



煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展

王国法 张建中 刘再斌 庞义辉 王佟 桑聪

引用本文：

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. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 1–16.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1190>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术

Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 67–74 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4115181f-fba2-4a87-84d1-3cc2f05bb6ac>

基于透明地质大数据智能精准开采技术研究

Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 286–293 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.026>

智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究

Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/623337e8-793e-4eeb-acf6-95ef8f50260e>

煤炭安全智能开采地质保障系统软件开发与应用

Development and application of geological guarantee system software for safe and intelligent coal mining
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 13–24 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/696834e4-c513-445b-a884-a948d5c17e60>

煤矿智能地质保障系统研究进展与展望

Research progress and prospects of coal mine intelligent geological guarantee systems
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 334–348 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2125>

煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术

Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 1–12 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/22e87d78-e0b2-4abe-bee7-93a15998961b>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

“矿山智能化与人工智能”专题



移动扫码阅读

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.

煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展

王国法¹, 张建中^{2,3}, 刘再斌⁴, 庞义辉^{2,3}, 王 佟¹, 桑 聪^{2,3}

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究院有限公司, 北京 100013; 3. 天地科技股份有限公司北京技术研究分公司, 北京 100013; 4. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 分析了当前我国煤炭资源绿色开发面临的新形势和新要求, 提出了煤炭资源绿色开发复杂巨系统数智化技术体系, 以绿色开发模式为目标, 以地质透明化为基础, 将煤矿全要素数字化, 完成煤矿所有信息的精准实时采集、网络化传输、规范化集成、可视化展现、自动化运行和智能化服务的数字化智慧体, 通过融合一系列数智化关键技术推动煤炭资源绿色智能平衡开发与管控模式迭代升级; 提炼“数智开采”技术, 研发了数字煤矿智慧逻辑模型、复杂变形条件下“采场-装备”双动态系统耦合分析模型、开采设备群健康状态评估与剩余寿命预测模型等关键技术, 提出了智慧逻辑模型框架下的开采系统智能化控制方法, 智能开采复杂场景综采设备群姿态识别方法、全局最优规划策略及协同控制方法、设备健康状态识别与故障诊断方法; 诠释“透明地质”概念, 提出了透明地质保障技术路径, 研发了精细物探与钻探、围岩条件动态监测、多源高精度数据采集、多源异构数据融合解译等地质透明化技术, 创新了静态地质建模、动态地质建模、工作面精准地质保障、多源地质数据解译融合、多属性动态高精度建模、地质信息同步映射、矿山信息模型等地质数字化技术, 分析了“透明地质”技术在地下资源开发地质构造探明程度、揭示煤岩物理力学性质、“三场”变化、隐蔽致灾因素预测等应用价值; 分析了绿色开采技术, 包括绿色减沉与保水开采技术和井上下协同治理与生态修复技术; 围绕数智开采、透明地质和绿色开采3方面技术进行了案例解析, 展望当前形势下, 需亟待加速数据驱动下煤炭资源绿色开发与管理变革转型, 推动煤炭行业高质量发展进入新阶段。

关键词: 绿色矿山; 煤矿智能化; 智能开采; 绿色开采; 地质探测; 地质建模; 透明地质

中图分类号: TD82; TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)11-0001-16

Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development

WANG Guofa¹, ZHANG Jianzhong^{2,3}, LIU Zaibin⁴, PANG Yihui^{2,3}, WANG Tong¹, SANG Cong^{2,3}

(1. China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China;
3. Beijing Technology Research Branch, CCTEG Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Analyzed the new situation and requirements facing the green development of coal resources in China, proposed a complex and intelligent technology system for the green development of coal resources, with the goal of green development mode and geological transparency as the basis. Digitized all elements of coal mines, and completed the precise real-time collection, networked transmission, standardized integration, visual display, automated operation, and intelligent service of all information in coal mines as a digital intelligent agent. By integrating a series of key digital intelligent technologies, it promotes the iterative upgrading of green, intelligent, balanced development and control mode of coal resources. We have refined the “digital intelligent mining” technology and developed key technolo-

收稿日期: 2024-05-21 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-1190

基金项目: 中国煤炭科工集团科技专项重点资助项目(2023-TD-ZD002, 2024-TD-ZD014-01, 2024-TD-ZD014-02)

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

通讯作者: 张建中(1980—), 男, 河北保定人, 高级工程师。E-mail: 18614716@qq.com

gies such as the digital coal mine intelligent logic model, the “mining equipment” dual dynamic system coupling analysis model under complex deformation conditions, the mining equipment group health status evaluation and remaining life prediction model, etc. We have proposed intelligent control methods for mining systems under the intelligent logic model framework, intelligent mining complex scene comprehensive mining equipment group posture recognition methods, global optimal planning strategies and collaborative control methods, equipment health status recognition and fault diagnosis methods; Interpreting the concept of “transparent geology”, proposing a path for transparent geological security technology, developing geological transparency technologies such as fine geophysical exploration and drilling, dynamic monitoring of surrounding rock conditions, multi-source high-precision data collection, multi-source heterogeneous data fusion and interpretation, innovating geological digitalization technologies such as static geological modeling, dynamic geological modeling, precise geological security of working faces, multi-source geological data interpretation and fusion, multi-attribute dynamic high-precision modeling, synchronous mapping of geological information, mining information modeling, etc., analyzing the application value of “transparent geology” technology in underground resource development geological structure exploration degree, revealing the physical and mechanical properties of coal and rock, “three field” changes, hidden disaster factor prediction, etc; Analyzed green mining technologies, including green sedimentation reduction and water conservation mining technologies, as well as well as collaborative management and ecological restoration technologies above and below the well; Case analysis was conducted around three technologies: intelligent mining, transparent geology, and green mining. It is expected that under the current situation, there is an urgent need to accelerate the transformation of data-driven green development and management of coal resources, and promote the high-quality development of the coal industry into a new stage.

Key words: green mine; intelligent coal mining; intelligent mining; green mining; geological exploration; geological modeling; transparent geology

0 引言

煤炭是我国主体能源和重要工业原料,担负着保障国家能源供给和社会经济发展的重大使命,根据国家能源局统计数据显示,我国原煤产量年均增长率约4.5%,2023年达47.1亿t,原煤占我国一次能源生产总量的占比仍保持在65%以上,煤炭消费量占能源消费总量的55%以上,火电占总发电量的66%以上。煤炭资源是能够实现安全高效绿色开发和清洁高效低碳利用的可靠能源,在我国构建新型能源体系中发挥着主体能源的稳定器和“压舱石”作用。

煤矿智能化是煤炭行业高质量发展的必由之路,是煤炭发展新质生产力的核心要素,煤炭行业必须坚持走生态优先、绿色低碳、安全智能的高质量发展道路,煤炭开发方式向数字化、智能化、绿色化方向发展。近年来,煤炭行业多位专家学者取得了一系列研究成果:刘峰等^[1]提出了数字化、智能化、绿色化(三化)协同的发展模式,揭示了煤炭新质生产力的核心内涵、总体架构和技术路径,提出了双碳背景下的煤炭安全区间与绿色低碳技术路径^[2];王国法等^[3]提出了智慧煤矿与智能化开采技术发展方向,智能化煤矿以6S技术特征和要求为评价准则^[4],系统阐述了煤矿智能化技术进展与问题^[5],研制了厚煤层智能绿色高效开采技术装备^[6],总结了煤矿无人化智能开采系统理论与技术进展^[7],以及对回采工作面地质保障技术进行了应用探索^[8]等;范京道等^[9]研究了煤矿智能化重构人与煤空间关系,并研制了全

矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备^[10];金智新等^[11]提出了新一代信息技术赋能煤矿装备数智化转型升级;彭苏萍等^[12-13]提出了煤矿安全高效开采地质保障系统技术要求,以及分析了煤田绕射地震勘探技术;王双明等^[14]提出了智能开采、深部开采、绿色开采对地质保障技术发展的需求,研究了“透明地质”“数字地质”以及“宜居地质”的关键技术;袁亮等^[15]分析了煤矿透明地质模型动态重构关键技术,程建远等^[16]提出了透明地质保障应用场景及关键技术等,进一步明确了地质透明化是实现智能开采的关键技术保障。

我国“双碳”战略要求下,煤炭开采方式逐步向绿色低损害和智能化低碳方向转型,尽可能降低对生态环境的扰动,实现无害化开采,其中,钱鸣高等^[17-19]提出了煤矿绿色开采技术体系,提出资源与环境协调的绿色采模式,提出煤炭的科学开采;缪协兴等^[20]进一步分析了我国煤炭资源绿色开采发展趋势,并不断发展完善和指导我国煤炭开采工程实践;袁亮等^[21-23]研究了我国绿色煤炭资源量预测方法,提出了煤炭精准开采的构想,以及关闭/废弃矿井资源开发利用的科学思考,提出了煤炭高质量发展的理论技术和透明地质模型动态重构的关键技术与路径;顾大钊等^[24-25]提出了我国煤矿地下水库理论框架和技术体系,构建了基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系;彭苏萍等^[26-27]提出了矿区生态环境可持续发展模式,研究了生态环境修复关键技术;王佟等^[28-30]揭示了中国绿色煤炭资源

概念及内涵,在地质勘查、绿色矿山建设及评价指标等方面进行分析。我国煤炭行业发展方式进行着加速变革^[31],资源开采的过程中减少矿井水和固体废弃物排放,同时实现水、固废及沉陷土地的资源化利用,对现有采动影响区和废弃矿井等开展生态修复,建设矿山绿色生态。

笔者在煤炭绿色智能开发与透明地质保障技术系统性创新研究和工程实践基础上,提出煤炭资源绿色开发复杂巨系统数智化技术体系,研发煤矿智能化绿色开采关键技术,诠释“透明地质”理念和研发关键技术,通过在不同条件的智能化开采工作面进行应用,不断加以推进迭代研发、技术进步和应用价值,为煤炭资源绿色智能开发提供可靠保障。

1 煤炭绿色开发新形势和新要求

1.1 我国能源供应链安全形势严峻

据国家能源局统计数据,2024年上半年,全社会用电量约4.7万亿kWh,同比增长8.1%,第一、二、三产业用电量同比分别增长8.8%、6.9%、11.7%。煤炭、汽油、柴油消费量小幅增长,天然气、煤油消费量较快增长。煤炭日均产量保持在1200万t以上,煤炭进口2.5亿t,在去年高基数基础上同比增长12.5%。预计我国一次能源消费在2030—2035年间实现达峰,峰值在62亿t标煤以上。目前,我国人均能源消费量仅为G7国家平均水平的一半左右,人均生活用电量不到美国的1/4,今后一个时期能源消费还将保持刚性增长,保障能源安全可靠供应,特别是迎峰度夏、度冬等时段的用能需求,仍面临较大压力。

根据国际能源署发布的《2023年煤炭市场报告》(以下简称《报告》)显示,2023年全球煤炭需求总量超过85亿t,同比上涨1.4%,创历史新高,2023年全球煤炭供应量同样出现上涨,达到87.41亿t,涨幅约为1.4%,刷新历史最高纪录。《报告》指出,过去两年,全球煤价大幅波动,部分时间涨价幅度超出预期,由此导致许多国家用能成本上升,多国政府不得不出台补贴措施以降低居民用能成本。

1.2 “双碳”与ESG理念变革煤炭开发模式

以“双碳”目标为导向的低碳经济将不断优化化石能源需求的规模和比重,如新能源快速发展,非化石能源在新增发电装机容量中占比较大,但其技术经济局限性在短期内难以突破,存在的不稳定性、间歇性强以及规模大、投资大、贡献相对较小等特点制约着新能源对传统化石能源的快速替代。因此,新

形势下煤炭资源的战略属性地位与“压舱石”作用更为突出。

当前,ESG(Environmental, Social and Governance)逐步成为了当代衡量企业价值的新标准,它涵盖Environmental(环境)、Social(社会)和Governance(治理)三个维度,用以评估企业的可持续发展能力。为适应新形势下发展挑战,煤炭企业应加快建立ESG治理体系,一方面需尽快完善ESG管理架构,提升内部管理透明度,积极采取减排降耗、节能降耗、循环利用等措施,优化生产过程和产品结构,减少对环境的负面影响,接受外部的监督和评价;另一方面,同步构建煤炭企业绿色供应链,健全职业健康管理体系,加快推进绿色开采和生态修复,减少对环境的破坏和污染,提高资源利用效率和回收率,逐步实现循环经济和绿色生产。

1.3 煤矿智能化向高级智能绿色发展

2023年12月,国家能源局公布了首批47座已经通过验收的智能化示范煤矿,其中井工煤矿42座、露天煤矿5座。首批智能化示范煤矿建设总投资超过230亿元,但总体上仍处于中低级水平,高级智能化煤矿尚未形成。

2024年3月,国家能源局印发了《2024年能源工作指导意见》《煤矿智能化标准体系建设指南》等文件,提出核准一批安全、智能、绿色的大型现代化煤矿,以高质量标准体系引领智能化煤矿建设、支撑煤炭行业高质量发展;2024年5月,国家能源局发布了《关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知》,明确大型煤矿要加快智能化改造,到2025年底前建成单个或多个系统智能化,具备条件的要实现采掘系统智能化;2024年4月,国家矿山安监局等七部委发布了《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》,明确到2026年全国煤矿智能化产能占比不低于60%,全国矿山井下人员减少10%以上,推动煤矿智能化建设向更深入、更高级阶段发展。

2024年4月,中华人民共和国自然资源部等七部委联合印发了《关于进一步加强绿色矿山建设的通知》,要求到2028年底,绿色矿山建设工作机制更加完善,持证在产的90%大型矿山、80%中型矿山要达到绿色矿山标准要求,各地可结合实际,参照绿色矿山标准加强小型矿山管理。新建矿山正式投产后1~2a内应通过绿色矿山评估核查;对剩余储量可采年限不足3a的生产矿山,要求按照绿色矿山建设标准进行生产管理;着重做好闭坑前的矿山地质

环境恢复治理、土地复垦和植被恢复等工作,确保生态修复到位。

据不完全统计,截至2023年底,全国1746家矿山企业纳入绿色矿山名录库,其中煤矿376个,占比21%。因此,从国家、企业和社会发展等方面,对煤炭资源开发均提出了绿色、智能等新要求,迫切需要绿色开发数智化理论及技术,建立健全智能绿色煤矿建设标准体系,推动矿山智能绿色开发技术迭代升级,实现资源开发与生态保护协调发展。

2 煤炭绿色开发数智化技术体系

地下采矿受限空间场景复杂、要素繁多、非结构化和不确定性大,且对绿色开发技术提出新的需求。传统单一的工业数字化模型、理论基础、数据处理方法和技术标准无法满足绿色智能化煤矿复杂巨系统控制要求,亟需多种理论框架、技术体系和工程方法相结合进行系统融合创新。为此,创新开展了煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术体系研发工作,即在煤矿全要素数字化基础上,能够完成煤矿所有信息的精准实时采集、网络化传输、规范化集成、可视化展现、自动化运行和智能化服务的数字化智慧体,开发构建煤炭资源地质环境全面感知、装备系统与围岩柔性耦合、确定性网络传输、新一代智能决策、分布式协同控制等技术,实现煤炭资源绿色智能柔性开发与管控模式。

2.1 技术体系内涵

煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术体系主要划分为数智化技术、透明地质保障技术和绿色开发技术3个方面。煤炭数智化是煤炭数字化和煤矿智能化的融合体,强调煤炭全产业链各业务场景数据和智能技术的深度集成应用,实现对煤炭绿色开发全过程实现全面感知、深度分析和智能决策;透明地质保障是区别于通用流程工业生产,利用地质探测技术、数字技术、智能技术等,实现煤炭资源、构造、应力等地下空间透明化,进而实现矿井设计、开拓、开采、储运等全过程精准化管控;绿色开发是煤炭资源开发技术发展方向和根本要求,本质上也是利用数字化、智能化技术,实现煤炭资源开采低损害、低扰动,结合绿色治理技术与工程实现煤炭资源开发绿色化转型。3个技术方面互有交叉、互为基础,只有从根本上从3个方面实现深度融合、有机集成,才能实现煤炭高质量发展。

2.2 技术体系架构

以煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术体系3

个方面融合为基础,在行业监管和全面系统管控要求下,建立矿井感知、传输、集成、决策、执行五个维度的应用闭环体系,主要包括:①全域空间感知,采用地质环境探测、开采环境数据采集、装备工况实时在线监测等技术,利用故障诊断与预测性维护技术,实现煤炭资源开采环境的全面精准感知与装备运行的协同耦合;②网络化传输,通过建设5G无线+有线专用网络,构建实时可靠的数据传输和通讯控制通道;③规范化集成,基于统一数据标准、统一架构和统一系统集成规范,实现复杂系统的优化集成;④智能化决策,基于大数据技术和人工智能算法平台,构建绿色智能开采决策分析模型,回采工作面主要包括支架-围岩耦合控制模型、综采设备群运动学模型、液压缸群组控制模型、开采决策行为模型等,为装备远程控制执行提供决策支持;⑤自动化执行,建设面向智能开采场景系统控制平台,通过智能化装备体系实现对采煤装备群的最优集中控制,包括采高控制、工作面直线度控制、俯仰采控、供液系统控制等。煤炭绿色开发数智化技术体系架构如图1所示。

基于煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术体系,研发从地质环境透明化、系统智能技术与装备、智能算力基础设施、边缘计算与最优规划策略及协同控制、一体化管控平台、煤炭工业知识模型化及云化服务等,到覆盖经营、生产、安全、辅助等智能化技术应用场景,核心流程为数字化地集成管理与共享利用各类矿山数据与信息资源,可视化地模拟与虚拟再现煤矿地质围岩环境,仿真化地分析煤矿采掘活动与采动影响过程,智能化地分析监测监控数据并智能识别各类灾变前兆,自动化地执行采煤装备和机器人活动并优化煤矿安全控制及应急预案执行;进一步提高效率,降低成本,实现管理最佳、效益最优、风险可控,使煤炭企业及煤矿更安全、更高效、更绿色、更智能。

3 “数智开采”技术进展

3.1 数字煤矿智慧逻辑模型

对数字煤矿智慧逻辑模型与跨系统全时空信息感知原理进行创新。通过采矿与信息技术、数据分析技术的交叉融合,以信息实体表征数字煤矿中的各种物理量、对象及变化趋势等,基于数据特征分析展开系统级的逻辑推理、智慧决策,能够为有效分析和揭示煤矿动态开采过程中的演进规律、快速寻求最佳控制目标提供新的方法。笔者团队在如下方面

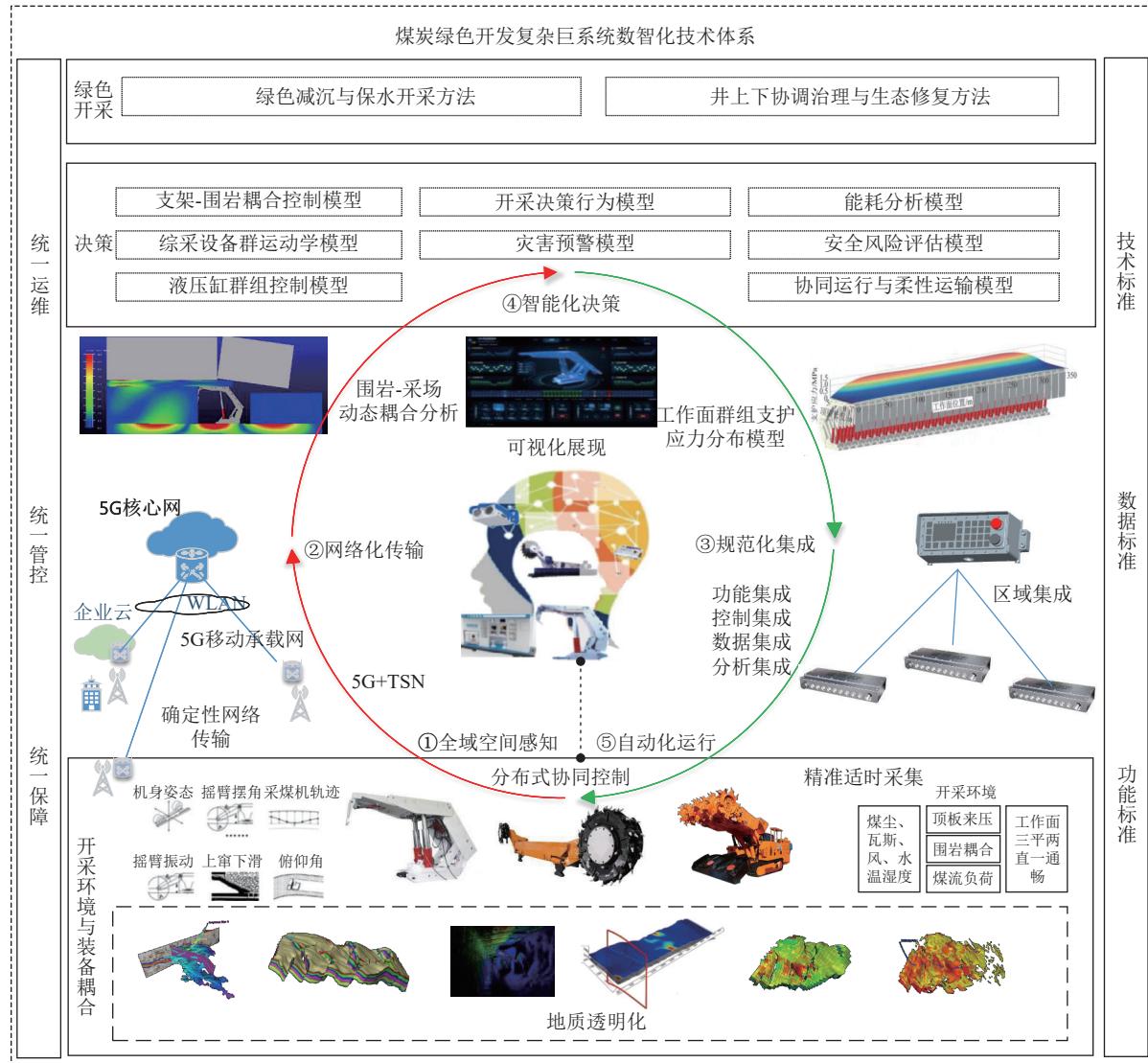


图1 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术体系架构

Fig.1 Theoretical framework of digitalization for green coal development

进行了探索:①构建“分级抽取-关联分析-虚实映射”的数字煤矿智慧逻辑模型;②构建基于开采行为预测推理的煤矿智慧逻辑模型优化机制;③构建井下跨系统全时空信息数字感知和数据结构体系;④构建面向综采装备结构表达的知识图谱。通过知识分级抽取信息动态匹配算法构建数字煤矿智慧逻辑模型,如图2所示。

3.2 “采场-装备”双动态系统耦合分析模型

为构建“采场-装备”双动态系统耦合分析模型,提出智能开采设备群全局最优规划和分布式协同控制理论。从开采系统全局装备群进行整体建模,基于分布式协同控制原理提出“数字煤矿-综采设备群-开采系统”多层次的最优规划控制策略,突破各设备相互独立集中控制的局限性,大幅提高了智能开采工艺对于井下复杂生产环境的适应能力。“采场-装

备”双动态系统耦合分析模型主要包含如下几点:

- 1)通过建立支架与围岩四柔性体机-液-岩联合仿真模型,揭示“采场-装备”双动态系统的强度、刚度、稳定性耦合特征,为设计高可靠、高适应支护系统奠定基础。超大采高工作面围岩应力场建模如图3所示。
- 2)构建工作面群组支护应力分布模型,通过模型研究提出支架分区协同支护控制方法。
- 3)构建超高煤壁采动应力传递规律与破坏机理,由此提出片帮协同控制方法。
- 4)建立工作面围岩载荷区域识别、顶底板变化趋势分析模型,揭示采场压力-围岩形态的时空动态演化特征,首次以定量方式来描述复杂条件采场多参数动态变化规律。

3.3 复杂场景综采设备群全位姿识别技术

- 1)研发融合“位移-倾角-惯导-视觉”多传感器的

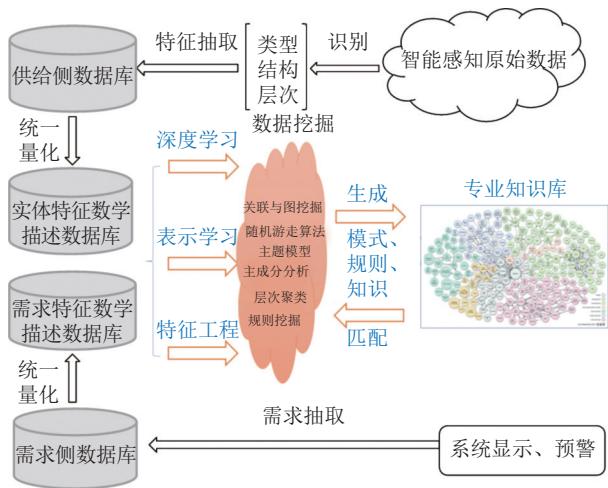


图2 知识分级抽取信息动态匹配算法

Fig.2 Knowledge grading extraction and dynamic matching algorithm for information

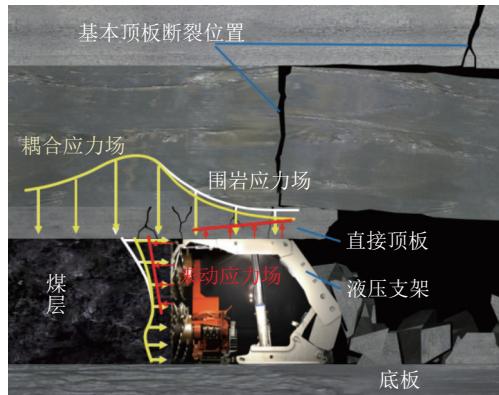


图3 超大采高工作面围岩应力场建模

Fig.3 Modeling of stress field in surrounding rock of ultra high mining face

装备群全方位姿态测量系统及方法,通过15个参数组成的最小数据集,实现工作面装备群在任意时刻的空间状态描述。发明综采装备群全方位姿态坐标变换及驱动关系建模方法,是实现多机协同控制的基础。

2)研发压力-位移一体式传感器,开发压力-速度双参数调控算法,研制具有精准控制功能的数字油缸,使精度提升70%以上,如图4所示。研发边缘智能AI摄像头,构建工作面关键部件智能识别,实现姿态感知与直线度检测,构建截割防碰撞等算法模型,实现工作面态势复杂场景的智能感知。

3.4 基于二次积分模型的全局最优规划策略及协同控制技术

1)构建基于双圆弧样条曲线的装备群位姿变化趋势分析预测模型,建立工作面综采装备群超前动态响应轨迹函数集,以此实时求解开采系统装备群全局最优轨迹。

2)研发了以围岩稳定性、装备性能参数和开采效率为目标的非线性耦合设备群全局最优规划策略,开发三维虚拟仿真与预测优化系统,支持复杂煤层条件下自主开采,如图5所示。

3.5 开采装备群状态评价与预知维护技术

研发多种因素下的智能开采系统设备群健康状态评价、剩余寿命预测与维护决策机制。基于数据驱动的系统健康状态评价模型和剩余寿命预测方法,构建综合考虑系统剩余寿命、生产调度和机会维护策略的开采系统装备群预知维护模型,为开采系统智能决策提供有力依据。

1)研发了基于格拉姆角场、深度残差收缩网络、

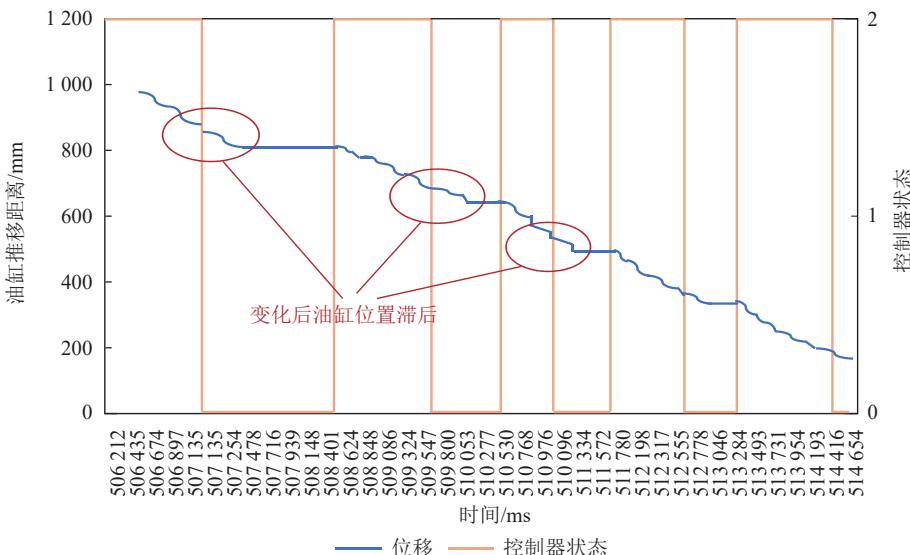


图4 控缸定位精度控制分析

Fig.4 Analysis diagram of cylinder positioning accuracy control

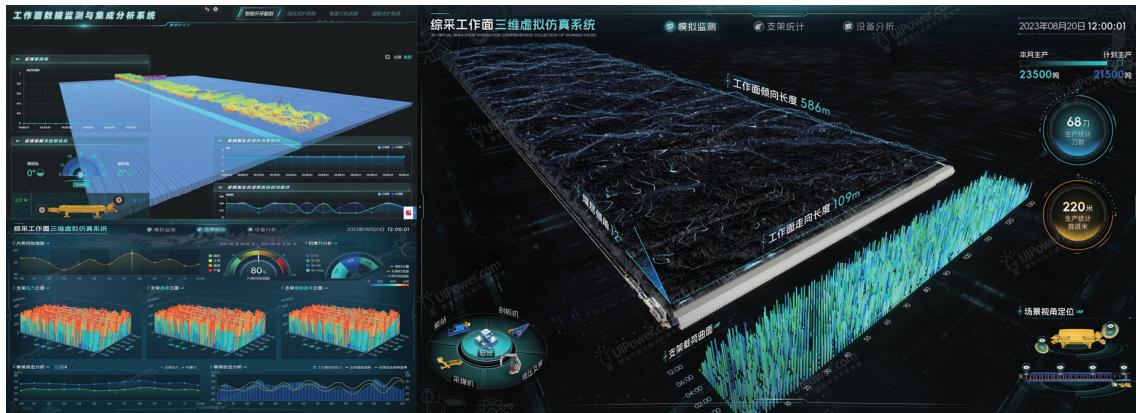


图 5 基于三维虚拟仿真的综采工作面自主开采系统
Fig.5 Autonomous mining system for fully mechanized mining face based on 3D virtual simulation

长短期记忆网络等技术的健康状态评估方法,有效解决了在非平稳、强噪声、时变工况条件下的健康状态评估难题。

2)研发了基于主成因分析的长短期记忆网络多维时间序列预测模型(KPCA-LSTM)、卷积神经网络和门控循环单元模型(MSCNN-GRU)和自注意力机制加时间序列预测(Self-Attention+LSTM)等神经网络的设备剩余寿命预测方法,建立融合多维退化数据的矿用关键设备的寿命预测模型,为煤矿关键设备预测性维护提供支撑。

3)研发了面向开采设备群的生产计划与维护联合决策方法,建立基于综合重要度的关键装备维护模型,分析不完美维修对设备退化和维修决策的影响。

4 “透明地质”技术进展

4.1 透明地质保障定义及内涵

煤矿透明地质是通过地质探测手段查明当前及未来采掘活动范围内开采地质条件及隐蔽致灾地质因素的空间分布与属性特征,以钻探、物探、采掘揭露等地质数据为基础构建煤矿地质体、地质结构、地质属性、采掘工程等对象的三维模型,实现地质模型与采掘工程的动态有机融合,为煤矿生产场景地质条件提供准确预测预报的技术。

透明地质保障系统的内涵主要包括以下3个方面:

1)数据驱动,透明地质保障系统依赖于地质、物探、钻探、采掘和测量等多源数字化信息,以及随着工作面采掘推进所产生的动态地质数据。这些数据通过数据过滤分析、数据清洗、特征分析等技术进行预处理,确保数据的准确性和有效性,为系统的更新及运行提供坚实的数据基础。

2)模型表达,利用获取的数据,透明地质保障系统首先搭建三维地质模型,该模型能够直观展示矿区地层、煤层赋存和主要构造情况。随着采掘活动的进行,实时、动态、高精度的地质信息被不断融入模型中,逐步提升模型的准确性和时效性,为煤矿生产提供全面的地质信息支持。

3)场景应用,透明地质保障系统在煤矿生产中发挥着重要作用。基于三维地质模型和地质大数据云平台,系统可以进行采煤和掘进作业规划,提高采掘效率和安全性。同时,通过智能预警系统及时进行灾害异常预测预报,如断层、瓦斯异常、水害等,确保采掘生产活动的安全推进。此外,系统还能够对矿井储量进行动态管理,实时监控资源储量的变化情况,为生产决策提供科学依据。系统还能够为技术人员提供便捷的辅助决策工具,如通过系统轻松获取三维透明地质剖面图等,实现相关决策支撑,进一步提高工作效率和准确性。

4.2 透明地质保障实现路径、技术与价值

煤矿地质保障是确保煤矿安全高效开采的关键,近年来,行业内专家开展了一系列应用探索,如曹哲哲在黄陵二号矿探索了煤矿多维度地质模型大数据融合精准开采技术^[32];张平松等针对采煤工作面地质条件透明化进行了研究^[33];毛善君提出了基于精确大地坐标的煤矿透明化综采工作面自适应割煤技术^[34];卢新明等提出了基于透明地质云计算的煤炭精准开采地质保障技术^[35],王佟等提出“双碳”背景下我国煤炭资源保障能力和勘查方向^[36]。综上分析,煤矿地质保障是实现精准开采的必要前提,其实现路径首先在于建立全面、系统的地质探测体系,通过地面勘探与井下探测相结合,运用高分辨三维地震、电磁法、钻探等多种技术手段,精确查明煤层赋存条

件、地质构造及水文地质特征;利用数字系统平台,建立矿井精细可视化动态立体地质模型,实现矿井生产全过程动态协同管理,保障矿井高效、快速、绿色、智能生产,防范事故发生。

为解决地质数据精度低,难以复用等难题,研发了透明矿井“数据→信息→知识”三层架构全息透明的技术开发路线,从底层地质数据获取与理解解译技术出发,通过地质保障数据级、特征级与系统级的融合与更新过程,实现专业化地质建模,将地质模型从“好看”提升到“好用”层面,以智能规划截割、工作面数字孪生、人工智能地质分析等应用功能为切入点,实现地质模型与矿井智能开采各子系统紧密耦合。

4.2.1 地质透明化技术进展

1)长掘长探技术。长掘长探技术依托于煤矿井下先进的定向长钻孔施工技术。在掘进巷道后方或侧方预设钻场,在钻场施工深度600~1 000 m的顺煤层定向长钻孔,结合钻孔瞬变电磁等手段,实现对钻孔径向半径不少于30 m范围内富水区、地质构造的远距离超前探测,如图6所示。

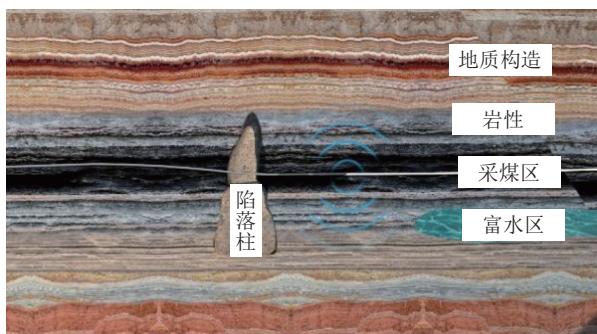


图6 长掘长探过程示意

Fig.6 Diagram of long excavation and exploration process

近年来,随着定向钻进和勘探技术装备的不断升级,长掘长探技术在深度和精度上均取得了显著进步。高精度随钻测量系统和光纤陀螺的广泛应用,使得钻孔轨迹的测量和控制更加精准。同时,钻孔瞬变电磁等物探技术的进步,进一步增强了富水区和地质构造的探测能力,结合三维地震资料的地质动态解释技术,为掘进巷道的优化设计提供了更加可靠的地质依据。

某煤矿应用长掘长探技术,在掘进巷道后方施工了多个深度超过1 020 m的定向长钻孔,并通过钻孔瞬变电磁探测,提前发现了掘进巷道前方的隐伏断层和富水区,及时调整掘进方案,有效避免了地质灾害的发生,显著提高了掘进效率和安全性。

2)随掘随探技术。随掘随探技术是通过在掘进巷道后方安置地震传感器,将掘进机截割煤壁时产生的震动信号为震源,实时接收地震波在遇到断层、陷落柱、采空区等地质异常体时的反射波,通过井下光纤环网将地震数据实时传输到地面处理中心,在专用软件动态生成掘进巷道前方地质构造成像结果。随掘地震探测如图7所示。

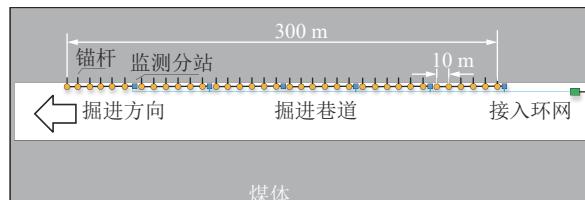


图7 随掘地震探测示意

Fig.7 Schematic diagram of earthquake detection during excavation

随着地震信号处理技术和计算机性能的提升,随掘随探技术的实时性和精度均得到了显著提升。现代随掘随探系统已经能够实现毫秒级的地震数据采集和实时处理,为掘进工作提供了近乎实时的地质信息反馈。同时,随着地震数据处理算法的不断优化,探测准确性和成像结果分辨率也在不断提升。

某煤矿采用随掘随探技术,在掘进巷道后方布置了地震传感器阵列,实时接收并处理掘进过程中产生的地震波信号。通过上位机软件,成功生成掘进巷道前方地质构造的高精度成像结果,为巷道掘进提供了及时、准确的地质预报,显著降低了地质灾害的风险。

3)反射槽波探测技术。反射槽波探测技术是利用地震波在煤层中的全反射特性形成槽波,通过接收和分析槽波在遇到煤层变化(如断层、陷落柱等)时的反射、散射信号,实现对采煤工作面内部构造进行超前探测。该技术结合地质解释软件,能够高精度地揭示工作面内部地质情况。

近年来,反射槽波探测技术在信号处理和成像算法方面取得了显著进展。现代处理算法能够更好地压制噪声、提高信噪比,从而生成更加清晰、准确的地质图像。同时,随着高性能计算机的应用,反射槽波数据的处理速度也得到大幅提升。

在山西某煤矿采煤工作面回采前,采用反射槽波探测技术对工作面内部构造进行了全面探测。通过接收和分析槽波信号,成功揭示了工作面内部的断层,后经探巷在112 m处实际揭露断层,断层走向190°,与反射槽波解释推断结果一致。通过反射槽

波探测技术结合地质解释软件,生成高精度的工作面地质模型,能够为采煤工作面安全回采提供有效保障。

4)随采地震探测技术。随采地震探测技术是利用采煤机截割煤壁时产生的震动作作为震源,在采煤工作面两侧巷道布设地震传感器实时接收信号,将随采地震数据进行动态处理和叠加成像,生成采煤工作面前方地震波速度和地质构造的高精度成像结果。

随着地震数据采集和处理技术的不断发展,随采地震探测技术的精度和效率均得到了显著提升。系统已经能够实现连续、高密度的数据采集,结合先进的成像算法,能够生成高分辨率的地质图像。同时,随着云计算和大数据技术的应用,随采地震数据的处理和分析也变得更加高效。

煤矿在采煤过程中采用随采地震探测技术,能够实时接收并处理采煤机截割煤壁时产生的地震波信号。通过随采地震数据的动态处理和叠加成像技术,成功生成采煤工作面前方地质构造的高精度成像结果。该技术为采煤机规划截割路径提供了重要的地质依据,确保了回采过程的安全和高效。

5)随采电法监测技术。随采电法监测技术在回采巷道或煤层底板定向长钻孔中超前布设发射电极和接收电极,通过周期性切换发射点和接收点,实时监测煤层顶底板含水层水体运移状态和构造薄弱带的活动变化情况。该技术能够发现动力地质灾害隐患,为开采扰动条件下底板突水等灾害的预警提供实时数据支持。

近年来,随采电法监测技术在电极布设、数据采集和处理算法等方面均取得了显著进展。现代随采电法监测系统已经能够实现自动化、高精度的数据采集和实时处理,为动力地质灾害的预警提供了可靠的数据支持。同时,随着三维电阻率成像技术的应用,随采电法监测结果的解释精度也得到了显著提升。

内蒙古某煤矿回采过程中采用随采电法监测技术,在回采巷道超前布设了电极阵列,实时监测了煤层顶底板含水层的水体运移状态和构造薄弱带的活化情况^[37]。通过监测数据的实时分析和处理,成功预警了多次底板突水隐患,确保了工作面的安全回采^[38]。

6)微震监测技术。微震监测技术是通过布设微震监测站,动态监测开采过程中顶板、底板围岩变形破坏诱发的微小地震事件。通过对岩石破裂点的动态定位和微震大数据的分析,反演裂隙带的发育高

度及其与承压含水层间距的动态变化,为安全开采提供实时监测预警信息。

目前微震监测站的布设密度、数据采集精度和处理算法均得到了显著提升。系统已经能够实现高密度、高精度的数据采集和实时处理,为开采过程中的安全监测提供了有力支撑。同时,随着人工智能和大数据技术的应用,微震监测数据的解释精度和预警能力也得到了显著提升。

某煤矿在开采过程中采用了微震监测技术,在井下关键位置布设了多个微震监测站。通过实时监测和分析微小地震事件的数据,成功预警了多次顶板冒落和底板突水隐患。该技术为煤矿开采过程中的安全监测和预警提供了重要技术支持,显著提升了开采过程的安全性。微震-电法联合监测示意图如图8所示。

7)地震全波形反演技术。地震全波形反演技术是一种高精度地震成像方法,其通过对实际观测到的地震波形与理论合成的地震波形进行比较,利用优化算法不断调整地下速度模型,使得合成波形与实际波形之间的误差最小化。这种方法不仅考虑了地震波的走时信息,还充分利用了波形的振幅、相位和频率等特征,能够提供更为丰富准确的井下地质结构信息。

随着计算机硬件和算法技术的飞速发展,地震全波形反演技术在实际应用中取得了显著进展。高效的并行计算技术和先进的优化算法使得大规模地震数据的全波形反演成为可能。同时,正则化技术和先验信息的合理应用也进一步提升了反演的稳定性和准确性。此外,随着三维地震数据采集技术的普及,三维地震全波形反演逐渐成为研究地下复杂结构的重要手段。

4.2.2 地质“数字化”技术进展

1)地质信息同步映射技术。基于复杂构造、多属性模型地质灾害同步映射预报技术,进行地质信息同步映射系统研究,包括物探在线解译技术采集处理及与三维地质模型融合技术,实现了煤矿物理场景与虚拟系统地质信息互联互通,如图9所示。

在掘进工作面中,地质信息同步映射技术通过三维地震解释层位和构造数据构建地层建模框架,结合直流电法超前探测、孔中物探、井巷测量及钻探工程等多源数据,运用离散光滑插值算法和地质网格化技术,形成包含煤层、顶底板、含水层及地质构造的精细地质模型。随着掘进工作面的推进,实

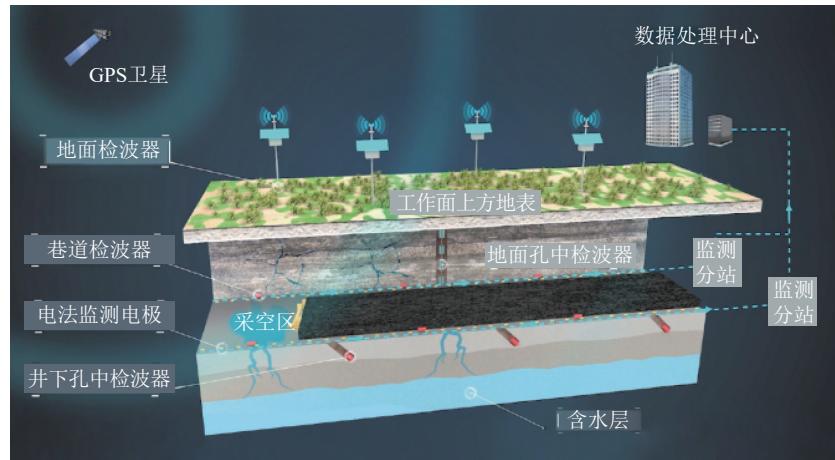


图 8 微震-电法联合监测示意
Fig.8 Schematic diagram of microseismic electrical joint monitoring

监测数据不断融入模型,动态更新地质模型,确保掘进过程的安全和高效。该技术能够模拟掘进场景,优化掘进规划曲线,预测地质异常并提供预警,为掘进机自主掘进提供精准指导,能够显著提升掘进作业的安全性和智能化水平。

回采工作面地质信息同步映射技术是基于三维地震解释数据构建静态地质模型框架,通过钻孔、煤层底板等高线图等数据修正模型,实现工作面的高精度地质建模。随着回采进行,利用随采地震监测、微震监测及电阻率监测等实时数据,动态更新地质模型,反映采掘扰动下的地质变化情况。该技术不仅支持回采场景仿真,生成基于地质模型的规划截割曲线,还可在数字孪生系统中模拟回采过程,预测预警地质异常情况,如断层、陷落柱等,为采煤机自主规划截割提供决策支持,实现回采工作面“人-机-环”的高效协同,提高回采作业的安全性和智能化水平。

2) 矿山信息模型技术。在透明地质技术基础上,

通过分析煤田地质、生产系统、作业环境、开采工艺、机电设备、工程设施等矿山对象对数字化表达的需求,识别矿山对象及其关系,提出矿山全生命周期信息模型理论与方法,构建包括矿山对象认知分类、语义定义、编码标准、数据结构、三维建模、空间分析、业务构建、系统平台、模型应用为内容的矿山信息模型技术体系,如图 10 所示。

4.2.3 “透明地质”创新应用场景

1) 透明回采工作面规划截割采煤。基于三维地质模型与实时监测数据,精准构建煤层及地质构造的透明化模型。通过集成随采地震、微震、电阻率等监测系统,采集测量数据等,动态修正地质模型。采煤机依据地质模型规划截割曲线自主截割,降低原煤含矸率,提高采煤效率与安全性。数字孪生技术仿真生产场景,实时监控与预警地质异常及动力地质灾害,确保生产安全。该技术不仅实现了采煤过程的智能化管理,还通过持续优化与调整,不断提升回采工作的综合效益。

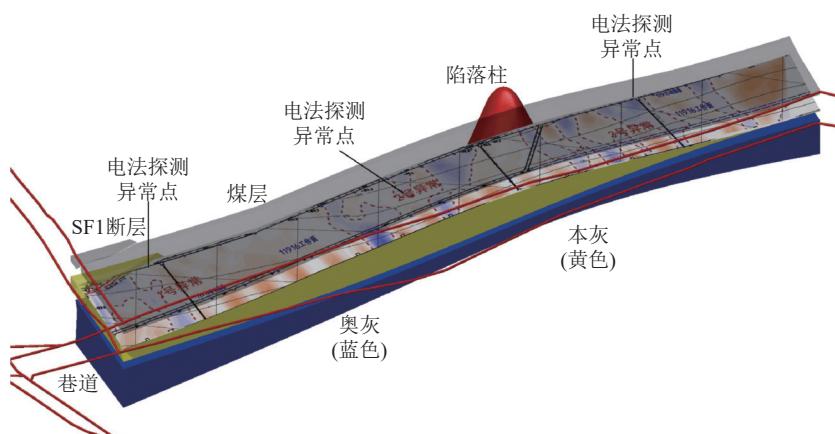


图 9 地质模型与监测信息融合示意
Fig.9 Schematic diagram of geological model and monitoring information fusion

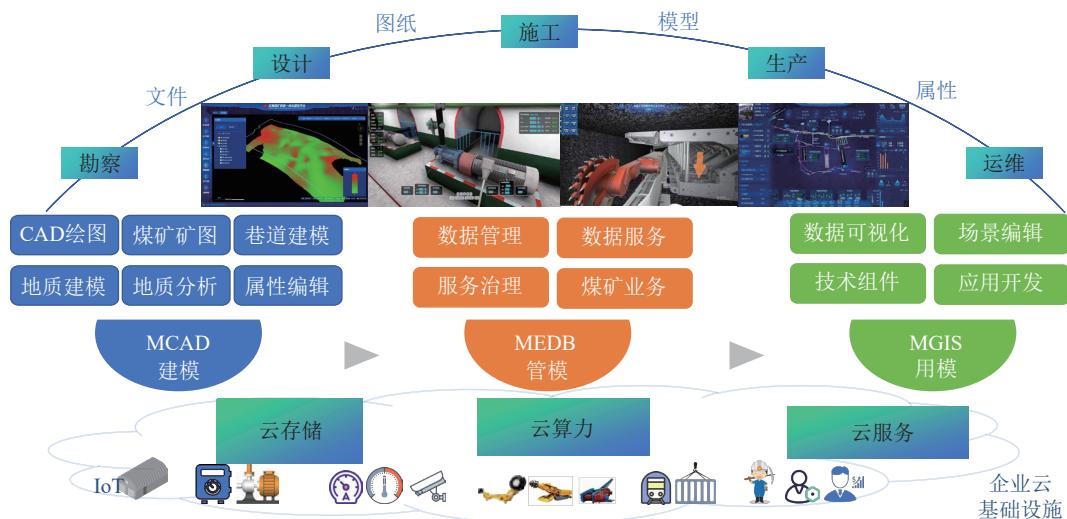


图 10 矿山信息模型技术体系
Fig.10 Mining information modeling technology system

2) 透明掘进工作面自主导航掘进。实现掘进过程动态更新, 通过随掘探测功能提高掘进前方探查精度, 长距离定向钻结合孔中物探提高探查效率和准确率。掘进机在掘进过程中, 根据透明地质模型实时导航, 自动规划掘进路径和断面截割曲线, 降低或避免地质构造对掘进作业的影响。

3) 基于透明地质的防治水工程管理。综合利用钻探、物探、水文监测等多源数据, 精准描绘含水层、隔水层、断裂构造等关键水文地质要素的空间分布。在防治水工程规划与实施过程中, 借助透明地质模型, 工程人员能够直观分析地下水水流场、富水异常区及潜在导水通道, 从而科学制定防治水方案。施工过程中, 实时监测地下水位、水质变化及工程影响区域的水文地质响应, 及时调整防治水措施。通过数字孪生技术, 仿真模拟防治水效果, 评估工程风险, 确保防治水工程的安全性与有效性。该技术不仅提高了防治水工程的设计精度与施工效率, 同时为煤矿安全生产提供了坚实的水文地质保障。

4) 基于透明地质的井上下一体化 BIM+GIS 时空信息管控。构建包括煤层、地质构造、水文地质条件等在内的高精度三维地质模型, 同时集成井巷工程、生产设备、监测设施等 BIM 模型, 以及地表环境、交通网络等 GIS 数据。通过 BIM+GIS 平台的时空信息管控, 实现了对井上下空间信息的一体化展示、集成分析与智能决策支持。在管控过程中, 实时监测井上下环境的变化, 动态更新地质模型与 BIM 模型, 确保信息的实时性并不断提升其准确性。同时, 借助大数据分析、人工智能等技术手段, 预测地质灾害风险, 优化开采方案, 提高生产效率和安全性。该

技术为矿井提供了全方位、多层次的信息支持, 推动了煤矿生产管理的智能化、精准化发展。

5) 基于透明地质的隐蔽致灾信息监测、灾害预警与防控。透明地质系统实现了工作面煤层、地质构造、水、瓦斯、冲击地压等隐蔽地质灾害分布情况透明化呈现和高精度控制, 通过透明地质模型的动态更新, 并将其实时与生产数据及监控系统数据联动, 实现矿井地质灾害预警, 并采取有效措施, 对隐蔽灾害进行有效防控。

6) 基于透明地质的低损害、零扰动开采生态保护。大数据驱动的透明地质动态模型, 实时展示开采损害的动态智能监测, 为采煤过程中对生态环境有效保护提供地质保障。

5 “绿色开采”技术进展

煤炭资源安全、智能、绿色、高效开采与清洁低碳利用是推进煤炭产业高质量发展的重要举措, 其中, 数智化技术是手段, 地质透明化是前提和基础, 绿色高效开采和清洁低碳利用是愿景目标, 将数智化和地质透明化技术与绿色开采技术深度融合, 不断推动实现煤炭资源绿色开发新模式, 是开展煤矿生态文明建设、推进煤炭产业可持续发展的必由之路, 是践行绿水青山就是金山银山理念的关键, 主要表现为开采方式向绿色化、低损害、低碳方向转型, 尽可能减少开采过程对生态环境的扰动, 减少矿井水、固体废弃物、瓦斯等排放, 同时实现水、固体废弃物、瓦斯及沉陷土地的资源化利用, 采后进行综合治理, 最大程度恢复改善开采扰动区的生态环境。

5.1 绿色减沉与保水开采技术

煤炭资源回采会导致上覆岩层发生断裂发生失稳破坏,从而破坏含水层,引起上覆岩层沉降,对地表建筑、公路、铁路及生态环境造成破坏。近年来,为减少煤炭资源回采造成地表沉降、含水层破坏等问题,逐渐形成了条带开采、限厚开采、充填开采、覆岩离层注浆开采等岩层控制与减沉开采技术,如图11所示。条带开采虽然可以减少地表沉降,但也会造成大量的煤炭资源浪费,因此,将条带开采与充填开采进行结合,可以在降低地表沉降、保护含水层的同时,提高煤炭资源回采率。

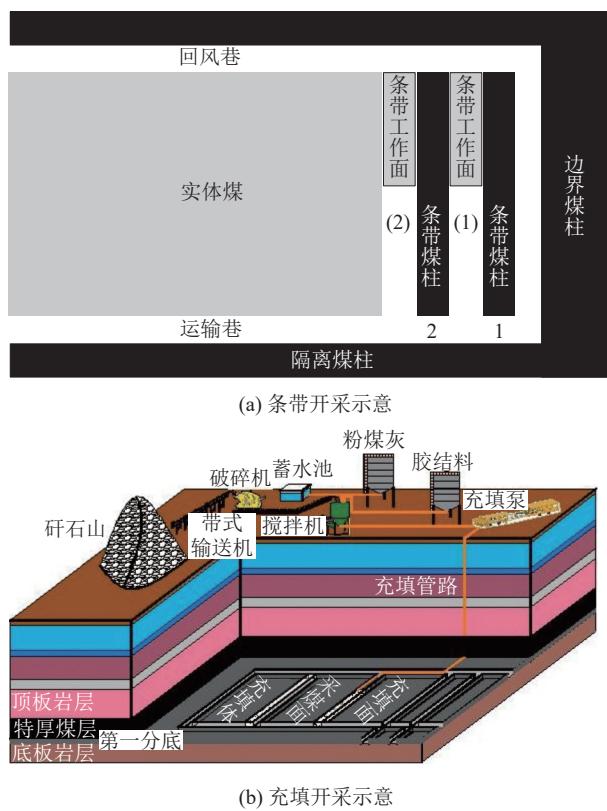


图11 绿色减沉技术示意

Fig.11 Schematic diagram of green sedimentation reduction technology

充填开采技术又细分为固体充填、膏体充填、高水材料充填等,“十三五”期间提出了煤矿井下分选与就地充填技术,此项技术是解决我国“三下”压煤与矿区生态环境治理的重要技术路径。

榆林榆阳矿区地面有村庄、油气管线,且临近城区和机场,采用传统综采技术排水量达 $1000\text{ m}^3/\text{h}$,为了减少对上覆含水层及地表建筑物的影响,采用机械化柔模充填技术,充填材料选用风积砂似膏体充填材料,极大程度减小了煤炭资源回采对上覆含水层及地表建筑物的影响。

5.2 井上下协同治理与生态修复技术

煤炭资源绿色开采涉及围岩控制、含水层保护、废弃物资源化利用、地表生态修复等多个方面,是一个复杂的系统工程。通过优化工作面布置方式,合理减少区段煤柱数量及宽度,不仅可以提高煤炭资源回采率,还可以有效降低采场应力集中程度。基于上述技术原理,西部矿区广泛推广超长工作面布置方式及小煤柱护巷技术,工作面长度由传统的200 m最大增加至450 m,并逐步推广应用沿空留巷、无煤柱护巷等技术,有效提高了矿井煤炭资源回采率,实现了地面整体沉降。针对部分薄基岩区域,采用“露天-井工联合开采”技术,最大程度提高煤炭资源回采率,降低环境破坏。

瓦斯作为煤的一种共伴生矿产资源,处置不当不仅会造成大气污染和资源浪费,还会对矿井安全生产带来威胁。近年来,国家大力开展瓦斯智能抽采技术,将瓦斯变废为宝,进行煤与瓦斯共采相关技术研究,实现煤与共伴生瓦斯资源的高效利用。神东保德煤矿利用煤层预抽高浓度瓦斯发电,瓦斯利用率超过70%,并通过研发对低浓度(0.5%)瓦斯催化发电或供暖,实现瓦斯的梯级综合利用。

煤系共伴生资源协同开发具有很大的潜在经济效益与战略价值,为了进一步提升煤与瓦斯共采技术应用效果,应进一步深入研发煤层瓦斯参数随钻测量技术、超长定向孔高效钻进技术与装备、复杂条件下瓦斯井上下联合高效抽采技术等,精确探明煤系地层的煤、油、非常规天然气、稀有金属、水等叠置资源赋存条件,开展多资源、立体化、综合开发模式与技术研究,实现煤炭及共伴生资源的协同有效开发。

煤炭资源开发不可避免地会对地表生态环境造成破坏。通过研究发现,开采沉陷对土壤成分、养分等均无明显影响,部分学者针对西部生态环境脆弱区提出了自修复技术^[39],即在原有植被较好的沉陷区,利用生态系统的自我调节、自我修复能力使塌陷区自然恢复;在植被较差的沉陷区则采取补设沙障、补播草籽等,采用人工辅助修复技术对沉陷区进行生态修复,均取得了较好的效果。

菌根是我国西部生态脆弱区复垦应用的主体微生物,菌根与矿区适合生长的植物紫穗槐、沙棘、文冠果、紫花苜蓿和野樱桃等均能形成较好的共生关系,在矿区干旱、土壤贫瘠和矿区塌陷裂隙伤根等逆境中,菌根通过扩大根系吸收范围、活化土壤养分和修复根系功能等机制,从而显著改善植物的营养状

况、改良土壤结构、提高植物的抗逆性(如抗寒、抗旱、耐盐碱)、促进植被的生长与生态快速恢复^[40]。

部分学者针对东部草原区大型煤电基地开发过程中产生的生态环境问题,研发了土地综合整治与水土保持、土壤剖面构建与改良、采矿废迹地转型利用、污染场地识别与防治集成技术,创建了采矿废迹地综合整治与生态修复技术体系及治理利用模式,见图12所示,支撑了宝日希勒等露天矿的生态治理。



图12 矿区生态修复前后对比

Fig.12 Comparison before and after ecological restoration in mining areas

在实施采煤沉陷区生态修复的同时,还应深入研究集InSAR干涉式合成孔径雷达+GNSS卫星导航(空)、无人机航摄(天)、全站仪+水准测量仪(地)和钻孔内移动监测+工作面矿压监测(深)于一体的采煤沉陷区探测技术,实现对采空区覆岩和地表变形全空间高精度协同监测,形成“空、天、地、深”四维一体协同监测平台,为采煤沉陷控制效果检验及预警提供实测数据。

6 应用实例

当前,高级煤矿智能化建设成为煤炭行业数字化转型和高质量发展的重要任务,数智化技术、透明地质保障技术和绿色开发技术正加快融合应用,涌现出了一批典型煤矿智能化建设示范,从数字化、智能化到绿色化全面建设且成效突出高级智能化煤矿尚未有成熟案例,本文分别以陕煤集团柠条塔煤矿、国家能源集团乌海矿区、国家能源集团神东煤炭榆家梁煤矿等3个案例分别阐述围绕数智化、透明地质、绿色开发等方向建设情况。

6.1 陕煤集团神木柠条塔煤矿

柠条塔煤矿以生产系统建设为主干,安全辅助

系统建设为支撑,地面生活服务系统建设为载体,全面打造满足“生产-辅助-生活”的智能化系统^[41],全面采用数智化技术,实现了系统智能化生产,回采工作面采煤机记忆割煤、液压支架自动跟机移架效果显著,跟机拉架速度提升20%,煤机最大运行速度15 m/min;工作面直线度控制在30 cm以内,超前支架无人操作,日进尺由18刀提高到22刀,产能提升22%,设备综合开机率达到80%以上,生产效率提升30%以上;掘进工作面采用“掘锚一体机+锚运破转载机+长运距桥式转载机”快掘系统及其配套设备,实现了单班进尺45 m、单日进尺84 m、单月进尺1 500 m的纪录,掘进接续时间缩短了40%以上,作业人员减少了近50%。

6.2 国家能源集团乌海矿区

乌海矿区采用以随掘地震、随采地震为代表的“透明化”技术,获取采掘工作面实时地质数据;通过构建数据底座,利用多源数据融合技术,实现海量地质数据的融合分析;基于多源数据融合结果,构建三维地质几何模型和水、火、瓦斯等多属性模型,利用实时地质数据驱动模型更新,实现构造、水、火、瓦斯等隐蔽地质规律与分布特征的数字化表达^[42]。以地质模型为基础,融合地质异常体空间位置、几何大小、属性信息等,构建透明地质保障系统,实现隐蔽致灾因素的地质预报。以透明地质保障系统指导矿区生态修复技术的应用研究与示范,为煤矿绿色智能高效开采提供支撑。

6.3 国能神东榆家梁煤矿

榆家梁煤矿以地质透明化为基础,综合采用数字化智能化技术,建立回采工作面煤层勘探地质模型、生产地质模型、煤层半透明化的智能开采地质模型^[43]。将建立的半透明化模型输入采煤机系统,设定预想切割曲线,采用回采工作面支架超前雷达、工作面三维激光扫描、工作面回采地质测量、快速写实等技术探测回采过程中煤层的参数,并实时反馈优化,形成智能开采工作面煤层透明化地质模型。采用对比分析、回采跟踪、地质建模等技术构建适应于榆家梁煤矿的薄煤层智能开采工作面煤层透明化勘查技术体系,指导采煤机截割轨迹的调整和修正。此外,基于透明地质系统,从薄煤层工作面应用向全矿井、全矿区拓展,构建“三期三圈”生态防治模式,即实现“采前防治、采中控制、采后营造”三期和打造“外围防护圈、周边常绿圈、中心美化圈”三圈,促进了神东公司绿色智能化开采水平的提升。

7 结语

矿产资源保障和生态保护是国家安全和高质量发展的重大战略基础,产业绿色化、数字化和智能化是一场广泛而深刻的系统性变革,将彻底改变传统业态,需要举行业内外之力量、吸收最新高科发展成果,在相关产学研用力量通力合作下,持续推进煤炭产业数字转型和智能化建设,不断提升煤炭绿色开发数智化技术水平,实现地质透明化、系统及装备智能化、作业场景少人化,生态环境绿色化等人与自然协调发展,创新破解传统产业发展瓶颈,加速数据驱动下管理变革转型,推进以高效、安全、绿色为目标,以技术、装备、数据、环境等为核心要素的煤炭新质生产力发展。

参考文献(References):

- [1] 刘峰,郭林峰,张建明,等.煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报,2024,49(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and it's path of building new coal productivity [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [2] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [3] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [4] 王国法,杜毅博,庞义辉.6S智能化煤矿的技术特征和要求[J].智能矿山,2022,3(1):2-13.
- [5] 王国法.煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J].煤炭科学技术,2022,50(1):1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1-27.
- [6] 王国法,庞义辉,许永祥,等.厚煤层智能绿色高效开采技术与装备研发进展[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):882-893.
WANG Guofa, PANG Yihui, XU Yongxiang, et al. Development of intelligent green and efficient mining technology and equipment for thick coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 882-893.
- [7] 王国法,张良,李首滨,等.煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J].煤炭学报,2023,48(1):34-53.
WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34-53.
- [8] 王国法,张建中,薛国华,等.煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J].煤田地质与勘探,2023,51(2):12-26.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, et al. Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal mining face [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 12-26.
- [9] 范京道,金智新,王国法,等.煤矿智能化重构人与煤空间关系研究[J].中国工程科学,2023,25(2):243-253.
FAN Jingdao, JIN Zhixin, WANG Guofa, et al. Reconstructing human-coal space relationship through coalmine intellectualization [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 243-253.
- [10] 范京道,封华,宋朝阳,等.可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J].煤炭学报,2022,47(1):499-514.
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 499-514.
- [11] 金智新,闫志蕊,王宏伟,等.新一代信息技术赋能煤矿装备数智化转型升级[J].工矿自动化,2023,49(6):19-31.
JIN Zhixin, YAN Zhirui, WANG Hongwei, et al. The new generation of information technology empowers the digital and intelligent transformation and upgrading of coal mining equipment [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 19-31.
- [12] 彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [13] 彭苏萍,赵惊涛,盛同杰,等.煤田绕射地震勘探现状与进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):1-20.
PENG Suping, ZHAO Jingtao, SHENG Tongjie, et al. Status and advance of seismic diffraction exploration in coalfield [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 1-20.
- [14] 王双明,孙强,谷超,等.煤炭开发推动地学研究发展[J].中国煤炭,2024,50(1):2-8.
WANG Shuangming, SUN Qiang, GU Chao, et al. The development of geoscientific research promoted by coal exploitation [J]. China Coal, 2024, 50(1): 2-8.
- [15] 袁亮,张平松.煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J].煤炭学报,2023,48(1):1-14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1-14.
- [16] 程建远,王保利,范涛,等.煤矿地质透明化典型应用场景及关键技术[J].煤炭科学技术,2022,50(7):1-12.
CHENG Jianyuan, WANG Baoli, FAN Tao, et al. Typical application scenes and key technologies of coal mine geological transparency [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 1-12.
- [17] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.

- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(4): 343–348.
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 1–7.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 1–7.
- [19] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 1–13.
- QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 1–13.
- [20] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(1): 1–14.
- MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Research on green mining of coal resources in China: Current status and future prospects[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(1): 1–14.
- [21] 袁亮, 张农, 阚甲广, 等. 我国绿色煤炭资源量概念、模型及预测[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 1–8.
- YUAN Liang, ZHANG Nong, KAN Jiaguang, et al. The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 1–8.
- [22] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 1–7.
- YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1–7.
- [23] 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.
- [24] 顾大钊, 曹志国, 李井峰, 等. 煤矿地下水水库技术原创试验平台体系研制及应用[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 100–113.
- GU Dazhao, CAO Zhiguo, LI Jingfeng, et al. Original experimental platform system and application of underground coal mine reservoirs[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 100–113.
- [25] 顾大钊, 李全生. 基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 950–958.
- GU Dazhao, LI Quansheng. Theoretical framework and key technologies of underground ecological protection based on coal mine occupational health prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 950–958.
- [26] 张博, 彭苏萍, 王佟, 等. 构建煤炭资源强国的战略路径与对策研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(1): 88–96.
- ZHANG Bo, PENG Suping, WANG Tong, et al. Strategic paths and countermeasures for constructing a “great power of coal resources” [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(1): 88–96.
- [27] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 57–64.
- PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 57–64.
- [28] 王佟, 张博, 王庆伟, 等. 中国绿色煤炭资源概念和内涵及评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(1): 1–8, 13.
- WANG Tong, ZHANG Bo, WANG Qingwei, et al. Green coal resources in China: Concept, characteristics and assessment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 1–8, 13.
- [29] 王佟, 赵欣, 林中月, 等. 新时代煤炭地质勘查工作的发展方向：“三个地球”建设[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(11): 7–10, 25.
- WANG Tong, ZHAO Xin, LIN Zhongyue, et al. New era coal geological exploration development orientation—the “triple earth” construction[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(11): 7–10, 25.
- [30] 江涛, 王佟, 宋梅. 煤炭行业绿色矿山建设标准及其评价指标初步探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(1): 1–7.
- JIANG Tao, WANG Tong, SONG Mei. Preliminary discussion on construction standards and evaluation index of green coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(1): 1–7.
- [31] 郑德志, 任世华, 秦容军, 等. 我国煤炭行业发展方式变革方向与路径研究[J]. *中国煤炭*, 2023, 49(5): 11–17.
- ZHENG Dezh, REN Shihua, QIN Rongjun, et al. Research on direction and path of the transformation of the development mode of China's coal industry[J]. *China Coal*, 2023, 49(5): 11–17.
- [32] 曹哲哲. 黄陵二号煤矿多维度地质模型大数据融合精准开采[J]. *陕西煤炭*, 2024, 43(2): 126–129, 141.
- CAO Zhezhe. Integration of multi-dimensional geological model and big data for precision mining of Huangling No. 2 Coal Mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2024, 43(2): 126–129, 141.
- [33] 张平松, 焦文杰, 李圣林. 采煤工作面地质条件透明化技术现状与分析[J]. *智能矿山*, 2023, 4(6): 2–13.
- [34] 毛善君, 鲁守明, 李存禄, 等. 基于精确大地坐标的煤矿透明化智能综采工作面自适应割煤关键技术研究及系统应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 515–526.
- MAO Shanjun, LU Shouming, LI Cunlu, et al. Key technologies and system of adaptive coal cutting in transparent intelligent fully mechanized coal mining face based on precisegeodetic coordinates[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 515–526.
- [35] 卢新明, 阚淑婷. 煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2296–2305.
- LU Xinning, KAN Shuteng. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2296–2305.
- [36] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. “双碳”背景下我国煤炭资源保障能力与勘查方向的思考[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(12): 1–8.
- WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Reflection on China's coal resource guarantee capacity and exploration work under the background of “double carbon” [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(12): 1–8.
- [37] 刘结高, 程建远, 疏义国, 等. 唐家会煤矿透明地质保障系统构

- 建及示范[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(1):1-9.
LIU Jiegao, CHENG Jianyuan, SHU Yiguo, et al. Construction and demonstration of the transparent geological guarantee system in Tangjiahui Coal Mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 1-9.
- [38] 王少龙, 刘再斌, 安林, 等. 基于透明地质的矿井智能水害仿真系统[J]. 智能矿山, 2023, 4(4): 75-80.
- [39] 李全生. 井工煤矿减损开采理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 988-1002.
LI Quansheng. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 988-1002.
- [40] 李全生. 煤炭生态型露天开采理论与技术体系及其应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2426-2444.
LI Quansheng. Theory and technical system of coal ecological open-pit mining and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5): 2426-2444.
- ciety, 2024, 49(5): 2426-2444.
- [41] 谭震. 柠条塔煤矿智能化先进技术创新与实践[J]. 智能矿山, 2024, 5(2): 28-35.
- [42] 谷保泽, 代振华, 李明星, 等. 透明地质保障技术构建方法: 以乌海矿区为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 136-143.
GU Baoze, DAI Zhenhua, LI Mingxing, et al. Construction method on transparent geological guarantee technologies: A case study of Wuhai mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 136-143.
- [43] 刘小雄, 王海军. 薄煤层智能开采工作面煤层透明化地质勘查技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 67-74.
LIU Xiaoxiong, WANG Haijun. Transparent geological exploration technology of coal seam on the working surface of intelligent mining of thin coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 67-74.