工程科学学报
Chinese Journal of Engineering

金属矿山开采技术发展现状与展望

王连成 邵安林 曲福明 岳星彤 王怀远 张兴帆 柳小波

Current status and prospects of mining technology in metal mines

WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, YUE Xingtong, WANG Huaiyuan, ZHANG Xingfan, LIU Xiaobo

引用本文:
王连成, 邵安林, 曲福明, 岳星彤, 王怀远, 张兴帆, 柳小波. 金属矿山开采技术发展现状与展望[J]. 北科大：工程科学学报, 2025, 47(5): 971–983. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.20.001
WANG Liancheng, SHAO Anlin, QU Fuming, YUE Xingtong, WANG Huaiyuan, ZHANG Xingfan, LIU Xiaobo. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 971–983. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.20.001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.20.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部金属矿开采关键理论技术进展与展望
Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines
工程科学学报. 2023, 45(8): 1281 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.11.12.004

金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望
Research status and prospect of thickening technology for metal tailings
工程科学学报. 2022, 44(6): 971 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.11.001

超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备研究现状与展望
Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines
工程科学学报. 2024, 46(12): 2147 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.001

面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略
Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035
工程科学学报. 2022, 44(4): 476 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.22.004

薄板坯连铸连轧技术发展现状及展望
Thin slab casting and direct rolling technology: Current status and prospects
工程科学学报. 2022, 44(4): 534 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.21.001

协同开采技术的演化原理与模型
Coevolution principle and model for synergetic mining technology
工程科学学报. 2024, 46(6): 1054 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.07.07.002

工程科学学报, 第 47 卷, 第 5 期: 971−983, 2025 年 5 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 47, No. 5: 971−983, May 2025
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.08.20.001; http://cje.ustb.edu.cn

金属矿山开采技术发展现状与展望

王连成[1,2)], 邵安林[2)], 曲福明[1,2)], 岳星彤[1,2,3)], 王怀远[1,2,3)], 张兴帆[1,2,4)], 柳小波[2,5)]✉

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083　2) 北京科技大学矿产研究院, 北京 100083　3) 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102209　4) 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110169　5) 辽宁科技大学智慧矿山研究院, 鞍山 114051
✉通信作者, E-mail: lxb_58@163.com

摘　要　金属矿产是人类生存和发展的重要物质基础, 是国家安全与经济发展的战略资源和重要保证, 其中关键金属矿产资源尤为突出, 成为当代大国博弈的焦点. 为了保障国家战略资源的稳定供给, 全球矿业强国纷纷布局矿业开发科技攻关计划, 以此大力发展矿山先进开采技术. 近年来, 我国矿产开采技术取得了惊人的进步, 但由于起步较晚, 相比矿业发达国家仍存在一定差距. 在此背景下, 梳理国内外矿产资源开采技术现状, 分析我国与矿业强国差距, 进而为我国矿山行业的技术发展指明方向. 本文从矿山规模、工艺装备和软件技术三个角度开展调研分析, 结果表明, 当前我国采矿技术与国际先进水平的差距主要表现在露天开采智能化无人化技术、地下开采深部化智能化技术和矿业软件的研发与应用等方面, 凝练出立足国家资源开发战略和采矿技术发展趋势的影响我国金属矿开采水平的四类技术—卡脖子技术、基础性技术、紧迫性技术和前瞻性技术, 并逐一提出了重点技术攻关建议.

关键词　金属矿产开采技术; 卡脖子技术; 基础性技术; 紧迫性技术; 前瞻性技术
分类号　TD85

Current status and prospects of mining technology in metal mines

WANG Liancheng[1,2)], *SHAO Anlin*[2)], *QU Fuming*[1,2)], *YUE Xingtong*[1,2,3)], *WANG Huaiyuan*[1,2,3)], *ZHANG Xingfan*[1,2,4)], *LIU Xiaobo*[2,5)]✉

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Institute of Minerals Research, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3) Ansteel Beijing Research Institute Co. Ltd., Beijing 102209, China
4) Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China
5) Institute of Smart Mining, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China
✉Corresponding author, E-mail: lxb_58@163.com

ABSTRACT　Metallic mineral resources are essential for human survival and development and serve as a critical material foundation for national security and economic prosperity. Among these, critical metallic minerals have become a focal point in the geopolitical competition between major powers in the contemporary landscape. To secure a stable and reliable supply of these strategic resources, leading mining nations are increasingly investing in scientific and technological initiatives aimed at advancing mining development, with a strong emphasis on improving mining technologies. In recent years, China has made significant strides in mining technologies; however, owing to its relatively late entry into the sector, a noticeable gap remains between China and more developed mining nations. The current study aims to review the state of mining technologies both domestically and internationally, analyze the disparities between China and leading mining powers, and provide strategic guidance for the technological development of China's mining industry. This research offers a comprehensive analysis from three key perspectives: mining scale, process equipment, and software technology. The findings can be summarized as follows: (1) Owing to limitations in resource endowments and technological capabilities, Chinese

收稿日期: 2024−08−20
基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XBZD-27); 国家自然科学基金资助项目(52474172)

metallic mines show considerable discrepancies in both production scale and mining depth compared with the world's leading mines. This gap is particularly noticeable in ultra-deep mining, where practical experience is especially lacking. (2) Future mining technologies that require urgent attention can be categorized into four types based on their criticality and urgency: bottleneck technologies, foundational technologies, urgent technologies, and forward-looking technologies. (3) The current "bottleneck" technical challenges facing China's mining sector include the development of intelligent and unmanned technologies for open-pit mining, advanced deep mining technologies for underground operations, and the research and application of specialized mining software. (4) The urgent technologies identified in this study include precise detection and safety management technologies for goaf areas, ultra-large-scale filling mining technologies for metallic mines, and intelligent ore grade detection technologies. (5) Foundational technologies encompass rock mechanics modeling for deep mining, multi-scale fracture simulation processes under geothermal system rock–hydraulic coupling, and dynamic control theories for managing disasters associated with deep mining activities. (6) Forward-looking technologies include a range of innovations, such as new transportation technologies for deep open-pit mines, advanced deep-well lifting techniques, novel efficient rock-breaking technologies, integrated mining and beneficiation technologies, co-extraction methods for both mineral and geothermal resources, and fluidized mining techniques for metallic minerals. To address these findings, it is recommended to develop systematic strategies for the four categories of technologies, prioritizing efforts to overcome bottleneck technologies. Accelerating research and development of urgent technologies is essential for achieving short-term breakthroughs while laying a solid groundwork for foundational technologies and fostering innovation in forward-looking technologies to drive future advancements in mining. The government should take an active role in promoting the establishment of high-level intelligent mining laboratories through collaboration among research institutions, universities, and industry leaders with technological expertise. These initiatives will expedite solutions to bottleneck technologies that hinder intelligent construction and support the development of advanced, high-precision mining equipment. Ultimately, these efforts will ensure the sustainable and high-quality development of China's mineral resources, strengthen its mining industry, and enhance its competitive standing in the global market.

KEY WORDS metal mining technology; bottleneck technologies; foundational technologies; urgent technologies; forward-looking technologies

矿产资源是人类文明生存和发展的物质基础, 更是国家安全与经济发展的战略资源和重要保证. 随着新能源、新材料和新一代信息技术等新兴产业的快速崛起, 战略性关键金属矿产资源已成为全球主要大国战略博弈的新战场. 为了保障关键矿产资源的自身需要, 美国、欧盟、加拿大和澳大利亚等发达国家先后制定并出台了各自的矿产资源战略计划[1−3], 重点推动以数字化建模与无人化开采支撑的智能矿山建设. 例如美国地质调查局的"矿产资源计划"、瑞典的"Grountecknik2000 计划"、加拿大的"2050 计划"和"超深采矿网络 2.0(UDMN2.0)计划"、芬兰的"智能矿山技术研究计划 (IM)"和"智能矿山实施研发计划 (IMI)"、澳大利亚的"未来矿山计划"等[4−6].

我国政府高度重视矿产资源的开发与利用, 近年来相继出台了一系列政策和规划, 推动了采矿技术的快速发展. 2007 年, 国家提出"两化融合、走新型工业化道路"的号召[7], 奠定了中国工业的发展基调. 2015 年, 国家进一步提出了"中国制造 2025"战略[8]. 随后, 2016 年国土资源部发布的《全国矿产资源规划 (2016—2020 年)》[9], 明确指出要加快矿山的数字化和智能化建设. 此后,《关于深化"互联网+先进制造业"发展工业互联网的指导意见》[10]、《5G 应用"扬帆"行动计划》[11] 以及《"十四五"国家应急体系规划》[12] 等文件相继出台, 进一步推动了矿山行业的技术创新发展.

然而, 由于我国矿山的工业化进程起步较晚, 导致在开采技术的先进性上不如上述发达国家, 目前整体仍处于追赶阶段. 在此背景下, 梳理国内外采矿技术的现状, 分析我国与国际先进采矿技术之间的差距, 可以为我国矿山行业的技术发展奠定基础, 对于推动我国矿山企业的转型升级, 助力我国建设现代化矿业强国具有重要意义. 本文将分别从矿山规模、工艺装备和软件技术三方面开展调研总结, 分析国内外金属矿山开采技术的最新进展, 在此基础上分析未来采矿需要攻克的关键技术, 为金属矿山未来的发展指明前进方向.

1 开采规模现状

矿山的开采深度和年产量可以在某种程度上反映出矿山的规模、历史和技术水平, 因此, 通过调查整理了世界开采深度较大和矿石年产量较大

的金属矿山的基本情况, 分为露天和地下两种, 具体情况如图 1 所示.

从露天矿山开采深度看, 我国许多金属露天矿已经进入深凹露天开采阶段, 其开采深度处于世界前列, 但生产规模与世界大矿山相比存在较大差距, 缺乏世界级特大型露天矿. 例如智利的 Escondida 露天矿, 年产矿石量超 1 亿吨, 是我国大型露天矿年产量的 5 倍以上.

而对地下矿山而言, 虽然生产规模较露天矿小得多, 但国外地下矿山仍普遍高于我国. 目前我国地下矿生产规模均在千万吨级以下, 几个千万吨级以上矿山仍在建设中, 建成后可能成为世界上较大规模的地下矿. 从开采深度看, 国外地下矿开采深度已经达到 3000 ~ 4000 m, 且多为价值较高的黄金矿山. 我国采深较大的地下矿开采深度为 1100 ~ 1600 m, 尚未超过 2000 m, 较国外矿山采深有较大差距. 随着开采深度的增加, 高地应力、高地温、高井深和开采扰动等问题凸显, 越深的矿井面临的技术难度越大, 因此我国地下开采存在诸多难题有待攻克.

2 开采工艺装备现状

2.1 露天金属矿开采工艺装备

金属矿露天开采主要包括穿孔、爆破、铲装、运输与排岩五大环节. 这五个环节相互衔接影响, 构成了露天开采的最基本生产周期. 其中, 工艺和装备的选择对矿山生产具有较大影响.

按照矿石运输的连续性, 露天开采的工艺可以分为间断工艺、半连续工艺和连续工艺[13−14], 主要区别是所用设备的不同. 通过对智利的 Escondida、墨西哥的 Buenavista、巴西的 Serra Norte Mining Complex、澳大利亚的皮尔巴拉矿区、我国的德兴铜矿、紫金山金铜矿和齐大山铁矿等知名露天矿山的工艺调查发现, 国内外的金属矿山露天开采基本均采用穿爆铲运排的采矿法, 矿石的转运采用单斗+汽车的间断工艺和单斗+汽车+破碎站+传送带的半连续工艺, 基本没有采用连续工艺. 在采矿方法和运输工艺上, 我国与世界先进的露天矿山基本不

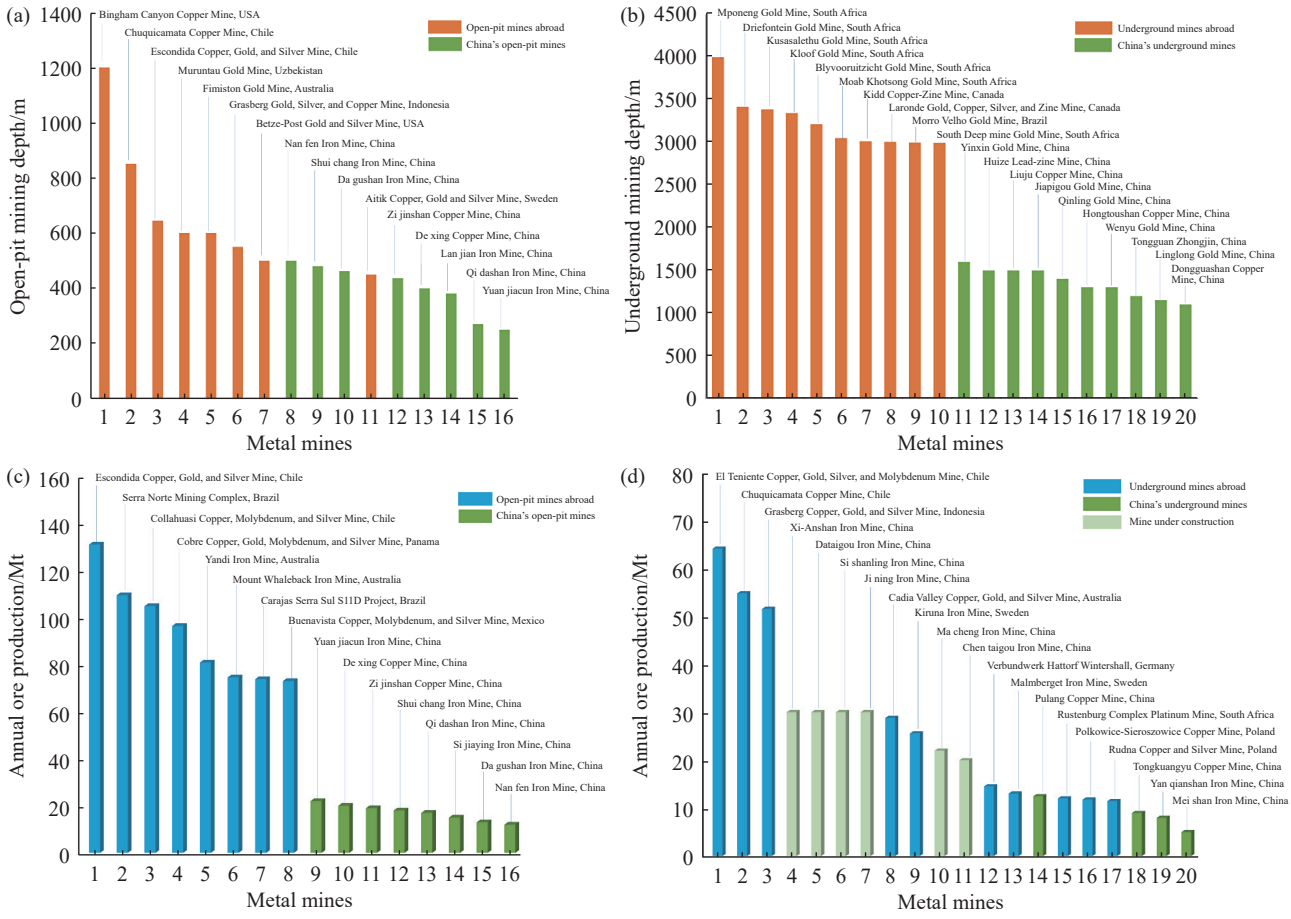

图 1 国内外大型金属矿比对. (a) 露天矿开采深度; (b) 地下矿开采深度; (c) 露天矿生产规模; (d) 地下矿生产规模

Fig.1 Comparison of large metal mines in China and worldwide: (a) depth of open-pit mining; (b) depth of underground mining; (c) annual production of open-pit mines; (d) annual production of underground mines

存在差距.

在众多的矿山机械设备中, 穿孔、铲装和运输设备与矿山的生产能力及智能化发展程度直接相关, 被称为露天矿山“三大件”. 现今国际上生产露天大型矿业设备的公司主要有: 卡特彼勒、安百拓、小松和山特维克等. 这些制造商凭借多年的技术积累和不断的创新投入, 形成了优秀的产品和成熟的智能化解决方案, 包揽了全球露天金属矿山的大部分市场. 例如, 卡特彼勒的 Cat MineStar™ 是一个以管理调度为核心, 多个信息管理系统为组件的无人作业系统. 该系统由车辆管理系统(Fleet)、生产现场管理系统(Terrain)、安全探测系统(Detect)、设备诊断系统(Health)与调度协同指挥系统(Command)等 5 个子系统构成. 以钻孔环节为例, Terrain for Drilling 专为提高钻孔精度和效率而设计, 其特点包括采用卫星制导实现精确的钻孔定位、使用精确的地形感知和深度感知确保钻孔底部高度的一致性、监测钻头的工作强度和速度识别地层岩性推算可爆性指数并优化爆破. Command for Drilling 则主要侧重钻孔的自动化和遥控作业, 在其辅助下每个工作人员可以操作多台设备同时进行穿孔作业, 在保证钻孔质量的同时提升整体作业效率. 相比国外先进的矿业设备制造能力, 我国的矿山设备制造技术起步较晚, 但发展迅速, 目前已具备多数设备的自主研发能力. 这些设备可以在一定程度上起到进口替代作用, 但在设备质量和配套的智能化技术方面, 与国外的先进设备对比还有着不小的差距.

2.2　地下金属矿开采工艺装备

不同于露天开采的简单工艺, 地下开采的工艺相对复杂. 按照地压控制方法的不同, 金属矿床地下开采方法主要分为空场法、崩落法和充填法. 在地下金属矿采矿方法的应用上, 国内外并无太大差别, 三大类采矿方法以及细分的各种方法在国内外均有使用, 但由于矿体赋存条件和不同国家政策的不同, 各种采矿方法所占的比例不同. 例如, 在崩落法中, 国外生产力较大的矿山多采用自然崩落法和无底柱分段崩落法. 我国使用自然崩落法的矿山只有普朗铜矿、铜矿峪铜矿和眼前山铁矿等少数矿山, 使用无底柱分段崩落法的矿山占据多数. 在充填法中, 国外在超深井充填方面已经有所实践, 例如加拿大 Kidd Creek 铜锌矿在采深超过 2800 m 的矿山使用了高浓度充填工艺, 南非的 Anglo Gold 公司在采深超过 3000 m 的 Tau Tona 金矿使用了超高强度回填技术[15], 而我国的充填矿山最大深度仍不过 1500 m 左右.

当前我国与国外先进地下矿之间的差距主要表现在各类装备的研发和应用上. 例如, 在钻孔设备方面, 国外先进的凿岩台车生产商主要有瑞典的安百拓和山特维克, 其产品多配有可靠的直接控制系统 (DCS) 或电脑控制的台车控制系统 (RCS), 可增设不同的自动化级别. 为了保证钻孔精度和安全性, 还集成了自动调平和钻头停止保护等功能, 因此占据着地下金属矿凿岩作业的大部分市场. 相较而言, 我国生产的凿岩台车正处于从纯手动阶段向半自动化、全自动化阶段跃升的过程, 鲜有采用自动化、智能化凿岩设备的案例报道. 对于井下运输车辆无人驾驶技术, 国内外均有很多公司、高校和科研院所进行相关研究, 文献 [16] 对此进行了详细的叙述. 综合来看, 井下电机车由于使用有轨运输, 机车行驶轨迹固定, 无人驾驶难度较低, 国内外均已有成熟应用案例; 对于无轨运输设备, 实现无人驾驶难度较大. 国外的技术相对领先, 已有井下卡车自动化成功应用的报道. 例如在南非的芬什钻石矿, 2006 年底卡车自动化系统投入运行, 是全球首家实现卡车自动化的矿山[6]. 国内近几年才开始关注无轨胶轮车无人驾驶技术的研究, 2022 年由武汉理工大学提供技术支持, 湖北三宁矿业有限公司与东风商用车有限公司联合研发的我国首台地下矿山无人驾驶卡车在宜昌市夷陵区试运行成功, 将转入商品开发阶段. 此外, 对于提升、通风和充填环节, 其装备和技术要求受开采深度影响较大, 由于当前我国地下矿山开采深度普遍小于 1500 m, 因此相关技术难题尚不突出, 但随着未来开采深度的不断增加, 面临的技术瓶颈将逐渐显现.

3　矿业软件研发应用现状

工业软件是提高企业生产经营效率的重要手段, 是除采矿设备之外保障矿山建设的重要内容. 工业软件的种类繁多且复杂, 按照中国工业技术产业软件化联盟的分类标准主要涵盖以下四类: 研发设计类软件 (CAD/CAM/CAE/EDA)、生产制造类软件 (PLC/DCS/SCADA/MES)、经营管理类软件 (ERP/SCM) 和运维服务类软件 (MRO/PHM). 本节将主要结合采矿技术的特点对矿山所用的研发设计类软件进行分析.

3.1　矿业 CAD 软件

CAD(Computer Aided Design) 是计算机辅助设计的简称, 是计算机科学技术发展和应用中的一

门重要技术. 在矿山的初始设计阶段和日常生产中, CAD 发挥了重要作用, 时至今日仍然是许多矿山必不可少的生产辅助工具. CAD 分为 2D 和 3D 两种产品, 2D CAD 是通用型产品, 主要是用于平面图、剖面图绘制; 3D CAD 主要用于三维建模, 实现设计里的实体、曲面造型(如 SoildWorks). 由于矿山行业的特殊性和复杂性, 企业普遍采用 2D CAD 进行辅助设计, 而 3D 模型的构建主要使用专业的矿业软件进行.

二维 CAD 的行业龙头是美国的 Autodesk 公司, 其技术和市场占有率一直处于领先地位. 我国的 CAD 企业的典型代表有中望软件、苏州浩辰和数码大方. 综合而言, 中望 CAD 在软件的功能、运行速度等核心指标已经基本与第一梯度的欧特克、达索处于同一水平, 在产品实力等方面处于国内领先的地位, 并且其价格优势显著. 未来随着二次开发生态的丰富, 以及性价比优势, 有望在国内逐步实现国产替代, 并在国际提升市场份额.

除了基础类的二维 CAD 软件外, 针对矿山开采领域, 不少公司推出了专业性更强的三维矿业软件, 比较知名的包括 Surpac、Vulcan、Micromine、3DMine 和 Dimine 等. 总体而言, 在三维矿业软件领域, Surpac 以其强大的专业功能获得了行业用户的普遍认可, Vulcan 和 Micromine 也占据着一定的市场份额, 我国的国产软件 3DMine 和 Dimine 对比它们虽然仍有一定差距, 但也基本可以满足矿山设计的需求. 并且随着研发的持续投入和技术的不断迭代, 将进一步缩小与国外先进矿业软件之间的差距.

3.2 矿业 CAE 软件

在矿山的开采过程中, 需要进行一系列的数值模拟分析以保证生产的安全高效进行. 例如对露天边坡的稳定性进行分析以设计合理的开采计划、对爆破方案进行模拟以获得最优的方案和参数、对含水条件下炮孔的失稳机理进行探索以寻求最佳解决方案等等[17], 这些研究过程都需要用到 CAE(Computer aided engineering)工业软件. 在采矿工程中, 涉及到的此类软件按照计算原理可以分为有限元软件、离散元软件、有限差分软件等[18−19]. 在采矿工程(岩石力学和岩土工程)中常用的有限元软件包括 ANSYS、ABAQUS、NASTRAN、ADINA、COMSOL 等; 离散元软件包括颗粒离散元 PFC、EDEM、YADE、ROCKY DEM、LIGGGHTS 和块体离散元 UDEC、3DEC 等[20−21]; 有限差分法软件包括 ITASCA 公司的 FLAC. 这些软件都是国际上知名的成熟商业软件(部分开源), 基本由美国和欧洲发达国家所研发. 我国的采矿工程(岩石力学)CAE 软件起步较晚, 较发达国家差距较大, 但经过多年的研发沉淀, 也逐渐趋于成熟并开始应用. 典型的软件包括 GDEM、RFPA、MatDEM、MultiFracS、Numerical Box 3D 等.

总体而言, 国外与采矿工程、岩土工程相关的 CAE 软件发展较早, 多由大型科技公司所研发维护升级, 产品更为成熟, 商业化程度高, 因此市场更广. 不同于国外, 我国与采矿相关的 CAE 软件多为高校或科研院自主研发, 再由孵化的商业公司进行商业销售, 整体上仍处于前期发展阶段. 虽然起步较晚, 但经过多年沉淀和创新, 取得了巨大的进步, 甚至在某些方面性能更优. 但不可否认的是, 国产 CAE 软件与国外先进成熟的商业 CAE 软件仍存在一定差距, 例如缺乏能解决通用场景的求解器, 在极端边界条件下的结果准确性不高等问题, 需要持续不断的创新突破.

4 采矿关键技术梳理

在大国竞争日趋激烈的当下, 发展先进的矿山开采技术, 对于保障我国的矿产资源供给具有重大意义. 因此, 本文在充分调研国内外采矿技术现状的基础上, 总结分析了采矿领域的关键技术, 并依据攻关时间线和紧迫程度划分为卡脖子技术、基础性技术、紧迫性技术和前瞻性技术等四类, 如图 2 所示. 具体的技术图谱如图 3 所示.

4.1 卡脖子技术

卡脖子技术, 是指能大幅提高开采效率、国外已经成熟应用而我国尚未拥有的技术. 基于国内外采矿技术调研情况分析可知, 当前我国在采矿技术领域面临的“卡脖子”问题主要包括高品质矿业设备及软件的自主化和智能化.

4.1.1 露天开采智能化无人化技术

通过调查可知, 国外的知名露天金属矿山矿石年产量普遍较大, 这些矿床普遍埋深不大、矿石品位较高, 矿山的整体经济效益极高. 优质的矿体赋存条件是影响矿石年产量的主要因素, 但先进的采矿技术是保障矿山高产的重要支撑. 在这些大型露天金属矿山中, 虽然采用的都是穿爆铲运排的开采工艺, 但各个作业环节均采用了最先进的机械设备和智能化技术[22]. 例如, 在穿孔环节, 使用了智能化程度较高的大孔径牙轮钻机, 可以实现快速高效、精准安全地钻凿最优的爆破炮孔; 在铲装环节, 普遍采用 10 m^3 以上斗容的电铲, 最

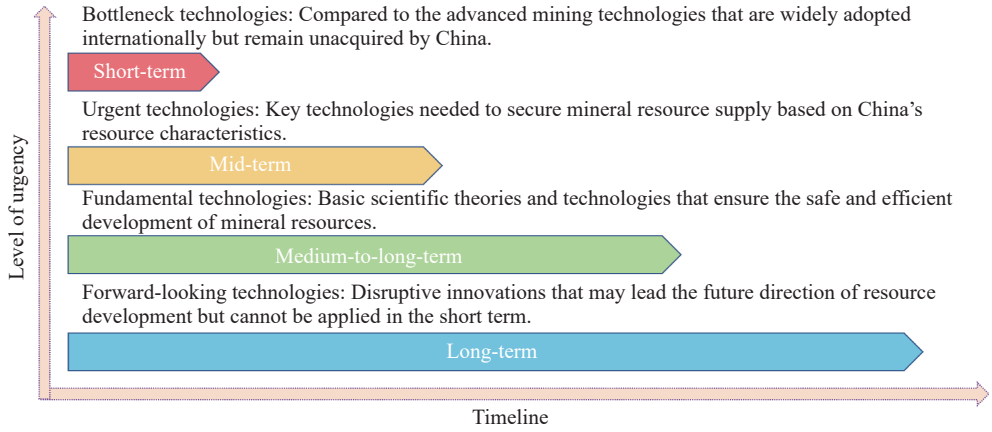

图 2　“四性关键”技术划分依据

Fig.2　Classification criteria for the four key technology types

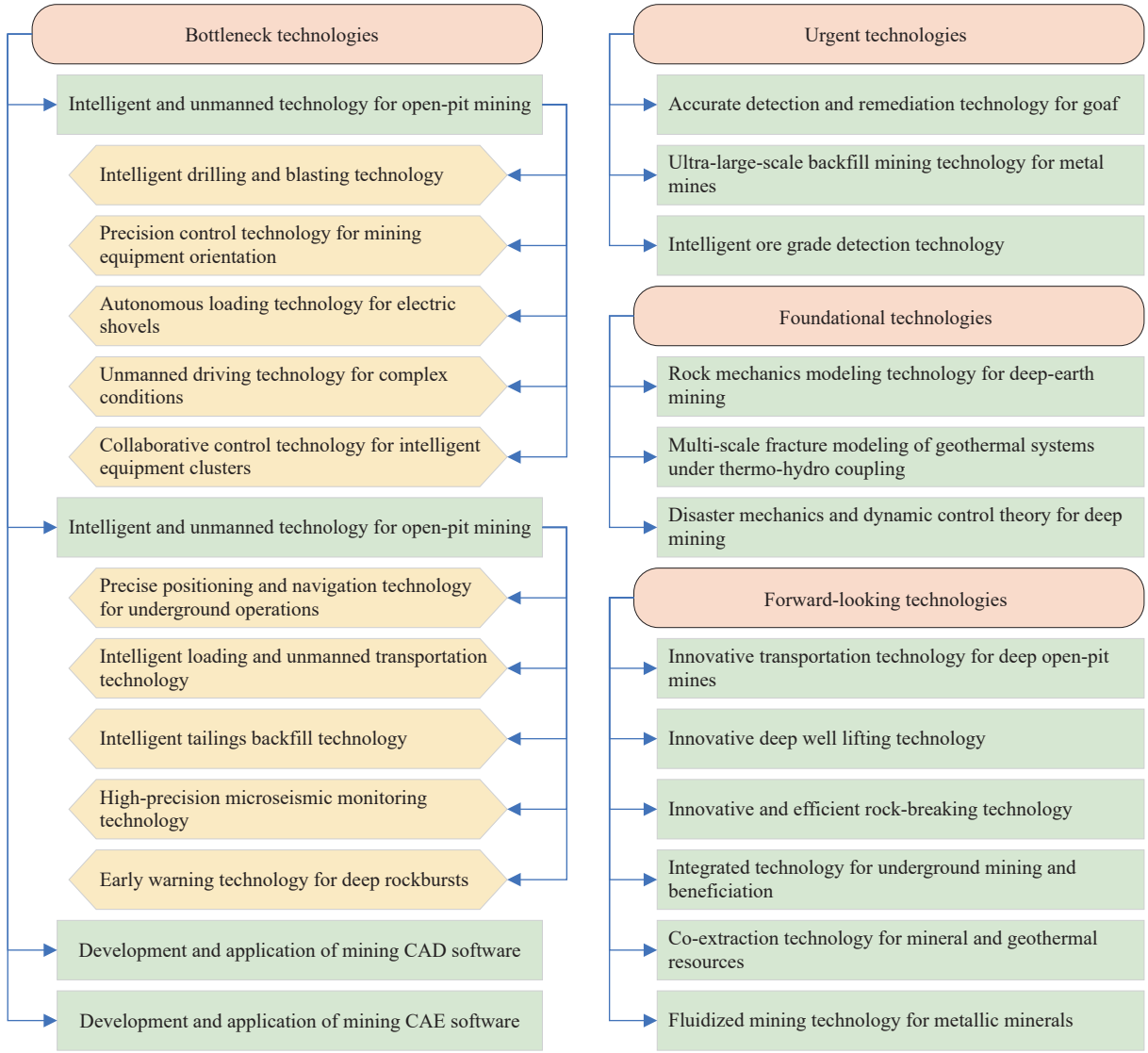

图 3　采矿关键技术图谱

Fig.3　Key technology roadmap for mining

大电铲容量可达 67 m^3, 并配有相应的智能化解决方法, 以实现安全高效的快速铲装; 在运输环节, 普遍使用 170 t 以上的大型矿卡和大倾角运输机进行矿岩的转运, 并大力发展无人卡车运输技术, 极大地提高了矿石的运载效率.

相比之下, 我国的露天金属矿山开采规模较

小, 多数的年产量均不超过 2000 万 t. 在开采方式和运输工艺方面虽然已达世界先进水平, 但在各个环节的大型设备研发和智能化配套方面仍有一定短板. 例如, 对于露天牙轮钻机, 只有极少数企业具备自主研发能力, 且产品质量和市场份额远不如国际矿业机械巨头卡特彼勒和小松, 智能钻孔技术也处于初级阶段; 在铲运环节, 电铲斗容多为 4 ~ 10 m^3, 卡车载重多在 25 ~ 75 t, 大型露天矿可达 120 ~ 170 t, 并且无人驾驶技术仍处于快速发展阶段, 距离完全成熟的无人运输阶段仍有一定距离[23].

短期内, 需要加快研发制约我国露天金属矿山智能化建设的“卡脖子”技术, 重点攻克智能穿孔爆破、采掘设备姿态精准控制、电铲自主铲装、复杂条件无人驾驶、智能装备集群协同控制等关键技术, 助力我国金属矿山的转型升级.

4.1.2 地下开采深部化智能化技术

在地下开采过程中, 开采深度是制约矿山生产的主要因素之一. 尤其是当地下开采进入 2000 m 以下的深部阶段时, “三高一扰动”(高地应力、高地温、高井深和开采扰动)问题的凸显会对矿石的开采造成极大困难. 国外的许多深井矿山开采深度已达 3000 ~ 4000 m, 在深部开采阶段积累了丰富的工程经验, 各项技术装备发展较为成熟. 相比之下, 我国的地下开采深度尚未超过 2000 m, 在深井通风降温、深井提升、深井岩爆预测以及深井充填等方面均缺乏实践, 部分关键装备依赖进口, 需要提早布局, 针对关键难题进行科技攻关[24].

此外, 在开采智能化方面, 国外的部分先进地下矿山已实现了凿岩、爆破、铲运出矿、无轨与有轨运输、提升等作业的自动化和无人化. 这不仅减少了工人在井下工作的危险, 还提高了生产效率, 为矿山带来了显著的经济和社会效益. 相比之下, 由于矿床赋存条件、技术和装备水平的限制, 我国地下矿山在开采过程中的智能化发展相对滞后. 例如, 在生产智能化方面, 无人化凿岩和出矿技术尚未在生产中广泛应用, 大多数只是实现了凿岩和出矿的远程遥控, 且多为示范性项目; 在固定设施的智能化方面, 如提升、通风、排水、充填等系统, 目前仅实现了部分功能的自动化与无人值守; 在生产管控智能化方面, 仅有部分环节应用了智能化检测手段, 尚未建成全面的一体化管控平台; 在分析决策方面, 矿山一线积累的大量生产数据并未得到有效地分析, 大数据分析技术有待深入应用.

短期内, 需加大地下开采智能化技术的科研力度, 重点攻关井下精准定位导航、智能化铲装及无人化运输、智能化尾矿充填、高精度微震监测、深井岩爆预警等核心技术装备, 保障安全的同时大幅提升采矿作业效率.

4.1.3 矿业软件的研发与应用

矿山地质的精细化建模是数字化矿山的基础, 也是智慧矿山建设的关键一环, 对于优化开采计划、提升矿山经济效益和生产效率至关重要. 在这一过程中, 三维矿业软件起到了不可替代的作用. 国外的先进矿山普遍将地质资源的精细化与可视化建模作为智能化建设的基础, 并据此形成覆盖全生命周期的全局性开采规划. 因此, 国外矿业界高度重视相关软件的研发, 涌现出如 Surpac、Vulcan、Micromine 和 Datamine 等优秀的矿产资源开发管理工具, 极大地推动了矿山数字化和智能化建设的进程.

近年来, 我国的矿业界也同样注重矿山地质的数字化建设, 尤其是在空间数据可视化、地质资源管理和生产过程管理等方面取得了显著进展, 相继研发了 3DMine 和 Dimine 等三维矿业软件, 并得到广泛应用, 然而其潜力尚未得到充分发挥. 例如, 对于勘测数据处理、矿体圈定、储量计算等方面的业务应用较为成熟, 但采矿设计和计划优化模块的表现却并不理想, 未能实现真正的业务协同[6]. 因此, 在总体上, 在三维矿业软件的研发与应用方面, 我国相较国际矿业发达国家仍有较大差距.

对于采矿工程 CAE 软件的自主研发方面, 我国由于起步较晚, 总体上较国际先进企业的研发水平差距较大, 常用的有限元、离散元和有限差分类模拟软件多依赖进口. 并且, 不同于国外大型商业公司开发销售迭代升级的成熟模式, 国内的数值模拟类软件主要由高校学者或科研院所进行开发, 形成完善的产品后再进行商业包装和销售, 缺乏大型商业公司的持续投入和市场推广, 整体上仍处于发展的初级阶段.

4.2 基础性技术

基础性技术, 是指为实现安全高效开采提供保障的与岩石力学基础理论相关的关键技术. 尤其是在进入深部开采后, 高地应力的存在极大地威胁着采矿作业的正常进行, 必须深入研究深部矿井中的岩石力学行为, 以保障矿山的生产稳定.

4.2.1 深地采矿岩石力学建模技术

深地采矿岩石力学建模是指在深部地下采矿

过程中, 通过应用先进的力学模型和数值模拟技术, 研究岩石的变形、破裂、应力分布等力学行为, 以预测和评估采矿过程中可能出现的岩体失稳、坍塌等地质灾害风险, 从而为安全高效的矿山开采提供科学指导[25].

该领域的主要研究方向包括: ①岩石的本构模型研究, 探索不同类型岩石在高压、高温等极端条件下的变形特性, 为采矿过程中岩石变形行为提供准确的数值描述; ②孔隙岩体的力学行为研究, 考虑地下水流对岩体力学性能的影响, 以及孔隙介质中岩石−水耦合作用对开采的响应; ③多尺度建模方法研究, 构建跨尺度模拟方法揭示从微观到宏观尺度的岩石力学响应.

4.2.2　地热系统岩石热水力耦合过程下多尺度断裂模拟

地热系统岩石热水力耦合过程下多尺度断裂模拟研究是指通过结合多个空间和时间尺度, 探究地热系统中岩石的热、水、力相互作用及其耦合机制的研究, 旨在揭示地热能开发和地下水流对地质断裂带和岩石性质的影响机制, 提高地热资源的开发效率和环境管理水平[26]. 在过去几十年中, 随着数值模拟、计算能力和数据监测技术的进步, 这一领域取得了显著的发展.

多尺度断裂模拟研究包括以下几个方面: ①从微观尺度到宏观尺度的跨尺度模拟, 深入理解地热系统内部岩石的热、水、力相互作用机制; ②耦合实验研究和数值模拟, 验证多因素影响下模拟结果的准确性; ③开发高效算法和模拟工具, 提升多尺度模拟的计算效率; ④实时监测和数据采集技术的应用, 改进模拟模型的精度.

4.2.3　深部开采灾害力学与动态调控理论

深部开采灾害力学与动态调控理论是指研究深部岩体力学特性与变形破坏机理, 建立岩体深部高地应力及开采扰动条件下岩体失稳的力学模型, 研发出新的探测技术和方法, 精准监测深部开采过程中岩体能量聚集、演化、岩体破裂、损伤和能量动力释放的过程, 为岩爆的实时预测预报提供可靠依据, 并通过人工诱导实现岩爆储能向采矿破岩动能转化的岩爆灾害良性调控的新技术[27].

该领域的主要研究方向包括: ①深部岩体力学特性与变形破坏机理; ②深部岩体失稳破裂的力学模型和强度准则; ③深部开采过程数值分析方法; ④深部开采灾害的孕育发生机理与动态调控.

4.3　紧迫性技术

紧迫性技术, 是指面对我国的资源禀赋情况, 亟需突破才能保障我国矿产资源供给安全的关键技术. 集中力量攻克紧迫性技术, 对于解决国家重大产业安全问题、有效保障产业链供应链安全具有重大意义.

4.3.1　采空区精准探测与安全治理技术

由于历史原因和无序开采, 我国部分矿山下部赋存着大量大小不一、形状各异的采空区, 部分矿山的空区表现出层位浅、分布面积大、顶板跨度大、多层空区显现且相互叠加等特点, 其复杂性和处理难度空前. 随着矿山开采深度的增加和大型设备的投入, 对空区上覆岩层的压力增大, 存在重大的安全生产隐患. 因此, 在生产过程中开展采空区的勘测和治理, 总结形成过采空区安全开采技术是十分迫切的. 为了攻克这一关键难题, 需要在以下几方面进行集中攻关: ①采空区地质灾害模式及诱发机理分析; ②隐伏空区精准探测技术; ③采空区精准无人高效治理技术; 采空区探−测−治全流程的稳定性监测与灾害预警技术等.

4.3.2　金属矿山超大规模充填开采技术

随着我国地质找矿取得显著进展, 一批超大规模矿山已经进入开发或建设阶段, 这些矿山的生产规模为 $10^7 \sim 3.5\times10^7\ \mathrm{t\cdot a^{-1}}$, 如思山岭铁矿和西鞍山铁矿等. 由于环保要求, 这些超大规模矿山必须采用充填法进行开采. 与空场法和崩落法相比, 充填采矿法能有效控制地表沉降, 减少尾矿地表堆存, 从而保护生态环境. 然而, 超大规模充填法开采也面临诸多挑战, 需要在以下几个方面取得关键突破: ①采矿方法工艺及回采顺序, 包括高应力底柱和间柱的回采、采场组织等; ②提升运输系统, 特别是深井大载重运输; ③有效的通风和降温方式及系统; ④充填工艺, 包括超大规模充填料的制备系统、减少管道磨损、钻孔的最佳深度、减压或泄压措施以及采场充填工艺等; ⑤岩爆的监测和预防; ⑥高应力条件下井巷的支护和加固; ⑦采矿自动化技术等.

4.3.3　矿石品位智能检测技术

品位是衡量矿石中目标矿物含量的关键指标, 直接决定了矿产资源的经济价值和开采可行性, 对矿山工程、开采工艺、选矿工艺流程等设计与优化, 甚至整个矿业经济运行具有重要意义. 长期以来, 矿山开采和加工过程中, 原矿矿物种类识别、含量分析以及多元素品位的即时检测一直是行业中的关键难题. 虽然传统实验室分析方法精度较高, 但存在周期长、成本高、样品代表性差等问题. 目前, 国内外在原矿性质在线分析技术方面

已有一定进展, 如 X 射线荧光光谱和 X 射线透射技术. 然而, 这些技术仍面临探测范围有限、样品整洁度要求高、设备辐射量大、成本较高等问题, 限制了它们在原矿性质在线分析中的应用. 未来, 需要在以下几个方向取得突破: ①多模态融合与智能感知技术的前沿探索; ②智能感知与数据处理算法的迭代升级; ③微型化、远程化、智能化设备的研发; ④实时动态监测网络系统的构建与优化等[28].

4.4 前瞻性技术

前瞻性技术, 是指短期内无法实现应用, 但可能引领未来采矿技术发展的颠覆性创新技术. 这些技术需要提早规划, 并持续进行科研攻关, 以为未来的采矿发展奠定基础.

4.4.1 深凹露天矿新型运输技术

随着露天矿山开采深度的增加, 矿岩的运输距离不断延长, 运输成本大幅上升, 对运输系统进行创新性的改变可以直接影响矿山的经济效益. 早在 2010 年, 就有学者提出了利用氦气平台作为露天矿石搬运的技术构想[29]. 该构想利用轻质气体提供的巨大升力将矿岩提至空中并进行运输, 变矿岩的地面运输为空中运输. 这种方法尤其适合深凹露天矿, 不仅能提高矿山的运输效率, 同时还可以大幅降低运输成本, 为企业获取巨大的经济效益. 此外, 该装置还能有效利用太阳能、风能等清洁能源, 极大程度减少化石能源的消耗, 降低二氧化碳的排放量, 是建设绿色矿山的颠覆性技术手段.

实际上, 利用轻质气体实现矿石的低空搬运并非难以实现的设想, 在航空航天领域, 现代重载飞艇便是一种与之相近的装置. 作为一种运输工具, 现代重载飞艇兼顾了运载能力(50 t 以上)、运输速度和运输费用三项指标, 有效地填补了传统运输手段在大型、重型货物远距离运输领域的空白. 目前国内外已有多家企业和科研机构开展了相关研究, 部分单位已经研制了样机并进行飞行试验[30]. 当然, 现在重载飞艇技术发展的主要应用方向是战术与战略武器的转场运输、货运起重和观光旅游等任务, 需要针对露天矿山的特点进行相应的技术改造才能实现矿岩的运输等任务, 但该技术的发展将为未来的采矿技术带来颠覆性的变革.

4.4.2 新型深井提升技术

对于地下开采的矿山, 提升技术是其中必不可少的关键环节. 对于开采深度小于 1000 m 的地下矿山, 摩擦轮多绳提升机是一种经济高效的提升技术, 因此被众多企业所采用. 但是, 进入深部开采之后, 随着提升高度的不断增加, 钢丝绳需要不断加长, 尤其是当开采深度超过 1800 m 后, 钢丝绳的重量可能超过提升容器装载的重量. 这不仅会导致生产效率的降低和生产成本的上升, 更会对矿山的生产安全造成极大威胁. 为了克服摩擦轮提升机的不足, 多绳缠绕式提升机被研发出来. 多绳缠绕式提升机解决了多绳摩擦提升机在深井提升中存在的尾绳问题, 不仅可用作双容器多水平提升, 而且可用于井筒掘进, 少了尾绳, 容器底部还能悬挂设备和材料, 目前已在南非等深井矿山成功应用. 然而, 当提升高度超过 3000 m 或 4000 m 后, 有绳提升技术由于钢丝绳造成的大负荷、大惯量、大扭矩将是无法解决的问题. 因此, 必须研发新的无绳垂直提升技术.

蔡美峰院士在论文中提及了一种直线电机驱动, 磁悬浮驱动提升技术[31]. 永磁直线同步电机的工作原理类似于旋转永磁同步电机. 当电机初级单元中通入三相对称电流时, 中气隙内产生一个沿直线方向分布的正弦磁场, 该磁场的峰值随时间平移, 形成行波磁场. 行波磁场与永磁体产生的磁场相互作用, 从而产生电磁推力, 在这一推力作用下, 罐笼得以直线向上移动. 与传统垂直运输系统相比, 直线电机驱动的运输系统具有空间利用率高、速度快、效率高以及提升高度无限制等优点, 因此有望成为未来深井开采的主要提升方式.

4.4.3 新型高效破岩技术

为了实现矿岩的化整为零, 方便矿岩的运输, 机械切割和钻孔爆破是最常用的两种方法. 以煤矿为代表的矿岩质地较软的矿山, 通常采用机械化破岩以实现连续采矿, 这种方法既能达到很高的生产能力又能改善工人作业环境. 以金属矿为代表的硬岩矿山, 由于矿岩的强度和硬度较大, 常规的机械刀具很难实现安全高效的连续破岩作业, 因此通常使用钻爆法进行开采. 然而, 爆破采矿工艺也存在着一定的弊端, 一方面, 爆破作业会对围岩和环境造成破坏, 影响采场的稳定性; 另一方面, 爆破作业很难精准控制落矿边界和爆破后矿岩的块度, 容易造成矿岩的混杂和破岩块度不均等问题. 因此, 探索适用于硬岩矿山的非爆连续开采方式, 对于深部金属矿山的发展至关重要.

对于各种新型破岩技术, 学术界和工程界进行了一系列的研究, 先后探索了机械破岩、高压

水射流破岩、激光破岩、等离子爆破破岩、液态 CO_2 相变致裂破岩、热力破岩、微波破岩、电磁破岩等多种方法[5]. 这些新技术普遍成本较高, 工业化进程缓慢, 短期内不适合大规模的地下矿山回采作业. 事实上, 进入深部开采后, 高应力条件下硬岩中积蓄了大量能量, 岩体开挖卸荷会导致能量的变化、转移和重新分布, 从而引发岩石裂纹扩展. 如果能够找到合适的诱导破裂方法, 就能将深部岩体的灾害性破坏转化为有序的致裂, 从而在少用或不用炸药的情况下, 实现深部矿床的安全高效开采. 早在 2001 年的深部开采香山科学会议上, 李夕兵等[32] 就提出了高应力硬岩诱导致裂、变害为利的理念, 并在开阳磷矿进行了初步实践, 探索了矿山深部硬岩开挖与灾害控制互换的非爆连续开采和资源无害化循环利用的新模式[33−34], 该方法有望在短期内成为未来深井矿山非爆连续开采的主要辅助破岩手段.

4.4.4　地下采选充一体化技术

地下采选充一体化系统, 是深部矿山开发的一种新的探索. 该方法打破了常规地下开采的模式和方法, 创造性地提出将选厂直接建在地下, 从而实现矿石短距离提升、地下选矿、精矿管道输送、尾砂就近地下充填等一体化的开发方法. 与传统的地下开采方法相比, 采选充一体化具有以下优点: 选厂建在地下, 极大程度上降低了提升运输的成本; 尾矿不出井直接充填采空区, 减少了固体废料在地表的堆放; 选厂建于地下, 减少了选厂的地表占地和对环境的影响. 因此, 无论是未来面对深井开采的必然趋势, 还是绿色矿山的环保政策要求, 该方法都具有充分的优势[35].

具体而言, 金属矿地下采选一体化理论与技术需要重点攻关的内容包括: 高应力、高水头、强扰动作用下大型地下硐室群围岩稳定性技术; 金属矿就地矿物分选技术与装备; 金属矿井下原位充填技术与装备; 地下采选协同机制和精矿浆高扬程管道输送理论与技术.

总之, 地下采选充一体化是深部金属矿产资源开发利用的重大创新, 是一种“短流程多工艺协同”的颠覆性技术集成开发模式, 国内外尚未形成大规模生产系统, 一体化装备匮乏且研发难度空前. 需要广大科研工作者潜心攻关, 研发采选充一体化的开采技术与装备, 形成新型深部金属矿资源开发技术模式的突破.

4.4.5　矿产与地热资源共采技术

对于深部开采的矿井, 由深层地温所诱发的高温热害是制约金属矿产安全高效开采的主要难题之一. 然而, 地热资源作为一种储量巨大的可再生能源, 如能实现地热资源的有效利用, 有助于实现绿色、清洁、低碳和可持续的发展目标. 为此, 中国工程院立项重点战略咨询项目“深部矿产与地热资源共采战略研究”, 对此进行了初步探索[36].

虽然已有众多学者对深部矿产和地热资源共采技术进行了探索性研究, 但实际上我国在该方向的科技攻关仍面临着一系列的挑战, 例如金属矿产资源与地热资源共同赋存区域勘查程度低、深部矿产和地热资源共同开发利用基础研究薄弱、行业规划和政策措施有待完善等, 未来需要从深部地热资源赋存及开发利用调查、深部矿产资源与深部地热共同开发利用前景分析、高温坚硬岩层地下巷道与硐室掘进和建造技术、深部矿产资源开采系统和地热开发系统“共建–共存–共用”关键理论与技术、深部高温岩层地热能交换和输送理论与技术等方面重点开展研究[36].

4.4.6　金属矿产流态化开采技术

据全世界 30 多个国家的地应力实测结果, 6000 m 以深的岩体基本处于三向等压状态, 整体呈现全范围塑性流变状态, 传统的金属矿开采方式将无法使用, 必须探寻新的开采模式. 为此, 谢和平院士提出了深地固体资源流态开发的技术构想, 以类似深地盾构作业(TBM 作业)为先导, 实现对深地固体资源采、选、冶、充、电、气的原位、实时和一体化开发[37]. 而且, 对于深地能源型矿物开采(如煤炭)和深地资源型矿物开采(如金属矿), 流态开采的概念与流程也不同. 深地能源型矿产建议原位能源转化利用, 实现流态化开发; 深地资源型矿产建议流态化输送.

关于深地金属矿产资源的流态化开采研究相对较少. 较为著名的是吴爱祥院士提出的深部原位溶浸开采, 是指从地表经钻孔把溶液注入深层金属矿, 溶液在矿层与目标矿物发生物理、化学、生物等反应, 生成可溶性离子进入溶液, 经抽液孔提升至地表, 从而提取有价金属[38]. 实际上, 原位溶浸开采技术是一种较为成熟的特殊采矿方法, 已被广泛用于铜、铀、金、银的开采. 但是在深部金属矿产的开发中, 目前尚无使用原位溶浸开采技术的相关报道, 主要原因是深部开采面临的高井深、高地温、高应力以及岩体高致密等难题, 现有的“就地破碎浸出”等传统溶浸开采技术将失效, 深层矿岩多尺度孔裂结构复杂, 生化反应影响下渗流通道不断演变, 导致溶液渗流行为不清、浸

矿体系渗流与反应响应关系不明. 同时, 深层环境下微生物增殖行为未知, 流态转化过程生物–化学耦合作用机理不明, 流态化开采过程调控技术缺乏. 因此, 需要建立深层金属矿原位生物流态化开采理论体系, 进而构建金属矿流态化开采的颠覆性技术.

5 结论

金属矿产作为现代社会的物质基础发挥着难以取代的重要作用, 而随着人工智能、工业互联网和大数据等新兴技术的不断进步与推动, 金属矿山的开采展现出深部、绿色和智能三大趋势. 本文通过对国内外金属矿山开采工艺和技术现状的全面调研, 归纳总结了当前我国采矿技术的瓶颈以及未来发展的重点方向.

(1)限于资源禀赋条件和装备技术短板, 我国金属矿山的生产规模和开采深度相比国际顶尖矿山存在较大差距, 尤其在超深井开采方面实践不足.

(2)当前我国采矿领域所面临的“卡脖子”技术难题主要包括露天开采智能化无人化技术、地下开采深部化智能化技术和矿业软件的研发与应用.

(3)建议面向四性技术开展系统布局, 加大卡脖子技术的攻关力度, 加紧研发紧迫性技术, 争取短期尽快突破; 长线布局基础性技术, 支持前瞻性技术创新性研究, 谋求采矿技术的新突破.

(4)建议由政府引导, 科研机构、高等学校和具有行业技术优势的企业联合组建高水平矿山智能化重点实验室, 开展专项技术攻关, 加快突破制约智能化建设的“卡脖子”技术, 研发高精尖采矿装备, 保障我国矿产资源的高质开发.

参 考 文 献

[1] Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad. *Acta Geosci Sin*, 2021, 42(2): 137
(陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 国内外战略性矿产厘定理论与方法. 地球学报, 2021, 42(2): 137)

[2] Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2019, 33(2): 106
(翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106)

[3] Wang A J, Wang G S, Deng X Z, et al. Security and management of china's critical mineral resources in the new era. *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2019, 33(2): 133
(王安建, 王高尚, 邓祥征, 等. 新时代中国战略性关键矿产资源安全与管理. 中国科学基金, 2019, 33(2): 133)

[4] Zeng X B, Li G J. The current status and development strategy of mineral resources in the United States. *World Nonferrous Met*, 2019(2): 73
(曾小波, 李桂菊. 美国矿产资源现状与发展战略. 世界有色金属, 2019(2): 73)

[5] Guo Q F, Cai M F, Wu X H, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 476
(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. 工程科学学报, 2022, 44(4): 476)

[6] Li G Q, Wang H, Hou J, et al. Progress of intelligent technology in underground metal mines. *Met Mine*, 2021(11): 1
(李国清, 王浩, 侯杰, 等. 地下金属矿山智能化技术进展. 金属矿山, 2021(11): 1)

[7] Xie K, Xiao J H, Wu J P. The environment, foundation and road of the integration of industrialization and informatization in China. *Econ Perspect*, 2009(2): 28
(谢康, 肖静华, 乌家培. 中国工业化与信息化融合的环境、基础和道路. 经济学动态, 2009(2): 28)

[8] Zhou J. Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025”. *China Mech Eng*, 2015, 26(17): 2273
(周济. 智能制造—“中国制造 2025”的主攻方向. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273)

[9] The State Council of the People's Republic of China. Reply of the State Council on National Mineral Resources Planning (2016—2020). *Gaz State Counc People's Repub China*, 2016(33): 39
(国务院. 国务院关于全国矿产资源规划(2016—2020 年)的批复. 中华人民共和国国务院公报, 2016(33): 39)

[10] The State Council of the People's Republic of China. The state council's guiding opinions on deepening “Advanced manufacturing industry in Internet plus” and developing industrial Internet. *Gaz State Counc People's Repub China*, 2017(34): 12
(国务院. 国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见. 中华人民共和国国务院公报, 2017(34): 12)

[11] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, et al. Ten departments issued the action plan of “sailing” for 5G applications (2021—2023). *Official Website of Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China* (2021-07-12) [2024-08-19]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/txs/wjfb/art/2021/art_ccee7f20deb248358e2f348596e087da.html
(工业和信息化部等. 十部门印发《5G 应用“扬帆”行动计划(2021—2023 年)》. 工业和信息化部网站 (2021-07-12)[2024-08-19]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/txs/wjfb/art/2021/art_ccee7f20deb248358e2f348596e087da.html)

[12] The State Council of the People's Republic of China. Circular of the state council on printing and issuing the plan for building the national emergency response system during the 14th five-year plan

period. *Gaz State Counc People's Repub China*, 2022(6): 30
(国务院. 国务院关于印发“十四五”家应急体系规划的通知. 中华人民共和国国务院公报, 2022(6): 30)

[13] Zhao H Z, Zhen X, Li M J. Current development situation of open-pit coal mine in China. *China Min Mag*, 2016, 25(6): 12
(赵红泽, 甄选, 厉美杰. 中国露天煤矿发展现状. 中国矿业, 2016, 25(6): 12)

[14] Ji C S. On development of surface coal mining systems in China. *J Min Saf Eng*, 2008, 25(3): 297
(姬长生. 我国露天煤矿开采工艺发展状况综述. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 297)

[15] Li X B, Liu B. Review and exploration of current situation of backfill mining in hard rock mines. *Gold Sci Technol*, 2018, 26(4): 492
(李夕兵, 刘冰. 硬岩矿山充填开采现状评述与探索. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 492)

[16] Bao J S, Liu Q, Ge S R, et al. Research status and development trend of intelligent technologies for mine transportation equipment. *J Intell Mine*, 2020, 1(1): 78
(鲍久圣, 刘琴, 葛世荣, 等. 矿山运输装备智能化技术研究现状及发展趋势. 智能矿山, 2020, 1(1): 78)

[17] Yang T H, Zhang F C, Yu Q L, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(5): 1437
(杨天鸿, 张锋春, 于庆磊, 等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437)

[18] Jing L, Hudson J A. Numerical methods in rock mechanics. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39(4): 409

[19] Nikolić M, Roje-Bonacci T, Ibrahimbegović A. Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Teh Vjesn*, 2016, 23(2): 627

[20] Sarhosis V, Lemos J V, Bagi K. Discrete element modeling//*Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 469

[21] Juhasz E, Movahedi R M, Fekete I, et al. Discrete element modelling of particle degardation of railway ballast material with pfc3d software. *Sci Transp Prog*, 2019(6(84)): 103

[22] Wu L H, Canz M, Guevara H, et al. Intelligent Construction System and Application Scenario of Large-scale Open-pit Mines Overseas: Taking Las Bambas Copper Mine asExample[J/OL]. *Met Mine*. (2024-04-19) [2024-08-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240418.1100.002.html.
(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/OL]. 金属矿山, (2024-04-19) [2024-08-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240418.1100.002.html)

[23] Hu N L, Li G Q. Discussion on the status and issues of intelligence for metal mines in China. *Met Mine*, 2024(1): 7
(胡乃联, 李国清. 我国金属矿山智能化现状与问题探讨. 金属矿山, 2024(1): 7)

[24] Cai M F, Tan W H, Wu X H, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines. *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31(11): 3409
(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. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3409)

[25] Yan J L, Mu Z R, Zheng W J. 2023 Global engineering fronts. *Engineering*, 2023, 31: 4

[26] Yan B Q, Ren F H, Cai M F, et al. A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling. *Chin J Eng*, 2020, 42(11): 1389
(颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等. 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. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1389)

[27] Yang J, Min T J, Liu B H, et al. Research progress on disasters and prevention in Deeping mining. *Sci Technol Eng*, 2020, 20(36): 14767
(杨军, 闵铁军, 刘斌慧, 等. 深部开采灾害及防治研究进展. 科学技术与工程, 2020, 20(36): 14767)

[28] Wang H Y, Liu Z Y, Qu F M, et al. Development of online detection technologies for ore grade. *Strateg Study CAE*, 2024, 26(3): 152
(王怀远, 刘政宇, 曲福明, 等. 矿石品位在线检测技术发展研究. 中国工程科学, 2024, 26(3): 152)

[29] Shao A L, Sun H R, Liu X B, et al. *Helium Platform Mine Low Air Handler*: China Patent, 201010165463.5. 2012-07-04
(邵安林, 孙豁然, 柳小波, 等. 氦气平台矿山低空运搬装置: 中国专利, 201010165463.5. 2012-07-04)

[30] Yan F, Huang W N, Yang Y C, et al. Overview of developing status quo and trend of modern heavy lift airships. *Sci Technol Rev*, 2017, 35(9): 68
(闫峰, 黄宛宁, 杨燕初, 等. 现代重载飞艇发展现状及趋势. 科技导报, 2017, 35(9): 68)

[31] 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)

[32] Gu D S, Li X B. Science problems and research state of deep mining in metal and nonferrous mines. *Min Res Dev*, 2003, 23(Supl 1): 1
(古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿. 矿业研究与开发, 2003, 23(增刊 1): 1)

[33] Li X B, Cao Z W, Zhou J, et al. Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example. *Chin J Nonferrous Met*, 2019, 29(10): 2364
(李夕兵, 曹芝维, 周健, 等. 硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建—以开阳磷矿为例. 中国有色金属学报, 2019,

29(10)：2364)

[34] Li X B, Yao J R, Du K. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine—A case study of Kaiyang phosphate mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(6): 1101
(李夕兵, 姚金蕊, 杜坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探—以开阳磷矿为例. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6)：1101)

[35] Sun H R, Mao F H, Liu X B, et al. Research of the integration system of underground mining and beneficiation for underground mineral resources. *Met Mine*, 2010(4): 15
(孙豁然, 毛凤海, 柳小波, 等. 矿产资源地下采选一体化系统研究. 金属矿山, 2010(4)：15)

[36] Cai M F, Duo ji, Chen X S, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(6): 43
(蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究. 中国工程科学, 2021, 23(6)：43)

[37] Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth. *Adv Eng Sci*, 2017, 49(1): 1
(谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向. 工程科学与技术, 2017, 49(1)：1)

[38] 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)