煤炭科学技术
COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国煤炭开采技术及装备50年发展与创新实践

王国法 杜毅博 徐亚军 任怀伟 张德生 庞义辉

引用本文:
王国法，杜毅博，徐亚军，等. 中国煤炭开采技术及装备50年发展与创新实践[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1–18.
WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun. Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publication of *Coal Science and Technology*[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1–18.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022–1801

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

我国综合机械化开采50年发展历程与展望
Development course and prospect of the 50 years' comprehensive mechanized coal mining in China
煤炭科学技术. 2021, 49(11): 1–9 http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f3b986b5–c170–4275–8a25–a84284a6a5f3

综采工作面智能开采关键技术实践
Key technology practice of intelligent mining in fully–mechanized coal mining face
煤炭科学技术. 2020, 48(7) http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9adfabb1–c68f–4a26–99d6–2cfbdbe228b3

煤矿矿井建设技术与装备70余年创新发展及推广实践
Seventy years innovation development and popularization practice of coal mineconstruction technology and equipment in China
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 65–83 https://doi.org/10.12438/cst.2024–0122

不同煤层地质条件下智能化无人综采技术
Intelligent unmanned fully–mechanized mining technology under conditions of different seams geology
煤炭科学技术. 2019(3) http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c6b1c720–d198–479d–95e2–28af30c4f8ed

深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践
Key technologies and practices for safe, efficient, and intelligent mining of deep coal resources
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 52–64 https://doi.org/10.12438/cst.2023–1794

我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术
Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China
煤炭科学技术. 2020, 48(7) http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/69648235–011b–4939–9122–84f0e5a03966

关注微信公众号，获得更多资讯信息

院士观点

移动扫码阅读

王国法, 杜毅博, 徐亚军, 等. 中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践——纪念《煤炭科学技术》创刊 50 周年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1−18.

WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, *et al*. Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publication of *Coal Science and Technology*[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1−18.

中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践

——纪念《煤炭科学技术》创刊 50 周年

王国法[1], 杜毅博[2,3], 徐亚军[2,3], 任怀伟[2,3], 张德生[2,3], 庞义辉[2,3]

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 中煤科工开采研究研究有限公司, 北京 100013;
3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘 要: 回顾《煤炭科学技术》杂志推动和见证中国煤炭开采技术及装备 50 年发展与创新实践的发展概况，阐述从煤矿机械化到煤矿智能化的创新历程并重点分析采煤机装备技术研发支撑煤炭开发工艺变革，综述煤矿装备智能化迭代发展并提出煤矿装备智能化发展思路。煤炭开采技术历经炮采、普通机械化开采、综合机械化开采、智能化开采 4 次重大技术变革，实现了煤炭生产力的巨大进步。采煤机装备研发支撑煤炭开发工艺变革，液压支架支护理论、设计方法、支架架型结构和制造技术的创新支撑实现我国液压支架产品由低端到高端的突破；采煤机制造工艺、机型适应性和监控系统等短板技术攻坚取得重大进展，采高 0.8~9.0 m 全系列采煤机满足我国煤矿高效生产要求，智能化水平不断提升；大运量长运距工作面刮板输送机关键技术不断突破，450 m 超长工作面大运量刮板输送机可靠运行，智能变频一体机传动代替传统 CST 等传动，节能近 30%；大运量带式输送机永磁直驱、芳纶带和无基础带式输送机结构等技术创新具有节能、可靠和智能的显著优势；电液控制和无人化智能开采控制技术快速发展，国产化 SAC 型液压支架电液控制系统、SAM 型工作面自动化系统和 SAP 型智能供液系统广泛应用；“掘锚一体机+锚运破+大跨距转载”掘锚一体机系统、悬臂式掘锚护一体机+临时支护系统和 TBM 全断面硬岩掘进系统，解决了采掘失衡难题；智能变频节能传动支撑矿山节能，采煤机装备全面国产化创新与智能制造能力快速提升，研发的 30 多种煤矿机器人在陕煤柠条塔煤矿集群应用，取得良好效果。煤矿智能化技术快速迭代发展，分析了煤矿数据流分类与关联，提出了煤矿智能化总体技术架构与“分级抽取−关联分析−虚实映射”的数据处理基础理论，综述了煤矿智能化系统耦合与迭代开发进展以及煤矿智能化技术标准体系建设进展，提出包括构建以“煤智云”为基础的数据价值生态，推进复杂条件智能开采工艺与装备及煤矿机器人集群研发，建设系统智能与人文智慧融合的煤矿智慧生态的煤矿智能化发展思路，为企业高质量发展指明了技术方向。

关键词: 中国煤炭; 综合机械化; 煤矿智能化; 液压支架; 综采装备; 智能开采控制技术

中图分类号: TD82; TD42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253−2336(2023)01−0001−18

Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publication of *Coal Science and Technology*

WANG Guofa[1], DU Yibo[2,3], XU Yajun[2,3], REN Huaiwei[2,3], ZHANG Desheng[2,3], PANG Yihui[2,3]

(1. *China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing* 100013, *China*; 2. *CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing* 100013, *China*;
3. *Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing* 100013, *China*)

收稿日期: 2022−10−31 **责任编辑:** 周子博 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2022-1801

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51834006)

作者简介: 王国法(1960—), 男, 山东文登人, 中国工程院院士, 中国煤炭科工集团首席科学家, 博士生导师。E-mail: wangguofa@tdkcsj.com

Abstract: The paper reviewed the development of *Coal Science and Technology* in the past 50 years which promoted and witnessed the progress and innovation practice of the coal mining technology and equipment in China. Furthermore, the innovation process from coal mine mechanization to coal mine intelligence was expounded and the research and development of coal machine equipment technology which supports the reform of coal development process was analyzed emphatically. Finally, the paper summarized the iterative development of smart coal mine and put forward some ideas for future development trends. Coal mining technology has experienced four major technological changes from blasting mining, ordinary mechanized mining, comprehensive mechanized mining, intelligent mining, through continuous independent research and development and innovation, to achieve great progress in coal productivity. Research and development of coal machinery equipment supports the reform of coal development technology. Hydraulic support is the core of fully mechanized mining. The innovation of supporting theory, design method, frame structure and manufacturing technology supported the breakthrough of hydraulic support products from low-end to high-end. Significant progress has been made in the short board technology for coal mining machines such as manufacturing process, model adaptability, monitoring system and so on. The full series of coal mining machines from 0.8 to 9 m could meet the requirements of efficient production of Chinese coal mines, and the intelligent level was constantly improving. The key technologies of large volume and long distance working face scraper conveyor were constantly broken through. The 450 m ultra-long working face scraper conveyor with large volume runs reliably. The intelligent frequency conversion integrated machine drives instead of traditional CST and other drives, saving energy by nearly 30%. Innovations such as permanent magnet direct drive, arylon belt, and belt conveyor without foundation for large volume belt conveyor showed significant advantages in energy saving, reliability, and intelligence. Electro-hydraulic control and unmanned intelligent mining control technology develop rapidly, and the domestic SAC hydraulic support electro-hydraulic control system, SAM face automation system and SAP intelligent liquid supply system were widely used. To solve the problem of mining imbalance, it had developed the “driving and anchor machine + anchoring and breaking + large-span reloading” intellectualized driving and anchor machine, boom-type roadheader + temporary support system and TBM full face hard rock tunneling system. Intelligent frequency conversion energy-saving transmission supports energy saving in mines, comprehensive domestic innovation of coal machinery equipment and rapid improvement of intelligent manufacturing capacity. More than 30 kinds of coal mine robots had been developed and applied in NingTiaoTa coal mine of Shaanxi coal, achieving good results. The intelligent technology of coal mine developed rapidly and iteratively. This paper analyzed the classification and correlation of coal mine data flow, proposed the overall technical framework of smart coal mine and the basic data processing theory of “hierarchical extraction- association analysis-virtual-real mapping”, summarized the coupling and iterative development progress of smart coal mine system and the construction progress of smart coal mine technical standard system, and finally puts forward the development idea of intelligent coal mine. It is necessary to build a data value ecology based on “coal intelligence cloud”, push forward the research and development of intelligent mining technology and equipment under complex conditions and coal mine robot cluster. Furth more a coal mine intelligence ecology that integrates system intelligence and human wisdom should be built, which could boost the high-quality development of enterprises.

Key words: China coal; comprehensive mechanization; intellectualization of coal mine; hydraulic support; fully-mechanized equipment; intelligent mining control technology

0　引　　言

煤炭是我国主体能源，煤炭工业是支撑国家经济社会高质量发展的基础产业。近 50 年来，煤炭工业经历了从炮采、普通机械化、综合机械化向智能化发展的重大技术变革。煤炭开采技术装备作为煤炭生产力的核心，其生产能力与制造质量得到飞速发展，促进了煤炭开采工艺变革和生产力的巨大进步，为安全生产提供根本保障。煤炭工业构建了以企业为主导的产学研深度融合，科技成果有效转化，采高与效率不断突破，智能化核心技术难题不断破解。《煤炭科学技术》作为煤炭行业新技术、新成果、新产品的主要发布媒体，为煤炭科技成果的推广提供了重要学术传播平台，助力和见证了中国煤炭工业的重大技术变革。

50 年来，煤炭工业为国家提供了 800 多亿 t 煤炭，保证了国家经济社会发展的能源需求。“十四五”及未来较长一个时期，能源需求仍将保持稳定增长，煤炭仍将长期发挥国家能源安全“压舱石”和为实现“双碳”目标兜底保障作用。在下个百年新发展阶段，煤炭科技创新将使煤炭成为最有竞争力的清洁能源和高端原材料。

1　《煤炭科学技术》推动和见证中国煤炭工业的 4 次重大技术变革

《煤炭科学技术》创刊于 1973 年，这 50 年是我国煤炭行业起步、加速、稳定发展的 50 年，也是我国煤炭科学技术持续发展的 50 年。《煤炭科学技术》

见证了我国煤炭工业从炮采、普通机械化开采、综合机械化开采、智能化开采的具有里程碑意义的技术革命。2021 年全国煤炭产量 41.3 亿 t，相比 1975 年的 4.2 亿 t，增长了 9.8 倍，为国家经济社会发展提供 70% 以上的一次能源。目前，全国智能化采掘工作面已达到 813 个，与 2020 年相比增加 65%，其中，采煤工作面为 477 个，与 2020 年相比增加 43%；掘进工作面为 336 个，与 2020 年相比增加 109%。已有 29 种煤矿机器人在 370 余处矿井现场应用。煤矿百万吨死亡率连年下降，从 1973 年的 9.2 下降至 2021 年的 0.044。

1973 年 2 月，由开滦煤矿唐山矿在创刊第 1 期首撰的论文“挖掘矿井潜力提高生产水平”（我国代表团于 1972 年 9 月 4–9 日在罗马尼亚布加勒斯特召开的第七届国际采矿会议上所做的报告）拉开了《煤炭科学技术》发展的序幕。

自 1973 年创刊以来，《煤炭科学技术》共出版了 50 卷 580 期，刊登了煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机电与自动化、煤矿信息化、煤炭加工与利用、煤矿环境保护等专业的学术性或技术性论文共计18 100 余篇，营造了百花齐放、百家争鸣的学术氛围。近年来，期刊以“内容为王、质量第一、强化品牌、争创一流”为指导思想，以“刊–网–号”媒体融合为抓手，持续深化期刊改革，不断创新办刊思路，提升期刊服务能力。围绕国家重大战略需求和行业绿色、智能、安全、低碳的发展要求，策划了多个热点专题，集中报道行业最新原创成果。主办的“国际矿业青年科学家论坛”“煤矿智能化技术创新论坛”“煤炭科学技术大家谈”等品牌学术活动得到了行业的广泛认可。发起成立的行业第 1 个青年学者学术共同体，搭建了青年学者学术交流的平台，助力优秀青年人才成长。开展的走进产学研单位科技论文写作与发表服务深受科技工作者好评。

期刊学术质量和各项评价指标不断攀升。《煤炭科学技术》已成功被美国《工程索引》（Ei Compendex）、荷兰《文摘与引文数据库》（Scopus）、中国科学引文数据库（CSCD）等 10 余个国内外重要数据库收录。主要期刊引证指标跃升至学科第 2 位，荣获“中国出版政府奖（提名奖）”“中国百强报刊”“中国精品科技期刊”“中国国际影响力优秀学术期刊”等称号；入选中国科协地学领域和煤炭领域高质量科技期刊分级目录 T1 类期刊；1 篇论文入选“第五届中国科协优秀科技论文”，每年有 22 篇论文（满额）入选“中国精品科技期刊——领跑者 5000”。

50 年披荆斩棘，50 年砥砺奋进。《煤炭科学技术》见证了我国综采技术与装备从消化吸收到自主研发的曲折发展阶段，见证了我国高端成套技术与装备成功引领世界综采技术的发展。随着我国工业的跨越发展，煤炭工业正在步入新的发展阶段。2020 年 2 月，国家发展和改革委员会等八部委《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的发布，标志着我国煤矿智能化时代全面开启。

作为煤炭系统的代表性品牌刊物，《煤炭科学技术》记录着中国煤炭工业 50 年来的繁荣发展，记载了国内外煤炭科学技术的新成就、新经验、新动向及反映煤炭生产建设与综合利用过程中的重大科技问题，推进了煤炭科技信息传播，也见证了 50 年来我国煤炭行业日新月异的产业升级。在全国奋力建设世界一流科技期刊目标的推动下，《煤炭科学技术》将继续肩负起时代赋予的使命和任务，坚持守正创新，重点报道煤炭领域及相关交叉学科领域的前沿和先进实用性成果，引导社会重新认识煤炭行业、煤炭科学家和煤炭高科技创新贡献，向全世界讲好中国煤炭故事，提升我国在世界能源与矿业领域的科技话语权，助力实现中国科技期刊强国梦。

2　从煤矿机械化到煤矿智能化的创新历程

2.1　从普通机械化开采到综合机械化开采

2.1.1　综采技术与装备发展历程

50 年来，煤炭开采技术历经了从炮采、普通机械化开采、综合机械化开采、智能化开采 4 次重大技术变革[1]，科技进步与煤机装备的快速发展支撑我国原煤产量由 1975 年的 4.13 亿 t 提升至 2021 年的 40.7 亿 t，井工煤矿原煤工效超过 180 t/工，而百万吨死亡率则由 9.39 降至 0.044（图 1），煤炭为我国经济社会发展提供了坚实的能源保障。

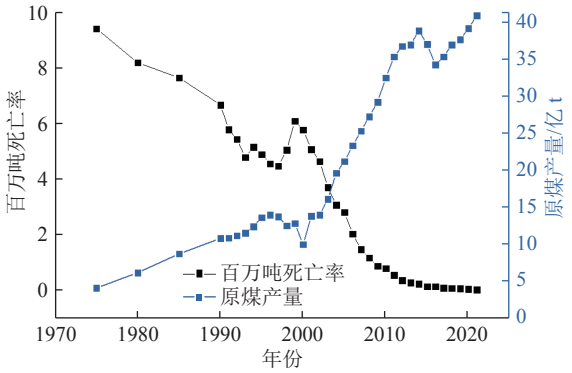

图 1　原煤产量与百万吨死亡率

Fig.1　Raw coal production and mortality in millions of tons

20 世纪 70 年代，我国煤炭开采从木支柱和金属摩擦支柱支护顶板+放炮落煤向应用单体液压支柱代替木支柱和摩擦支柱支护+放炮落煤（炮采）和采煤机落煤（高档普采）变革，80 年代初开始先后从国外引进了 140 多套综合机械化开采装备，开展综合机械化开采。由于我国煤层赋存条件复杂多样，引进的国外综采技术装备并不能适应一些矿井的煤层赋存条件，出现各种问题，综采效率水平较低，综采技术推广阻力很大。

多年来，在消化吸收国外技术装备的基础上，经过不断的自主研发与创新，实现了煤炭生产力的巨大进步。采用液压支架对工作面顶板岩层进行可靠支护是综合机械化开采与普通机械化开采的主要差异，因此液压支架与围岩的相互作用关系及液压支架对围岩的适应性直接关系综采技术的成败。液压支架是综采技术装备的核心，从“六五”到“十三五”期间我国都把以液压支架为龙头的综采装备列入国家攻关研发计划，持续推进综采理论、技术和装备创新。钱鸣高院士[2] 提出了工作面上覆岩层断裂结构的“砌体梁理论”与“关键层”理论力学模型，宋振骐院士[3] 提出了“传递岩梁”理论模型，王国法院士[4] 提出了液压支架与围岩的“三耦合”理论及液压支架设计方法，为工作面围岩控制及液压支架研发奠定了理论基础。

1980—1990 年，我国在引进、消化、吸收的基础上，研制以中厚煤层掩护式液压支架为主体的成套综采装备，在国有统配煤矿推广综合机械化，在少数工作面实现年产百万吨，显示了综采技术的比较优势。1990—2000 年，综采进入加快发展阶段，综采综掘等主要煤机装备国产化在困难中前行，初步建立起煤机装备制造技术和产业体系。神东等新矿区建设采取了全面引进国外装备的策略，其进口装备与国产装备价格差达数倍，一些配件价差甚至达数十倍，国外煤机巨头在我国高端煤机市场形成了市场垄断和价格垄断，一定程度上倒逼国内煤机装备制造业的发展。2003 年，我国首次开展 5.5 m 大采高电液控制高端液压支架的研发，成功研发了 ZY8640/25.5/55D 电液控制大采高液压支架，在晋城寺河煤矿替代进口产品，成功应用，工作面日产达到 3 万 t。2005 年依托国家重大技术装备研发专项“年产 600 万吨综采成套装备研制”，研发了高可靠性电液控制液压支架、采煤机、刮板输送机、转载机、破碎机、大运量带式输送机等成套采高 5 m 综采装备，在神华万利煤矿应用成功，达到和超越进口装备水平，获得国家科技进步二等奖。这一系列综采装备研发实践，提振了高端装备国产化信心，综采技术和装备得到飞速发展。

2.1.2　不断突破大采高综采采高和效率

“十一五”期间，实施国家重点科技支撑计划项目“年产千万吨级矿井大采高综采成套装备及关键技术”，研发了 ZY12000/28/64 型大采高液压支架，在晋兴能源斜钩煤矿进行了 6.0 m 超大采高综采，工作面年产量达到 1 000 万 t；2009 年依托智能制造专项，开展智能综采系统研发，研发了 ZY18800/32.5/72D 型超大采高液压支架及综采成套技术装备，在陕煤红柳林煤矿将工作面最大一次开采高度提升至 7.0 m，实现采高和效率的双突破；2014—2016 年，为解决西部矿区浅埋深、厚度为 6 ~ 8 m 的坚硬特厚煤层高效、高采出率开采难题，研发了 ZY21000/38/82D 型超大采高液压支架及成套国产装备，在兖矿集团金鸡滩煤矿首次将工作面一次开采高度提升至 8 m，工作面月产达到 150 万 t，采高和效率指标都刷新世界综采纪录，实现大采高综采技术的重大突破[5]。2018 年后，神东上湾煤矿等持续开展 8 m 以上超大采高综采研究与实践，促进了超大采高技术的推广应用，8 m 以上超大采高综采技术装备逐步成熟。理论和技术的突破及制造能力的进步，为不断突破采高极限奠定了基础。目前，正在研发最大支护高度达到 10 m 的超大采高综采成套装备 ZY29000/45/100D 型，如图 2 所示，该样机正在进行全方面试验和完善。

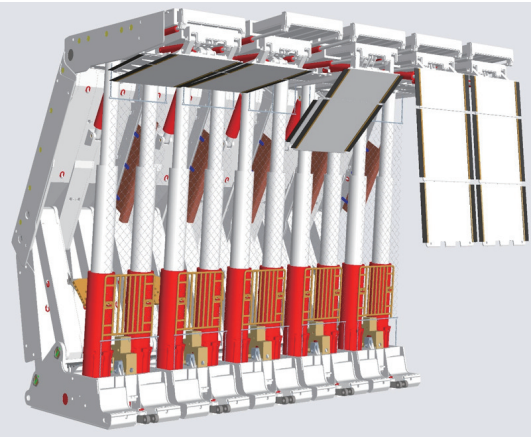

图 2　ZY29000/45/100D 型超大采高液压支架

Fig.2　ZY29000/45/100D super large mining height hydraulic support

2.1.3　特厚煤层综放开采不断创新发展

放顶煤开采是解决特厚煤层高效开采的有效方法，1986 年，首次在窑街二矿成功应用特厚煤层水平分段放顶煤开采，随后，在平顶山、潞安、兖矿等矿务

局应用放顶煤开采技术与装备。放顶煤液压支架架型结构是综放效果的决定性因素，我国综放液压支架经历了高位放顶煤液压支架、中位放顶煤液压支架、低位放顶煤液压支架 3 种架型的演变，如图 3 所示。

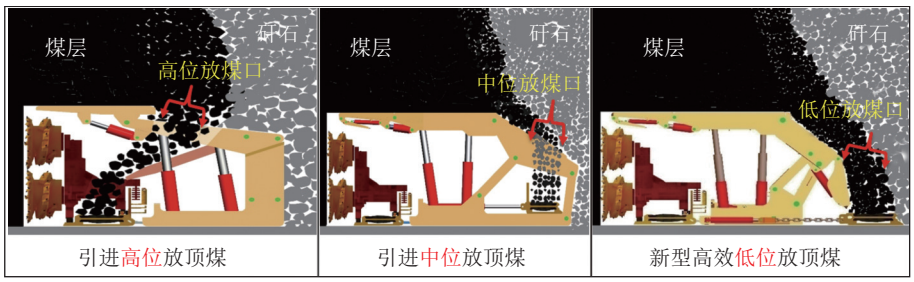

图 3　3 种不同架型的综放液压支架

Fig.3　Three different rack types of hydraulic supports

为提高综放工作面的顶煤放出率及放煤效率，“九五”“十五”期间进行了多种型号的综放液压支架研发与推广应用。90 年代初创新研发了新型低位放顶煤液压支架，淘汰了高位和中位放顶煤液压支架，使顶煤采出率和放煤效率显著提高。2001 年，通过国家技术创新项目“600 万吨综放工作面设备配套与技术研究”，研发了世界首套两柱掩护式放顶煤液压支架，并首次在综放液压支架上装备电液控制系统，实现了综放工作面液压支架的自动化控制，工作面最高月产达到 64 万 t，创出当时的高产高效新纪录，并实现成套专利技术出口到澳大利亚等采煤国家。2008 年，通过“十一五”国家科技支撑计划项目“特厚煤层大采高综放开采成套技术与装备研发”，针对同煤集团塔山煤矿 14 ~ 20 m 特厚煤层赋存条件，创新研制了当时国内外首套最大支撑高度为 5.2 m 的大采高综放液压支架（ZF15000/28/52），解决了 14 ~ 20 m 特厚煤层超大开采空间顶板动载矿山压力、超高煤壁稳定性控制、超厚顶煤冒放性等技术难题，实现了特厚煤层大采高综放工作面年产量 1 000 万 t，获得国家科技进步一等奖。

2012 年，在国家 863 计划项目“两柱式超强力放顶煤液压支架研制”的资助下，针对蒙陕矿区坚硬特厚煤层赋存条件研发了两柱强力大采高放顶煤液压支架，提高了坚硬特厚煤层顶煤的放出率与放出效率。2019 年，针对金鸡滩煤矿东翼盘区浅埋深、坚硬、特厚煤层赋存条件，提出了特厚煤层超大采高综放开采技术，研制了世界首套 7 m 超大采高两柱掩护式综放液压支架（ZFY21000/35.5/70D），如图 4 所示，工作面最大割煤高度达到 6.5 m，实现了工作面最高日产 7.91 万 t、最高月产达 202.01 万 t，工作面资源采出率达到 92.06%，突破了坚硬特厚煤层安全高效开采难题。

图 4　ZFY21000/35.5/70D 型超大采高综放液压支架

Fig.4　ZFY21000/35.5/70D super large mining height comprehensive discharge hydraulic support

2.2　从综合机械化开采到智能化开采的技术创新

液压支架电液控制是综采工作面实现安全高效、自动化和智能化的基础，英国、德国于 20 世纪 70 年代开始研发电液控制技术，但直到 1985 年电液控制系统才逐渐开始应用。1985—2005 年是我国液压支架电液控制系统的国产化研发阶段，但一直未能解决其可靠性关键技术。2003 年开始，煤炭科学研究总院北京开采所与德国 Maco 公司成立天玛合资公司，开发液压支架电液控制系统，在国内主要矿区推广使用，促进了电液控制技术的推广。2008 年，天玛公司创新研发成功首套具有自主知识产权的国产 SAC 电液控制系统，并陆续研发 SAM 工作面智能化系统、SAP 智能水基动力远程供液系统等，产品迅速在全国煤矿推广使用，推动了从综合机械化开采到智能化开采的发展[6]，截止 2022 年底已销售近 900 个工作面（套）。

2012—2014 年，在黄陵一号煤矿创新研发应用工作面采煤机记忆截割、液压支架自动跟机移架等技术，首次实现了较薄煤层“工作面有人巡视、无人操作、远程干预控制”的智能化开采，大幅降低了工

作面人员数量及劳动强度，提高了工作面开采效率。在此基础上，坚持不断创新发展，在黄陵矿区中厚煤层和厚煤层实施智能开采，形成“工作面自动控制+远程控制采煤”的智能化开采黄陵模式，在全国得到了广泛推广应用，2020 年获得国家科技进步二等奖。

近年来，全面推进煤矿智能化建设，开展煤矿巨系统智能化融合，加强基于精准地质模型的智能地质保障技术研发，如图 5 所示，通过构建采煤工作面的动态精准地质模型与开采系统模型，多信息融合提高智能开采自适应能力。相关技术在神东榆家梁煤矿、陕煤黄陵一号煤矿、阳煤新元煤矿、淄矿郭屯煤矿等进行了应用，取得了较好效果。受制于地质探测技术与装备的发展瓶颈，以及工作面设备可靠性、控制精度等，目前，基于精准地质保障的智能开采技术仍处于探索试验阶段，仍有诸多技术瓶颈有待攻克。

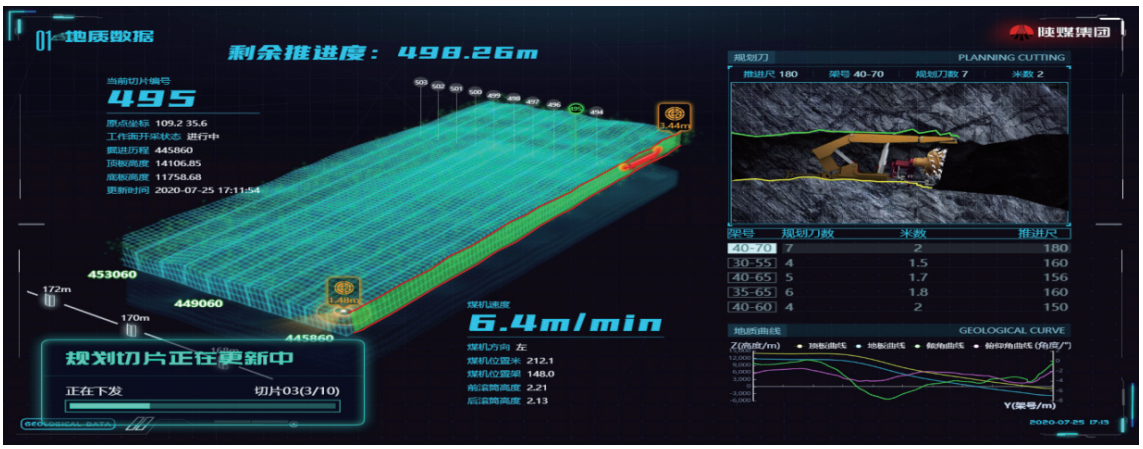

图 5　基于透明地质的智能化开采

Fig.5　Intelligent mining based on transparent geology

3　采煤机装备研发支撑煤炭开发工艺变革

3.1　液压支架从低端到高端的技术突破

在综采发展过程中，液压支架始终是焦点。我国液压支架研发经历了引进消化、吸收仿制、自主设计、创新引领等发展阶段[7-8]，在支护理论、设计方法、架型结构、材料研发、制造工艺、控制方法等方面取得一系列突破[9]。

1）支护理论的突破。确定液压支架支护强度和工作阻力历来是液压支架选型设计的重点，液压支架与围岩“强度、刚度、稳定性”三耦合理论的提出[10-11]，提高了液压支架选型设计的合理性和科学性。在此基础上相继推导出两柱掩护式支架顶梁前后比等重要参数的合理阈值，从理论上解决了两柱掩护式支架立柱与顶梁铰接点的合理布置位置[12]；修正了两柱掩护式支架承载能力区公式，计算了支架与与围岩刚度耦合公式（图 6），得出了提高液压支架支护阻力，防止支架出现“低头”或“高射炮”等不良支护姿态的关键措施[13-14]；基于大倾角工作面液压支架刚柔组合倾覆力矩平衡的支护原理，建立了大倾角工作面液压支架与工作面围岩稳定性耦合状态方程，给出了大倾角液压支架“自撑-邻拉-底推-顶挤”的理论依据，实现了大倾角工作面液压支架与围岩稳定性耦合定量分析[15]；建立了液压支架群组支护阻力与工作面长度量化关系，给出了液压支架群组支护阻力解析公式，解释了超长工作面“三峰值”来压特性[16-17]（图 7），形成了系统的液压支架支护理论体系。

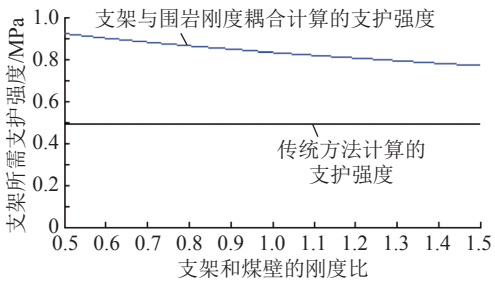

图 6　支架与围岩刚度耦合公式计算结果

Fig.6　Results of coupling formula of stiffness of bracket and surrounding rock

2）设计方法的突破。1990—2000 年，随着计算机技术的推广普及，开发了液压支架二维参数化、可视化动态设计软件，利用软件进行液压支架连杆机构优化设计和强度计算，大大提高了设计效率。在此基础上，以三维参数化设计软件为基础，开发了基于骨架模型的三维参数化设计软件[18]，采用自顶向下设计方法进行支架整体布局设计、参数优化、结构

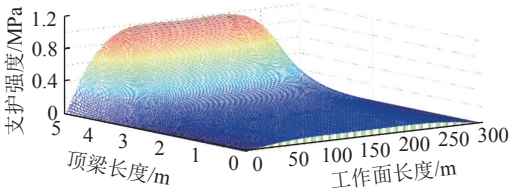

图 7　超长工作面液压支架支护强度“三峰值”

Fig.7　Extra long working face hydraulic support support strength “three peaks”

设计和实体模型构建[19-21]，解决了液压支架设计协同作业难题。在支架三维实体模型的基础上，基于液压支架型式试验标准，采用有限元软件分析液压支架结构强度，提高了液压支架设计效率与计算准确性。经过多年研究与探索，形成了较为成熟的液压支架三维动态可靠性优化化设计方法。

3)架型结构的突破。液压支架架型结构包括机构学结构和部件结构，是决定支护效果和支护可靠性的关键。从 2003 年起，随着高端综采装备国产化推进，液压支架架型结构设计取得一系列突破，先后研制出适应 0.6 ~ 1.3 m 薄煤层液压支架、1.3 ~ 3.5 m 中厚煤层液压支架、3.5 ~ 9.0 m 厚煤层大采高和超大采高综采液压支架、60°大倾角综采支架、20 m 特厚煤层大采高放顶煤液压支架等系列产品，开发了具有独立自主知识产权的新型放顶煤液压支架、超大伸缩比薄煤层液压支架、超大采高综采支架和各种特殊液压支架新架型，支撑形成了具有中国特色的薄煤层、中厚煤层、厚煤层一次采全厚综采、特厚煤层综采放顶煤开采成套技术与装备体系。

4)高端液压支架制造能力的突破。2000 年开始，煤炭行业进入“黄金”10 年发展阶段，随着煤炭产能的大幅增加，高端液压支架需求量呈逐年攀升的态势，推动了高端液压支架制造能力的快速发展，促进了多个大型液压支架试验台、大规模液压支架生产企业的建设。2010 年，在国家智能制造专项支持下，开展了液压支架大型结构件智能焊接车间技术研发，建起了国内外首个液压支架大型结构件机器人智能焊接车间，根据液压支架结构特点，生产线自动上料、转运、装夹、拼装、自动焊接、自动检验，实现液压支架结构件自动化焊接生产，保证了焊接质量稳定可靠。为了解决液压支架在井下腐蚀性环境中锈蚀严重难题，研发应用耐腐蚀高强度钢板，材料从 Q460、Q550、Q690、Q890 等不断升级，突破了液压支架用高强度低合金结构钢、焊接材料及相关焊接工艺难题[22-23]。创新立柱不锈钢包敷、激光表面熔敷、立柱内壁熔铜等新工艺，提高了立柱和千斤顶的可靠性[24-26]。建设了电液控制元部件智能制造工厂，突破了高精度电磁先导阀、主控阀等制造瓶颈，实现高端液压支架完全国产化，并出口到美国、德国、澳大利亚、印度、俄罗斯、土耳其等世界主要采煤国家。

3.2　采煤机技术短板的攻坚与新进展

为适应我国煤层地质条件多样性的特点，经过近半个世纪的研发与实践，形成以滚筒式采煤机作为主要型式的采煤机体系，在设计方法、材料研发、机身布置、电动控制和可靠性等方面取得突破，产品基本满足了国内开采高度从 0.8 ~ 9.0 m 不同开采需要。我国自主研制的超大采高采煤机如图 8 所示。

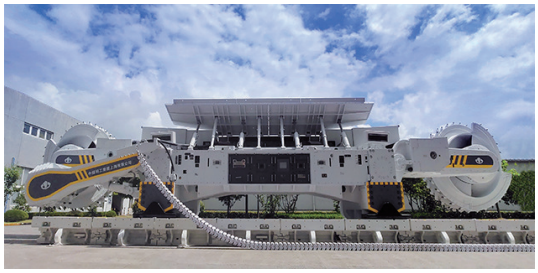

图 8　8 m 超大采高采煤机

Fig.8　8 m super large shearer

1)采煤机设计制造手段不断增强。突破平面力学分析方法的缺陷，基于三维实体模型分析铸造缺陷、优化采煤机结构(图 9)，采用有限元和离散元分析方法研究机身强度和滚筒装煤效果，提高计算结果的准确性；突破采煤机材料研制难题，研发高强度复杂铸造壳体调质处理工艺和锻造材料精炼方法，细化金相组织晶粒，提高采煤机结构强度和运行可靠性。

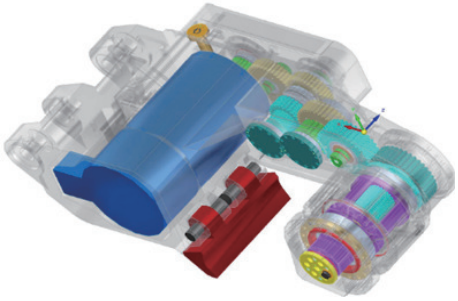

图 9　采煤机虚拟设计

Fig.9　Virtual design of shearer

2)薄煤层采煤机配套能力和智能化水平不断提升。通过改变电机布置方式来解决薄煤层采煤机机面高度较高难题，成功研制截割电机并行布置(图 10)、多电机纵横布置(图 11)、以及半悬和全悬机身等多种不同机身布置方式的薄煤层滚筒式采煤机，装机功率 238 ~ 1 200 kW，最小采高 0.8 m，满足了薄和较薄煤层开采需要。

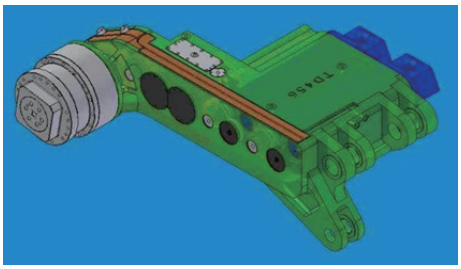

图 10　截割电机并行布置

Fig.10　Parallel arrangement of cutting motors

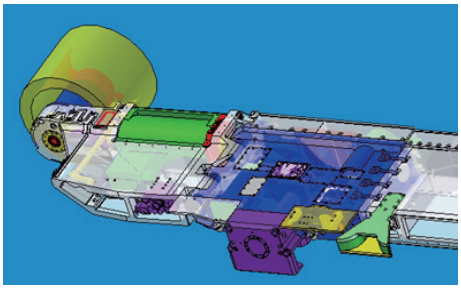

图 11　多电机纵横布置

Fig.11　Multi-motor vertical and horizontal arrangement

3)智能化水平不断提升。采用振动、温度、噪声、压力、低频超宽带电磁波等多种传感器感知煤岩条件变化多信息融合，根据检测结果自动调整滚筒高度和截割路径，实现采煤机根据煤岩条件变化自适应截割；研发了采煤机截割滚筒干涉检测装置和基于惯导的开采水平控制技术，安装压力、温度、位置、流量、摆角、振动、张力等传感器，全面感知采煤机运行状态，实现采煤机滚筒防碰撞和全生命周期管理。采用惯性导航、机器视觉位姿监测等，通过采支运“三机”协同自动控制，实现采煤机水平直线度控制。

3.3　不断突破大运量长运距工作面刮板输送机关键技术

我国刮板输送机已形成了完整的系列产品(图 12)，长运距、大运量、高可靠性、智能化是方向发展。目前，最大单驱动功率达 2 000 kW、最大运输长度 500 m、最大运量 6 000 t /h，能够满足采高 0.8 ~ 9 m 一次采全高以及 20 m 以上放顶煤等各类采煤工作面的运输条件，并能适应 400 m 以上超长工作面运输可靠性要求。刮板输送机核心技术创新取得重大进展。

1)变频软启动技术。软启动技术是刮板输送机的核心技术，对于大功率、长运距刮板输送机的正常启动和平稳运行起到至关重要的作用。刮板输送机软启动方式从双速电机、耦合器、可控起动传动装置 (Controlled Start Transmission,CST)、阀控耦合器、

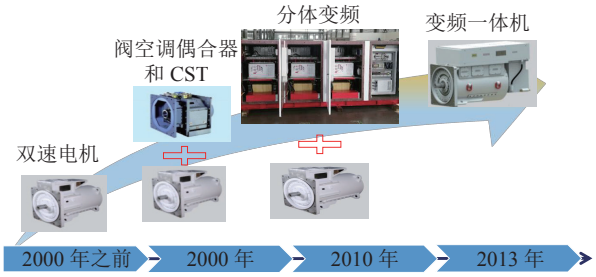

图 12　大功率输送设备驱动技术变革

Fig.12　High-power conveyor equipment drives technological change

分体式变频驱动发展到变频一体机。变频一体机实现了机电一体化，节能近 30%，是近年来刮板输送驱动技术的重大创新，达到国际领先水平，带来了传动领域的重大技术变革，逐步取代了传统的耦合器、CST 等软启动方式。

2)关键元部件。高性能元部件是保障刮板输送机连续可靠运行的关键。为满足超大采高工作面重型刮板输送机的要求，当前中部槽最大规格已达 1 400 mm× 2 400 mm，链条直径 60 mm，过煤量突破了 40 Mt[27]；薄煤层工作面刮板输送机采用扁平链结构，轻量化减阻特性刮板组件，便于设备配套和驱动部布置；为适应超长运距的要求，采用大规格紧凑链，在机头(尾)架驱动单轴承外置式机械结构，提升了链轮组件整体强度。

3)机尾动态张紧技术。链条张紧是减少链条断链事故发生几率、延长链条及链轮轴组使用寿命的主要措施。机尾动态张紧技术融合刮板输送机转矩、机尾油缸压力、油缸位移以及采煤机位置、采煤机方向等信息，经过分析判断，控制液控系统来操纵机尾千斤顶动作，进而控制链条张力达到合适值。基于链条变形补偿技术的链条张力动态管理策略很好地解决了机尾动态张紧问题。

3.4　大运量带式输送机技术的创新与发展

带式输送机随采煤技术机械化、自动化和智能化不断发展，“十一五”期间，煤矿带式输送机以大运量、长运距、高带速、大功率为主要特征，重点提高带式输送机整机及主要元部件的可靠性，采用调速液力耦合器、CST、电软启动技术和多点多机驱动技术，实现了单机的大型化；“十二五”期间，煤矿带式输送机在大型化发展的基础上应用了变频调速、自动化集中控制、综合保护、自动监测、故障诊断等关键技术，提升了煤矿带式输送机自动化水平；近年来，永磁直接驱动技术在煤矿带式输送机得到广泛应用，轻量化低阻力输送带、低阻力高速托辊等节能关键

技术取得突破[28]，智能、高效、无人、可靠成为带式输送装备的重要攻关方向。

1）驱动技术。与刮板输送机类似，永磁变频同步直驱系统作为高效节能的新型软启动和功率平衡技术，是带式输送机最显著进步之一，已逐步取代原有的液力耦合器、CST 和交流变频调速等带减速器的传统驱动方式。对于整个驱动系统而言，永磁变频同步直驱技术取消了减速器，不仅提高了系统的传递效率，还大幅减少了现场设备维护量，提高了设备可靠性。

2）新型输送带。输送带的强度和重量是运行可靠性，节能降耗的重要因素。芳纶输送带质量更小（同等覆盖胶厚度条件下约为钢丝绳芯输送带的 40%），带体更薄，成槽性更好，易维护，耐冲击，整体带芯压力均匀一致，具有强度高、密度低，耐高温、长寿命等显著特点，近年来已广泛应用于长距离大运量输送机。

3）监测监控技术。监测监控技术主要在体现在 3 个方面：①准确地测量煤流量，基于瞬时煤流量建立煤料分布模型，实现带式输送机、给煤机、破碎机、煤仓等设备多机协同联动，远程集中控制和智能调速；②采用机器人等智能装置进行设备运行状态日常巡检，包括运行工况检测、人员违规监测、异物识别（大块煤、堆煤、锚杆）等，实现无人值守；③解决运行工况检测及机电设备故障智能预警问题。

4）无基础带式输送机。无基础带式输送机是近年来发展的新技术之一，采用模块化设计，机头部分采用整体框架式结构，利用力的平衡原理，抵消带式输送机外力，达到整机不滑移、不翻转、无基础安装的目的，减少煤柱预留长度，缩短终采线需求。

3.5　电液控制和无人化智能开采控制技术快速发展

电液控制系统是综采自动和智能化的基础，是综采工作面高效协同运行的保障。自 2008 年研发成功首套国产化 SAC 型液压支架电液控制系统以来，相继研发了 SAM 型工作面自动化系统和 SAP 型智能供液系统，形成了较为完整智能开采控制技术体系，产品全面快速推广应用，有效支撑了智能开采技术的快速发展[29-30]。

1）SAC 型液压支架电液控制和 SAM 型自动化系统迭代发展。应用 SAC 型电液控制系统成功实现了液压支架自动跟机、姿态检测与控制、自动化放煤、自动压力补偿等功能，智能制造技术使阀的可靠性不断提高，系统平均无故障时间达 6 000 h 以上。电液阀涵盖了 200、320、400、500、1 000 L/min 等多种系列产品，试验寿命超过 30 000 次。安全阀涵盖了 100~2 000 L/min 等系列产品，试验寿命达到 10 500 次，开启关闭压差小于 3 MPa，动态响应时间小于 10 μm，在研安全阀最大流量为 4 000 L/min。

SAM 型自动化系统是面向煤矿综采工作面自动化控制与智能化开采的软硬件结合的成套系统，是液压支架智能控制系统的核心部件，已发展到 2.0 版本。支架控制器内置计算机系统，通过其控制程序进行解析，向驱动器发出支架动作控制指令，驱动器导通对应的电磁先导阀，将电信号转换成液压信号，并通过主阀将液压信号放大，推动油缸动作，从而实现对液压支架的控制。网络型液压支架控制器融合了原有电液控制系统、综采工作面自动化控制系统等功能，将高清摄像仪、各类传感系统直接接入控制器，采用自主知识产权的实时嵌入式操作系统，符合 EtherNet/IP 标准的工业实时以太网，实现了“一网到底”，将井下液压支架控制纳入工业互联网体系。有效解决了现有系统通讯链路复杂、速率低、实时性不足的问题。SAM2.0 系统以透明开采平台为感知基础，基于井下环网、工作面 WiFi 及 5G 专网构成的高速网络通道，利用网络型液压支架控制器对支架群组实现自动化跟机，集成了工况监测、远程控制、视频识别、基于透明地质的自主规划截割、数字孪生等功能，实现了工作面“自动跟机、远程干预、无人巡视、自主割煤”的无人化开采模式。

2）SAP 型大流量水基动力智能供液系统快速推广。按照需求导向，不断突破大流量乳化液泵站技术瓶颈，研发出系列超大流量、高压力、智能化乳化液泵，单泵流量 600、800、1 000、1 350 L/min，额定工作压力达到 40~42 MPa。研发了集水质净化、乳化液自动配比、乳化液泵站、管路系统、变频控制、背压补偿、参数精准监测、按需供液的远程集中智能供液系统，满足特大型智能化煤矿的动力需求。

3.6　高效掘进装备研发支撑破解掘采掘失衡

采掘失衡是行业长期难题，近年来，掘进配套自动化、智能化、一体化技术等高效掘进装备关键技术研发取得较快进展，初步构建了适用于不同煤层条件的煤矿智能化快速掘进工艺技术与装备体系，掘进效率显著提升。

1）在地质条件较好矿区，研发使用掘锚一体机为代表的煤巷快速掘进装备（图 13）。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，建设基于“GIS+三维可视化”的远程集控系统，如张家峁矿快速掘进最高

图 13　快速掘进成套装备

Fig.13　Rapid boring of complete equipment

月进尺突破 2 700 m；小保当矿护盾式智能掘进机器人，集智能截割、自动运网、自动钻锚等技术为一体，进尺能力达到 1 500 m/月。

2）在条件复杂的地区，采用悬臂式掘锚护一体机、临时支护系统，在黄陵等矿区进行推广应用，月进尺突破 600 m；中煤科工的钻锚一体化方案集锚杆自动支护、巷道表面喷涂护表、随掘变形动态监测于一体，将传统锚杆支护分为 6 道标准工序，目前已进入井下工业试验阶段。

3）在岩巷掘进方面，全断面掘进机 TBM（Tunnel Boring Machine）技术带来了掘进方式的重要变革。延长石油可可盖煤矿研发使用敞开式全断面掘进系统，具有安全性能好、成巷质量高、掘进速度快等优点，破解了岩巷掘进的难题，实现智能快速建井。

3.7　智能变频传动支撑矿山节能

在双碳目标下煤炭资源绿色低碳开发需求迫切，变频技术有效支撑了矿山机电产品矿山节能，应用到采掘、运输到分选全环节。采煤机、刮板输送机、乳化液泵站、通风机等高耗能环节已全面推广应用变频技术，显著减少吨煤能耗，尤其是变频一体机，永磁直驱滚筒等节能传动产品的出现，加快了变频技术推广应用的范围。

变频一体机采用直接转矩控制模式，启动转矩大、响应速度快、动态性能好，其低速大转矩启动提高了电机的最大转矩倍数和过载能力；在体积较小的防爆机壳中，变频输出直接到电机，对通讯系统电磁干扰小，不影响其他设备运行，比变频器+电机方式更有优势。

永磁直驱滚筒主要用于带式输送机等驱动，由永磁直驱滚筒和智能驱动器构成，解决了带式输送机启动、运行、检测、保护及调速中的问题，是机、电和算法高度结合的智能终端，智能外转子直驱传动系统降低了由滚筒、电动机、减速机、液力耦合器、联轴器、控制保护等设备组成的传统输送机传动系统的复杂性，筒既是电动机又是滚筒，满足了全系列化产品的发展要求。

3.8　采煤机装备全面国产化创新与智能制造能力建设

我国煤炭工业的发展带动了国产化采煤机技术与装备的迅速发展。近十年来，技术创新速度加快，新技术、新产品层出不穷，长期困扰的设备可靠性得以提高，在需求引导下，研发了系列国际领先的大型先进设备，支撑开采工艺技术改革，生产力大幅提高。矿井建设和巷道掘进大型先进装备不断研发，研制成功大功率反井钻机和竖井掘进机、大断面掘锚联合机组。露天开采大型装备国产化进展顺利，研制出大型矿用挖掘机、300 t 无人驾驶自卸卡车等设备。

在国家加快智能制造装备的创新发展和产业化政策支持下，建成了高端液压支架智能焊接车间[31-32]、智能化采煤机生产线、大型刮板输送机中部槽智能焊接生产线和高压大流量液压阀柔性生产线和智能工厂（图 14），高端采煤机制造能力全面增强，形成了高端智能化综采装备智能制造体系，大幅提高采煤机装备产品的性能及可靠性，全面提升采煤机综采成套装备的制造能力和产业化水平，推动我国煤炭行业的转型升级和可持续发展。

3.9　煤矿重点机器人产品研发与集成应用

应用机器人将工人从危险繁重的井下作业中解放出来是实现煤矿智能化的重要途径和目标。2019 年 1 月，我国发布了《煤矿机器人重点研发目录》，煤矿机器人研发进入快车道。2020 年，“大型矿井综合掘进机器人”“复杂地质条件煤矿辅助运输机器人”和“面向冲击地压矿井防冲钻孔机器人”列入国家“智能机器人”专项。当前煤矿机器人产品中，巡检类机器人逐步发展成熟，广泛应用于带式输送机、变电所等巡检作业；巷道辅助作业机器人研发全面启动，喷浆机器人、水仓清淤机器人等进入实际应用，钻孔机器人、管路安装机器人、冲尘机器人和巷道修复机器人等列入“十四五”重点研发计划；采煤和掘进工作面装备机器人化研发工作不断推进，群组协同性不断提升；以消防灭火机器人为代表的救援类机器人等也在同步发展过程中。

在煤矿机器人单机发展基础上，煤矿机器人研

图 14　煤机装备智能制造车间研发

Fig.14　Research and development of intelligent manufacturing workshop of coal machine equipment

发及应用逐渐向集群化发展，陕煤集团柠条塔煤矿研发了机器人集群管控平台，集成应用各类机器人 30 余台套，创新机器人集群应用关键技术，形成智能装备和机器人集群协同作业的新模式，如图 15 所示。

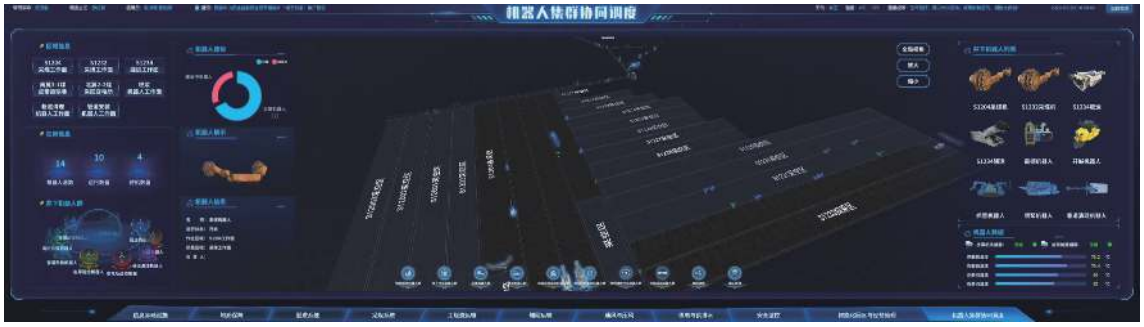

图 15　机器人集群调度平台

Fig.15　Robot cluster scheduling platform

4　煤矿智能化技术快速迭代发展

煤矿智能化是我国煤炭工业高质量发展的核心技术支撑与发展方向。随着《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的出台，围绕煤矿开采，在采煤、掘进、煤流运输、通风、智能安控等各煤矿关键生产系统的智能化水平得到极大发展，提高了生产效率，保障煤矿安全。随着煤矿智能化体系架构的不断完善，煤矿智能化基础理论及标准体系研究推动了煤矿开采智能化系统的耦合与迭代开发，构建了煤炭开采技术新生态。

4.1　煤矿智能的基础研究与理念创新

当前，根据煤矿生产数据需求，已初步建成了煤矿生产现场时空感知体系，对物理空间、地质构造、人员、装备等静态及动态的逻辑、属性、运行、过程信息进行不同频次的采集，以支持煤矿数字化。智能化煤矿复杂巨系统最重要的是要解决多源异构数据的处理问题。数据信息的载体不同、格式不同，单纯某一个方法无法实现多层次、多维度、多关联、多领域数据的融合处理。“分级抽取-关联分析-虚实映射”的数字煤矿智慧逻辑模型形成了多源异构数据处理理论方法[33-34]。

1）分级抽取。煤矿数据具有较强的时空关联性及事件关联性，根据其事件的关联关系，可分为煤炭生产数据流，环境安全数据流，围岩安全数据流，矿井水管控数据流，能耗管理数据流，设备管理数据流及调度管理数据流等构成。煤炭生产数据流以煤炭生产为核心，涵盖煤炭生产运输的各个流向，包括综采综掘生产过程信息及主运过程中的输送带、煤仓，箕斗及选运销等全流程煤炭生产环节过程数据；环

境安全数据流以风流为主线，对煤炭井下环境中的瓦斯、安全监控数据、防灭火数据进行归集；围岩安全数据流则针对煤矿顶板安全管理涉及的矿压、顶板离层仪、冲击地压监测系统等数据实现融合；矿井水管控数据流针对煤矿水资源涉及的数据进行处理，包括水文监测数据、供排水管控数据、水处理系统数据等，使水资源管控形成一体化；能耗管理数据流以供电数据为核心，对各设备电量信息进行管控；设备管理数据流对于矿井各类设备运行、故障情况、备件管理等进行归类管理；调度管理数据流则面向工人管理相关数据，包括生产计划、隐患排查、运输调度等。各类数据之间纵向根据事件流向形成时序数据，横向之间也存在因果关联与空间关联。

不同数据层级、通信方式、数据格式不同，但均包含如图 16 所示煤矿数据逻辑模型统一描述：根据管理、生产、安全的不同需求，提取对应的标签数据。标签数据来自于最初给定的“信息实体”，或通过自我更新机制产生。按照信息抽取粒度不同，可采用基于中心向量模型的方法、模式匹配的方法等。抽取过程中，抓取多个源数据库的消息，然后传递到对应的高级队列；通过获取所述源数据模块中高级队列中的消息，并将所需数据标签进行发送；最后通过消息处理模块将标签数据通过处理、转换之后应用于多个不同的应用目标端。

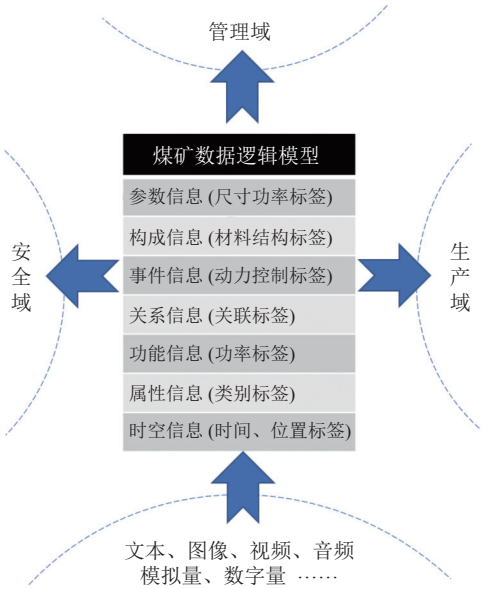

图 16　煤矿数据逻辑模型[33]

Fig.16　Logical model of coal mine data[33]

2）关联分析。关联分析是数据融合挖掘的基础，且针对不同的目标需要结合不同的专业分析模型。根据各类数据的不同层级，首先分层抽取各类数据特征，如设备信息、安全指标数据、人员信息等进入信息共享库。根据专业需求，通过矿压、瓦斯、设备故障、工艺流程等专业分析模型调用共享特征数据进行关联分析，支撑煤矿智能化预测决策需求。煤矿各类数据之间根据其生产工艺，时空关系产生关联，因此进行关联分析首先应实现各类数据的时空统一，在此基础上，基于理论模型、数学模型等构建各数据关联分析算法，进而进行数据融合挖掘，满足管理、安全、生产控制的需求。煤矿常用的关联分析模型包括生产工艺模型、统计关联模型、通风安全预警模型、矿压预警模型等。

3）虚实映射。数字孪生强调的是虚拟系统与现实系统的符合度，而数据逻辑模型的虚实映射则更关注二者的交互以及预测与控制的结合，如图 17 所示。“信息实体”是虚实映射的基础，分级抽取的信息通过关联分析形成的逻辑都被赋予到“信息实体”中。因而，与物理实体相比，信息实体是具备逻辑关系的“智能体”。这些智能体之间通过网状的逻辑关联来表达、分析、预测物理实体的行为。当某时、某种关联对应的行为符合预期目标，则这种关联就被记忆，并反向驱动实际的物理实体按照既定的关联完成行为动作。

4.2　煤矿智能化的顶层设计与架构

智能化煤矿顶层架构通过感知、执行、管理系统升级，以先进、智能、高可靠性的生产装备为基础，打造坚实可靠的工业运行体系；依托前沿技术实现产业赋能升级，以泛在网络和大数据云平台为主要支撑，以智能管控一体化系统为核心，以“资源化、场景化、平台化”为手段，以“全局优化、区域分级、多点协同”构建管控模式，通过基于一套标准体系，构建一个智能化管控平台、3 项基础设施（全面感知网络、大数据中心、四维空间位置服务）和八大智能系统，面向“生产、生活、生态”3 个业务领域实现全面智慧化服务，形成“1+3+8”架构的覆盖生产、生活、办公、服务各个环节的智慧、便捷、高效、保障的煤矿综合生态圈[35-37]，如图 18 所示。

1）智能化管控平台。综合智能管控平台是煤矿生产、运营的“大脑”，统一监控整个煤矿的日常运行过程，集中管理和操作各个子系统的数据，涉及工作面集控、瓦斯探测、通风、排水、防火、供电等多达 90 多个子系统。

综合管控的目标是打通信息孤岛，实现关键系统的协同控制，并在此基础上实现各系统的智能化应用。因此，需要整个系统形成统一的架构，理顺上下层次关系，保障各系统的协同性。通过统一规划

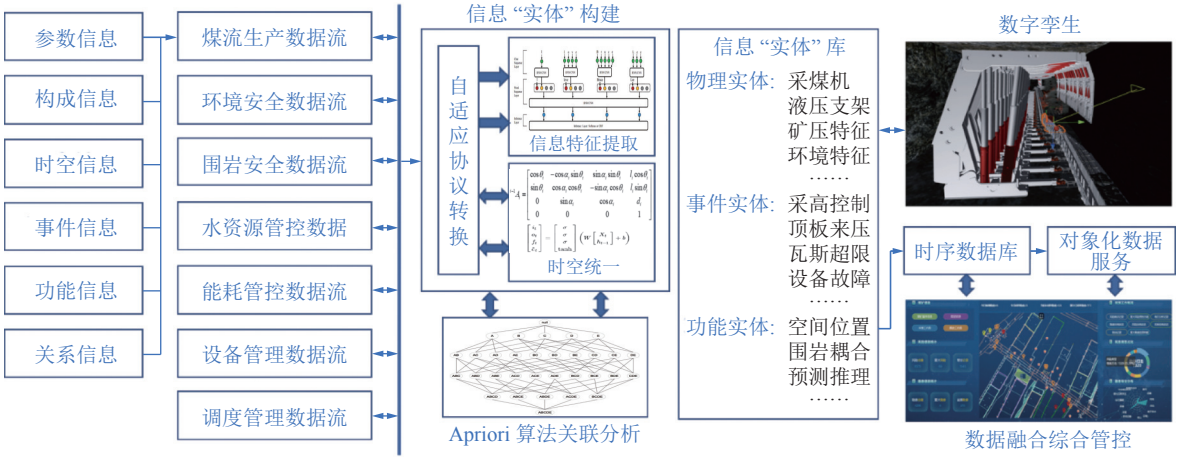

图 17　煤矿数据虚实映射模型

Fig.17　Coal mine data virtual reality mapping model

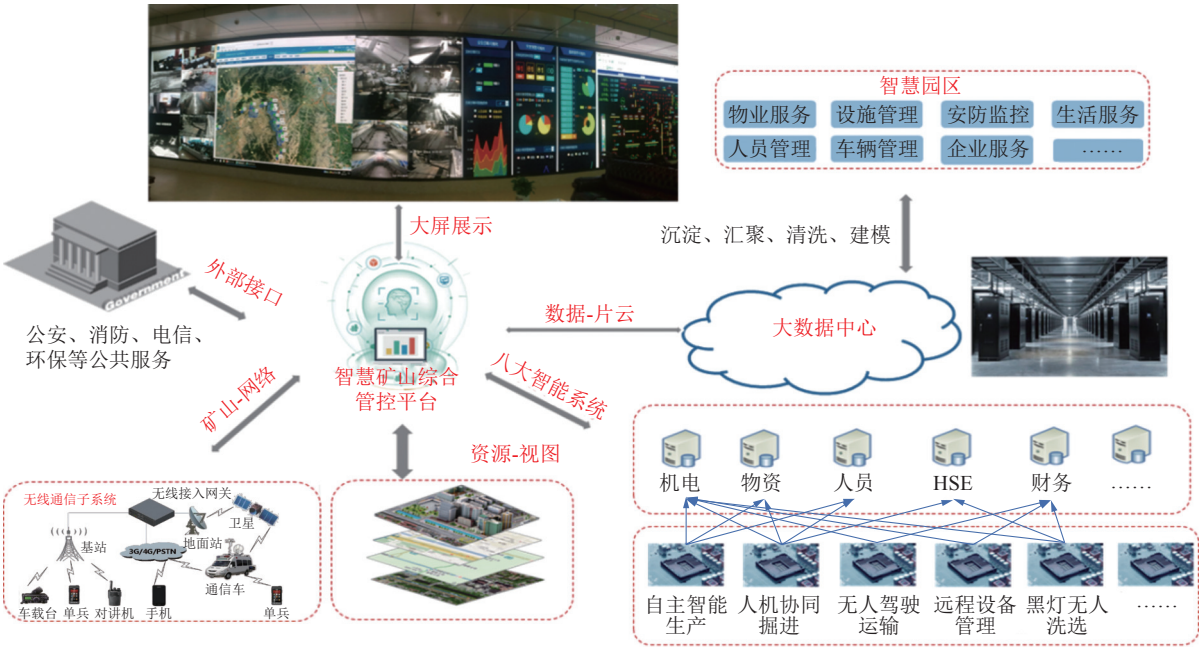

图 18　智能化煤矿顶层架构

Fig.18　Intelligent coal mine top-level architecture

和建设一个自顶向下、完整、标准的智能综合指挥调度平台，构建涵盖全矿井的安全监管、生产、运销、综合服务等业务的统一应用系统和大数据中心，向下实现各种多源异构感知数据的接入、集成和融合，从而实现感知数据上传和控制数据下发的双向交互，在一个平台内实现信息化与自动化的融合。

2）三项基础设施。全面感知网络融合多种接入方式，实现多场景感知的数据无缝接入，满足不同带宽、时延和接入密度的要求。全面感知网络能够满足智能化开采的多样承载需求，充分考虑业务安全性以及网络故障不扩散原则，有效支撑各智能化应用场景。

大数据中心是煤矿一切生产、经营及管理数据存储和利用的平台。基于云平台的大数据分析能力，对海量数据进行分析和变现，构建煤矿大数据仓库。基于微服务架构和人工智能算法构建智能数据引擎，实现业务逻辑快速组态化构建和智能决策，从而形成实时反映煤矿运行状态的煤矿领导驾驶舱。

四维空间位置服务是煤矿生产中最为重要的空间基础信息，所有相关人员、设备、采掘作业、管理等都需要基于空间位置信息进行工作和运行。通过统一资源视图，从地理信息数据实现业务系统视图的统一协同更新与管控，在地质数据与工程数据关联、分析、融合的基础上，进行二者的四维时空深度融合，构建矿井的四维时空地理信息服务引擎，为工作面智能规划设计、避灾路线优化等提供基础数据支撑。

3)八大智能系统。八大智能系统包括巷道智能快速掘进系统、采煤工作面智能协同控制系统、主煤流智能控制系统,辅助运输智能管控系统、煤矿井下环境感知及安全管控系统、煤矿智能通风与压风系统、智能化供电与供排水控制系统、煤矿场区及绿色生态智能系统等。

4.3　煤矿智能化系统的耦合与迭代开发

针对煤矿信息基础设施核心“智能化综合管控平台”,通过各大研发机构攻关与煤炭企业的实践推广,已基本形成统一业务架构,为煤矿系统融合提供数据支撑,并为各系统的联动管控奠定基础。智能化综合管控平台是以“BIM+GIS 平台”作为图形化统一展示引擎支撑,以煤炭工业大数据平台作为统一数字底座,构建具有生产监控、流程管理、组态化建模功能的煤矿工业互联网平台,打造生产调度协同管控中心、安全保障管理协同应用中心、专业业务应用中心、决策分析综合管控应用中心、运维监测管理中心等业务应用中心,并预留业财融合经营管控中心,满足多级用户在各类应用终端的需求[38]。

平台部署基于用户角色与业务需求进行权限管理:调度指挥大屏面向调度中心指挥人员,主要针对生产各系统监控数据,安全管理监控数据进行多角度,主题化展示,包括综采、综掘、煤流运输、辅助运输与人员定位、通风与安全监控、供电与供排水、洗运销、智慧园区等;针对各科室业务管理人员,基于业务中心建设 Web 管理客户端,将管理流程植入综合管控平台,使各项作业管理规范化、数据化、流程化,同时可依据平台数据为管理提供决策支持;同时构建移动端 APP,一方面便于生产一线及管理人员对于生产及安全数据进行总体监控,另一方面使管理数据形成闭环,有效推进管理数字化智能化。煤矿智能化管控平台建设实效如图 19 所示。

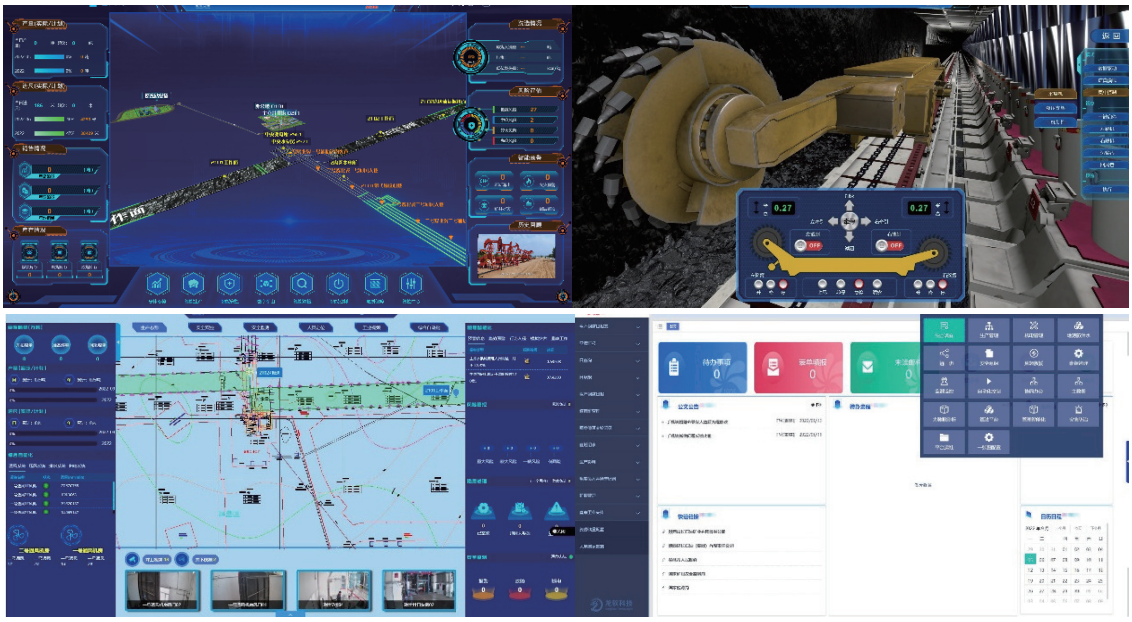

图 19　某矿煤矿智能化综合管控平台

Fig.19　Construction of an intelligent comprehensive management and control platform for a certain mine coal mine has practical results

地质探测技术与装备的智能化、探测信息的数字化、模型化以及地质信息与工程信息的有效融合,为煤矿智能化开采提供基础地质与工程数据支撑。当前随着技术研发深入与迭代,煤矿地质数据得到极大丰富,多源数据联合分析与处理使煤矿地质模型构建精细化程度极大提升,基本形成“静态模型构建—动态数据更新—GIS 基础服务”技术体系,为煤矿各类业务如通风、水文、运输等提供一体化的共享图形基础。而对于采煤工作面与掘进工作面,基于地震监测的随采随掘探测技术研发成功,工作面前方地质构造可基于设备截割能力构建网格化地质模型,并进行动态更新,形成透明工作面,为采煤工作面与掘进工作面的截割路径规划提供依据,实现基于透明地质的智能化开采与掘进。

视频 AI 识别是人工智能技术发展高地,并已成为煤矿安全生产领域研究热点。井下视频监控系统在煤矿广泛应用,通过井下视频应用 AI 技术,对人员违章、环境参数异常、设备工作状态等情况进行智能化识别与结果快速显示。由于煤矿环境复杂,存在光源照明不均匀、高尘雾影响、监控目标成像过程中存在过曝光或弱曝光、图像边缘模糊等现象,严重影响关键特征信息的提取和分析。煤矿复杂环境视

频监控目标识别与检测技术目前已取得较多成果，包括井下图像增强预处理方法，异常安全隐患检测与识别技术等。煤矿井下图像预处理方面，一方面针对矿井低照度图像增强算法研究较多，采用基于小波的多尺度 Retinex 的图像增强算法提升了粉尘的低照度环境下煤矿视频图像效果；另一方面针对矿井图像分辨率增强重建，形成基于反馈的深度残差网络实现矿井图像细节重建，提高煤矿视频 AI 识别检测精度[39]。而矿井复杂场景下异常安全隐患检测与识别，已在多种场景下得到应用，如井下人员各违章行为的智能识别，输送带煤量、异物、堆煤及跑偏识别与分析，采煤工作面安全电子围栏及截割干涉识别，钻探工艺过程自动识别与记录等。这些场景为关联系统提供智能检测与识别功能，为实现智能化提供支撑。在煤矿视频 AI 技术飞速发展过程中，部分矿井已开始建设全矿井一体化视频监控与处理平台，将生产与安全管理进行流程化规范化，通过视频 AI 对重点安全隐患与不规范的动作行为进行识别预警，使矿井智能管控形成闭环，为智能系统化建设进行突破和创新。

综合而言，目前煤矿各系统发展已取得突出成果，系统间的关联环节得到打通，形成较为统一的数据基础，关键系统已具备部分智能化功能；煤矿智能化建设是一个复杂，不断迭代的过程，下一步，亟需对各智能化场景进行完善与关联提升，将其他相关系统相融合实现系统间协同，为智能场景构建识别、预警、处置的体系化处理模式，打造面向煤矿智能化的知识图谱数据库，从而实现智能系统化。

4.4　煤矿智能化技术标准体系建设与演进

以先进标准助力煤矿智能化的顶层设计和总体布局，科学合理制定煤矿智能化的发展方向和重点任务，支撑煤矿智能化高质量发展。

煤矿智能化标准体系建设是与煤矿智能化技术体系一脉相承的，包括通用基础，支撑技术与软件，煤矿信息互联网，智能控制系统及装备，安全监控及防控装备，生产保障等 6 个部分[40]。随着煤矿智能化建设不断深入，行业内标准归口单位及研发机构均认识到煤矿智能化标准建设的重要性，在国家标准、行业标准及团体标准等不同层面立项，以构建煤矿智能化关键系统标准，规范及指导煤矿智能化建设。

煤矿智能化标准建设过程中，基础共性标准是最为迫切的。其中包括术语定义，评价标准，体系架构，数据标准等。《智能化煤矿（井工）分类、分级技术条件与评价》《智能化采煤工作面分类、分级技术条件与此评价指标体系》两项团体标准为煤矿智能化建设提供了建设依据与评价办法，在此基础上，国家能源局发布了《煤矿智能化建设指南（2021 年版）》与《智能化示范煤矿验收管理办法（试行）》，从而规范和指导了全国煤矿智能化建设，使煤矿智能化建设有据可依，极大地推动了煤矿智能化的建设。除此之外，煤矿智能化术语及体系架构标准均已在国家标准立项，对于规范煤矿智能化相关概念，统一煤矿智能化思想理念，界定煤矿智能化标准范围具有重要意义。

煤矿智能化的基础是实现数字化，而进行数字化建设的瓶颈是各系统各自为政，难以形成统一的数据模型。究其原因是各系统数据特征各异，相互之间缺乏统一的编码体系与数据共享规范，因此建设煤矿数据标准体系是煤矿智能化全面发展的基本保障。智能化煤矿数据标准体系结构，包括基础共性、数据编码、数据采集、数据治理、数据安全、数据应用六大专题。目前，由应急管理部立项并组织全国各大矿业集团及研究机构组成煤矿数据标准体系建设团队，对其关键标准进行研究推动。

随着煤矿智能系统建设实践与应用，煤矿智能化关键系统标准发展迅速。在综采工作面、掘进工作面、5G 及 WIFI6 一体化网络、智能通风及安全监控、煤矿机器人等方面，包括系统设计，关键系统装备技术要求等一系列行业标准、团体标准立项，并已有标准得以发布，为相关系统建设提供了指导。随着煤矿智能化建设不断推进，如何发挥智能化系统功效成为关键。煤矿各智能化系统运维技术规范及管理技术规范成为亟需。随着煤矿智能化建设的不断深入，其标准体系将根据煤矿智能化技术迭代不断细化，而标准建设重心也将不断调整，从而发挥标准的前瞻与指导作用。

4.5　煤矿智能化发展新趋势

建设智能化煤矿是实现煤炭工业转型升级和高质量发展的必由之路。随着煤矿智能化建设的步伐不断加快、建设深度不断扩展，传统采矿专业与现代智能化技术不断融合，煤矿智能化发展呈现新趋势。

1）系统智能化建设全面铺开。智能化煤矿要求开拓设计、地测、采掘、运通、选煤、安全保障、生产管理等主要系统具有自感知、自学习、自决策与自执行的基本能力。因此，煤矿行业应集中力量，重点建设十大智能应用系统，包括信息基础设施、智能地质保障系统、智能掘进系统、智能开采系统、智能主煤流输系统、智能辅助运输系统、智能通风与压风系统、智能供电与供排水系统、智能安全监控系统、智能分

选系统、智慧园区与经营管理系统，实现了煤矿智能化建设从总体基础平台，到井下采掘运系统和井下安全系统，再到煤矿辅助保障系统的全面升级。

2）实现复杂条件工作面无人开采。针对现有煤机装备不能完全适应复杂条件工作面高地压、大变形、矿压显现强烈等开采难题，需要全面提高智能化综采装备的适应性和可靠性，推广应用新一代智能网络型电液控制系统、数字油缸、高可靠性智能传感器、数字孪生技术等，并逐步突破复杂条件下采煤机智能调高、液压支架自适应耦合支护协同控制、工作面自动调直、端头和超前支护自动推移等难点，实现复杂开采条件薄煤层和中厚煤层工作面常态化无人值守，远程控制采煤。

3）突破共性技术，推进煤矿机器人集群研发使用。面对煤矿复杂条件，需要研发高适应性机器人行走机构和重载执行机构、防爆动力和轻量化技术，研发井下锚、钻、喷浆类机器人，加快研发探水钻孔、防突钻孔、防冲钻孔等钻探机器人，研发巷道清理机器人、煤仓清理机器人、水仓清理机器人等各类作业机器人，研发智能装备和机器人从设计到使用全生命周期管理系统，推进井上下机器人集群管控和协同作业技术研究和应用。

4）系统智能与人文智慧融合，建设煤矿智慧生态系统智能是指矿山运行系统具有全流程人–机–环–管数字互联高效协同，智能决策自动化运行的能力。人文智慧是指人的智慧在矿山运营中的决定性作用，借助信息通信技术和人工智能技术，将管理者的思想等变成系统决策的依据，提高决策水平，降低劳动强度，实现安全高效、绿色低碳、健康运行。在构建智慧煤矿的进程中，需要将系统智能服务于职工素养和生产效能的提升，服务于生活理性和人文精神的涵护，通过更新生产经营管理思路，建立智能化煤矿管理和岗位规范，以智能化手段为煤矿员工提供技术指导，建设智能化煤矿新生态，助推企业高质量发展。

5）以“煤智云”为基础推动构建智能煤矿（区）新生态。随着云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术快速发展，数据呈现爆炸式增长，协同煤炭行业企业形成数据生态逐渐成为智能化煤矿建设的核心内容。通过联合安监云、安标云、运销云以及煤炭企业集团，构建以“煤智云”为中心、企业为单元的分布式煤矿智能化系统数据资源池，打通“煤智云”数据采集、传输、存储、建模、分析、决策支持等全链条数据应用通道，形成“煤智云”数据服务产业生态和商业模式，进一步推动行业数据价值利用。作为储存和计算的基础设施，“煤智云”大数据中心建设是大势所趋，也是建设现代能演体系和柔性煤炭开发供给体系的迫切要求。

推进新矿井“智能化建井，建智能化矿井”，通过系统智能与人文智慧融合，矿区生态治理、智能绿色煤矿与社会协调发展，建立矿区立体化开发体系和多能耦合低碳发展体系，建设智慧矿山循环工业园、智能化煤矿科普馆和多媒体教育培训系统；促进 5G 与人工智能、区块链、云计算、大数据等新信息技术的紧密结合，支撑国家煤炭生产和交易共享智能化平台，构建现代能源矿业治理技术体系，加快构建高质量智能柔性煤炭开发供给体系，更好地发挥煤炭为双碳兜底、为能源安全兜底、为国家安全兜底的作用。

5 结　　语

50 年来，《煤炭科学技术》宣传、助力、见证了煤炭工业从普通机械化、综合机械化向智能化开采不断奋进的创新历程。在 50 年的发展中，开采技术与装备的创新始终是推动煤炭工业发展的核心驱动力，形成了现代煤炭开采技术与装备体系，支撑我国成为世界最大煤炭大国。煤矿综合机械化的发展是 20 世纪重大技术成就，高可靠性电液控制液压支架、高功率密度变频采煤机、大运量刮板输送机等装备的成功研发与应用，国产装备支撑煤炭生产安全高效，也为新时期发展自动化、智能化坚定了坚实基础。近十年来，煤炭开采技术与装备体系阶跃式发展，开采装备高端制造能力突破，控制技术趋于成熟，形成了开采高度 0.8 ~ 9.0 m 的全系列自动化成套开采装备。当前，煤矿智能化理论、技术与装备创新，推动煤炭工业第四次重大技术变革，展现了现代煤炭工业为国家经济社会发展提供基础支撑的强大能力和前景。下一步，煤矿智能化技术创新需要支撑实现煤矿生产现场的全自动化作业，全时空多源信息的实时感知，安全风险双重预防闭环管控最终达到全流程人–机–环–管数字互联高效协同运行，从而为煤矿职工创造更大福祉，为煤炭企业创造更大价值。

参考文献(References):

[1] 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 Guofa, ZHANG Tiegang, WANG Chengshan, *et al*. Development of energy and mining governance system based on new-

generation information technology[J]. Engineering, 2022, 24(1): 176−189.

[2] 钱鸣高,许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973−984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973−984.

[3] 宋振骐,郝　建,石永奎,等. “实用矿山压力控制理论”的内涵及发展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 1−15.
SONG Zhenqi, HAO Jian, SHI Yongkui, *et al*. An overview of connotation and development of practical ground pressure control theory[J]. Journal of Shan Dong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1): 1−15.

[4] 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.

[5] 王国法, 庞义辉. 特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 33−42.
WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 33−42.

[6] 李首滨, 李　森, 张守祥, 等. 综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 28−39.
LI Shoubin, LI Sen, ZHANG Shouxiang, *et al*. Key technology and application of intelligent perception and intelligent control in fully mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 28−39.

[7] 王国法, 史元伟, 陈忠恕, 等. 液压支架技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 3.
WANG Guofa, SHI Yuanwei, CHEN Zhongshu, *et al*. Hydraulic support technology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999: 3.

[8] 王国法. 综采工作面成套技术的发展与创新[C]//第七次煤炭科学技术大会文集, 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 765-774.
WANG Guofa. Development and innovation of complete set technology in fully mechanized mining face[C]//Collected Papers of the Seventh Coal Science and Technology Conference, Beijing: Coal Industry Press, 2011: 765-774.

[9] 王国法. 煤矿综采自动化成套技术与装备创新和发展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 1−9.
WANG Guofa. Innovation and development on automatic completed set technology and equipment of fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 1−9.

[10] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系与应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30−34.
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30−34.

[11] 王国法. 工作面支护与液压支架技术理论体系[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1593−1601.
WANG Guofa. Theory system of working face support system and hydraulic roof support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1593−1601.

[12] 徐亚军, 王国法, 任怀伟. 液压支架与围岩刚度耦合理论与应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2528−2533.
XU Yajun, WANG Guofa, REN Huaiwei. Theory of coupling relationship between surrounding rocks and powered support[J]. Journal oF China Coal Society, 2015, 40(11): 2528−2533.

[13] 徐亚军. 液压支架顶梁外载作用位置理论研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2015(7): 102−106.
XU Yajun. Research and application external load position of powered support’ s canopy[J]. Coal Science and Technology, 2015(7): 102−106.

[14] 徐亚军, 王国法, 刘业献. 两柱掩护式液压支架承载特性及其适应性研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2113−2120.
XU Yajun, WANG Guofa, LIU Yaxian. Supporting property and adaptability of 2-leg powered support[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2113−2120.

[15] 王国法, 徐亚军, 李丁一. 大倾角综采工作面液压支架刚柔组合倾覆力矩平衡的支护原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 4125−4132.
WANG Guofa, XU Yajun, LI Dingyi. Analysis on supporting principle and its application of powered support in large inclined fully mechanized face based on balance of rigid and flexible combined overturning moment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 4125−4132.

[16] 徐亚军, 王国法. 液压支架群组支护原理与承载特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3367−3373.
XU Yajun, WANG Guofa. Supporting principle and bearing characteristics of hydraulic powered roof support groups[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3367−3373.

[17] 徐亚军, 王国法, 张金虎, 等. 基于弹性独立支座的大采高综采工作面液压支架群组支护应力场理论与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1226−1236.
XU Yajun, WANG Guofa, ZHANG Jinhu, *et al*. Theory and application of supporting stress fields of hydraulic powered support groups in fully mechanized mining face with large mining height based on elastic supporting beam model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1226−1236.

[18] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 763−773.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, *et al*. Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 763−773.

[19] 徐亚军, 王国法, 柴宾元, 等. 液压支架虚拟样机构建技术的研究[J]. 煤矿开采, 2003(4): 8−11.
XU Yajun, WANG Guofa, CHAI Binyuan, *et al*. Study on Virtual Prototype Technology in Hydraulic Powered Support[J]. Coal Mining Technology, 2003(4): 8−11.

[20] 孟宪云, 李提建, 徐亚军. 应用反向动力学实现液压支架的三维虚拟仿真[J]. 煤矿开采, 2009, 14(3): 78−80.
MENG Xianyun, LI Tijian, XU Yajun. Applying IK solvers to

realizing 3D Virtual simulation of powered support t[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(3): 78−80.

[21] 王国法, 徐亚军, 孙守山. 液压支架三维建模及其运动仿真[J]. 煤炭科学技术, 2003, 29(1): 42-46.
WANG Guofa, XU Yajun, SUN Shoushan. 3 D modeling of hydraulic powered support and dynamic simulation[J]. Coal Science and Technology, 2003, 29(1): 42-46.

[22] 王秀海, 王国法, 徐亚军, 等. WH70高强钢采用高强度焊丝Q550常温下焊接试验[J]. 煤矿机械, 2003(4): 23−26.

[23] 徐亚军, 黄书祥, 刘成峰, 等. Q890高强度结构钢在液压支架应用的试验研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 46−48.
XU Yajun, HUANG Shuxiang, LIU Chengfeng, *et al*. Experimental Research on Q890 high strength structural steel application in hydraulic support[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(1): 46−48.

[24] 王安顺, 徐亚军, 刘士卫, 等. 高温富水强矿压环境液压支架研究与设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(2): 24−26.
WANG Anshun, XU Yajun, LIU Shiwei, *et al*. Research and design of hydraulic support in high temperature rich water and strong mine pressure environment[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(2): 24−26.

[25] 杜博睿, 王淼辉, 申博文. 液压支架立柱激光熔覆不锈钢的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2021, 50(16): 4.
DU Borui, WANG Miaohui, SHEN Bowen. Microstructure and properties of laser cladding stainless steel on hydraulic support cylinder[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(16): 4.

[26] 王昆宏, 刘鸣放. 支架高端制造立柱内壁熔铜技术的研究与应用[J]. 内燃机与配件, 2018, 14(2): 114−115.
WANG Kunhong, LIU Mingfang. Research and application of molten copper technology in the inner wall of high-end manufacturing column of bracket[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018, 14(2): 114−115.

[27] 汪连成. 刮板成套输送设备发展现状与展望[J]. 煤矿机电, 2021, 42(6): 16−19.
WANG Liancheng. Development status and prospect of complete scraper conveyor equipment[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2021, 42(6): 16−19.

[28] 蒋卫良, 刘 冰, 郗存根. 煤矿主煤流运输系统技术现状及发展趋势[J]. 智能矿山, 2022, 3(6): 62−70.
JIANG Weiliang, LIU Bing, XI Cungen. Technical status and development trend of main coal flow transportation system in coal mines[J]. Intelligent Transportation, 2022, 3(6): 62−70.

[29] 李首滨. 智能化开采研究进展与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 102−110.
LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 102−110.

[30] 李 森. 基于惯性导航的工作面直线度测控与定位技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 169−174.
LI Sen. Measurement & control and localisation for fully-mechanized working face alignment based on inertial navigation[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 169−174.

[31] 任怀伟. 液压支架机器人智能焊接生产线研发与应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 16−21.
REN Huaiwei. Development and application of robot intelligent welding production line to hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 16−21.

[32] 杜毅博, 任怀伟, 陈士松, 等. 液压支架智能焊接车间制造执行系统研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 117−122.
DU Yibo, REN Huaiwei, CHEN Shisong, *et al*. Development and application of manufacturing execute system for hydraulic support intelligent welding workshop[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 117−122.

[33] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 智能化煤矿数据模型及复杂巨系统耦合技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 61−74.
WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, *et al*. Digital foundation and giant system coupling technology system of smart coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 61−74.

[34] 任怀伟, 王国法, 赵国瑞, 等. 智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2923−2935.
REN Huaiwei, WANG Guofa, ZHAO Guorui, *et al*. Smart coal mine logic model and decision control method of mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2923−2935.

[35] 王国法, 杜毅博, 任怀伟, 等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1909−1924.
WANG Guofa, DU Yibo, REN Huaiwei, *et al*. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909−1924.

[36] 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.

[37] 吴群英, 蒋 林, 王国法, 等. 智慧矿山顶层架构设计及其关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 80−91.
WU Qunying, JIANG Lin, WANG Guofa, *et al*. Top-level architecture design and key technologies of smart mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 80−91.

[38] 韩 安, 陈晓晶, 贺耀宜, 等. 智能矿山综合管控平台建设构思[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 7−14.
HAN An, CHEN Xiaojing, HE Yaoyi, *et al*. Construction conception of intelligent management and control platform[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(8): 7−14.

[39] 程德强, 钱建生, 郭星歌, 等. 煤矿安全生产视频AI识别关键技术研究综述[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-17[2023-01-12]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0359.
CHENG Deqiang, QIAN Jiansheng, GUO Xingge, *et al*. Review on key technologies of AI recognition for videos in coal mine[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-17[2023-01-12]. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0359.

[40] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1−9.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 1−9.