DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.013

我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究

葛世荣[1,2]，张晞[2,3]，薛光辉[2,3*]，任怀伟[4,5]，王宏伟[6,7]，庞义辉[4,5]，范磊[2,3]

（1. 中国矿业大学（北京），北京 100083；2. 煤矿智能化与机器人创新应用应急管理部重点实验室，北京 100083；3. 中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院，北京 100083；4. 中煤科工开采研究院有限公司，北京 100013；5. 天地科技股份有限公司，北京 100013；6. 山西省煤矿智能装备工程研究中心，太原 030024；7. 太原理工大学机械与运载工程学院，太原 030024）

摘要：煤机装备是煤炭开采技术变革、煤炭能源生产体系的关键支撑，受“双碳”战略目标、智能煤矿建设浪潮的驱动，我国煤机装备产业将朝着智能、绿色、安全、高效方向转型升级；煤机市场的机遇与挑战并存，煤机智能技术与装备发展成为迫切需求。本文立足我国煤炭智能化开采尚处于初级阶段的发展实际，梳理了煤机智能技术与装备的发展现状与趋势，剖析了煤机智能装备关键技术体系，涵盖煤矿智能装备支撑、智能综采综放、智能快速掘进、主/辅助运输系统智能感知与控制、煤矿机器人等技术；提出了关键基础材料和先进加工工艺、柔性制造和虚拟仿真、装备再制造、第五代移动通信+工业互联网深度融合、工业大数据与人工智能、物联网智能感知与互联、信息物理与数字孪生系统等煤机智能装备产业发展方向。研究建议，加强煤机智能技术与装备攻关，完善煤机人才支撑体系，规划引导与产业布局优化并举，建立煤机研制创新生态系统，以此推动煤机装备高质量发展。

关键词：煤机装备；智能化；关键技术；产业升级；低碳

中图分类号：TD803　　**文献标识码：**A

Development of Intelligent Technologies and Machinery for Coal Mining in China’s Underground Coal Mines

Ge Shirong[1,2], Zhang Xi[2,3], Xue Guanghui[2,3*], Ren Huaiwei[4,5], Wang Hongwei[6,7], Pang Yihui[4,5], Fan Lei[2,3]

(1. China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Mining and Robotics, Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. Coal Mining Research Institute Corp., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 5. Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 6. Center of Shanxi Engineering Research for Coal Mine Intelligent Equipment, Taiyuan 030024, China; 7. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Coal machinery is crucial for the technological transformation of coal mining and the coal production system. Driven by

收稿日期：2023-07-21；**修回日期：**2023-09-28

通讯作者：*薛光辉，中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院副教授，主要研究方向为煤矿机器人、煤矿装备自动化与智能化、无线传感器网络；E-mail: xgh@cumtb.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“山西煤机装备制造高质量发展战略研究”（2022-XY-42）

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

the carbon peaking and carbon neutralization goals and the wave of intelligent coal mine construction, China's coal machinery industry will transform and upgrade toward intelligence, green, safety, and efficiency. Opportunities and challenges coexist in the coal machinery market, and development of intelligent technologies and machinery for coal mining has become an urgent demand. This study is based on the development reality in China that intelligent coal mining is still in its early stage and sorts out the current status and trends of intelligent technologies and machinery for coal mining. Moreover, it analyzes the key technology system of intelligent coal machinery, covering intelligent coalmine equipment support, intelligent fully mechanized mining and caving, intelligent rapid excavation, intelligent perception and control of main/auxiliary transportation systems, and coalmine robot technologies. Moreover, development directions are proposed, including key basic materials and advanced processing techniques, flexible manufacturing and virtual simulation, equipment remanufacturing, deep fusion of 5G with industrial Internet, industrial big data and artificial intelligence, intelligent perception and interconnection by the Internet of Things, and cyber-physical and digital twin systems. Furthermore, we suggest to strengthen breakthroughs in intelligent technologies and machinery for coal mining, improve the talent support system, emphasize both plan guidance and industrial layout optimization, and establish an innovative ecosystem for coal machinery research and manufacture, thereby promoting the high-quality development of coal machinery.

Keywords: coal machinery; intelligence; key technologies; industrial upgrading; low carbon

一、前言

能源是国家经济可持续发展的重要支撑[1,2]，但其伴生的CO_2过度排放成为引发气候变化的主要因素。在全球范围内经济社会与能源产业形成了低碳化发展的大趋势，我国也正式提出“双碳”战略，实现碳达峰、碳中和成为我国经济社会高质量发展的内在要求[3]。也要注意到，富煤贫油少气的能源赋存特性[4~6]决定了煤炭是我国的主体能源和重要工业原料。2022 年，世界煤炭消费量超过 8×10^9 t [7]，我国原煤产量为 4.56×10^9 t，同比增长 10.5% [8,9]。当前煤炭在我国一次能源生产和消费总量中的占比分别超过 67%、56% [10]，预测 2030 年煤炭的一次能源占比仍有 46.3% [11]。因此，在未来相当长一段时期内煤炭仍是经济发展、能源安全稳定的“压舱石”“稳定器”[12~14]。

构建以煤基能源为保障，具有清洁低碳、安全高效特征的能源体系，是保障我国能源安全、建设能源强国的重要途径[15,16]。与庞大的煤炭产能相对应，我国是全球最大的煤机市场国、煤机需求国。为实现“双碳”战略目标，我国煤机市场正在进行阶段性的调控和整顿，面临着市场集中、行业整合、技术与产品创新等方面的挑战；但也蕴藏着诸多新的发展机遇，以煤机装备技术的智能化、无人化、机器人化为代表，成为煤炭行业绿色低碳、安全高效转型升级的新质支撑力量。

相关已有研究主要涉及“双碳”背景下能源领域高质量发展[17,18]、能源消费结构与煤炭消费趋势[19]、煤炭能源升级战略[20]、煤炭行业发展路径[21~23]、煤炭资源强国建设[24]等宏观内容，井工煤矿智能化开发技术进展[25,26]、40 年来煤机装备制造发展历程和煤炭工业科技创新成就[27,28]等技术内容。《“十四五”智能制造发展规划》（2021 年）、《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》（2020 年）[29]、《煤炭工业“十四五”装备制造发展指导意见》（2021 年）等政策文件也明确了煤机技术与装备高质量发展的主攻方向。值得指出的是，尽管煤炭行业与技术研究成果较多，但针对煤机智能技术与装备开展的发展研究明显不足[30,31]。

煤机智能技术与装备范围非常广泛，既有井工矿智能技术与装备，也有露天矿智能技术与装备，还有煤炭洗选与煤化工智能技术与装备等。本文聚焦我国井工矿煤机智能技术与装备，总结发展现状及趋势、分析关键技术体系、辨明产业发展方向，以期为“双碳”发展背景下的煤机装备高质量发展研究提供参考。

二、煤机智能技术与装备的发展现状及趋势

（一）煤机智能技术与装备的发展现状

“十三五”以来，我国主要煤机装备基本实现了国产化，“三机一架”（采煤机、掘进机、刮板输送机和液压支架）等关键装备已达到了国际领先或先进水平[32]。一批超大采高智能化综采综放、智能快速掘进支护、大运量带式输送机等主煤流运输、煤矿机器人等煤机智能装备为智能煤矿建设提供了强大支撑。

1. 煤机智能装备支撑系统

基于第五代移动通信技术（5G）网络高速率、低时延和广连接的移动通信特点，煤机智能装备支

撑系统已形成了“端–边–云”三级网络架构，实现了煤机装备海量数据的高效可靠传输和互联。煤炭科技工作者构建了综采工作面三维虚拟数字孪生分析决策技术架构；基于多维地球物理精细探测方法，构建了全空间、全方位地质动态模型技术体系[33]，为煤炭智能精准开采[1]提供了透明地质条件和三维采场空间数字化模型。煤机智能装备研究院所和生产厂家采用分布式架构集控系统软件，研发了多设备协同作业一体化控制中心，基于统一的服务器、存储及数据接口标准构建协同作业控制平台，实现了远程、共享、平行协同作业。

2. 智能综采综放装备

我国已开展了8 m超大采高综采、7 m超大采高综放等一批重大实践[34-36]，取得了超大采高智能采煤机、智能刮板输送机及液压支架等标志性成果，引领了特厚煤层开采及高端装备的发展方向。神东煤炭集团公司联合高校、科研院所以及煤机装备制造企业研制的8~9 m超大采高智能采煤机总装机功率达3450 kW，整机重量为220~230 t，可实现9 m厚煤层一次采全高；8 m超大采高液压支架和大运量智能刮板输送机实现了输送、转载、破碎及皮带自移机尾等装备系统集成；创成的回风顺槽无反复支护装备提高了两巷作业的自动化水平，保障了工作面设备群的协同高效推进。8.8 m超大采高双滚筒采煤机（生产能力为6000 t/h）、超大工作阻力液压支架（支架工作阻力为26 000 kN）、大运量高强度刮板输送机（输送量为6000 t/h）、大流量乳化液泵站（最大流量为1350 L/min）和超长运输距离智能单点驱动带式输送机（带长为6000 m，带宽为1.8 m）等组成的8.8 m超大采高综采智能成套技术装备在神东煤炭集团的上湾煤矿投入应用[37]，创造了单日割煤22刀、日产6.55×10^4 t的纪录。薄及极薄煤层智能开采技术与装备也有较大发展，解决了大功率较薄煤层高效开采采煤机的关键技术难点，突破了刨煤机成套关键技术与装备，研制出了螺旋钻采煤机，薄煤层采煤机、刨煤机、连采机及其配套的液压支架、刮板输送机等关键装备都已实现了成套国产化。

3. 智能快速掘进支护成套装备

我国已形成了适用于不同煤层条件下煤矿的智能快速掘进工艺技术与装备[25,38]，研制的煤矿快速掘锚成套装备系统实现了掘、支、运一体化连续协同作业，可完成宽6.5 m、高4.5 m大断面巷道机械化施工，掘、锚同步作业，设计掘进速度可达1500 m/月。集成掘、支、锚、运、通风、除尘等智能装备的护盾式快速掘进系统在陕西小保当煤矿实现了工程应用。以“掘锚一体机+锚运破+大跨距转载”成套装备为基础，精准导航为引导，多机协同控制为核心，建成了基于“地理信息系统（GIS）+三维可视化”掘进远程集控系统。长距离、大坡度斜井专用掘进机实现巷道开挖、砌衬、出渣、运输、排水与通风等功能的系统集成，成功应用于补连塔煤矿，创造了单日进尺42 m，单月进尺639 m的记录[26]。中国铁建重工集团股份有限公司研制的由掘锚一体机、锚杆钻车、自移式皮带机组成的智能型大断面快速掘锚成套装备[38]在国家能源集团、陕西煤业化工集团有限责任公司、中国中煤能源集团有限公司等大型煤炭集团进行了应用，提高了复杂地质条件下煤矿巷道的智能化快速掘进水平。薄煤层掘进机国产化机型有20多种，主要有EBZ-132、135、150A和160等。

4. 主/辅助运输系统智能装备

围绕长距离、大运量和高速度带式输送机在设计制造、安全运行等方面的突出问题，科研院所和企业合作研制出了具有国际先进水平的超大型带式输送机。煤炭科技工作者基于智能化煤矿对煤流系统提出的智能调控及无人值守的新要求，围绕高效、节能、可靠、无人的目标，取得了高性能输送带、驱动技术、煤流检测等技术新突破。近年来，国产化变频一体机完成了进口产品的替代，形成了功率为315~2000 kW、电压为660~3300 V的全系列矿用产品。无人驾驶技术也已经在井工矿的无轨胶轮车、单轨吊、有轨电机车等辅助运输系统中开展了试验研究。科研人员研制出了远距离大运量带式输送机及其系统，实现了永磁电机直接驱动、张力分布式调节、大跨度空间转弯等关键技术[39]。

5. 煤矿机器人

据统计，国家安全生产监督管理局规划的38种机器人中已有31种在煤矿现场进行了应用[1]，临时支护、露天矿穿孔爆破、巷道冲尘、巷道清理和密闭砌筑等5种机器人已立项研发，仅有充填支护机器人和井下抢险作业机器人尚属空白。中国矿业大学（北京）在国家重点基础研究发展计划项目资助下研制的机器人化掘进机群，由掘进机器人、支护

机器人、钻锚机器人、支架搬运机器人、转载机器人和带式输送机机器人等组成，具有多机协同、平行作业、自主定位与导航、自适应智能截割等功能。巡检类机器人现已广泛替代人工进行工作面、带式输送机、巷道、变电所和水泵房等场所的巡检作业，实现了多岗位的无人值守。智能喷浆机器人投入使用后，作业人数减少至2人，日喷浆进度提升至30 m左右，混凝土回弹率降至20%以内，年节约成本120万元。搬运机器人可实现1 t重载搬运作业，可节约作业人数2~3人，工作效率可提高35%左右。

（二）煤机智能技术与装备的发展趋势

我国煤炭开采经历了人工、炮采、普采、综采、智能开采等技术发展阶段[30,40]，目前处于智能化开采的初级阶段。煤机装备相应经历了动力化助人、机械化替人、自动化减人和智能化无人等不同阶段。目前，我国煤机装备正在朝着智能化、高端化、成套化方向发展[41]。

1. 向高端智能装备方向发展，构建绿色、低碳、安全高效的煤机装备产业链

绿色、低碳、安全高效的煤炭智能开采需要煤机智能技术与装备的支撑，要求煤机装备向绿色、低碳、安全、高效方向发展。高端智能煤机装备的发展要求加强煤矿智能化装备基础理论研究和核心基础零部件、先进基础工艺、关键基础材料等共性关键技术的研发，重点突破精准地质探测、精确定位与数据高效连续传输、智能快速掘进、复杂地质条件智能综采、永磁直驱连续化辅助运输、露天无人开采作业、重大危险源智能感知与预警、煤矿机器人等技术与装备，提高国产化水平，构造绿色、低碳、安全、高效的煤机装备产业链。重点打造10 m超大采高综采等一批标杆性示范项目，带动相关产业提速发展。

2. 向成套智能装备方向发展，构建不同复杂地质条件下智能化采煤技术与装备

科研院所和煤机制造企业经过多年对复杂地质条件下薄煤层、中厚煤层和厚煤层智能化开采技术与装备的理论研究与实践探索，研发了以采煤机、液压支架、刮板输送机、以巷道集中监控为基本框架的智能采煤成套技术与装备，初步形成了薄煤层、中厚煤层、大采高与超大采高和特厚煤层等智能化采煤模式。薄煤层和中厚煤层智能化综采还涉及工作面自动找直、液压支架自动跟机与远程干预、采煤机记忆截割与远程干预、刮板输送机煤流负荷平衡控制、综采智能集中控制、工作面视频监控、安全监测联动联制和超前支护智能控制等关键技术与成套装备。厚煤层智能综采关键技术与装备还包括大采高工作面防片帮智能控制、大采高底软智能控制、大采高视频智能监控和大采高安全保障等。智能掘进装备已形成适应不同地质条件的快速掘进工艺和成套装备。此外，采煤装备精准定位、煤岩界面智能识别、围岩自适应支护、智能纠偏、智能煤流运输系统等核心关键技术还需深入研究，以提高智采工作面的自主能力和对复杂地质条件的适应性。

3. 向“新基建”方向发展，构建煤矿新型基础设施，建设煤矿智能化的“地基”

新型基础设施包括5G基站、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大领域。煤矿基础设施体系需依托5G、大数据、人工智能和工业互联网等新一代信息技术，以新发展为理念，以技术创新为驱动，以信息网络为基础，构建智慧煤矿综合信息一体化管控平台，为煤矿提供数字化转型、智能化升级以及融合创新等服务，以提高煤矿的自动化、信息化和智能化水平。5G与工业互联网为煤矿装备海量数据传输和泛在连接提供了无限可能，大数据、人工智能为煤矿装备的智能计算和智能决策提供了强大理论与技术支撑，为煤矿智能装备的应用提供了平台基础。煤矿智能化的投入比煤矿综合机械化投入增加约30%，将开辟煤炭行业新一轮“新基建”空间，尤其在5G通信、大数据中心建设等方面将加速发展，“新基建”赋能的煤矿智能装备在构建煤矿新型基础设施建设煤矿智能化的“地基”中扮演着重要角色。

三、煤机智能装备关键技术体系

近年来，在国家科技研发项目的资助下，煤炭科技工作者开展了大量科学研究和技术创新，在煤炭智能化开采基础理论、关键技术、重大智能装备和工程示范应用等领域取得了许多重大突破，为我国煤炭智能化开采提供了重要的技术和装备支撑，也为国家“双碳”战略目标的实现奠定了坚实基础。

（一）煤矿智能装备支撑技术

煤矿装备智能化主要包括环境智能感知、行为决策与智能控制、状态监测与健康诊断，需要大量的技术支撑，主攻方向包括矿井透明地质精细化模型构建、煤矿灾害预测与防治、煤矿环境的智能感知与实时重构、煤矿装备状态感知与智能决策控制等。将5G通信、人工智能和大数据等新一代信息技术与煤矿智能化“地基”深度融合，形成环境感知–分析决策–智能控制–闭环反馈的运行模式，研制矿井智能闭环管控平台系统，形成集监测、预警、防控、应急于一体的闭环管控体系，实现煤矿地质模型的实时精细化构建、煤矿灾害智能感知与预防和煤矿装备分析决策与智能控制。由工业网络控制系统、工作面智能开采决策系统、液压动力执行系统、煤矿地面井下一体化控制中心、高效通信网络等构成的新一代无人化智能开采控制系统与装置为煤矿无人化智能开采提供系统和环境支撑。未来，还要加强基础材料、制造加工工艺、设备可靠性等基础理论研究，增强煤机装备的可靠性。

（二）智能综采综放技术

智能综采综放技术主要是指采煤机、液压支架、刮板输送机、带式输送机和巷道集中控制等智能化技术[42,43]。采煤机的智能化技术主要包括基于角度传感器和旋转编码器的姿态感知技术，基于机载超低照度高清晰摄像仪视频监控技术，基于高速率、大带宽、低延时的交互通信技术，基于传感检测与控制的记忆截割技术，基于惯性导航的自主定位技术和基于多参数辨识的煤岩识别技术。液压支架智能控制技术包括自动移架、跟机、调斜与调直，自适应护帮，智能供液、放顶煤智能控制、超前支护智能控制、端头支护的智能控制和巷道集中控制等。刮板输送机智能控制技术包括智能自启动、智能调速、多功率协调控制、智能紧链与断链监控、自动调直、采运协同和智能控制系统等。此外，大采高防片帮冒顶智能控制技术，高精度地质探测及精准地质建模技术，基于数字孪生的单机控制、顺槽集中控制和地面远程控制等都是亟待解决的关键技术。薄及极薄煤层开采智能技术与装备的主攻方向主要有薄煤层智能化开采、高效卸压开采和稀缺煤种高采出率开采技术，以及开发大功率矮机身滚筒采煤机、无人化自动化刨煤机、无人化螺旋钻采煤机和连续采煤机成套装备等。

（三）智能快速掘进技术

煤矿掘进工作面空间狭长、环境恶劣、工序复杂，存在成套掘进装备系统地质适应性差、自动化和智能化程度低、单机可靠性低等问题，难以满足掘进工作面平行作业等快速掘进的需要[44-46]，采掘接续失调，掘支矛盾突出。为实现巷道快速掘进，需解决智能快速掘进成套技术与装备在掘支锚护等工艺装备的自动化、智能化乃至机器人化，研制智能快速掘进成套技术与装备，以实现适应不同地质条件的煤矿巷道的快速掘进。其主攻方向涉及到的主要技术包括智能超前探测技术、掘进装备的位姿精准检测与导向技术、煤岩特性智能识别技术、自适应截割技术、智能支护技术和智能除尘技术、智能快速掘进工艺与协同控制技术等。此外，支护工艺、支护材料、喷涂材料等的研究也需加强，以使支护工艺简单化、支护材料轻型化，为智能快速掘进提供支撑。薄及极薄煤层的快速掘进技术主要是在降低掘进机高度的同时，研制低矮型的掘进与支护装备，实现少岩化快速掘进。

（四）主/辅助运输系统智能感知与控制技术

煤矿主运输系统有矿用提升机、带式输送机等关键装备；辅助运输系统有单轨吊、有轨机车和无轨胶轮车等关键装备。矿用提升机已实现智能化无人值守运行，其智能感知与控制技术主要是运行决策与健康维护，主要包括其运行分析决策与智能控制、状态监测与健康诊断。带式输送机智能感知与控制技术包括智能驱动、自动张紧、自移机尾、智能保护和煤流智能管控等。此外，采用图像识别、伽马射线检测、变频控制以及机器人巡检等技术实现煤流量智能检测与控制、胶带撕裂与断带保护和铁丝、钢扦等异物智能识别与分拣是带式输送机主煤流运输系统全方位感知与常态化智能运行的关键保障。精细化闭环管控和高级辅助驾驶技术是连续化辅助运输系统智能化的主攻方向，包括基于工业互联网的煤矿井下辅助运输管控技术、煤矿井下车联网与无人驾驶技术。

（五）煤矿机器人技术

煤矿机器人是面向煤炭行业的特种机器人，是

煤矿智能化技术与装备发展的新方向，是传统煤机装备和现代机器人技术交叉融合的创新成果。其发展面临着许多关键的共性技术[47~49]，主要有本体防爆安全设计理论与方法、行走与作业机构设计、长续航高效动力及其驱动设计、多传感器融合环境智能感知与障碍识别技术、受限封闭空间自主定位与导航技术、狭长空间高可靠抗干扰通信技术、可靠性测试与评估方法和多机器人群协同控制技术等。将煤矿机器人与5G、工业互联网、大数据、云计算、人工智能和数字孪生等新技术融合以提升其智能化水平是当前的研究热点。

四、煤机智能装备产业发展方向

随着智能煤矿建设的深入，支撑智慧煤矿建设的装备研制也不断与新一代信息技术深度融合，呈现出众多的发展方向，初步构建出了面向未来的煤机装备绿色、低碳、智能产业体系。

（一）煤机装备关键基础材料和先进加工工艺

智能煤机装备的应用提升了煤炭智能开采的水平，同时煤炭智能开采也要求智能煤机装备具备高可靠性，以保障煤炭智能开采作业的安全高效。关键基础材料和先进加工工艺的应用是提高煤机装备可靠性的根本途径。目前，我国大型煤机装备的设计加工工艺、高强度基础材料和关键核心零部件等与国际先进水平相比还存在一定差距，也滞后于我国煤炭工业的整体发展水平。因此，煤机装备基础核心零部件、关键基础材料和先进加工制造工艺等瓶颈技术的研究和关键基础材料及先进加工工艺的突破可为我国煤机智能装备的高可靠性提供保障。

（二）煤机装备柔性制造和虚拟仿真

由于煤炭赋存条件的复杂性，其生产装备具有一定的个性化和特殊性，煤机装备生产模式多为小批量订单式为主，再加上煤机装备结构件多、类型和材料不同，从而要求煤机装备生产制造工艺离散化和柔性化。柔性制造技术和虚拟仿真技术在智能制造的实现中扮演着重要的角色，可为智能煤机装备的离散与柔性制造提供高效率、低成本的有效支撑。柔性制造技术是在传统制造技术基础上发展起来的新兴制造技术，数控智能设备的应用是柔性制造的基础。虚拟仿真技术有面向产品制造工艺和装备、面向产品和面向生产管理三个层面的仿真技术。针对煤机装备生产制造工艺的离散化和柔性化，煤机装备制造业充分利用虚拟仿真技术的优点，建立相应的虚拟装配、性能验证和柔性制造执行系统，应用柔性生产线、自动化立体库、自动导引车（AGV）、工业机器人和自动上下料系统建立数字化柔性制造产线，实现煤机装备生产计划的订单式、数字化和自适应管理，为煤机装备个性化定制和小批量生产提供条件。

（三）煤机装备再制造

从煤机装备价值来看，综采设备占比约为60%~75%，占据煤机市场的主要份额。其中，采煤机、液压支架和刮板输送机等煤机核心设备的服务寿命一般为5~8年，煤炭生产存在巨大的设备更新需求。在智能煤矿建设和设备更新驱动下，现有煤机装备面临着技术改造升级、修复和再制造的巨大市场和发展机遇。煤机装备再制造是循环经济“再利用”的高级形式，是促进国民经济高质量发展的重要内容。煤机装备再制造是煤机装备全生命周期管理的延伸和提升，是实现煤机装备制造绿色化、低碳化发展理念的有效途径，是实现既有煤机装备技术、性能和价值升级的有效手段。煤机装备再制造技术包括再制造先进设计技术、毛坯寿命评估技术、复合表面工程技术和智能化再制造技术等。

（四）基于5G+工业互联网深度融合

煤机装备的个性化定制和订单式生产模式要求煤机装备的制造高度协同。基于时间的分工协同和基于空间的个性化定制服务均需要强大的数据获取能力与实时的智能服务能力来支撑。5G技术和工业互联网在智能煤矿建设中发挥着十分关键的作用。5G技术的高速率、大带宽、广连接和低时延特性及其数字化生态重塑了煤机智能装备生产和服役过程中人、机器与数据三者的实时连接、协作互动关系。煤机装备自身及其生产数据的高效可靠稳定传输与交换是其智能化的关键，深度融合5G+工业互联网可为煤机智能装备提供必要的数据链路和平台支持，可极大提升我国煤机装备产业的生产链和价值链内涵，推动我国煤机制造业实现向智能化、高端化和服务化升级转型。

（五）工业大数据与人工智能

煤机装备从制造到服役的整个过程均伴随着海量数据的产生和应用。工业大数据是煤机装备制造和生产的关键技术之一，贯穿于煤机装备的产品设计、生产制造和应用的整个生命周期，是推动煤机装备智能创新的核心技术力量，尤其是以数据挖掘和分析为核心的应用和服务。人工智能（AI）主要研究知识表示、认知建模、推理应用、机器感知、机器思维、机器学习和智能系统等。传统技术与AI技术深度融合后，运用AI技术和工业大数据挖掘分析可有效解决煤机装备产业从产品设计研发、制造装配到管理服务等全生命周期的管理问题。大数据和AI技术已成为煤机装备产业不断提升创新能力与可持续竞争优势的新引擎，不断推动其迈向更高的智能化阶段。

（六）物联网智能感知与互联

煤机装备的智能化有赖于对环境的智能感知和数据的高速互联，因此智能感知与互联技术是煤机智能装备的关键技术。煤机智能装备从制造到生产全过程，均需要通过有线或无线传感器网络实时监控，与制造和生产有关的各种现场数据需实时传输给控制中心，甚至上传到大数据中心进行数据分析。物联网技术已广泛应用在生产工艺优化、设备监控管理、环境监测、能源管理与安全生产管理等方面。物联网智能感知与互联技术融入到煤机智能装备的各制造和应用环节，可改善产品质量，提高生产效率，降低生产成本和资源消耗，是我国煤机装备制造业由传统制造提升到智能制造的必由之路，也是实现煤机智能装备可靠运行的有效保障。

（七）信息物理系统与数字孪生系统

信息物理系统是通过计算资源与物理资源的紧密协调与配合来进行系统建模的，提供制造、生产相关事物与计算空间的映射理论框架，具有适应性、自主性、高效性、功能性、可靠性、安全性和可用性等特点。数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体提供更加实时、高效、智能的运行或操作服务，是集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程。数字孪生智采工作面[50]是数据可视化、人机强交互和工艺自优化的高逼真采煤工作面三维镜像场景，高度依赖煤机装备的单机智能化、集群自主化和远程智能管控技术，涉及物理工作面、虚拟工作面、孪生数据、信息交互、模型驱动、边缘计算、沉浸式体验、云端服务、信息物理系统和智能终端等关键技术。基于信息物理系统与数字孪生系统，煤机装备可利用其物理模型、历史运行和传感器更新数据，在虚拟空间中反映其全生命周期过程，为我国煤机装备产业提供研发、生产和服务过程的状态智能感知、实时精确分析、科学决策和精准执行的数据闭环，也为煤机智能装备更加精细、安全、稳定的运行决策与安全管控提供理论与技术支撑。

五、发展建议

基于我国煤机智能技术与装备的现状，面向煤炭工业“十四五”规划建设绿色、高效、安全的智能煤矿总体战略[51]，我国煤机智能装备产业发展应瞄准煤矿高端智能装备，加强技术攻关，培育创新人才、完善产业布局，增强原始创新、集成创新和继承创新能力，推动产业升级。

（一）加强煤机智能技术与装备攻关，形成煤机智能装备产业新业态

加强煤矿智能装备的基础理论研究和基础材料、先进制造工艺等共性核心技术研发，重点突破精准地质探测、精确定位与高效数据传输、“掘–支–锚”一体化智能快掘、智能综采综放、连续高效主煤流/无人驾驶辅助运输、危险源智能感知与预警、煤矿机器人等技术与装备，打造10 m超大采高综采等标杆性示范项目，带动相关产业提速发展，提升煤机智能装备研制水平。应坚持示范成功后再进行成套推广的研发策略；坚持绿色和服务型煤炭装备制造，积极探索煤机装备虚拟仿真、柔性制造与再制造技术，利用5G、工业互联网、大数据、云计算等新一代信息技术，发展先进制造和现代服务业深度融合的新模式新业态，推动煤机装备制造与服务协同发展，打造煤机智能装备产业新业态。

（二）完善煤机研制人才支撑体系，建立示范引领机制

加强创新驱动，积极开展国际交流合作，引进

国外先进管理与技术装备，内外联动衔接国内与国际标准，强化标准化基础，构建知识、信息、技术与人才等要素支撑的优势体系，打造“政产学研资”紧密合作的创新生态。推进煤机智能装备研发试验中心建设、工业强基、智能制造、绿色制造和高端装备创新等工程建设，推动煤机智能装备产业健康可持续发展。完善人才支撑体系，鼓励高校、科研院所与企业联合培养复合型创新与应用高水平人才，支持建立行业协会高级人才储备库和企业人才库，大力发展职业教育和专业培训，健全完善职业资格和人才评价制度。建立示范引领机制，研究发布煤机智能装备产业发展指数和报告，总结典型经验，为煤机智能装备制造企业提供示范引领。

（三）规划引导与产业布局优化并举，推进产业链现代化

加强规划引导，发挥协会和行业联盟的作用，综合考虑我国煤炭资源分布、环境容量和市场空间等因素，统筹分析我国煤炭装备的市场需求，引导煤机智能装备产业布局优势区域、向集群化转型升级，重点发展“2 高 5 重”（北京、上海 2 市高端制造企业集群；山东、河南、河北、山西、陕西 5 省重点制造企业集群）煤炭产业装备集群，推进创新工程建设，打造具有战略性和全局性的高效协同产业链，精准合理布局，补短链、延中链、强长链，增强产业链韧性。鼓励煤机装备制造企业深度融入全球产业链体系，向集群化转型升级，创建煤机智能装备产业集群，优化产业布局和结构，提高产业整体规模和效益。智能技术与装备宜采取先研发、试验再推广的模式，优先在地质条件较好的矿井开展工业性试验，成熟后再推广。

（四）建立煤机研制创新生态系统，保障煤机智能技术与装备持续升级

加快相关法律法规、产业政策的制定 / 修订，为煤机装备制造业发展提供制度保障和营商环境；加快培育建设企业技术中心、重点实验室等科技创新平台，吸引国内外一流科研院所、知名院校合作建设科技成果转移转化中心，积极完善标准体系，夯实标准化基础，支持建设智能化采掘装备、主辅运输装备等数字孪生、可靠性模拟试验台和智能控制、智能检测试验台等高水平研发平台，提高产品创新研发能力和可靠性保障能力；重点支持采掘装备、主辅运输设备关键元部件、耐腐蚀耐磨高强度新材料制造及热处理、变频与永磁电机、高可靠性圆环链、无托辊及空气悬浮带式输送机等关键技术攻关，支持新型大功率智能运输设备产品开发与升级换代。

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: July 21, 2023; **Revised date:** September 28, 2023

Corresponding author: Xue Guanghui is an associate professor from School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing. His major research fields include coal mine robot, coal mine equipment automation and intelligence, and wireless sensor network. E-mail: xgh@cumtb.edu.cn.

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “High Quality Development Strategy of Coal Machinery Equipment Manufacturing in Shanxi” (2022-XY-42)

参考文献

[1] 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 S R, Hu E Y, Li Y W. New progress and direction of robot technology in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 54–73.

[2] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(5) : 1187–1197.
Xie H P, Wang J H, Wang G F, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.

[3] 习近平. 正确认识和把握我国发展重大理论和实践问题 [EB/OL]. (2022-05-15)[2023-06-20]. http: //www. qstheory. cn/dukan/qs/2022-05/15/c_1128649331.htm.
Xi J P. Correctly understanding and grasping the major theoretical and practical issues in China’s development [EB/OL]. (2022-05-15) [2023-06-20]. http: //www. qstheory. cn/dukan/qs/2022-05/15/c_1128649331.htm.

[4] 中国能源研究会. 中国能源展望 2030 [M]. 北京: 经济管理出版社, 2016.
China Energy Research Association. China energy outlook 2030 [M]. Beijing: Economic Management Press, 2016.

[5] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.

[6] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
Yuan L. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.

[7] International Energy Agency (IEA). Coal 2022 : Analysis and forecast to 2025 [R/OL]. (2022-12)[2023-06-04]. https: //www. iea.

org/reports/coal-2022.

[8] 中国煤炭工业协会. 2022煤炭行业发展年度报告 [EB/OL]. (2023-03-08)[2023-06-04]. http: //www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=146684.
China Coal Industry Association. 2022 annual report on the development of the coal industry [EB/OL]. (2023-03-08)[2023-06-04]. http: //www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=146684.

[9] BP. Statistical review of world energy (2022) [EB/OL]. [2023-06-04]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf.

[10] 国家统计局. 能源生产总量和构成 [EB/OL]. (2022-10-27)[2023-03-23]. https: //data.stats.gov.cn/tablequery.htm?code=AA0701.
National Bureau of Statistics of China. Total energy production and composition [EB/OL]. (2022-10-27)[2023-03-23]. https: //data.stats.gov.cn/tablequery.htm?code=AA0701.

[11] 文博杰, 陈毓川, 王高尚, 等. 2035年中国能源与矿产资源需求展望 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 68–73.
Wen B J, Chen Y C, Wang G S, et al. China's demand for energy and mineral resources by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 68–73.

[12] 中矿(北京)煤炭产业景气指数研究课题组. 2022—2023年中国煤炭产业经济形势研究报告 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(3): 2–10.
Research Group of Zhongkuang (Beijing) Coal Industry Prosperity Index. Research report on the economic situation of China's coal industry from 2022 to 2023 [J]. China Coal, 2023, 49(3): 2–10.

[13] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1–36.
Wang G F, Liu F, Meng X J, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary) [J]. Coal Science and Technology, 2016, 47(8): 1–36.

[14] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34–41.
Wang G F, Zhao G R, Ren H W. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34–41.

[15] 莫非. 以颠覆性技术实现煤炭清洁高效利用——访中国工程院院士葛世荣 [N]. 中国电力报, 2023-03-21 (01).
Mo F. Realization of clean and efficient utilization of coal with subversive technology—Interview with Ge Shirong, a member of the Chinese Academy of Engineering [N]. China Electric Power News, 2023-03-21 (01).

[16] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. "十四五"现代能源体系规划 [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-06-04]. https: //www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf.
National Development and Reform Commission of China, National Energy Administration of China. Modern energy system planning for the 14th Five Year Plan [EB/OL]. (2022-01-29)[2023-06-04]. https: //www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf.

[17] 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 K C. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 1–7.

[18] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. "双碳"背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 8–18.
Huang Z, Xie X M, Zhang T T. Medium- and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8–18.

[19] 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.

[20] 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 Q, Tu K, Zeng Y F, 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): 1625–163.

[21] 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.

[22] 阮立军. "双碳"形势下煤炭工业未来发展的思考 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2022 (1): 55–57, 62.
Ruan L J. Thinking on the future development of coal industry under the situation of "double carbon" [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2022 (1): 55–57, 62.

[23] 王国法, 张铁岗, 王成山, 等. 基于新一代信息技术的能源与矿业治理体系发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 176–189.
Wang G F, Zhang T G, Wang C S, et al. Development of energy and mining governance system based on new-generation information technology [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 176–189.

[24] 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 B, Peng S P, Wang T, et al. Strategic paths and countermeasures for constructing a "reat power of coal resources" [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 88–96.

[25] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071–1081.
Kang H P. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(6): 1071–1081.

[26] 雷毅. 我国井工煤矿智能化开发技术现状及发展 [J]. 煤矿开采, 2017, 22(2): 1–4.
Lei Y. Present situation and development of underground mine intelligent development technology in domestic [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(2): 1–4.

[27] 刘峰, 曹文君, 张建明. 持续创新70年硕果丰盈——煤炭工业70年科技创新综述 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(9): 5–12.

Liu F, Cao W J, Zhang J M. Continuous innovation and remarkable achievements in past 70 years — Research summary on scientific and technological innovation of coal industry in last 70 years [J]. China Coal, 2019, 45(9): 5–12.

[28] 铁旭初. 我国煤机装备制造 70 年发展成就与展望 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(11): 5–12.
Tie X C. Development achievement and prospect of coal machine equipment manufacturing in China in 70 years [J]. China Coal, 2019, 45(11): 5–12.

[29] 国家能源局. 关于印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的通知 [EB/OL]. (2020-03-03)[2023-05-26]. http: //www.nea.gov.cn/2020-03/03/c_138838778.htm.
National Energy Administration. Notice on issuing *the guiding opinions on accelerating the intelligent development of coal mines* [EB/OL]. (2020-03-03)[2023-05-26]. http: //www.nea.gov.cn/2020-03/03/c_138838778.htm.

[30] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28–46.
Ge S R, Hao S Q, Zhang S H, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28–46.

[31] 牛艳奇, 商德勇, 庞义辉, 等. 煤机装备智能制造发展路径与关键技术研究 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 157–160.
Niu Y Q, Shang D Y, Pang Y H, et al. Research on development path and key technology of intelligent manufacturing of coal machinery equipment [J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 157–160.

[32] 闫少宏, 徐刚, 范志忠. 我国综合机械化开采 50 年发展历程与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 1–9.
Yan S H, Xu G, Fan Z Z. Development course and prospect of the 50 years' comprehensive mechanized coal mining in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 1–9.

[33] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277–2284.
Yuan L, Zhang P S. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8) : 2277–2284.

[34] 刘振坚, 邱锦波, 庄德玉. 天地科技上海分公司采煤机智能化技术现状与展望 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(7): 33–39.
Liu Z J, Qiu J B, Zhuang D Y. Present situation and prospect of intelligent shearer technology of Shanghai Branch Company of Tiandi Co., Ltd. [J]. China Coal, 2019, 45(7): 33–39.

[35] 李明忠, 张德生, 刘壮, 等. 8.2 m 大采高综采工作面超前支护技术研究及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11) : 32–36.
Li M Z, Zhang D S, Liu Z, et al. Research and application of advance supporting technology for 8.2 m large mining height fully-mechanized face [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11) : 32–36.

[36] 杨俊哲. 8.8 m 智能超大采高综采工作面关键技术与装备 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 116–124.
Yang J Z. Key technologies and equipments for 8.8 m intelligent super large mining height fully－Mechanized mining face mining [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 116–124.

[37] 王剑, 刘备战, 雷亚军, 等. 曹家滩煤矿智能快速掘锚成套装备应用 [J]. 陕西煤炭, 2021, 40(1): 1–3, 40.
Wang J, Liu B Z, Lei Y J, et al. Application of complete equipment for intelligent rapid excavation and anchoring in Caojiatan coal mine [J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(1): 1–3, 40.

[38] 张忠国. 煤巷快速掘进系统的发展趋势与关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 55–60.
Zhang Z G. Development tendency and key technology of mine seam gateway rapid driving system [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 55–60.

[39] 郭文晋, 冯志军, 王彦, 等. 大型永磁驱动带式输送高端装备的技术应用分析 [C]//中国砂石协会. 第九届全国砂石骨料行业科技大会论文集. 武汉: 中国砂石协会, 2022: 13–26.
Guo W J, Feng Z J, Wang Y, et al. Technical application analysis of high-end equipment for large permanent magnet drive belt conveying [C] // China Aggreqates Association. Proceedings of the 9th National Science and Technology Conference of the Sand and Aggregate Industry. Wuhan: China Sandstone Association, 2022: 13–26.

[40] 王国法, 杜毅博, 陈晓晶, 等. 从煤矿机械化到自动化和智能化的发展与创新实践——纪念《工矿自动化》创刊 50 周年 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 1–18.
Wang G F, Du Y B, Chen X J, et al. Development and innovative practice from coal mine mechanization to automation and intelligence: Commemorating the 50th anniversary of the founding of *Journal of Mine Automation* [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 1–18.

[41] 王国法, 刘峰. 中国煤矿智能化发展报告(2022 年) [M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
Wang G F, Liu F. China coal mine intelligence development report (2022) [M]. Beijing: Emergency Management Press, 2022.

[42] 范京道, 徐建军, 张玉良, 等. 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 43–52.
Fan J D, Xu J J, Zhang Y L, et al. Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43–52.

[43] 葛世荣, 王忠宾, 王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 1–9.
Ge S R, Wang Z B, Wang S B. Study on key technology of Internet plus intelligent coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 1–9.

[44] 张东宝. 煤巷智能快速掘进技术发展现状与关键技术 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 56–59.
Zhang D B. Development status and key technology of intelligent rapid driving technology in coal seam roadway [J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 56–59.

[45] 吴拥政, 吴建星, 王峰. 巷道掘支锚连续平行作业机理及其应用 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 39–44.
Wu Y Z, Wu J X, Wang F. Mechanism and application of excavation, support and bolting continuous parallel operation in roadway [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 39–44.

[46] 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 G F, Liu F, Pang Y H, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development [J]. Journal of

China Coal Society, 2019, 44(2): 349–357.

[47] 葛世荣. 煤矿机器人现状及发展方向 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(7): 18–27.
Ge S R. Present situation and development direction of coal mine robots [J]. China Coal, 2019, 45(7): 18–27.

[48] 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 S R, Hu E Y, Pei W L. Classification system and key technology of coal mine robot [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455–463.

[49] 胡而已, 葛世荣. 煤矿机器人研发进展与趋势分析 [J]. 智能矿山, 2021, 2(1): 59–74.
Hu E Y, Ge S R. Coal mining robot research progress and trend analysis [J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 59–74.

[50] 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 S R, Zhang F, Wang S B, et al. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925–1936.

[51] 中国煤炭工业协会. 煤炭工业“十四五”装备制造发展指导意见 [EB/OL]. (2021-06-03)[2023-05-26]. http: //www.coalchina.org.cn/uploadfile/2021/0603/20210603114439221.pdf.
China National Coal Association. Guiding opinions on the development of equipment manufacturing in the coal industry during the 14th Five Year Plan [EB/OL]. (2021-06-03)[2023-05-26]. http: //www.coalchina.org.cn/uploadfile/2021/0603/20210603114439221.pdf.