

交叉·前沿

煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力
建设路径刘峰^{1,2}, 郭林峰², 张建明², 王蕾¹

(1. 中国煤炭学会, 北京 100013; 2. 中国煤炭工业协会, 北京 100013)

摘要:煤炭工业是支撑我国经济社会高速发展和保障国家能源安全的压舱石与稳定器, 承担着能源保供与支撑新能源稳定发展的时代使命, 煤炭工业的高质量发展既是落实我国能源安全新战略与产业体系变革的关键, 也是推进能源产业可持续发展与促进国家高质量发展的基础。当前我国煤炭工业高质量发展已取得阶段成效, 能源保供成绩显著, 产业结构不断优化, 科技创新能力显著提高, 绿色开发与清洁高效利用持续推进。但当前煤炭工业仍面临诸多挑战, 发展水平与中国式现代化的国家需求差距较大, 可持续发展受多重因素制约, 数字技术与煤炭开发利用尚未深度融合, 智能化建设仍处于示范培育阶段, 绿色化发展不平衡且矛盾突出, 煤炭工业的转型升级仍然任重道远。结合当前煤炭工业发展现状与挑战, 提出了数字化、智能化、绿色化(三化)协同的发展模式, 明确了煤炭新质生产力的核心内涵, 构建了三化协同发展煤炭新质生产力的总体架构, 阐述了通过数字化变革生产要素创新配置、智能化引领关键技术跨越突破、绿色化主导传统产业深度转型三大要素催生煤炭新质生产力的技术路径, 提出了六大技术体系: 通过研发全产业链数据高效采集与深度治理技术体系, 打通煤炭产—运—储—销—用全流程的数据壁垒; 通过研发构建煤炭行业知识图谱与智能决策管控技术体系, 深度挖掘煤炭产业上下游各业务场景的关联关系与价值, 为煤炭生产利用全流程的自主决策与智能控制奠定基础; 开展煤炭资源智能—绿色—高效开发技术体系、煤炭产业安全协同保障技术体系、矿区生态智能监测—预警—修复技术体系、煤炭柔性开发与清洁低碳利用技术体系研究, 实现煤炭开发利用全产业链、全流程的三化协同发展, 培育形成煤炭新质生产力, 为煤炭工业的整体形象带来根本性变革提升。

关键词:数字化; 智能化; 绿色化; 三化协同; 煤炭新质生产力; “双碳”目标

中图分类号: F426.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0001-15

Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry
and its path of building new coal productivityLIU Feng^{1,2}, GUO Linfeng², ZHANG Jianming², WANG Lei¹

(1. China Coal Society, Beijing 100013, China; 2. China National Coal Association, Beijing 100013, China)

Abstract: The coal industry is the ballast stone and stabilizer that supports the rapid development of China's economy and society and ensures national energy security. It also undertakes the mission of ensuring energy supply and supporting the stable development of new energy. At present, the high-quality development of China's coal industry has achieved some

收稿日期: 2023-12-10 修回日期: 2024-01-22 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0091

作者简介: 刘峰(1967—), 男, 甘肃平凉人, 研究员, 博士生导师, 博士。E-mail: mtkjlf@sina.com

通讯作者: 郭林峰(1994—), 男, 山西繁峙人, 工程师, 博士。E-mail: mtkjlf@163.com

引用格式: 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 its path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.



移动阅读

staged results, with remarkable achievements in energy supply, the continuous optimization of industrial structure, the significant improvement of scientific and technological innovation capabilities, and the continuous advance of green development and clean and efficient utilization. However, the current development level of the coal industry is far from meeting the national needs of Chinese-style modernization. The sustainable development is restricted by multiple factors. The digital technology and coal development and utilization have not yet been deeply integrated. The intelligent construction is still in the demonstration and cultivation stage. The green development is unbalanced and contradictory and prominent. The transformation and upgrading of the coal industry still has a long way to go. In view of the current development status and challenges of the coal industry, this paper proposes a synergistic development mode of digitalization, intelligentization and greenization (three -izations), clarifies the core connotation of new-quality coal productivity, constructs the overall framework of the synergistic development of new-quality coal productivity, and expounds the technical path for the transformation of the innovative allocation of production factors by digitalization, the breakthrough of key technologies led by intelligentization, and the deep transformation of traditional industries by greenization, i.e., by these three factors to generate new-quality coal productivity. Six major technical systems are proposed: through the research and development of the technical system of efficient data collection and in-depth governance of the whole industry chain, the data barriers among coal production, transportation, storage, marketing and use of the whole process are removed. Through the research and development of the knowledge map and intelligent decision-making and control technological system of the coal industry, the correlation relationship and value of the upstream and downstream business scenarios of the coal industry are deeply explored, so as to lay the foundation for the independent decision-making and intelligent control of the whole process of coal production and utilization. Also, the research should be carried out in terms of the intelligent-green-efficient development technological system of coal resources, the technical system of collaborative guarantee of safety in the coal industry, the technical system of ecological intelligent monitoring-early warning-restoration in mining areas, and the technical system of flexible development and clean and low-carbon utilization of coal, so as to realize the synergistic development of the whole industrial chain and the whole process of coal development and utilization, cultivate and form a new-quality coal productivity, and bring some fundamental changes and improvements to the overall image of the coal industry.

Key words: digitalization; intelligentization; greenization; synergy of three-izations; new coal productivity; carbon peaking and carbon neutrality goals

能源是经济社会发展的重要物质基础和动力源泉。近年来,世界能源格局加速演进,三大体系已呈现出明显的变化:新冠疫情叠加大国博弈和地缘政治冲突前所未有地冲击了全球能源供给体系,全球气候变化倒逼变革能源消费体系,绿色低碳转型迫在眉睫,与此同时,第四次工业革命与产业变革正在重塑能源技术体系。面对严峻的外部形势和自身发展需求,党的二十大站在以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的战略高度,对能源发展作出新部署、提出新要求:积极稳妥推进碳达峰碳中和、加快规划建设新型能源体系、确保能源安全、积极参与应对气候变化全球治理等,为新征程上推动能源高质量发展指明了方向。2023年中央经济工作会议更是明确指出要坚持“稳中求进、以进促稳、先立后破”的总原则,进一步为能源行业的健康发展奠定了基调。

基于我国富煤贫油少气的能源禀赋,以煤为主的能源结构短期内难以根本改变。煤炭工业是支撑我国经济、社会高速发展和保障国家能源安全的压舱石

与稳定器,承担着能源保供与支撑新能源稳定发展的时代使命,煤炭工业实现高质量发展既是落实我国能源安全新战略与产业体系变革的关键,也是推进能源产业可持续发展与促进国家高质量发展的基础。所以,在当前阶段任何形式的“去煤化”都是不负责任的错误观点,而如何推进煤炭工业的转型升级、进一步“做好煤炭这篇文章”则是必须深度思考的重大命题。

煤炭行业多位专家学者针对这一命题开展了系列研究。在能源战略方面,王显政^[1-2]提出建设创新发展、绿色发展、安全生产等七大体系,推动建设现代化煤炭经济体系;谢克昌^[3-5]提出从能源总量、能源结构、综合能效、能源科技、体制机制、能源安全6方面重点分析了未来一段时期内能源发展的关键问题,提出了能源革命,碳达峰、碳中和4个阶段的战略目标;谢和平等^[6-7]研判了我国能源消费格局演变趋势及不同时段煤炭消费规模,阐述了碳中和目标下,我国煤炭行业将迎来实现煤炭高质量发展的机遇、煤炭升级高技术产业的机遇、煤炭抢占新能源主阵地的三大机遇。

在煤炭安全绿色开发利用方面,钱鸣高等^[8-11]在新世纪初提出煤矿绿色开采技术体系,持续指导我国煤炭绿色开采工程实践;彭苏萍等^[12-14]研究了矿区生态环境修复关键技术,提出了生态环境可持续发展的工作重点与发展模式;袁亮等^[15-17]对我国绿色煤炭资源量进行预测,提出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;王双明等^[18-20]探讨和展望利用煤炭开采、地下气化及原位热解等形成的扰动空间进行CO₂地下封存的技术途径,提出了赋煤区全生命周期能源开发理念,并搭建了赋煤区新能源开发总体框架;武强等^[21-23]对我国煤炭主题能源地位和能源战略形势开展了思考与对策研究,研发了矿井水害治理关键技术体系;岳光溪、刘炯天、刘中民、赵跃民等^[24-28]对煤炭清洗选和燃烧等技术途径和技术进行了研究和总结;卞正富等^[29]提出煤炭零碳开采理念与技术;陈浮等^[30]研究了采煤沉陷区降污固碳协同修复机制;张吉雄等^[31]对煤基固废充填开采技术研究进行了进展总结与展望;潘一山、齐庆新、窦林名、姜福兴等^[32-36]对冲击地压防治方面开展了大量研究,已形成较完整防冲技术体系;周福宝等^[37-38]对矿井煤尘和瓦斯防治技术进行了研究和总结。在高效智能开发利用方面,康红普等^[39-41]研究了千米深井巷道围岩控制难题,提出了煤巷智能快速掘进技术与装备的发展方向,并针对全球产业链与能源供应链重构提出了煤矿智能化建设等5项重点任务;王国法与笔者^[42]共同提出煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑,并对煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展进行研究^[43-44];葛世荣等^[45-48]研究了数字孪生智采工作面、煤矿机器人体系的架构及关键技术,初步建立了我国煤矿机器人研发技术体系,并开展了煤基能源动态碳中和模式及其保供降碳效益评估研究;笔者^[49-50]系统总结了“十三五”煤炭科技发展成就,分析了煤炭科技发展面临的共性问题,提出了煤炭科技自立自强、完善现代化煤炭开发利用理论与技术体系的“十四五”煤炭科技发展目标,并以科学定“量”、绿色提“质”、创新领“路”为纲,展开了双碳目标下推进煤炭消费转型升级的技术路径研究。

通过对产业结构、发展模式、管理体制等进行持续变革创新,我国煤炭工业高质量发展已取得阶段性成效,现代化煤矿建设取得积极进展,生产开发布局持续优化,生产效率大幅提升,安全形势明显好转,系统智能化建设成效显著,清洁利用水平逐步提高,现代产业链逐渐完善,自主创新能力明显提升。“十四五”时期是我国全面开启建设社会主义现代化国家新征程的第1个5年,也是推进实现高质量发展的关键

5年。在取得成绩的同时,全行业也要清醒地认识到,当前煤炭工业的发展水平远不能满足中国式现代化的国家需求,煤炭工业的转型升级仍然任重道远,发展模式仍需自我革命,科技创新的支撑力度仍然不够。新时代新征程,亟须形成与中国式现代化相适应的煤炭新质生产力。

笔者分析了当前我国煤炭工业高质量发展取得的阶段成效,指出今后发展面临的挑战,提出了煤炭工业数字化智能化绿色化三化协同发展的理念与架构,明确了煤炭新质生产力的核心内涵,构建了三化协同发展煤炭新质生产力的总体架构,阐述了通过数字化变革生产要素创新配置、智能化引领关键技术跨越突破、绿色化主导传统产业深度转型三大要素催生煤炭新质生产力的技术路径,为煤炭行业高质量发展探索了新的模式。

1 煤炭工业高质量发展现状与挑战

1.1 煤炭工业高质量发展取得的阶段成效

1.1.1 能源保供成绩显著

面对日趋复杂的国内外政治环境,煤炭安全高效开发和清洁低碳利用有效支撑了我国经济社会平稳快速发展。2022年我国原煤产量达到45.6亿t,同比增长10.5%,分别占我国能源生产、消费总量的67.4%、56.2%;原油产量约为2.05亿t,进口原油约5.08亿t,原油对外依存度约为71.3%;天然气产量约2201亿m³,进口天然气1503亿m³,天然气对外依存度约为40.6%;发电量约为8.8万亿kW·h,火电装机占比约为52%,火电发电量占比约为69.8%,其中煤电占比约为58.4%,如图1所示。2023年1—11月,全国规模以上原煤产量46.6亿t,同比增长2.9%,2023全年进口煤炭4.7亿t,同比增长61.8%。煤炭资源安全高效开发保障了我国能源的安全稳定供给。

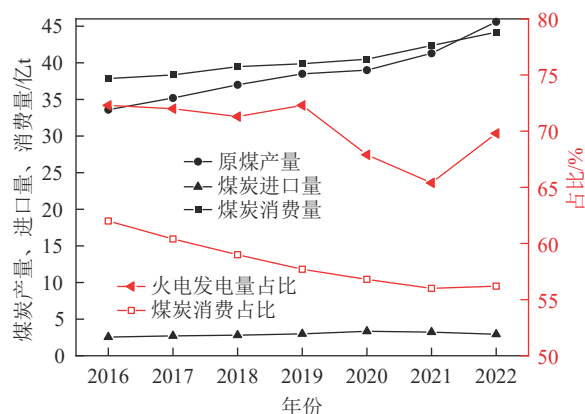


图1 煤炭生产、消费量与火电占比

Fig.1 Proportion of coal production, consumption and thermal power

1.1.2 产业结构不断优化

煤炭开发布局结构持续优化,煤炭开发效率、效益与安全水平稳步提升。近年来,我国煤炭生产集中度不断提升,中西部产煤区的作用和战略地位愈发凸显,截至 2023 年底,我国煤矿数量缩减至约 4 313 座,但产量再创历史新高。煤炭开发重心加速向晋陕蒙等中西部转移,2022 年原煤产量超过 1 亿 t 的省(区)有 6 个,产量达 39.6 亿 t;晋陕蒙新 4 省的产量达到 36.9 亿 t,其中山西、内蒙古原煤产量突破 10 亿 t。煤炭行业生产结构持续优化,企业的产业形态更加多元,上下游产业一体化发展成效显著,并逐步实现由中低端向中高端迈进。2022 年,规模以上煤炭开采和洗选业利润总额约为 1.02 万亿元,同比增长 44.3%;矿山事故起数、死亡人数、煤矿百万吨死亡率比 2012 年分别下降 75.8%、77.6% 和 86.0%,煤炭产业经济与安全形势持续向好(图 2)。

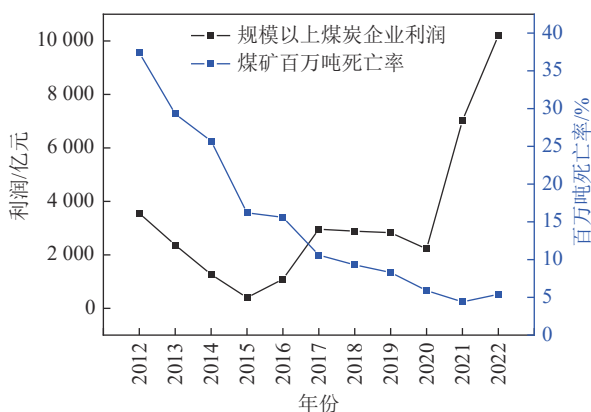


图 2 煤炭企业经营与安全形势

Fig.2 Management and safety situation of coal enterprises

1.1.3 科技创新能力显著提高

据不完全统计,大型煤炭企业的科技研发投入强度达到 2%,建成国家级研发平台 149 处,初步形成以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的开放型创新体系;大型矿井智能化建设、特厚煤层智能化综采综放、煤与共伴生资源协调共采、燃煤超低排放发电、现代煤化工等技术取得突破,大型煤机装备国产化、智能化水平稳步提升,煤机装备制造水平位居世界前列,建成了世界最大规模的安全高效智能化煤炭开发体系、清洁高效煤电供应体系和现代煤化工技术体系。截至 2023 年 12 月,全国已有 758 处煤矿累计建成智能化采煤工作面 1 651 个,其中全国首批示范煤矿累计建成智能化采煤工作面 363 个、掘进工作面 239 个,涵盖产能 6.2 亿 t,单个工作面平均生产能力达到 500 万 t,智能化建设总投资规模超 2 000 亿元,有力推动了煤炭生产方式加快实现根本性变革,煤炭行业高质

量发展迈上新台阶。

1.1.4 绿色开发与清洁高效利用持续推进

近年来,充填开采、保水开采、无煤柱开采、煤与共伴生资源协调开采等绿色开采技术得到大力推广,我国原煤入洗率由 56.0% 提升至 69.7%,矿井水综合利用率由 62.0% 提升至 79.3%,土地复垦率由 42.0% 提升至 57.8%,煤矸石及低热值煤发电装机由 2 950 kW 提高至 4 300 kW,实现超低排放的燃煤机组占比达到 94%,大型煤炭企业的原煤生产能耗由 17.1 kg tce/t 降至 9.7 kg tce/t,高效煤粉燃烧技术及煤粉工业锅炉系统使工业锅炉热效率达到 90% 以上,燃煤工业锅炉污染物排放达到超低排放标准;攻克了 4 000 t/d 水煤浆气化、3 500 t/d 干粉气流床气化成套技术与装备,建成 108 万 t/a 煤直接液化和 400 万 t/a 间接液化示范工程,煤制烯烃、乙二醇等实现工业化生产,形成了世界上最齐全的现代煤化工技术体系。

1.2 煤炭工业高质量发展仍面临挑战

近十年来,我国煤炭工业经受了复杂多变的国内外政治、经济、技术、装备等考验,通过创新发展思路、发展路径与发展模式,煤炭、煤电、煤化工等产业体系持续转型升级,为煤炭工业实现高质量发展奠定了坚实的基础,但面对数字经济、新一代信息技术赋能与“双碳”战略制约等,煤炭工业实现高质量发展仍然面临诸多挑战。

1.2.1 可持续发展受多重因素制约

煤炭仍将在未来相当长一段时期内作为我国的主体能源,实现煤炭资源安全、高效、可持续、稳定供给任重而道远。近年来,随着开采强度逐年增大,浅部优势煤炭资源逐渐枯竭,山西面临后续储备资源不足等问题,陕西、内蒙古面临开采深度增大、矿井灾害日益严重、生态与环境制约等问题,新疆则存在自治区内消费量较低、煤炭资源外运存在瓶颈,山东、河北、河南、两淮等矿区煤炭资源日益枯竭,面临持续减产的风险。国际政治环境变化导致国内煤炭供需极易短期内出现过松或过紧的情况,现有煤炭工业体系难以实现煤炭资源智能柔性供给,生产煤矿短期内大幅核增产能,导致采掘接续紧张、灾害治理欠账等,安全高效开采面临风险。另外,新一代煤炭产业工人对传统煤矿井下作业环境提出更高要求,传统煤炭企业面临招工难的窘境,煤炭产业面临可持续稳定发展的难题。

促进煤炭行业向生产服务型转变仍面临体制机制的制约。我国煤炭消费增速放缓并逐渐进入峰值平台期,行业发展模式必须由依靠规模扩张、总量增加向提高质量、增加服务转变。虽然部分企业已经在

探索煤矿专业化服务模式,但相关法律法规依然存在障碍,亟待研究推动煤炭行业由生产向生产服务型转变的法律法规体系和配套体制机制。

1.2.2 数字技术与煤炭开发利用尚未深度融合

数字化本质上是一场新的工业革命和产业变革,是指由数字技术驱动下,实现生产、运营、管理、销售和服务等全面数字化,从而推动业务模式重构、管理模式变革、商业模式创新与核心能力提升。产业数字化和数字产业化,是能源工业产业链价值链走向高端的重要机遇,数字技术是构建煤矿新形态的核心力量,将驱动煤矿生产模式、生产要素、生产者的三重变革:生产模式的变革,意味着从过去的机械化向智能化发展,从过去的人工决策向更高阶段的数字驱动决策发展;生产要素的变革,意味着数据将成为土地、劳动力、资本、技术之外的第五大生产要素,深刻影响煤矿运行模式;生产者的变革,意味着煤矿员工工作将远离环境恶劣的井下,而是置身于绿色的智慧园区。

目前大多数煤矿启动了数字基础设施建设,建设了数据中心、云平台、有线/无线网络系统等,多数煤矿在以往信息化建设的基础上实现了经营管理的数字化,但数据资产的利用率较低、利用价值尚未得到有效挖掘,煤炭企业数字化转型路线仍不清晰,未能实现生产流程的全数字化,未完全打通生产控制系统、经营管理系统、安全管理系统等,缺乏基于数据的决策能力,远未形成驾驭“数字”的能力。

1.2.3 智能化建设仍处于示范培育阶段

煤炭行业属于传统的高危行业,井下作业环境恶劣、劳动强度大,且生产过程中伴随着水害、火灾、瓦斯、冲击地压、粉尘等灾害威胁,智能化建设需求迫切。开采层面,已形成薄与极薄煤层智能综采、中厚煤层智能综采、厚煤层智能综采、特厚煤层智能综放的智能采煤工作面模式,针对不同地质条件试验应用TBM掘进机、煤巷快掘系统、掘进机器人系统、智能化纵轴式综掘设备等,主煤流运输、供电、供排水、通风系统等可以实现远程集中控制,露天矿卡无人驾驶编组运行试验成功。虽然整体智能化建设取得了一些进展,但在智能地质保障、智能防灾、智能快掘、智能辅运、智能感知决策等领域存在着明显技术短板,露天矿无人驾驶技术需要进一步突破。人工智能、大数据、5G、云计算等技术可以有效减少井下作业人员数量、降低工人劳动强度,但受制于井下复杂恶劣的开采环境,新一代信息技术与煤炭开采技术的融合难度大,5G技术仍然缺乏适宜的应用场景,智能化开采技术装备对于条件复杂矿井的适应性仍较差,关键核心技术装备还存在诸多瓶颈制约,尚难以实现各系统和应

用场景的常态化无人/少人运行;煤炭企业生产、生活环境对高科技人才吸引力弱,矿山从业人员“老龄化”严重、知识结构难以适应数字化转型与智能化建设需要,传统煤矿组织架构与激励机制难以支撑企业智能化发展。

1.2.4 绿色化发展不平衡且矛盾突出

党的二十大指出:必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展,当经济效益与环境生态效益发生冲突的时候,必须坚持生态优先的新发展理念。中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化,要求在合理区间内开发利用和扰动自然资源,煤炭绿色开发和清洁高效利用已成为立足我国资源禀赋、确保能源安全的重要战略举措,是建立新型能源体系、实现“双碳”目标的关键支撑。欧洲主要国家在20世纪90年代实现了碳达峰,计划2050年实现碳中和,而我国碳达峰到碳中和的时间仅30a,煤炭企业面临空前的环境政策制约。

大量煤炭开采带来了煤矸石、矿井水、煤矿瓦斯、地面沉陷、土地占用、地上地下水系损伤、煤尘飞扬等生态环境问题。虽然近年来,无煤柱开采、保水开采、充填开采、矿区生态修复等技术取得积极进展,但绿色开采技术的效率、效益较低,大范围推广难度大。多数煤矿仍面临残采区遗煤/关闭矿井空间/矿井水/地热/瓦斯等资源利用率低、采动塌陷面积大、矿工职业健康保障能力不够等棘手问题。西部生态脆弱区煤矿,亟需采动损伤精准监测感知与控制、矿区生态健康预警与修复等技术。14个煤炭基地9个在黄河流域,包括晋北、晋中、晋东,亟需山水林田湖草综合治理、系统治理、源头治理。开展煤水资源协调开采、采空沉陷区精细治理、局部精准充填、固废资源利用等技术攻关。煤炭高效清洁燃烧、清洁转化、碳捕集与碳封存等关键技术的原创性颠覆性突破较少,人才和经费保障不足,政策支持力度较弱,我国煤炭工业尚未建立基于“双碳”目标的煤炭绿色开发与清洁低碳利用标准体系、技术装备体系与典型示范工程。

2 煤炭工业三化协同发展理念与架构

2.1 三化协同发展理念

煤炭工业高质量发展要以煤炭资源的安全、绿色、高效、智能开发为基础,以满足国家能源安全需求、促进煤炭与其他能源的融合发展、提升煤炭清洁高效可持续利用水平、促进煤炭由高碳能源向绿色能源转变、提高矿工生活质量与矿区生态文明建设为约束,通过科技、人才、管理、体制机制变革赋能,实现煤炭资源

勘察设计、建设开发、洗选运输、转化利用等全产业链的高质量发展。我国煤炭工业实现高质量发展应以煤炭资源的安全、绿色开发为前提,以数字化、信息化、智能化开采为手段,以煤炭产业全链条稳定供给、价值最大化利用为依托,实现煤炭资源的高效开采与清洁低碳利用。基于新一代信息技术与煤炭开发利用技术深度融合应用,实现煤炭资源开发利用全流程的数字化、智能化、绿色化(三化)协同发展,是现阶段实现煤炭工业高质量发展的关键。

基于我国煤炭工业高质量发展现状及数字化、智

能化、绿色化协同发展需求与挑战,提出我国煤炭工业三化协同的发展理念,如图3所示,即通过构建“数字基础设施、智能管控基础设施、绿色开发与生态修复基础设施、清洁低碳利用基础设施、安全保障基础设施、产业协同基础设施”等6类基础设施,形成煤炭开发利用上下游全产业链、全要素、全生命周期的基础设施底座,上述相关基础设施主要指煤炭开发利用相关的数据采集、数据传输与深度融合治理、软硬件平台及相关装置装备,是实现煤炭资源开发利用全流程数字化、智能化、绿色化协同发展的基础。

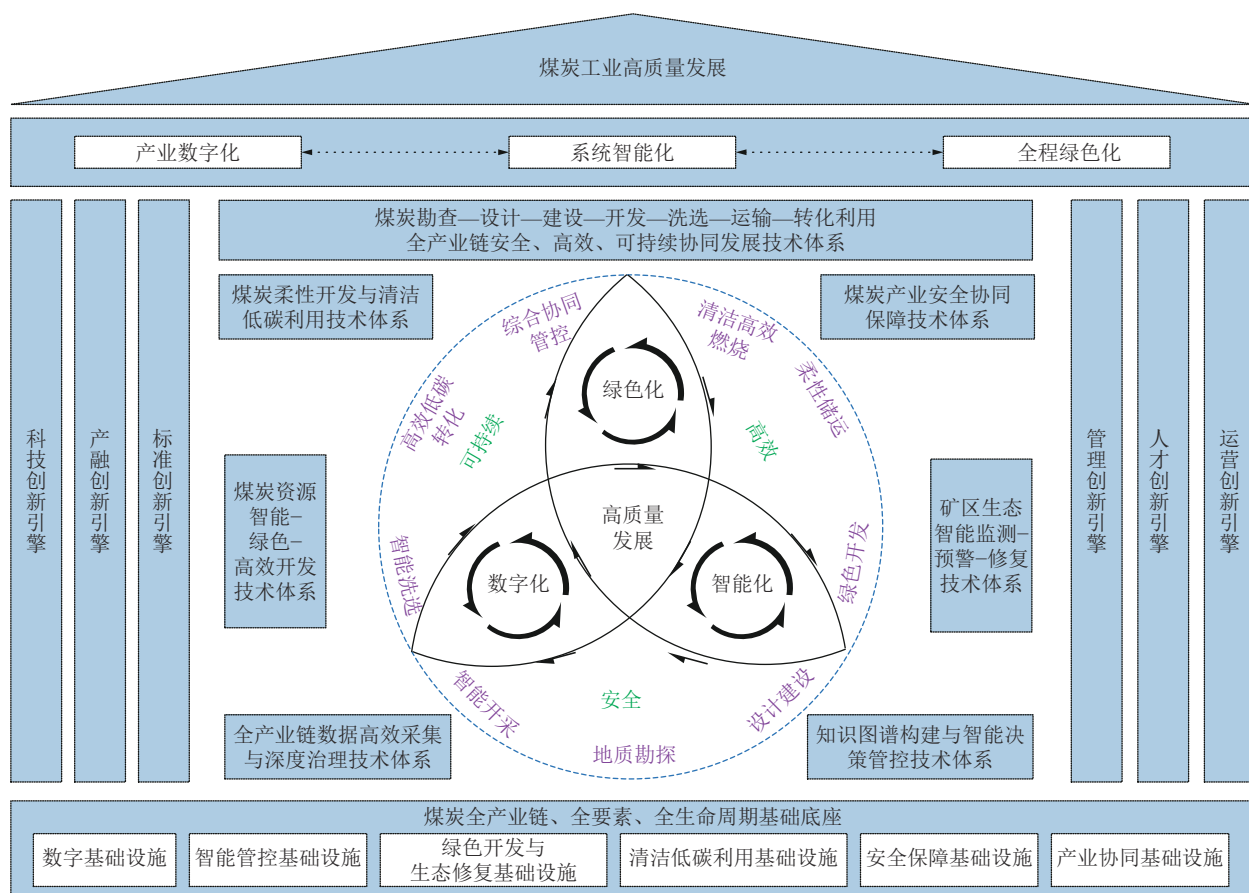


图3 煤炭工业三化协同发展理念框架

Fig.3 Framework of concept of coordinated development of the three-izations of the coal industry

基于上述基础设施,重点研发形成6类技术体系。通过研发全产业链数据高效采集与深度治理技术体系,打通煤炭产—运—储—销—用全流程的数据壁垒,通过数据治理技术深度挖掘不同场景数据的融合应用价值,以数字产业化赋能煤炭产业数字化;通过研发构建煤炭行业知识图谱与智能决策管控技术体系,深度挖掘煤炭产业上下游各业务场景的关联关系与价值,为煤炭生产利用全流程的自主决策与智能控制奠定基础,实现煤炭产业数字化赋能煤炭产业生产利用决策控制的智能化;通过研发煤炭产业安全协同保障技术体系,实现煤炭生产安全、生态安全、数据安全、

网络安全、平台安全,保障国家能源安全、稳定、可持续供给。将上述数字化、智能化融合发展成果应用于煤炭开发、生态修复、低碳清洁利用相关应用场景,研发形成煤炭资源智能—绿色—高效开发技术体系、矿区生态智能监测—预警—修复技术体系、煤炭柔性开发与清洁低碳利用技术体系,实现煤炭开发利用全产业链、全流程的数字化、智能化、绿色化协同发展。

上述技术体系的研究应用,需要科技、产业、标准、管理、人才、运营等6类创新引擎进行支撑,共同构建煤炭工业“产业数字化、系统智能化、全程绿色化”三大生态体系,最终实现以“减人、增安、提质、创效、

绿色、低碳、可持续”发展为特征的煤炭工业三化协同高质量发展目标。

煤炭工业三化协同是以数字产业化赋能煤炭产业数字化为基础,以煤炭产业数字化与系统智能化为支撑,实现煤炭产—运—销—储—用全流程的智能系统化运行,将煤炭产业数字化、智能系统化应用于煤炭资源开发利用的各主要环节,实现煤炭工业数字化、智能化、绿色化三化协同发展,助力煤炭工业高质量发展。

2.2 三化协同发展架构

上述煤炭工业三化协同发展理念的诠释,三化协同指数字化、智能化、绿色化等新一代技术与煤炭开发利用技术的融合创新应用,赋能煤炭工业上下游全产业链的协同发展,实现煤炭工业探—建—采—选—储—运—销—用—监管等于一体的协同发展,为此构建了煤炭工业三化协同发展总体架构,如图4所示。

总体架构的最底层涵盖煤炭工业全产业链的主要参与方,包括地质勘探、矿井建设、煤矿企业与选煤厂、煤化工企业、燃煤电厂等,是信息生产与采集的基础层,也是上部行业智能综合管控平台与监管平台智

能决策指令的执行层,构成了煤炭工业三化融合的基础设施底座;通过煤炭工业融合网络将底层各类信息上传至煤炭行业数据中心,大部分数据通过高速、高可靠有线网络传输,部分涉密数据可以采用专网传输;部分应用场景也可以选择公—专融合的5G无线网络传输,借助5G公网的网络切片技术,可以降低传输成本,通过5G专网可以提高数据传输的时效性、可靠性与安全性。

采集的各类数据分别汇入煤炭行业数据中心,根据应用场景差异,分别设立煤炭行业勘查数据中心、开采与洗选数据中心、生态环境数据中心、煤化工数据中心、燃煤电厂数据中心等,并根据不同的应用场景设置装备、物料等数据中心,以及融合应用数据中心,采用“云—边—端”协同的多层级处理方式对数据进行分析,实现根据业务场景的数据深度挖掘分析及多场景数据的融合应用。将“云—边—端”协同的数据处理中心可以划分为4层,底层为数据采集层(端侧),将采集的数据汇聚至边缘云或企业云;边缘云则主要在系统侧,支撑业务系统的数据处理;第3层为企业

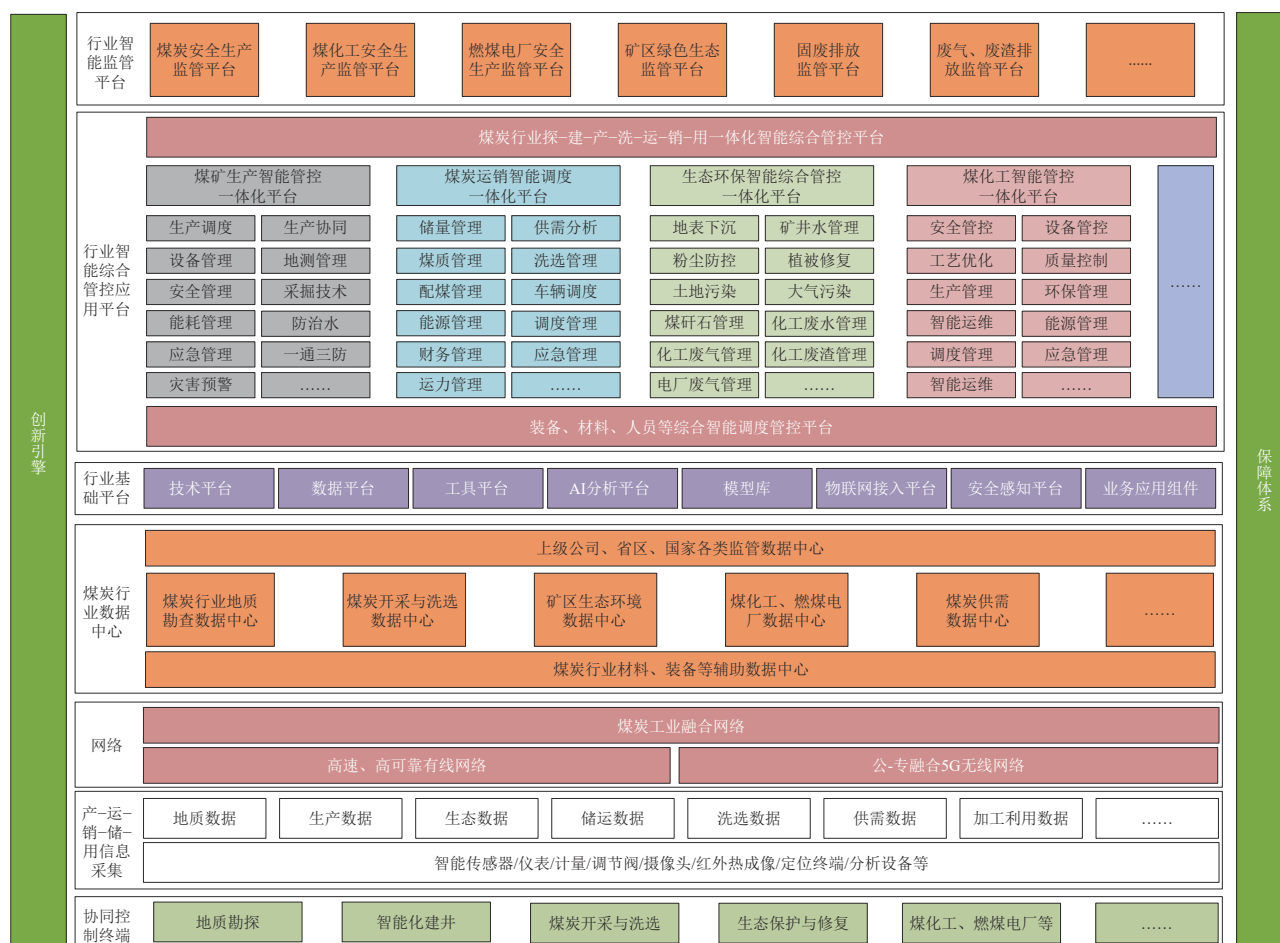


图4 煤炭工业三化协同发展总体架构

Fig.4 Overall framework of coordinated development of the three-izations of the coal industry

云或集团云,用于对本企业或集团相关数据的融合处理;第4层为行业云,用于对全行业数据进行分析、融合及应用,形成煤炭工业三化融合的数据支撑底座。部分应用场景(如洗选、运输、销售等)可以采用区块链技术,提高数据的可靠性、交易的透明度等。

通过技术平台、数据平台、模型库与算法库等行业基础平台赋能,将新一代信息技术与煤炭资源勘探、设计、建设、开发、生态修复、洗选、运输、销售、清洁利用等技术进行深度融合,实现数字产业化对煤炭产业数字化赋能,支撑构建不同业务场景的智能综合管控平台,其中生产企业端主要实现基于数据深度挖掘与融合分析对各业务系统的综合管理与集成控制,重点实现对底层各场景基础设施的智能控制,突出生产单元体或业务场景的数字化、智能化、绿色化协同发展;而上部集团层则重点实现对所辖企业各类场景的监管或管控,突出集团所辖各类应用场景的三化协同发展,重点为各类应用场景的协同;再上层则为行业监管层,重点对煤炭行业上下游全产业链的监管,突出三化技术赋能煤炭行业探-建-产-洗-运-销-用等全链条的协同发展,以及与长下游辅助行业的协同发展。上述煤炭工业三化协同发展架构的实现不仅需要多专业科技协同创新支撑,还需要管理体制变革、国家与行业政策激励、人才队伍建设等保障措施支持。

2.3 煤炭新质生产力的内涵

2023年中央经济工作会议指出:“要以科技创新推动产业创新,特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能,发展新质生产力。”生产力是人类改造自然、征服自然的能力,新质生产力是以科技创新为内生动力、包含全新质态要素的生产力。生产力变革离不开产业作为载体和表现形式,所以实现传统产业的转型升级是培育发展新质生产力的必由之路。煤炭开发利用的全生命周期,是广大矿工改造自然环境、同各类灾害不懈斗争的过程,也是自然反作用人类攫取利用资源而互相对抗的过程,加快形成煤炭新质生产力是推动实现人与自然和谐共生的中国式现代化发展的重要途径。

煤炭新质生产力,是在煤炭安全区间内科学定“量”的前提下^[50],以绿色提“质”、创新领“路”为纲,通过数字化变革生产要素创新配置、智能化引领关键技术跨越突破、绿色化主导传统产业深度转型三大要素协同融合,进而推动煤炭开发利用水平大幅跃迁的先进生产力。发展煤炭新质生产力是煤炭工业进入新发展阶段贯彻新发展理念,以创新推动变为全面创新驱动的自我革命式的新发展模式。

纵观百年以来的煤炭开发利用史,每一次开发利用的技术革命都会带来生产力的重大跃升。新时代新征程,亟须形成与中国式现代化相适应的煤炭新质生产力,提升适应环境、改造灾害、利用资源的能力。立足煤炭行业高质量发展阶段性成果,以数字化设施为基础,以智能化技术为突破,以绿色化转型为方向,发挥科技创新的增量器作用,煤炭新质生产力将依托煤炭智能绿色安全高效开采、清洁低碳协同转化利用两大基础理论的进步,以及5G、AI、矿山大模型、高可靠传感器和终端装备、核心元器件、煤化工新型催化剂、负碳固碳等技术的革命性突破,对煤炭工业的劳动者、劳动工具、劳动对象等进行系统性重塑和整体性重构,大幅度提升全要素生产率,深刻改变煤炭工业生产形态:基层劳动者将由体能型、技能型向科技型、复合型转变;劳动对象将由器械、设备、原料等物质实体拓展至包括大数据、工业互联网等在内虚拟对象;生产资料将进一步从物质资源等实体资本向科技资本、人才资本侧重;生产要素除劳动力、资本、土地等传统要素外,拓展出数据这一全新关键生产要素;劳动产出将由煤炭、化工品等实物产品类向智能技术应用场景、矿山大模型算法、提质降碳模式等技术服务类拓展转变。

3 三化协同培育煤炭新质生产力的技术路径

3.1 数字化变革生产要素创新配置

基于煤炭工业三化协同发展总体架构,采用工业互联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等新一代ICT技术,建设覆盖现场、煤矿、企业、行业4层架构的煤炭全产业链云网融合数字基础设施,推动煤炭行业全要素、全过程、全生命周期数字化,建设煤炭工业大数据中心,构建“数据驱动”的煤炭数字产业新生态,激发数据作为新的生产要素创新活力,驱动煤炭工业生产方式变革,建立全产业链数据高效采集与深度治理技术体系和知识图谱与智能决策管控技术体系,深度融合赋能煤炭资源开发与清洁利用全产业链数字化转型。

3.1.1 全产业链数据高效采集与深度治理技术体系

以煤炭行业工业互联网体系架构为框架,构建煤炭工业全产业链数据高效采集与深度治理技术体系,如图5所示,从下至上,主要包括:

(1) 全面开展煤炭全产业链数字化、煤矿智能化建设,以煤矿、企业为单元建设数字化、智能化基础设施,构建集团级、边缘侧二级云边协同私有云数据平台,具备煤炭全产业链全要素监测、识别、采集能力,

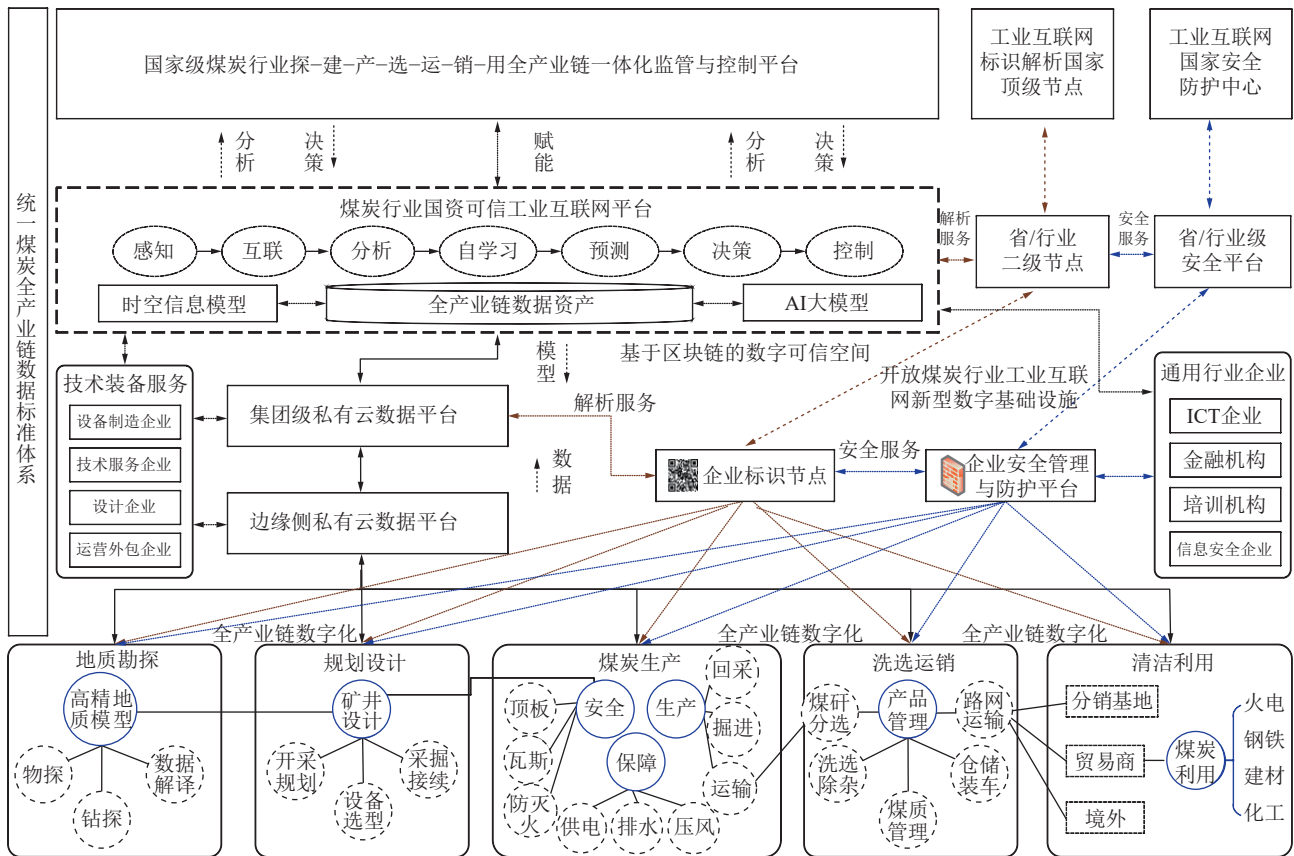


图5 煤炭工业全产业链数据高效采集与深度治理技术体系

Fig.5 Technical system of efficient data collection and in-depth management of the whole industrial chain of the coal industry

实现煤炭资源及环境动态高精度数字地质模型、矿井采掘工程设计及装备数字化、煤炭开采工艺和生产系统数字化、煤炭洗选储运全流程数字化、煤炭消费利用全过程数字化,实现数据横向跨生产系统、纵向跨业务管理层级自由流动。

(2) 构建开放共享的煤炭行业可信公有云工业互联网平台,建立数据安全高效采集机制,汇聚全产业链数据资源,融合矿山 AI 大模型、BIM+GIS 时空信息模型等技术平台能力,开展数据开发、建模、训练,形成面向全行业数据深度治理及智能应用服务能力;依托国家工业互联网新型数字基础设施建设,构建煤炭行业工业互联网标识解析二级节点、企业节点和公共递归节点 3 个层级的链网基础设施,形成跨产业链上下游、跨组织壁垒的数据互联互通路径,在统一行业数据标准下,实现对全产业链业务场景的解析服务。

(3) 统一煤炭全产业链数据标准体系,统一煤炭行业数字产业结构和数据字典,破除行业数据孤岛,采用分布式网络、隐私计算加密、智能合约等区块链技术,构建煤炭行业数据透明、不易篡改、可追溯的数字可信空间,形成煤炭全产业链各要素原生数字身份与大规模可信协作网络。利用数据资产管理、数据目录、供需撮合等数据流通功能,实现数据资产的统一登记

和管理;利用数据访问控制、使用控制和延伸控制等功能,实现数据主体、数据本身的使用时间、地点、方式等管控;利用可信环境、日志存证和自动审计功能,实现使用环境和行为安全可控。

(4) 基于煤炭行业工业互联网平台、标识解析链网基础设施和大规模数字可信协作网络,构建形成煤炭工业全产业链数据高效采集与深度治理技术体系和数字基础设施,为全产业链监测数据、分析模型、决策依据等提供承载空间,为实现“数据驱动”的产业控制决策模型提供数字化支撑手段。

3.1.2 知识图谱与智能决策管控技术体系

基于煤炭工业全产业链数字基础设施重塑煤炭生产要素配置,构建基于知识图谱支撑的煤炭工业智能决策管控技术体系,如图 6 所示,煤炭工业数字基础设施承载煤炭行业全产业链图数据资源、煤炭工业知识文档数据资源、煤炭工业地质与采掘部署时空数据资源和煤炭工业监管准入规则数据资源等;建立煤炭工业全产业链知识图谱引擎,融合知识图谱任务引擎、大模型任务引擎、规则算子流程引擎,构建煤炭工业全产业链多模态超融合知识引擎;支撑构建煤炭工业知识图谱、煤炭工业文档知识库、煤炭工业规则知

识业务库,形成煤炭工业全产业链知识体系跨形态建模支撑体系;打造煤炭工业全产业链知识赋能与决策支撑能力,包括煤炭行业知识检索、知识推荐、关系推理、图谱相似度计算、文档生成、多模态驱动规则流程定义等;聚焦煤炭工业全产业链智能柔性供给、安

全高效柔性生产、设备全生命周期预测性维护、安全态势分析预测和安全生产培训及运维服务等应用场景,提供业务决策、规则计算、知识支撑能力,支撑煤炭工业全产业链探-建-产-选-运-销-用一体化产业监管与控制平台的智能决策水平。

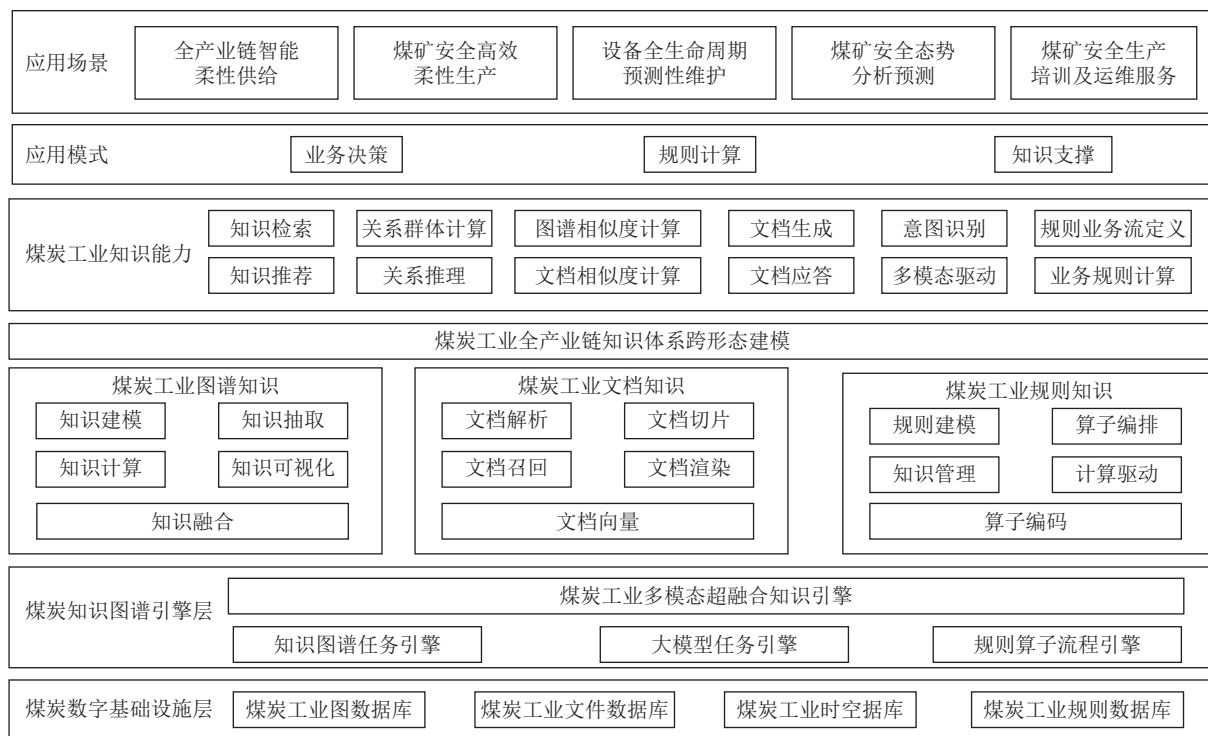


图6 煤炭工业全产业链知识图谱与智能决策技术体系

Fig.6 Technological system of knowledge map and intelligent decision of the whole industrial chain of the coal industry

3.2 智能化引领关键技术跨越突破

依托煤炭工业数字化创新要素配置体系,推动新一代信息技术与煤炭资源开发清洁利用深度融合,促进煤炭科技创新、煤炭数字技术和煤炭数字产业全面升级,构建煤炭全产业链智能-绿色-高效开发技术与供给体系,打造形成煤炭工业新质生产力,推动煤炭全产业链全要素实现泛在互联、深度融合,煤炭传统产业与数字产业实现以新促质、数实融合,煤炭数字技术与数字产业实现自主可控、自立自强,3方面融合共生、协同演进。

3.2.1 煤炭资源智能-绿色-高效开发技术体系

煤炭工业新质生产力促进煤炭新型工业化进程,以国家“3060”双碳战略目标为要求,建立煤炭资源开发、智能生产、柔性供给、低碳减排、绿色生态发展路径,形成煤炭资源智能-绿色-高效开发技术体系,基于煤炭工业数字要素配置体系与知识图谱智能决策管控技术体系,部署面向全产业链现场级、企业级和产业智能技术与应用集群,推动煤炭全产业链地质资源、开采装备、应用系统等全要素上云、用数、赋智,

全面提升煤炭资源开发技术体系应用水平,如图7所示。

煤炭工业智能-绿色-高效开发技术体系包括纵向国家级、产业级、企业级和工业现场级4层,横向产业链从资源勘探、矿井设计与装备选型制造、煤炭开采、煤炭运销、煤炭利用等5个阶段,形成纵横交织的数字管控产业链网,主要包括:

(1) 工业现场级。实现系统及设备的智能化升级改造,包括煤矿现场或井下、智能制造工厂、运销路网基础设施、发电厂及化工厂等,通过煤炭数字产业基础设施建设,打通物物流通及数字互联互通路径,包括煤矿智能化建设构建的信息基础设施、透明地质数字孪生保障、智能开采自主精准截割。装备及系统智能化升级、智能化综合管控平台及各类应用APP;煤机智能制造工厂MES系统、数控产线、故障检测等,实现厂矿端到端网络化协同;煤矿智能化生产与煤炭运销基础设施形成煤炭资源流动网,实现火力发电厂、煤化工工厂按需供货。

(2) 企业级。实现企业的数字化转型,包括煤炭设计企业、煤机制造企业、煤炭企业、煤炭运销企业、煤

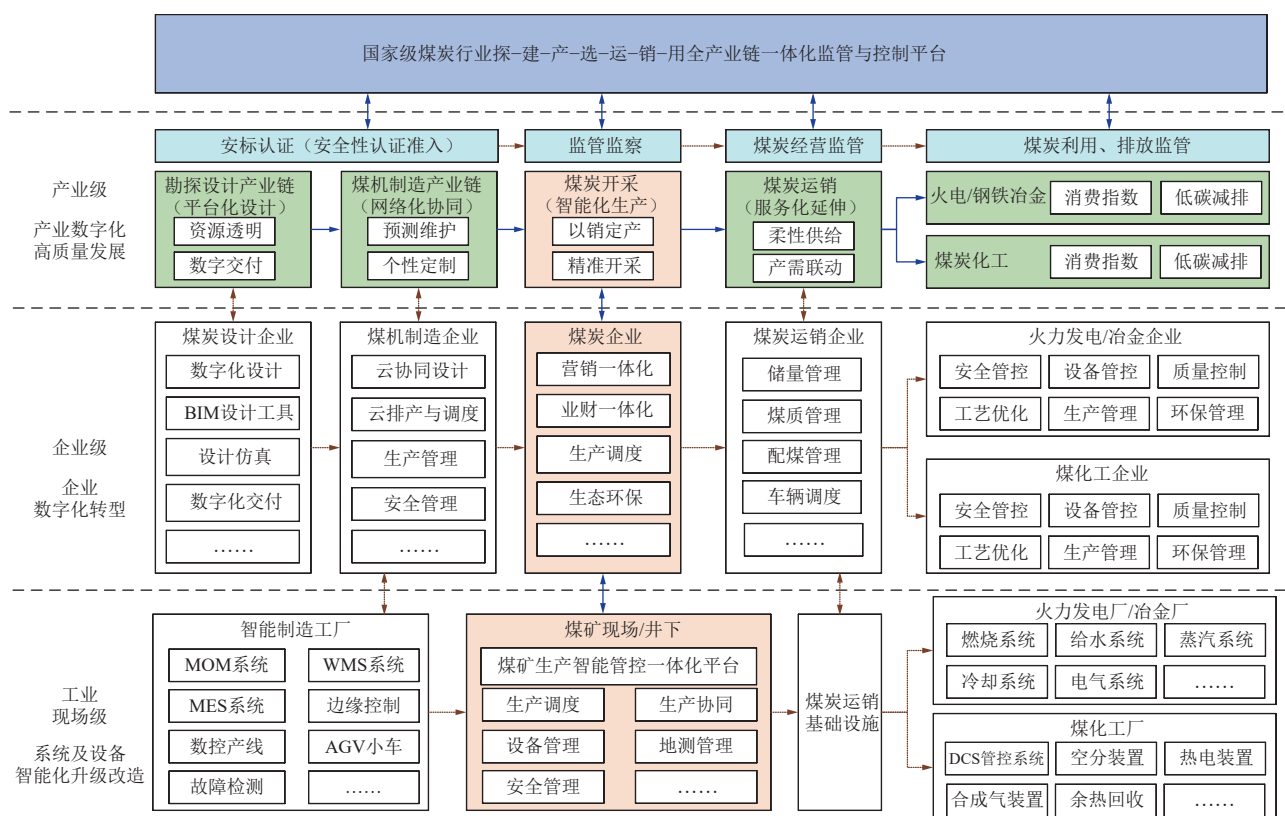


图 7 煤炭工业智能-绿色-高效开发技术体系

Fig. 7 Technological system of intelligent-green-efficient development of the coal industry

炭消费企业等,打通企业间的管理流程,形成跨组织间的协同协作模式。煤炭设计企业需提升数字化设计及交付、孪生仿真、设计工具等能力,实现设计、交付、运营一体化服务;煤机装备企业需提升云协同设计能力、制造产线智能化水平、设备维修响应速度,实现设备及系统运维网络化协同;煤炭企业需提升业财一体化及营销一体化水平,提升人员零伤害、环境零扰动的安全管控和精准开采能力,实现煤炭资源按需开采;煤炭运销企业需提升对煤炭需求、价格、煤质、储量及车辆路网等数据的实时获取、预测分析能力,实现煤炭最优配置供给;煤炭消费企业需提升煤炭燃烧利用的低碳减排量化控制水平,实现“3060”双碳目标下的最优减排路径,满足企业 ESG 评价信息披露要求。

(3) 产业级。实现煤炭全产业链上下游数字化转型和高质量发展,行业安标准入、安全监管监察、煤炭经营监管、低碳减排监管等实现服务化转型,在统一产业标准体系、数据标准体系和监管管控流程规范下,产业链上下游形成可信认证的数字流通空间,形成物物按需流通、数据安全可信、数实融合共享的煤炭数字产业发展态势,实现煤炭消费按需调控、煤炭运销柔性供给、煤炭开采以销定产、煤炭装备精准维护和服务体系全面升级。

3.2.2 煤炭产业安全协同保障技术体系

煤炭作为我国主体能源,保障了我国能源安全可靠,在新能源产业体系中发挥了稳定器、压舱石作用,一方面是煤炭资源开发过程的安全可控,包括地质安全、生产安全、设备安全、环境安全、管理安全和经营安全等;另一方面是供给消费端安全保障,包括煤炭质量与煤质安全、煤炭供给安全、煤炭清洁利用安全和低碳减排安全等,形成煤炭工业全产业链安全协同保障技术体系。构建国家级、煤炭企业集团级、煤矿、工业现场等 4 级架构,支撑煤炭行业探-建-产-选-运-销-用一体化产业监管与控制平台,实现煤炭产业链可管可控。

构建煤矿全地层高精度构造地质模型、巷道模型、采空区模型、地质属性模型等,构建地质预测预报信息化模型,对采掘范围内的主要灾害进行预测预报,采掘位置与致灾体空间三维距离关系,构建采掘空间三维立体预报体系,与矿井通讯系统联动,实时传输信息。前沿数字化技术与基础研究的结合,煤矿灾害防治正向着定量化精准化的阶段发展,利用数值仿真技术与大尺寸物理模拟实验的结合厘清灾害发生的机理,自主感知的监测设备和机器学习算法的融合应用将丰富工程尺度下数据质量的提升,全空间长时监测装备助力实现全维度信息的透明化,为灾害防治决策

提供全面、可靠的基础数据支撑,深度学习、大模型等前沿算法,将打通覆盖煤炭开发利用全生命周期的系统工程。

建立从煤矿、矿区、煤炭行业等3个维度安全体系,其中煤矿生产安全从煤矿综采、掘进、主运输、辅助运输、生产辅助、供配电、智能洗选、供配电等固定场景数据融合、协同管控与远程控制,实现无人少人则安。矿区级产业协同与矿井协同主要以“产-运-销”业务链为核心,以矿区级销售订单与产业需求,对各矿井生产与销售计划动态编排、跟踪与指标管控,从生产监督管理视角进行;行业级柔性生产监测体系,重点围绕区域性能源需求,进行能源生产调度管理,综合提升能源安全和产业安全协同保障水平。

3.3 绿色化主导传统产业深度转型

当前,能源绿色低碳转型引发了新一轮技术创新高潮,促使我国能源发展进入了“化石能源清洁化、清洁能源规模化、多种能源综合化”格局。煤炭工业绿色低碳发展应以煤炭资源安全、高效、高采出率开发为基础,以智能开发技术与装备为基本保障,以生态环境保护为约束,运用先进的科学技术与现代管理理念,构建和谐有序、协调一致、智能高效、绿色可持续发展的煤炭资源开发新格局,助力煤炭工业实现高质量发展。

3.3.1 矿区生态智能监测-预警-修复技术体系

围绕煤炭资源低损害智能开发前沿科学问题,系统研究煤炭开采“三场”时空演化规律、覆岩断裂及地表生态损害机理、透明地质与智能化开采基础理论、地表生态自修复机理、矿井水净化与离子交换机理、粉尘扩散与防控机理等,为煤炭资源安全智能绿色开发奠定理论基础。重点研发煤炭开采对地表生态环境损害机理及智能监测、预测、预警技术体系,突破低损害开采围岩控制理论难题;研发煤矿高精度地质探测技术与装备、复杂环境自动化扫描重构与全时空透明地质建模等技术,构建矿井地质透明、应力场透明、渗流场透明等透明地质技术体系;研发厚及特厚煤层安全高效智能开采技术与装备,突破多系统融合与智能协同管控技术瓶颈;研发构建矿井灾害智能监测预警与综合防治技术体系,开发低损害智能留巷与减量化智能充填技术装备,以及矿井水资源循环利用技术体系,形成煤矿采-选-充-复智能一体化开发模式;研发采空区碳封存、负碳开采等技术,实现开采过程的降碳、固碳;研究深部煤炭资源原位流态化开采技术体系,实现“地上无煤、井下无人”的深部煤炭资源流态化、智能化、无人化开采;研发露天矿源头减损与智能高效采-排-复一体化技术装备,提高露天矿智能高效开采绿色开采水平。

研究高强度开采沉陷区生态自修复机理,以及煤炭开采扰动区人工干预及自修复诱导促进技术与装备,有效减缓煤炭开发对地表生态破坏。研发矿区土地损伤修复智能监测技术与装备,开发基于多元物联网感知技术的矿区生态环境监测与治理系统,构建形成煤矿地质环境治理应用与生态重建技术体系。研发露天矿环境地质灾害智能协同监测预警与风险评估技术和装备,构建矿山地质灾害综合防控、生态环境修复等综合技术体系。研发煤基固废智能高效利用与采注协同智能开采技术,变废为宝,降低煤基固废对生态环境的破坏。研发井上下空气污染物“分源-分区-分级-分策”智能精准监测与高效协同防控方法,构建“人-机-环-管”四位一体的煤矿职业健康保障体系。

3.3.2 煤炭柔性开发与清洁低碳利用技术体系

目前,我国处于新旧能源交替转换的关键时期,煤炭作为我国能源安全稳定供给的压舱石与稳定器,煤炭需求与供给的剧烈波动对我国能源安全带来深远影响。发展以煤矿智能化技术支撑煤炭资源柔性开发的能源供给体系,有效消除因气候、突发政治事件等带来的能源波动冲击影响,以煤为基保障能源供需的动态平衡,提高能源供给的稳定性、可靠性与经济性。

针对煤炭清洁低碳利用技术难题,应研发高精度在线测灰仪、旋流场重介质精准分选、界面调控增强选择性浮选、煤炭智能干选、煤泥水高效固液分离等关键技术与装备,突破工艺参数和产品质量高精度在线检测及预测技术,开发选煤设备智能诊断、管控与决策系统,攻克一批基于精细化和智能化的煤炭分选加工共性关键技术,突破自适应原煤品质全流程智能控制、数字孪生运维等技术,构建煤炭生产、智能配煤、产品结构与成本利润模型,实现煤炭洗选管理流程化、洗选过程智能化、洗选运销柔性化。

着力突破灵活智能燃煤发电、高效清洁燃煤发电、新型动力循环燃煤发电等新技术,开发高低旁热电解耦高效适应性热调峰技术与深度电调峰技术,实现燃煤电厂热电灵活调节;研发大型燃煤电站自主化灵活高效智能控制系统,开发燃煤发电过程泛在状态感知体系、工业实时数据中台、工业智能计算引擎等,提高大型燃煤电站的智能化水平;研究燃煤污染物高效低成本深度控制与资源化回收技术、煤电机组混氨燃烧技术、汽轮发电机组性能优化与智能运行监控技术,实现燃煤发电的降本、降碳、提效。研究燃煤机组综合能源转型技术,开发“火电+”源网荷储一体化技术,构建风光火储一体化大型多能互补智能综合管控平台,提高能源利用率及促进可再生能源消纳。

对煤炭直接液化、间接液化、煤制烯烃产业链技术进行迭代升级,重点突破费托合成油中的 α -烯烃分离提纯技术、煤基特种燃料、高端聚烯烃、高端润滑油、高端碳素材料加工转化技术,实现煤化工产业链的延链、补链和强链。研发气固热载体双循环粉煤快速热解技术、高沥青质含量中低温煤焦油全馏分加氢技术、煤焦油全馏分加氢产物制环烷基油品技术,开辟低阶煤清洁高效转化利用新路径。研究煤炭转化过程中污染物控制及煤基固废资源化利用技术,探索现代煤化工与“光伏+制氢+储热+储能”一体化互补资源开发。

4 愿 景

以数字化智能化绿色化三化协同培育发展煤炭新质生产力,将为煤炭工业整体形象的提升带来根本性变革,彻底颠覆传统落后的生产面貌,未来煤炭将是呈现以下6个新特征的“煤”:

(1) 本质安全煤。煤炭新质生产力将保障煤炭工业的发展安全。一方面通过数字技术赋能、智能技术变革,实现煤炭生产各类灾害的精准定量防控,发展消灾无害化开发利用模式;另一方面,将更好统筹发展与安全的关系,确保能源安全、产业链安全。

(2) 开发高效煤。煤炭新质生产力将推动煤炭工业生产效率变革。提升从勘探—设计—建设—开发—洗选—运输—转化利用全产业链的效率和效益,释放先进生产力的科技效能。

(3) 低碳绿色煤。煤炭新质生产力将推动煤炭工业生产质量变革。环境友好型开发利用模式助力创建零碳减损矿区,同时实现开采利用的全流程的碳排放跟踪监测。

(4) 创新驱动煤。煤炭新质生产力将推动煤炭工业发展动力变革。由劳动密集型转变为技术密集型,抢占战略性新兴产业和未来产业竞争制高点,不断推动煤炭工业向价值链中高端发展,拓展高技术输出服务。

(5) 矿工幸福煤。煤炭新质生产力将提升煤炭从业者的获得感、幸福感、安全感。职业健康水平大幅改善,素质优良、规模充裕、结构优化、分布合理的新型劳动者队伍将成为新质生产力最重要的基础性核心支撑。

(6) 和谐文化煤。煤炭新质生产力将变革各生产单元传统的生产关系。通过管理创新、机制创新、文化创新,形成与新质生产力相适应的生产关系。

参考文献(References):

[1] 王显政. 关于建设现代化煤炭经济体系的思考[J]. 中国煤炭, 2018,

44(10): 5-8.

WANG Xianzheng. Consideration of building modernized coal economic system[J]. China Coal, 2018, 44(10): 5-8.

[2] 王显政. 坚持依靠科技创新 推动行业转型升级 促进煤炭工业健康协调可持续发展[J]. 中国煤炭工业, 2017(10): 4-9.

[3] 谢克昌. 面向 2035 年我国能源发展的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1-7.

XIE Kechang. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 1-7.

[4] 谢克昌. 因地制宜推进区域能源革命的战略思考和建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 1-6.

XIE Kechang. Strategic thinking and suggestions on promoting regional energy revolution based on local conditions[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 1-6.

[5] 谢克昌. “十四五”期间现代煤化工发展的几点思考[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(5): 1.

[6] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.

XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.

[7] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J/OL]. 煤炭学报, 1-11[2024-01-19] <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1091>.

XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon negative and efficient backfill mining in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 1-11[2024-01-19] <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1091>.

[8] 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): 5-10.

QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 5-10.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 许家林. 岩层控制与煤炭科学开采——记钱鸣高院士的学术思想和科研成就[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 1-6.

XU Jialin. Strata control and scientific coal mining—A celebration of the academic thoughts and achievements of Academician Minggao Qian[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 1-6.

[12] 彭苏萍, 毕银丽. 钱鸣高院士指导西部干旱半干旱煤矿区生态修复研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 857-860.

PENG Suping, BI Yinli. Academician Minggao Qian directed ecological restoration research of arid and semi arid coal mining areas in

- western China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 857–860.
- [13] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coamine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [14] 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.
- [15] 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 Jianguang, 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.
- [16] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14–20.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14–20.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59–79.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59–79.
- [20] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂ 地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45–60.
WANG Shuangming, SHEN yanjun, SUN qiang, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45–60.
- [21] 武强, 涂坤, 曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J]. 科学通报, 2023, 68(15): 1884–1898.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China’s energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884–1898.
- [22] 武强, 姚义, 赵颖旺, 等. 矿井突(透)水灾害过程中涉险人员危险性评价方法与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2357–2366.
WU Qiang, YAO Yi, ZHAO Yingwang, et al. An assessment of hazards to the risk-involved personnel in mine water disaster[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2357–2366.
- [23] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625–1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625–1636.
- [24] 岳光溪, 顾大钊. 煤炭清洁技术发展策略研究[J]. 国企管理, 2021(18): 18.
- [25] 岳光溪, 周大力, 田文龙, 等. 中国煤炭清洁燃烧技术路线图的初步探讨[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 74–79.
YUE Guangxi, ZHOU Dali, TIAN Wenlong, et al. Preliminary discussion on the technology roadmap of clean coal combustion in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 74–79.
- [26] 刘炯天, 朱书全, 张明旭, 等. 低品质煤大规模提质利用的基础研究[J]. 科技创新导报, 2016, 13(6): 173.
LIU Jiongtian, ZHU Shuquan, ZHANG Mingxu, et al. Basic research of large-scale quality improvement and utilization of low-quality coal[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(6): 173.
- [27] 刘中民. 现代煤化工是煤炭清洁高效利用重要途径[J]. 中国石油企业, 2023(6): 10.
- [28] 赵跃民, 张亚东, 周恩会, 等. 清洁高效干法选煤研究进展与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 607–616.
ZHAO Yuesmin, ZHANG Yadong, ZHOU Enhui, et al. Research progress and prospect of clean and efficient dry coal separation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 607–616.
- [29] 卞正富, 伍小杰, 周跃进, 等. 煤炭零碳开采技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2613–2625.
BIAN Zhengfu, WU Xiaojie, ZHOU Yuejin, et al. Coal mining technology with net zero carbon emission[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2613–2625.
- [30] 陈浮, 朱燕峰, 马静, 等. 东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2836–2849.
CHEN Fu, ZHU Yanfeng, MA Jing, et al. Cooperative remediation mechanism and key technologies for pollution reduction and carbon sequestration in coal mining subsidence areas of the eastern plain[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2836–2849.
- [31] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167–4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [32] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [33] 潘一山, 肖永惠, 罗浩, 等. 冲击地压矿井安全性研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1846–1860.

- PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846–1860.
- [34] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861–1874.
- QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861–1874.
- [35] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152–171.
- DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152–171.
- [36] 姜福兴, 杨光宇, 魏全德, 等. 煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 333–339.
- JIANG Fuxing, YANG Guangyu, WEI Quande, et al. Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time pre-warning platform[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 333–339.
- [37] 周福宝, 袁亮, 程卫民, 等. 矿井粉尘职业健康防护技术 2013—2023 年研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(12): 5–15.
- ZHOU Fubao, YUAN Liang, CHENG Weimin, et al. Research progress on occupational health protection technology of mine dust from 2013 to 2023[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(12): 5–15.
- [38] 周福宝, 康建宏, 王有湃, 等. 煤层瓦斯含量井下一站式自动化精准测定方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2873–2882.
- ZHOU Fubao, KANG Jianhong, WANG Youpai, et al. Method of underground integrated automatic and accurate determination of coalbed gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2873–2882.
- [39] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789–1800.
- KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789–1800.
- [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, 谢和平, 任世华, 等. 全球产业链与能源供应链重构背景下我国煤炭行业发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 26–37.
- KANG Hongpu, XIE Heping, REN Shihua, et al. Development Strategy of China's Coal Industry under the Reconstruction of Global Industrial Chain and Energy Supply Chain[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 26–37.
- [42] 王国法, 刘峰, 庞义辉, 等. 煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349–357.
- WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349–357.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925–1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [46] 葛世荣, 胡而已, 裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 455–463.
- GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455–463.
- [47] 葛世荣, 胡而已, 李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 54–73.
- GE Shirong, HU Eryi, LI Yunwang. New progress and direction of robot technology in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 54–73.
- [48] 葛世荣, 王兵, 冯豪豪, 等. 煤基能源动态碳中和模式及其保供降碳效益评估[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 122–135.
- GE Shirong, WANG Bing, FENG Hao hao, et al. Dynamic carbon neutrality mode for coal-based energy systems and effectiveness assessment thereof[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 122–135.
- [49] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1–15.
- LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1–15.
- [50] 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.