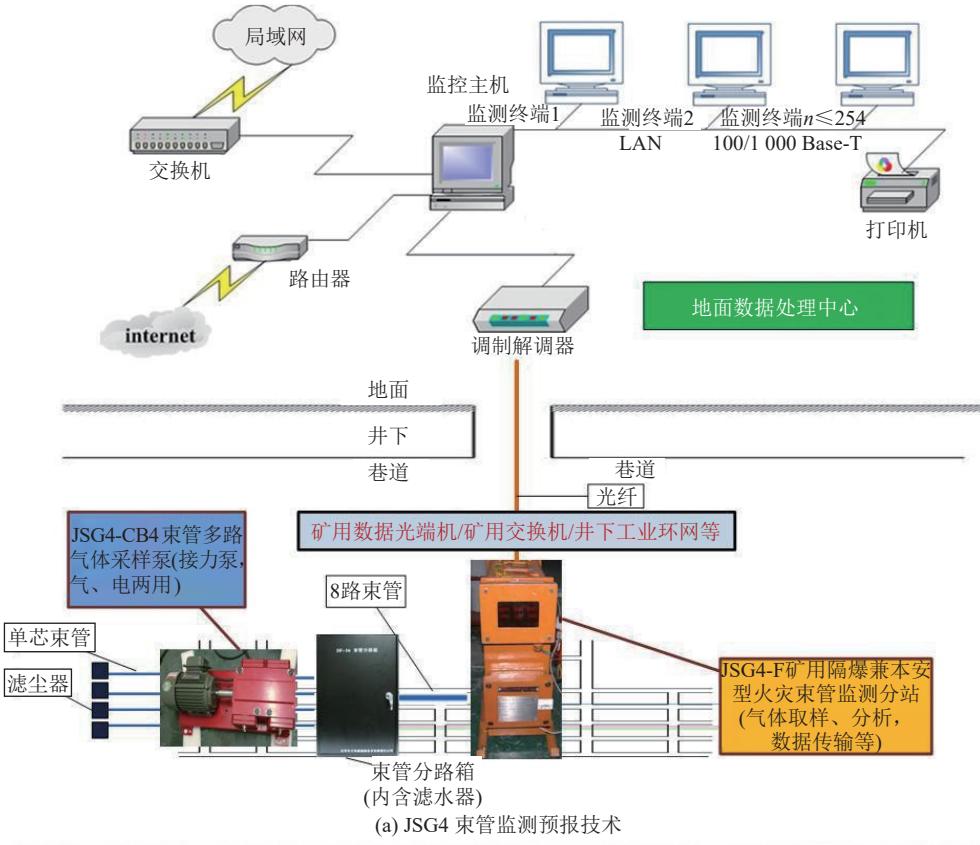
神东矿区在探索智能化开采的过程中,逐步形成了以跟机自动化、远程干预、智能割煤(记忆割煤-预测割煤-自主割煤)、线缆智能联动为核心特征的智能化开采技术^[26],如图17所示。2017年围绕薄煤层自动化高效开采目标,神东公司率先提出了“有人巡视、无人操作,自主割煤为主、远程干预为辅”的智能化开采模式。2018年9月,神东公司第1个薄煤层智能工作面(榆家梁煤矿43101工作面)开始调试,针对薄煤层智能化开采,神东公司开创性地提出了“基于精确三维地质模型和扫描构建工作面绝对坐标数字模型的薄煤层自主智能割煤技术”,研发了薄煤层综采工作面采煤机线缆智能联动系统,有效解决了长期困扰薄煤层智能化开采的技术难题。

随后在总结榆家梁薄煤层智能化开采成功经验的基础上,神东公司于石圪台煤矿引入薄煤层等高无人化智能开采技术,结合国内首套等高式采煤装

备与国产 1.5 m 液压支架, 实现了薄煤层智能化高产、高效开采, 如图 18 所示。

22# 303-1 工作面长度 253.41 m, 推进长度 603.25 m, 煤层倾角 1°~3°, 厚度 0.9~1.8 m, 可采储量 24.85 万 t。所配备的等高式采煤机只要 2 min 就能完成两端头进刀, 单班生产突破 15 刀割煤纪录。

并且采用随机电缆自动拖拽装置, 配套智能巡检机器人、三维激光扫描、惯导和视频监控系统, 无需司机和巡视工跟机操作, 可实现在距离工作面 400 m 外的顺槽内远程操控, 只需配备集控台司机 2 人、巡视岗位工 3 人就能完成生产任务。等高采煤装备在石圪台煤矿成功投入生产运行, 不仅填补了国内薄



(b) 地面注浆防灭火技术

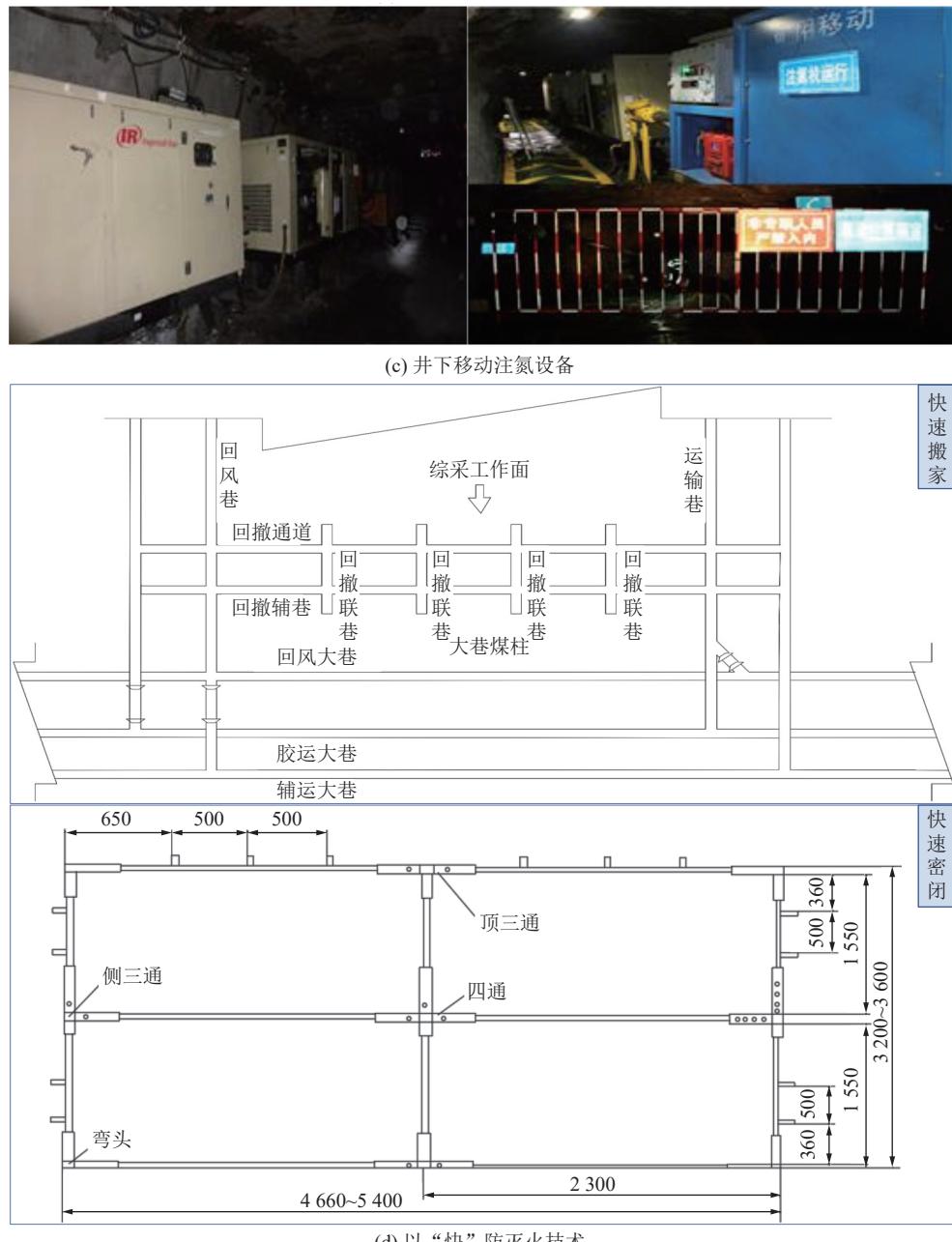


图 16 防灭火关键技术

Fig.16 Key technologies for fire prevention and suppression

煤层等高无人全自动化生产领域的空白,更为神东公司可采储量达 9.57 亿 t 的薄煤层自动化高效开采积累重要经验,提供有益借鉴。

3.1.2 超大采高成套综采装备与技术

神东矿区煤层厚度 8~10 m 的煤炭地质储量巨大,约为 20 亿 t,为了实现该类煤炭的开采以及解决 8.8 m 超大采高综采工作面的采场空间大、开采强度高、围岩控制难度大等问题,神东矿区研发了适应 8~10 m 煤层超大采高综采关键技术和成套技术装备,形成了一套包括 8.8 m 工作面围岩控制、关键生产装备与安装回撤装备的研发、工作面设备群组智

能协同控制等成套技术,如图 19 所示。该套技术装备包含合作研发的首台 8.8 m 采高特厚煤层 MG1100/2925-WD 型交流电牵引采煤机、超大采高 8.8 m 液压支架、高强度大运量刮板输送机、1 350 L/min 大流量乳化液泵站、首创的百吨级支架搬运车和综采工作面智能协同控制平台,实现了工作面采煤机、支架、刮板输送机、泵站等设备的集中控制和协同作业,并在上湾煤矿 12401、12402 工作面以及补连塔煤矿 12511 工作面进行了工业性应用,其中补连塔煤矿开展了 8.0 m 一次采全高综采试验,工作面按两班半组织生产,日割煤 16 刀,日产量 4.3 万 t,月产量

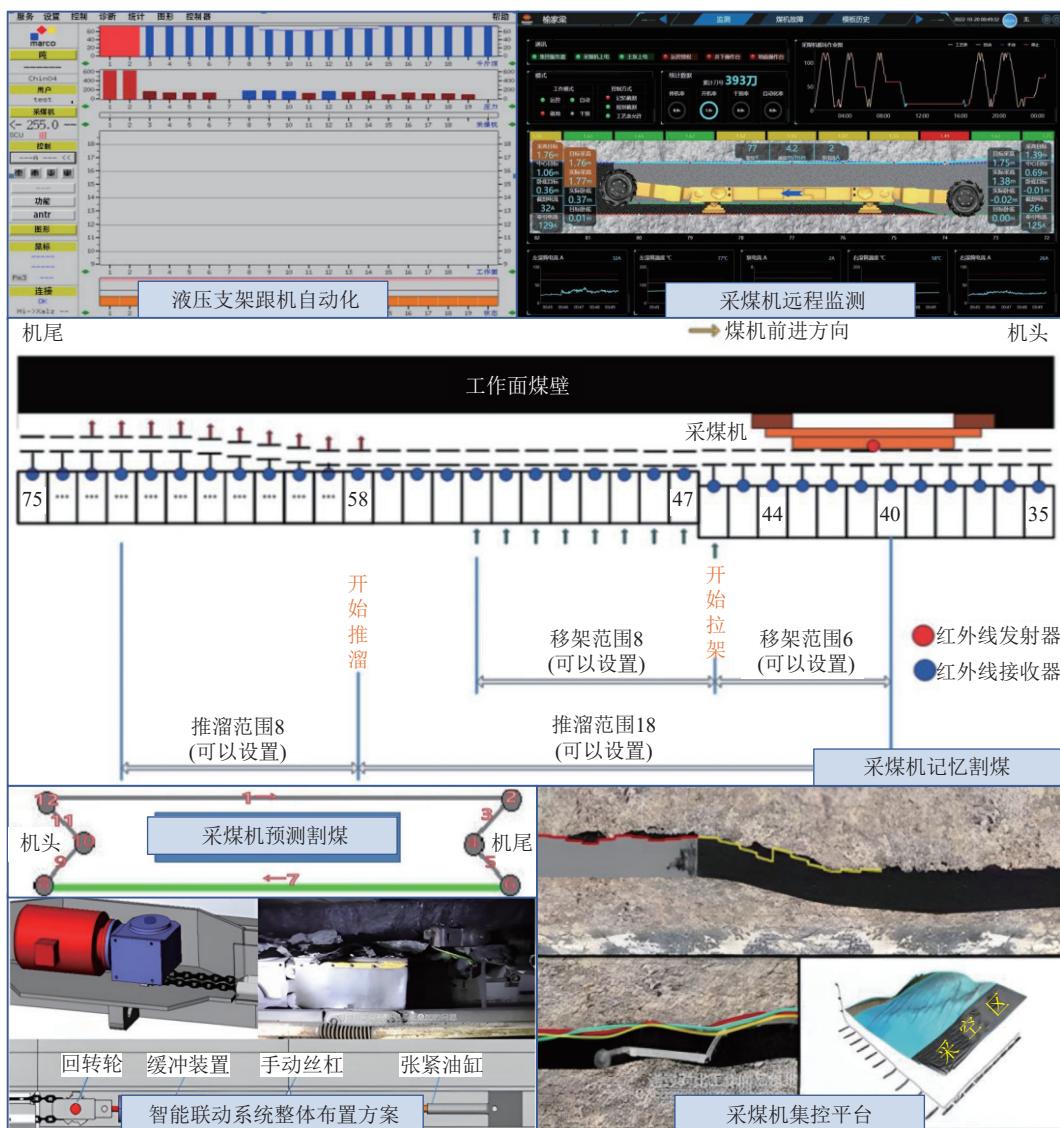


图 17 智能化开采技术

Fig.17 Intelligent mining technology

105.4万t, 取得了良好的经济效益^[27]。

3.1.3 采准煤巷快速掘进装备与全断面盾构施工技术

1) 双巷快速掘进关键技术。随着神东矿区综采技术装备与矿井配套设施的快速发展, 综采工作面的开采强度成倍增加, 产量不断增大, 工作面的回采速度不断被刷新, 使煤矿井下巷道掘进工程量剧增, “采掘失衡、采掘接续”的矛盾日益突出^[28]。掘进效率低、采掘比例失调, 成为制约神东矿区高产高效的瓶颈。因此, 神东矿区综采工作面采用诸多大功率设备, 提高了工作面推进速度, 同时为了满足矿井通风、排水、连续采煤机快速掘进、无轨胶轮车辅助运输和工作面快速搬迁等需要, 综采工作面进回风巷均采用双巷布置方式^[29](图 20), 为工作面安全生产提供了备用脱险通道。在此基础上, 神东公司创新

和完善了连续采煤机连续运输掘进技术, 用 10 单元连续运输系统替换了梭车(运煤车), 通过给料破碎机进行给料、破碎、运煤, 使采煤与运输相配套, 解决了采煤和运煤不连续的难题, 达到了快速掘进的目的, 月进尺最高达到 4 654 m。

2) 掘锚一体化关键技术。为了提高掘进效率, 提升矿井安全管理水平, 达到减人提效的目的, 神东公司在高产、高效采掘模式的基础上, 突破传统, 通过技术和工艺创新, 研发出了高效快速智能掘进技术工艺系统^[30], 并在大柳塔煤矿正式使用, 该系统以实现“掘支平行作业”和“煤流连续运输”为主要指导思想, 单班最高进尺 78.5 m, 日最高进尺 132 m, 月最高进尺达到 3 088 m, 比原有掘进工艺工效提高了 3 倍以上, 创造了煤巷大断面单巷掘进的世界纪录。快速掘进系统的主要配套设备包括掘锚机、十臂锚

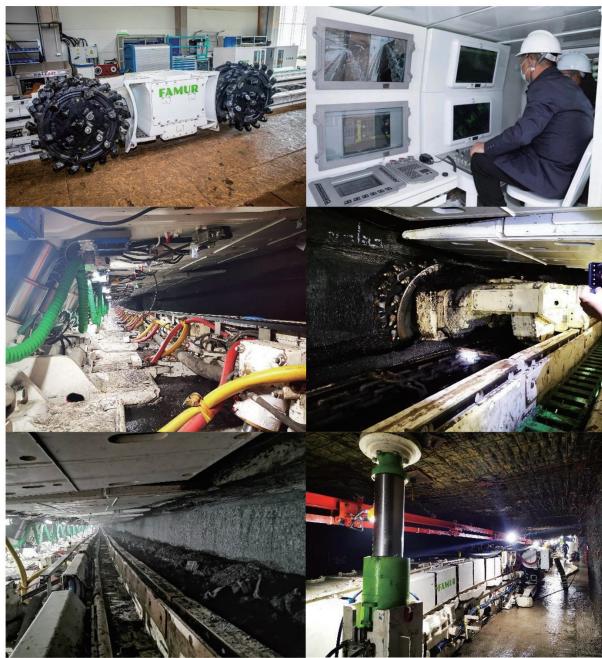


图 18 神东石圪台煤矿 22[±]303-1 工作面等高式采煤设备
Fig.18 Contour coal mining equipment for the 22[±]303-1 working face of Shendong Shigetai Coal Mine

杆机、破碎转载机、可弯曲胶带机、迈步式自移机尾和自移动力站等,如图 21 所示。

3) 全断面盾构施工长距离斜井关键技术。在大力发展战略高效矿区的背景下,神东公司首次将盾构施工成套技术与装备应用到煤炭领域(图 22),创新了煤矿施工工艺,变革了中深部矿井开拓方式,提升了煤矿建设水平。为使得该类装备能适应煤矿“深埋超长、连续下坡、富水高压、地层多变”的特点,神东公司综合研究了双模式盾构设备系统快速模式转换的结构与技术、超前钻机进行超前地质预报关键技术、盾构施工煤矿长距离斜井防水处置及有害气体处置关键技术、盾构施工煤矿实时监测与安全评估技术、斜井内盾构拆解施工成套技术等,并在补连塔煤矿斜井完成了应用示范,施工期间机械化率达 100%,实现了安全零事故,连续 4 个月的月平均进度达到 546.4 m,最高月进尺达 639 m,充分体现了机械化程度高、安全可靠,优质、高效、环保的特点。

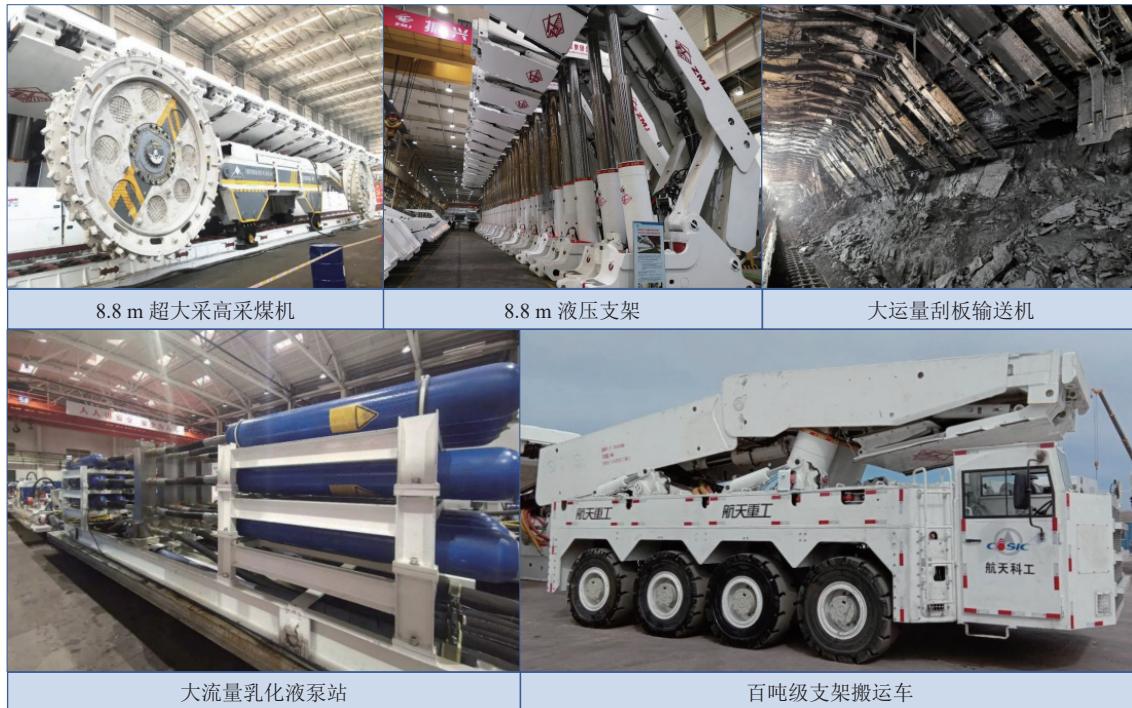


图 19 8.8 m 综采工作面国产化成套装备
Fig.19 8.8 m comprehensive mining face localization complete sets of equipment

4) 全断面矩形巷道快速掘进设备与技术。以神东为代表的亿吨矿井为了保障采掘平衡,在掘进工艺方面进行了长期的实践探索,形成了以连续采煤机为主体的适应不同地质条件的多种掘进工艺系统,并取得了良好的实践成果,但是随着矿区规模的持

续扩大,掘进与支护的矛盾仍然比较突出,在此背景下神东公司提出了全断面高效快速掘进系统的设计构想、技术路线和关键技术指标^[31],确定了“巷道断面一次成型、掘进与支护同步、远距离遥控作业、激光智能导向和巷道长压短抽通风除尘方式”技术目

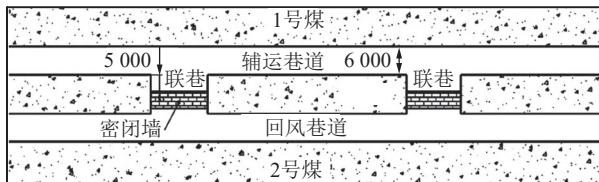


图 20 双巷掘进工艺

Fig.20 Double-alley tunneling process

标, 研制了 MJJ3800×5800 型全断面矩形快速掘进机,

如图 23 所示。神东公司利用该项技术在哈拉沟煤矿 22524 运输巷进行了工业性试验, 在工程实施之后, 操作人员数量降低了一半, 支护效率、掘进速度及掘进综合效率皆提升了 1 倍, 有效解决了采掘失衡问题, 提高了掘进工作面除尘效果和改善作业环境, 显著提高了巷道质量和安全性, 为煤炭企业带来巨大的经济效益。

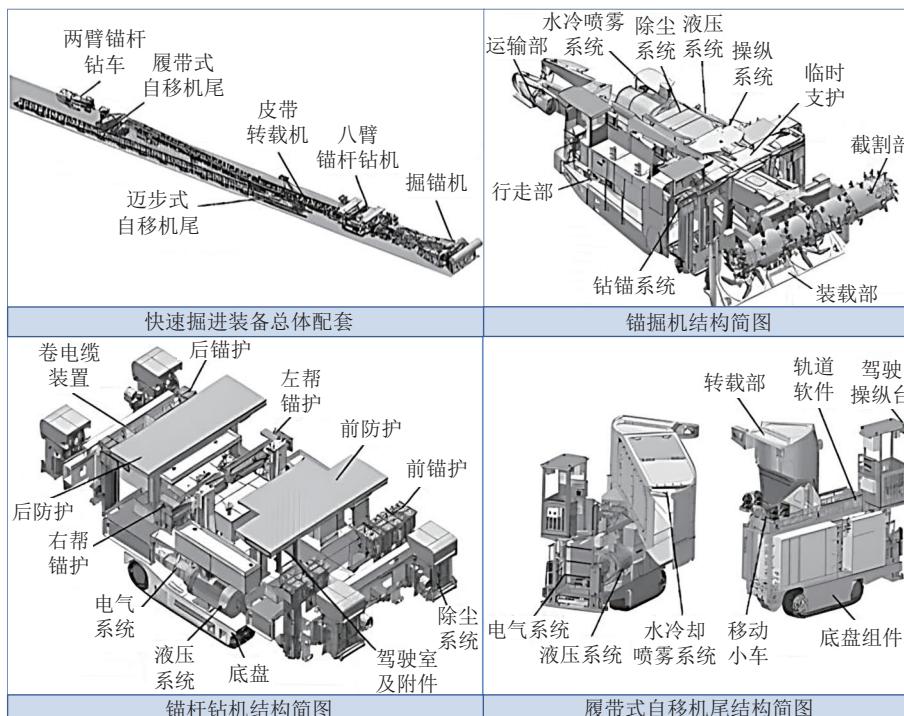


图 21 快速掘进装备总体配套及各设备结构简图

Fig.21 Rapid tunnelling equipment overall package and the structure of each equipment sketch



图 22 盾构设备及配套设施

Fig.22 Shield equipment and ancillary facilities

3.1.4 短壁机械化采煤装备与关键技术

据估计, 我国现有煤炭资源中 60% 适合布置长壁综采工作面, 23% 属于“三下”压煤, 其他则是不能

布置长壁工作面的采区^[32]。按目前我国综采采区的资源采出率计算, 开采后约形成 20% 的残采煤区和残留煤柱, 如神东这样优良赋存条件的特大型矿区,

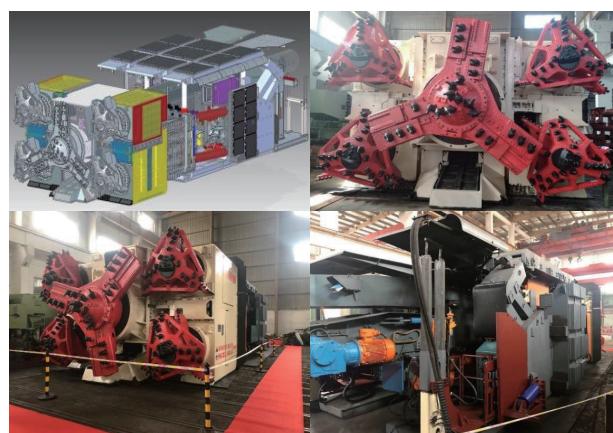


图 23 全断面矩形快速掘进机

Fig.23 Full-section rectangular fast boring machine

规划范围内存在不规则边角块段及部分小型井田的可采储量为5.3亿t,占矿区可采总量的17.24%,开采边角煤炭资源对神东矿区的发展具有十分重要的现实意义。基于此,神东公司开发了短壁机械化开采装备与技术,如图24所示。其中,所选用的EMI340型连续采煤机自使用以来,短壁开采工作面月均产量达到4.6万t;日最高纪录达到支巷掘进为70m,掘进和采硐分别为进尺50m、采硐8个;短壁回采工作面商品煤年产量超过220万t,最高月产量超过21万t。



图24 短壁采煤关键装备

Fig.24 Key equipment for short-wall coal mining

3.2 快速准备与回撤搬家装备与关键技术

3.2.1 辅巷多通道工艺

神东矿区建矿初期,大柳塔煤矿1209综采工作面作为矿区首采工作面回撤时,80%以上工作面支架被压死,部分支架立柱折断、顶梁开缝、立柱洞穿顶梁,工作面架前煤壁垮落,顶板开裂工作面设备无法撤出^[33-35]。基于此背景,提出了回撤“辅巷多通道”工艺,该工艺设计内容包括辅巷多通道的布置与巷道支护方式、方法,具体为在综采面回采停采线前预先掘出两条平行于回采工作面的辅助巷道,然后在两条辅巷之间掘出若干条联络巷道,即构成了“辅巷多通道”系统,如图25所示。图中,靠综采工作面终采线一侧的巷道是回采工作面液压支架和其他设备回撤时的调向通道,称为主回撤通道。该通道一般采用锚网支护,并配以单体液压支护、矿用工字钢梁、专用垛式支架补强支护。

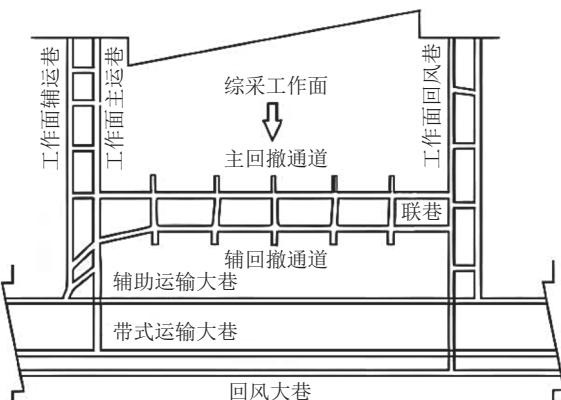


图25 综采工作面辅巷多通道巷道布置

Fig.25 Multi-channel roadway arrangement for auxiliary lanes in a comprehensive mining face

3.2.2 多掩护支架回撤工艺

目前5.0、5.5、6.3m液压支架回撤普遍采用三掩护支架回撤工艺,7.0m液压支架回撤采用四掩护支架回撤工艺,但这种工艺已不能满足5.0m及以上采高工作面液压支架的安全、有效、快速回撤^[36]。神东公司基于此开发了五掩护支架回撤技术(图26)^[37]。

该技术工艺是从联巷两头分开向两巷回撤,并采用五掩护顺序撤架法,结合支架远程回撤操作系统以及新研发的自支撑变频牵引绞车,达到提高回撤速度、有效控制顶板与三角区网包的垮落以及缩小三角区空顶面积的目的。该项工艺先后在神东公司补连塔煤矿12510综采工作面、大柳塔煤矿52505综采工作面以及补连塔煤矿12512综采工作面完成了回撤任务,上述工作面均为7.0m以上大采高工作面,通过实施该回撤工艺,工作面的空顶面积有效减少,道木支护量也随之下降,不但降低了员工的劳动强度,而且减少了道木消耗,实现了安全高效、节约成本。

3.3 智能化运输系统

3.3.1 无人值守长距离主运输系统

为实现矿井运输系统“机械化换人、自动化减人”的总体目标,神东矿区通过安装完善各类传感器、输送带绳芯无损检测装置、带面纵向撕裂识别装置、智能除铁装置、智能音视频识别系统、沿线巡检机器人等装置或系统实现了带式输送机的远程监控,即无人值守^[38]。并基于智能张紧控制自动计算模型,创建了负载感知自适应张紧控制系统(图27a),自主研发了运输距离达6000m的单点驱动可伸缩带式输送机,在上湾煤矿4个工作面生产中得到了成功应用,单工作面实际安装长度5000~5500m,累计过

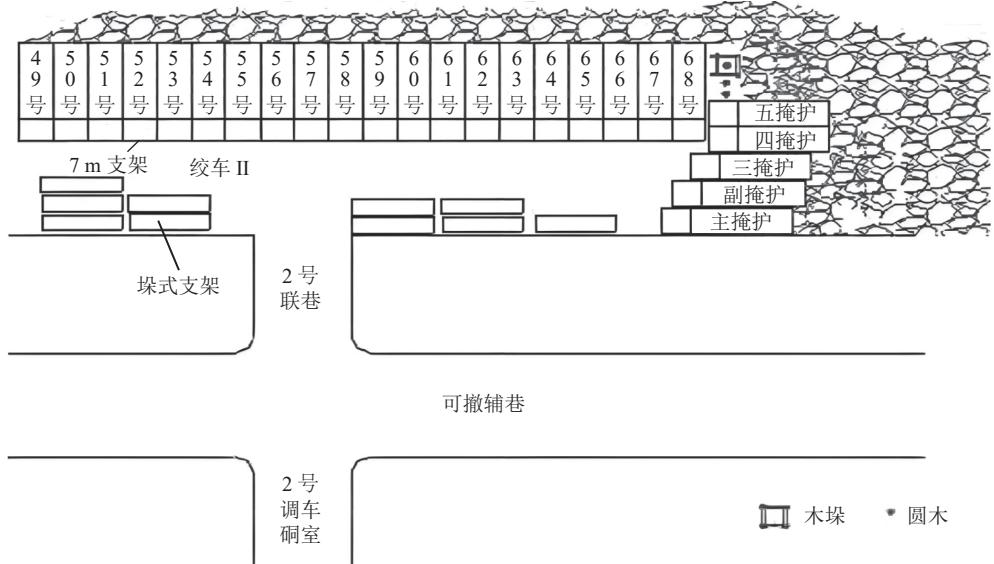


图 26 五掩护支架回撤技术
Fig.26 Five cover stent retraction technique

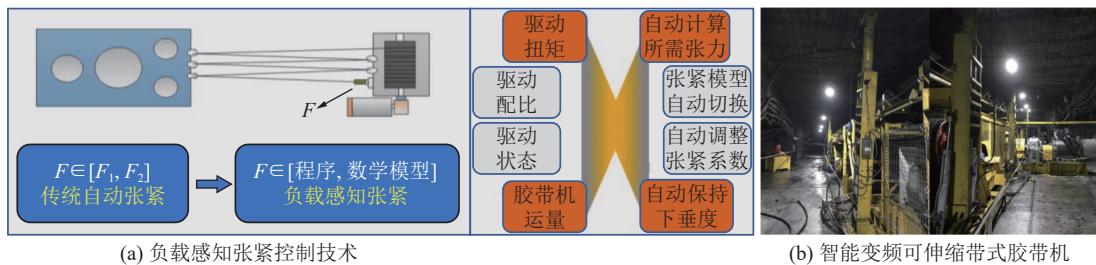


图 27 无人值守长距离主运输系统
Fig.27 Unattended long-distance main transportation system

煤量 3 500 万 t。除此之外,神东公司研发了可快速安装回撤的机头集中驱动智能变频可伸缩带式胶带机(图 27b),运输能力达 3 000 t/h,能够满足 200~6 000 m 不同长度工作面的生产需求,达到了简化顺槽运输系统、减少采矿事务工程量、安装回撤工作量、降低劳动强度和使用成本、提高煤炭生产效率以及智能化高效运输的目的。

3.3.2 新型辅助运输成套装备

针对现有柴油无轨胶轮车在井下长距离大坡度巷道运行时,难以满足上坡动力持续输出和下坡时制动以及存在噪音、尾气排放污染等问题,神东公司在综合研究防爆柴油机无轨胶轮车和蓄电池无轨胶轮车技术特点的基础上,深入研究无轨架线电车在煤矿井下使用的可行性,最终创新性提出并形成了“矿井电柴混合双动力辅助运输成套装备”,并在补连塔煤矿 2 号辅运平硐成功运行(图 28)。

以试验实施地点补连塔煤矿 2 号辅运平硐和 2 号辅运大巷的架线区域为例,与同规格的 10 t 防爆



图 28 矿井电柴混合双动力运人车
Fig.28 Mining electric-diesel hybrid dual-power people mover

柴油机运人车相对比,双动力运人车的运营效率高,设备采购低,且按原来柴油机 100% 使用频率计算,使用架线车可减少 90%,因此故障率大幅降低,配件采购量减少,柴油消耗量减少。以神东矿区 150 台运人车计,每年可节约井下人员运输费用大约 6 000 万元,该新型辅助运输成套装备为亿吨矿井井下长距离安全、经济、高效辅助运输提供了重要保障。

除此之外,针对柴油无轨胶轮车存在燃油(柴油)消耗巨大、尾气排放严重的弊端,神东矿区研制了国内首台井工矿防爆电动无轨胶轮运输车(图 29),该车每百千米能耗费用仅为同类型柴油车的 13%,



图 30 变电站在线智能巡视系统

Fig.30 Substation online intelligent inspection system

具备“零排放、低能耗、低噪声、高寿命”的强大优势，在通过相关认证后，将成为国家在井工矿领域推行的安全、节能、环保新标准，也将逐步代替目前主流防爆柴油机无轨胶轮运输车，具有良好的经济效益和社会效益。



图 29 防爆电动无轨胶轮运输车

Fig.29 Explosion-proof electric trackless rubber wheel transporter

3.4 智能化供电系统

神东矿区拥有多个亿吨级的生产矿井，且各矿井采煤机械化程度高、装机容量大、回采速度快且工作面长，采用固定的传统供电方式不能满足安全供电的要求，故针对此问题，神东公司研究并形成了中央变电所与采区变电所分区独立供电和 10 kV 直接下井供电技术，并研制了 35 kV 新型智能箱式变电站，如图 30 所示。该技术实现了“站内设备自动巡检、设备状态全面感知、设备异常主动预警、倒闸操作一键顺控、人员行为智能管控、主辅设备智能联动、资产全寿命周期管理”等智能应用，较好地解决了高产高效矿井采掘工作面供电质量问题，满足了煤矿供电系统在智能供电、智能运维及能效管控的需求，保证了采掘工作面供电的安全可靠性。而且 35 kV 新型智能箱式变电站采用了预制舱建站模式，全工厂生产线预制、高度集成，可根据现场场地需求进行

布置，以此达到快速建站，同时减少占地、缩短建站周期、节约成本的目的。

3.5 智能机器人技术

为实现煤炭生产减人增效、降低工人劳动强度和作业安全风险，神东公司依托煤矿智能化创新联盟、科研院所、主要煤矿装备供应商，全面开展煤矿机器人研发及推广应用，目前已完成研发的煤矿机器人项目 14 项^[5]，包括：综采工作面智能巡检机器人、主运输智能巡检机器人、变电所智能巡检机器人、水泵房智能巡检机器人、钻锚机器人、喷浆机器人、捡矸机器人、管路抓举机器人、钻孔机器人、掏槽机器人、水仓清淤机器人、四足巡检机器人、危险气体巡检机器人、辅助搬运机器人等，如图 31 所示。

3.6 智能化分选技术

神东亿吨矿井群的智能分选技术主要包含智能感知、智能诊断与控制、智能管理、智能决策以及智能化管理模式创新等方面关键技术^[39]，如图 32 所示。神东公司已在上湾千万吨级智能化选煤厂建成了应用示范点，并形成了全面建成智能化选煤厂规划框架。上湾选煤厂从提出智能化选煤厂概念到实施建设至今，工作和管理模式实现了以下 4 个转变：区域巡视向无人值守转变、调度室集中控制向移动集中控制转变、人工数据采集向系统自动采集转变、运行状态由经验分析向大数据智能分析转变。而且通过智能化实施应用，上湾选煤厂年电力消耗减少 8% 以上，生产效率提升 5%，日均生产时间缩短 1 h，煤质稳定率提高了 12%，员工接触粉尘、噪声的时间减少 240 h，全员工效逐步提升。

神东矿区选煤生产智能决策系统是智能分选技术的进一步扩展，主要包含选煤生产组织智能决策、



图 31 煤矿智能机器人技术
Fig.31 Coal mine intelligent robotics

选煤过程调控智能决策以及选煤生产成本控制智能决策(图33)。该系统应用后,生产系统运行效率提升10%以上,日均生产时间由16 h缩短至14 h,能源消耗减少10%以上,年经济效益增加1 000万元以上;选煤厂电力消耗、介质药剂消耗、设备部件消耗等可控成本下降了0.52元/t,每年可节约生产成本780万元,人力资本降低了17.5%,环境保护成本减少21%,节省了大量成本支出;而且原煤灰分与水分测定精度提高了50%,基于分选密度的智能调节,而使客户有关煤质的满足度提高了33%,商品煤灰分、水分及发热量测定精度提高了14%,提高了商品煤质量水平。

3.7 智能生产管控平台

亿吨矿井集群的系统集成复杂度较高,各部门的互联网平台整合具备一定的障碍,不同的设备生产商往往具有不同的设备接口和协议,且尚未形成统一标准,数据资源无法实现互联互通,造成系统集成难度大、协同控制水平低等问题。因此,神东公司起草并制定了八大系统38类“矿井设备数据接口与协议”企业标准。同时,以上述38类设备为对象,进行相应的EtherNet/IP应用对象规范验证试验,最终使得设备接入工业以太网后无需进行配置或进行极少配置,即可在地面或井下计算机上直接进行远程监测和控制,实现了“即插即用”,大大减小数据上传



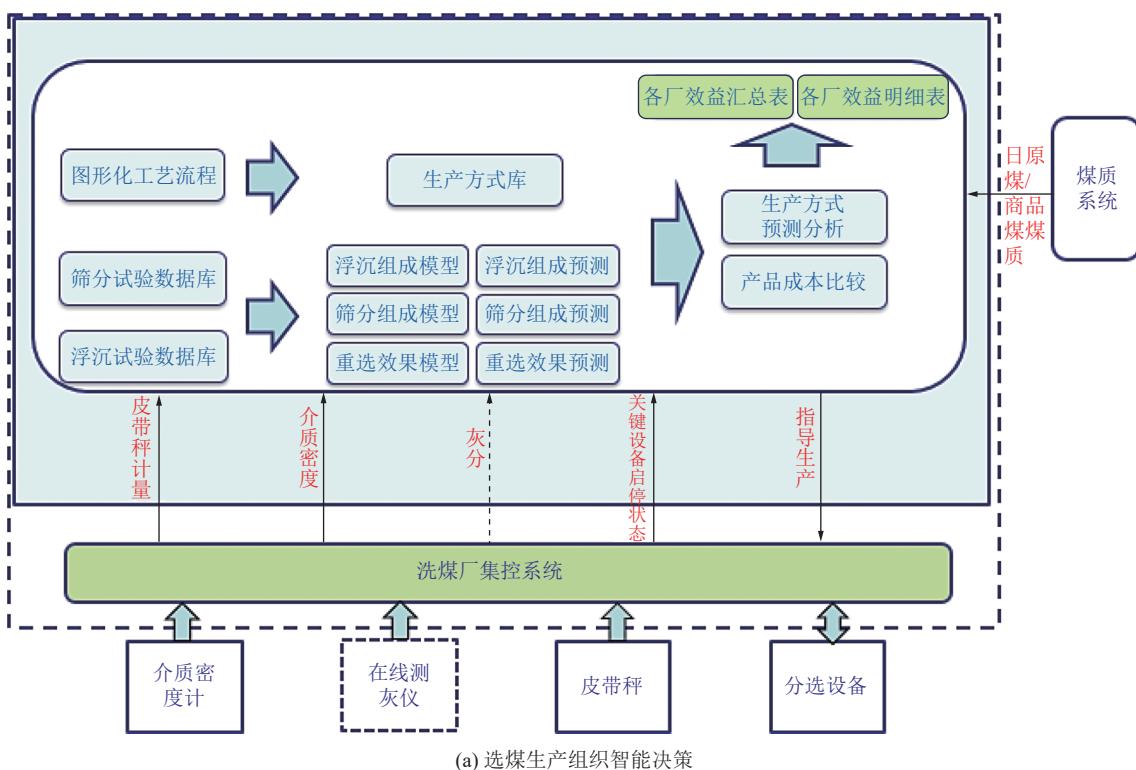
图 32 智能分选技术
Fig.32 Intelligent washing technology

和自动化集成的技术难度和工作周期。除此之外，神东公司首次提出并成功搭建了“矿井综合信息传输平台”，即“一网一站”，其中，“一网”指井下万兆环网，可实现对各大系统的统一接入、统一承载、统一管理；“一站”指通过一个综合分站集成包含无线通信、人员定位、车辆定位、工业电视、语音广播、调度指挥、工业自动化、安全监控共八大业务系统，如图 34 所示。并结合与华为公司共同发布的“矿鸿操作系统”，建立了智能生产管控平台^[40]，如图 35 所示。该平台集生产信息采集、存储、传输、统计、分析、发布于一体的完整信息系统，通过图形化工作界面，可直接了解和掌控现场的生产运行情况，为各级

管理者提供有力的决策分析手段。

4 神东公司亿吨矿井群绿色开采技术的研究与实践

为提高亿吨矿井群的绿色开采技术水平，达到煤矿高效绿色开采要求，神东公司构建了生态环境保护与修复技术体系，研发了微生物生态修复技术，并形成了多维度资源化的废物再利用技术，实现了“三废”协同治理，有效削弱了生态保护与生产需求之间的矛盾，推动了“低扰动、低排放、高安全”的可持续发展，为我国煤炭行业实现“双碳”目标提供了关键技术支撑。



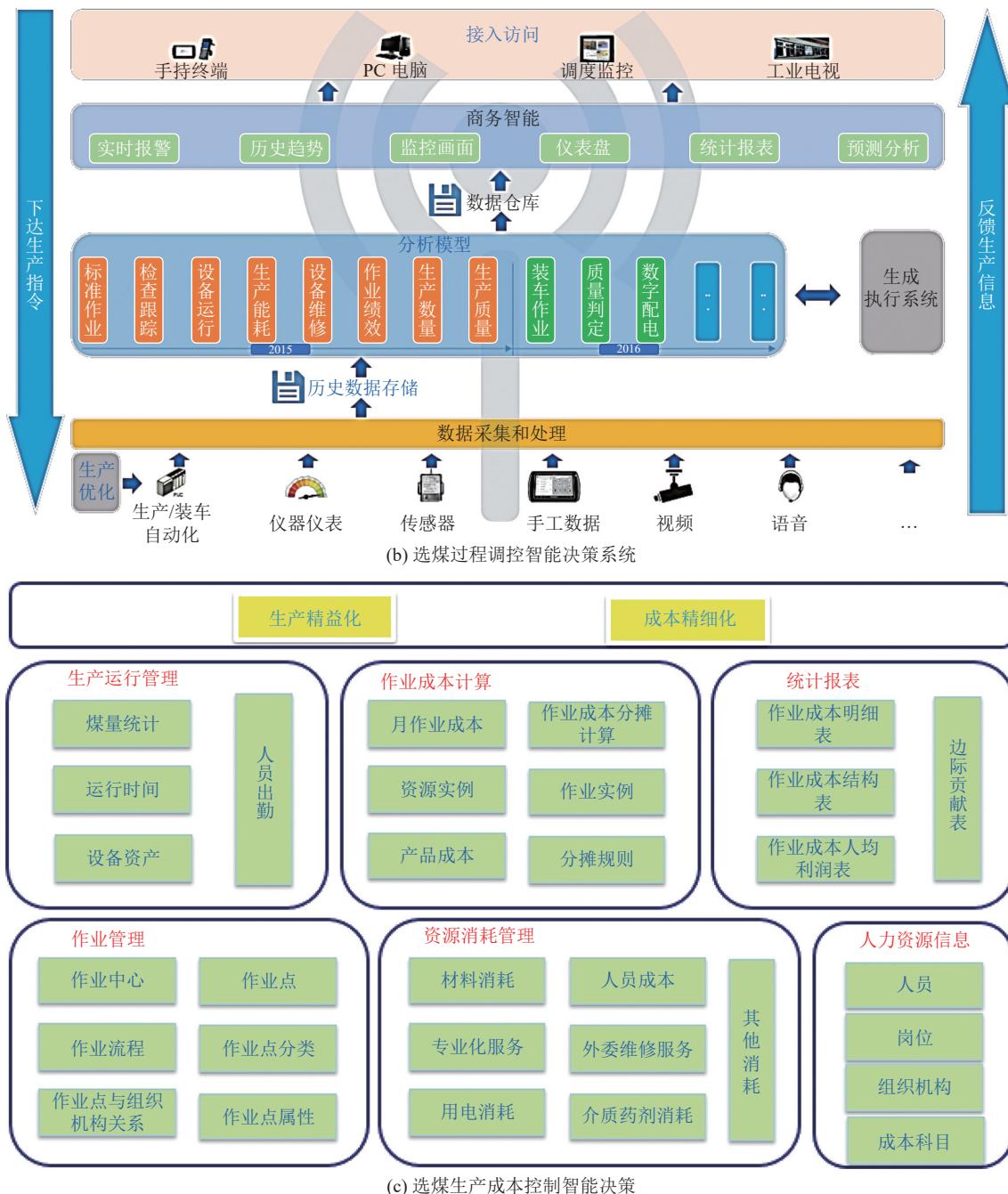


图 33 神东矿区选煤生产智能决策系统

Fig.33 Intelligent decision-making system for coal processing production in Shendong mining area

4.1 生态环境的保护与修复关键技术

4.1.1 生态环境保护与修复技术体系

神东面对大规模煤炭开采与脆弱生态环境的突出矛盾,不断创新绿色开采技术,破解了煤炭开采与生态环境保护这一难题,形成了煤炭绿色开采的理论和技术体系,走出了一条煤炭开采与生态环境协调治理的主动型绿色发展之路,建成了多个国家级生态修复示范基地,实现了亿吨矿井群资源与环境的协调开发,引领和带动了煤炭产业的绿色发展^[41]。该体系具体包含以下 3 个方面:

1) 面对脆弱的自然生态环境,摒弃先开发后治理的传统做法,结合脆弱自然生态特征与大规模开采影响,创新了“三期三圈”水土保持生态环境防治模式,如图 36 所示。

2) 摆弃传统煤炭企业“边生产边治理”与“先生后治”被动做法,创新出一条以“先治后采、治大采小、采治互动、以采促治、三方共赢”为特征的主动型水土保持生态环境建设道路。

3) 创新“3 项协同”技术,提出了我国西部资源环境协调发展的新范式。

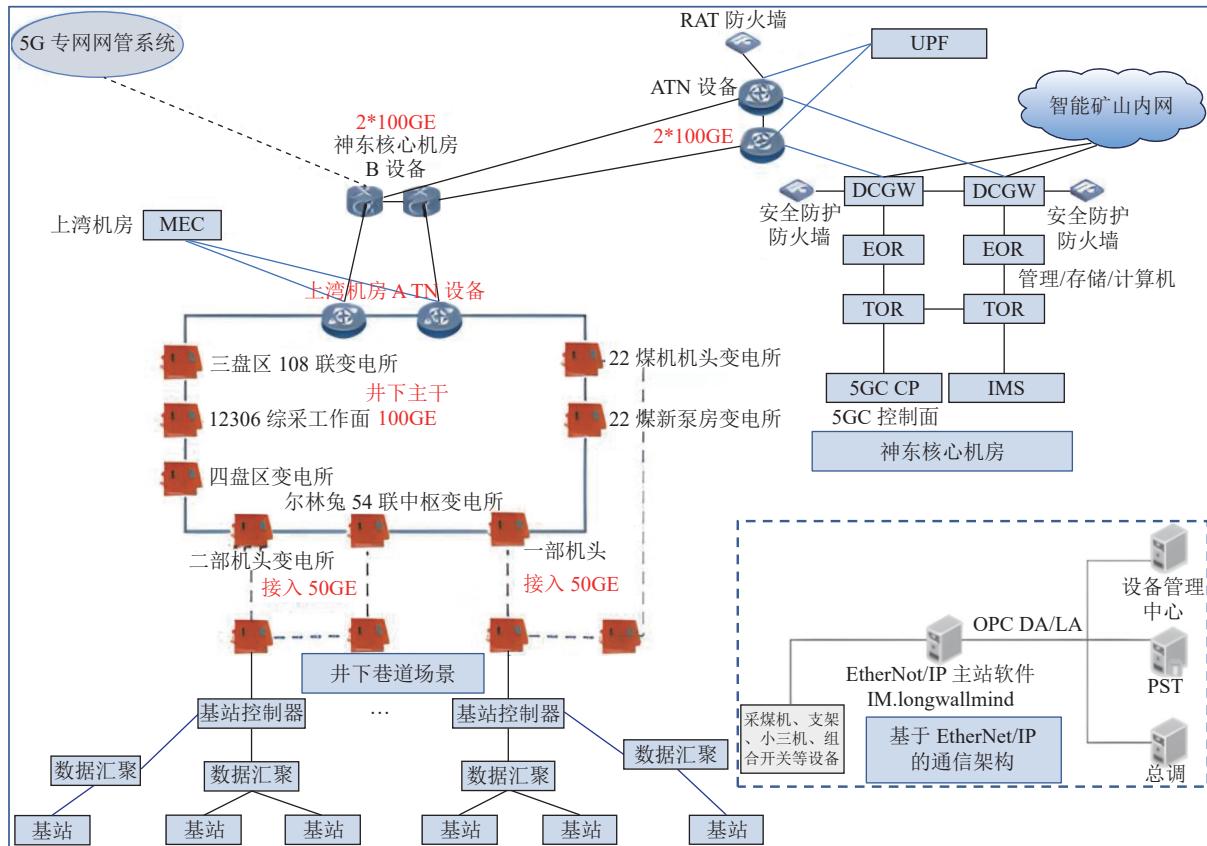


图 34 矿井综合信息传输平台架构

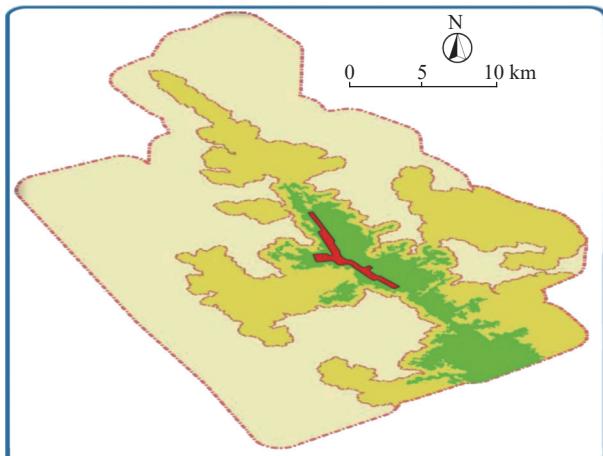
Fig.34 Mine integrated information transmission platform architecture

图 35 神东智能生产管控平台
Fig.35 Shendong's production control platform

4.1.2 采煤沉陷区地表植被生态修复关键技术

煤炭开采活动能够对植物根际土壤特性、土壤微生物和酶活性、微生物菌群多样性产生一定的影

响^[42]。针对此问题,神东公司开展了大量试验研究,深入探究了煤炭开采活动对土壤和微生物的具体影响,并提出了生态修复的有效方案。神东公司结合

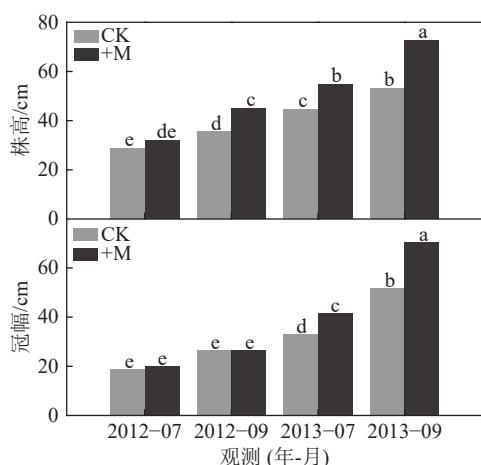


注: 图中黄色区域为“外围防护圈”, 绿色区域为“周边常绿圈”, 红色区域为“中心美化圈”。

图 36 “三期三圈”生态治理模式

Fig.36 “Three phases and three circles” ecological management

微生物复垦技术在大柳塔矿活鸡兔井塌陷区开展了生态修复工程试验, 通过向新建植的植物接种微生物, 使失去微生物活性的复垦区土壤重新建立和恢复土壤微生物体系, 加速复垦土壤的基质改良以及自然土壤向农业土壤的转化过程, 使生土熟化, 从而缩短复垦周期。其中, 供试菌种为实验室培养的内生菌 *Glomus mosseae*(G.m), 供试植物是紫穗槐, 试验地土壤为沙质土, 接种菌根后的紫穗槐生长如图 37 所示。由图 37 可知, 接种菌根 2 个月后, 菌根的生态效应开始显现, +M(接种组) 处理紫穗槐生长速度明显高于 CK(对照组) 处理, 即接种丛枝菌根有利于紫穗槐的生长, 表明该项技术能够有效促进植物生长发育, 改善植物营养条件, 实现矿区环境的可



注: 图中数值为平均值, 字母代表 5% 水平上的差异显著性。

图 37 接种菌根对紫穗槐生长的影响

Fig.37 Effect of inoculation with mycorrhizae on the growth of *Sophora japonica*

持续发展。目前, 因微生物复垦技术对植株生长的促进作用, 以及紫穗槐具备生长快、耐干旱、耐贫瘠的优良特性, 使得该项技术体系在神东矿区植被恢复工程中愈受青睐, 并得以广泛应用。

4.2 矿井废物利用的节能环保技术

神东公司所采用的矿井废物利用的节能环保技术主要包含矿井乏风余热利用技术、矿井水分级循环利用技术、纯水液压技术以及研石井下充填技术共 4 部分, 通过多维度资源化路径实现了“三废”协同治理^[41,43-46], 如图 38 所示。

其中, 矿井乏风余热利用技术主要采用热管技术开展矿井乏风低焓热能利用实践, 将热能有效传递给矿井新风, 确保了寒冷季节井筒进风所需的温度要求; 矿井水分级循环利用技术基于水质特征构建“井下涌水→沉淀过滤→工业回用/生态补水”的 3 级处理系统, 使水资源综合利用率大幅提升。纯水液压技术采用纯水介质液压技术代替乳化液介质液压技术对采煤支架进行优化改造, 首次在锦界煤矿开展了试验和应用, 并极大改善了矿井的工作和安全条件, 有效降低了煤矿的运营成本。研石井下充填技术主要包含研石井下直接充填、破碎研石注浆或膏体充填等研石处理技术, 不仅解决了研石占地带来的环境污染等问题, 还实现了井下残余边角煤资源的有效回收以及采空区自然发火等问题。

5 神东公司亿吨矿井群全面管理技术的研究与实践

为了提升企业核心竞争力, 引领煤炭行业规范化和专业化管理, 神东公司建立了集质量(工作质量、服务质量、管理质量)、安全、健康、环保等为一体的综合性管理体系, 持续开展体系化和标准化建设, 全面改善和提升生产经营管理水平, 不断提高适应煤炭行业特色的人力资源管理能力, 推进煤炭企业精益化管理, 构建了内外部相结合的专业化服务体系, 还开展了大型煤炭基地矿业组合服务模式与技术及其应用研究, 形成了先进的煤炭行业全面管理技术。

5.1 综合性管理体系的标准化

神东公司综合管理体系建立的依据是 GB/T 19001、GB/T 24001、GB/T 28001、NOSA、煤矿安全质量标准化考核评分标准, 是在神东公司原“一体化”的基础上, 借鉴 NOSA、安全质量标准化的管理理念, 有效引入安全质量标准化、NOSA 在现场管理中的工作内容等, 建立了集质量(工作质量、服务质量、管理质量)、安全、健康、环保等为一体的综合性管

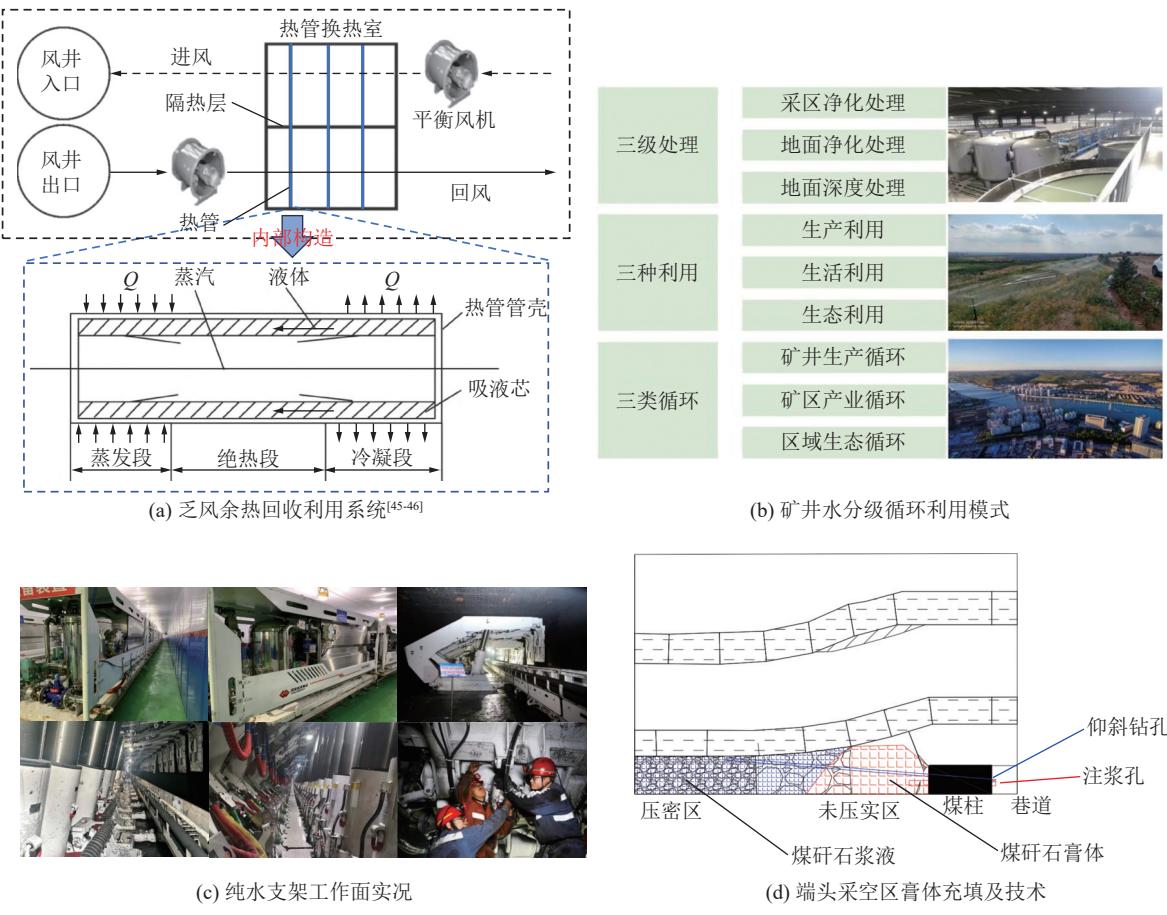


图 38 矿井废物利用的节能环保技术

Fig.38 Energy-saving and environmental protection technology for mine waste utilization

理体系。

而标准化是组织现代化、集约化生产的重要保证,是加快神东公司技术进步、加强科学管理的重要手段,所以神东公司以 GB/T 15496—2017《企业标准体系要求》等国家标准和神东公司发展战略为指导,按照国家相关法律法规、神东公司相关制度和规定的要求,构建了神东煤炭集团标准体系总体框架,如图 39 所示。

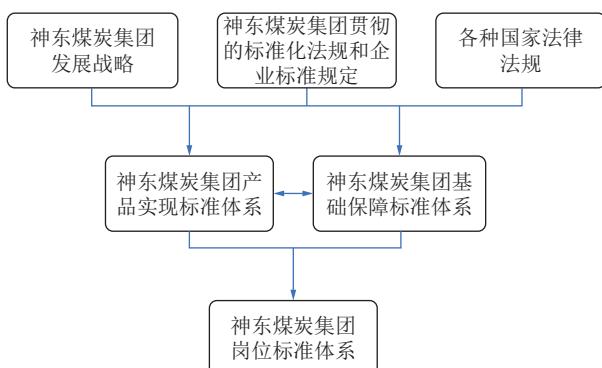


图 39 神东煤炭集团标准体系总体框架

Fig.39 Shendong Coal Group standard system general framework

5.2 综合性管理体系的精益化

5.2.1 生产精益化

精益生产是通过系统结构、人员组织、运行方式和市场供求等方面变革,使生产系统能很快适应用户需求不断变化,并能使生产过程中一切无用、多余的东西被精简,最终达到包括市场供销在内的生产的各方面最好结果的一种生产管理方式^[47]。神东公司作为我国煤炭行业的龙头,贯彻“五大发展理念”,在大力开展“找抓促”和“管理提升”活动的同时,一直在积极探索和实践精益化管理模式,弥补管理短板、夯实管理基础,提升企业核心竞争力,建设世界一流煤炭企业。

神东公司率先在上湾煤矿试行推行精益生产,在取得良好效果之后,对该试点单位进行经验总结,建立了神东煤炭生产精益化体系,如图 40 所示。

该体系建立后,神东公司在 46 个单位(其中 13 个矿井单位)进行了实施推行,皆取得了较好效果。该体系应用后,全公司设备故障次数和影响时间从 2015 年 160 次 1 060.4 h,降低到 2020 年的 105 次 882.3 h,单产水平从 2015 年 45.82 万 t 提升到 2020

年 52.2 万 t, 提升了 13.92%, 连掘和掘锚单进水平从 2015 年 1 058.3 m 和 512.76 m 提升到 2020 年的 1 129.2 m 和 581 m, 分别提升了 6.0% 和 6.3%。表明精益生产方式不仅适合机械制造业, 还可以在煤炭生产企业发挥作用, 能够有效提高煤炭生产效率, 降低生产成本。

5.2.2 经营及人力资源管理精益化

先进的煤炭企业在经营管理的实践和探索中, 要形成以全面预算管理、成本管理、全员绩效管理以及财务集中管控为核心的经营管理体系^[48], 逐步完善管理制度, 落实管理措施, 通过精益化管理及对标管理等先进管理办法, 最终实现经营管理的精细化, 降低经营管理成本, 提升企业的经营效益。其中, 全面预算管理利用系统科学的方法进行一套完整的预算, 便于管理层做出正确的决策(图 41a)。成本管理主要通过 4 级成本管理体系, 把煤炭公司、矿井、区队、班组 4 级核算体系作为成本管理和控制的载体, 着重在定额管理和班组核算方面进行加强(图 41b)。

财务管理主要为“4U2C1E”财务管理集中管理模式, 能够实现全公司核算体系的统一和专业化管理, 并优化人力资源配置, 为财务人员由核算型向管理型过渡奠定了基础。除此之外, 人力资源的开发和利用起着举足轻重的作用, 通过实行企业人力资源战略的制定、员工的招募与选拔、培训与开发、绩效管理、薪酬管理等一系列人力资源政策以及相应的精益化管理活动, 最终实现对企业发展目标的战略性支撑。

5.3 综合性管理体系的专业化

神东公司认真总结“大而全小而全”在企业发展过程中的弊端, 坚持“有所为, 有所不为”, 构建了内外部相结合的专业化服务体系^[49]。以煤炭生产规模化、集约化为基础, 以安全生产为中心, 将非煤炭业务直接从矿井剥离出来, 在全公司范围内统一实行专业化服务, 矿井和专业化服务单位建立了服务与被服务的合同契约关系, 推行内部模拟市场化有偿服务运作。目前神东公司专业化覆盖的业务有矿井生产准备、综采工作面回撤安装、设备管理、物资供应、分选加工等 14 多个方面。服务半径超过 200 km, 专业化服务单位员工总数占到公司总人数 48%。基于该专业化服务体系, 神东公司形成了煤炭生产核心板块用人少、速度快、效率高的格局, 实现了人员、装备、技术的资源共享, 提高了工作质量和运行效率, 降低了运营成本。

除此之外, 神东公司还开展了大型煤炭基地矿

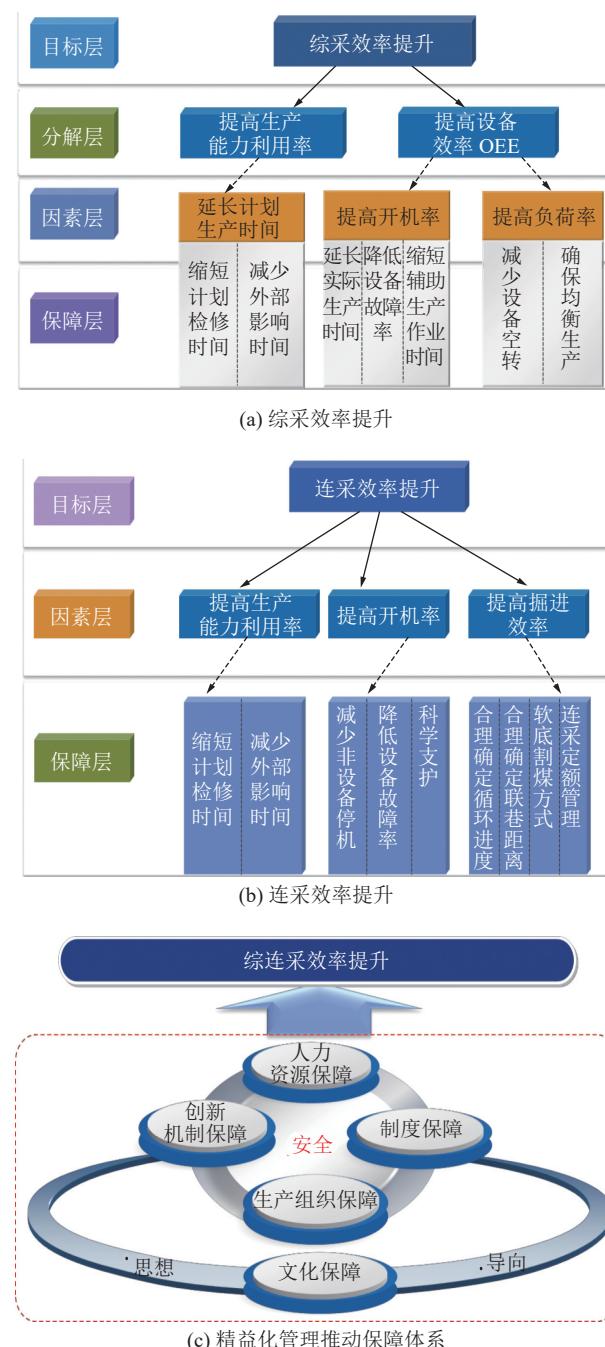


图 40 精益化管理体系
Fig.40 Lean management system

业组合服务模式与技术研究及应用示范工作^[50]。通过提供专业化的矿业组合服务, 神东公司实现了从生产商向“生产+服务”商的转型, 为煤炭生产企业的战略转型提供模板, 推动了整个煤炭行业转型升级和供给侧结构性改革。该矿业组合服务模式在陕西、山西、内蒙古等地皆成功完成示范工程应用, 矿业组合服务支撑平台如图 42 所示。近年来, 神东公司累计对外承揽矿业组合服务 132 项, 经济效益显著, 其中 2016 年实现收入约 1.98 亿元, 2017 年约 3.04 亿元, 由此可知矿业组合服务能够有效节省资金占用

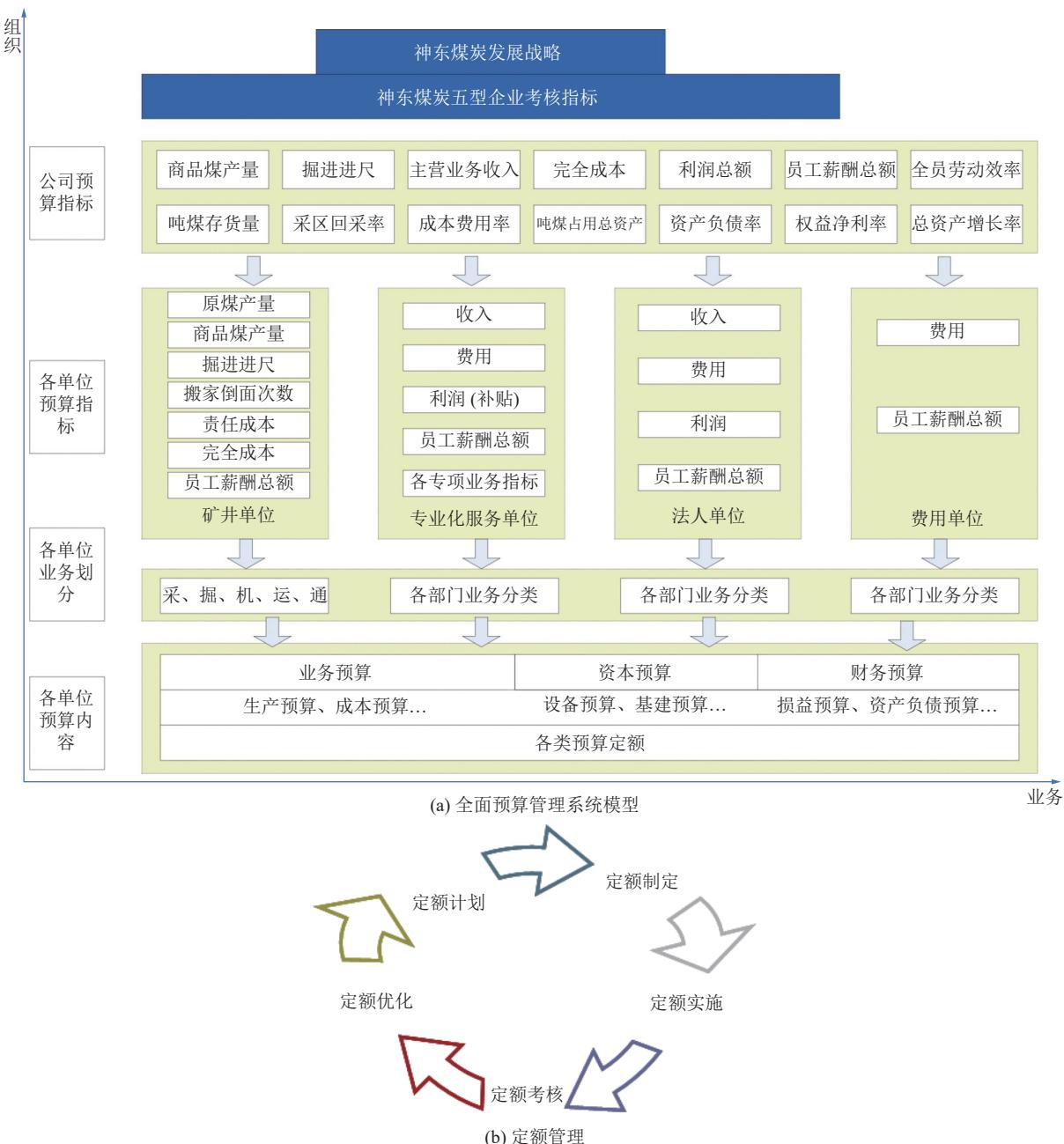


图 41 生产经营管理体系

Fig.41 Production and management system

率,增加利润来源渠道,实现资源整合,提供更为丰富广泛的服务。

6 神东公司亿吨矿井集群创新发展趋势

尽管神东公司在亿吨矿井群的安全智能绿色开采及管理方面取得了显著进展,但仍存在一些局限性。深部开采条件下的围岩控制技术对极端应力环境的适应性还需进一步优化,智能化装备在复杂地质条件下的稳定性仍需提升;设备控制系统兼容性问题突出,不同品牌设备间协议差异导致技术集成度较低,影响整体作业效率;智能化水平尚未完全满

足动态开采需求,设备自主决策仍依赖人工干预。基于上述问题,神东公司将继续围绕亿吨矿井集群的智能绿色化开采技术创新和产业协同等方向深入发展,通过提升技术水平、优化管理模式和加强产业协同,实现高质量、可持续发展。

1) 智能化发展方面:神东公司将加强“智能化+低碳化+矿井集群生产技术”的深度融合,致力于开发具备更高自适应能力的亿吨级矿井集群智能开采技术,并加强探索“双碳”目标下煤矿绿色智能化转型的新路径,以进一步推动“智能矿山+清洁能源”协同发展模式,助力煤炭工业向低碳化、数字化转型,

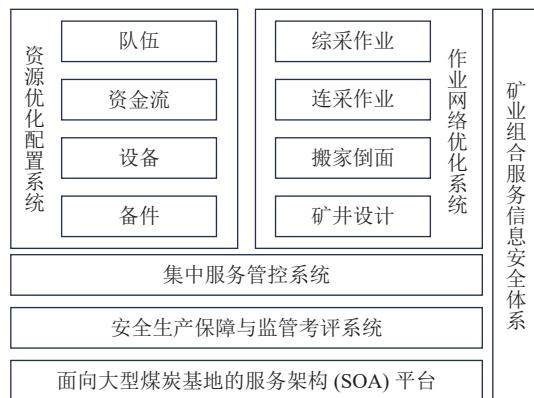


图 42 矿业组合服务支撑平台
Fig.42 Mining portfolio service support platform

全力为国家能源安全和行业高质量发展贡献神东力量; 神东公司将通过深度融合矿鸿操作系统与工业互联网平台, 强化智能装备与系统的升级, 构建全球首个亿吨级智能矿井协同运行系统, 并按照“智能化建井, 建智能矿井”的理念, 打造亿吨级智能煤矿集群, 建设亿吨级安全高效绿色智能示范矿区。除此之外, 神东矿区也会继续加强矿井集群与新能源、新材料等领域的深度融合, 实现更高效能的跨界发展。

2) 绿色开采方面: 神东公司将大力推广亿吨级矿井集群绿色开采技术, 如充填开采、生物修复等, 以减少煤炭开采过程中的资源浪费和环境污染; 推动煤炭产业向高端化、清洁化方向发展, 如煤制油、煤制气等, 实现煤炭的清洁利用; 大力推进零碳矿区示范工程的建设, 通过新能源协同开发及废弃资源的高效利用, 重塑传统能源企业绿色发展范式, 实现亿吨级矿井集群及生态修复产值效益最大化。

3) 人才培养方面: 亿吨矿井集群的安全化、智能化、绿色化建设更需要专业人才的智力支持, 神东公司将更加注重智能化、绿色开采等领域的专业人才培养和引进, 通过高校支持和企业培训, 培养“矿+AI”的复合型工程师群体, 打造智能矿山建设核心智力引擎, 为产业发展提供强力保障。

4) 产业协同管理方面: 神东公司将继续深入发展产业集群化, 通过整合资源, 提高产业集中度, 打造出基地化、集群化的亿吨级安全智能绿色示范矿区; 构建“智能开采-清洁转化-生态修复-碳汇交易”的全方位价值链, 形成可复制推广的亿吨级智能绿色矿山建设标准范式, 为国家能源安全战略实施和行业高质量发展提供创新实践样本。

7 结论与展望

神东公司通过近 10 a 的科技创新与实践, 系统

地推进了亿吨矿井集群的安全保障能力建设、智能化升级、绿色化改造以及集约化生产管理, 形成了神东特色的亿吨矿井群核心技术体系, 主要核心技术成果体现在以下 4 个方面:

1) 在亿吨矿井群安全生产方面, 神东公司开发了多样化顶板灾害防治技术, 研制了超大采高综采面顶板控制技术、定向钻孔水压致裂软化顶板坚硬岩层技术、无煤柱开采技术以及矿压预警平台; 研发了富水顶板防治水技术以及清污分离技术, 创建了“高产高效”模式压力下的 4 000 m³/h 大涌水量排水技术; 构建了亿吨矿井全生命周期煤与瓦斯协同开采与利用技术体系, 并根据各个产尘环节的不同特点形成了多重连环综合防尘技术体系以及包含以“快”防灭火、注浆、注氮等技术的煤层自燃综合防灭火技术体系。

2) 在亿吨矿井群智能高效开采方面, 神东公司创新了采掘装备与技术, 优化了快速准备与回撤搬家工艺, 研发了 8.8 m 特大采高综采工作面成套装备及双巷快速掘进技术工艺系统, 开发了全断面盾构法施工斜井装备、短壁机械化开采技术和薄煤层等高式采煤技术; 建立了包含智能运输、供电和分选的神东公司亿吨井群智能开采关键技术体系, 制定了“矿井设备数据接口与协议”数据通信标准, 创建了亿吨级智能生产管控平台, 实现了区域内全部煤矿的集中控制、集中显示、关联分析、故障诊断、智能报警、协同管理。

3) 在亿吨矿井群绿色开采方面, 神东公司创建了生态环境保护与修复技术体系, 研发了微生物生态修复技术及多维度废物再利用技术, 建成了多个国家级生态修复示范基地, 实现了“三废”协同治理及亿吨矿井群资源与环境的协调开发。

4) 在亿吨矿井群全面管理技术方面, 神东公司建立了集质量(工作质量、服务质量、管理质量)、安全、健康、环保等为一体的标准化、精益化和专业化的综合性管理体系, 开发了内外部相结合的专业化服务体系及大型煤炭基地矿业组合服务模式, 形成了全面的亿吨矿井群运营管理“软”核心技术。

尽管神东公司在亿吨矿井群的安全智能绿色开采及管理方面取得了显著进展, 但在极端应力条件下的设备适应性、控制系统的兼容性以及智能化水平仍存在一些局限性。为解决上述问题, 并深入推进亿吨矿井集群的高质量、可持续发展, 加速智能化、绿色化与矿井集群生产的融合, 神东公司将继续加强探索“双碳”目标下煤矿绿色智能化转型的新路径,

开发具备更高自适应能力的亿吨级矿井集群智能开采技术，并深度融合矿鸿操作系统与工业互联网平台，加强新型“矿+AI”的复合型人才的培育，推进新能源的协同开发及废弃资源的高效利用，重塑传统能源企业绿色发展范式，构建“智能开采—清洁转化—生态修复—碳汇交易”的全方位价值链，着力打造资源开发与生态治理协同发展的亿吨级矿井集群示范区，为保障国家能源安全和行业高质量发展贡献神东方案。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1–16.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1–16.
- [2] WANG G F, REN H W, ZHAO G R, et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(1): 24.
- [3] JI P F, LIN H F, LI S G, et al. Technical system and prospects for precise methane extraction in the entire life cycle of coal mining under the goal of “carbon peak and carbon neutrality”[J]. Geoenrgy Science and Engineering, 2024, 238: 212855.
- [4] 赵冰, 冯志忠. 基于新质生产力下神东矿区高质量发展路径探索[J]. 中国煤炭, 2024, 50(S1): 428–432.
ZHAO Bing, FENG Zhizhong. Exploration of high quality development path of Shendong mining area based on new quately productive force[J]. China Coal, 2024, 50(S1): 428–432.
- [5] 罗文. 国能神东煤炭集团重大科技创新成果与实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 1–43.
LUO Wen. Major scientific and technological innovation achievements and practices of CHN Shendong Coal Group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 1–43.
- [6] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [7] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11–22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11–22.
- [8] 张林, 王国法, 刘治国, 等. 煤矿智能化建设市场现状及发展趋势研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 29–44.
ZHANG Lin, WANG Guofa, LIU Zhiguo, et al. Research of the present situation and development trend of intelligent coal mine construction market[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 29–44.
- [9] JIA Z J, LIN B Q. How to achieve the first step of the carbon-neutrality 2060 target in China: The coal substitution perspective[J]. Energy, 2021, 233: 121179.
- [10] 贺生忠. 供给侧改革背景下煤炭企业专业化服务模式研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(11): 120–123.
HE Shengzhong. Study on specialized service mode of coal enterprises under the background of supply side reform[J]. China Coal, 2017, 43(11): 120–123.
- [11] 李全生, 郭俊廷, 张凯, 等. 西部煤炭集约化开采损伤传导机理与源头减损关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3636–3644.
LI Quansheng, GUO Junting, ZHANG Kai, et al. Damage conduction mechanism and key technologies of damage reduction in sources for intensive coal mining in Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3636–3644.
- [12] 王天瑞. 以文化聚力赋能 筑牢矿井安全发展之基[J]. 中国煤炭工业, 2024(12): 72–73.
WANG Tianrui. Empowering with cultural cohesion to build the foundation of mine safety development[J]. China Coal Industry, 2024(12): 72–73.
- [13] 范雅慧, 刘英, 衡文静, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区1990—2022年煤炭开采对生态环境的影响分析[J]. 绿色矿山, 2024(1): 41–53.
FAN Yahui, LIU Ying, HENG Wenjing, et al. Impact analysis of coal mining on ecological environment in Shendong Mining area from 1990 to 2022 based on R_{SEI} [J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 41–53.
- [14] 牛鸿波, 田少国, 祖鹏举, 等. 神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 267–277.
NIU Hongbo, TIAN Shaoguo, ZU Pengju, et al. Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 267–277.
- [15] CHEN Z C, ZHU Z Y, ZHANG X F, et al. Study on spatio-temporal evolution of ecosystem services, spatio-temporal pattern of tradeoff/synergy relationship and its driving factors in Shendong mining area[J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1445833.
- [16] 张俊. 神东保德矿地应力特征及其对底板采动破坏控制机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
ZHANG Jun. Study on in-situ stress characteristics and its control mechanism on mining failure of floor in Baode coal mine, Shendong mining area[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [17] 宋桂军, 李化敏. 布尔台矿综放工作面端面冒顶影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1170–1176.
SONG Guijun, LI Huamin. Study on influence factors of roof fall at fully mechanized sublevel caving face in Buertai coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1170–1176.
- [18] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 浅埋特大采高综采工作面关键层“悬臂梁”结构运动对端面漏冒的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1197–1204.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of key strata can-

- [18] tilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1197–1204.
- [19] 杨英兵, 王青祥, 宋小林, 等. 神东矿区浅埋煤层开采地表裂隙分布及动态演化特征研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 66–75.
YANG Yingbing, WANG Qingxiang, SONG Xiaolin, et al. Research on distribution and dynamic evolution characteristics of surface fractures in shallow coal seam mining of Shendong Mining Area[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(6): 66–75.
- [20] 蔚保宁. 水力压裂技术在浅埋煤层工作面初次放顶中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(S1): 100–102.
(WEI/YU) Baoning. Application on hydraulic fracturing technique in first caving of shallow buried coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S1): 100–102.
- [21] 康红普, 冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 1–9.
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 1–9.
- [22] 杨汉宏, 薛二龙, 罗文, 等. 神华集团切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术的应用[J]. 煤炭科技, 2015, 36(3): 1–3.
YANG Hanhong, XUE Erlong, LUO Wen, et al. Application of automatic roadway-forming and non-pillar mining technology with roof cutting and pressure relief in Shenhua Group[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2015, 36(3): 1–3.
- [23] 徐刚, 张震, 张春会, 等. 我国煤矿开采工作面顶板灾害及防治技术研究现状[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(5): 16–41.
XU Gang, ZHANG Zhen, ZHANG Chunhui, et al. Review on roof disaster and prevention technology for coal mining face in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(5): 16–41.
- [24] 张永福. 保德煤矿瓦斯综合防治技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3): 68–71, 75.
ZHANG Yongfu. Comprehensive prevent and control technology of gas in Baode coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3): 68–71, 75.
- [25] 高登彦, 陈建华, 欧阳一博. 近距离复合采空区煤自燃灾害防控技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S2): 159–167.
GAO Dengyan, CHEN Jianhua, OUYANG Yibo. Prevention and control technology of coal spontaneous combustion disaster in short-distance composite goaf[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 159–167.
- [26] 崔亚仲, 任艳艳, 白明亮. 神东矿区煤炭智能化建设实践[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 218–226.
CUI Yazhong, REN Yanyan, BAI Mingliang. Practice of intelligent construction of Shendong coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 218–226.
- [27] 贾士耀. 8.8m 超大采高综采工作面末采贯通关键技术应用研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 60–66.
JIA Shiyao. Key technology of end mining cut-through in 8.8m super-high fully mechanized mining face[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12): 60–66.
- [28] 罗文, 余伊河, 王文. 神东矿区综采工作面过同层位空巷强矿压显现机理及控制方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3335–3352.
LUO Wen, YU Yihe, WANG Wen. Mechanism and control of strong mine pressure in fully mechanized mining face of Shendong mining area when crossing abandoned roadways in the same coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3335–3352.
- [29] 赵海兴. 神东矿区煤矿掘进工艺及装备智能化技术研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(3): 10–14.
ZHAO Haixing. Research on coal mine tunneling and equipment intelligentization technology in Shendong mining area[J]. Coal Engineering, 2024, 56(3): 10–14.
- [30] 张东宝. 煤巷智能快速掘进技术发展现状与关键技术[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 56–59.
ZHANG Dongbao. Development status and key technology of intelligent rapid driving technology in coal seam roadway[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 56–59.
- [31] 张渊. 全断面高效快速掘进系统在大柳塔煤矿的应用[J]. 中国煤炭工业, 2015(6): 56–57.
ZHANG Yuan. Application of full-face efficient rapid excavation system in daliuta coal mine[J]. China Coal Industry, 2015(6): 56–57.
- [32] 赵国喜. 三下压煤充填采煤技术发展现状及展望[J]. 能源与节能, 2016(7): 129–130.
ZHAO Guoxi. Development status and prospect of filling mining technology in “three unders” pressed coal[J]. Energy and Energy Conservation, 2016(7): 129–130.
- [33] 霍建军, 杨景惠, 孙波. 综采辅巷多通道回撤工艺通风系统管理研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 142–146.
HUO Jianjun, YANG Jinghui, SUN Bo. Study on ventilation system management of multi-channel withdrawal process in fully mechanized mining auxiliary roadway[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 142–146.
- [34] 满娜, 周凯. 综采工作面快速回撤成套支护装备组成及应用[J]. 能源与节能, 2022(1): 151–153.
MAN Na, ZHOU Kai. Composition and application of complete support equipment for rapid withdrawal in fully mechanized mining face[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(1): 151–153.
- [35] 方杰, 何虎军. 综采设备辅巷多通道快速回撤在神东矿区的应用[J]. 煤矿开采, 2012(1): 42–44, 58.
FANG Jie, HE Hujun. Application of multi-channel fast dismantlement technology of full-mechanized mining equipments in Shendong mining area[J]. Coal Mining Technology, 2012(1): 42–44, 58.
- [36] 张强. 神东矿区综采工作面机尾缩面技术研究[J]. 价值工程, 2019, 38(9): 142–145.
ZHANG Qiang. Research on the machine tail shrinking face technology of fully mechanized mining face in Shendong mining area[J]. Value Engineering, 2019, 38(9): 142–145.
- [37] 郝玉兵, 邬方崇. 采用多掩护式专用支架回撤工作面液压支架[J]. 陕西煤炭, 2016, 35(6): 106–108.
HAO Yubing, WU Fangchong. The withdrawing technology of

- hydraulic supports in fully mechanized mining face by special shield hydraulic supports[J]. Shaanxi Coal, 2016, 35(6): 106–108.
- [38] 杨真, 贺晓峰, 廖志伟, 等. 煤矿智能化主运输系统无人值守关键技术研究与实践[J]. 工矿自动化, 2022, 48(S1): 61–66.
YANG Zhen, HE Xiaofeng, LIAO Zhiwei, et al. Research and practice on key technologies of unattended intelligent main transportation system in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(S1): 61–66.
- [39] 董其峰. 洗选中心设备智能管理现状及优化分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 714–717.
DONG Qifeng. Intelligent management status and optimization analysis of washing center equipment[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 714–717.
- [40] 崔亚仲, 贺建荣, 任艳艳. 神东矿区人工智能安全生产管控平台应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 275–283.
CUI Yazhong, HE Jianrong, REN Yanyan. Research on application of artificial intelligence safety production management and control platform in Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 275–283.
- [41] 刘海平, 王义. 神东矿区资源环境治理对策研究及其具体实践[J]. 中国煤炭, 2023, 49(S1): 6–14.
LIU Haiping, WANG Yi. Study on countermeasures of resources and environment management in Shendong mining area and its concrete practice[J]. China Coal, 2023, 49(S1): 6–14.
- [42] 刘刚, 张伟龙, 宋子恒. 采煤沉陷区裂缝边缘带土壤、作物、微生物响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 127–134, 145.
LIU Gang, ZHANG Weilong, SONG Ziheng. Response characteristics of soil, crops and microorganisms at the fracture edge of the coal mining subsidence area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 127–134, 145.
- [43] 王福海. 煤矿综采工作面纯水液压技术装备研究与应用[J]. 煤矿机械, 2025, 46(2): 114–118.
WANG Fuhai. Research and application of pure water hydraulic technology equipment in coal mine fully mechanized mining face[J]. Coal Mine Machinery, 2025, 46(2): 114–118.
- [44] 罗文, 王庆雄. 神东高强度开采煤矸石规模化利用模式研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 1–7.
LUO Wen, WANG Qingxiong. Research on large-scale utilization mode of coal gangue in Shendong high-intensity mining[J]. Coal Engineering, 2023, 55(4): 1–7.
- [45] 李晓峰. 井工煤矿地面主通风机乏风余热利用技术应用[J]. 煤炭工程, 2024, 56(S1): 73–77.
LI Xiaofeng. Application of waste heat utilization technology for surface main ventilator in underground coal mine[J]. Coal Engineering, 2024, 56(S1): 73–77.
- [46] 王小龙. 矿井回风热管余热回收利用研究[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 42–46+58.
WANG Xiaolong. Study on recovery and utilization of heat pipe waste heat from mine return air[J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(1): 42–46+58.
- [47] 上官萍. 简述精益化在煤炭企业人力资源管理实践中的应用[J]. 管理观察, 2017(27): 56–58.
SHANGGUAN Ping. Brief introduction of lean application in human resource management practice of coal enterprises[J]. Management Observer, 2017(27): 56–58.
- [48] 乔磊. 全面预算管理在神东煤炭集团中的应用分析[J]. 中外企业家, 2020(11): 87–88.
QIAO Lei. Application analysis of comprehensive budget management in Shendong coal group[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2020(11): 87–88.
- [49] 张丽. 神东对外开展专业化服务实践研究[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(S1): 180–184.
ZHANG Li. The practice of carrying out external specialized service[J]. Shaanxi Coal, 2018, 37(S1): 180–184.
- [50] 杨鹏. 神东矿井生产组合服务模式探索[J]. 中国煤炭, 2016, 42(5): 5–9.
YANG Peng. Exploration of Shendong mine production combined service model[J]. China Coal, 2016, 42(5): 5–9.