

深部金属矿开采关键理论技术进展与展望

王 勇^{1,2)}, 吴爱祥^{1)✉}, 杨 军²⁾, 杨钢锋¹⁾, 王珍岐¹⁾, 李 健¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: wuaixiang@126.com

摘 要 深部岩体相比浅部岩体具有强流变性、强湿热环境和强动力灾害等差异, 相关岩体力学理论和开采技术不再适用于深部金属矿开采。因此本文对深部岩体力学、深部建井提升、绿色开采、智能开采这 4 个金属矿深部开采的关键理论技术的研究现状进行综述, 并针对性提出未来的研究重点。最后, 基于现阶段深部金属矿开采的关键技术和理论的研究现状以及存在的问题, 提出了发展和完善极深部岩体力学理论、进行原位流态化开采技术研究和应用以及建设超大型深部智慧化无人矿山这 3 个方面的展望。随着金属矿开采深度不断下降, 亟需研究金属矿深部开采相关理论技术, 确保深部金属矿产资源安全、高效、经济、环保地进行开采。

关键词 深部金属矿; 岩体力学; 建井提升; 绿色开采; 智能开采

分类号 TD853

Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines

WANG Yong^{1,2)}, WU Ai-xiang^{1)✉}, YANG Jun²⁾, YANG Gang-feng¹⁾, WANG Zhen-qi¹⁾, LI Jian¹⁾

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

2) State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: wuaixiang@126.com

ABSTRACT Mineral resources are essential to human life and social development and play an important role in national security and economic development. China has huge reserves of metal mineral resources, but the per capita possession is low. Especially, it is difficult for iron, copper, aluminum, and other metal mineral resources to be self-sufficient and heavily dependent on foreign countries. Because of the massive exploitation of metal mineral resources, shallow resources are becoming exhausted, and deep mining will become the main force for the supply of metal mineral resources in the future. “Going deep into the earth” corresponds to the current state of national resource strategy development. It is found that there is still a certain gap between China’s deep metal mining technology and mining depth compared with internationally developed mining countries. The mining depth of foreign mining countries is mostly over 3000 m, with three South African mines having a mining depth of over 4000 m, whereas the mining depth of Chinese mines is mostly below 2000 m, and most of the metal mines have not yet broken through the kilometer depth. Furthermore, the level of mining technology in established mining countries abroad is high, and the degree of mechanization and intelligence is high. Deep mining technology in China is insufficient to meet the need for deep mining. China still has a large gap compared with internationally developed countries; therefore, the related rock mass mechanics theory and mining technology are no longer suitable for deep metal mining. In this paper, we summarize the research status of four major theories and technologies for deep mining of metal mines, namely, deep rock mechanics, deep well building and lifting, green mining, and intelligent mining, and proposes future research emphases. Finally, based

收稿日期: 2022–11–12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130404); 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金课题资助项目(SKLGDUK2127); 中央高校基本科研业务费资助项目(QNXM20220002, FRF-TP-19-002C2Z, FRF-IDRY-GD22-004)

on the research status and existing problems of the key technologies and theories of deep metal mining at present, the paper puts forward three strategic ideas: deep-part construction of a super-large intelligent autonomous mine, *in-situ* fluidized mining, and rock mechanics. With the continuous increase of mining depth, it is urgent to study the related theory and technology of deep mining of metal mines so as to ensure the safe, efficient, economical, and environmentally friendly mining of deep metal mineral resources and ensure the resource security of our country.

KEY WORDS deep metal mines; rock mechanics; shaft construction and hoisting; green mining; intelligent mining

矿产资源是人类生存和社会发展必不可少的物质基础和保障, 矿产资源的开发利用水平一定程度上决定了人类社会的发展水平^[1]. 据统计, 目前社会生产所需的 80% 左右的原材料、90% 以上的能源、70% 左右的农业生产资料, 均来自矿产资源, 其中金属矿产占据主导地位^[2]. 金属矿产资源是指经过加工冶炼可以从中提取金属元素的矿产资源, 是社会发展的必需品, 是构成现代社会三大支柱的重要组成部分^[3]. 金属矿产资源是关系国家经济命脉和国家安全的重要战略物资, 是中国全面建成小康社会、实现第三步战略目标宏伟任务和经济社会可持续发展的重要物质基础, 在中国现代化建设中具有举足轻重的地位^[4].

我国金属矿产储量高, 但人均占有量低, 呈现“大而不强”的特点. 特别是进入 21 世纪以来, 工业化发展迅速, 国内的金属矿产资源已不能满足需求, 严重依赖国外进口. 根据智研咨询、中国产业信息网等相关数据, 近年来我国铁、铜、铝对外依存度均在 50% 以上, 尤其是 2019 年铁矿对外依存度高达 77.1%. 金属矿产资源的保障程度直接关系到国民经济发展和国家安全. 因此, 因而金属矿产资源紧缺成为制约我国经济社会快速发展的瓶颈.

金属矿产资源是不可再生资源, 几十年的大规模开采使我国浅部金属矿产资源日渐枯竭. 但随着金属矿产资源的需求不断增大, 为保障供应, 金属矿山开采的深度随之增大, 未来我国金属矿产资源的开采将进入第二深度空间(1000 ~ 2000 m)^[5]. 据相关数据统计与预测, 未来 10 年内, 我国三分之一的地下金属矿山开采深度将达到或超过 1000 m, 最高可达到 2000 ~ 3000 m^[6]. 而纵观世界金属矿产资源的开发, 国外金属矿山开采深度超千米有 100 余座, 分布在南非、加拿大、美国、印度、俄罗斯和欧盟等国家和地区, 且其绝大多数的开采深度超过 2000 m^[7].

2011 年, 国务院《找矿突破战略行动纲要(2011—2020 年)》提出, 加快推进重点成矿区带的基础地质调查、矿产远景调查和综合研究工作, 促进深部找矿突破^[8]. 2016 年习近平总书记在全

国科技创新大会指出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”, 将地质科技创新提升到了关系国家科技发展大局的战略高度^[9]. 2021 年, 按照国务院的要求, 自然资源部将联合发展改革委、科技部、财政部等部门, 充分调动社会各界的积极性, 共同组织实施《战略性矿产找矿行动(2021—2035)》^[10].

进入深部开采已经成为金属矿产资源开采的必然趋势. 为此, 本文归纳总结了国内外金属矿深部开采关键理论与技术的发展现状及研究趋势, 并以此为基础提出了极深部岩体力学、深部金属矿原位流态化开采和超大型深部智慧化无人矿山建设 3 个方面的展望, 以期在金属矿深部开采方面, 不断开拓创新、持续科技攻关、突破技术瓶颈, 安全、经济、高效、环保、智能地开采深部金属矿产资源, 保障我国金属矿产资源安全.

1 金属矿深部开采国内外现状

金属矿深部开采已经在国内外取得了较快的发展, 深部开采矿山数量及开采深度迅速增长. 与此同时, 为了确保深部金属矿安全、高效、环保地进行开采, 包括中国在内的世界各采矿大国联合工业部门与研究机构, 对金属矿深部开采的相关技术开展了深入的研究.

1.1 国外金属矿深部开采现状

1.1.1 开采现状

国外的金属矿深部开采和研究起步早. 1989 年在印度 Kolar 金矿采用空场法开采深度达到 320 m 时记录到有岩爆现象的发生^[11], 1900 年在印度科拉尔金矿观察到岩爆现象^[12]. 1904 年在美国大西洋 Atlanta 铜矿观察到了明显的岩爆现象, 且该矿由于在 1906 年发生了一次较大的岩爆(地震强度估计达到里氏 3.6 级)后关闭^[13]. 随后, 在美国、前苏联、加拿大、澳大利亚等国家相继进行了深部金属矿的开采和研究工作.

据不完全统计, 国外采深超千米的地下金属矿山有 110 余座, 主要分布在南非、加拿大、美国、印度、澳大利亚、欧盟等国家和地区^[5]. 其中,

南非绝大多数金矿、铀矿的开采深度都在 1000 m 以上, Western deep level 金矿开采深度达到 4800 m, 是目前世界上采深最深的地下金属矿山; Mponeng 金矿开采深度达到了 4350 m, 矿体埋深更是超过 7500 m; Savuka 金矿开采深度也达到了 4000 m, 这 3 座矿山是现有的采深超过 4000 m 的深部金属矿山, 南非成为世界上金属矿深部开采数量最多、矿井最深的国家^[12,14]。在这 110 余座国外深井金属矿山中, 70% 以上为金矿和铜矿, 3000 m 及以上采深的矿山有 18 座(有 13 座位于南非, 均为金矿)。表 1 为国外典型深部金属矿山情况^[14-15]。表中南非和加拿大共有 20 座深部金属矿。此外, 多个国家和地区的金属矿开采均进入了深部开采。国外深部金属矿开采起步早、发展迅速, 并且当前仍然以较快的速度进行发展。

1.1.2 研究现状

与传统浅部开采不同, 进入深部后将面临“三高一扰动”的问题, 为确保深部开采能够安全、高效、环保地进行开采, 并获得最大的效益, 国外各采矿大国联合工业部门、研究机构等对金属矿深部开采的基础性问题和相关技术开展了深入的研究。国外各矿业大国的研究历程如表 2 所示。

南非早在 1908 年就已经成立了专门的委员会进行深井岩爆问题的研究^[12], 并于 20 世纪 60、70 年代开展了一系列深部开采的探索及实践工作, 首次发现了分区破裂现象并建立了微震监测系统^[16]。Morrison 于 1942 年针对加拿大 Ontario 矿出现的岩爆现象完成研讨报告, 至今仍被视为经典^[12]。20 世纪 60 年代末, 美国矿山局联合高校、研究院等单位开展了使用微震技术监测岩爆的研究, 并于美国 Idaho 地区的矿山进行了应用^[17]。1977 年, 国际岩石力学学会组织成立了岩爆专门委员会, 对岩爆问题进行专题研究^[18]。1983 年, 针对 1600 m 深部开采的技术难题, 前苏联岩石力学专家开展了专题研究^[15]。1984 年, 加拿大 Falconbridge 矿发生的岩爆灾害, 于 1985 年开启了为期 10 年的 Canadian Ontario Industry Project (1985 ~ 1990 年) 和 Canadian Rockburst Research Program (1990 ~ 1995 年) 两个研究计划, 取得了显著的研究成果^[11]。20 世纪 90 年代, 美国对岩爆、天然地震引发、核爆等信号的差异进行了研究^[19]。为解决 3000 ~ 5000 m 深部安全、经济开采面临的一些关键问题, 南非于 1998 年启动了“Deep Mine”研究计划, 其研究内容包括安全技术研究、岩爆控制、地质构造、采场布置与采矿方法、降温与通风、采

表 1 国外典型深部金属矿山^[14-15]

Table 1 Foreign typical deep metal mines^[14-15]

Name	Mining depth/m	Country
Western deep level gold mine	4800	South Africa
Mponeng gold mine	4350	South Africa
Savuka gold mine	4000	South Africa
Tau Tona Anglo gold mine	3900	South Africa
Caritonville gold mine	3800	South Africa
East Rand Proprietary mines	3585	South Africa
South deep gold mine	3500	South Africa
Kloof gold mine	3500	South Africa
Driefontein gold mine	3400	South Africa
Kusasaletu gold mine	3276	South Africa
Champion Reef gold mine	3260	India
Kolar gold mine (closed)	3200	India
President Steyn gold mine	3200	South Africa
Boksburg gold mine	3150	South Africa
LaRonde gold-silver-copper-zinc mine	3120	Canada
Andina copper mine	3070	Chile
Moab Khotsong gold mine	3054	South Africa
Lucky Friday silver-lead-zinc mine	3000	USA
Kidd Creek copper-zinc mine	2927	Canada
Great Noligwa gold mine	2600	South Africa
Creighton nickel mine	2500	Canada
Merensky Reef platinum-palladium mine	2200	South Africa
Sudbury copper-nickel mine	2000	Canada
Mount Isa copper mine	1900	Australia
Pribram Uranium mine	1836	Czech Republic
SDAG Wismut Uranium mine (closed)	1800	Germany
Cheremukhovskaya-Glubokaya copper mine	1550	Former Soviet Union
Boulby Potash mine	1300	UK
Noranda mine	1280	Canada

场支护、超深竖井掘进、深井提升技术等深部开采 8 个方面的关键问题, 如图 1 所示^[6,11,16,20]。Deep Mine 计划为期 4 年, 耗资 1380 万美元, 取得了一系列创新性研究成果^[14]。1999 年澳大利亚成立地质力学中心, 针对矿压支护、微震及岩爆风险管理、挤压大变形、矿山充填以及吸能锚网的研发应用等开展了大量研究^[21]。

2011 年, 南非与日本进行合作对南非深层地下矿山(1000 ~ 3000 m)地震进行了研究, 提高了对地震事件预测及分析的可靠性^[22]。由加拿大矿业创新卓越中心提出倡议, 建立了加拿大的超深采

表 2 国外主要矿业大国深部开采研究历程

Table 2 Research process of deep mining in major foreign mining countries		
Year	Research process	Country
1908	Sets up rock burst commission	South Africa
1942	Classical seminar on rock burst in Ontario	Canada
1960s	Research on monitoring rock burst using microseismic technique	USA
1970s	Establish a microseismic monitoring system	South Africa
1977	Organized a special committee on rockburst	The International Society for Rock Mechanics
1983	Carried out special research to solve the problems of 1600 m deep mining	Soviet Union
1985	Ontario industry project and rockburst research program	Canada
1990s	Research on the differences in signals such as rock bursts, natural earthquakes, and nuclear explosions	USA
1998	Launched the "Deep Mine" research project	South Africa
1999	Established geomechanics center	Australia
2011	Research on earthquakes in deep underground mines (1000–3000 m)	South Africa and Japan
2015	Established ultra-deep mining network	Canada
2016	Asked three forward-looking questions	European Union

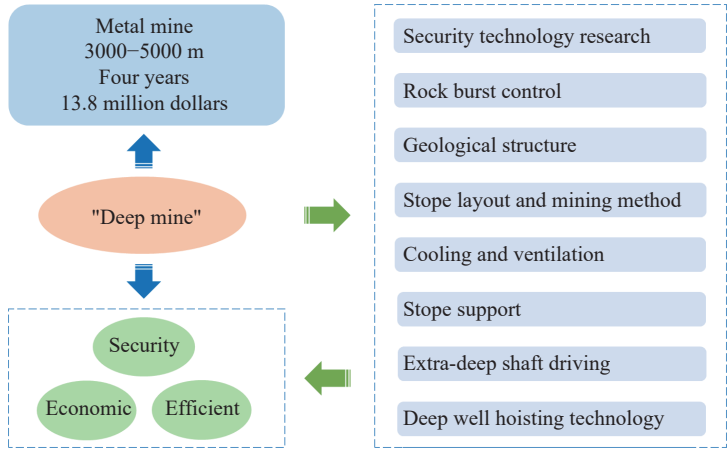


图 1 南非 Deep Mine 计划研究内容^[6,11,16,20]

Fig.1 Research contents of Deep Mine project in South Africa^[6,11,16,20]

矿联盟, 该项目自 2015~2019 年, 斥资 4600 万美元, 研究的主题包括 2500 m 采深的应力灾害问题、能耗问题、运输与生产能力问题和工人安全问题^[6]。此外, 近年来欧盟提出了 3 个具有代表性和前瞻性的问题: (1) 未来智能深部采矿的创新技术与理念^[23]; (2) 热、电、金属联合提取^[24]; (3) 利用生物技术从深部矿床提取金属的新概念^[25]。

历经一百多年的理论技术与工程实践, 国外金属矿深部开采已经获得了大量的理论技术和实践成果, 打下了坚实的基础, 且还在不断向地球的更深处迈进。

1.2 国内金属矿深部开采现状

1.2.1 开采现状

相比于国外, 我国进入深部开采研究的时间

较晚, 最早于 1933 年在抚顺胜利矿发现岩爆^[26]。20 世纪 60 年代在石嘴子铜矿、盘古山钨矿、锡矿山铜矿以及弓长岭铁矿等有岩爆的活动记录^[19]。石嘴子铜矿是国内深部开采矿山之一, 最大采深达到了 950 m, 后因地压大、损失贫化严重于 1969 年闭矿^[27]。1976 年在辽宁抚顺的红透山铜矿有明确的岩爆记录, 并对此开展了相关的研究^[19]。整个 20 世纪, 在金属矿开采领域我国仅有吉林石嘴子铜矿、辽宁红透山铜矿以及安徽铜陵冬瓜山铜矿这 3 座矿山达到或接近 1000 m^[15,27]。进入 21 世纪我国金属矿山的开采深度随之迅速增大。据不完全统计, 当前国内已有 22 座矿山的开采深度达到或超过 1000 m, 如表 3 所示。

如表 3 所示, 河南灵宝市的秦岭金矿开采深度

表3 国内典型深部金属矿山

Table 3 Typical deep metal mines in China

Name	Mining depth/m	Metal type
Henan Qinling gold mine	1990	Gold
Henan Fuxin gold mine	1600	Gold
Jilin Jiapigou gold mine	1600	Gold
Yunnan Huize lead-zinc mine	1500	Lead-zinc
Yunnan Liuju copper mine	1500	Copper
Liaoning Sishanling iron mine	1500	Iron
Liaoning Hongtoushan copper mine	1300	Copper
Henan Wenyu gold mine	1300	Gold
Shannxi Tongguan zhongjin gold mine	1200	Gold
Shandong Linglong gold mine	1200	Gold
Anhui Dongguashan copper mine	1120	Copper
Hunan Xiangxi gold mine	1100	Gold
Xinjiang Ashele copper mine	1100	Copper
Liaoning Erdaogou gold mine	1100	Gold
Hebei Jinchangyu gold mine	1100	Gold
Shandong Sanshandao gold mine	1050	Gold
Shandong Jining iron mine	1045	Iron
Gansu Jinchuan nickel mine	1000	Nickel
Shandong Jinzhou mining	1000	Gold
Liaoning Gongchangling iron mine	1000	Iron
Hebei Shouwangfen copper mine	1000	Copper
Shandong Rushan gold mine	1000	Gold

达到了 1990 m, 是我国目前最深的地下金属矿山^[28], 同时还包括河南崑鑫金矿、吉林夹皮沟金矿、云南会泽铅锌矿、六苴铜矿和辽宁思山岭铁矿在内的共 6 座矿山的开采深度达到或超过 1500 m. 近年来, 铁矿山进行深部开采建设的力度最大, 目前在建或计划建设的深部地下金属矿山中, 绝大多数是铁矿, 如辽宁本溪大台沟铁矿、河北马成铁矿、辽宁陈台沟铁矿等^[15]. 目前, 我国金属矿山的开采深度以大约 $10 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度进行, 预计在较短的时间内我国深部开采的金属矿山的数量将达到世界第一, 部分地下矿山的开采规模将达到世界最高水平^[2].

1.2.2 研究现状

我国深部开采的研究相比于国外较晚, 但发展迅速. 国家先后设立“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”科技攻关项目和“十三五”重点研发计划, 对深部开采面临的关键科学难题开展了大量的研究^[6].

1996 年(“九五”期间), 国家将《冬瓜山千米深

井 300 万吨级矿山强化开采综合技术研究》列为重点攻关项目^[29]. “十五”期间, 深井开采研究再次在国家攻关课题中立项. 2001 年 11 月, 召开了“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山科学会议第 175 次学术研讨会^[12]. 2004 年, 启动了国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”, 对深部开采面临的岩体力学问题开展了深入研究, 取得了重要的研究成果^[6]. 2006 年, 我国发布《规划纲要》任务及国家重大部署, 为贯彻落实该重大部署, 建设矿产资源强国. 2009 年, 国家设立 973 项目“深部重大工程灾害的孕育演化机制与动态调控理论”和“煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究”, 系统研究了深部开采条件下动力灾害的发生机理和预警防治对策^[30]. 2016 年, 国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》提出“深地资源勘探理论和技术装备”为重点研究目标^[31]. “十三五”期间的相关研究突破相关技术瓶颈, 为我国金属矿床深部开采提供了理论基础、技术支撑和工程示范^[15].

虽然我国高度重视深部开采方面的研究, 投入了大量的人力物力, 取得了诸多研究成果, 但与国外矿业发达国家相比仍有较大差距. 因此, 在深部开采研究方面应该持续科研攻关.

1.3 国内外金属矿深部开采对比分析

1.3.1 开采深度

国内外金属矿的开采深度存在较大差异. 从表 3 可以看出, 当前我国金属矿山的开采深度最大达到 1990 m, 尚未达到 2000 m. 而南非、印度、加拿大、美国、智利等多个国家金属矿的开采深度已经达到或超过 3000 m, 尤其南非已经有 10 余座金属矿山的开采深度达到或超过 3000 m, 最深可达 4800 m. 由此可见, 我国金属矿山的开采深度与国外矿业发达国家存在巨大的差距.

1.3.2 技术差距

国外深井采矿方法及工艺发展迅速, 具有较完善的深井开采理论、技术体系及灾害控制技术. 我国深井开采深度、深部开采理论、技术、装备等方面与国外存在较大差距, 并且井下深部开采技术对工作人员的操作和各种设备有着极高的要求, 在实际应用的过程中面临着许多的困难, 存在诸多技术瓶颈^[32], 主要表现在设备机械化、智能化水平不高, 自主研发水平不高^[33].

2 金属矿深部开采关键理论与技术

2.1 深部岩体力学理论

与浅部力学特征相比, 深部岩体处于“三高—

扰动”的环境,这种复杂的力学环境制约了深部开采的发展.因此,为适应深部的复杂力学环境,保证安全、高效开采,亟需对传统的浅部岩体力学理论进行变革,以新思路、新方法来研究深部岩体力学理论.深部金属矿岩体力学理论研究的总体框架如图 2 所示.

地应力是进入深部开采后岩体力学研究的基础.有南非学者认为存在一个临界深度,该临界深度决定了水平应力与垂直应力的相对大小,即地应力的特征^[34].Bready 和 Brown^[35]提出了一种水平应力和垂直应力比值的估算方程,而后发现该比值与实际不符.

深部岩体赋存于“三高一扰动”的复杂环境中,表现出强流变性、强湿热环境和强动力灾害的响应特征^[36].(1)强流变性:在深部高应力的作用下,岩体结构与力学特性相比于浅部会发生重大变化,即使质地非常坚硬的岩体,在深部的特殊环境下也会变成软岩,表现出明显的流变特性,这就导致现有浅部的岩体力学特性不再适用于深部的特殊环境,深部岩体力学的流变性则成为深部岩体力学研究的一大难题.(2)强湿热环境:由于深部具有高地温、高岩溶水压力的特点,在深部环境中表现出高温高湿,导致工作条件恶化,严重影响工人健康、工作效率,设备的安全运行、生产效率等.因此,深井降温与热害治理成为深部开采所面临的一大难题.(3)强动力灾害:深部开采的动力灾害主要包括岩爆、塌方、冒顶和突水等,深部开采最大的特点即为岩爆发生频率相比于浅部具有明显的增加,且一旦发生岩爆将会造成巨大的损失,严重威胁工人的安全.因此,岩爆一直是深部开采的研究重点,在以后的深部开采研究中仍将作为国内外的研究重点.同时,为预防岩爆的发

生,围岩稳定性与岩层控制的力学分析研究也成为深部开采研究的重点.

2.2 深部金属矿建井提升技术

深部金属矿地下开采的技术核心是“进得去、待得住和取得出”,随着开采深度的不断增加,对建井和提升技术水平的要求也越来越高,建井与提升是深部金属矿开采的“咽喉”工程.

深部矿井地质条件探测是围岩稳定性控制技术的基础,精细探测技术逐渐应用于深部矿井的地质条件探测.针对深井围岩的复杂力学特征,通过研究围岩的应力变化规律,从围岩自身的稳定性出发,参考水力压裂切顶卸压理论,可通过围岩卸压与应力控制,达到围岩稳定性控制的目的^[37].同时,通过改善围岩结构、封堵水力通道、提高填充材料密度等方式可对节理、裂隙等各类围岩自身的弱点进行改性,提高围岩自身的稳定性.除了提高围岩自身稳定性之外,对深部井巷围岩支护是进行围岩稳定性控制应用最广泛的技术,当前已经形成了支护-改性-卸压一体化的围岩稳定性控制理念与技术^[38].当前,在复杂的矿井地质条件下,在机械破岩的同时经常需要人工干预,智能化建井技术将成为深部建井的发展方向.迫切需要研发智能化建井的相关技术与装备,形成一个自主决策的智能化建井体系^[39].

提升系统是矿山生产的重要环节,相比于浅部,深部开采在安全稳定性、提升能力、提升成本等方面对提升系统有更高的要求^[40],通过力学分析、理论计算以及数值模拟等方法对提升系统的稳定性进行了研究^[41].水力提升是目前较为先进的一种提升概念系统,该方法便于井下充填,同时也减少了环境污染,为建立“无废矿山”创造条件,在未来具有很好的应用前景.

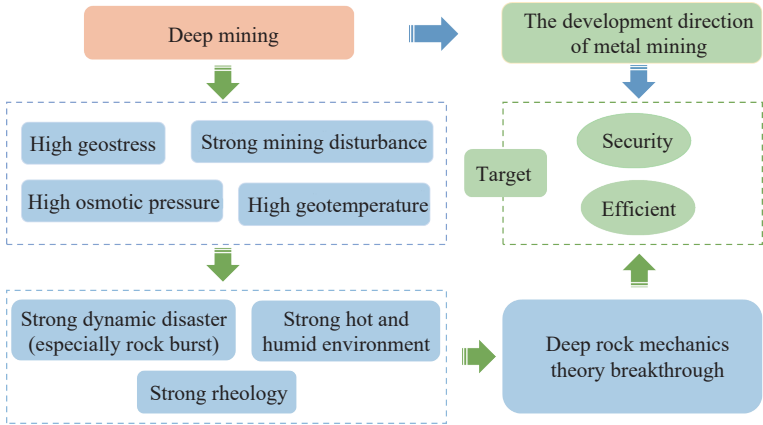


图 2 深部金属矿岩体力学理论研究的总体框架

Fig.2 General framework of theoretical research on rock mass mechanics of deep metal mines

2.3 深部金属矿绿色开采

金属矿山开采过程会对生态环境造成破坏，如重金属污染、酸性废水污染、固体废弃物污染以及固体废弃物占地等。为了减小或消除矿山开采过程对环境的破坏，践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念，绿色开采成为当前我国金属矿开采领域的研究热点。

我国学者针对金属矿绿色开采在理论和技术框架、指标体系、内涵和意义及工程应用等方面已经开展了较多的研究。当前绿色开采模式按矿山生命周期可分为源头预防型、末端治理型和全程管控型3种；按尾废处置方式可分为资源化利用主导型、全尾砂充填主导型、生态处置无害堆存主导型和复合型4种^[42]，尾矿膏体处置将成为金属矿绿色开采的发展趋势^[43]。全尾砂膏体充填技术能够有效解决金属矿开采引发的环境问题，同时还可以保障开采安全，是实现绿色开采的关键技术，在国内金属矿山得到了广泛的应用^[44]。该技术是将全尾砂、废石等矿山固废制备成饱和态、无泌水、牙膏状的结构流料浆，通过管道输送至井下采空区进行充填，工艺流程如图3所示^[45]。与传统的水砂充填相比，膏体材料具有不分层、不离析和不脱水的特征^[46]。可以消除尾矿库和采空区两大危险源，实现“一废治两害”的优良效果。

随着国家对环保的要求越来越高，深部金属矿开采过程中必须以环保为前提，走绿色开采的发展道路，最终实现高效、无废、无害以及生态化的开采目标。

2.4 深部金属矿智能开采

智能开采是21世纪金属矿开采的重要发展方

向及前瞻性目标^[2]。进入深部后，作业环境、安全性以及作业效率极其低下，将智能技术应用于矿山开采，不断提高开采技术水平，对于解决深部开采面临的诸多问题具有重要的意义。因此，建立智能化的深部金属矿山势在必行。当前，智能矿山的建设受到国内外的高度重视，芬兰、瑞典、德国等多个国家制定了相关战略规划^[47]，开展了智能开采的相关研究并进行了工程应用。在“中国制造2025”的战略背景下，我国多个部门针对智能开采提出了相关政策措施^[48-49]，极大地推动了我国智能开采的发展进程。

智能矿山主要由控制平台、传输系统以及采掘装备3个部分组成^[50]，如图4所示。控制平台即为控制整个智能化系统的平台，负责采矿过程中的智能调度和控制，是整个智能开采系统的“大脑”；传输系统主要包括信息获取系统、无线通信系统、精准定位系统和智能导航系统，负责将控制平台发出的指令传输到采掘设备上，同时将采掘设备的实时状态反馈到控制平台上；采掘装备包括智能凿岩台车、潜孔钻机、铲运机、电机车、装药车等各类智能采矿设备，用于执行控制平台发出的具体指令，进行采矿作业，设备的实时位置信息、运行状态等可随时获取^[51]。

3 金属矿深部开采展望

在深部金属矿开采面临的“三高一扰动”特殊环境下，需要对更深开采水平的岩体力学理论进行研究，为极深部开采打下坚实的基础。随着装备大型化、智能化的发展，建设超大型深部智慧化无人矿山则是深部开采未来发展的主流方向及最终

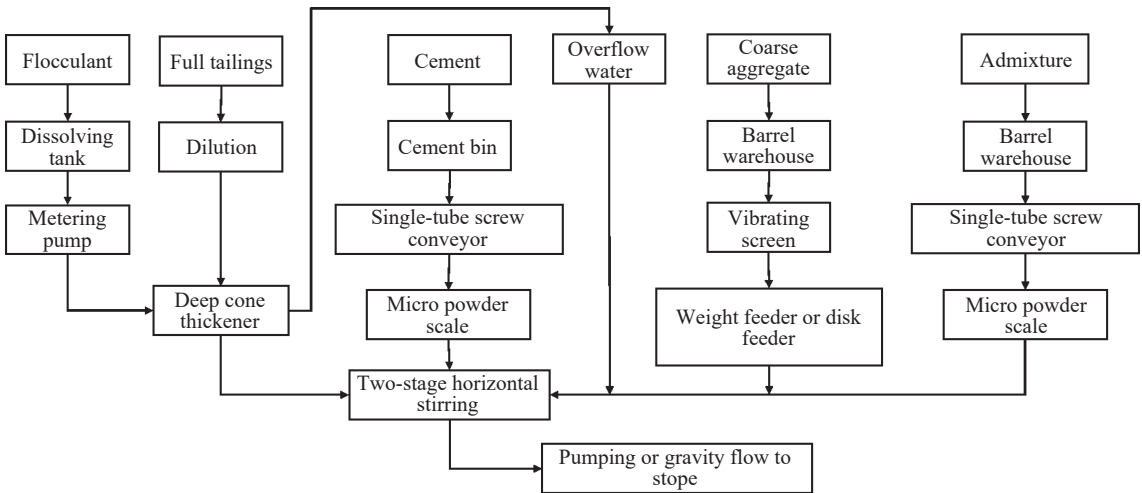


图3 全尾砂膏体充填工艺流程^[45]

Fig.3 Full tailings paste backfilling process^[45]

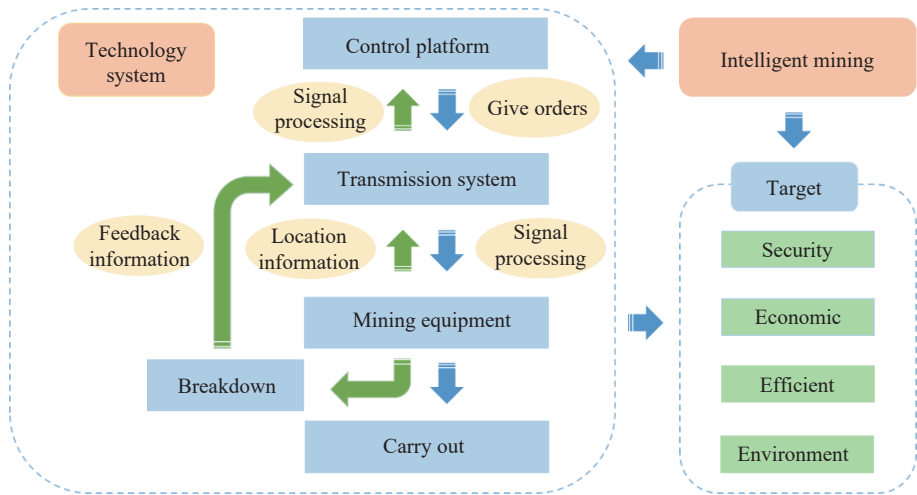


图 4 智能矿山技术体系

Fig.4 Technical system of intelligent mining

目标。同时,由于深部岩体的强流变性对开采的限制,亟需颠覆传统的开采理念,原位流态化开采将成为深部金属矿开采的有效手段。

3.1 极深部岩体力学

我国学者对 1000 ~ 2000 m 采深的岩体力学理论进行了大量的研究与探索,为未来金属矿全面进入深部开采提供了理论基础,有利于实现深部金属矿的安全、高效开采。从长远来看,金属矿产资源的开发应该走向地球更深部,实现极深部开采。然而,岩体的岩性如何变化等一系列理论研究成为极深部开采首先需要解决的问题。因此,极深部岩体力学理论的研究与探索将成为未来深部金属矿开采的重要研究方向。

传统岩体力学是建立在材料力学的基础上,同时忽略开挖扰动的影响,是一种静态的研究,形成的岩体力学理论没有考虑到深部的原位环境、开采深度以及工程扰动等相关因素^[52]。近些年通过深部岩体力学的研究,初步建立了 1000 ~ 2000 m 采深的岩体力学理论体系。相比于 2000 m 以浅的环境,进入极深部后将发生一系列的变化,尤其进入 6000 m 以深岩体将处于三向等压状态,岩体进入全范围塑性流变状态^[53],当前的深部岩体力学理论体系将不再适用。因此,需要寻找新的思路、新的方法开展极深部岩体力学理论的研究。有学者提出了极深部岩体力学研究的三个思路^[36]: (1) 从分子层面对极深部环境下的岩石分子进行研究,包括微观构像、物化性质、分子力场与能势等,是研究极深部岩体力学行为的一种新思路; (2) 突破传统的微观渗流力学研究,通过研究微观力学环境以及化学特征的变化了解极深部岩体的

力学性能,同时将物理、化学、热学、力学、微生物学等结合建立多场耦合的极深部岩体力学理论; (3) 利用地球内部磁场的稳定性与岩石矿物自身具有的磁性,利用精细探测技术监测由极深部高温高压导致的磁场变化以及岩体破坏产生的声波信号,联合预测岩体内部的声磁变化,为极深部开采的动力灾害预测提供一种新的思路。

3.2 深部金属矿原位流态化开采

根据多个国家的地应力测量结果,6000 m 以深岩体的地应力为三向等压的静水压力状态,岩体进入全范围塑性流变状态,从理论上讲传统的采矿方法将难以实现^[2,54],金属矿的深部开采将受到巨大的限制。相比之下,油气资源的开采深度已经超过了 7500 m,主要原因在于油气资源均为流态,开发过程中只需钻机在井下工作,将流态资源输送至地面,这种开采方式与当前金属矿的开采方式有着本质的区别^[55-56]。借鉴油气资源的开采方式,利用深部岩体的强流变性,颠覆传统金属矿开采理念,原位流态化开采技术成为我国未来深部金属矿开采的重要方向。

原位流态化开采是指将深部的金属矿产资源转化为流态,直接输送至地面的开采技术,相比于传统的开采模式,具有人员无需下井、尾废直接在井下充填、输送成本低、能耗小等一系列优势。原位转化则是深部金属矿进行流态化开采的关键,根据原位转化的两种不同方式,深部金属矿原位流态化开采可分为原位溶浸开采和采选充一体化两个发展方向^[57]。原位溶浸开采是指通过钻孔把溶液注入深部金属矿层,溶液与矿层有用组分发生一系列反应,生成可溶性离子进入溶液,抽取至

地表提取有用金属的一种开采方法^[58]。原位溶浸开采无矿岩开挖、井下无人、接近零排放、能源消耗小、成本低(据统计,原位铀矿开采成本为传统开采的1/4),在安全、环保、经济等方面均具有显著的优势,但其开采局限性较大,溶浸液体难以控制^[59]。采选充一体化是指将深部金属矿开采后,矿石在井下进行破碎加工,将精矿浆以流态化送至地表,剩余固废用来充填采空区的一种开采方法^[60]。该技术基建工程量小,减少土地占用,尾废不出坑,可有效实现高效、经济、无废开采。但是该技术处于起步阶段,相关采选方法、技术、装备等存在一系列问题,在金属矿开采领域尚未进行工程应用^[61]。

3.3 超大型深部智慧化无人矿山

面临深部开采特殊环境,工人在井下的安全难以得到保障,只有实现无人矿山,才能从根本上解决矿山的安全生产问题。随着我国金属矿山开采装备的不断创新和发展,未来的采矿装备朝着大型化和智能化的方向发展。因此,建立超大型深部智慧化无人矿山成为我国深部金属矿开采的一个重要发展方向。大型设备则是一个重要的研究方向,在深部金属矿开采中,大型化设备结合连续采矿工艺,可以实现规模化开采,提高采矿效率。无人矿山的发展则建立在以数字化矿山为基础和依托的智慧矿山的基础上,是智慧矿山发展的最终目标^[62]。我国智慧化矿山经历了单机自动化阶段和综合自动化阶段,当前仍处于智慧矿山建设的初级阶段,即局部智慧体阶段,距离完全实现无人矿山还有很大的差距^[63]。

在当前的发展阶段,要想建设无人矿山,智慧矿山的实现是首要目标。智慧矿山是以物联网和互联网为基础,高度集成互联网技术、智能信息技术和传感器技术,结合大数据、云计算以及人工智能等各类高新技术的一种矿山管理模式,分为感知层、输入层和智慧层三个层次^[64-65]。智慧矿山的运行需要研发各种高度可靠的智慧决策应用系统,如搭建一体化智慧矿山决策平台,包括矿端平台和具有强大数据处理能力的云端平台;开发各类能够进行大数据挖掘、具有完整决策能力、能够对各系统之间的数据进行融合分析的智能决策分析应用软件^[63]。在深部的特殊环境中,建设无人矿山还需要研发能够与深部特殊环境相适应的各类智能化无人采矿设备,通过智能化的无人控制系统及管控平台控制设备运行,最终实现深部金属矿山安全、高效的开采目标。

当前,随着开采深度的迅速增大,同时在国家战略需求的导向以及国家政策的支持下,深部开采将成为我国未来金属矿资源开采与保障的主力军。深部岩体力学理论、建井与提升技术、绿色开采以及智能化开采仍是当前深部金属矿开采研究的核心,需要持续科研攻关、不断开拓创新、突破技术瓶颈,以保障我国深部金属矿产资源安全、高效、经济、环保地进行开采。从长远来看,极深部岩体理论的研究对我国深部金属矿开采具有重要意义,原位流态化开采是面对深部岩体特殊环境的一种有效的开采方法,超大型深部智慧化无人矿山建设则是深部金属矿开采发展的最终目标。

参 考 文 献

- [1] Xing L T, Xu Z H, Wang Q. *Exploitation, Utilization and Planning of Mineral Resources*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008
(邢立亭,徐征和,王青. 矿产资源开发利用与规划. 北京:冶金工业出版社,2008)
- [2] Wu A X, Wang Y, Zhang M Z, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines. *Met Mine*, 2021(1): 1
(吴爱祥,王勇,张敏哲,等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望. 金属矿山, 2021(1): 1)
- [3] Li F Q, Li J W. Study on economic importance assessment of metal mineral resources. *China Min Mag*, 2018, 27(12): 6
(李芳琴,李建武. 金属矿产资源经济重要性评估研究. 中国矿业, 2018, 27(12): 6)
- [4] Feng J C. Analysis on the construction of China's metal mineral resources reserve system. *Theory Mon*, 2010(12): 164
(冯进城. 浅析我国金属矿产资源储备体系的构建. 理论月刊, 2010(12): 164)
- [5] Wang Y M. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures. *Mod Min*, 2011, 27(1): 1
(王运敏. 金属矿采矿业面临的机遇和挑战及技术对策. 现代矿业, 2011, 27(1): 1)
- [6] 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)
- [7] Els F. Idaho silver mine shaft sunk to final depth of 9587 feet [EB/OL]. (2016-05-24)[2022-11-12]. <http://www.mining.com/idaho-silver-mine-shaft-sunk-final-depth-9587-feet/>
- [8] The outline of strategic action for ore prospecting breakthrough (2011—2020) was officially released. *Equip Geotech Eng*, 2012, 13(4): 3
(找矿突破战略行动纲要(2011—2020年)正式发布. 地质装备,

- 2012, 13(4): 3)
- [9] Xi J P. Struggling for building a world powerful country in science and technology [EB/OL]. (2016-05-31) [2022-11-12]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-05/31/c_1118965169.htm
(习近平. 为建设世界科技强国而奋斗 [EB/OL]. (2016-05-31) [2022-11-12]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016-05/31/c_1118965169.htm)
 - [10] The ministry of natural resources will organize and implement the strategic mineral prospecting action (2021—2035). *Miner Explor*, 2021, 12(4): 988
(自然资源部将组织实施《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》. 矿产勘查, 2021, 12(4): 988)
 - [11] Hedley D G F. *Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines*. Ontario: Energy, Mines and Resources Canada, 1992
 - [12] Zhao S C. Resource exploitation and underground engineering in deep stress—175th summary of Xiangshan conference. *Adv Earth Sci*, 2002, 17(2): 295
(赵生才. 深部高应力下的资源开采与地下工程——香山会议第175次综述. 地球科学进展, 2002, 17(2): 295)
 - [13] Bieniawski Z T. *Strata Control in Mineral Engineering*. United States: U. S. Department of Energy, 1986
 - [14] Dong L J, Tong X J, Li X B, et al. Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *J Clean Prod*, 2019, 210: 1562
 - [15] 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)
 - [16] Li X B. Correct understanding and accurate positioning of zonal fracturing is of great significance to deep mining of metal mines // *Proceedings of Academic Salon of New Views and New Theories* 21. Beijing, 2008: 32
(李夕兵. 分区破裂化正确认识与准确定位对金属矿山深部开采的意义重大// 新观点新学说学术沙龙文集 21. 北京, 2008: 32)
 - [17] Bolstad D D. Rockburst control research by the US bureau of mines // *Rockbursts and Seismicity in Mines*. Rotterdam, 1990
 - [18] Li X B, Gu D S. Disaster control and crushing mutagenesis of high stress in hard mining of deep wells // *The 175th Scientific Conference of Xiangshan*. Beijing, 2002: 101
(李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变 // 香山第175次科学会议. 北京, 2002: 101)
 - [19] Jiang F F, Zhou H, Liu C, et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines. *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38(5): 956
(江飞飞, 周辉, 刘畅, 等. 地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 956)
 - [20] He M C, Xie H P, Peng S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(16): 2803
(何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803)
 - [21] Australian Centre for Geomechanics. ACG research [EB/OL]. (2016-09-20)[2022-11-12]. <http://acg.uwa.edu.au/acg-research/>
 - [22] Durrheim R, Ogasawara H, Nakatani M, et al. Observational studies to mitigate seismic risks in mines — A new Japanese–South African collaborative research project // *Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, "Proceedings of the International Conference on Deep and High Stress Mining". Perth, 2010: 11
 - [23] i2mine. Project overview [EB/OL]. [2022-11-12]. <http://www.i2mine.eu>
 - [24] CHPM2030. Combined heat, power and metal extraction [EB/OL]. [2022-11-12]. <http://www.chpm2030.eu>
 - [25] Johnson D B. Biomining—biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Curr Opin Biotechnol*, 2014, 30: 24
 - [26] Li Y S. Research and review of mine impact at home and abroad. *Ref Mater Coal Sci Res*, 1982(4): 1
(李玉生. 国内外矿山冲击的研究及评述. 煤炭科研参考资料, 1982(4): 1)
 - [27] Guo J F, Diao X H, Zhang C X, et al. On the research of the mining technology for Dongguashan deep-lying copper deposit. *Met Mine*, 2002(1): 10
(郭金峰, 刁心宏, 张传信, 等. 冬瓜山深埋铜矿床开采技术的研究. 金属矿山, 2002(1): 10)
 - [28] Bian Z H. Application of infrastructure prospecting in mine construction with ultra-deep well: Taking sishanling iron mine as an example. *Mod Min*, 2020, 36(8): 68
(边振辉. 基建勘探在超深井矿山建设中的应用: 以思山岭铁矿为例. 现代矿业, 2020, 36(8): 68)
 - [29] Gu D S. The development tendency of mining science and technology of underground metal mine. *Gold*, 2004, 25(1): 18
(古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势. 黄金, 2004, 25(1): 18)
 - [30] Jiang Y D, Pan Y S, Jiang F X, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China. *J China Coal Soc*, 2014, 39(2): 205
(姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205)
 - [31] Notice of the state council municipality on printing and distributing the 13th five-year national science and technology innovation plan. *Gazette State Counc People's Repub China*, 2016(24): 6
(国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知. 中华人民共和国国务院公报, 2016(24): 6)
 - [32] Yang T. Discussion on underground mining technology and development trend of underground mining. *Mod Chem Res*, 2020(10): 9
(杨涛. 谈井下采矿技术及井下采矿的发展趋势. 当代化工研究, 2020(10): 9)
 - [33] Li X F, Tan D X, Liu X L. Technical transformation of mining

- technology of deep metal ore body in mine. *Min Technol*, 2014, 14(4): 10
(李学锋, 谭定新, 刘湘莲. 金属矿山深部矿体开采工艺的技术改造. 采矿技术, 2014, 14(4): 10)
- [34] Xie H P, Feng X T. *Basic Research on Safety of Major Projects in Disaster Environment*. Beijing: Science Press, 2009
(谢和平, 冯夏庭. 灾害环境下重大工程安全性的基础研究. 北京: 科学出版社, 2009)
- [35] Bready B H G, Brown E T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005
- [36] 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)
- [37] Kang H P, Feng Y J. Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution. *J China Coal Soc*, 2012, 37(12): 1953
(康红普, 冯彦军. 定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1953)
- [38] Kang H P, Wang G F, Jiang P F, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000m. *J China Coal Soc*, 2018, 43(7): 1789
(康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789)
- [39] Liu Z Q, Song Z Y, Cheng S Y, et al. Equipment and key technologies for full-section scientifically drilling of kilometer-level vertical shafts. *J China Coal Soc*, 2020, 45(11): 3645
(刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 千米级竖井全断面科学钻进装备与关键技术分析. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3645)
- [40] Liang P F, Leng K, Ma Q. Research on the key hoisting technology in deep shafts of metal mines. *J Liaoning Univ Technol*, 2018, 38(1): 29
(梁鹏飞, 冷奎, 马倩. 金属矿山深井提升关键技术探讨. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 29)
- [41] Han R J, Wang H L, Zhang W. Discussion of multi-rope friction hoisting rope in deep shaft. *Nonferrous Metall Equip*, 2019(2): 102
(韩瑞军, 王会来, 张伟. 深井多绳摩擦提升钢丝绳研究. 有色设备, 2019(2): 102)
- [42] Zhao G Y, Wu P, Pei D F, et al. Study on the mining mode in deep metal mines and its technological system based on green mining. *Gold*, 2020, 41(9): 58
(赵国彦, 吴攀, 裴佃飞, 等. 基于绿色开采的深部金属矿开采模式与技术体系研究. 黄金, 2020, 41(9): 58)
- [43] Liu X H. Tailings paste disposal will become the main trend of green mining of metal mines. *China Mining News*, 2018-6-20(3)
(刘晓慧. 尾矿膏体处置将成金属矿绿色开采主趋势. 中国矿业报, 2018-6-20(3))
- [44] Ruan Z E, Wu A X, Jiao H Z, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China. *Chin J Nonferrous Met*, 2022, 32(1): 286
(阮竹恩, 吴爱祥, 焦华喆, 等. 我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 286)
- [45] Wu A X, Wang Y, Wang H J. Status and prospects of the paste backfill technology. *Met Mine*, 2016(7): 1
(吴爱祥, 王勇, 王洪江. 膏体充填技术现状及趋势. 金属矿山, 2016(7): 1)
- [46] Wu A X, Wang H J. *Theory and Technology of Metal Paste Filling*. Beijing: Science Press, 2015
(吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术. 北京: 科学出版社, 2015)
- [47] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2015
- [48] Wang L H. From intelligence science to intelligent manufacturing. *Engineering*, 2019, 5(4): 615
- [49] Zhou J. Research on the construction of enterprise integration management system. *Mod Ind Econ*, 2013(11): 16
(周剑. 企业两化融合管理体系构建研究. 现代产业经济, 2013(11): 16)
- [50] Gustafson A, Lipsett M, Schunnesson H, et al. Development of a Markov model for production performance optimisation. Application for semi-automatic and manual LHD machines in underground mines. *Int J Min Reclam Environ*, 2014, 28(5): 342
- [51] Li J G, Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, 2018, 4(3): 381
- [52] 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)
- [53] Xie H P, Wang J H, Ju Y. *Coal Industry Reform: Strategies and Directions*. Beijing: Science Press, 2018
(谢和平, 王金华, 鞠杨. 煤炭革命的战略与方向. 北京: 科学出版社, 2018)
- [54] Ranjith P G, Zhao J, Ju M H, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review. *Engineering*, 2017, 3(4): 546
- [55] Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources. *J China Coal Soc*, 2017, 42(3): 547
(谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547)
- [56] 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)
- [57] 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)
- [58] Liang W G, Zhao Y S, Xu S G, et al. Theoretical study of *in situ* solution mining. *J Taiyuan Univ Technol*, 2012, 43(3): 382
(梁卫国, 赵阳升, 徐素国, 等. 原位溶浸采矿理论研究. 太原理工大学学报, 2012, 43(3): 382)
- [59] Bhargava S K, Ram R, Pownceby M, et al. A review of acid leaching of uraninite. *Hydrometallurgy*, 2015, 151: 10
- [60] Tu S H, Hao D Y, Miao K J, et al. Research of synergetic mining for mining, dressing and backfilling integrated deep mines with complicated systems. *J China Univ Min Technol*, 2021, 50(3): 431
(屠世浩, 郝定溢, 苗凯军, 等. 深部采选充一体化矿井复杂系统协同开采. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 431)
- [61] 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)
- [62] Luo X Y, Li J N, Lang D. Basic connotation, core problems and key technologies of wisdom mine. *Ind Mine Autom*, 2019, 45(9): 61
(罗香玉, 李嘉楠, 郎丁. 智慧矿山基本内涵、核心问题与关键技术. 工矿自动化, 2019, 45(9): 61)
- [63] Lyu P F, He M, Chen X J, et al. Development and prospect of wisdom mine. *Ind Mine Autom*, 2018, 44(9): 84
(吕鹏飞, 何敏, 陈晓晶, 等. 智慧矿山发展与展望. 工矿自动化, 2018, 44(9): 84)
- [64] Zhao M L. Research on the framework and development prospect of intelligent mine. *Sci Technol Innov*, 2019(23): 180
(赵明磊. 智慧矿山框架与发展前景研究. 科学技术创新, 2019(23): 180)
- [65] Zhang Y M. Interpretation of smart earth and smart city. *Inf China*, 2010(10): 23
(张永民. 解读智慧地球与智慧城市. 中国信息界, 2010(10): 23)