



面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略

郭奇峰 蔡美峰 吴星辉 席迅 马明辉 张杰

Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035

GUO Qi-feng, CAI Mei-feng, WU Xing-hui, XI Xun, MA Ming-hui, ZHANG Jie

引用本文:

郭奇峰, 蔡美峰, 吴星辉, 席迅, 马明辉, 张杰. 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. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.22.004

GUO Qi-feng, CAI Mei-feng, WU Xing-hui, XI Xun, MA Ming-hui, ZHANG Jie. 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. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.22.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.22.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属矿深部开采现状与发展战略

Current status and development strategy of metal mines

工程科学学报. 2019, 41(4): 417 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.001>

深部开采安全机理及灾害防控现状与态势分析

Current status and future trends of deep mining safety mechanism and disaster prevention and control

工程科学学报. 2017, 39(8): 1129 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.08.001>

THMC多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述

A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling

工程科学学报. 2020, 42(11): 1389 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.29.003>

地下金属矿山采掘作业计划优化模型

Optimization model of mining operation scheduling for underground metal mines

工程科学学报. 2017, 39(3): 342 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.03.004>

THMC多场耦合作用下岩石力学实验与数值模拟研究进展

Research review of rock mechanics experiment and numerical simulation under THMC multi-field coupling

工程科学学报. 2021, 43(1): 47 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.29.005>

基于多场耦合碳/碳复合材料传热及烧蚀响应

Heat transfer and ablation of carbon/carbon composites based on multi-field coupling

工程科学学报. 2020, 42(8): 1040 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.30.002>

面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略

郭奇峰^{1,2)}, 蔡美峰^{1,2)}✉, 吴星辉¹⁾, 席 迅¹⁾, 马明辉^{1,3)}, 张 杰¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 3) 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿, 烟台 261400

✉通信作者, E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

摘 要 深部开采是金属矿产资源开发的必然趋势, 向地球深部进军, 着力推动采矿业智能化改造升级, 开展深部智能化开采技术研究具有重要的战略意义。立足国家深地战略背景, 剖析金属矿深部资源开发对采矿科学技术发展的需求, 依托工程技术预见技术方法开展全球技术态势分析, 梳理出本领域关键热点和前沿技术清单, 后经专家研判, 形成面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采基础理论和深部开采环境智能感知、深部开采过程智能作业、深部开采系统智能管控三大类前沿技术。在此基础上, 提出了我国面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略、重点任务、技术路线, 包括发展目标与需求、基础研究方向、关键技术装备等。针对我国金属矿深部开采技术变革和智能化升级的科技发展路径, 从政策、产业、技术、人才等方面提出了发展和保障建议。

关键词 金属矿; 深部开采; 智能开采; 多场耦合; 发展战略; 技术路线

分类号 TD801

Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035

GUO Qi-feng^{1,2)}, CAI Mei-feng^{1,2)}✉, WU Xing-hui¹⁾, XI Xun¹⁾, MA Ming-hui^{1,3)}, ZHANG Jie¹⁾

1) School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China

3) Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mine (Laizhou) Co Ltd, Yantai 261400, China

✉ Corresponding author, E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

ABSTRACT Deep mining is an inevitable trend in the exploitation of metal resources owing to their increasing demand. The multifield coupling environment for deep mining, which includes a high *in situ* stress, high temperature, high hydraulic pressure, and strong disturbances from excavations, pose considerable challenges to mining safety and efficiency. Intelligent or smart mining is a key to revolutionizing the mining industry. Therefore, for promoting the intelligent transformation and upgrading of the mining industry, the study of intelligent mining technologies for deep mines has a considerable strategic significance. Based on the strategic background of mining deep resources, this study investigated future technological strategies for exploiting deep metal resources toward 2035. Global technological trends on deep intelligent mining subject to multifield couplings were analyzed using technological forecasting methods. Hot research topics and advanced technologies related to intelligent deep mining subject to multifield couplings were obtained. Based on experts' opinions and analyses, key fundamental theories and techniques for intelligent deep mining toward 2035 were proposed. There are three promising mining methods: unconventional deep mining methods without blasting, continuous pastes backfill mining in deep mines, integration of mining, mineral beneficiation and backfill. Advanced technologies can be divided into three types: (1) smart

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(L1824402)

perception of the deep mining environment, (2) intelligent working during deep mining, and (3) intelligent control of mining systems. Type 1 includes intelligent *in situ* stress measurements, the intelligent identification of rock mass structures, microseismic monitoring and early warning of disasters, intelligent underground space exploration, and intelligent perception of man-machine systems. Type 2 includes intelligent full-section well excavation equipment, intelligent support technology and equipment, intelligent continuous mining technology and equipment, unmanned intelligent mining equipment, and intelligent lifting technology and equipment. Type 3 includes the intelligent control of the filling system, intelligent control of the microclimate in tunnels, flexible data communication on working faces, intelligent scheduling for the entire life cycle of deep mining, intelligent scheduling of the entire mining process, integrated platform for mining management, and big data analysis for deep mining. Technological strategies, key tasks, and a technical roadmap for 2035 were proposed for intelligent deep mining subject to multifield couplings in China, including development targets and demands, fundamental research areas, and key technologies and equipment. Technological development procedures to transform deep mining technologies and improve mining intelligence were presented. Some suggestions were provided in terms of policies, industries, technologies, and talent for intelligent deep mining.

KEY WORDS metal mine; deep mining; intelligent mining; multifield couplings; development strategy; technical roadmap

目前我国金属矿深部开采面临的挑战与难题主要包括金属矿深部开采动力灾害预测与防控、深井高温环境与热害控制及治理、深部非传统采矿方法研究、深井遥控自动化智能采矿、适应深部开采的选矿新工艺与新技术^[1-4]。解决金属矿深部开采所面临关键难题的最有效手段便是智能开采, 矿山智能化建设是实现矿山本质化安全的必由之路, 也是推动矿山高质量发展的必由之路。

中国工程院 2019 年启动了中国工程科技中长期发展战略研究项目《面向 2035 的金属矿深部多场耦合智能开采战略研究》, 旨在针对金属矿深部开采面临的难题, 调研国内外金属矿智能开采研究布局和现状, 参考国外智能开采方案与规划, 理清智能开采未来的发展方向, 深入总结深部高地应力、高温、高岩溶水压以及多源强扰动等多场耦合开采环境对深部开采提出的新挑战, 分析该领域基础研究需要攻克的技术难题和技术装备的发展需求及方向, 提出深部金属矿智能开采的发展战略和路线图。项目研究对我国金属矿产资源供应保障具有重要的战略意义, 对我国金属矿深部开采基础理论体系建立具有重要的科学价值, 对我国建设一流矿业强国有着重要的应用前景。

本文围绕《面向 2035 的金属矿深部多场耦合智能开采战略研究》项目的工作内容和研究成果, 介绍该领域技术需求和发展态势, 详述亟待发展的关键前沿技术、基础研究方向、关键技术装备、技术发展路线图及支撑保障建议。

1 深部金属矿智能开采发展现状

1.1 全球智能采矿行动计划与发展趋势

国外以加拿大、瑞典、芬兰为代表, 从国家战

略层面出台了相关计划, 推进适应深部多场耦合环境的智能化开采技术攻关和装备研发。加拿大提出 2050 计划和超深采矿网络 2.0(UDMN2.0) 计划, 旨在建成全智能无人化矿山, 实现卫星遥控。瑞典制定了面向矿山自动化的 Grounteknik 2000 计划, 发展了阿特拉斯等一批智能采矿领军企业。芬兰启动国家智能矿山技术研究计划(IM)和智能矿山实施研发计划(IMI), 推动了山特维克等矿山设备智造领军企业的发展。欧盟启动地平线 2020 科研规划, 着力研究国际竞争性科技难题。此外, 美国、南非、澳大利亚、智利等矿业大国均有矿山智能化的相关战略规划, 正在逐步推进矿山智能化建设和开采运营。

国内开展了以信息化为基础, 以采矿装备智能化运行以及采矿生产过程自动控制为目标的地下金属矿智能开采技术与装备研究, 为促进我国从矿业大国走向矿业强国提供技术支撑^[1]。如“数字化采矿关键技术与软件开发”、“地下无人采矿设备高精度定位技术和智能化无人操纵铲运机的模型技术研究”、“井下(无人工作面)采矿遥控关键技术与装备的开发”、“千米深井地压与高温灾害监控技术与装备”等项目, 为遥控自动化智能采矿的发展奠定了良好基础。“十二五”期间国家又部署了“863”研究项目“地下金属矿智能开采技术”, 针对地下金属矿山的特殊性, 以信息采集、井下高频宽带实时通信网络、井下定位技术、调度与控制系统等为技术手段, 以井下铲运凿岩爆破装备为控制对象, 通过多层次、在线实时调度与控制, 优化矿山生产过程, 形成具备行业性和通用性的地下金属矿智能开采平台。十三五国家重点研发计划“深地资源勘查开采”更是布局了“基于

大数据的金属矿开采装备智能管控技术研发与示范”重点专项,突破了开采过程及装备大数据采集与融合,以及基于大数据的预测、诊断、控制与调度等技术瓶颈。随着 5G 技术的快速发展,采矿行业成为 5G+工业互联网探索和应用的热门领域,涌现出金川集团龙首矿“5G+电机车无人驾驶系统”、山东黄金集团三山岛金矿“5G+凿岩车、5G+远程破碎系统、运转系统无人化”、洛阳钼业“5G+钻、铲、装超远程精准控制和纯电动矿用卡车智能编队运行”等金属矿智能化开采应用场景。

1.2 智能采矿技术发展态势

为全面了解国内外金属矿深部多场耦合智能开采领域的整体研究进展,通过工程技术预见技术与方法,构建检索技术体系(图 1),采用战略咨询智能支持系统(ISS)和科睿唯安公司 Web of Science 数据库的论文分析和专利分析功能,从不同的维度,对金属矿深部多场耦合智能开采领域目前的总体态势进行宏观分析。

各国文献统计(图 2)和专利统计(图 3)分布反映出该国家对本领域的重视程度以及对该领域研究的支持力度,也反映了该国家在该领域技术的发展水平和国际地位^[5]。随着我国进入深部开采矿山数量的增长,研究和技术人员发表的相关文献呈现爆发式增长,美国、英国等基础研究领域发表的成果积累较多,紧随其后的是加拿大、澳大利亚等矿业大国。美国、日本、俄罗斯三个国家发布申请的专利数量最多,彰显出其创新能力和技术优势,同时说明其在该领域设备研发和技术创新的领先地位。

通过 ISS 和 Web of science 数据库检索“深部金属矿”、“深部开采”、“多场耦合”和“智能开采”等关键词,得到金属矿深部多场耦合智能开采词云热点(图 4 和图 5)。词云分析能够体现出领域的研究热点、研究主题,也可衍生出新的专业术语,关键词数量越多,说明该方向热度越高,通过高频关键词分析特定领域研究的热点,有助于更好地把握研发动向,更好地进行技术研发布局。面对金属矿开采的复杂环境,数值模拟方法成为研究深部多场耦合智能开采的主要手段。深部开采、岩石力学、多场耦合问题成为重点研究对象。深部地下矿山开采装备是智能开采的重点研发对象。连续凿岩机、支护设备、水力压裂设备是深部智能开采设备的研究热点。

基于 ISS 的技术发展态势分析,组织高校、研究院、企业单位相关专家和工程技术人员对金属

矿深部多场耦合智能开采中亟待解决的工程科技难题进行讨论,借鉴国内外技术预见成果、重大科技项目指南,总结该领域技术发展现状、重大科技需求和未来发展趋势,梳理出了该领域关键热点和前沿技术清单。后经院士专家研判,形成面向 2035 年的金属矿深部多场耦合智能开采关键前沿技术、发展目标、重点任务、技术路线图。

2 深部开采基础理论及相关技术

金属矿深部开采面临高地应力、高温、高岩溶水压以及多源强扰动等多场耦合开采环境。实现深部安全高效开采跨越式发展的关键是变革性的开采基础理论与方法。近年来,随着开采装备、信息化技术、先进破岩技术、支护技术的发展,一些前沿采矿理念或理论陆续被提出,其中包括:

(1) 深部非传统开采方法。

采用机械掘进、机械凿岩方法,以连续切割技术和设备取代传统爆破采矿工艺进行开采是一个重要的发展方向^[6]。机械切割破岩掘进与采矿技术、高压水射流破岩技术、激光破岩技术^[7-8]、顶板诱导崩落技术、诱导致裂破岩技术、等离子爆破破岩技术等相关研发是实现非传统爆破开采的关键^[9]。

(2) 深部膏体连续充填。

通过自动化升级,智能量化调控配料和搅拌系统,加强自适应泵送控制,保障计量的精度、稳定性以及快速响应能力,可实现膏体连续充填作业。待进一步突破的关键问题在于超细、高强、价廉、速凝充填材料和充填外加剂研发,尾砂浓密理论、技术和设备开发,长距离管道自流输送理论和控制技术^[10-13]。

(3) 深部采选充一体化。

地下采选一体化系统将地表选矿作业转移到地下空间,一方面可大幅减少矿岩提升量,另一方面矿物和多余尾砂可通过管道流态化提升^[14-15]。创新深井“排水-提矿”一体化作业模式,建立深井水力提升理论技术体系,解决深井大型硐室群建造和稳定性控制难题,以及固废就地绿色充填技术是实现采选充一体化高效开发的根本。

(4) 深部矿产与地热资源共采。

建立深部矿产资源和深部地热共采的开创性系统工程,利用深部矿产资源开发的井巷工程提高深部地热开发的热交换面积和地热输送能力,解决地热开发中增强型地热系统(EGS)技术难以克服的关键难题,通过地热开发大幅缩减深井开采降温成本,解决深部矿产资源开采面临的高温

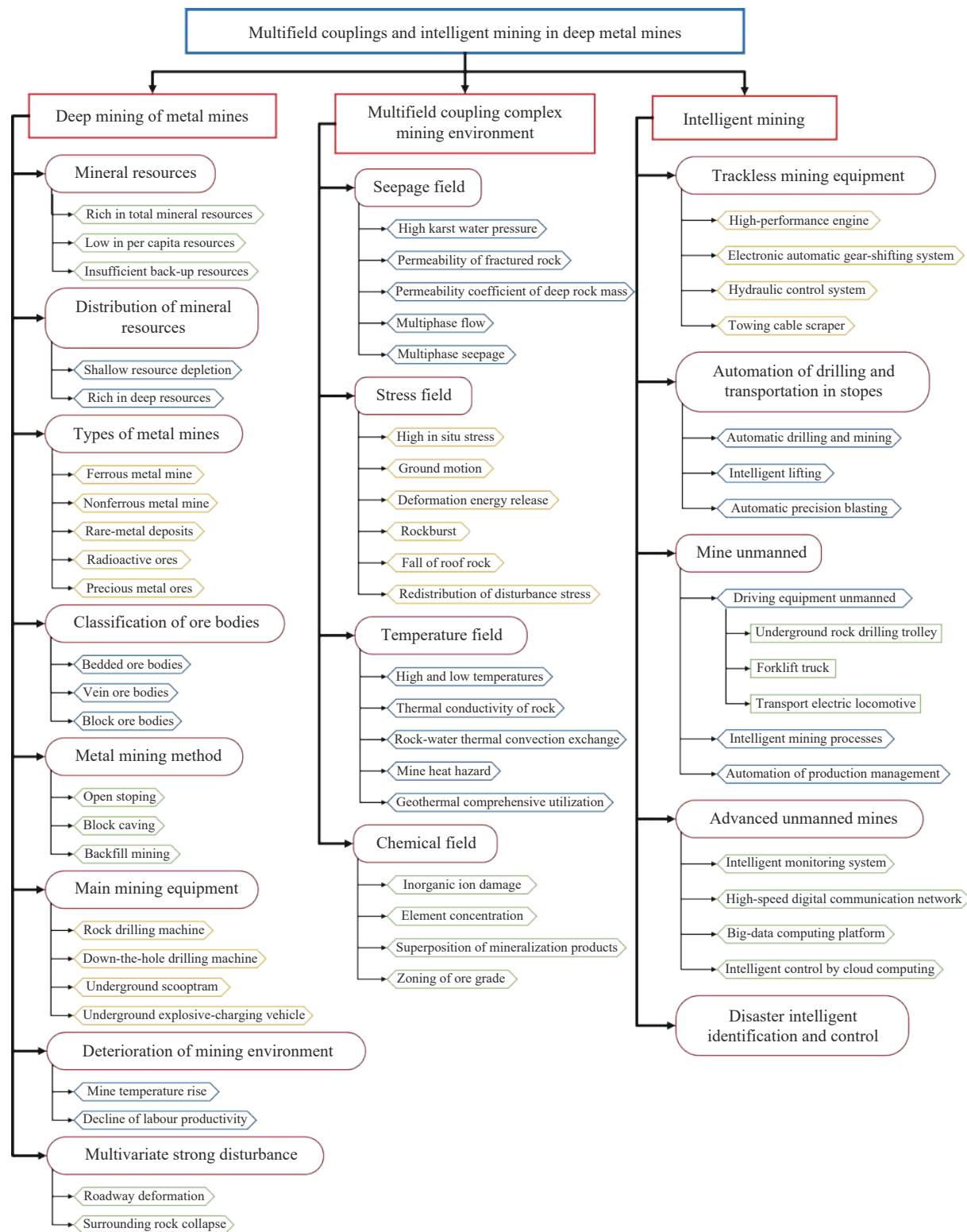


图 1 技术体系图

Fig.1 Technological system

热害问题^[16-18]。构建兼备实用性和经济性的“深部矿产资源与深部地热共采系统工程”框架，研究高温坚硬岩层地下巷道和硐室掘进与建造技术，探索深地热能交换和输送理论技术，建立深部矿产资源开采系统和地热开发系统共建共存共用的关

键理论与技术体系，实现深部矿产和地热资源的低成本共采。

3 深部智能开采关键前沿技术

矿山智能化建设是解决金属矿深部开采所面

Milestone	2020	2025	2030	2035
Target	To break through the key technologies of accurate detection of deep geological and in situ stress environment, intelligent disaster identification, and accurate control. To reveal the multifield coupling mechanism, intelligent mining and cooperative operation mechanism. To establish a deep multifield coupling intelligent mining technology system of metal mines combining prevention, control and comprehensive utilization.			
Demand	To establish deep environment intelligent perception method, intelligent mining standard, mining big data analysis. To build a theoretical system of deep resource intelligent mining. To overcome the intelligent detection of deep mining conditions and intelligent mining technology, and gradually realize the new intelligent mining mode of unmanned underground and remote control on the well. To develop intelligent sensors and intelligent mining equipment for deep mining with independent intellectual property rights, and build a big data management and control platform for mine cloud computing. To build a demonstration mine for intelligent mining of deep metal mines to provide support for the development of national deep mineral resources.			

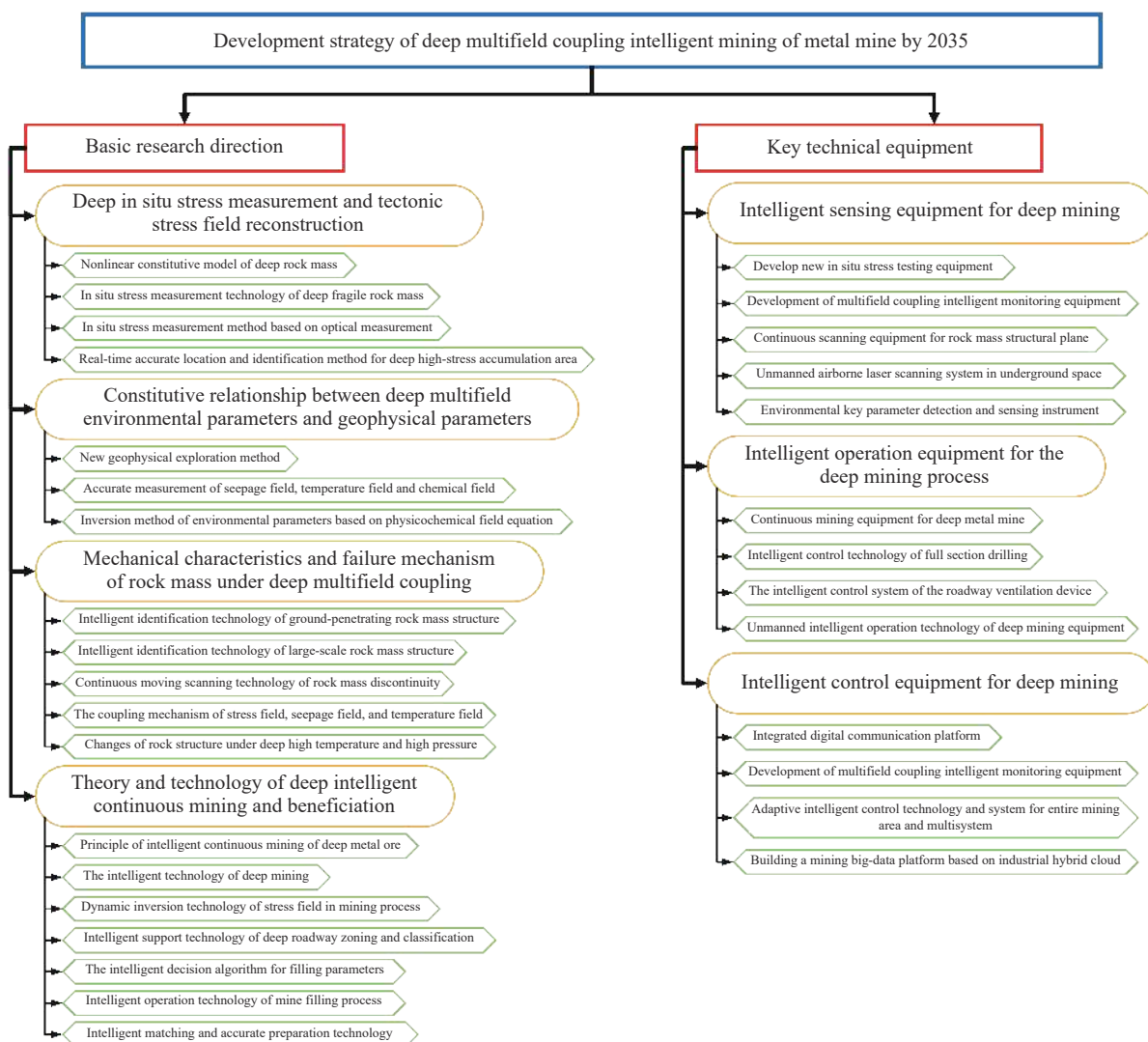


图 6 面向 2035 的技术路线图

Fig.6 Technological roadmap for 2035

构大、转场困难、所需硐室规格大等难题，研发掘井钻机性能与深井环境匹配技术^[34]，全断面掘井钻机钻进自适应技术^[35]，全断面掘井钻机智能控制技术系统^[36]。

(2) 岩体智能匹配支护技术与装备。

面向深部复杂地质条件和多场耦合开采环境

下的地压调控与支护难题，研究深部开采过程应力场动态反演技术，深部井巷围岩力学特性及失稳垮落机理，深部高应力开采潜在地压致灾危险区评估，深部井巷分区分级的高强度智能支护技术，深部开采过程地压动态调控一体化服务平台。

(3) 智能化连续采矿技术与装备.

面向常规采矿方法作业工序多、难以实现连续作业问题, 研究深部金属矿智能连续开采的原理及方案, 深部采场智能化采矿工艺技术体系, 深部金属矿机械截割落矿机理, 全岩不稳固岩体机械落矿截齿分布与形态^[37-39], 深部环境复合地层盾构开挖卸荷机理与控制技术.

(4) 采掘装备的无人化智能作业技术.

为实现深地环境采掘装备的高效、安全和连续作业, 提高深部金属矿智能化水平, 研发基于开采环境和装备特性的自适应作业控制系统^[40], 基于人工智能的作业参数优化技术, 开采装备故障诊断及自健康管理, 基于周界激光扫描的定位导航技术, 自主行驶空间感知及路径优化技术^[41].

(5) 充填系统智能化控制技术.

为实现深部充填制备精细化、过程智能化, 实现稳定可靠输送^[42], 研发充填参数智能决策算法, 充填工艺流程智能化自主运行技术, 智能优化配比与精准给料制备技术^[43], 深井充填管道智能化监测与诊断维护技术^[10].

(6) 井巷微气候智能调控技术.

面向深部井巷环境复杂, 深井按需通风面临系统复杂、调控困难等难题, 研究深部井巷按需通风智能调控理论^[44], 多因素耦合矿井通风网络解算技术^[45], 深部井巷通风智能控制系统, 无极节距角变频智能风机装备, 通风系统与采矿协同技术.

(7) 高效智能提升技术及装备.

面向传统提升在控制方式、提升高度和载荷难以满足深井大规模智能化开采等难题, 研究点驱动智能提升原理, 多点连续提升分布式智能控制技术, 连续提升系统智能装卸载及高效平衡提升技术.

3.3 深部开采系统智能管控

(1) 作业面柔性数据通信.

为解决深井作业面井巷环境复杂、作业装备众多、信号干扰严重、协同作业困难等问题, 研发异构网络柔性组网和高效数据传输技术, 井下恶劣环境下的通信装备高效防护技术^[46], 井下多级以太网环境下的高精度授时及时间同步技术^[47], 实现井下多通信基站间的数据多跳传输和快速无缝切换^[48].

(2) 深井开采全生命周期智能规划.

为解决基于商业矿业软件的深部金属矿全生命周期开采规划难题, 研究深部开采地质-工程-力学-经济一体化模型, 深部开采过程全生命周期

模型构建技术, 开采设计可视化与动态调整技术, 生产计划智能化编制与优化技术, 提出深部开采应力演化与开采顺序整体方案设计方法.

(3) 开采全过程智能调度.

为解决深部开采过程开采装备的集群自主协同作业难题, 研发矿山异构信息系统间的结构化融合技术, 深部开采全作业链装备智能调度算法, 作业区域人员装备的精准识别及定位技术, 异常工况下人员装备应急调度决策方法, 多系统多装备的高效协同控制技术, 全矿区开采计划自主编排及智能派配系统.

(4) 开采过程管控一体化平台.

为解决深部开采过程信息孤岛严重、信息重用性差、流程优化不到位等问题, 研发管控一体化平台组织与数据协议统一方法, 管控一体化平台数据与办公自动化融合技术, 全矿区信息数据关联挖掘与分析预判技术, 地上地下真实感显示与智能交互技术, 基于增强现实的管控信息三维交互技术^[49-50].

(5) 深部开采云计算大数据分析.

为满足金属矿山行业大数据整合、分析及云计算服务需求, 开展工业混合云的云计算大数据架构优化, 研发深井开采大数据数据库构建与知识挖掘技术^[51], 多源异构线下信息获取与数据清洗技术, 基于海量数据的实时并行计算技术, 云计算模式下的信息编码与数据安全技术^[52].

4 发展目标与重点任务

4.1 发展目标与需求

2020 年至 2035 年我国金属矿产资源开发工程以深部开采、智能开采、地下矿山原位利用为发展方向, 致力于建立深部开采和原位利用基础理论和技术体系, 解决深部开采面临的安全、提升、降温、原位开发利用等技术瓶颈, 提高开采机械化、自动化、智能化程度, 提高深部资源开发利用效率, 减小矿石提升和回填料量, 减少废石、尾矿排放, 安全、环保、高效开采利用深部矿产资源^[53]. 重点突破深部金属矿开采面临的多场耦合环境约束, 研究突破性开采理论、多场耦合开采环境识别与控制技术, 建立深部环境智能感知方法、深井智能化开采标准、矿业大数据分析理论, 攻克深部开采条件智能探测和采矿作业智能化技术, 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装备, 建设矿山云计算大数据管控平台.

2035 年形成深部地下矿山原位开发利用新模

式,建立适应深部多场耦合环境的智能化开采基础理论和关键技术体系;实现中型矿山机械化,大型矿山机械化、自动化,示范矿山机械化、自动化、智能化;逐步实现井下无人、井上遥控的智能化开采新模式;全面实现矿山废料的资源化,保障金属矿产资源可持续发展,提高金属矿产资源自产自足能力;建成深部金属矿智能化开采示范矿山,为国家千米深井矿产资源规模化开发提供支撑。

4.2 基础研究方向

(1)深部全场地应力测量及构造应力场重构。

开展基于关键点控制测量、区域地质信息数学模型与物理模型的多尺度全场地应力场反演重构研究,实现工程区域信息化反馈与自适应调整的深部地应力场精准测量和反演重构,提高原位数字化地应力测量的深部适用性,实现应力解除过程中原位岩体力学参数的实时获取。

(2)深部多场环境参量与地球物理参数本构关系。

在深部地下渗流场、温度场和化学场精准测量理论的基础上,基于定量地球物理学建立地球物理参数与环境参量间的本构方程;通过点测量数据实现约束反演,基于环境参量的本构方程,将钻孔精细测量的成果向整个研究区域延拓,从而实现深部地质构造精细探测技术和环境参数的精准反演。

(3)深部多场耦合岩体力学特征及破坏机理。

研发钻进过程中原位岩体力学参数实时获取技术,研究开采强扰动和爆破动荷载作用下工程结构的复杂受力特征及破坏机理等关键问题,解决影响深部开采工程高效建设与运维安全的技术瓶颈,为金属矿深部开采提供全面的理论和技术支撑。

(4)深部智能化连续采选理论技术。

攻克深部开采过程应力场反演、深部岩层致灾机理及控制、高能量吸收支护等关键技术,形成采动应力场、位移场、能量场等多场动态闭环调控的岩体智能匹配支护技术,建立深部智能化连续采矿技术体系,实现深部充填制备精细化、过程智能化,实现稳定可靠输送。

4.3 关键技术装备

(1)深部开采环境智能感知装备。

开发新型地应力测试及多场耦合智能监测装备,可移动便携式大尺寸岩体结构连续扫描设备,解决岩体内部结构精准识别与三维建模难题。攻克无人机自主飞行、自主定位及三维激光扫描仪

即时成图技术,开发地下空间无人机载三维激光扫描系统,创新地下空间形态获取手段,打破矿山传统测量方式。构建基于“人工智能+云服务”的深部全自动微震监测与灾害在线预警体系,创新微震监测在开采-监测-预警-治理中的闭环应用,大幅提高微震监测的数据分析时效性和灾变预警专业性。研发面向“人-车-岩-场”的深井开采环境关键参数探测感知仪器,形成深井开采空间信息多变条件下的深地采矿环境感知技术与装置集成。

(2)深部开采过程智能作业装备。

研发深部金属矿山连续采掘装备,形成深部智能化连续采矿技术与装备系统。开发深部全断面成井钻机智能化控制技术,实现成井钻机智能精准施工。完善深部井巷通风装置智能调控理论,构建深部井巷实时按需通风系统,实现通风与采矿协同。开发具有自主知识产权的深部采掘装备无人化智能作业技术,打破国外技术垄断,构筑适合我国深井作业条件的无人采矿技术体系。

(3)深部开采系统智能管控平台。

构建适合矿山工作面复杂环境的高可靠、高带宽、高性能综合数字通讯平台,实现柔性数据通信,保障深井矿山智能化生产。建立生产规划、经济收益、深井高应力环境的反馈优化机制,形成深部金属矿开采全生命周期智能化规划理论与方法。创建深井条件下全采区、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。突破系统离散管控的传统模式,实现地下金属矿复杂离散系统一体化、智能化、可视化集中管控。构筑基于工业混合云平台的矿山大数据整合与数据挖掘,并实现基于云技术平台的全产业链产学研用一体化运行模式。

5 发展路线图

面向 2035 年金属矿深部多场耦合智能化开采战略的实施,明确了关键技术路线图(图 6):实施深部地质与应力环境精准探测、地质灾害智能感知分析、灾害精准控制与防治等金属矿深部开采关键技术突破,制定深井智能开采标准规范,建设矿业大数据中心,以数据为基础构建智能化开采理论体系。研制井下智能探测、采矿作业自动化装备,推动智能采矿装备自主创新。加强深部采矿感知系统、矿业虚拟现实(VR)等技术基础研发,发展人机智能协同系统、信息交互与虚拟技术;研发基于智能感知技术的开采作业设备,利用 VR 技

术控制井下无人化智能作业设备;研究深部智能管控系统,实现调控系统、感知系统、作业设备之间的数字通讯,构建矿山智能开采大数据平台。

6 战略支撑与保障

面向 2035 年金属矿深部多场耦合智能化开采战略的实施需要在明确关键技术路线的基础上,发挥我国的制度优势、组织优势、资本优势、人力资源优势,建立完善的科学体系、政策框架、技术框架及人才队伍,形成产业、技术、人才等战略支撑与保障系统。

金属矿产资源开发具有长期性和行业迫切性,发展成为具有高科技特点的新产业是现代矿山发展的共识,现代化矿山智能化升级市场需求大,具备良好的市场前景。国内部分大型矿山正在结合国家“中国制造 2025”、“新一代人工智能发展规划”等政策倡议,打破传统模式,基于物联网、大数据、工业互联网等技术打造“智能矿山”的产业链,推动矿山向智能化、无人化方向的发展进程将不断加快,“打造智能矿山”成为我国矿业发展的必经之路。山东黄金、洛阳钼业、金川集团等矿业集团投入大量资金开展智能矿山建设,有序规范地带动了矿山深部多场耦合智能化开采战略实施进程。

矿业智能化升级要加强智能矿山人才队伍建设。在符合条件的高校开设与智能开采相关的专业或基础学科,加大复合型人才培养力度,以实践为导向与国内外知名企业合作教学,增强人才的实践能力。通过“产教融合”、“校企合作”方式,将政府、企业、高校和民间机构共同带入金属矿智能化的生态建设,推动产业技术的成果转化,激发人才的创新培养。高等院校、科研机构、高新企业等相关单位已开展了大量的基础研究和布局,形成了庞大的技术研发梯队,能够提供充足的技术支撑与保障。

7 结束语

本项目组织金属矿领域的高等院校、科研院所、矿山企业、智造服务商进行研讨,开展了较为广泛的调研,总结了金属矿深部安全高效开采面临的复杂作业环境及环境识别技术,梳理了智能化开采需要解决的硬件和软件技术瓶颈,最终确定了面向 2035 年的金属矿深部多场耦合智能开采战略技术路线图,为金属矿智能化基础研究和关键技术装备研发提供了方向。通过稳步有效的产

业、人才、技术保障与推进,我国金属矿智能化产业升级将步入发展的快车道。

参 考 文 献

- [1] Cai M F, Tan W H, Ren F H. *Strategic Research on Innovative Technology System for Deep Mining of Metal Mines*. Beijing: Science Press, 2018
(蔡美峰, 谭文辉, 任奋华. 金属矿深部开采新技术体系战略研究. 北京: 科学出版社, 2018)
- [2] Xie H P. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory. *J China Coal Soc*, 2019, 44(5): 1283
(谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283)
- [3] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417)
- [4] Cai M F, Brown E T. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources. *Engineering*, 2017, 3(4): 432
- [5] Holliday C O. Good morning engineers: A wake up call. *Engineering*, 2016, 2(1): 8
- [6] Li X B, Wang S F, Wang S Y. Experimental investigation of the influence of confining stress on hard rock fragmentation using a conical pick. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51(1): 255
- [7] Hallada M R, Walter R F, Seiffert S L. High-power laser rock cutting and drilling in mining operations: Initial feasibility tests. *High-Power Laser Ablation III*, 2000, 4065: 614
- [8] Kosyrev F K, Rodin A V. Laser destruction and treatment of rocks // *9th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT 01)*. Constanta, 2002: 4762: 166
- [9] Zhang F P, Peng J Y, Qiu Z G, et al. Rock-like brittle material fragmentation under coupled static stress and spherical charge explosion. *Eng Geol*, 2017, 220: 266
- [10] Wu A X, Yang Y, Cheng H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China. *Chin J Eng*, 2018, 40(5): 517
(吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517)
- [11] Wu A X, Li H, Yang L H, et al. Cemented paste backfill paves the way for deep mining. *Gold*, 2020, 41(9): 51
(吴爱祥, 李红, 杨柳华, 等. 深地开采, 膏体先行. 黄金, 2020, 41(9): 51)
- [12] Wu A X, Wang Y, Zhang M Z, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines. *Metal Mine*, 2021(1): 1
(吴爱祥, 王勇, 张敏哲, 等. 金属矿地下开采关键技术新进展与展望. 金属矿山, 2021(1): 1)
- [13] Yin S H, Hao S, Zhang H S, et al. Water balance model and cost optimization of waste rock-unclassified pastes slurry. *Chin J Nonferrous Met*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.tg.20210>

- 831.1433.016.html
(尹升华,郝硕,张海胜,等.废石全尾砂充填料浆的水平衡模型及成本寻优.中国有色金属学报,https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.tg.20210831.1433.016.html)
- [14] Sun C Y, Song Z G. Development and application outline of integrated underground mining-processing system. *Min Metall*, 2017, 26(1): 1
(孙传尧,宋振国.地下采选一体化系统的研究及应用概况. *矿冶*, 2017, 26(1): 1)
- [15] Wu A X, Wang H J, Yin S H, et al. Conception of in situ fluidization mining for deep metal mines. *J Min Sci Technol*, 2021, 6(3): 255
(吴爱祥,王洪江,尹升华,等.深层金属矿原位流态化开采构想. *矿业科学学报*, 2021, 6(3): 255)
- [16] Andrault D, Monteux J, Le Bars M, et al. The deep Earth may not be cooling down. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 443: 195
- [17] Wu X H, Cai M F, Ren F H, et al. Heat exchange cooling technology of high temperature roadway in deep mine. *J Central South Univ Sci Technol*, 2021, 52(3): 890
(吴星辉,蔡美峰,任奋华,等.深部矿井高温巷道热交换降温技术探讨. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 890)
- [18] Kang F C, Tang C A. Overview of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China. *Earth Sci Front*, 2020, 27(1): 185
(亢方超,唐春安.基于开挖的增强型地热系统概述. *地学前缘*, 2020, 27(1): 185)
- [19] Xie H P, Li C B, Gao M Z, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40(2): 217
(谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(2): 217)
- [20] Li Y, Fu S S, Qiao L, et al. Development of twin temperature compensation and high-level biaxial pressurization calibration techniques for CSIRO *in-situ* stress measurement in depth. *Rock Mech Rock Eng*, 2019, 52(4): 1115
- [21] Ge Y F, Xia D, Tang H M, et al. Intelligent identification and extraction of geometric properties of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning. *Chin J Rock Mech Eng*, 2017, 36(12): 3050
(葛云峰,夏丁,唐辉明,等.基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 3050)
- [22] Ge Y F, Zhong P, Tang H M, et al. Intelligent measurement on geometric information of rock discontinuities based on borehole image. *Rock Soil Mech*, 2019, 40(11): 4467
(葛云峰,钟鹏,唐辉明,等.基于钻孔图像的岩体结构面几何信息智能测量. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4467)
- [23] Yuan L. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines. *J China Coal Soc*, 2020, 45(5): 1557
(袁亮.煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1557)
- [24] Li X, Xu N W. Research developments and prospects on microseismic source location. *Prog Geophys*, 2020, 35(2): 598
(李翔,徐奴文.微震震源定位研究现状及展望. *地球物理学进展*, 2020, 35(2): 598)
- [25] Chen A G, Gao Y. Developments of research on earthquake detection methods. *Prog Geophys*, 2019, 34(3): 853
(陈安国,高原.微震识别方法研究进展. *地球物理学进展*, 2019, 34(3): 853)
- [26] Li T, Cai M F, Sun L J, et al. Inversion of mining-induced stress field and its application based on focal mechanism solution. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(9): 1747
(李铁,蔡美峰,孙丽娟,等.基于震源机制解的矿井采动应力场反演与应用. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1747)
- [27] Wang G F, Zhao G R, Ren H W. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining. *J China Coal Soc*, 2019, 44(1): 34
(王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 34)
- [28] Li J L, Yang C Y, Hu Y, et al. Application research of UAV-lidar in detection of underground goaf. *Met Mine*, 2020(12): 168
(李杰林,杨承业,胡远,等.无人机三维激光扫描技术在地下采空区探测中的应用研究. *金属矿山*, 2020(12): 168)
- [29] Yang B S, Liang F X, Huang R G. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing. *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46(10): 1509
(杨必胜,梁福逊,黄荣刚.三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势测绘学报, 2017, 46(10): 1509)
- [30] Zhang Y S, Zhan K, Ma C Y, et al. Technical architecture and construction ideas of intelligent mine. *Nonferrous Met Min Sect*, 2020, 72(3): 1
(张元生,战凯,马朝阳,等.智能矿山技术架构与建设思路. *有色金属(矿山部分)*, 2020, 72(3): 1)
- [31] Wang G F, Du Y B. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(1): 1
(王国法,杜毅博.煤矿智能化标准体系框架与建设思路. *煤炭科学技术*, 2020, 48(1): 1)
- [32] Liang F M. *Intelligent Sensing Theory and Key Technologies of Multi-Parameter Fiber Bragg Grating in Coal Mining* [Dissertation]. Beijing: China University of Mining & Technology Beijing, 2019
(梁敏富.煤矿开采多参量光纤光栅智能感知理论与关键技术[学位论文].北京:中国矿业大学(北京), 2019)
- [33] Xie H P. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory. *Adv Eng Sci*, 2017, 49(2): 1
(谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望. *工程科学与技术*, 2017, 49(2): 1)
- [34] Long Z Y, Guo X X. Development and application of full tunnel boring machine. *Mine Constr Technol*, 2017, 38(5): 7
(龙志阳,郭孝先.全断面掘进机发展和应用. *建井技术*, 2017,

- 38(5):7)
- [35] Tan J, Liu Z Q, Song Z Y, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China. *Met Mine*, 2021(5): 13
(谭杰, 刘志强, 宋朝阳, 等. 我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势. 金属矿山, 2021(5): 13)
- [36] Li J B. Current status, problems and prospects of research, designing machine in China, and manufacturing of bor. *Tunn Constr*, 2021, 41(6): 877
(李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 877)
- [37] Li X B, Huang L Q, Zhou J, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines. *Chin J Nonferrous Met*, 2019, 29(9): 1828
(李夕兵, 黄麟淇, 周健, 等. 硬岩矿山开采技术回顾与展望. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1828)
- [38] Wang S F, Li X B, Gong F Q, et al. Breakage characteristics and mechanized mining experiment in deep hard rock. *J Central South Univ Sci Technol*, 2021, 52(8): 2772
(王少锋, 李夕兵, 宫凤强, 等. 深部硬岩截割特性与机械化破岩试验研究中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2772)
- [39] Li X B, Zhou J, Wang S F, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources. *Chin J Nonferrous Met*, 2017, 27(6): 1236
(李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236)
- [40] Wang G F, Liu F, Meng X J, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage). *Coal Sci Technol*, 2019, 47(8): 1
(王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1)
- [41] Yang J J, Zhang Q, Wu M, et al. Research progress of autonomous perception and control technology for intelligent heading. *J China Coal Soc*, 2020, 45(6): 2045
(杨健健, 张强, 吴森, 等. 巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2045)
- [42] Liu L, Fang Z Y, Zhang B, et al. Development history and basic categories of mine backfill technology. *Met Mine*, 2021(3): 1
(刘浪, 方治余, 张波, 等. 矿山充填技术的演进历程与基本类别. 金属矿山, 2021(3): 1)
- [43] Qi C C, Yang X Y, Li G C, et al. Research status and perspectives of the application of artificial intelligence in mine backfilling. *J China Coal Soc*, 2021, 46(2): 688
(齐冲冲, 杨星雨, 李桂臣, 等. 新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望. 煤炭学报, 2021, 46(2): 688)
- [44] Zhou F B, Wei L J, Xia T Q, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation. *J China Coal Soc*, 2020, 45(6): 2225
(周福宝, 魏连江, 夏同强, 等. 矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2225)
- [45] Zhang Q H, Yao Y H, Zhao J Y. Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(2): 97
(张庆华, 姚亚虎, 赵吉玉. 我国矿井通风技术现状及智能化发展展望. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 97)
- [46] Yuan L, Yu X, Ding E J, et al. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of things. *J Commun*, 2020, 41(2): 1
(袁亮, 俞啸, 丁恩杰, 等. 矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究. 通信学报, 2020, 41(2): 1)
- [47] Li Y, Wu Z W. Research on time synchronization accuracy method in synchronous Ethernet environment. *Comput Netw*, 2016, 42(22): 72
(李晔, 伍宗文. 同步以太网环境下时间同步精度方法研究. 计算机与网络, 2016, 42(22): 72)
- [48] Ji H, Zhang D, Dai R, et al. High precision time synchronization system designed and implemented for underground mine distributed system. *China Min Mag*, 2019, 28(Suppl 2): 219
(冀虎, 张达, 戴锐, 等. 一种适用于地下矿山分布式系统的高精度时间同步系统设计及实现. 中国矿业, 2019, 28(增刊2): 219)
- [49] Wang G F, Wang H, Ren H W, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine. *J China Coal Soc*, 2018, 43(2): 295
(王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿2025情景目标和发展路径. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295)
- [50] Wang L G, Chen X. Advancing technologies for digital mine. *Chin J Nonferrous Met*, 2016, 26(8): 1693
(王李管, 陈鑫. 数字矿山技术进展. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1693)
- [51] Bi L, Wang J M. Construction target, task and method of digital mine. *Met Mine*, 2019(6): 148
(毕林, 王晋森. 数字矿山建设目标、任务与方法. 金属矿山, 2019(6): 148)
- [52] Ding E J, Hu Q S. Design ideas of the top layer of the mine Internet of things. *Chin J Internet Things*, 2018, 2(1): 69
(丁恩杰, 胡青松. 矿山物联网顶层设计思路. 物联网学报, 2018, 2(1): 69)
- [53] The project team of "Technological strategy research of China Engineering Science and technology towards 2035". *The Development Strategy of China's Engineering Science and Technology for 2035*. Beijing: Science Press, 2019
(“中国工程科技2035发展战略研究”项目组. 中国工程科技2035发展战略—综合报告. 北京: 科学出版社, 2019)