



金属矿山深部智能开采现状及其发展策略

蔡美峰, 谭文辉, 吴星辉, 张丽萍

(北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 深部安全高效开采是我国金属矿产资源开发面临的迫切问题, “三高”导致传统采矿方法困难。世界各国都在开展深部智能开采研究。本文系统分析了国内外智能采矿的发展现状, 从多个矿山智能化建设案例总结出我国矿山在开采环境智能感知、提升运输自动运行、采掘遥控作业、辅助系统无人值守、生产计划和调度智能决策等方面进展, 剖析了我国金属矿深部智能开采存在的问题, 并对我国金属矿深部智能开采发展策略提出了建议。

关键词: 金属矿山; 深部开采; 智能开采; 智能感知; 智能控制

文章编号: 1004-0609(2021)-11-3409-13

中图分类号: TD85

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42115

CAI Mei-feng, TAN Wen-hui, WU Xing-hui, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3409–3421. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42115

人类的生存、社会的发展离不开矿产资源, 据统计, 世界上 95% 的能源、80% 的工业原料、70% 以上的农业生产资料来自于矿物原料^[1]。其中, 金属矿产资源对国民经济的发展和社会物质文明与科技进步更具有举足轻重的作用。

我国金属矿山 90% 左右为地下矿山, 20 世纪 50 年代建成的一批地下金属矿山中, 有 60% 的矿山因储量枯竭已经或接近闭坑, 其余 40% 的矿山正逐步向深部开采过渡^[1]。未来 10 年内, 我国将有三分之一以上金属矿山的开采深度达到或超过 1000 m, 其中最深的可达 2000~3000 m^[1]。因此, 深部开采成为我国金属矿产资源开发的必由之路。

进入深部开采后, 矿床地质构造和矿体赋存条件恶化、破碎岩体增多、地应力增大、涌水量加大、井温升高、开采技术条件和环境条件严重恶化, 导致开采难度加大、劳动生产率下降、成本急剧增加, 使正常生产难以维继^[2]。2017 年, 中国工程院咨询

研究项目《我国金属矿深部开采创新技术体系战略研究》指出, 我国金属矿深部开采需要面对和解决五大挑战与难题^[1]: 第一是金属矿深部开采动力灾害预测与防控; 第二是深井高温环境与热害控制及治理; 第三是深部非传统采矿方法研究; 第四是深井遥控自动化智能采矿; 第五是适应深部开采的选矿新工艺与新技术。由于深部多场耦合的复杂开采环境, 智能开采技术成为未来解决金属矿深部开采所面临关键难题的最有效手段。

“智能开采”是综合利用传感器、自动化设备、通信、人工智能、虚拟现实等技术, 通过对生产过程的动态实时监测和智能化的决策控制, 使采矿决策和生产过程管理高度精细、可靠、准确, 确保矿山生产处于最佳状态和最优水平, 使矿山最终实现安全高效、绿色开采^[3]。

国外一些发达国家经过多年实践, 在地下金属矿智能开采技术领域积累了丰富的经验, 但是国内

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(L1824042)

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-09-27

通信作者: 谭文辉, 副教授, 博士; 电话: 010-62333700; E-mail: wenhui.t@163.com

在智能开采领域还处于发展阶段，还没有形成系统性的深部矿山开采技术。为此，本文对金属矿山深部智能开采国内外现状进行了分析，根据我国金属矿山深部特点，提出了建立符合深部矿山特点的智能开采技术体系的战略和策略，可为我国建立金属矿产资源供应保障体系、完善金属矿深部开采基础理论体系、建设一流矿业强国提供参考。

1 国外智能开采现状

面对不断恶化的深部开采条件和环境条件，如何最大限度提高劳动生产率和采矿效率、保证开采安全与高效？最有效、最可靠的方法是智能开采。

从 20 世纪末以来，为了取得采矿工业的技术优势，芬兰、瑞典、加拿大、德国等国先后实施了“智能化矿山”、“无人化矿山”、2050 计划、工业 4.0 等的发展规划^[4-17]。

1992 年至 1997 年，芬兰通过对资源及其生产过程中的实时管理、设备自动化和生产维护自动化等三个领域的研究，实施了智能矿山技术研究计划

(IM)，初步建立了智能矿山技术体系^[6-8]。1997 年以后，芬兰在此基础上进一步提出了智能矿山实施研发技术计划(IMI)，历时 3 年，开发出先进的机械装备与系统，并在凯米地下矿进行了开发试验^[6-8]。

为了开发能够明显降低地下矿山生产成本的采矿方法和装备，如自动化铲运机、自动化和半自动化的凿岩、装药和爆破系统等，瑞典开展了智能采矿国家综合研究计划——“采矿技术 2000 (GROUNTECKNIK—2000)”^[9]。

2008 年，力拓集团启动了“未来矿山”计划，在皮尔巴拉铁矿部署了围绕计算机控制中心展开的无人驾驶卡车、无人驾驶火车、自动钻机、自动挖掘机和推土机等运输建设^[10]。在 2017 年末的时候，英美资源集团技术总监 Tony O'Neill 在伦敦矿业与金融会议上表示，英美资源力争在未来 5~7 年内逐步用全智能化自动采矿覆盖其所有采矿业务^[10]。

为了解决地表以下 2500 m 处采矿所涉及的四个战略主题：减少应力灾害、减少能耗、提升矿石运输与生产能力、改进工人安全性(见图 1)，加拿大

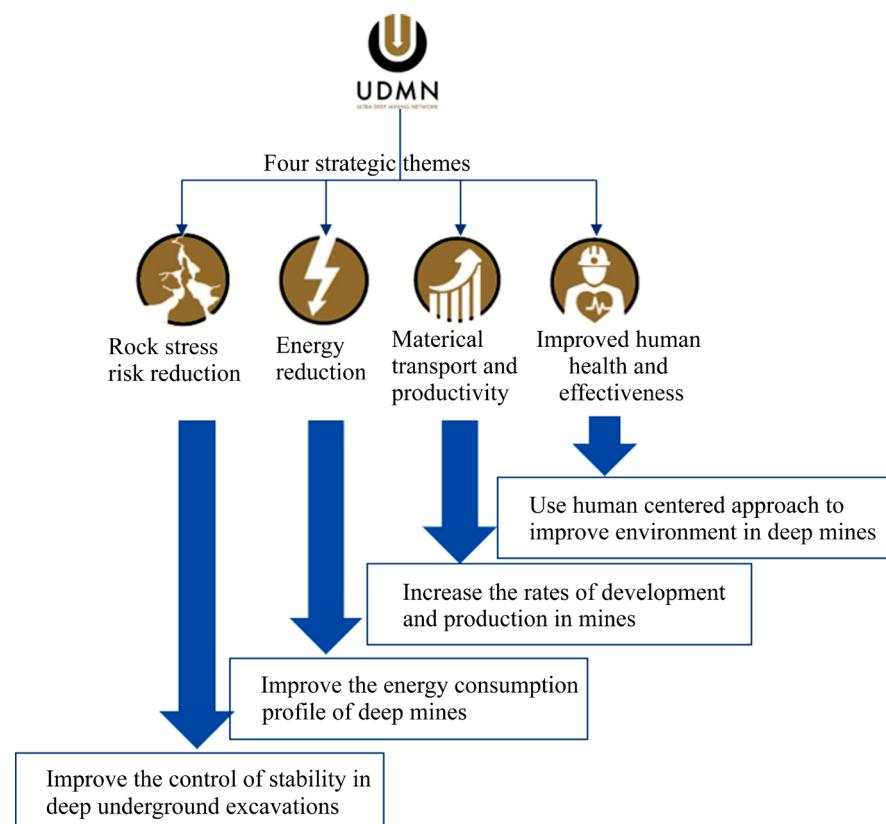


图 1 超深采矿联盟研究主题^[11]

Fig. 1 Research themes of ultra-deep mining network^[11]

建立了超深采矿联盟(Ultra-Deep Mining Network, UDMN), 并于 2015 年至 2019 年斥资 4600 万美元进行了研究^[11-12]。

加拿大已经完成论证并开始实施采矿自动化项目(MAP)——基于国际镍公司研发的地下高频宽带通信系统, 研发遥控操作、自主操作和自调整系统等核心技术^[10, 12], 这使得加拿大在采矿自动化技术方面处于国际领先地位。加拿大还计划通过卫星操控边远地区的一个矿山, 力争在 2050 年将该矿建成“无人化矿山”。

欧盟启动了三项前瞻性的课题: ①未来智能深矿井的创新技术与理念(Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future, I²mine)^[13]; ②热、电、金属矿物的联合开发(Combined Heat, Power and Metal extraction, CHPM2030)^[14], ③利用生物技术从深部矿床中提取金属的新采矿理念(New Mining Concept for Extracting Metals from Deep Ore Deposits using Biotechnology, BIOMOre)(2015~2018 年)^[15]。

国外一些矿山在智能化矿山方面已经走在了前面, 如: 世界上第一座智能化的地下铁矿山——瑞典的基律纳铁矿。基律纳铁矿是目前世界上最大、最现代化的地下铁矿山之一, 基律纳铁矿的采场凿岩、装运和提升都已实现智能化和自动化作业, 凿岩台车和铲运机都已实现无人驾驶(见图 2), 并有智能化的计算机集控中心, 基本实现了“无人地下采矿”, 工人和管理人员在计算机集控中心监

控并执行现场操作^[18]。

西澳的日出坝金矿(Sunrise Dam)^[19]为了应对全球经济调整的严峻形势, 采用物联网、人工智能和大数据分析预测等最新技术, 进行企业战略调整, 实施了精益灵敏的生产管理方式。日出坝金矿与 Maptek 和 MinLog 等公司合作, 成功部署智能矿山管理系统 MineSuite, 实现了矿山进度计划与井下生产现场之间的无障碍沟通, 完整有效地连接企业经营价值链的各个环节。

日出坝金矿地测采工程师使用 Maptek 数字矿山软件 Vulcan、Eureka、Evolution 等, 完成地质建模、验证和数据模型整合, 进行开采、凿岩爆破和矿石铲运设计(见图 3)。所有这些数字化过程和结果通过智能矿山统一协调和管理, 在各相关方之间充分交流和共享。

世界上最大的充填法矿山澳大利亚奥林匹克坝铜铀矿^[20-21]于 1997 年开始进行自动化 LHD(铲运机)项目研究; 1999 年, 该矿山将 MINEGEM 系统安装在 Caterpillar 公司的 ElphinstoneR2900 型铲运机上, 采用光纤和微波无限电网络通讯在地表进行控制; 2003 年, 该矿山首次实现由 1 名操作员在地表控制中心同时遥控两台铲运机和一台装在卸载点的碎石机。目前, 奥林匹克坝矿采用了 Minesuite 矿山信息处理管理模块、井下通信网络模块、车辆调度管理模块, 共有 50 辆开采铲运设备、300 辆辅助车辆、1500 个矿灯装有特制的井下 WiFi 定位标签。图 4 所示为该矿的 LHD 自动化出矿。



图 2 遥控砼喷射与加固技术^[18]

Fig. 2 Remote control technology of concrete injection and reinforcement^[18]: (a) Concrete spray machine by remote control; (b) Bolt and steel mesh installation by rock bolting jumbo

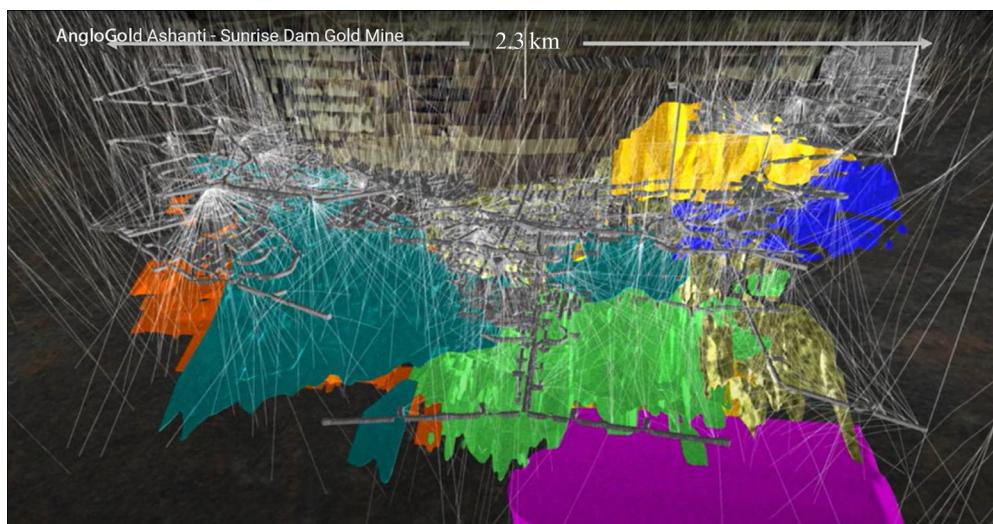


图3 日出坝金矿地质模型与地下开采系统示意图^[19]

Fig. 3 Geological model and schematic diagram of underground mining system of Sunrise Dam Gold Mine^[19]

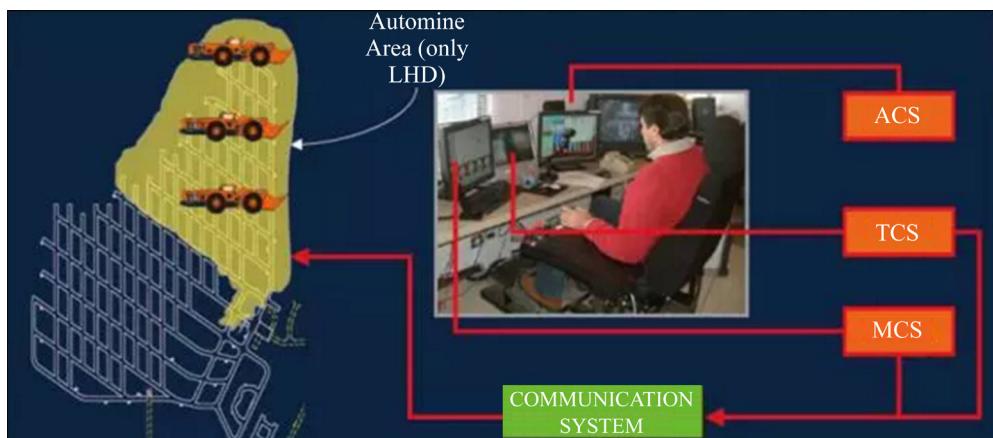


图4 LHD 自动化出矿^[20]

Fig. 4 LHD Automatic ore mining^[20]

全球最大的地下矿山智利特尼恩特(EI Teniente)铜矿^[20]在自动铲运机出矿方面颇具特色，采用山特维克的地下矿山自动化矿石运输系统(AutoMine 系统)，在距生产区约 15 km 的地表实施控制。控制室只有两人工作，一人负责操作地下铲运机，随时可将铲运机在线转至遥控等待、自动或遥控操作状态，而无需停车；另一人负责生产计划和协调工作。

2018 年 11 月 29 日，全球第二大铁矿石商力拓(Rio Tinto)宣布，已全面获批耗资 26 亿美元的 Koodaideri 矿山项目，在西澳洲打造全球首个纯“智能矿山”项目^[22]。Koodaideri 矿山将布设智能设备网络，成为一个遍布着机器人、无人驾驶矿车、无人卡车、无人钻机和无人运货火车的矿山，项目

创新将达 70 多项。

澳洲第四大矿山罗伊山铁矿自 2017 年起，与 Maptek 组成跨企业、跨地域的联合科研项目组，把人工智能、深度学习和虚拟现实等最新技术结合起来，成功应用于智能矿山建设^[23]。目前，该项目已经取得阶段性成果，包括：用 Python 语言创建 AI 矿体建模函数库；开发自动流程管理工具，统一管理建模方法脚本；利用多高斯克里金算法构建强大的资源估算统计计算工具；与加拿大 LlamaZoo 公司共同开发沉浸式资源可视化平台 MineLife(见图 5)；建立了先进的企业级数据管理云计算平台等。

近日，全球最大的铜矿公司智利国家铜业公司(Codelco)与芝加哥的 AI 技术提供商 Uptake 签订了



图 5 罗伊山矿资源可视化平台^[23]

Fig. 5 Resource visualization platform of Mount Roy Mine^[23]

一项协议, 将在矿山运营中引入 AI 技术, 以监测采矿设备的健康状况, 并确保采矿作业高效运转。

从国外智能开采技术的发展可见, 国外的智能化开采已进入相对成熟阶段, 智能开采将成为深部开采的必然之路。智能开采的关键技术由以下三个部分组成^[24-25]:

1) 开采智能探测

透明地质是智能开采的基础, 因此必须布设各类传感器和非接触测量设备对采场区域进行开采前的自动探查和检测, 以及开采过程中对环境变化的感知等, 进行矿岩的自动识别、复杂采矿环境的辨识, 为采矿机俯仰采控制和摇臂调高等开采活动提供可靠信息, 实现地质条件的透明化^[26-27]。

2) 开采智能导航

为了实现对开采设备和人员的自动定位, 服务于矿山开采和安全监控, 可采用光纤惯性导航、三维雷达、三维激光、红外等技术为精确开采保驾护航。

3) 开采智能控制

开采智能控制需要融合自动化、可视化、远程遥控、三维虚拟现实等多项技术, 根据不断变化的开采条件自动调控采掘过程, 使智能化采掘设备与自动调度决策集为一体, 建立以成套装备总控制网络为核心, 单机装备为执行机构的智能控制模式, 最终形成装备安全感知、信息可靠传输、动态决策

于一体的智能开采系统^[24]。

此外, 智能化开采软件系统的完善、矿山物联网网络系统的建立也必不可少。将物联网、云计算、大数据、人工智能、自动控制、移动互联网、机器人化装备等与现代矿山开发技术相融合, 才能形成一个矿山感知、互联、分析、自学习、预测、决策、控制的完整智能系统^[25]。

2 国内金属矿山智能开采现状

国内智能矿山的发展历程大致分为三个阶段^[28], 如表 1 所示。

目前, 我国智能矿山建设已经初具规模, 数字化、信息化和智能化技术的大量应用显著提升了矿山技术设备、生产控制、安全管理和经营管理的综合水平^[17, 29-35], 促进了矿业的科学发展。矿业软件的应用和主体设备的自动化在国内矿山企业已经基本实现, 部分矿山实现了生产管理远程化、遥控化和无人化。一些先进企业正在利用人工智能、大数据和云计算技术, 创新矿山智能操控、决策系统, 争取实现生产作业、经营管理全流程智能管控。具体体现在地质、测量、采矿信息的数字化与可视化, 生产运行智能化管控, 安全生产智能化监测, 预警和经营管理智能决策等四个方面。

在智能化建设方面突出的有以下几个矿山。

表1 国内智能矿山的发展历程^[28]Table 1 Development history of intelligent mine in China^[28]

Stage	Time	Stage characteristics	Technical features	Function realization
No.1	In the 1990s	Single machine automation stage	Classification sensing technology, 2D-GIS, Single machine transmission	Programmable control, remote centralized control operation, alarm and locking
No.2	Early 21st century	Integrated automation stage	Integrated platform, 3D-GIS, high speed network	Primary data processing, primary system linkage, comprehensive information release
No.3	Current	Local intelligence stage	BIM, Big data, cloud computing	Local closed loop operation, multiple systems interworking, professional decision

1) 超大型绿色智慧矿山——马城铁矿

马城铁矿是目前国内规模最大的在建地采铁矿山，建成后将成为国内最大的充填法开采矿山。马城铁矿联合庞巴迪、夏尔克等国际领先的无人电机车运输控制与制造商，采用自动化驾驶有轨运输技术，实现了运输环节的无人化。首创国内多因素智能通风系统(见图 6)^[36]，采用变频风机，分区分季节按需通风，降低能耗和成本，创造矿山安全舒适的工作环境。依托互联网+智慧应用，物联网技术、大数据分析和人工智能，把资源、设备和人有机地结合在一起，实现了产品全生命周期和全流程的数字化、资源开采可视化、设备管控智能化和可控化、信息传输网络化、生产管理与决策科学智慧化，是国内超大规模深井开采智慧矿山示范基地。

2) 智慧矿山——梅山铁矿

梅山铁矿是我国重点黑色金属地下矿山企业之一，曾是我国自行设计，自己建设的国内最大的一座地下铁矿^[37]。装备水平在国内地下冶金矿山处于领先地位。采区配备了多个系统，如出矿信息采集系统、人员定位系统、通风检测监控系统、无线通信系统等，并在前期建设中，解决了矿体三维建模与矿体数字化，同时基于地理信息系统平台 MapGIS 开发了地测图数一体化管理系统，对矿山地质、测量业务数据进行多源采集、多途径加工，根据不同需求在不同平台上进行可视化输出，取得了很好的应用效果。

矿山生产过程数据管控平台是梅山整个数字矿山的核心，覆盖了采矿、选矿生产、检验、计量、

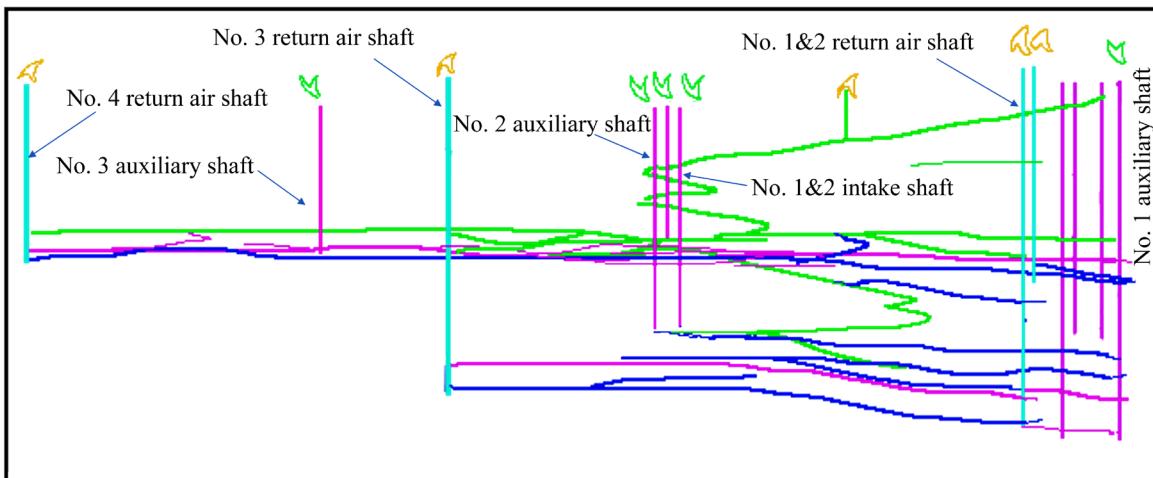
检修、能源消耗及产品销售等多方面生产信息，为各级管理工作提供实时的生产数据，为管理层提供及时的生产状况信息，并通过对各种信息的分析，支持企业管理优化与决策。

3) 采选联合智能矿山——锡铁山矿

西部矿业股份有限公司锡铁山铅锌矿是我国储量最大的铅锌矿，其智能矿山建设从采矿、选矿、管矿三方面进行了完整的架构设计，从集团应用和矿山应用两个层面，全方位地规划了整个矿山 29 个子系统，同时串起来形成一个完整的智慧矿山^[38]。在智能采矿方面，实现了无人驾驶、远程装矿、采矿数据集成、智能通风等；在智能选矿方面，实现了磨浮无人化、磨矿专家系统、泵站无人值守等；在智能管控方面，通过 MES、集中计量、无人计量、能源管理、物资管理等，实现了矿山数据统计工作的智能化，各类减员基本都在 80%以上，大大提升了企业生产经营执行效率^[39]。

4) 首套全自动无人驾驶系统——马钢张庄矿

张庄矿业智能采矿首先从井下无人驾驶系统入手，综合应用网络通信技术、过程控制技术、激光及传感器技术、电气及自动化监测技术等^[40]，实现了井下矿山生产作业监控监测、自动控制、安全管理，有效地减少了井下作业人员及物资投入，实现了最大限度的安全运输，打造出“以人为本”的矿山。2018 年 8 月，国内首套全自动、无人干预的马钢张庄铁矿井下矿电机车无人驾驶系统运行成功(见图 7)，标志着我国采矿向智能化、无人化迈出了坚实的一步。

图 6 马城铁矿智能通风系统^[36]Fig. 6 Intelligent ventilation system of Macheng Iron Mine^[36]图 7 张庄矿无人驾驶系统^[40]Fig. 7 Unmanned system in Zhangzhuang Mine^[40]

5) 罗河矿智慧矿山建设

罗河矿的智慧矿山建设首先体现在自动化无人化技术的进步导致生产效率的提升方面^[41-42]。其次, 通过在生产区域安装控制操作台和服务器, 将井下机车的运行状态、监测参数、机车位置、动态视频等信息传输到上位机, 机车操作人员据此执行远程操控(见图 8), 智慧矿山全部建设完成后, 可实现井下-560 m 运输水平电机车无人驾驶与远程遥控装矿系统全覆盖。

为了推动矿山安全建设, 罗河矿率先在井下成功应用 4G 通信系统, 达到了井下与地面、井下与井下的语音视频通信、适时视频监控、第三方数据传输等功能, 极大地提高了矿山综合管理效率, 提升了应急反应能力。

图 8 罗河矿远程操控系统^[41]Fig. 8 Remote control system of Luohe Mine^[41]

6) 攀钢智慧矿山建设

截至 2019 年 10 月, 攀钢矿业公司已建成 GPS 矿车调度系统、采掘计划编制系统、生产管控系统、选钛厂 MES 系统、尾矿库在线安全监测系统等 20 余项, 初步实现了重点产线和重点作业自动化和信息化^[43]。

在攀枝花铁矿和白马铁矿采场, 根据采场作业情况, GPS 矿车调度系统可智能安排行程路线和作业点; 选矿厂通过电脑对无人值守自动化系统进行操作, 可实现破碎过程远程监控; 在白马、密地尾矿库(坝)安装了感知与预警系统, 实现了对尾矿库库区的降雨量、液位、水质、压力、坝内应力等参数的实时自动化监测和尾矿库(坝)危害(危险)预警。

预报。此外，各种管理系统极大地提升了企业信息化管理水平。

7) 三山岛金矿智能矿山建设

三山岛金矿是目前国内唯一海底采矿的黄金矿山，也是目前全国机械化程度和整体装备水平最高的现代化金矿，在数字化开采领域居于国内领先地位^[44]。三山岛金矿智能矿山建设体现在以下几个方面：

① 多技术支撑的矿山物联网平台建设(见图9)。全面升级和扩展了企业网、工业环网、井下无线网络(Wifi)、井下4G网络建设，实现了矿山信息高速公路的全面升级。

② 引进了地下智能铲运机，通过车身姿态传感器、环境自主识别传感器以及自主行驶控制算法，实现了智能铲运机在各种巷道环境下的自动驾驶。此外，还有破碎机远程遥控系统、基于射频识别及数据挖掘技术的车辆精细化管理系统。

③ 综合利用工业物联网、智能控制、建模仿真、以及大数据分析等技术手段，建设了数据采集平台与数据中心、智能操作选厂、虚拟选矿厂及云服务平台。

④ 建设基于三维可视化系统的透明矿山系统，实现矿山各管理系统的高度集成化、一致化、协同化。建设了基于增强现实(AR)/虚拟现实技术

(VR)构建的矿山安全仿真与培训一体化系统。

归结起来，由于地下空间环境的复杂性和特殊性，国内地下矿山的智能化建设大多集中在以下三个方面。

首先是开采环境智能感知。利用非接触式监测、智能机器人巡检等矿山数据获取技术，异构多源多模态数据融合与封装技术，多源异构传感器协同测量及优化布局技术，异构多源数据通讯与发布技术、实时运行监测与优化控制技术等，对矿山的人员、设备、环境进行全面感知。

其次是采掘和运输自动化。通过引进自动化的凿岩设备、铲装设备、装药设备，自动化井筒提升和有轨运输系统等，运用自控技术、网络技术等，实现采掘、运输、提升和装卸的自动化和集中远程控制与管理。此外，利用数控设备和物联网技术，可以对通风、供配电、排水、压气等辅助系统进行远程控制和管理^[45]。

2019年11月11日，山东黄金莱西金矿与山东移动、华为合作，首次成功实现了5G基站的开通和无人驾驶电机车控制系统的网络对接，标志着5G使智慧矿业迈出关键的一步^[46]。

第三是调度管理智能化。通过建立数据中心和集控中心，可以根据生产实时数据进行智能分析与决策，实现生产全流程的智能化控制和管理。

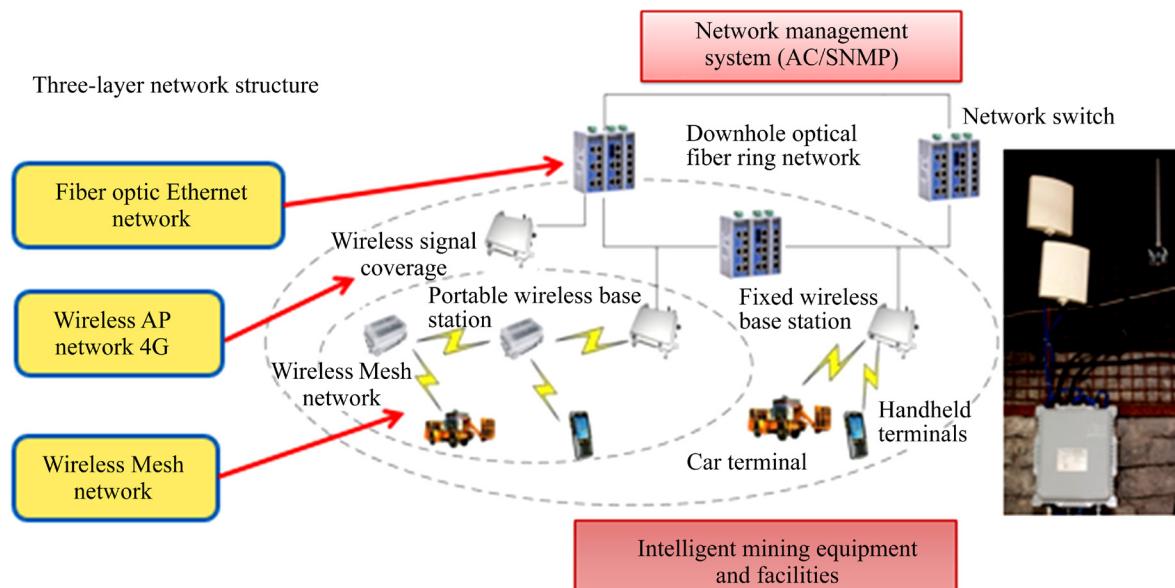


图9 三山岛矿物联平台^[44]

Fig. 9 Internet of Things Platform of Sanshan Island mine^[44]

3 我国金属矿深部智能开采存在的问题与应对策略

3.1 我国金属矿深部智能开采存在的问题

目前, 我国矿山多数已建成了井下光纤主干通信网络, 大部分矿山有环境感知设备、自动化控制系统、灾害监控系统和矿山管理软件等^[47]。但是, 与国外矿山相比, 智能化发展相对滞后, 仍存在以下问题。

1) 开采环境智能感知技术薄弱。对采矿导致的岩石力学条件和环境改变的多场信息监测感知, 是当前地质信息透明化的主要数据信息源。目前单一变化量的测试感知尚可, 但其整体效应、参数融合不足, 对岩层介质变化的规律及判断未形成统一标准。数据和信息孤岛问题、异构多源多模态数据融合问题、标准滞后问题是目前必须解决的问题。

2) 缺乏深部高应力、高温条件下的高效采矿技术, 采矿成本高, 井巷工程推进速度慢。深部环境复杂, 开采过程精确定位导航技术缺乏, 安全应急指挥与调度智能化技术急需提高, 开采过程工艺复杂、设备繁多导致行进路线长、行进阻力大、行程困难多, 急需研发自主行走、智能控制等关键技术。

3) 矿山机械化装备配套性差, 井下大型采掘设备的制造水平低。我国大多数矿山仍然采用的是传统的设备, 其自动化及信息化水平尚不能满足智能开采要求, 缺少成熟的、智能化的国产凿岩钻车、铲运机和矿用汽车等现代装备, 缺乏适合于井下的精确定位导航技术。

4) 采矿生产管控一体化综合信息平台开发相对滞后。在开采优化设计、生产管理、开采环境监测、安全预警等方面, 信息难以共享, 不能为科学决策与管理提供有效的技术支撑^[48]。需要开发全新的具有高度智能化、信息化和协同性的控制技术、决策技术、开采技术和装备体系。

3.2 金属矿深部智能开采发展策略

智能采矿是一个复杂的系统工程, 国内外智能采矿的成功案例无一例外都有合理高效的开采工艺、智能化采矿设备、自动化的提升和运输设备、先进的生产管控模式。因此, 应基于人工智能、物联网、大数据等技术, 集成各类传感器、自动控制

器、传输网络、组件式软件等, 建立深部环境智能感知方法、深井智能开采标准、矿业大数据, 构建深部资源智能化开采理论体系; 攻克深部开采环境智能探测和采矿作业智能化技术, 逐步实现井下无人、井上遥控的智能化开采新模式; 研制具有自主知识产权的深部开采智能传感器和智能采掘设备, 建设矿山云计算大数据管控平台; 建设深部金属矿智能化开采示范矿山, 为解决国家千米以深矿产资源开发提供支撑。

为了突破深部地质与地应力环境精准探测、灾害智能识别与精准控制关键技术, 揭示多场耦合作用机理、智能化开采及协同作业机制, 建立防治与综合利用相结合的金属矿深部多场耦合智能开采技术体系, 金属矿深部智能开采应在四大类 19 个基础研究方向开展研究, 并开发三大类 13 种技术设备, 具体如下。

3.2.1 基础研究方向

1) 深部地应力测量及构造应力场重构

针对传统地应力测量方法在深部测量中存在的理论和方法局限性, 开展深部岩石力学工程地应力测量相关技术研究, 着重研究: 深部岩体非线性本构模型; 深部易碎岩体地应力测量技术; 基于光学测量的地应力测试方法; 深部高应力积聚区实时精准定位辨别方法。

2) 深部多场环境参量与地球物理参数的本构关系

为了实现深部地质构造精细探测和环境参数的精确反演, 着重研究: 地球物理探测新方法; 渗流场、温度场和化学场精准测量; 基于物理化学场方程的环境参量反演方法。

3) 深部多场耦合作用下岩体力学特征及破坏机理

针对深部开采工程面临多场耦合环境和不同于浅部的岩体非线性基础性问题, 重点研究: 透地岩体结构智能识别技术; 大尺寸岩体结构智能识别技术; 岩体结构面连续移动扫描技术; 应力场、渗流场和温度场耦合作用机制; 深部高温、高压条件下岩石结构变化过程。

4) 深部智能连续采选理论技术

围绕深部复杂地质条件下安全、高效、智能开采难题, 重点研究: 深部金属矿智能连续开采原理; 深部采矿智能化工艺技术; 开采过程中应力场动态

反演技术；深部井巷分区分级智能支护技术；充填参数智能决策算法；充填工艺智能化运行技术；智能化匹配与精准给料制备技术。

3.2.2 关键技术设备

1) 深部开采智能化感知设备

开发新型地应力测试设备、多场耦合智能监测设备、岩体结构连续扫描设备、地下空间无人机载激光扫描系统和环境关键参数探测感知仪器，解决岩体内部结构精准识别与三维建模难题。

2) 深部开采过程智能作业设备

研发深部金属矿山连续采掘装备、全断面成井钻机智能化控制技术、井巷通风装置智能调控系统、深部采掘装备无人化智能作业技术，构筑适合中国深部开采的无人采矿技术体系。

3) 深部开采智能管控平台

开发综合数字通信平台、全采区、多系统自适应智能调控技术与系统、构筑基于工业混合云的矿山大数据平台，满足矿山工作面复杂环境下的高可靠、高带宽、高性能管控需求，创建深井条件下全区开采、多系统自适应智能调度技术与系统，形成开采全过程智能管理及调配解决方案。

通过以上措施必将解决深部开采面临的各类技术瓶颈，实现金属矿深部开采的智能化，为我国千米以深矿产资源开发提供强有力的支撑。

4 结语

深部开采是我国金属矿产资源开发面临的迫切问题，面临诸多挑战，智能开采是解决各种挑战最有效的手段。本文简要介绍了国内外地下矿山智能采矿的发展历程和现状，从多个矿山智能化建设案例总结出我国矿山在开采环境智能感知、提升运输自动运行、采掘遥控作业、辅助系统无人值守、生产计划和调度智能决策等方面进展，指出了我国金属矿深部智能开采存在的问题，对金属矿深部智能开采的发展策略提出了建议。

面对深部矿山“三高一扰动”多场耦合环境下采矿的困境，亟需完善深部岩体力学与灾害控制基础理论，提升智能感知技术，为智能开采提供“透明化”作业环境；创新深部矿产资源开发方法和技术体系，为智能开采提供配套的作业空间和工艺；加强矿业与新兴企业的多学科交叉融合，推动

矿业智能化升级改造；建立典型矿山智能开采示范工程，明确大中小型矿山智能化发展路径。通过这些措施，中国金属矿智能产业的提升指日可待。

REFERENCES

- [1] 蔡美峰, 谭文辉, 任奋华, 等. 金属矿深部开采创新技术体系战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
CAI Mei-feng, TAN Wen-hui, REN Fen-hua, et al. Strategic research on innovative technology system for deep mining in metal mines[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] 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 Mei-feng, XUE Ding-long, REN Fen-hua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417–426
- [3] LI Jian-guo, ZHAN Kai. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering, 2018, 4(3): 381–391.
- [4] GUSTAVSSON M, SÄRNHOLM E, STIGSSON P, et al. Energy scenario for Sweden 2050 based on renewable energy technologies and sources[M]. Stockholm, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2011.
- [5] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE4.0[M]. Berlin: National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [6] 刘艾瑛. 为打造智能化矿业大国贡献一份力[N]. 中国矿业报, 2015-06-09(B01).
LIU Ai-ying. To make a contribution to the building of intelligent mining country[N]. China Mining News, 2015-06-09(B01).
- [7] 匿名. 为打造智能化矿业大国贡献一份力[N]. 中国矿业网[EB/OL]. [2015-06-11]. <http://www.chinamining.org.cn/index.php?a=show&c=index&catid=9&id=13229&m=content>. Anonymity. To make a contribution to the building of intelligent mining country[N]. China Mining Network [EB/OL]. [2015-06-11]. <http://www.chinamining.org.cn/index.php?a=show&c=index&catid=9&id=13229&m=content>.
- [8] 古德生, 周科平. 绿色开发 深部开采 智能采矿[N]. 中国冶金报, 2012-10-25(C02).
GU De-sheng, ZHOU Ke-ping. Green development, deep mining, intelligent mining[N]. China Metallurgical News,

- 2012-10-25(C02).
- [9] 古德生, 周科平. 现代金属矿业的发展主题[J]. 金属矿山, 2012, 7(7): 1-8.
GU De-sheng, ZHOU Ke-ping. Development theme of the modern metal mining[J]. Metal Mine, 2012, 7(7): 1-8.
- [10] 上海有色网. [SMM专题]机器人如何改变全球矿业谁人欢呼谁人独舔伤口?[EB/OL] [2018-05-21]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/1814364990/6c25033e019007tuj>.
Shanghai Metals Market. [SMM Topic] How can robots change the global mining industry? Who cheers and who licks their wounds alone [EB/OL]? [2018-05-21]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/1814364990/6c25033e019007tuj>.
- [11] Ultra-Deep Mining Network. The business of mining deep: Below 2.5 kms[EB/OL]. [2016-09-20]. <https://www.miningdeep.ca/>.
- [12] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236-1262.
LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [13] ANONYMITY. I2Mine [EB/OL]. [2021-07-28]. <https://www.eurogeosurveys.org/projects/i2mine/>
- [14] HARTAI E, MADARÁSZ T, MIKLOVICZ T. CHPM2030: Combined Heat, Power and Metal extraction [C]//Proceedings of 1st Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference. [2019-06-27]. <https://www.chpm2030.eu>. DOI: 10.3997/2214-4609.202021076.
- [15] FILIPPOV L, IZART C, HEJNY H, et al. The BIOMOre project – A new mining concept for extracting metals from deep ore deposits using biotechnology[J]. Mining Reporter, 2017, 153(5): 436-445.
- [16] GAO L, SHEN W M, LI X Y, et al. New trends in intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2019, 5(4): 619-620.
- [17] 李夕兵, 黄麟淇, 周健, 等. 硬岩矿山开采技术回顾与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1828-1847.
LI Xi-bing, HUANG Lin-qi, ZHOU Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.
- [18] 文兴. 基律纳铁矿智能采矿技术考察报告[J]. 采矿技术, 2014, 14(1): 4-6.
WEN Xing. Investigation report on intelligent mining technology of Kiruna Iron Mine[J]. Mining Technology, 2014, 14(1): 4-6.
- 2014, 14(1): 4-6.
- [19] 孟丹. 国外智能矿山建设(一): 以日出坝金矿为例[EB/OL]. [2018-09-19]. https://mp.weixin.qq.com/s/TmV2YdR_LKgi8QhzTINueQ.
MENG Dan. Foreign intelligent mine construction (1): Taking the sunrise-dam gold mine as an example[EB/OL]. [2018-09-19]. https://mp.weixin.qq.com/s/TmV2YdR_LKgi8QhzTINueQ.
- [20] 矿业汇. 远程遥控、无人矿山, 全面解析 3 家全球智能矿山建设领航者[EB/OL]. [2018-09-13]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-yBP9DfoCNRcYX2T7Bdjtw>.
Mining Exchange. Remote control, unmanned mines, comprehensive analysis of 3 global smart mine construction leaders[EB/OL]. [2018-09-13]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-yBP9DfoCNRcYX2T7Bdjtw>.
- [21] 李长根. 澳大利亚奥林匹克坝铜-铀矿山[J]. 矿产综合利用, 2012(4): 64-68.
LI Chang-gen. Olympic Dam Copper-Uranium Mine in Australia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(4): 64-68.
- [22] 邱丹丹. 力拓 26 亿美元项目获批! 全球首个纯“智能矿山”真得要来了吗? [EB/OL] [2018-1129]. https://mp.weixin.qq.com/s/YQmzBNcoF18MZXYI3_vj0Q.
QIU Dan-dan. Rio Tinto's \$2.6 billion project approved! Is the world's first pure "smart mine" really coming [EB/OL]? [2018-11-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/YQmzBNcoF18MZXYI3_vj0Q.
- [23] 孟丹. 罗伊山矿有智能: Maptek 专家一席谈[EB/OL]. [2018-10-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/dApzJsU4D737skewdtE74g>.
MENG Dan. Roy Mountain Mine has intelligence: A meeting with Maptek experts[EB/OL]. [2018-10-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/dApzJsU4D737skewdtE74g>.
- [24] 峯斯基. 智能化开采技术发展方向[EB/OL]. [2018-06-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/H9EgsK7K44h5TznzPl-M8Q>.
FENG Si-ji. Development direction of intelligent mining technology[EB/OL]. [2018-06-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/H9EgsK7K44h5TznzPl-M8Q>.
- [25] 王金华, 黄曾华. 中国煤矿智能开采科技创新与发展[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 1-6, 21.
WANG Jin-hua, HUANG Zeng-hua. Innovation and development of intelligent coal mining science and technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 1-6, 21.

- [26] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331–2345.
PENG Su-ping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [27] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346–2356.
YUAN Liang, ZHANG Ping-song. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2346–2356.
- [28] 吕鹏飞, 何敏, 陈晓晶, 等. 智慧矿山发展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(9): 84–88.
LYU Peng-fei, HE Min, CHEN Xiao-jing, et al. Development and prospect of wisdom mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9): 84–88.
- [29] 解海东, 李松林, 王春雷, 等. 基于物联网的智能矿山体系研究[J]. 工矿自动化, 2011, 37(3): 63–66.
XIE Hai-dong, LI Song-lin, WANG Chun-lei, et al. Research of intelligent mine system based on internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(3): 63–66.
- [30] 吴立新, 古德生. 数字矿山技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 49–50, 83–84.
WU Li-xin, GU De-sheng. Technologies for digital mine[M]. Changsha: Central South University Press, 2009: 49–50, 83–84.
- [31] 连民杰, 王占楼, 马龙, 等. 基于物联网的富全铁矿智能生产管控系统开发与应用[J]. 中国矿业, 2019, 28(1): 122–128.
LIAN Min-jie, WANG Zhan-lou, MA Long, et al. Application of intelligent production control and management system in Fuquan iron mine based on IOT[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(1): 122–128.
- [32] 连民杰, 袁代国, 王占楼, 等. 冶金矿山RHO安全生产管理体系建立与应用[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(8): 139–142.
LIAN Min-jie, Yuan Dai-guo, Wang Zhan-lou, et al. Establishment and application of RHO safety production management system in metallurgical mines[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(8): 139–142.
- [33] 赵威, 李威, 黄树巍, 等. 三山岛金矿智能绿色矿山建设实践[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(2): 219–227.
ZHAO Wei, LI Wei, HUANG Shu-wei, et al. Construction and practice of intelligent green mine for Sanshandao Gold Mine[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(2): 219–227.
- [34] 贾明星. 七十年辉煌历程 新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1801–1808.
JIA Ming-xing. A review of nonferrous metals industry achievements in China(1949–2019) and prospects for the future[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1801–1808.
- [35] 王李管, 陈鑫. 数字矿山技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1693–1710.
WANG Li-guan, CHEN Xin. Advancing technologies for digital mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1693–1710.
- [36] 匿名. 超大型绿色智慧矿山! 这是马城铁矿的正确打开方式[EB/OL]. [2017-06-20]. https://mp.weixin.qq.com/s/cNM_S2nWjanef2yE-UuH3w.
Anonymity. Super large green and intelligent mine! This is the correct way to open Macheng Iron Mine[EB/OL]. [2017-06-20]. https://mp.weixin.qq.com/s/cNM_S2nWjanef2yE-UuH3w.
- [37] 匿名. 经验: 国内最大的地下铁矿如何构建自己的智能矿山[EB/OL]. [2017-11-03]. https://mp.weixin.qq.com/s/ohDk7w8j_CBur0VdaKzwyg.
Anonymity. Experience: How does the largest underground iron mine in China build its own smart mine[EB/OL]. [2017-11-03]. https://mp.weixin.qq.com/s/ohDk7w8j_CBur0VdaKzwyg.
- [38] 刘艾瑛. 智能矿山的中国道路[N]. 中国矿业报, 2019-10-15(1).
LIU Ai-ying. Chinese roads for smart mines[N]. China Mining News, 2019-10-15(1).
- [39] 匿名. 智能矿山的中国道路[J]. 国土资源, 2019(10): 21–25.
Anonymity. Chinese roads for smart mines[J]. Land & Resources, 2019(10): 21–25.
- [40] 采矿技术新突破: 我国首套全自动无人驾驶系统在马钢张庄矿成功应用! [EB/OL]. [2018-08-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/RmTW6YaMIFx9hghLWHJZMQ>.
A breakthrough in unmanned driving technology in mines-the first full-automatic system was successfully applied in Zhangzhuang Mine of Maanshan Iron and Steel Co., Ltd[EB/OL]. [2018-08-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/RmTW6YaMIFx9hghLWHJZMQ>.
- [41] 罗河矿创新引领打造智慧矿山[EB/OL]. [2019-11-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/SHSOJe7Tw8YBT9TAeaVU0g>.

- Luohe Mine leads innovation to build smart mines[EB/OL]. [2019-11-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/SHSOJe7Tw8YBT9TAeaVU0g>.
- [42] 徐宝金. 罗河矿创新引领打造智慧矿山[N]. 中国矿业报, 2020-01-08(4).
- XU Jin-bao. Luohe Mine leads innovation to build smart mines[N]. China Mining News, 2020-01-08(4).
- [43] 尹久红. 攀钢推进矿山采选一体化智能产线建设[N]. 攀枝花日报, 2019-07-01(3).
- YIN Jiu-hong. Pangang advanced the construction of intelligent production line integrating mining and beneficiation[N]. Panzhihua Daily, 2019-07-01(3).
- [44] 赵可广. 三山岛金矿智能矿山建设应用实践 V6.0[EB/OL]. [2017-01-10]. <https://wenku.baidu.com/view/c5c61279302b3169a45177232f60ddccda38e667.html>.
- ZHAO Ke-guang. Sanshandao Gold Mine Intelligent Mine Construction and Application Practice V6.0[EB/OL]. [2017-01-10]. <https://wenku.baidu.com/view/c5c61279302b3169a45177232f60ddccda38e667.html>.
- [45] 连民杰, 周文略. 金属矿山智能化建设现状与管理创新研究[J]. 矿业研究与开发, 39(7): 136-141.
- LIAN Min-jie, ZHOU Wen-lve. Study on current situation and enterprise management innovation in the construction of intelligent metal mine[J]. Mining Research and Development, 39(7): 136-141.
- [46] 山东移动携手华为助力山东黄金实现国内首个地下矿山 5G 工业化应用案例[EB/OL]. [2019-11-15]. http://news.lznews.cn/luzhong/shandong/201911/t20191115_11526117.html.
- Shandong Mobile joins hands with Huawei to help Shandong Gold Mine to realize the first domestic 5G industrial application in underground mines[EB/OL]. [2019-11-15]. http://news.lznews.cn/luzhong/shandong/201911/t20191115_11526117.html.
- [47] 刘艾瑛. 矿业变脸, 智能矿山的未来已来[N]. 中国矿业报, 2019-04-16(1).
- LIU Ai-ying. Mining suddenly turns hostile, the future of smart mines has come[N]. China Mining News, 2019-04-16(1).
- [48] 古德生. 矿业未来三主题[J]. 中国经济和信息化, 2013(16): 18-19.
- GU De-sheng. Three topics of mining in the future[J]. Chinese Economy & Informatization, 2013(16): 18-19.

Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines

CAI Mei-feng, TAN Wen-hui, WU Xing-hui, ZHANG Li-ping

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Safe and efficient deep mining is an urgent problem facing the development of metal mineral resources in China. The traditional mining methods are hard to be used because of the high in situ stress, high temperature and high seepage pressure in deep mines. All countries in the world are developing deep intelligent mining technology. This paper systematically analyzed the development status of intelligent mining at home and abroad, and summarized the progress of China's mines in improving intelligent awareness of mining environment, automatic transportation operation, mining remote control operation, unattended auxiliary system, intelligent decision-making of production planning and scheduling from a number of intelligent mines. The problems existing in the intelligent deep mining of metal mines in China were analyzed and some suggestions on the strategy and tactics of the development of intelligent deep mining for metal mines in China were put forward.

Key words: metal mines; deep mining; intelligent mining; intellisense; intelligent control

Foundation item: Project(L1824042) supported by the National Natural Science Foundation, China

Received date: 2021-07-29; **Accepted date:** 2021-09-27

Corresponding author: TAN Wen-hui; Tel: +86-10-62333700; E-mail: wenhui.t@163.com

(编辑 何学锋)