



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

杨小聪 尹升华

Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines

YANG Xiaocong, YIN Shenghua

引用本文:

杨小聪, 尹升华. 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[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2147–2158. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.001

YANG Xiaocong, YIN Shenghua. Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2147–2158. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.001>

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>

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>

金属矿山固废充填研究现状与发展趋势

Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines

工程科学学报. 2022, 44(1): 11 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.03.08.001>

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>

深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究

Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines

工程科学学报. 2022, 44(10): 1682 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.05.07.005>

短壁连采连充式胶结充填采煤技术应用研究

Application of short-wall continuous mining and continuous backfilling cemented-fill mining technology

工程科学学报. 2022, 44(6): 981 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.05.13.003>

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

杨小聪^{1,2,3}✉, 尹升华²

1) 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160 2) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 3) 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628

✉通信作者, E-mail: yxcong@bgrimm.com

摘要 我国铁矿资源矿床普遍具有厚度大、品位低的特点, 这使得传统的开采方式难以经济有效地满足市场需求. 为了在激烈的市场竞争中占据优势, 同时遵循环保和低碳发展的要求, 必须采用千万吨级的大规模、低成本、环保低碳开采模式. 这种开采模式不仅能显著降低单位矿石的开采成本, 还能最大程度地减少对环境的影响, 降低碳排放, 实现资源的可持续开发与利用. 为此, 本文围绕超大型深井矿山高效绿色开采的采矿新模式、安全新技术、绿色新要求、智能新趋势, 旨在攻克“深部厚大矿体超大规模连续开采原理与方法、高应力岩体强循环扰动灾变机理及力学行为、深热矿井多风机自适应智能节能通风机制”3 项关键问题, 研究形成“深部倾斜厚大矿体盘区化时空协同连续开采技术、大规模采动力学环境高效感知装置与灾害防控技术、尾砂膏体大流量连续稳态制备与输送技术、深热矿井多级动态智能通风及热害直冷防治技术、盘区回采作业链设备群智能决策与协同作业管控技术”5 项关键技术, 实现厚大矿体大参数高效连续开采、大规模开采的工程岩体力学与动力灾害防治、采选固废高效充填利用、智能节能通风与热害防治、盘区智能化回采作业链高效协同等方面的理论、技术、方法和装备创新, 创建千米以深千万吨级金属矿绿色智能开采新理论、新技术和新装备并建立示范矿山, 形成可推广应用的超大型深井矿山高效绿色开采技术体系, 以期全面提升我国深部战略矿产资源的大规模绿色开发能力, 为深部矿产资源大规模绿色开发提供理论基础与技术支持.

关键词 深井铁矿; 充填采矿; 智能采矿; 超大规模开采; 采矿技术与装备

分类号 TG142.71

Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines

YANG Xiacong^{1,2,3}✉, YIN Shenghua²

1) BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China

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

3) National Center for International Joint Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China

✉Corresponding author, E-mail: yxcong@bgrimm.com

ABSTRACT China's iron ore deposits are generally characterized by substantial thickness and low grade, and this presents challenges for traditional mining methods to satisfy market demands economically and efficiently. To maintain a competitive edge in the market while complying with environmental and low-carbon development principles, large-scale, low-cost, environmentally friendly, and low-carbon mining models that can handle tens of millions of tons annually must be adopted. Such models not only considerably lower the unit cost of ore extraction but also minimize the environmental effect, lower the carbon emissions, and attain sustainable resource

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2904100)

development and utilization. This paper studies the new mining models, advanced safety technologies, green requirements, and intelligent trends in the efficient, green exploitation of large-scale deep mines. This study aims to address three crucial issues: the principles and methods for the continuous large-scale mining of deep thick ore bodies, the mechanisms and mechanical behaviors of catastrophic events triggered by strong cyclic disturbances in high-stress rock masses, and the adaptive intelligent energy-saving ventilation mechanisms for deep hot mines with multiple fans. This paper aims to advance five key technologies: spatiotemporal collaborative continuous mining techniques for deep inclined thick ore bodies, efficient sensing devices for large-scale mining dynamic environments and disaster prevention and control technologies, high-flow continuous steady-state preparation and transportation technologies for tailings paste, multistage dynamic intelligent ventilation and direct cooling technologies for thermal hazard prevention in deep hot mines, and intelligent decision-making and collaborative operation control technologies for the equipment chain in stope mining operations. These innovations aim to attain the efficient continuous mining of thick ore bodies with large parameters; the effective disaster prevention and control for rock mechanics and dynamic disasters in large-scale mining; the efficient utilization of mining and processing of solid waste through backfilling, intelligent energy-saving ventilation, and thermal hazard prevention; and the efficient collaboration of intelligent stope mining operation chains. The eventual objective is to develop new theories, technologies, methods, and equipment for the green, intelligent mining of metallic mines at depths surpassing one kilometer, to create a demonstrative mine, and to form a technological system for the efficient, green mining of large-scale deep mines that can be widely applied. This paper aspires to improve the capacity for large-scale green development of deep strategic mineral resources in China comprehensively and to provide a theoretical foundation and technical support for the large-scale green exploitation of deep mineral resources. By addressing these key issues and developing the associated technologies, this paper aims to improve the efficiency, safety, and sustainability of mining operations in deep iron ore deposits remarkably, ultimately contributing to the long-term viability and competitiveness of the mining industry in China.

KEY WORDS deep iron mines; mining with backfill; intelligent mining; mass mining; mining technology and equipment

我国浅部矿产资源已逐渐趋于枯竭,但国民经济发展对矿产资源需求量仍逐年攀升,为解决矿产资源供需矛盾,贯彻落实习近平总书记“向地球深部进军”战略方针,深部矿产资源开发利用势在必行^[1-3]。以铁矿为代表的大宗战略性矿产资源对我国国民经济持续发展至关重要。我国铁矿资源量位居全球第5,但普遍品位低、埋藏深,开发难度大,对外依存度常年超过80%^[4-6]。只有采用大规模开采,才具有市场竞争力,才能满足国家战略性矿产资源的保供需求。

目前,在我国河北冀东、辽宁鞍山、安徽霍邱等矿区已探明了上百亿吨深部铁矿资源,这些深部资源的大规模开发利用,对于保障我国铁矿资源稳定供给、降低对外依赖度、破解大宗矿产资源国际供应链中的“卡脖子”问题具有重要战略意义^[7-9]。以南非、加拿大和澳大利亚为代表的矿业发达国家,在深井采矿方面积累了较为丰富的研究与实践经验,最大开采深度已超过4000 m,但是其深井矿山以黄金、铜镍、铅锌等高品质贵金属或有色金属开发为主,开采规模小,一般只有100~300万t·a⁻¹。近些年来,我国在深井采矿技术研究方面取得了长足进步,但总体而言仍处于起步阶段,现有的千米以深金属矿山开采规模相对较小,一般不大于100万t·a⁻¹^[10]。我国近期探明且准备开

发的多座深部铁矿床均具有矿体厚、储量大、品位低的特征,需采用年产千万吨以上的大规模、低成本、绿色环保低生态损害方式开采,才能确保其既具备市场竞争力,又符合国家绿色发展要求。然而,金属矿深井采矿技术领域的前期成果主要基于年产规模中等及以下的深井开采实践形成,国内外的千万吨级地下矿山全部采用崩落法或空场法,千米以深千万吨级矿山绿色高效开采在国内外未有先例,这是我国铁矿资源开采将面临的重大挑战。采用充填采矿法,很难实现千万吨以上的超大规模生产,原因有二:一是回采和充填作业需要时空隔离,导致能同时回采的采场数量受限,制约了产能。二是现有的充填技术难以满足大规模充填及质量保障。此外,千米以深的超大规模采矿面临着深部高应力与大规模开采的强采动、强卸荷叠加,它的地压灾害风险将更加突出^[11-13]。高地温与大空区围岩放热、充填水化放热相叠加,热害将更加凸显,面临的安全问题更为严峻^[14-16]。

面对以上新挑战,现有的采矿工艺模式适应性不足,矿山大规模产能、生产效率与作业安全性难保证,同时在国家绿色发展的战略要求下,为保证市场竞争力,我国以铁矿为代表的深部战略性矿产资源矿山亟待以千万吨级大规模、低成本、低碳环保方式进行开采,为此亟需研发高应力、高

地温环境下超大规模高效绿色智能开采方面的新理论、新技术与新装备。

1 国内外深井矿山高效绿色开采与智能装备发展现状

伴随浅表资源的日渐枯竭, 矿业发达国家的矿产开采作业相继进入千米以深(图 1)。随着深度的增加和环境保护的需要, 矿山逐渐往大型化、绿色化和智能化转型, 并在转型过程中涌现了一批又一批的深井矿山, 对矿山的高效绿色开采和智能化装备提出了更高的要求。

1.1 国外研究现状

国外进入深部开采的金属矿山主要分布在南非、印度、加拿大、美国等国家, 相关理论与工程实践研究起步较早, 其中, 南非是世界上深井矿山数量最多、深部开采经验最丰富的国家^[18-20]。目前世界上最深的六座矿山(图 1)均分布在南非的威特沃特斯兰德矿区^[21-22]。世界上最深的 Mponeng 金矿开采深度已超过 4000 m, 且矿体延伸到 7500 m 以下。

早在 20 世纪 60 年代南非就成立了矿山安全研究咨询委员会^[23], 主持开展了一系列的深部开采探索研究及工程实践工作, 在深井采矿方面已形成了较完备的理论与技术体系, 尤其在深井开采的岩体力学理论、深部地压监测与防控技术等方面处于国际领先地位。加拿大作为矿业强国自 20 世纪 80 年代以来, 由联邦和省政府及采矿工业部门合作, 开展持续 20 年的深井开采技术研发计划。并于 2015 年由加拿大安大略省萨德伯里矿业创新卓越中心提出倡议建立了加拿大的超深采矿联盟^[24], 每年斥资 4600 万美元, 旨在解决地表以下深度达 2500 m 处采矿所涉及的四个战略难题(图 2): 降低高应力灾害、减少能源消耗、增大矿石运输

与生产能力、提高矿工安全性及工作效率^[25]。

澳大利亚地质力学中心, 自 1999 年以来针对深部矿山开采中遇到的挑战, 已持续开展了多年的技术研发工作, 在矿压支护系统优化、微震及岩爆风险管理平台研发、挤压大变形及防范措施、矿山充填及有效应力评估、深部高应力开采中吸能锚网的研发及应用等方面均取得了突破性的成果, 为澳大利亚深部资源的开发利用提供了坚实技术支撑。

澳大利亚、加拿大等国家将膏体充填技术作为矿山固废利用主要途径, 先后研发了尾矿高效浓密脱水技术, 研制了深锥浓密机(图 3)和膏体输送柱塞泵(图 4)等膏体充填装备, 相关技术处于世界前列, 并提出了膏体管道输送管壁滑移测试方法和充填管道输送阻力预测模型等。其中, 加拿大高达公司提出了不同级配尾砂先行旋流分级, 再行组合浓密造浆方式制备膏体, 实现了细尾砂膏体的稳定高效制备, 相关技术处于世界前列。澳大利亚西澳大学 Helinski 等^[26-27]针对阶段空场嗣后充填采矿法, 提出了基于胶凝材料“自干燥”过程的采场底部及充填挡墙受力模型, 为原位充填体强度成型过程分析奠定了基础。加拿大蒙特利尔大学 Li^[28-29]考虑实际采场充填体的分层现象、充填体与采场侧壁围岩摩擦作用等, 对充填体强度需求的计算理论与方法进行了拓展。加拿大多伦多大学 Thompson 等^[30]研制了原位充填体多场耦合性能监测装置, 通过预先埋设方式, 可监测膏体料浆充入采场后内部温度、基质吸力、孔隙水压力等多场参量数据, 为膏体充填体耦合成型过程研究提供了方法。

针对深井高地温、重热害问题, 澳大利亚 Chasm 咨询公司开发了 Ventsim 矿井通风系统仿真平台, 初步探索了矿井通风网络监测及参数调控方法,

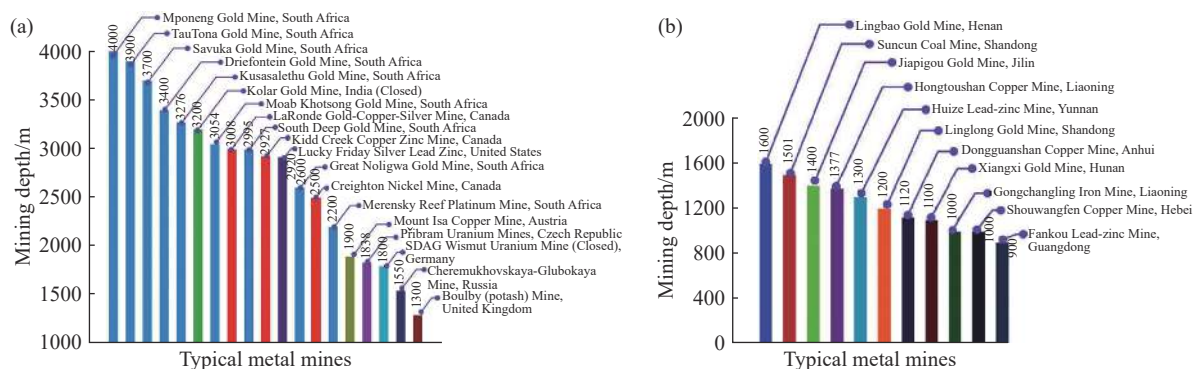


图 1 国内外典型金属矿山开采深度对比^[17]。(a) 外国; (b) 中国

Fig.1 Comparison of mining depths of typical metal mines worldwide: typical deep mines in (a) foreign countries and (b) China^[17]

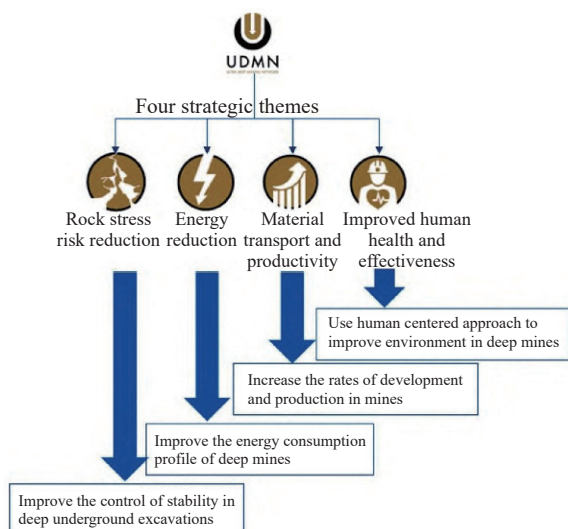


图 2 超深采矿联盟研究主题^[19]

Fig.2 Research themes of ultradeep mining network^[19]

已在国内外矿山得到广泛应用, 相关技术处于国

际领先地位^[33]. 美国罗克韦尔等机构研发了风量、温湿度、压力等多种矿井专用传感器, 实现了矿井通风参数准确测评与应用. 美国密歇根理工大学受美国矿业局委托研发的火灾动态模拟系统 MFire 能够按照 1 : 1 实际建模, 运用场模型开展矿井火灾风烟流动、特殊火行为的动态模拟以及控制对策研究等, 在全球取得了广泛应用^[34-35].

在采矿智能化方面, 国外矿业发达国家起步较早, 自 20 世纪 80 年代起, 芬兰、加拿大等国家先后制定了“智能矿山”和“无人矿山”发展规划, 特别在井下设备自动化控制、设备调度与管理等领域开展了大量研究工作, 经过 30 余年发展, 在矿山自动化领域形成了较成熟的解决方案, 例如: 瑞典山特维克公司推出 AutoMine 铲运机自动化系统, 安百拓(原阿特拉斯)推出 Scooptram Automation 铲运机自动化控制系统, 在瑞典基律纳铁矿

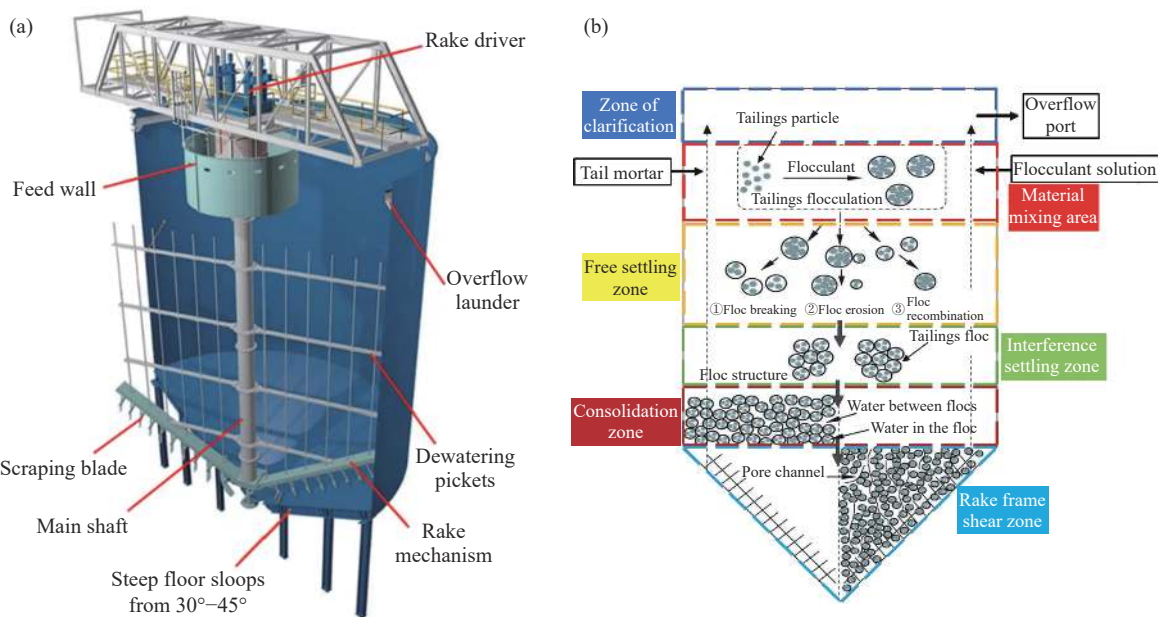


图 3 深锥浓密机结构及运行示意图^[31]. (a) 深锥浓密机结构; (b) 深锥浓密机操作过程

Fig.3 Structure and operation diagram of deep cone thickener^[31]. (a) deep-cone thickener structure; (b) deep cone thickener operation process

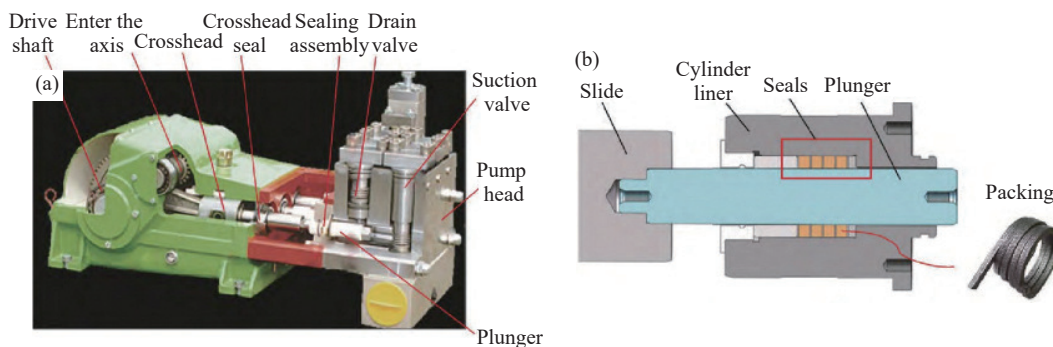


图 4 高压柱塞泵及软密封结构原理图^[32]. (a) 高压柱塞泵; (b) 软密封结构

Fig.4 High-pressure piston pump and soft seal structure schematic^[32]. (a) high pressure plunger pump; (b) soft seal structure

(Kiruna)、加拿大基德矿(Kidd Mine)、南非芬驰矿(Finsch Mine)等矿山广泛应用。瑞典的基律纳铁矿作为世界上第一座智能化的地下铁矿山,是目前世界上最大、最现代化的地下铁矿山之一,将高度自动化和智能化的大型机械设备配合远程智能遥控系统使得工人和管理人员能在计算机控制中心(图5)执行采矿活动,目前已基本实现“无人智能采矿”,完成了智能化开采的转型^[36]。位于厄瓜多尔南部的米拉多铜矿,是厄瓜多尔目前最大的固体矿山,矿区内地质结构复杂,岩层不稳定性高,为了克服人员徒步测量导致的效率低、精度低、受环境条件影响大等问题,米拉多铜矿采用P580智能测绘无人机配合无人机数字技术,实现了实时监测突发事件和预测灾害、进行环境评估和生态保护等各个方面,推动米拉多铜矿加速向智能化矿山迈进^[37]。

1.2 国内研究现状

近年来,在“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”的号召下,我国围绕深井开采布局了一系列科技攻关项目,包括在“十三五”国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项的支撑下,在深部开采岩体力学与开采理论、深部金属

矿集约化连续采矿等领域形成了一批创新成果,建成了一批示范矿山,有效提高了我国金属矿山深部开采的基础理论与技术水平^[39-40]。

在深部金属矿开采方面,构建了深部金属矿大矿段时空协同连续采矿理论,研发了多单元集约化采矿^[41]和水平分条空场嗣后充填采矿方法^[42]。但是针对深部厚大矿体千万吨级大规模绿色开采方面,还需探索新的开采模式及与之匹配的关键技术与装备。

我国的玲珑金矿现阶段矿区已开采至1180 m水平,为了应对工作面气温高、湿度大、空气含氧量低等一系列不利因素,对生产矿井的通风系统进行了优化,形成了主井、副井进风,三处回风的“两进三回”通风方式,不仅满足了深部通风要求,而且提高了矿井安全性与生产效率^[43]。

以矿体厚大、埋藏深、地应力高和矿岩破碎著称于采矿界的金川镍矿^[44]采用工程地质调查、围岩、充填体变形监测和深部连续开采过程的数值仿真模拟等综合手段,通过优化开采顺序和回采工艺,选择了最适合深部采场的胶结充填体强度,最终成功实现了大型复杂难采矿床1150 m中段以上无矿柱大面积连续开采(图6(a)),沿矿体走向划

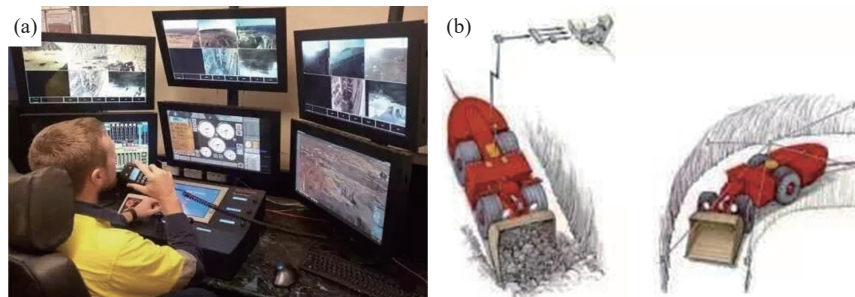


图5 基律纳铁矿的控制中心和遥控铲运机^[38]。(a)控制中心;(b)遥控铲运机

Fig.5 Control center and remote-controlled scraper at Kiruna Iron Mine^[38]: (a) control center; (b) remote controlled scraper

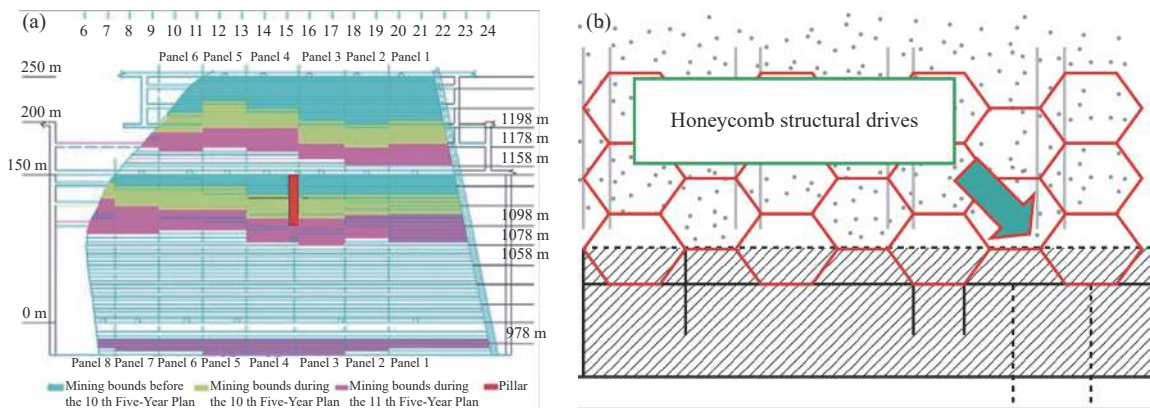


图6 采用蜂窝状结构进路的大面积连续开采新工艺^[45]。(a)无矿柱大面积连续开采方法;(b)大断面六角形进路采矿方法

Fig.6 New technique of large-area continuous mining in honeycomb structural drives^[45]: (a) pillar-free large-area continuous mining method; (b) large-section hexagonal drive mining method

分采矿盘区,不留盘区矿柱,采矿作业完成后及时充填,实现矿体的连续开采,提高采矿效率;同时基于仿生学原理,采用将六角形进路安排成蜂窝状结构实现等边六角形间的最紧凑轮廓,使应力集中程度显著减小(图 6(b)).全面总结开采经验和关键技术,并结合当前条件对连续开采过程进行安全评价与风险预测,提前采取安全措施和控制技术,确保深部连续采矿的顺利进行.

在深部岩石力学方面,系统研究了深部环境下的岩体力学性质^[46]及原位监测技术^[47].目前主要以基础理论研究为主,针对深部厚大矿体大规模开采过程的工程岩体力学问题,仍需基于深井超大规模采矿方法的工程岩体力学行为开展针对性研究.

在膏体充填方面,围绕尾砂浓密^[48]、料浆制备^[49-51]、管道输送^[52]和采场充填^[53-54]等开展了大量研究,并在武山铜矿、喀拉通克铜镍矿等推广应用.但随着井深增加,膏体料浆落差变大,充填料浆管输稳定性与采场中充填体强度分布不均问题显著,大流量高质量充填工艺是深井大规模开采膏体稳态充填所需重点攻关的难题.特大型地下铁矿山张庄铁矿采用先进的超细全尾砂大流量充填技术,以深锥浓密机为核心,充填站内建设了 1 套深锥浓密机、3 套搅拌桶和 2 套胶凝材料仓(图 7),单套搅拌系统生产能力 200~220 m³·h⁻¹且 24 h 连续制备、自流输送至井下采空区,实现了矿山大规模生产采充协同作业,是充填技术由常规流量往高浓度大流量方向发展的关键一步^[55-56].

在矿井通风方面,研发矿井智能通风与灾变应急决策平台^[48],提出多种复杂深井金属矿风网调控方法^[58-59].但超大规模深部金属矿井的通风能耗较浅部显著增长,多盘区作业导致“点多面广”通风与热害防治难度加大,在当前低碳节能要求下,智能节能通风将是深井通风与热害防治亟需解决的难题.采用人工制冷是有效的降温方式,但投资成本高,据统计矿井冷却系统耗电量约占矿井总耗电量的四分之一,从节能和减少污染的角度出发,在开发特性的基础上对冷却方式进行创新是一条新的途径^[60].以矿井涌水为冷源的降温技术是一种通过利用矿井涌水来降低矿井工作面温度的创新方法.其工作原理(图 8)分为四个步骤:矿井涌水的收集和利用、能量提取、冷量传递和工作面降温、热量回收和地面供热.该技术的优势在于充分利用了矿井中原本无用的涌水资源,通过冷热能量的转换和再利用,实现了矿井降温和地面供热的双重目标,具备显著的经济效益和环境效益^[61].

在智能化开采方面,基于“十二五”国家 863 计划“地下金属矿智能开采技术”以及“十三五”国家重点研发计划“地下金属矿规模化无人采矿关键技术研发与示范”等项目,在金属矿智能化开采技术取得较大突破^[62-63].我国地下金属矿已实现了多种单体设备的自动化、智能化控制(图 9),多装备协同控制技术处于突破阶段^[64].但与矿业发达国家相比,我国地下金属矿山智能化仍着眼于单个或局部系统智能化,在千米深井千万吨级的超

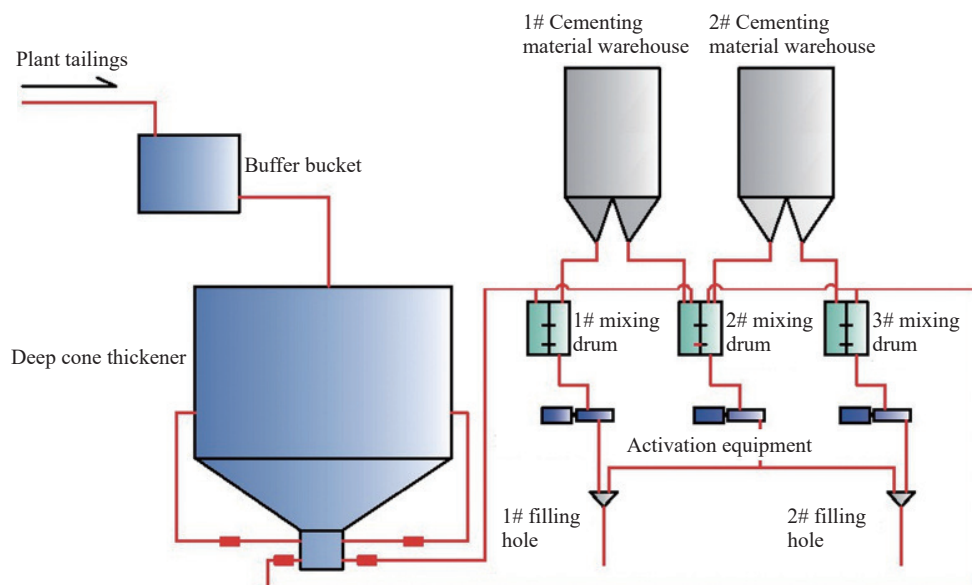


图 7 张庄铁矿超细全尾砂大流量充填系统工艺流程^[57]

Fig.7 Process flow of large flow filling system of Zhangzhuang Iron Mine^[57]

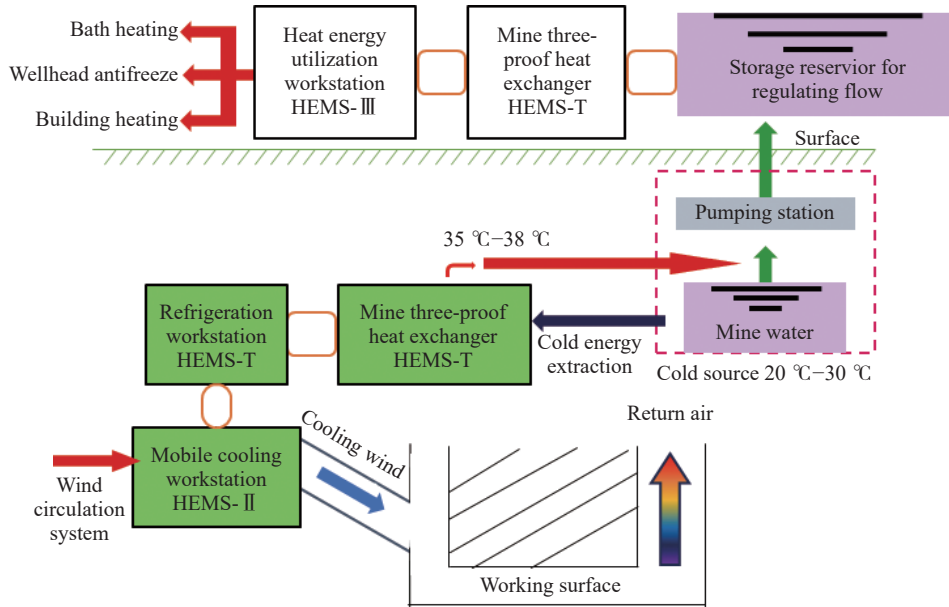


图8 以矿井涌水为冷源的系统降温原理^[61]

Fig.8 Principle of swallet cold-source cooling system^[61]

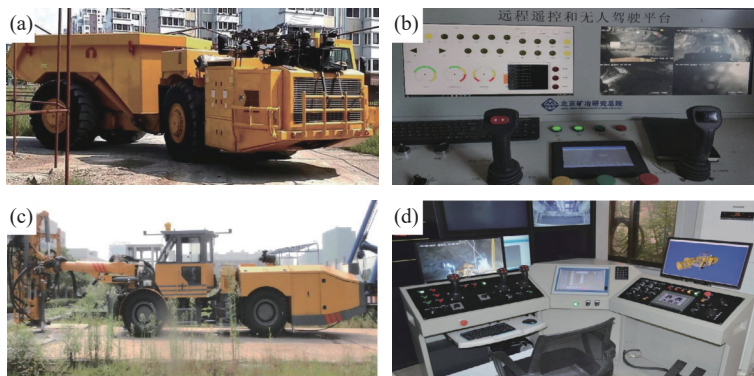


图9 矿山智能装备及智能操作系统^[66]。(a) 地下智能矿用汽车; (b) 智能铲运机远程控制自动驾驶; (c) 智能中深孔全液压凿岩台车; (d) 智能中深孔全液压凿岩台车智能作业

Fig.9 Mine intelligent equipment and intelligent operating system^[66]: (a) underground intelligent mine car; (b) intelligent scraper remote control autonomous driving; (c) intelligent medium and deep hole full hydraulic drilling rig; (d) intelligent medium and deep hole full hydraulic drilling rig intelligent operation

大规模深部开采过程中, 如何解决复杂工况条件下的盘区回采过程作业链的智能高效协同难题, 将是地下金属矿智能开采亟需攻克的关键难点^[65]。

2 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备存在的问题、关键技术与应对策略

针对千米以深千万吨级厚大矿体超大规模绿色开采面临的“开采单元回采效率要求高、回采作业协同衔接难度大、采选固废充填能力难保障、深部大规模强采动条件下的动力灾害与热害更突出”等难题, 凝练了三项关键问题, 提出了五项关键技术, 为研究创建千米以深千万吨级金属矿绿色智能开采新理论、形成可推广应用的超大型深井铁矿高效绿色开采技术体系奠定重要基础, 全

面提升我国深部战略矿产资源的大规模绿色开发能力。超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备存在的三个关键问题分别是深部厚大矿体超大规模连续开采原理与方法、高应力岩体强循环扰动灾变机理及力学行为、深热矿井多风机自适应智能节能通风机制。具体关键技术如下:

1) 深部倾斜厚大矿体盘区化时空协同连续开采技术。探索深部倾斜厚大矿体盘区化时空协同连续开采技术, 构建大规模智能化连续开采的工程结构及回采工艺, 创新研发深井大规模开采的炸药原料管道输送与采场低扰高效爆破技术, 建立深部多中段盘区化采场充填体强度及结构设计方法。

2) 大规模采动力学环境高效感知装置与灾害

防控技术. 研究深井厚大矿体超大规模开采的工程岩体力学行为与致灾机制测评技术, 构建深井大规模开采动力灾害孕育的可视化推演系统, 研发深井大规模开采物理力学环境信息高效感知技术, 建立研究厚大矿体盘区化时空协同大规模连续开采的动力灾害主动防控技术和高应力大参数回采结构的抗强冲击吸能防护技术.

3) 尾砂膏体大流量连续稳态制备与输送技术. 研究尾砂膏体充填料浆大能力稳态制备技术, 研发深井大流量膏体充填分级控压满管输送技术, 构建高大采场充填体强度发展机制及均质化控制技术, 创新深井废石与尾砂膏体宽耦合充填关键技术.

4) 深热矿井多级动态智能通风及热害直冷防治技术. 研发新型高精度风压风量在线传感技术, 构建超大规模多级多风机通风网络反演解算技术, 提出超大规模深井矿山多中段盘区化开采的多级站按需通风自适应智能调控技术, 创新建立深井大规模开采环境风温评价与预测技术, 研发研究深热矿井热害“隔-治-护”综合治理技术.

5) 盘区回采作业链设备群智能决策与协同作业管控技术. 建立盘区回采数字化设计与作业计划智能排程技术, 创新井下地图增量动态更新与智能装备自学习技术, 研究回采作业链装备集群数字孪生智能化调度技术, 形成回采作业链高效协同智能化系统控制技术.

围绕“创立千米以深千万吨级金属矿绿色智能开采新理论, 研发多中段盘区化连续开采的采动灾害主动防控与热害治理关键技术及装备, 实现千米深井大规模安全高效绿色智能开采”的项

目目标, 提出了三项关键问题, 凝炼了五项关键技术难题. 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备技术路线图如图 10.

3 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备发展战略

3.1 发展战略的相互联系

围绕“创立千米以深千万吨级金属矿绿色智能开采新理论, 研发多中段盘区化连续开采的采动灾害主动防控与热害治理关键技术及装备, 实现千米深井大规模安全高效绿色智能开采”的项目目标, 具体设置了 5 个发展战略, 发展战略之间的逻辑关系图如图 11 所示.

3.2 发展战略的具体内容

3.2.1 深部厚大矿体大参数高效连续开采技术

千米以深千万吨级超大规模开采, 对深井矿山回采单元产能、回采效率、厚大矿体的矿石采出率和开采连续性提出了更高的要求, 现有的传统采矿理论技术难以支撑深部大规模开采. 为此, 需要深入探索并建立深部倾斜厚大矿体盘区化时空协同连续开采新理论; 研发大规模智能化连续开采工程结构及回采新工艺; 开发深井大规模开采的炸药原料管道输送与采场低扰高效爆破技术; 提出深部多中段盘区化采场充填体强度及结构设计新方法; 为建设千米以深千万吨级示范矿山提供开采方法基础.

3.2.2 大规模采动力学环境高效感知装置与灾害防控技术

在深井规模化采矿过程中, 强循环扰动大参数矿岩结构劣化、采动物理力学环境快速叠加演

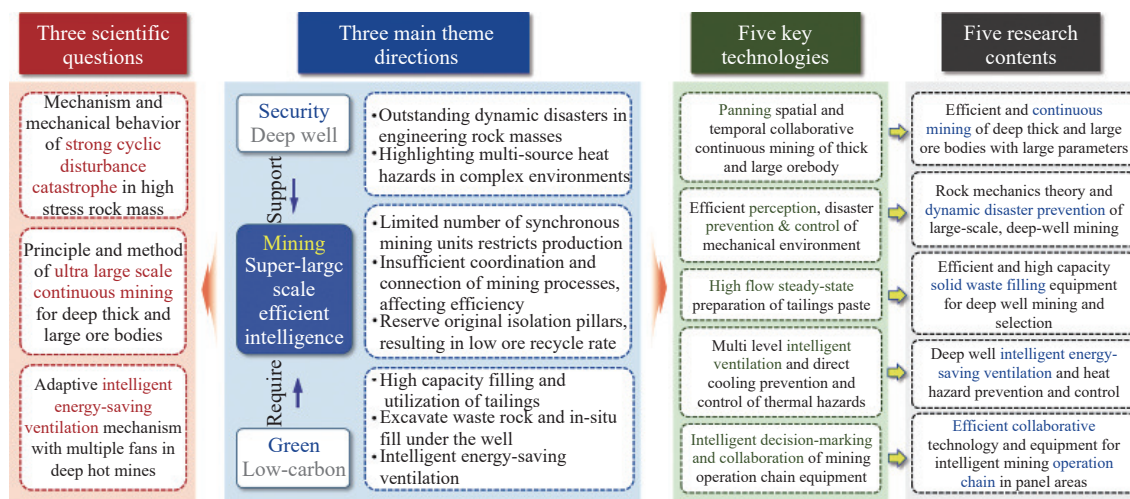


图 10 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备技术路线图

Fig.10 Technical roadmap of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultralarge deep mine

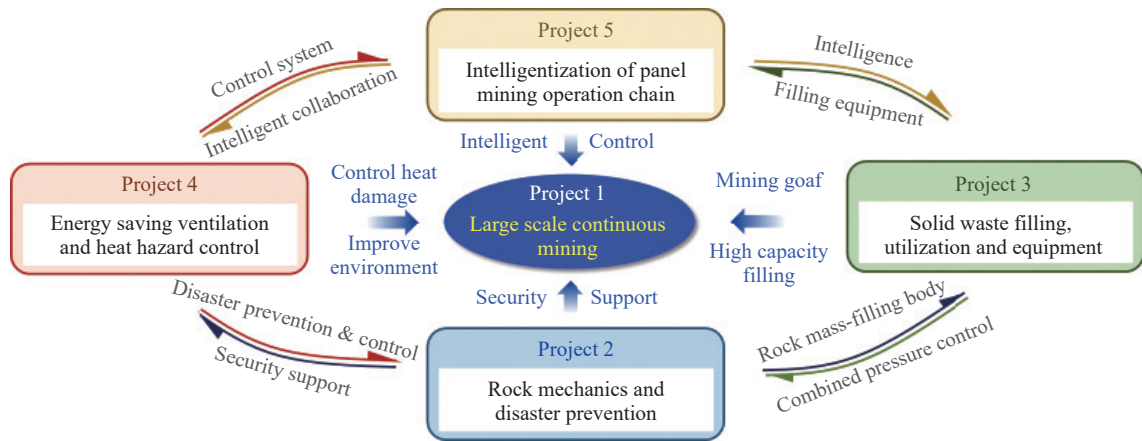


图 11 超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备发展战略关系图

Fig.11 Relationship of development strategy on efficient green mining technology and intelligent equipment in ultra large deep well mines

化现象尤为突出, 导致的动力灾害成灾-致灾复杂变化和深井采矿工程行为非常规化难题. 对此需要进一步探究深井厚大矿体开采岩体力学行为特征, 揭示大规模开采动力灾变机理; 研发采动物理力学环境信息高效感知技术与装备; 提出深井大规模开采动力灾害孕育的可视化推演方法与致灾模式; 创新动力灾害源头主动控制的规模化采充时空行为调控方法; 形成高应力大参数回采结构的抗强冲击吸能防护技术.

3.2.3 深井采选固废高效充填技术与大能力充填装备研发

深井采选固废高效充填是大规模连续开采的基础, 也是动力灾害防治的主要手段. 与现有常规充填技术不同的是, 深井固废充填存在着充填料浆大能力制备与高质量控制矛盾突出、大流量充填料浆输送压力突变、高大采场充填体稳定性差、采选固废产出量大等难题, 对大规模连续安全开采带来了极大的挑战. 需要着重突破 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 尾砂膏体充填料浆大能力稳态制备技术; 攻克深井大流量膏体充填分级控压满管输送技术; 高大采场充填体强度形成机制及均质化控制技术; 深井废石与尾砂膏体宽耦合充填关键技术.

3.2.4 深井智能节能通风与热害防治技术

深热金属矿井多采用多级多台风机通风的模式, 通常存在通风线路长、自然风压大、耗能高、漏风和热害严重等难题. 在超大规模深井矿山开采过程中, 多盘区、多中段、多采场同时作业, 导致通风和热害存在“点多面广”的防治困局. 需进一步研究新型高精度风压风量在线传感技术与装置; 超大规模多级多风机通风网络反演解算方法; 多级站按需通风自适应智能调控技术; 深井大规模开采环境风温评价与预测技术; 深热矿井热害

“隔-治-护”综合治理技术及装备.

3.2.5 盘区智能化回采作业链高效协同技术与装备

针对地下深井矿山环境复杂, 存在多源多态的信息数据, 回采作业涉及复杂的空间布局和工序安排等问题, 着重研究地下开采场景感知与信息融合技术及装备; 盘区回采数字化设计与作业计划智能排程技术; 井下地图增量动态更新与智能装备自学习技术; 回采作业链装备集群数字孪生智能化调度技术; 回采作业链高效协同智能化控制系统研发.

4 结语

深部超大规模绿色开采, 是千米以深的千万吨级充填采矿, 是我国铁矿资源开发的重大工程需求, 也是保障我国矿产资源供应链安全的战略要求.

为有力促进我国从矿产资源大国走向矿产资源强国, 保护好重要矿产资源国内生产自给的战略底线, 立足我国以铁矿为代表的大宗战略金属矿产资源赋存特征, 深入开展“超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备”项目研究, 聚焦千米以深的千万吨级充填采矿面临一系列技术挑战, 凝聚深部金属矿大规模绿色智能开采领域优势平台与前期理论技术基础, 建立千米以深千万吨级超大型深井铁矿的绿色高效开采模式, 实现理论有创新、技术有突破、成果能落地, 继往开来, 自主创新, 攻克共性关键技术难题, 并建成示范矿山, 全面提升我国深部矿产资源的获取能力.

致谢

感谢北京科技大学蔡美峰院士、矿冶科技集团有限公司沈政昌院士、中钢集团马鞍山矿山研

究总院股份有限公司郭金峰教授级高级工程师、中国矿业大学(北京)秦跃平教授、中煤科工集团沈阳研究院有限公司梁运涛研究员、中南大学王李管教授、首钢滦南马城矿业有限责任公司黄佳强正高级工程师及项目所有参研人员的参与和支持。

参 考 文 献

- [1] Cui Z X. Analysis and reflection on the situation of strategic mineral resources conservation in China. *China Min Mag*, 2023, 32(7): 10
(崔祖霞. 我国战略性矿产资源保供形势分析与思考. *中国矿业*, 2023, 32(7): 10)
- [2] Cai M F, Duoji, Chen X S, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources. *Strategic 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)
- [3] Xie H P, Gao F, Ju Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34(11): 2161
(谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2161)
- [4] Zhao L Q, Wang C N, Zhang M, et al. Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China mainland. *Geol Explor*, 2020, 56(3): 635
(赵立群, 王春女, 张敏, 等. 中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 635)
- [5] Wang Q. Analysis of global supply and demand situation of iron ore resources in 2018. *Nat Resour Econ China*, 2020, 33(3): 59
(王婧. 2018 年全球铁矿资源供需形势分析. *中国国土资源经济*, 2020, 33(3): 59)
- [6] Zhang X. The present situation and countermeasures of iron ore resource safety in China. *Fujian Metall*, 2021, 50(3): 56
(张翔. 浅谈我国铁矿资源安全的现状和对策. *福建冶金*, 2021, 50(3): 56)
- [7] Wang F G. *Comprehensive Geophysical Method for Prediction of Jidong Deep Iron Ore* [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences, 2017
(王凤刚. 综合物探方法预测冀东深部铁矿研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2017)
- [8] Guo X B. Rational development of Huoqiu iron mine resources and environmental protection. *Low Carbon World*, 2014(21): 191
(郭先宝. 霍邱铁矿资源合理开发与环境保护. *低碳世界*, 2014(21): 191)
- [9] Zhang P, Qiao S Y, Jiang H Y, et al. Metallogenic regularities and resources potential of the iron deposits in Anshan-Benxi Area, Liaoning Province. *Geol Resour*, 2012, 21(1): 134
(张朋, 乔树岩, 姜海洋, 等. 辽宁鞍山地区铁矿成矿规律与资源潜力分析. *地质与资源*, 2012, 21(1): 134)
- [10] Xu A R. Significance analysis of deep well mining technology in nonferrous metal mines. *China Plant Eng*, 2018(1): 199
(许爱荣. 有色金属矿山中深井采矿技术的意义分析. *中国设备工程*, 2018(1): 199)
- [11] Li P, Guo Q F, Miao S J, et al. Comparisons of in situ stress fields and stability of faults in shallow and deep engineering areas. *J Harbin Inst Technol*, 2017, 46(9): 10
(李鹏, 郭奇峰, 苗胜军, 等. 浅部和深部工程区地应力场及断裂稳定性比较. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 46(9): 10)
- [12] Zhao X D, Zhou X, Zhao Y F, et al. Research status and progress of prevention and control of mining disasters in deep metal mines. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2021, 52(8): 2522
(赵兴东, 周鑫, 赵一凡, 等. 深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2522)
- [13] 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)
- [14] He M C, Guo P Y, Chen X Q, et al. Research on characteristics of high-temperature and control of heat-harm of sanhejian coal mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(Sup 1): 2593
(何满潮, 郭平业, 陈学谦, 等. 三河尖矿深井高温体特征及其热害控制方法. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊 1): 2593)
- [15] Kou Y P, Guo M C, Tan Y Y, et al. Early hydration heat release and strength evolution of cemented backfill with graded fine tailings. *Chin J Eng*, 2023, 45(8): 1293
(寇云鹏, 郭沫川, 谭玉叶, 等. 分级细尾砂胶结充填体早期水化放热及强度演化特性. *工程科学学报*, 2023, 45(8): 1293)
- [16] Wang R X, Wo H S, Zhao X D, et al. Test research on surrounding rock thermal conductivity of deep roadway in Sanshandao gold mine. *Non Ferrous Min Metall*, 2015, 31(2): 15
(王瑞星, 沃杭帅, 赵兴东, 等. 三山岛金矿深部巷道围岩放热系数实验研究. *有色矿冶*, 2015, 31(2): 15)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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
- [21] Yang Z G, Yu R C, Guo R. Review on research of mining in high-stress deep zone. *Met Mine*, 2007(3): 6
(杨志国, 于润沧, 郭然. 深部高应力区采矿研究综述. *金属矿山*, 2007(3): 6)
- [22] Ren J P, Xu K K, Xiang Z Q, et al. Geological characteristics, metallogenic model and prospecting criteria of the South Deep gold deposit in Witwatersrand Basin, South Africa. *Geol Bull China*, 2015, 34(6): 1217
(任军平, 许康康, 相振群, 等. 南非维特沃特斯兰德盆地绍斯迪普金矿床地质特征、成矿模式和找矿模型. *地质通报*, 2015, 34(6): 1217)
- [23] Squelch A P. Virtual reality for mine safety training in South Africa. *J S Afr Inst Min Metall*, 2001, 101(4): 209
- [24] Guo L J, Liu G S, Ma Q H, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine. *J China Coal Soc*, 2022, 47(12): 4182
(郭利杰, 刘光生, 马青海, 等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4182)
- [25] Wang Y, Wu A X, Yang J, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines. *Chin J Eng*, 2023, 45(8): 1281
(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. *工程科学学报*, 2023, 45(8): 1281)
- [26] Helinski M, Fahey M, Fourie A. Numerical modeling of cemented mine backfill deposition. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2007, 133(10): 1308
- [27] Helinski M, Fahey M, Fourie A. Behavior of cemented paste backfill in two mine stopes: Measurements and modeling. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2011, 137(2): 171
- [28] Li L, Aubertin M. A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes. *Can Geotech J*, 2012, 49(8): 994
- [29] Li L. Analytical solution for determining the required strength of a side-exposed mine backfill containing a plug. *Can Geotech J*, 2014, 51(5): 508
- [30] Thompson B D, Bawden W F, Grabinsky M W. *In situ* measurements of cemented paste backfill at the Cayeli Mine. *Can Geotech J*, 2012, 49(7): 755
- [31] Yin S H, Shao Y J, Wu A X, et al. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *J Cleaner Prod*, 2020, 247: 119590
- [32] Liu Y S, Dong J, Wei W S, et al. Research status and green development trend and prospect of mine high-power plunger pump. *J Mech Eng*, 2023, 59(10): 333
(刘银水, 董婕, 韦文术, 等. 矿用大功率柱塞泵研究现状及绿色化发展趋势与展望. *机械工程学报*, 2023, 59(10): 333)
- [33] Grabinsky M, Bawden W, Thompson B. Required plug strength for continuously poured cemented paste backfill in longhole stopes. *Mining*, 2021, 1(1): 80
- [34] Liu M M. Application of ventsim 3D ventilation simulation system in metal mines. *Met Mine*, 2010(10): 120
(柳明明. Ventsim 三维通风仿真系统在金属矿山的应用. *金属矿山*, 2010(10): 120)
- [35] Ma H L. *Analysis on Anti-disaster Ability of Ventilation System Based on the Coupling Technology the Zone and Network Model* [Dissertation]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2008
(马洪亮. 基于区网耦合模拟的矿井通风系统抗灾能力分析[学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2008)
- [36] Wen X. Investigation report on intelligent mining technology in Kiruna iron mine. *Min Technol*, 2014, 14(1): 4
(文兴. 基律纳铁矿智能采矿技术考察报告. *采矿技术*, 2014, 14(1): 4)
- [37] Hu F Z, Wang L. Intelligent mapping equipment for Mirador Copper mine enables mine development [J/OL]. *Mirador Copper Mine (2023-11-03) [2024-01-15]*. https://mp.weixin.qq.com/s/r5QgRE22KpNe_FAkaiMS4A
(胡发忠, 王丽. 米拉多铜矿智能测绘装备为矿山发展赋能[J/OL]. 米拉多铜矿 (2023-11-03) [2024-01-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/r5QgRE22KpNe_FAkaiMS4A)
- [38] Qiang H Y. Kiruna “wisdom” of iron ore mine construction [J/OL]. Green mining development Guidance Center (2018-07-30)[2024-01-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/i-6hA1EwZ4DKfoYZurzdzg>
(强海洋. 基律纳铁矿的“智慧”矿山建设[J/OL]. 绿色矿业发展指导中心(2018-07-30) [2024-01-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/i-6hA1EwZ4DKfoYZurzdzg>)
- [39] Tian W P, Li D J. Study on underground continuous mining technology of metal mines. *Sci Technol Ind Parks*, 2017(17): 32
(田伟鹏, 李得建. 金属矿地下连续开采技术研究. *中国高新区*, 2017(17): 32)
- [40] Xi J P. Struggle for building a world powerful country in science and technology—Speech at the national science and technology innovation conference, academician conference of the Chinese academy of sciences and the ninth national congress of China association for science and technology. *Sci Technol Assoc Forum*, 2016, 31(6): 4
(习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话. *科协论坛*, 2016, 31(6): 4)
- [41] Yuan L M, Zhou L H, Smith A C. Modeling carbon monoxide spread in underground mine fires. *Appl Therm Eng*, 2016, 100: 1319
- [42] 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)
- [43] Cheng L. Optimization of ventilation system in Jiuqu sub-mine of Linglong Gold Mine. *Gold*, 2023, 44(10): 9
(程力. 玲珑金矿九曲分矿通风系统优化研究. *黄金*, 2023, 44(10): 9)
- [44] Yang Z Q, Gao Q, Wang Y Q, et al. Key technology and problems

- on high-efficiency mining for the large-scale Jinchuan Mine. *China Min Mag*, 2014, 23(5): 94
(杨志强, 高谦, 王永前, 等. 金川大型难采矿床安全高效开采关键技术及面临难题. *中国矿业*, 2014, 23(5): 94)
- [45] Yang Z Q. Key technology research on the efficient exploitation and comprehensive utilization of resources in the deep Jinchuan nickel deposit. *Engineering*, 2017, 3(4): 276
- [46] 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)
- [47] Tian X, Zhong W, Luo J L, et al. Study on synergetic optimization of cross-section size of access in intensive mining of complex polymetallic mine. *Met Mine*, 2020(5): 82
(田鑫, 钟文, 罗建林, 等. 复杂多金属矿集约化开采进路断面尺寸协同优化研究. *金属矿山*, 2020(5): 82)
- [48] Wang H J, Peng Q S, Yang Y, et al. Research status and prospect of thickening technology for metal tailings. *Chin J Eng*, 2022, 44(6): 971
(王洪江, 彭青松, 杨莹, 等. 金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望. *工程科学学报*, 2022, 44(6): 971)
- [49] Luo W C, Yao Z L, Li X, et al. Stable preparation technology for slurry in high-Flow backfill systems. *Min Technol*, 2020, 20(5): 19
(罗文冲, 姚中亮, 李鑫, 等. 大流量充填系统料浆稳定制备技术. *采矿技术*, 2020, 20(5): 19)
- [50] Wu F F, Wang X, Yao Z L, et al. Research and application of high flow continuous cemented filling technology. *Nonferrous Met (Min Sect)*, 2020, 72(6): 40
(仵锋锋, 王选, 姚中亮, 等. 大流量连续胶结充填技术研究与应用. *有色金属(矿山部分)*, 2020, 72(6): 40)
- [51] Huang M F. Research and application of key technologies of low-cost cemented filling in large mines. *Min Res Dev*, 2023, 43(1): 20
(黄明发. 大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用. *矿业研究与开发*, 2023, 43(1): 20)
- [52] Wang L M, Cheng L, Yin S H, et al. Multiphase slurry flow regimes and its pipeline transportation of underground backfill in metal mine: Mini review. *Constr Build Mater*, 2023, 402: art No. 133014.
- [53] Li M J, Mo J, Zhou C H. Stability analysis of full tailing paste filling roof in Wushan Copper Mine. *Copper Eng*, 2023(4): 126
(李明骏, 莫静, 周成豪. 武山铜矿全尾砂膏体充填顶板稳定性分析. *铜业工程*, 2023(4): 126)
- [54] Ye C. Study on filling quality stability of full tailings paste backfilling system. *Copper Eng*, 2022(6): 47
(叶超. 全尾砂膏体充填系统充填质量稳定性研究. *铜业工程*, 2022(6): 47)
- [55] Liu F C, Xiong Y W, Liu E Y, et al. Application and development trend of large flow filling technology in metal mine. *Min Res Dev*, 2021, 41(1): 34
(刘福春, 熊有为, 刘恩彦, 等. 金属矿山大流量充填技术的应用及发展趋势. *矿业研究与开发*, 2021, 41(1): 34)
- [56] Wang N N, Yu J, Wang Y F, et al. Application of one-key intelligent filling system in Zhangzhuang Mine. *Mod Min*, 2021, 37(2): 137
(王南南, 余剑, 王玉富, 等. 一键智能充填系统在张庄矿的应用. *现代矿业*, 2021, 37(2): 137)
- [57] Yu J, Xiong Y W, Liu F C, et al. Application of large flow filling system with ultra-fine tailings in Zhangzhuang Mine. *Met Mine*, 2020(1): 89
(余剑, 熊有为, 刘福春, 等. 超细全尾砂大流量充填系统在张庄铁矿的应用. *金属矿山*, 2020(1): 89)
- [58] Zhou D. Research on optimization of mine ventilation systems under complex conditions. *Min Equip*, 2020(3): 36
(周东. 复杂条件下矿井通风系统优化研究. *矿业装备*, 2020(3): 36)
- [59] Wang K X, Peng J X, Liang Z H, et al. The investigation on numerical simulation of deep complex mine ventilation system optimization. *Met Mine*, 2023(10): 221
(王凯旋, 彭俊兴, 梁宗霍, 等. 深部复杂矿井通风系统优化数值模拟研究. *金属矿山*, 2023(10): 221)
- [60] Wang M, Liu L, Chen L, et al. Cold load and storage functional backfill for cooling deep mine. *Adv Civ Eng*, 2018(12): 1
- [61] He M C, Guo P Y. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(12): 2377
(何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2377)
- [62] "Project 863" achieves significant results in intelligent mining technology for underground metal deposits. *Gold Sci Technol*, 2016, 24(3): 57
(“863”项目“地下金属矿智能开采技术”成果丰硕. *黄金科学技术*, 2016, 24(3): 57)
- [63] Liu G S, Yang X C, Guo L J. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining. *J China Coal Soc*, 2019, 44(5): 1391
(刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1391)
- [64] Li J G, Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, 2018, 4(3): 181
(李建国, 战凯. 基于无人装备的地下金属矿智能开采技术. *Engineering*, 2018, 4(3): 181)
- [65] Liu X M, Deng L, Wang L G, et al. Intelligent mine master plan for underground metal mine. *Gold Sci Technol*, 2020, 28(2): 309
(刘晓明, 邓磊, 王李管, 等. 地下金属矿智能矿山总体规划. *黄金科学技术*, 2020, 28(2): 309)
- [66] Zhan K, Lv X, Jin F, et al. Current status of intelligent mining technology and equipment for underground metal mines and reflections on the 14th Five-Year Plan. *J Intell Mine*, 2021, 2(1): 11
(战凯, 吕潇, 金枫, 等. 地下金属矿智能开采技术与装备现状及“十四五”的思考. *智能矿山*, 2021, 2(1): 11)