

煤炭工业数字化发展战略研究

康红普¹, 任世华^{2*}, 王保强¹, 陈佩佩¹, 郑德志², 庞义辉¹, 张亚宁²,
陈茜³, 刘跃东¹, 焦小淼²

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013;
3. 中国科协创新战略研究院, 北京 100038)

摘要: 煤炭是我国能源体系的“压舱石”, 在加快发展数字经济、积极稳妥推进“双碳”目标的形势下, 构建煤炭工业数字化发展新优势, 对加快新旧动能转换、推动高质量发展具有重要意义。本文界定了煤炭工业数字化的内涵, 明确了煤炭工业数字经济分类, 首次测算了我国煤炭工业数字经济规模; 系统梳理了煤炭工业数字化发展的现状和基础条件, 凝练了制约煤炭工业数字化发展的认识理念、基础设施、人才队伍、核心技术等方面的迫切问题。在此基础上, 描绘了煤炭工业数字化发展的战略目标, 阐明了包括筑牢煤炭数字化基础设施能力、强化煤炭数字化人才支撑、增强煤炭工业数字化两大关键能力、优化煤炭工业数字化两个发展环境在内的煤炭工业数字化发展战略路径, 研判了煤炭工业数字化发展的重点发展方向、全产业链需求技术、关键单项技术。研究建议, 从建立数据管理机构及平台、组建煤炭数字化技术实验室、提升数据共享及价值挖掘能力、建设煤炭数字化人才培养基地等方面出发, 构建煤炭工业数字化发展的坚实支撑。

关键词: 煤炭工业; 数字化; 数字经济; 煤炭数字化技术

中图分类号: R-1 **文献标识码:** A

Digital Development Strategy of Coal Industry

Kang Hongpu¹, Ren Shihua^{2*}, Wang Baoqiang¹, Chen Peipei¹, Zheng Dezhi², Pang Yihui¹,
Zhang Yaning², Chen Qian³, Liu Yuedong¹, Jiao Xiaomiao²

(1. China Coal Technology & Engineering Group, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute Co., Ltd.,
Beijing 100013, China; 3. National Academy of Innovation Strategy, Beijing 100038, China)

Abstract: Coal is vital for the energy system of China. As the digital economy develops rapidly in China and in the context of carbon peaking and carbon neutrality, promoting the digital development of the coal industry becomes crucial for the industrial upgrade and high-quality development of the industry. This study defines the digitalization of the coal industry, clarifies the digital economy in the coal industry, and for the first time calculates the scale of digital economy in China's coal industry. The basic conditions for the digital development of the coal industry are sorted out, and the urgent issues that constrain the digital development of the industry, such as concept understanding, infrastructure, talent teams, and core technologies, are summarized. On this basis, strategic goals are proposed, and a strategic path is elucidated from the aspects of digital infrastructure, skilled personnel, key capabilities, and development environment. The key development directions, technologies for the entire industry chain, and key technologies for the digital development of the coal industry are emphasized. Furthermore, the following policy recommendations are proposed to build a solid

收稿日期: 2023-10-24; **修回日期:** 2023-12-16

通讯作者: *任世华, 煤炭科学研究总院有限公司研究员, 研究方向为煤炭相关技术经济评价、能源战略; E-mail: ren@cct.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“煤炭与伴生能源资源一体化绿色开发战略研究”(2023-XZ-19), “煤炭工业数字化发展战略研究”(2022-XZ-28), “煤炭与新能源融合发展战略与路径”(2023-XZ-22)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

support for the digital development of the coal industry: (1) establishing data management institutions and platforms, (2) establishing laboratories for developing coal-related digital technologies, (3) enhancing the data sharing and value mining capabilities of the industry, and (4) building training bases to cultivate skilled personnel for the digital development of the coal industry.

Keywords: coal industry; digitization; digital economy; digital technology of coal

一、前言

全球性的数字化浪潮正在兴起,世界各国进入了以信息产业为主导的新经济发展时期。我国“十四五”规划纲要提出,加快数字化发展,建设数字中国,加速推进数字化发展进程;31个省份发布了省级数字化转型发展规划,以全面推进信息技术在经济社会各领域的应用。2022年,我国数字经济规模为50.2万亿元,居世界第二位,在国内生产总值(GDP)中的占比提升至41.5%^[1]。

煤炭是我国能源体系的“压舱石”^[2],在未来相当长的时间内煤炭需求量将保持在 $3.5 \times 10^9 \sim 4.5 \times 10^9$ t/a^[3]。在加快发展数字经济、积极稳妥推进“双碳”目标的形势下,抢抓数字经济发展机遇,推进煤炭数字化升级转型,构建数字经济与煤炭工业深度融合发展新格局,形成煤炭工业数字化发展新优势^[4],对加快新旧动能转换、推动煤炭工业高质量发展^[5]具有重要意义。一方面,数字化是实现煤炭工业自身高质量发展的迫切要求。煤炭工业安全生产形势依然严峻,智能绿色开发水平不高,对生态环境损害严重等问题依然存在,亟需以数字化为依托,推进自身安全绿色高质量发展。另一方面,安全高效、清洁低碳的新型能源体系和智慧能源系统建设,迫切要求煤炭工业数字化,完善煤炭数字化基础设施建设并与数字技术融合,促进煤炭领域与新能源、可再生能源的协同发展。

我国煤炭工业数字化的相关研究已有开展,集中在煤炭工业“两化”融合、煤炭企业数字化升级转型、煤矿智能化等方面。“两化”融合为煤炭工业数字化发展确立了重要基础,在组织管理体系、基础设施水平、系统建设应用、产业链协同水平等方面取得了成效^[6-8];煤炭工业“两化”融合水平达到我国工业行业的平均水平,进一步明确了新时期煤炭工业“两化”融合的核心任务^[9]。针对煤炭企业,侧重从顶层设计、体制机制、数据集成、网络安全、基础研究与应用等方面出发,分析数字化升级转型的现状与问题^[10,11],探讨数字化升级转型的方向、任务及趋势^[12,13]。煤矿智能化建设是煤炭工

业数字化发展的重要内容^[14],近年来我国相关研究提速^[15],在基础理论体系、关键技术研发与应用方面取得了重大进展^[16];但整体处于初级阶段或培育示范阶段,受到理念、制度、技术、装备、人才等因素的制约,面临多重挑战。

本文界定煤炭工业数字化的内涵,测算煤炭工业数字经济规模,进而厘清煤炭工业数字化发展现状并辨识面临的瓶颈与挑战;系统提出煤炭工业数字化发展战略,深入研判煤炭工业数字化发展的系列关键技术,以期对煤炭工业数字化发展研究与工程建设提供借鉴和参考。

二、煤炭工业数字化的内涵与数字经济规模测算

(一) 煤炭工业数字化的内涵

面向数字经济加速发展、“双碳”目标积极稳妥推进等新形势,结合我国煤炭工业自身特点及实际情况,借鉴国内外其他行业数字化发展经验,本研究将煤炭工业数字化的内涵界定为:以数据要素创新驱动为核心,煤矿信息化、网络化建设为基础,运用新一代信息技术、数字技术变革煤炭资源的开发与利用方式,优化重构煤炭企业的业务流程与组织管理模式,提升煤炭工业治理体系和能力;实现煤炭“产、运、储、销、用”全产业链,煤炭工业、企业、煤矿各层级,煤炭资产、技术、人才全要素的数字化升级转型,构建柔性协同的煤炭生产供应体系,推动煤炭工业“安全高效、智能绿色、清洁低碳”高质量发展^[17]。

(二) 煤炭工业数字经济的分类与规模测算

煤炭工业数字经济立足煤炭产业数字化基础条件,以数据资源、现代信息网络、信息通信技术推动煤炭领域经济活动的效率提升和结构优化。依据国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》,结合我国煤炭工业实际发展情况,界定煤炭工业数字经济的产业范围,具体分为煤炭产业数字化、煤炭数字产业化两部分。①煤炭产业

数字化指在新一代数字科技的支撑和驱动下，以数据为关键要素、价值释放为核心、数据赋能为主线，对煤炭产业链上的全要素进行数字化升级、转型、再造的过程；主要表现为数字化效率提升，涵盖数字采矿、煤机装备智能制造、煤炭智慧物流、煤炭智慧仓储等产业方向。②煤炭数字产业化指为煤炭产业数字化发展提供数字技术、产品、服务、基础设施和解决方案，以及完全依赖于数字技术、数据要素的各类经济活动。包括数字产品制造业、数字产品服务业、数字技术应用业、数字要素驱动业4类细分产业，涵盖煤炭电商平台、煤炭应用软件开发及信息技术服务、井下智能设备制造等产业方向。

目前，我国煤炭工业数字经济规模的系统测算研究未见报道。本研究根据《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》并结合煤炭工业发展实际，将煤炭工业数字经济规模划分为煤炭产业数字化规模、煤炭数字产业化规模（见表1）：前者以智能化煤矿营收、现代煤化工营收、煤机装备智能制造营收之和进行测算；后者以煤炭信息技术产业营收进行测算。以2021年为研究年，我国煤炭工业数字经济规模的测算值约为7715亿元，约占煤炭工业总产值（以煤炭开采与洗选、煤机装备制造、煤化工营收之和估算）的15.2%。其中，煤炭产业数字化规模占据着主导地位，在煤炭工业数字经济规模中的占比约为96%。对照2021年我国数字经济总体规模（45.5万亿元、39.8%的GDP占比），煤炭工业数字经济规模及占比整体偏低，煤炭工业数字化发展任重而道远。

三、煤炭工业数字化发展的现状与基础

（一）数字化基础设施逐步建设和推广

近年来，煤炭工业加速推进“两化”融合，把握“新基建”发展机遇，大范围开展数据中心、

表1 煤炭工业数字经济规模测算值

类别	测算项目	规模/亿元
产业数字化规模	智能化煤矿营收	4038
	现代煤化工营收	3058
	煤机装备智能制造营收	313
数字产业化规模	煤炭信息技术产业营收	306
合计		7715

工业以太环网、第四代移动通信（4G）网等信息化基础设施的建设和推广，初步满足了信息化发展需求。各大煤炭集团推进企业“一朵云”建设，积极升级新型数据中心并提升网络安全防护能力，网络核心设备的国产化率、网络安全软件使用的国产化率分别提升至92%、97%（由20家大型煤炭集团总部的统计值平均而得）。各类煤矿普遍将工业以太环网的速率从百兆、千兆升级为万兆甚至十万兆，满足了海量数据传输、存储、应用的新要求。井下无线通信系统由原来的小灵通、第三代移动通信（3G）、4G等网络逐步升级到第五代移动通信（5G）、第六代无线网络技术（Wi-Fi 6）、第五代固定网络（F5G）等的融合组网；井下人员定位系统逐渐从射频识别区间定位升级至超宽带亚米级精准定位。

（二）数字化技术加快场景融合应用

5G、大数据、区块链等信息技术加速与煤炭工业各场景的融合应用。目前，5G组网应用已在全国百余个煤矿实施，采掘工作面远程控制、全景视频拼接、智能巡检、露天煤矿自动驾驶等场景下的创新应用也在持续深化。矿山领域首个工业互联网操作系统“矿鸿”已在各大煤炭集团开展推广应用，支持破除数据壁垒。自动驾驶技术在露天煤矿率先实现常态化应用，井工煤矿无人驾驶正在多个矿区测试运行。人工智能（AI）技术已在煤矿100多个细分作业场景中开展实际应用，31种煤矿机器人在370余处矿井中获得现场应用。

（三）煤炭企业加速推进数字化升级转型

煤炭企业整合优势资源，加快利用数字技术开展全方位、多角度、全链条的企业能力改造，将数字经济、数字技术提升至企业未来发展的重要产业板块位置。煤炭央企在数字化升级转型中发挥了引领作用，国家能源投资集团有限责任公司、中国中煤能源集团有限公司、中国煤炭科工集团有限公司等企业具备良好的信息化基础条件，也对数字化升级转型有着较为深刻的认识；强化顶层设计、加大创新与应用力度，持续推进生产、运营、管理的数字化升级转型。此外，山西、河北等省份的地方煤炭企业也在加快建设“能源云”“两地三中心”等数字化项目，积极推进企业的数字化升级转型。

(四) 煤矿智能化建设进入快速发展阶段

智能化煤矿建设是煤炭工业数字化发展的重要组成部分。《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》(2020年)发布后,全国煤矿智能化建设进一步加速。数次召开全国煤矿智能化建设推进会,发布《煤矿智能化建设指南(2021年版)》《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》(2021年)等管理指南,开展首批国家级智能化示范煤矿建设。此外,14个省份发布了有关煤炭智能化建设的地方性指导文件。得益于政策、资金、项目的支持,煤矿智能化标准体系和框架初步建立,国家、行业、团体等层面的标准陆续颁布,一批核心技术装备研发与应用实现重大突破。2023年6月,全国累计建成的智能化采掘工作面超过1300处^[18]。薄煤层、中厚煤层、特厚煤层的综采和综放开采都有良好的应用案例,形成了黄陵智能化煤矿,老矿区复杂条件智能煤矿,蒙、陕、晋千万吨级高强开采智能化煤矿等建设模式,标志着我国煤矿智能化建设进入快速发展期^[19]。

(五) 煤炭工业信息技术产业规模逐步壮大

新一代信息技术、数字技术加速应用于煤炭工业各类场景,煤炭信息技术产业从无到有、逐步壮大,初步形成了包括各类硬件设备、操作系统、工业互联网平台、软件/移动应用服务等在内,较为完整的信息技术产业生态体系。2021年,煤炭信息技术产业营收同比增长30.7%,利润、研发投入分别同比增长48.3%、39.15%;煤炭企业创立的信息技术企业也在发展壮大,年营收过亿元的企业超过30家,过10亿元的增至3家^[20,21]。随着煤炭企业数字化升级转型、煤矿智能化建设加快推进,煤炭信息技术产业规模仍有拓展壮大的空间,未来市场潜力突出。

四、煤炭工业数字化发展的问题与挑战

(一) 认识理念上仍存在怀疑态度和保守思维

煤炭工业数字化是一项逐步迭代、复杂艰巨、长期持续的系统工程,具有投入大、成本高、见效慢的特点。部分煤炭企业未能充分认识到数字化是行业发展的必然趋势,也缺乏顶层规划以及长期投入的决心和耐心,存在着怀疑态度、保守思维、畏难情绪、消极心理。当前,与大部分传统能源企业

一样,煤炭企业向数字化升级转型整体处于起步阶段,多数企业停留在试点阶段;规模化推广有待开展,“不会转”“不敢转”的问题较为突出。

(二) 数字化基础设施仍待完善升级

数字化发展对煤炭工业提出了超宽带、安全、大数据、AI等方面的数字化基础能力要求,而传统信息化基础设施的网络能力、运算能力已很难满足煤炭工业数字化发展的需求。面向数字化升级转型的基础设施顶层设计缺乏,各类系统相互隔离,不能满足生产精益化、柔性化,决策科学化发展需求^[22]。网络性能、覆盖及数据治理能力不强,部分煤矿的带宽不足,视频监控、瓦斯监控等环境感知设施不充分;类型繁多的异构数据导致生产、经营等方面的业务流程难以贯通,甚至出现数据“采而无用”等问题。部分煤炭企业缺乏必要的网络安全管控设施,未达到信息安全动态感知、主动防御、网络安全等级保护要求。

(三) 人才队伍难以适应数字化升级转型要求

数字化升级转型不只是技术转型,实质上是人才队伍的转型。人才队伍是数字化发展的第一要素。煤炭工业不仅缺乏掌握AI、大数据等的数字技术人才,而且缺乏懂技术、懂业务的高端复合型人才;企业高层的认识理念、各级管理人员的知识结构、基层生产人员的素养与技能,都与数字化驱动的行业发展改革趋势不相匹配。按照煤炭行业的普遍认识,煤矿采掘一线工人80%以上的学历在专科以下,具有高级技师、技师等级证书的工人占比不足3%,一线管理人员中具有高级技术职务的比例仅为1.5%。伴随着全行业的数字化推进,煤炭工业数字化人才的缺口将进一步扩大,更加广泛的数字化人才培养工作迫在眉睫。

(四) 关键核心技术未能充分支撑行业发展

煤炭工业特色关键技术存在研发难度大、进度滞后、融合应用水平偏低的突出问题,尚未真正形成数字化成套技术供给能力,制约着数字技术与煤炭工业的深度融合。除了少量的优势煤炭企业,多数煤炭企业的数字技术应用仍处于初级形态,数字技术对关键核心生产环节的赋能作用较弱,应用数字技术挖掘生产潜力的预期难以实现。例如,山西省已有24座煤矿实现“5G下井”,多为高清视频传

输、远程控制等“简单”场景应用，而复杂且更具生产价值的应用场景仍待挖掘。

五、煤炭工业数字化发展的战略目标与路径

（一）战略目标

顺应经济社会数字化发展的重大趋势，推动煤炭工业与数字经济深度融合发展：煤矿成为安全智能的“煤炭数字化生产车间”，煤炭企业成为创新高效的“煤矿数字化管理平台”，煤炭工业成为柔性协同的“煤炭产品数字化供应系统”，支撑建设国家新型能源体系。

煤炭工业加快全方位数字化升级转型，不断壮大煤炭数字经济规模，实现安全高效、智能绿色、清洁低碳发展，增强能源安全供给能力。以《数字中国建设整体布局规划》（2023年）、《“十四五”数字经济发展规划》（2022年）等为行动指引，把握能源数字化、智慧能源系统发展形势，筑牢煤炭数字化基础设施条件，强化煤炭数字化人才支撑，增强煤炭数字化关键技术能力，优化煤炭数字发展环境，赋能煤炭工业、企业、煤矿的数字化升级转型。

煤炭工业数字化发展可采取“三步走”。①煤炭工业数字化2.0。到2025年，国家级智能化煤矿（示范煤矿）产能占比达到20%，煤炭数字经济规模在煤炭工业总产值中的占比达到20%，大型煤炭企业的原煤生产人员效率突破10 t/工，百万吨死亡率降低至0.05以下。②煤炭工业数字化3.0。到2035年，具有国家级智能化煤矿水平的煤炭产能占比达到50%，煤炭数字经济规模在煤炭工业总产值中的占比达到50%，大型煤炭企业的原煤生产人员效率超过20 t/工，百万吨死亡率降低至0.04以下。③煤炭工业数字化4.0。到2050年，煤炭工业数据资源共享机制建成，具有国家级智能化煤矿水平的煤炭产能占比达到100%，煤炭数字经济规模在煤炭工业总产值中的占比达到80%，煤矿安全生产实现“零伤亡”。

（二）战略路径

1. 筑牢煤炭数字化基础设施能力

加快煤炭工业“新基建”发展，提高数字基础设施保障能力。推进智能传感器、环境感知终端、视频监控设备等智能终端在煤炭工业的大规模应用，全面提高基础设施的感知能力。因地制宜并适

度超前，开展煤矿专用数据网、高速工业环网、物联网建设，提高5G网络建设和应用水平，增强常态数据采集、应急通信快速组网能力。针对井下应用场景，推动无线公网通信融合应用，支撑终端装备、各类能源数据大规模接入无线公网，构建煤矿融合泛在的通信网络。

2. 强化煤炭数字化人才支撑

自主培养与外部引进并重，扩大煤炭与数字技术兼具的高技术人才，懂技术、懂业务的高端管理人才的规模；配套人才激励机制与持续性培养模式，提升煤炭工业数字化发展的人才支撑能力。支持煤炭企业与高校、技术服务企业共建培养基地，持续开展员工分级分类培训，整体性提高煤炭行业的数字理论知识和应用技能水平^[23]。鼓励煤炭相关的高校、职业技能学院优化学科建设方向，增设数字化工科专业，批量化培养复合型人才、实用技能型人才。

3. 增强煤炭工业数字化两大关键能力

一是加快数字化技术融合创新。在煤炭勘查设计、开发、转化利用的过程中，凝练并形成数字化技术与各类场景的融合应用。突破数字化相关的共性关键技术，提升煤炭智能装备的国产化和成套化水平，重点研发精准地质探测、智能快速掘进、复杂条件智能综采、重大危险源智能监测预警等技术装备。加快煤矿智能化建设，开展开发工艺和装备智能化升级，推动固定场所无人值守、危险岗位机器人替代、各重要环节智能化联动。建立智能柔性供应技术体系，显著增强柔性供应能力。

二是强化网络与信息安全保障。将网络与信息安全置于数字化升级转型工作中的突出位置，强化信息安全防护体系，构建覆盖煤矿业务全生命周期的“预警-监测-响应”动态防御体系。①重要信息系统实行安全等级保护，提升重要领域、基础网络、重要系统的安全防护水平。②建设网络与信息安全、安全灾备等设施，推广使用国产软件，逐步实现国产化替代，提高核心技术和核心设备的自主化水平。③应用数据加密传输等技术，提升能源数据通信网络的安全水平。

4. 优化煤炭工业数字化两个发展环境

一是构建数字产业生态。①加强数据治理和数据挖掘，发展煤炭地质灾害、生产安全、绿色低碳、经营管控、风险防控等关键领域中的大数据算法和模型，解决煤炭企业数据“采而无用”问题；构建

合作机制,形成煤炭企业之间、关联行业之间的数据资源共享机制。②建立覆盖企业、行业、跨行业级的多层次工业互联网平台,整合和利用各类数据中心、平台资源,建立煤炭工业数据资源共享机制。

二是构建开放共赢的合作格局。①推动煤炭工业开放并融合外部资源,打破产业链上不同层级、涉及不同行业的数据壁垒,实现跨部门、跨行业、跨区域的深度融合,形成良好发展生态;以数据流贯通煤炭生产、运输、储备、贸易、利用等环节,促进业务流程、管理机制、商业模式、应用范式的协同和全面优化。②建立生态伙伴协同发展机制。组建煤炭工业信息技术产业板块,推动煤炭企业集团下属信息技术企业与其他领域的信息通信技术企业开展灵活且深入的合资及合作,鼓励优势煤炭企业将内部数字基础设施、装备、软件等拓展服务于外部市场;加快区块链等数字技术的工程应用,开展煤炭数据交易、征信等服务。

六、煤炭工业数字化发展的关键技术研判

(一) 重点发展方向

1. 研发应用数字化技术装备

以集成产品开发、产品生命周期管理为依托,优化研发流程,提高技术装备研发效率,实现产品、技术装备研发转向数字化、平台化协同;积极发展AI、区块链等信息技术与煤炭工业相结合的技术装备。建设煤炭洗选、利用、煤机制造等环节的数字化、智能化车间/工厂/厂区,提升煤机装备的智能制造水平。

2. 推进设计与运行数字化

应用建筑信息模型(BIM)+地理信息系统(GIS)、5G、大数据等数字化技术,建立三维矿山信息模型、三维协同设计平台,提升勘察、设计、建设、运营等环节的信息共享和业务协同能力;推动工程数字化管理、数字化交付,实现运行管理的数字化和智能化。在开采运营阶段,应用5G+万兆工业环网等技术,实现煤矿数据的高效采集和传输;基于虚拟仿真技术进行开采模拟,提高矿井的抗灾和防灾能力;采用数字控制、大数据分析、云计算等技术,增强相关设备的自主学习和决策支持能力,实现智能化、无人或少人化开采。通过数字化、信息化技术运用,实现煤矿全生命周期的生产运营管理。

3. 构建行业数字化发展生态

聚集煤炭行业协会、科研机构、企业、高校的优势资源,按照平等互利、合作共赢的理念建设技术创新应用共同体,形成联合攻关、协同创新的应用生态。共建共享以信息与通信技术为基础的煤炭工业互联网平台、行业大数据中心,形成煤炭工业数据资产,引导行业规范化发展。构建研发、营销、交付、服务等环节的煤炭工业数字化生态,推动产业内上、下游的数字化升级转型。

(二) 全产业链需求技术

1. 煤炭勘查设计数字化技术

研究煤矿地质高精度地震探测、井下复杂环境自动化扫描重构、围岩稳定性动态监测、大数据分析等技术,开发矿井多源异构数据融合、信息动态关联、复杂条件地质几何建模、煤矿全空间地学信息等系统。研发井下复杂环境多物理场(含复合动力灾害、地下水、岩体、瓦斯、粉尘、温度、有害气体)自适应感知技术,发展地质属性信息时空演化的实时融合分析、隐蔽灾害可视化能力。开发面向智能开采的“透明矿井”核心软件平台,实现煤炭资源动态管理、开发过程追溯、灾害监测预警、应急辅助决策等功能。基于绿色智能煤矿标准,研发矿井数字化勘察设计技术,采用BIM、GIS等技术并融合虚拟现实方法进行矿井设计,将以往独立设计的矿井各系统进行集成,实现矿井勘查设计的数字化。

2. 煤炭安全智能开采数字化技术

深化冲击地压、强矿压、水、火、瓦斯、有毒有害气体监测预警与综合防治技术研究,发展覆岩破坏及顶板来压预警分析技术,建立覆岩运移破坏可视化监测系统。开发工作面顶板灾害监控预警平台,构建“一通三防”系统监测、智能预警及诊断系统。研制供电系统电能大数据分析与远程监测集控、灾害风险智能分级预警管控等技术装备,提升矿井生产安全保障能力。研制适应不同赋存条件的智能化开采技术装备,具有精确定位、自适应截割能力的快速掘进与全自动支护技术及装备。研发智能化临时支护装置,开展多功能掘进机的整机布局与结构优化,运用运输系统集群分布式协同联动控制技术,建立运输全流程无人化协同作业系统。集成露天无人驾驶、车联网、电(氢)能源驱动、车辆自导航及定位等技术,开发智能化调度分配系

统，提高煤矿智能化装备应用水平。

3. 煤炭柔性灵活供给数字化技术

将数字技术与煤炭运输、储备、销售进行深度融合，构建紧密衔接主产煤地、中转地、大型集团的“产供需”管理和调度平台，如煤炭智慧物流网络系统、全国煤炭“产供储销”数据平台、煤炭储备信息数字调度系统、煤炭交易数字化系统等。构建煤炭灵活柔性供给体系，增强应急储备资源的调度能力。

4. 煤机装备智能制造数字化技术

加快煤机装备智能制造工艺创新和系统优化，推进智能车间、工厂、厂区建设^[24]。研发智能制造数字化系统，同步推动基础网络建设，为煤机智能制造提供网络基础保障。利用数字技术驱动服务业、煤机装备制造业的深度融合，催生煤炭工业发展的新模式、新业态，推动煤炭工业装备制造由单纯提供产品转向提供包括产品、服务在内的一体化解决方案，系统集成总承包能力。

5. 煤炭清洁高效利用数字化技术

发展煤炭洗选全流程智能控制、数字孪生运维等技术，形成相应技术工艺及装备^[25]。研发基于数字化的高效率、低排放煤基发电技术，提高先进高参数燃煤发电技术水平。基于数字化手段改进地下原位煤气化、气化热解/气化燃烧一体化、低阶煤分质利用、煤基产品新工艺等技术，提升煤化工数字化水平。

（三）关键单项技术

1. 数字地质勘查与勘探技术

发展数字地质遥感、高速无线数据传输航空电磁、智能化地震采集、智能化地震处理及解释等技术，支持实现矿产资源勘查区地质结构、生态环境及其演化过程的可视化、透明化，以及勘查数据采集、管理、处理、传输、模型构建、预测评价、决策分析、服务应用的全过程数字化、可视化、智能化。

2. 智能开采技术与装备

发展快速智能掘进成套技术装备，复杂困难地质条件下的综采、综放智能自适应协同开采关键技术与装备^[26]，提升综采设备精准定位与导航、智能自适应液压支架、智能采煤机、煤矿井下机器人等的智能化水平。部署智能化煤机装备智能制造技术、煤矿生产决策智能化管控系统应用，实现煤机

装备制造过程与应用场景的智能化。

3. 安全高效开采地质保障技术

构建综采（掘）工作面探测信息大数据分析平台，发展综采（掘）工作面采动应力定量探测技术与装备、煤矿井下智能钻探技术与装备、矿井四维GIS综合探测与应用系统、矿井地质信息时空状态数据库技术、综采（掘）工作面地质信息综合管理系统、透明综采（掘）工作面三维地质动态模型技术等，实现地质数据与工程数据的融合共享，为采掘机运通各业务系统提供统一的资源地图支撑。

4. 煤炭精准智能洗选加工技术

发展煤炭精准分选技术工艺及装备，旋流场重介质精准分选、智能干选技术与装备，工艺参数及产品质量高精度在线检测预测技术，精细化、智能化煤炭分选加工共性关键技术等，实现煤炭洗选过程的常态化无人值守作业。

5. 燃煤与可再生能源耦合发电技术

研究基于数字化的煤炭与风、光等可再生能源深度耦合发电、制氢、化工转化技术，推广应用煤矿区煤电与光伏发电、风电、水电智能协同，采煤沉陷区治理与光伏发电融合等技术，推动煤炭、煤电与新能源的优化组合，全面提升能源供给的柔性韧性。

6. 井下流态化开采与转化一体化技术

发展基于数字化的深部原位流态化开采的地质保障、精准导航、智能开拓布局、智能化分选等技术，构建深部原位一体化流态化开采、无人化智能输送与提升等技术装备体系^[27]。突破深部原位能量诱导物理破碎流态化开采、化学转化流态化开采、生物降解流态化开采、富油煤原位热解发电、煤粉爆燃发电等前沿技术，革新固体资源开采模式，实现井下无人智能化采、选、充以及热、电、气转化的流态化开采。

7. 基于数字化的煤矿区碳减排技术

发展基于数字化的煤矿区碳排放监测技术，开发适用于商业规模的高效率、高通量、紧凑型大型CO₂分离数控设备。研发CO₂矿化封存及配方信息化仿真应用技术、CO₂矿化发电颠覆性技术、数字化的CO₂驱替煤层气技术，以数字化技术赋能煤炭开发利用过程中的碳补集、利用与封存。

8. 煤炭及共伴生资源智能协同开发技术

研发煤炭与典型共伴生资源一体化智能开发的成套工艺与装备，构建煤系共伴生金属/非金属固体矿产资源智能协调开采方法与技术体系，突破深

部煤系“三气”综合智能开发、矿区煤层气分布式智能高效利用等技术，推进煤炭与伴生能源资源一体化智能开发。

七、煤炭工业数字化发展建议

(一) 建立煤炭工业数据统一管理机构和平台

建议设立煤炭数据管理机构，统筹煤炭工业数据管理工作，协调推进煤炭工业数据基础制度建设，研究制定煤炭工业数字化顶层设计，组织建设煤炭工业数字化平台等。建立煤炭工业大数据平台，积累和挖掘煤炭勘探、开发、运输、储备、销售、利用等产业链上全要素、全生命周期的数据信息，应用大数据技术开展分析以赋能行业发展。近实时化地掌握煤炭供需态势，精准响应煤炭消费需求变化并开展柔性供给，构建兼具稳定性和灵活度的煤炭供应链。

(二) 组建国家级煤炭数字化技术创新实验室

发挥优势煤炭企业的骨干和带动作用，建设国家级煤炭数字化技术创新实验室。保障科技资源投入，深化煤炭数字化基础理论与技术应用研究，侧重技术突破与融合应用，创新煤炭特色场景下的共性技术。着力解决“卡脖子”技术环节，在AI、大数据、区块链、工业控制安全、机器人、数字孪生等方向开展特色化、定制化研发，提升煤炭工业专用的单机装备、电子元器件、基础软件的国产化水平。

(三) 提升煤炭数据共享及价值挖掘能力

按照国家大数据战略的整体部署，支持企业健全和完善煤炭数据采集的管理机制及标准体系，以煤炭数据资源高质量共享来提升煤炭商业数据开发利用水平。强化煤炭企业数字治理体系和能力建设，形成数据资产目录，提升煤炭数据资源规模和质量；支持市场主体依法合规采集煤炭流通、交易、监测诊断等的的数据，培育和壮大煤炭数据服务业务。

(四) 建设国家级煤炭数字化人才培养基地

加强传统矿业学科与现代信息技术学科的交叉融合，探索煤炭工业数字化管理和技术人才的分级体系建设，规模化培养煤炭工业高素质人才，建成国家级煤炭数字化人才培养基地。分领域、分层级

开展煤炭工业数字技能提升专项培训，提高广泛运用数字技术的能力水平。将数字人才培养与煤炭工业转型升级计划、国家中长期煤炭科技发展规划、有关重大工程项目实施相结合，壮大“数字采矿”高端复合型专业人才队伍。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 24, 2023; **Revised date:** December 16, 2023

Corresponding author: Ren Shihua is a research fellow from China Coal Research Institute Co., Ltd. His major research fields include the economic evaluation of coal technologies and energy strategies. E-mail: ren@cct.org.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Integrated Green Development Strategy of Coal and Coassociated Energy Resources” (2023-XZ-19), “Research on the Digital Development Strategy of Coal Industry” (2022-XZ-28), “Coal and New Energy Integration Development Strategy and Path” (2023-XZ-22)

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家互联网信息办公室. 数字中国发展报告 (2022年) [R]. 北京: 中华人民共和国国家互联网信息办公室, 2023.
Cyberspace Administration of China. Digital China development report (2022) [R]. Beijing: Cyberspace Administration of China, 2023.
- [2] 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 H P, Xie H P, Ren S H, 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.
- [3] 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 H P, Ren S H, Xie Y C, 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.
- [4] 余娜. 头部厂商补短板 煤企数字化转型提速 [N]. 中国工业报, 2023-10-17 (07).
Yu N. Head manufacturers make up for shortcomings, digital transformation of coal companies speeds up [N]. China Industry News, 2023-10-17 (07).
- [5] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130–138.
Kang H P, Wang G F, Wang S M, et al. High-quality development of China's coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130–138.
- [6] 王虹桥, 王丹识. 提升两化融合水平 推动煤炭工业高质量发展 [J]. 智能矿山, 2021, 2(1): 10.
Wang H Q, Wang D S. Improve the level of integration of indus-

- trialization and informatization and promote the high-quality development of coal industry [J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 10.
- [7] 包兴. 煤炭行业两化融合发展现状和趋势分析 [J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(7): 74–78.
Bao X. Analysis on the status and trend of the integration of informatization and industrialization in the coal industry [J]. Coal Economic Research, 2019, 39(7): 74–78.
- [8] 陈养才. 深入推进两化融合 促进煤炭工业转型升级 [J]. 中国煤炭工业, 2018 (6): 8–12.
Chen Y C. Deepen the integration of industrialization and industrialization and promote the transformation and upgrading of coal industry [J]. China Coal Industry, 2018 (6): 8–12.
- [9] 张翔. 拥抱“数字化”, 煤企转型的机遇与选择 [N]. 中国煤炭报, 2021-11-04 (03).
Zhang X. Embracing digitalization, opportunities and options for transformation of coal enterprises [N]. China Coal News, 2021-11-04 (03).
- [10] 王丹识, 王荣博. 煤炭企业数字化转型现状、问题研究及建议 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(12): 7–11.
Wang D S, Wang R B. Current situation and problems research and suggestions of digital transformation of coal enterprises [J]. China Coal, 2021, 47(12): 7–11.
- [11] 张翔. 数字化转型, 带给煤炭多少想象空间 [N]. 中国煤炭报, 2021-09-04 (03).
Zhang X. How much imagination does digital transformation bring to coal [N]. China Coal News, 2021-09-04 (03).
- [12] 牛克洪, 牛天勇, 刘名字. 基于创新趋势研判方法的煤炭产业发展走势研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(3): 11–15.
Niu K H, Niu T Y, Liu M Y. Research on the development trend of coal industry based on innovative trend research and judgment method [J]. China Coal, 2023, 49(3): 11–15.
- [13] 刘虹. 加快煤炭数字转型 开创未来发展之路 [J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(9): 1.
Liu H. Accelerating the digital transformation of coal, creating the road of future development [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(9): 1.
- [14] 胡善亭. 数字化转型引领煤炭行业科技进步 打造智慧矿山排头兵 [J]. 企业观察家, 2021 (3): 90–91.
Hu S T. Digital transformation: leads the scientific and technological progress of coal industry and builds the vanguard of smart mines [J]. Enterprise Observer, 2021 (3): 90–91.
- [15] 鄢丽娜, 刘永宏. 我国煤矿智能化建设全面升级提速 [N]. 中国煤炭报, 2023-04-22 (01).
Yan L N, Liu Y H. China's coal mine intelligent construction comprehensively upgraded and accelerated [N]. China Coal News, 2023-04-22 (01).
- [16] 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 G F, Zhang L, Li S B, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34–53.
- [17] 朱妍. 升级信息化设施, 筑牢煤矿“智慧”基础 [N]. 中国能源报, 2022-05-16 (17).
Zhu Y. Upgrade the informationization facilities, build a strong coal mine “wisdom” foundation [N]. China Energy News, 2022-05-16 (17).
- [18] 姚美娇. 三化协同将成煤矿高质量发展新业态 [N]. 中国能源报, 2023-09-11 (07).
Yao M J. Three transformations synergy will become the new business mode of coal mine high-quality development [N]. China Energy News, 2023-09-11 (07).
- [19] 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 G F. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1–27.
- [20] 中国煤炭工业协会. 煤炭信息技术产业发展报告 2022 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2022.
China National Coal Association. Report on the development of coal information technology industry in 2022 [R]. Beijing: China National Coal Association, 2022.
- [21] 朱妍. “数字煤炭”增安提效 [N]. 中国能源报, 2023-10-09 (02).
Zhu Y. “Digital Coal” increases safety and efficiency [N]. China Energy News, 2023-10-09 (02).
- [22] 张翔, 高玉洁. 高需求带来高增长 “数字引擎”释放强劲动能——解读首个煤炭信息技术产业发展报告 [N]. 中国煤炭报, 2022-12-29 (03).
Zhang X, Gao Y J. High demand leads to high growth, “digital engine” unleashes strong momentum: Interpreting the first coal IT industry development report [N]. China Coal News, 2022-12-29 (03).
- [23] 陈养才, 孟峰. 构建煤炭工业两化深度融合“六大体系”的思考 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(10): 10–14.
Chen Y C, Meng F. Consideration on the construction of “six systems” for the deep integration of coal industrialization and informatization [J]. China Coal, 2019, 45(10): 10–14.
- [24] 煤炭工业“十四五”装备制造发展指导意见 [EB/OL]. (2020-08-03)[2023-10-15]. <http://www.chinacaj.net/i,34,11756,0.html>.
Guiding opinions on the development of equipment manufacturing in the 14th Five Year Plan for the coal industry [EB/OL]. (2020-08-03)[2023-10-15]. <http://www.chinacaj.net/i,34,11756,0.html>.
- [25] “十四五”能源领域科技创新规划 [J]. 中国科技奖励, 2022 (9): 23–42.
Scientific and technological innovation planning in energy field in the 14th Five-Year Plan [J]. China Awards for Science and Technology, 2022 (9): 23–42.
- [26] 康红普, 姜鹏飞, 宋德军, 等. 钻锚一体化智能快速掘进成套装备 [J]. 智能矿山, 2023, 4(2): 9–14.
Kang H P, Jiang P F, Song D J, et al. Complete set of drilling and anchoring integrated intelligent rapid excavation equipment [J]. Journal of Intelligent Mine, 2023, 4(2): 9–14.
- [27] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210–1219.
Xie H P, Ju Y, Gao M Z, et al. Theories and technologies for in situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210–1219.