长沙矿山研究院采矿智能装备发展回顾与展望*

豆龙[1,2],姜岸委[1,2],刘梦寅[1,2],谭磊[1],汤晓勇[1,2],房燕涛[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:矿山装备智能化是破解深部开采安全与效率瓶颈、实现矿业高质量发展的核心路径。系统回顾了长沙矿山研究院有限责任公司从技术引进到自主创新的发展历程,介绍了覆盖成井施工、凿岩采掘及井下辅助作业的成套智能装备体系。重点阐述了CKT系列天井钻机、CKY/CKQ系列全谱系采掘装备,以及融合AI视觉与机器人的智能辅助装备等方面的关键技术突破。针对深部复杂工况下装备自适应能力不足、多机协同困难等行业共性短板,提出了涵盖智能感知、数字孪生与集群协同的前沿技术布局,并阐明了从单一供应商向全场景智慧矿山服务商转型的战略路径。长沙矿山研究院有限责任公司的研发实践可为我国摆脱高端矿业装备对进口的依赖、保障矿业装备的自主可控提供了重要范本。

关键词:智能矿山;采掘装备;矿山机器人;智能化升级;装备协同

中图分类号:TD42 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0194-10

Review and Prospect of Intelligent Mining Equipment Development at Changsha Institute of Mining Research

Dou Long[1,2], *Jiang Anwei*[1,2], *Liu Mengyin*[1,2], *Tan Lei*[1], *Tang Xiaoyong*[1,2], *Fang Yantao*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Intelligent upgrading of mining equipment is the core pathway to address the safety and efficiency bottlenecks in deep mining and to achieve high-quality development of the mining industry. The development process of Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd from technology introduction to independent innovation was systematically reviewed, and the complete intelligent equipment system covering shaft construction, rock drilling and excavation, and underground auxiliary operations was introduced. Key technological breakthroughs in CKT series raise boring machines, CKY/CKQ series full-spectrum mining equipment, and intelligent auxiliary equipment integrating AI vision and robotics were highlighted. In response to the common industry shortcomings, such as insufficient adaptability of equipment and difficulties in multi-machine coordination under deep and complex working conditions, a cutting-edge technology layout covering intelligent sensing, digital twin, and cluster coordination was proposed, and the strategic path for transformation from a single equipment supplier to a full-scenario intelligent mining service provider was clarified. The research and development practices of Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd have provided an important model for China to break away the dependence on imported high-end mining equipment and ensure the independent controllability of mining equipment.

Key words: Intelligent mine, Mining equipment, Mining robots, Intelligent upgrading, Equipment coordination

0 引言

新一轮科技革命和产业变革重塑全球矿业竞争格局,人工智能、物联网、数字孪生等数字化技术与采矿行业深度融合,推动矿业产业正在发生结构性转型[1-3]。长期依靠高强度人力投入的矿产资源粗放开采模式,受制于矿山安全生产管控、开采效率瓶颈、生态环保约束等多重因素,已然无法适配矿业高质量发展的需求[4-6]。国内外学者针对智能开采工艺、凿岩自动化系统、矿山数字孪生、智能成套装备落地、智能矿山整体架构开展系统性梳理与综述研究,普遍认为加快智能矿山建设、推动采矿装备向智能化、成套化、自主可控方向升级,既是矿业转型升级的核心路径,也是减少井下作业人员暴露风险、提高矿产资源回采

* **收稿日期**:2026-03-28
基金项目:战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心科技专项计划项目(GC2026KJ020002)
作者简介:豆龙(1986—),男,湖南郴州人,博士研究生,高级工程师,主要从事矿山智能装备研发工作。E-mail:382317065@qq.com
通信作者:姜岸委(1994—),男,湖南怀化人,硕士,工程师,主要从事矿山智能采矿装备研发工作。E-mail:445779139@qq.com

率、践行绿色低碳开采理念的关键手段[7-9]。

欧美矿业发达国家较早开展智能采矿装备产业化布局，在井下远程操控、地下高精度定位、矿山数字孪生落地场景等方面已形成装备体系并构建技术壁垒，造成成套智能装备购置与运维成本高昂，且装备体系对我国复杂矿体条件、开采工艺的适配性不足，难以直接移植应用于国内矿山场景[10-12]。国内学者立足我国矿床赋存条件复杂、深部开采占比持续攀升、矿山类型多样的行业实情，一方面剖析智能矿山发展趋势、建设模式与落地实施路径，为本土智能矿山整体技术方案的搭建提供理论支撑[13-15]；另一方面围绕绿色矿山建设、矿业绿色标准构建、有色金属可持续开采、深部金属矿开采战略展开大量研究，将智能化改造与绿色矿山建设相结合，形成“智能＋绿色”双轮驱动的矿山发展思路[16-20]。

在行业理论研究持续推进的同时，我国在国家层面持续完善矿山智能化顶层布局，不断夯实智能矿山建设政策基础。2024 年 4 月，国家矿山安监局联合七部委发布《关于深入推进矿山智能化建设 促进矿山安全发展的指导意见》，明确提出到 2030 年建立完备的矿山智能化技术、装备与管理体系。随后，《矿山智能机器人重点研发目录》与《金属非金属矿山智能化建设指南(2025 年版)》等政策文件相继出台，给智能矿山装备的研发划定了清晰的技术门槛与发展赛道，走本土化自主创新路线，研发适配我国矿山工况的成套智能装备，是保障国家矿产资源安全、实现矿业高质量发展的必然选择。

1　发展历程与成就综述

长沙矿山研究院有限责任公司(简称“长沙矿山院”)成立于 1956 年，是国内矿业装备领域的核心科研机构，专注于采矿装备研发与工程应用。历经七十年技术积累，长沙矿山院实现了由技术追赶到自主创新、由仿制跟跑到技术引领与成果输出的跨越式发展，构建了以天井钻机、潜孔钻机、采矿台车三大产品为核心的成套智能采矿装备体系，覆盖反井施工、深孔凿岩、巷道掘进等矿山核心工序，为国内矿山智能化转型与安全高效开采提供了国产化装备支撑，相关主要装备如图 1 所示。



(a) 天井钻机　(b) 潜孔钻机

(c) 采矿台车

图 1　三大主力装备产品

Fig.1　Three major equipment products

截至 2026 年初，长沙矿山院承担了多项国家重点研发项目，在装备领域累计获得国家级、省部级各类科技奖励十余项。近年来，在中国五矿集团有限公司(简称“集团公司”)的战略引领下，长沙矿山院进一步锚定智能矿山装备研发主业，高标准建设采矿实验室及智能装备中试线，坚定不移地走技术自主创新、装备自立自强的高质量发展道路。

立足长沙矿山院七十年装备研发实践，结合国内采矿装备行业整体技术演进逻辑，可将矿山采矿装备发展划分为仿制与技术积累、引进与再创新、自主创新与引领三个核心阶段。装备整体简略发展历程如图 2 所示。

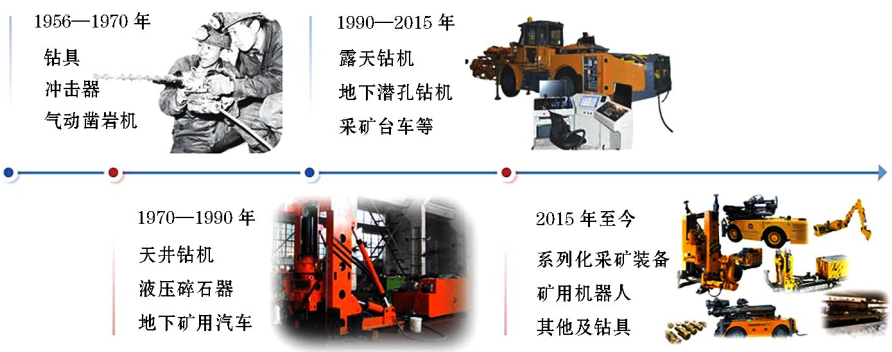


图 2　发展历程

Fig.2　Development course

1.1 仿制与技术积累阶段

1956年,依托国家“十二年科学技术发展规划”的战略部署,长沙矿山院(时称“有色金属矿山科学研究所”)正式组建。建院之初,新中国采掘工业基础薄弱,矿山装备领域几乎空白。面对工业制造能力与科研条件的双重制约,长沙矿山院始终坚持独立自主的技术路线,系统开展采矿基础理论、开采工艺与成套装备的探索性研究。在此过程中逐步构建起较为完整的装备研发体系,为我国金属矿产的大规模工业化开采提供了坚实的技术支撑与产业配套能力形成了专业化人才储备。同时,这一时期的研究实践为后续矿山装备的技术攻关奠定了重要基础,培育了国内首批矿山装备领域的专业科研队伍,为后续技术迭代与创新突破形成了深厚的学术积淀、积累了丰富的人才资源。

1.2 引进与再创新阶段

改革开放后,国内大型露天金属矿、深部地下矿山建设提速,对采矿装备开采效率提出了更高的要求,推动长沙矿山院迈入“引进—消化—吸收—再创新”的第二阶段。该阶段,“矿用牙轮铁基—铜基磨擦副”“硅锰钼系中空合金钎杆及其生产新工艺”获国家发明奖,“冶金矿山潜孔钻具新材料、新工艺和新技术研究”“钻井法凿井”“154 t电动轮自卸汽车”“地下矿连续开采工艺与装备”4项成果荣获国家科技进步奖一等奖。其中,“一千万吨级大型露天矿成套设备研制”实现了大型采矿装备国产化里程碑式突破,彻底扭转我国大型露天采矿成套装备长期依赖进口的行业格局,大幅降低国内大型露天矿山装备采购与运维成本,支撑国内露天矿产资源的规模化开发,并荣获国家科技进步奖特等奖。并推动“工艺—装备—工况”研发体系在长沙矿山院深植落地,即装备研发摒弃单一仿制路径,坚持以“采矿工艺”为导向、以“矿山现场工况”为根本依据,开展从理论研究到工业验证与应用的全链条正向开发;培养一批兼具工艺设计、机械开发、现场调试能力的复合型科研人员,为新世纪深部智能采矿装备自主研发、智能化升级提供完整的开发框架与足够的人才储备。

1.3 自主创新与引领阶段

进入新世纪,国内矿产资源开发逐步向深部延伸,开采深度突破千米,高地应力、破碎围岩、高温高湿、狭窄巷道等复杂工况成为地下矿山常态,传统人工、半机械化开采模式安全风险陡增,行业对装备智能化、自主可控、井下无人作业提出硬性需求。同时国外高端成套装备技术封锁加剧,核心电控、感知元器件采购受限,保障矿产资源安全、突破国外技术壁垒成为行业核心战略任务。在此背景下,长沙矿山院以自主创新为核心的新型科研体系逐步成型,依托金属矿山安全技术国家重点实验室、国家金属采矿工程技术研究中心等国家级平台,根据矿山真实生产难题反向推导装备开发需求,下沉井下一线采集工艺痛点,锚定国内矿山“贫、细、杂、散”的资源特征及复杂多变的水文与地压地质条件,围绕现场“卡脖子”的工艺难题,保障研发装备充分匹配国内矿山工况。

长沙矿山院联合多家合作矿山,将测试平台直接设置到井下作业现场,打通“课题立项—定制化装备研发—井下现场实测—工业投产应用—性能迭代优化”的产学研用链条。依托扎实的技术储备,结合对矿山现场工况与行业发展需求的充分调研,长沙矿山院构建起了“研发—试验—应用—迭代”一体化的科研发展体系。在体系支撑下,长沙矿山院自主研发的智能中深孔全液压凿岩台车、地下高气压智能潜孔钻机两项装备成果均达到国际领先水平,并获得中国有色金属工业科学技术奖二等奖,实现国内原创、全面替代进口;迈入自主创新驱动、高质量内涵式发展的全新征程。为进一步提升成果转化能力、完善产业化配套体系,正在建设采矿装备中试生产线与工程化研发基地,践行“产学研用”的理念,构建起“课题引领—定制研发—井下验证—规模化应用”的全链条闭环。

2 技术突破与核心装备体系

近五年国内矿山智能化建设进入规模化落地阶段,政策导向、市场需求、底层技术协同驱动智能采矿装备快速迭代。依托数十年技术积淀与成熟完善的技术体系,长沙矿山院针对深部井下受限空间、高地压、爆破后大块处置等高危、低效工况痛点,完成成井成槽、凿岩采掘、井下智能辅助机器人三大谱系装备智能化升级,并持续加大科研攻关与产品迭代力度,逐步建成门类齐全、工况适配、智能先进的系列化核心智能装备体系。

2.1 成井掘进装备:实现智能化升级

传统天井、切割槽井巷施工长期采用人工钻爆工艺,现场工人需在高空搭设的作业平台上施工,面临顶板垮落、碎石飞溅、爆破冲击波等多重安全隐患,同时人工钻孔深度、角度一致性差,井巷成型质

量难以得到保障,施工周期长、综合开采成本偏高,是深部矿山长期存在的高危低效工序。在成井掘进装备领域,长沙矿山院牵头制定天井钻机国家标准[21],并完成天井钻机与切割槽钻机双向突破、协同配套,实现从单机作业到全场景适配、从人工操作到智能化成井的跨越式升级。

对标国家《矿山智能机器人重点研发目录》要求,长沙矿山院持续推进成井装备大型化、谱系化、智能化迭代。CKT 系列天井钻机的成井直径覆盖 1 500～7 000 mm,最大钻进深度可达 400 m,全面适配中小型常规井筒与大型矿山深井、超大断面通风井等复杂工程场景。针对井下狭窄巷道、起伏地形等特殊工况,研发了轨轮式、轮胎自行式、履带自行式等多构型机型。配套研发的 ATM 系列切割槽钻机,通过机身结构优化与智能控制系统升级,精准破解低矮受限空间的施工难题,可自动化、机械化完成切割槽开挖作业,彻底替代传统的人工施工模式。依托智能传感、自适应算法、远程通信等技术,成套成井装备已实现自动定位、智能钻进、参数动态调节、无人值守连续作业,彻底颠覆传统的人工高危施工模式,实现成井作业本质安全与高效提质。

2.2 核心采掘装备:实现全谱系智能化

国内矿山大、中、小型规模并存,矿体厚度、巷道断面、开采深度差异显著,对凿岩装备吨位、钻孔参数、通行尺寸提出了差异化需求。结合我国金属矿深部开采现状与地下矿山凿岩装备应用现状可知,差异化凿岩装备配套与智能化升级已然成为矿山开采装备发展核心方向[22-23]。目前,长沙矿山院围绕采矿凿岩台车的应用需求完成了多个方向的技术攻关,内容涵盖凿岩台车自动调平电液控制系统开发、液压凿岩机回转速度调控方案设计、基于 CAN 总线的车载智能控制系统搭建以及台车工作大臂组合体有限元力学分析,形成智能中深孔全液压凿岩台车成套技术成果,为智能化采矿凿岩台车设计提供理论与工程借鉴[24-30]。围绕潜孔钻机开展系列研究,探究钻机机械手智能定位与自动换杆控制策略,构建基于 LabVIEW 的比例阀性能测试平台,采用应变测试手段获取凿岩工况数据,深入研究深孔钻进防偏斜技术,并形成地下高气压智能潜孔钻机专项技术成果,为潜孔钻机的研发与工程应用提供理论和试验支撑[31-36]。另外,长沙矿山院牵头制定潜孔冲击器和潜孔钻头国家标准[37]。在此基础上,完成 CKY 系列采矿凿岩台车、CKQ 系列地下潜孔钻机全谱系、梯度产品布局,实现远程智能操控、自主钻孔等成套技术,能有效满足不同规模、不同矿体条件矿山的差异化开采需求。

目前,长沙矿山院采掘装备深度融合远程测控、智能感知、凿岩智能控制等技术,可实现设备远程启停、自动走位、精准凿岩、参数智能优化等作业功能,操作人员可在地面安全中心完成全流程操控,从根源规避井下安全风险。在采掘装备方面,拥有 CKY50、CKY76、CKY90 系列全品类采矿凿岩台车,覆盖微型、中型、高效型多级产品梯度,钻孔直径区间涵盖 Φ51～89 mm,最大凿岩深度达 30 m,台班作业效率可达 120 m/班,兼具机械、程控、智能多种操控模式与多底盘驱动形式,井下通过性与工况适配性极强。其中,CKY50 微型一体化钻机结构紧凑,为国内小断面巷道、薄矿脉开采提供专属解决方案。同步迭代升级的 CKQ150S 第五代微型地下潜孔钻机,整机行驶宽度仅 1.2 m,可适配大直径深孔采矿、泄水孔、充填孔等复杂凿岩场景,其钻孔直径覆盖 Φ76～165 mm,最大钻孔深度 60 m,四轮驱动配合原地 360°转向能力,能够在采场环形孔穿凿等复杂作业场景中灵活机动。

2.3 井下辅助装备:填补行业技术空白

随着矿山智能化发展理念的广泛普及,以及智能化建设需求的持续释放,我国矿山智能机器人领域的研究迎来了蓬勃发展;机器人不仅在提升生产效率方面成效显著,更在减轻人工劳动强度、降低作业安全风险等方面展现出不可替代的独特优势[38-39]。在井下辅助作业领域,深部竖井掘进、爆后大块矿石破碎、井下清渣等工序属于井下高危作业场景,传统人工近距离破碎作业易引发落石、飞石、设备挤压冲击等安全事故,适配井下恶劣工况的成套智能装备长期缺位,成为矿山少人化转型的主要制约因素。近五年,长沙矿山院针对该领域开展专项攻关,融合机器视觉、AI 目标识别等技术研发系列井下智能辅助装备,实现高危作业无人化。面向矿山竖井施工地质复杂、风险集中的痛点,自主研发了智能化竖井抓岩成套装备,实现竖井抓岩连续化、机械化、智能化安全作业。针对井下大块矿石处置高危难题,依托机器视觉、AI 智能识别等技术,研发智能破碎机器人与大块解炮机器人,可自主识别大块矿石与空间坐标,自主规划行进路线与破碎作业点位,一体化完成矿石定向破碎与现场废渣清扫,作业全程无需人员进驻爆破危险区,从源头消除飞

石、设备回弹等安全隐患。

目前,长沙矿山院正逐步将智能化技术从单一装备拓展至凿岩、成井、破碎、掘进等全品类产品,持续完善智能化、谱系化矿山装备产业体系(见表1)。

表1 装备简介

Table 1 Equipment overview

装备名称	型号/系列	关键性能指标	适用场景
天井钻机	CKT系列	1.成井直径:1 500~7 000 mm。 2.最大钻进深度:400 m。 3.构型:轨轮式、轮胎自行式、履带自行式。	中小型常规井筒、大型矿山深井、超大断面通风井、狭窄巷道及受限空间。
切割槽钻机	ATM系列	1.机身结构优化,尺寸压缩。 2.具备自动化、机械化开挖能力。 3.智能控制系统升级。	井下受限空间、切割槽开挖作业。
采矿凿岩台车	CKY系列	1.钻孔直径:51~89 mm。 2.最大凿岩深度:30 m。 3.台班作业效率:可达120 m/班。 4.操控模式:机械、程控、智能。	CKY50:小断面巷道。 CKY76/90:中大型高强度、规模化采矿作业。
地下潜孔钻机	CKQ系列	1.整机行驶宽度:1.2 m。 2.钻孔直径:76~165 mm。 3.最大钻孔深度:60 m。 4.功能:360°原地转向、模块化集成。	狭窄巷道、大直径深孔采矿、泄水孔、充填孔等复杂凿岩场景。
智能辅助装备	智能破碎机器人/大块解炮机器人/智能化竖井抓岩成套装备	1.具备机器视觉、AI智能识别。 2.自主识别目标、精准定位。 3.集成智能抓岩测控。	井下大块矿石处置(破碎、清扫)、深部矿山井巷施工、高危作业区域。

3 当前行业技术短板与发展展望

浅部矿产已逐渐枯竭,矿山开采正持续向千米级多场耦合复杂矿体延伸。我国矿山行业已步入从“机械化换人”向“智能化少人”转型的关键攻坚期[40-42]。然而,深部高地温、高地压、高水压及强扰动等多场耦合环境显著削弱了传统装备的作业能力与工程可靠性,给井下受限空间施工、多机协同作业、智能开采及矿山绿色低碳运行带来严峻技术挑战[43-47]。国内外学者从深部围岩强扰动特性、采掘装备技术进展、复杂地质条件协同控制、矿山智能化总体架构及海外大型露天矿山工程实践等多重视角,系统揭示了当前行业面临的共性瓶颈,并为后续技术攻关与产业落地提供了理论与工程参照[48-54]。立足现有研究成果,从现存短板、核心攻关方向、技术与产业保障三方面梳理矿山装备发展路径。

3.1 智能矿山装备现存技术短板

极端深部环境下装备自适应能力不足是首要瓶颈。深部高地应力、高温、高水压及破碎矿岩构成多场耦合复杂条件,现有装备对破碎岩体、高流变软岩等复杂地质条件的适配开采能力不足;岩性识别与采掘参数动态调控算法成熟度偏低,设备难以随岩体条件动态调整作业参数,运行稳定性与服役寿命大幅缩减,难以支撑常态化无人开采。另外,安全管理、协同调度与绿色配套体系是保证矿山高效生产的关键,但是目前整体体系仍然存在各种不足[55-56]。以井下装备为例,当前主要以单机远程操控为主,集群调度、自主避障、动态任务分配算法工程化落地不足,通信时延与异构设备数据不互通,制约无人采场构建;行业缺少统一数据接口与互联互通标准,各厂商软硬件兼容性差,防爆感知元器件及核心零部件依赖进口、造价高昂,中小矿山改造压力大;现有装备能耗与固废管控薄弱,与绿色矿山低碳要求存在差距。

3.2 重点攻关研究方向

根据国家《矿山智能机器人重点研发目录》,应重点布局多款新型智能装备,多点突破,打造核心产品矩阵。近五年及后续在技术领域与装备发展方面的布局见表2。具体规划为2026—2027年集中定型,全品类基础机型同步落地完成矿安认证、小批量试产,同步补齐全品类产品空白;2029—2030年配套产业链全线布局,同步落地钻具、耐磨件、配套刀盘、智能化改造增值业务,构建“高端采矿装备+智能改造+配套耗材+全生命周期运维”的一体化业务矩阵。同时,聚力打通科研成果产业化落地链条,建成专业化装备中试基地与整机验证平台,补齐装备研发、试制、验证、落地全流程产业短板。依托“基础研究+中试验证+产业落地”的全链条发展模式,使智能装备产业规模稳步攀升,面向深部开采、复杂工况与绿色低碳的多重发展约束,持续推动矿山生产方式、作业模式、管理体系的全方位变革。

表 2 技术布局

Table 2 Technology roadmap

技术领域	突破点(近五年)	未来布局方向
成井掘进技术	1.实现天井钻机全直径、全深度、全工况适配。 2.研发多构型机型解决受限空间难题。 3.实现自动定位、智能钻进、无人值守连续作业。	1.深化智能感知与自适应算法应用。 2.拓展更复杂地质条件下的自动化成井技术。
凿岩采掘技术	1.完成 CKY 系列台车全谱系布局。 2.CKQ150S 微型潜孔钻机实现狭窄巷道突破。 3.实现远程启停、自动走位、参数智能优化等无人化功能。	1.提升远程测控与无线专网通信稳定性。 2.优化多机协同作业能力。
井下辅助作业	1.研发智能破碎与解炮机器人,填补行业空白。 2.实现竖井掘进连续化、机械化、智能化。 3.AI 视觉分析技术在多品类产品中通用化落地。	1.拓展复杂矿体工况的适配性。 2. 提升机器人自主决策能力。
基础科研与前沿技术	1.构建“产学研用”实体闭环。 2.建成凿岩装备中试生产线及工程化研发基地。	1.底层技术:岩石识别、岩性分析、参数自适应。 2.演进路径:远程遥控→单机半自动→一人多机→多机协同。 3.前沿领域:数字孪生、集群协同、智能感知。
产业化与人才战略	1.形成近百亿元产业体量。 2. 搭建分层培养、实战历练的人才体系。	1.建成专业化实验室与整机验证平台。 2.围绕《矿山智能机器人重点研发目录》布局新型装备。

3.3 基础前沿技术布局、人才保障与装备产业化

目前,长沙矿山院在研发层面上依托金属矿山安全技术国家重点实验室等平台,深耕岩性分析、采掘装备参数自适应调控等基础机理研究;聚焦多源环境感知、数字孪生、多装备集群协同三大前沿方向,遵循“远程遥控—单机半自动—单人多机—集群协同”四阶段分步推进,对标 2030 年全国矿山智能化总体建设目标,夯实绿色智能开采底层技术支撑。

在人才培育与产业转化层面上,构建青年工程师、资深设计师、学科带头人三级科创梯队,搭建分层培养、实战历练、梯队成长的人才发展体系;逐步建成专业化装备中试基地与整机综合验证平台,打通“基础研究—样机试制—井下验证—批量投产”全链条闭环。推动长沙矿山院由单一设备供应商向全场景智慧矿山综合解决方案服务商转型升级,培育形成百亿级智能采矿装备产业集群,依托复合型创新人才梯队与良性协同产业生态,持续支撑深部矿山智能化建设长效转型。

面向深部开采与多元矿山开采场景需求,下一阶段将以成套装备谱系为纲领统筹研发布局,分级推进成井掘进、核心采掘、井下辅助装备的迭代开发,并同步完成装备与复杂井下工况的耦合适配设计。在研发规划基础上,依托集团公司产业平台、矿山现场场景及制造配套等综合优势,构建贯通谱系规划、样机研制、井下试验、定型量产的闭环产业化实施体系;同步建设中试平台与工业验证基地,建立涵盖研发迭代、工况校验、批量投产的标准化转化流程。最终形成“顶层规划引领—分级研发推进—产业闭环转化”的有序路径,确保谱系化采矿装备实现分步研制与梯次产业化落地。智能采矿装备的全谱系架构如图 3 所示。

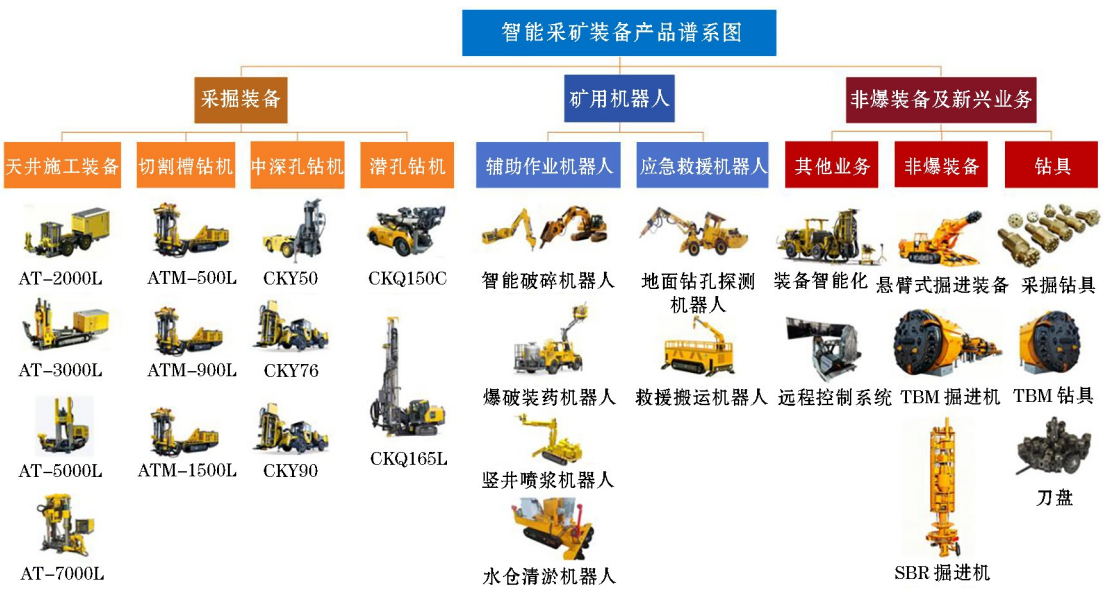


图 3 智能采矿装备产品谱系

Fig.3 Product genealogy system for intelligent mining equipment

3.4 智能矿山装备发展展望

长沙矿山院智能矿山装备发展始终遵循“补短板、拓谱系、攻智能、延链条”四阶递进发展主线,精准锚定矿山智能化、无人化、高效化发展需求;依托多年采矿装备研发积淀,统筹布局前沿智能采矿技术,集中攻克行业核心技术难题,以技术成果积累赋能传统装备升级与新型智能装备迭代更新;持续完善研发、中试、产业化全链条体系,稳步提升企业的装备产业核心竞争力与行业品牌影响力。未来将聚焦采矿装备智能化改造,将人工智能、大数据、机器视觉等前沿技术与矿山装备深度融合;提前布局装备智能化关键技术攻关,搭建专项验证实验室与测试平台,进行智能算法适配、设备无人作业、故障智能预警等技术验证,补齐智能装备技术短板,丰富智能装备产品谱系,助力矿山装备实现智能化升级。

4 结语

经过七十年的技术积淀与工程实践积累,长沙矿山院在采矿装备领域实现了从技术引进、消化吸收到自主创新、原创引领的跨越式发展。围绕矿山成井施工、凿岩采掘等核心工况,构建以天井钻机、潜孔钻机、采矿台车为核心的智能采矿装备体系;同时,在前沿关键技术领域进行系统性技术布局,装备型谱体系持续完善,整体技术水平实现了从跟跑、并跑到局部领跑的阶段性突破。

装备方面系列技术与成果的形成,源于对矿山复杂工况及工程实际需求的长期研究与精准适配,依托规模化工程应用场景完成装备迭代验证,同时借助国家级科研平台的技术攻关能力,实现多项关键核心技术突破,为整个采矿智能装备体系的迭代升级提供了重要支撑。

面向我国矿产资源安全保障与矿业绿色智能化转型的战略需求,后续将持续强化创新主体作用,聚集高端科研人才、整合内外创新资源,推进采矿装备前沿技术与科研成果的工程化验证与产业化应用。通过自主可控智能装备赋能井下采掘作业智能化、绿色化升级,为我国采矿装备国产化替代、矿业产业链供应链安全稳定及行业高质量、低碳化发展提供关键技术与装备支撑。

参考文献(References):

[1] 黄麟淇,李夕兵,李传奇.人工智能赋能金属矿开采的技术进展与未来图景[J].中国有色金属学报,2026,36(3):1144-1163.
Huang Linqi, Li Xibing, Li Chuanqi. Technological advances and future outlook of artificial intelligence-enabled metal mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2026,36(3):1144-1163.

[2] Ebad Shouki A, Abueid Aws I, Amara Marwa, et al. AI-driven digital twins in mining operations: a comprehensive review[J]. Technologies,2026,14(5):269.

[3] Hazrathosseini A, Moradi Afrapoli A. The advent of digital twins in surface mining: its time has finally arrived[J]. Resour Policy,2023,80:103-155.

[4] 王连成,邵安林,曲福明,等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
Wang Liancheng, Shao Anlin, Qu Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2025,36(5):971-983.

[5] 胡乃联,李国清.我国金属矿山智能化现状与问题探讨[J].金属矿山,2024(1):7-19.
Hu Nailian, Li Guoqing. Discussion on the status and issues of intelligence for metal mines in China[J]. Metal Mine,2024(1):7-19.

[6] 李云松,李帅,翟庆祥,等.金属矿绿色智能化开采现状与发展趋势[J].现代矿业,2025,41(8):46-50+70.
Li Yunsong, Li Shuai, Zhai Qingxiang, et al. Current situation and development trend of green intelligent mining of metal mines[J]. Modern Mining,2025,41(8):46-50+70.

[7] 欧志成,彭跃金,杨宁等.智能装备在矿山的应用现状[J].能源与节能,2025(11):69-72+76.
Ou Zhicheng, Peng Yuejin, Yang Ning, et al. Application status of intelligent equipment in mine[J]. Energy and Energy Conservation,2025(11):69-72+76.

[8] Athanasios Kokkinis, Theodore Frantzis, Konstantinos Skordis, et al. Review of automated operations in drilling and mining[J]. Machines,2024,12(12):845

[9] 张元生,战凯,马朝阳,等.智能矿山技术架构与建设思路[J].有色金属(矿山部分),2020,72(3):1-6.
Zhang Yuansheng, Zhan Kai, Ma Zhaoyang, et al. Technical architecture and construction ideas of intelligent mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2020,72(3):1-6.

[10] Seguel F, Palacios-Játiva P, Azurdia-Meza C A, et al. Underground mine positioning: a review[J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(6):4755-4771.

[11] Zhironkina O, Zhironkin S. Technological and intellectual transition to mining 4.0: a review[J]. Energies, 2023, 16(3):1427.

[12] Botín-Sanabria D M, Mihaita A S, Peimbert-García R E, et al. Digital twin technology challenges and applications: a comprehensive review[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6):1335.

[13] Dong Longjun, Wang Jian, Wang Jiachuang, et al. Safe and intelligent mining: some explorations and challenges in the era of big data[J]. Journal of Central South University, 2023,30(6):1900-1914.

[14] 鞠建华,韩见,鞠方略.中国智能矿山发展趋势与路径分析[J].中国矿业,2023,32(5):1-7.
Ju Jianhua, Han Jian, Ju Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. China Mining Magazine,2023,32(5):1-7.

[15] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[16] 赵国君,李兴武,张凤廉,等.我国矿业绿色发展标准体系建设路径探索研究[J].矿业研究与开发,2026,46(4):286-294.
Zhao Guojun, Li Xingwu, Zhang Fenglian, et al. Research on the construction path of China's standard system for green mining development[J]. Mining Research and Development,2026,46(4):286-294.

[17] 周文略,湛景震,范才兵,等.科技创新赋能绿色矿山建设研究与实践[J].金属矿山,2026(1):51-58.
Zhou Wenlue, Zhan Jingzhen, Fan Caibing, et al. Study and practice of green mine construction empowered by scientific and technological innovation[J]. Metal Mine, 2026(1): 51-58.

[18] 时金玲,孙映祥.绿色矿山建设与实践案例[J].中国矿业,2025,34(3):73-82.
Shi Jinling, Sun Yingxiang. Construction and practice cases of green mines in China[J]. China Mining Magazine,2025, 34(3):73-82.

[19] 李照永,侯至群,倪曙,等.关于绿色矿山全面建设与管理的几点思考[J].绿色矿山,2025,3(2):74-80.
Li Zhaoyong, Hou Zhiqun, Ni Shu, et al. Some thoughts on the overall construction and management of green mine[J]. Journal of Green Mine,2025,3(2):74-80.

[20] 黄麟淇,陈江湛,周健,等.未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3436-3449.
Huang Linqi, Chen Jiangzhan, Zhou Jian, et al. Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3436-3449.

[21] GB/T 12761—2025 天井钻机[S].

[22] 吴昊骏,纪洪广,龚敏,等.我国地下矿山凿岩装备应用现状与凿岩智能化发展方向[J].金属矿山,2021(1):185-201+212.
Wu Haojun, Ji Hongguang, Gong Min, et al. Present application status of rock drilling equipment in underground mine and the development direction for intelligent rock drilling in China[J]. Metal Mine,2021(1):185-201+212.

[23] 徐冬东.金属矿深部开采现状与发展探讨[J].世界有色金属,2020(22):51-52.
Xu Dongdong. Discussion on present situation and development of deep mining in metal mines[J]. World Nonferrous Metals,2020(22):51-52.

[24] 谭家琪,李东明,豆龙,等.凿岩台车自动调平电液系统研究[J].液压气动与密封,2025,45(4):16-24.
Tan Jiaqi, Li Dongming, Dou Long, et al. Research on automatic leveling electro-hydraulic system of rock drilling jumbos[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals,2025,45(4): 16-24.

[25] 席汝凯,李东明,张永玺.液压凿岩机回转速度控制系统[J].金属矿山,2017(3):153-156.
Xi Rukai, Li Dongming, Zhang Yongxi. Rotary speed control system of hydraulic rock drill[J]. Metal Mine,2017 (3):153-156.

[26] 孙达仑,李万鹏.智能中深孔全液压凿岩台车 CAN 总线控制系统[J].矿业研究与开发,2016,36(9):69-71.
Sun Danlun, Li Wanpeng. CAN bus control system of the intelligent full-hydraulic drill jumbo for medium-deep hole [J]. Mining Research and Development,2016,36(9):69-71.

[27] 席汝凯,李东明,张永玺,等.基于 Solidworks 的大臂组合体有限元分析[J].矿业研究与开发,2016,36(8):78-80.
Xi Rukai, Li Dongming, Zhang Yongxi, et al. Finite element analysis on the bearing assembly based on Solidworks[J]. Mining Research and Development,2016,36 (8):78-80.

[28] 谭家琪.基于混合智能优化算法的凿岩台车自动调平电液控制系统研究[D].长沙:长沙矿山研究院,2025.
Tan Jiaqi. Research on the electro-hydraulic control system for automatic leveling of rock drilling jumbos based on hybrid intelligent optimization algorithm[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research,2025.

[29] 罗红波,施显阳,魏鹏,等.凿岩台车多关节机械臂的 PID 位置控制研究,2019,51(4):157-162.
Luo Hongbo, Shi Xianyang, Wei Peng, et al. Research on PID position control of multi-joint manipulator for rock drill car[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4): 157-162.

[30] 陈淋倩,闫杰,李东明.钻机机械手智能定位控制研究[J].矿业研究与开发,2014,34(6):61-63+85.
Chen Linqian, Yan Jie, Li Dongming. Research on intelligent positioning control of drilling manipulator[J]. Mining Research and Development,2014,34(6):61-63+85.

[31] 陈淋倩,闫杰,豆龙.基于 LabVIEW 的比例阀性能测试试验台的设计[J].液压与气动,2014(10):37-39+45.
Chen Linqian, Yan Jie, Dou Long. Design of performance test experiment platform for proportional valve with LabVIEW[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014 (10):37-39+45.

[32] 何小平,李东明,闫杰,等.应变片测试方法在凿岩施工中的应用[J].矿业研究与开发,2014,34(1):102-104.
He Xiaoping, Li Dongming, Yan Jie, et al. Application of strain gages test method on drilling construction[J]. Mining Research and Development,2014,34(1):102-104.

[33] 何小平,王毅,闫杰,等.潜孔钻机施工中钻孔偏斜的原因和对策[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(1):73-75.
He Xiaoping, Wang Yi, Yan Jie, et al. Reasons and countermeasures of axial deviation in process of drilling by down-the-hole drill[J]. Bridge and Tunnel Machinery & Construction Technology,2013,30(1):73-75.

[34] 何小平,李东明,闫杰,等.潜孔钻机钻架结构的有限元分析[J].建筑机械,2013(11):87-89.
He Xiaoping, Li Dongming, Yan Jie, et al. Finite element analysis of the drill boom diving boring machine[J]. Construction Machinery,2013(11):87-89.

[35] 周建庚,张永玺,杨琛,等. 适用于井下采矿钻机的钻杆库系统[J]. 矿山机械,2014,41(10):21-24.
Zhou Jiangeng, Zhang Yongxi, Yang Chen, et al. Drill rod changer system applying to underground drill rigs[J]. Mining & Processing Equipment,2014,41(10):21-24.

[36] 陈淋倩.地下潜孔钻机 4WIS 模型研究及控制优化[D].长沙:长沙矿山研究院,2015.
Chen Linqian. Research and the optimization of control on four wheel independent steering for underground DTH Rig[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research,2015.

[37] GB/T 13344—2019 潜孔冲击器和潜孔钻头[S].

[38] 杨磊,戴守晨,鲍久圣,等.我国矿山智能机器人发展与研究概况及典型应用场景分析[J].煤炭科学技术,2026,54(2):79-101.
Yang Lei, Dai Shouchen, Bao Jiusheng, et al. Overview of development and research on intelligent mining robots in China and analysis of typical application scenarioss[J]. Coal Science and Technology,2026,54(2):79-101.

[39] 孟浩洋,庞义辉.矿用机器人发展现状与关键共性技术发展趋势分析[J].煤炭科学技术,2026,54(5):109-124.
Meng Haoyang,Pang Yihui. Analysis of development status and key common technology trends of mining robots[J]. Coal Science and Technology,2026,54(5):109-124.

[40] 鲁伟.采矿工程中的智能化技术应用与发展趋势研究[J].中国矿业,2024,33(增刊 1):199-202.
Lu Wei. Research on application and development trend of intelligent technologyin mining engineering[J]. China Mining Magazine,2024,33(Suppl.1):199-202.

[41] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
Cai Meifeng, Tan Wenhui, WU Xinghui, et al. Current situation and development strategy of deep intelligentmining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3409-3421.

[42] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
Guo Qifeng, Cai Meifeng, Wu Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[43] 彭瑞东,薛东杰,孙华飞,等.深部开采中的强扰动特性探讨[J].煤炭学报,2019,44(5):1359-1368.
Peng Ruidong, Xue Dongjie, Sun Huafei, et al. Characteristics of strong disturbance to rock mass in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1359-1368.

[44] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
Wang Yong, Wu Aixiang, Yang Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 44(6): 125-139.

[45] 李国清,王浩,侯杰,等.地下金属矿山智能化技术进展[J].金属矿山,2021(11):1-12.
Li Guoqing, Wang Hao, Hou Jie, et al. Progress of intelligent technology in underground metal mines[J]. Metal Mine,2021(11):1-12.

[46] 吴立活,Miguel Canz,Hermes Guevara,等. 海外大型露天矿山智能化建设体系与应用实践:以拉斯邦巴斯铜矿为例[J].金属矿山,2025(1):207-215.
Wu Lihuo, Miguel Canz, Hermes Guevara, et al. Intelligent construction system and application practice of large-scale open-pit mines overseas:taking Las Bambas copper mine as an example[J]. Metal Mine,2025(1):207-215.

[47] Ali M, Izeldeen M, Osman A A. AI-driven mining 4.0: a systematic review of smart, sustainable, and autonomous technologies across the mining lifecycle[J]. Current Journal of Applied Science and Technology,2025,44(6):125-139.

[48] 黄洁,郭冬艳,孙映祥,等.中国矿业绿色发展评价及耦合协调分析[J].上海国土资源,2026,47(2):141-147.
Huang Jie, Guo Dongyan, Sun Yingxiang, et al. Evaluation and coupling coordination analysis of green development in China's mining industry[J]. Shanghai Land & Resources, 2026,47(2):141-147.

[49] 孙映祥,杨繁,宁娜.甘肃省绿色矿山建设管理实践与建议[J].中国矿业,2023,32(7):50-54.
Sun Yingxiang, Yang Fan, Ning Na. Practice and suggestions on the management of green mines construction in Gansu Province[J]. China Mining Magazine,2023,23(7):50-54.

[50] 赵奕,张海胜,张维国,等.金属矿山露天矿智能化建设路径与总体技术架构研究[J].中国矿山工程,2026,55(2):36-45.
Zhao Yi, Zhang Haisheng, Zhang Weiguo, et al. Research on the intelligent construction path and overall technical architecture of open-pit metal mines[J]. China Mine Engineering,2026,55(2):36-45.

[51] 蒋正国.复杂地质条件下矿山智能开采装备协同控制研究[J].世界有色金属,2026(7):130-132.
Jiang Zhengguo. Research on collaborative control of intelligent mining equipment in mines under complex geological conditions [J]. World Nonferrous Metals,2026(7):130-132.

[52] 王运敏,张松波,代碧波,等.金属非金属矿业减碳路径与工程科技[J].金属矿山,2023(1):1-7.
Wang Yunmin, Zhang Songbo, Dai Bibo, et al. Carbon reduction path and engineering technology in metal and nonmetal mining industry[J]. Metal Mine,2023(1):1-7.

[53] 王国法,任世华,庞义辉,等.我国智能绿色矿业发展战略研究[J].煤炭经济研究,2021,41(12):4-10.
Wang Guofa, Ren Shihua, Pang Yihui, et al. Research on development strategy of intelligent green mining industry in China[J]. Coal Economic Research,2021,41(12):4-10.

[54] 李沚昊.智能化矿山采矿技术中的安全管理问题与应对措施研究[J].能源与节能,2025(3):119-122.
Li Zhihao. Safety management problems in intelligent mining technology and countermeasures [J]. Energy and Energy Conservation,2025(3):119-122.

[55] 谢红星. 基于安全管理问题的智能化矿山采矿技术分析[J].世界有色金属,2024(17):34-36.
Xie Hongxing. Analysis of intelligent mining technology based on safety management issues[J]. World Nonferrous Metals,2024(17):34-36.

[56] 张冰,李欣,万欣欣.从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J].系统仿真学报,2019,31(3):369-376.
Zhang Bing, Li Xin, Wan Xinxin. From digital twin to digital engineering modeling and simulation entering a new era[J]. Journal of System Simulation,2019,31(3):369-376.