金属矿深井采矿工艺回顾与发展展望*

林卫星[1,2]，张芫涛[3]，龚永超[1,4]，陆锦涛[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012；
3.中色非洲矿业有限公司， 北京 100089；
4.五矿集团国创中心科技(湖南)有限公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：随着浅部金属矿产资源日益枯竭，向深部进军已成为保障国家资源安全的必然战略选择。然而，深部“三高一扰动”的复杂地质力学环境，致使传统回采工艺在安全性、成本管控及作业效率等方面面临严峻挑战。通过梳理国内外典型深井矿山工程实践与近年科研成果，系统综述了金属矿深井开采的发展现状、关键工程技术难点及主要工艺技术路径，分析了不同赋存条件下深井采矿方法的适用性和局限性，指出“开采规模化、装备智能化、作业连续化”是深井开采技术变革的核心方向。针对深部厚大稳固矿体、破碎矿体及薄矿脉三类典型矿体赋存条件，分别提出以高应力耦合破岩与模块化连续回采、环境重构与卸压开采、精细化爆破与无废高效回采为核心的工艺技术体系，同时分析了非爆机械化连续开采技术在降低扰动、提升本质安全水平方面的应用潜力。研究旨在为我国金属矿深部开采由传统模式向智能化、连续化技术体系转型提供理论依据与技术路径，助力形成金属矿产资源开发新质生产力。

关键词：深井开采；连续开采；智能开采；非爆开采；规模化开采

中图分类号：TD853 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)09-0007-13

Review and Development Prospects of Deep Mining Technology for Metal Mines

Lin Weixing[1,2], *Zhang Yuantao*[3], *Gong Yongchao*[1,4], *Lu Jintao*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.NFC Africa Mining PLC, Beijing 100089, China;
4.Minmetals National Innovation Center Technology (Hunan) Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: As shallow metal mineral resources become increasingly depleted, advancing into the deep subsurface has become an inevitable strategic choice for safeguarding national resource security. However, the complex geomechanical environment characterized by “three highs and one disturbance” in deep mining poses severe challenges to conventional stoping methods in terms of safety, cost control, and operational efficiency. By reviewing typical engineering practices of deep mines at home and abroad and recent research achievements, the development status, key engineering technical difficulties, and main technological paths of deep metal mining were systematically summarized. The applicability and limitations of deep mining methods under different ore body occurrence conditions was analyzed, and it was pointed out that “large-scale mining, intelligent equipment, and continuous operation” constitute the core direction of deep mining technological transformation. For three typical types of ore body occurrence conditions, namely thick and stable ore bodies, fractured ore bodies, and thin veins in deep mining, technical systems were respectively proposed with high-stress coupled rock fragmentation and modular continuous stoping, environmental reconstruction and stress-relief mining, as well as precise blasting and waste-free efficient stoping as the core. Meanwhile, the application potential of non-explosive mechanized continuous mining technology in reducing disturbance and enhancing inherent safety was also analyzed. This study aims to provide a theoretical basis and technical pathways for the transformation of deep metal mining in China from traditional modes to intelligent and continuous technology systems, thereby contributing to the formation of new quality productive forces in metal mineral resource development.

Key words: Deep mining, Continuous mining, Intelligent mining, Non-explosive mining, Large-scale mining

---

* **收稿日期**：2025-12-04
基金项目：国家科技重大专项项目(2025ZD1010701)；中国五矿集团有限公司科技专项计划项目(2023ZXB01，2026ZXB01)
作者简介：林卫星(1983—)，男，湖南怀化人，博士，正高级工程师，主要从事金属矿山采矿工程技术研究。E-mail：lwx09@163.com
通信作者：张芫涛(1999—)，男，湖南怀化人，硕士，助理工程师，主要从事深井矿山开采技术研究。E-mail：1440579878@qq.com

0 引言

矿产资源的长期开发导致浅层矿体趋于枯竭,促使全球矿业活动向地球深部延伸。据不完全统计,全球开采深度超过 1 000 m 的金属矿已超 120 座,最大采深达 4 350 m[1]。其中,我国千米深井 30 余座,最大采深超 1 600 m,并正向深部快速延伸[2]。深地资源储量巨大,加强深部矿产勘探开发,是落实习近平总书记"向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题"指示的重要举措,是解决国家资源安全问题的重要途径;深井开采是我国以及全球矿产资源开发的必然趋势[3]。

然而,目前各界对于深井开采的定义并不统一,如美国矿务局(USBM)认为回采深度超过 1 524 m 即为深井开采;而南非作为矿业大国,其矿业界将回采深度超过 1 500 m 视为深井开采;我国《采矿手册第四卷》中,将 600 m 作为深部开采的界限。相较于单纯以深度(如 600 m 或 1 000 m)作为划分标准,本文认为应以深部岩体力学行为的转变作为核心判据,即当采矿工程面临高地应力诱发的岩体流变与岩爆风险、高地温导致的热害环境以及高井深带来的提升排水难题时,即进入深部开采范畴。

这种"三高"特征与强烈的工程扰动耦合,使得深部岩体表现出显著的非线性力学响应,以及深部金属矿床具有构造应力大、矿体形态不规则、赋存条件复杂的特点,使得深部开采存在着低效率、不安全和高成本等诸多难题[4],导致传统采矿理论与工艺失效。因此,亟须建立适应深部环境的全新采矿工艺体系。

为此,基于文献回顾与工程实践,本文旨在系统评估深井采矿的现状与主要障碍,分类总结针对典型赋存条件的工艺路线,并提出实现规模化、连续化与智能化的技术路线与研究优先级,为后续理论研究与工程示范提供参考。

1 深井开采现状

1.1 国外深井开采现状

国外深井开采的研究起步较早,尤其以南非、加拿大、美国等为首的矿业发达国家对深井开采的布局较早。早在 1908 年,南非便组织专业人员研究深井的冲击地压现象,20 世纪 60 年代,南非已开展大量的深部开采基础性研究与相关工程实践工作;加拿大在 20 世纪 80 年代便已利用计算机来开展岩爆研究,在深井岩爆以及支护方面取得了大量成果,极大推动了全球深井开采的研究;美国密西根工业大学等高校在 20 世纪 60 年代开展了深井岩爆相关研究,其在全球岩爆预测及控制领域处于领先地位。除上述国家外,澳大利亚、印度、欧盟及俄罗斯等也均在深井开采领域开展了大量研究[5-7]。

当前全球开采深度超过 1 000 m 的金属矿山已超 120 座,而开采深度最大的前十座矿山均在国外。南非深井矿山的数量与开采深度都位列世界之首,其中全球最深的地下矿山为南非的 Mponeng 金矿,目前开采深度已达 4 350 m,南非仍有多个矿山开采深度超 3 000 m。而加拿大深井矿山最大开采深度达 3 100 余米。除此之外,印度、美国、智利等国家最大开采深度均已超过 2 000 m。上述国外矿业发达国家对深井开采已有多年的研究历史,获得了丰富的研究成果与工程实践经验,且仍在不断继续深入对深井开采的研究[8-9]。

1.2 国内深井开采现状

虽然我国深井开采相关研究起步相对较晚,但由于国家的重视,其发展迅速。我国对深井开采相关现象的记录最早可以追溯到 1933 年,彼时在抚顺胜利矿便已有关于深井岩爆的记录。我国从"九五"开始直至"十四五",国家均对深井相关课题设有专项科研攻关与重点研发计划。国内如中南大学、东北大学、北京科技大学、长沙矿山研究院有限责任公司、矿冶科技集团有限公司等从事金属矿产资源研究工作的科研院校从国家需求出发,对深井开采面临的关键重点、难点问题开展大量研究与攻关,尤其在深部岩体力学、深井采矿、深井提升方式、深井高温热害处置等方面开展了大量工作,并取得了初步成果[10-12]。

相较于国外,我国深井矿山开采深度并不算大,会泽铅锌矿是我国开采深度最大的地下矿山之一,开采深度接近 1 600 m,其他国内典型深井矿山,如冬瓜山铜矿、三山岛金矿、金川二矿区、夹皮沟金矿等,开采深度均未超过 2 000 m,与南非、加拿大、美国等矿业发达国家还存在一定差距,且生产规模有限。当前我国深井矿山规模最大达 400 万 t/a,但一批深井超大规模矿山正在基建或即将投入生产,如:思山岭铁矿(1 500 万 t/a)、马城铁矿(2 200 万 t/a)、沙坪沟钼矿(1 000 万 t/a)、西鞍山铁矿(3 000 万 t/a)等[13]。我国部分深井矿山分布见表 1。

表 1 我国部分深井矿山分布

Table 1 Distribution of selected deep underground metal mines in China

矿山名称	所在省份	矿种	最大开采深度/m	预计/设计产能/(万 t/a)
马城铁矿	河北滦南	铁矿	900	2 200(设计)
凤凰山铁矿	山东临沂	铁矿	1 496	400(设计)
陈台沟铁矿	辽宁鞍山	铁矿	<1 000	1 100(设计)
三山岛金矿	山东莱州	金矿	1 900	396(设计)
夹皮沟	吉林	金矿	1 500	62.5(设计)
思山岭铁矿	辽宁本溪	铁矿	1 500	1 500(设计)
冬瓜山铜矿	安徽铜陵	铜矿	>1 000	390
沙坪沟钼矿	安徽金寨	钼矿	1 300	1 000(设计)

我国虽然在深井开采领域取得了大量研究成果,但在深井超大规模矿山资源开发基础理论和核心技术攻关上仍存在较大不足。如井下采选充一体化技术、非爆破岩开采等关键技术尚不成熟。深井矿山数字化、智能化也亟需相应的深井高效采矿工艺搭建应用场景[14]。

1.3 采矿方法

目前深井采矿方法仍主要沿用浅部开采的思路,包括空场法、充填法和崩落法三大类。但其结构参数、回采顺序、回采工艺等应根据深井矿山特点进行相应调整。由于深井开采“三高一扰动”的特点,深井开采以充填法为主。

对于崩落采矿法来说,其通过崩落围岩的方式管理采场地压,具有工艺简单、回采成本低等显著优势。但在深井开采地压较大,矿体崩落过程控制难度大,且随着开采的不断进行,崩落法极易产生岩层移动与地表塌陷,这是崩落法难以避免的重大缺陷,故目前深井回采很少使用崩落法。

而空场法在浅部回采时,通过留设矿柱可以很好地支撑采场,保证采场稳定。但随着回采深度的增大,预留矿柱的可靠性势必越来越低,一旦矿柱失稳,在高应力作用下很容易产生连锁反应,导致采场大范围垮塌[15]。

由此可见,随着开采深度的不断增大,崩落法与空场法由于其逐渐暴露出来的安全问题,将不再适用于深井矿山开采,充填采矿法是当前深井开采的主流采矿方法。而对于深井开采,无论是充填材料输送还是设备、人员等相关成本,相较于浅部均更高。且充填法工艺较为复杂,施工组织难度大,故未来深井开采还将要进一步降低回采成本,提高产能,通过模块化、连续化手段降低工艺与施工组织难度,通过智能化、机械化手段提高深井开采的本质安全水平[16-18]。

2 深井开采经典案例

针对深井开采目前存在的诸多难题,国内外科研院所及矿山企业也开展了大量的技术攻关与工程实践,并在很多方面取得了成功,形成了相应的技术成果。

2.1 国内深井开采典型案例

进入 21 世纪后,我国多个矿山迈入深井矿山行列,多个深井矿山企业与科研单位及高校合作展开了一系列深井开采相关研究,并取得了大量成果与成功的实践经验,这些深井开采的经典案例也为我国深井开采未来发展提供借鉴。

2.1.1 金川镍矿深井高效开采

金川矿是国内外闻名的大型铜镍矿,金川集团股份有限公司二矿区自回采至今已有近六十年的开采历史。其开采深度早已超过千米,目前每年采切的下降速度达 5~8 m,随着回采深度的增大,其地应力也在显著增加,矿山地质与岩体力学条件愈发复杂,矿岩也更加破碎,且巷道围岩多为软岩,碎胀蠕变明显。据统计,金川矿区有接近一半的巷道工程在施工结束后半年内进行返修,采场稳定也难以保证,是世界罕见的高应力特大型难采金属矿[19]。

为此金川集团股份有限公司联合长沙矿山研究院有限责任公司等,依托“十一五”“十三五”国家科技支撑计划,以“特大型矿床深部开采综合技术研究”“深部金属矿开采的卸荷原理与方法”“深井金属矿床超大规模高效开采关键技术研究”为题,结合金川集团股份有限公司二矿区深部开采的实际需求开展科技攻关。主要包括特大型矿床深部开采工艺,深部矿体开采过程中的应力集中、转移和释放变化规律,深部开采高应力岩体-支护-充填体之间的相互关系与作用机制,深部大面积开采采动环境监测及地压动态调控技术研究。

研究成果包括深部矿床开采环境重构理论与技术、盘区卸压开采理论与技术、高应力储能与爆破协同作用破岩技术、深部开采地压监测与灾害预警技术等;攻克了大型深部矿体复杂难采的技术瓶颈,提高了资源综合利用效率,使得金川集团股份有限公司二矿区生产能力达 420 万 t/a,为金川镍矿实现生产能力 1 100 万 t/a 提供了重要支撑。研究成果在凡口铅锌矿、会泽铅锌矿等 20 多座矿山推广应用,有效解决了深部矿床安全高效开采技术难题[19-20]。

2.1.2 玲南金矿深井破碎矿体安全开采

中矿金业股份有限公司玲南金矿位于山东省招

远市,矿床属大破碎带蚀变岩型、混合岩化热液金矿床。目前开采深度接近 1 000 m,此前矿山一直采用点柱式上向水平分层采矿法进行开采。但进入深部后,由于高地应力影响,矿柱、顶板岩爆显现明显,矿岩破碎,采场回采作业安全性较差,安全隐患处理难度较大。为此中金矿业股份有限公司联合长沙矿山研究院有限责任公司开展深井破碎矿体安全高效开采工艺攻关[21],研发包括锚索联合预支护交错式上向水平分层充填采矿法和进路预留空间转层互换上向进路充填采矿法协同应用、深井开采多种充填方式交替作业连续高效充填技术,深井高应力条件下软破矿岩高效支护技术,超前网状长锚索支护技术和管缝式锚杆施工冲击装置。

通过开展系列研究和技术成果应用,玲南金矿实现锚索联合预支护交错式上向水平分层充填采矿法采场生产能力 315 t/d,盘区生产能力 1 124 t/d,矿石损失率 7.7%,贫化率 6.4%;进路预留空间转层互换上向进路充填采矿法采场生产能力 86 t/d,盘区生产能力 200 t/d,矿石损失率 6.9%,贫化率 7.1%,实现了深井破碎矿体的安全高效开采。

2.1.3 冬瓜山铜矿深井多岩爆、高地热矿山开采

冬瓜山铜矿位于安徽省铜陵市,矿床埋藏深度约为 1 000 m,目前开采深度已达 1 000 m。据统计,冬瓜山铜矿深部地应力最大主应力超过 38 MPa,-875 m 中段水平温度高达 30～39 ℃,井下岩爆频繁,属于典型的大型深井高应力、多岩爆、高地热代表矿山,岩爆对作业安全的危害与深井热害问题显著。为此冬瓜山铜矿联合中南大学、长沙矿山研究院有限责任公司等多个科研院校开展相关科技攻关[22]。建立了微震监测系统、常规应力和位移监测系统及人工观察系统的动-静态联合监测的深井开采岩爆与地压监测系统[23]。由于井下岩温高、湿度大,对井下多级机站通风系统各级机站的风机进行远程集中监控,自动监测进回风巷道风流参数,实现深井智能化通风,改善深井回采环境。以上措施有效控制了岩爆与热害问题,为类似深井多岩爆、高地热矿山回采提供了经验。

2.2 国外深井开采典型案例

相较于国内深井开采矿山,国外深井矿山更侧重于采用大型的机械化设备、智能化矿山装备和控制系统,以实现深井矿山的大规模安全开采。

2.2.1 瑞典基律纳铁矿

瑞典基律纳铁矿作为世界最著名的铁矿之一,最早是露天开采,但随着矿体逐渐深入地表以下,转向了地下开采。目前地下开采深度已超过 1 365 m,并计划进一步深入。该矿体本身延伸很深,预计未来的开采深度可能接近 2 000 m。目前采用的采矿方法为大规模高分段无底柱崩落法,分段高度可达 50～55 m。矿山采用 Epiroc 公司生产的凿岩台车进行大直径深矿凿岩,采用 Sandvik 公司生产的装药台车进行装药,采用 Epiroc 公司生产的 25 t 铲运机进行远程铲装作业,喷、锚、网等支护作业也均采用大型智能遥控设备进行,该矿产能超过了 2 200 万 t/a。

2.2.2 赞比亚谦比希铜矿

谦比希铜矿位于世界闻名的刚果(金)—赞比亚铜矿带,该铜矿带典型特点为矿体破碎且地下水丰富。谦比希铜矿为第一家中资海外矿山,目前其东南矿体回采深度接近 1 100 m。目前主要采用预切顶分段空场嗣后充填采矿法开采,使用 Sandvik 公司生产的智能凿岩台车进行切顶层的掘进回采,随后使用锚索台车进行破碎顶板的支护,支护完成后采用智能中深孔台车进行中深孔凿岩,采用 GETMAN 公司生产装药台车进行精细化装药,采用 Sandvik 公司生产的 14 t 铲运机与 45 t 矿卡进行无人自动化铲装及运输,实现了深井破碎矿体的安全高效回采。

2.3 国内外技术路径对比分析

综合对比国内外深井开采实践,可以看出显著的技术路径差异:国外矿山回采工艺较为简单,倾向于通过高机械化、自动化装备实现大规模崩落或深孔回采,以“抗”和“避”为主,侧重效率提升;而国内矿山受限于复杂的地质构造与地表保护要求,主要采用充填采矿法,侧重于通过充填体支撑与应力释放来“控”制地压,回采工艺复杂。然而,随着开采深度突破千米大关,单一的传统路径均难以兼顾安全与效率,仅通过部分技术的革新是远远不够的,亟须融合“规模化破岩”与“精细化地压管理”的新型工艺体系,实现真正的变革。

3 深井开采难题

深井开采的核心难题在于多场耦合下的岩体失稳机制与工程响应,具体表现在以下 3 个方面。

(1) 高能级岩体灾变机制:高储能岩体在开采扰动触发下,极易发生瞬时能量释放(岩爆),或表现为大变形流变,导致支护系统失效。

(2) 多场耦合环境恶化:地热场与开采扰动场的叠加,不仅恶化作业环境,更通过热应力进一步削弱岩体强度,增加了围岩控制的复杂性。

(3) 传统工艺的不适应性:传统的钻爆法间断作业模式,加剧了围岩的加卸载循环效应,不仅效率

低,且人员暴露时间长,本质安全度不足。

上述表现严重影响深埋矿产资源的安全、高效开发利用,给深井采矿带来了一系列的工程技术与生产运营问题,在深井开采具体生产实践中又表现为岩层稳定性、岩石力学、深井开采相关设备、通风、采矿工艺、人员安全与作业环境以及成本控制等方面的问题[24],包括但不限于以下问题。

(1) 高地压带来的稳定性问题:随着开采深度的增加,地压逐渐增大,岩石强度和稳定性会受到影响,导致巷道变形、采场冒顶等一系列稳定性问题,如图 1 所示,岩爆等地质灾害随着开采深度的增大将更易发生[25-28]。

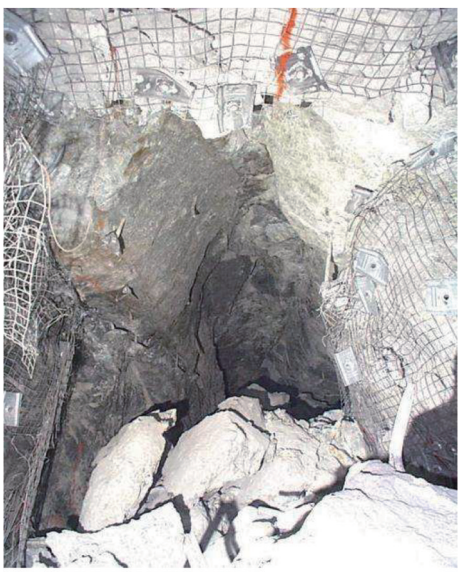


图 1 深井高地压导致的巷道变形

Fig.1 Roadway deformation caused by high ground pressure in deep mines

(2) 深井岩体力学问题:相较于浅部岩体,深埋岩体的力学性质和破坏、断裂规律发生显著变化,较为典型的现象是深井岩体在高应力作用下逐渐由塑性向流塑性转变[29-30],这些均会影响矿山开采效果和安全性。

(3) 高地热带来的极端作业环境问题:由于开采深度大,通风条件恶劣,炮烟、粉尘等有毒有害气体与物质容易聚积,威胁井下作业人员健康。同时,深井结构复杂,通风难度大,采场温、湿度难以控制,也进一步恶化了深井作业环境[31-32]。

(4) 采矿工艺问题:相较于浅部开采,深井开采环境发生了重大变化,岩体性质也有所区别,无法沿用、照搬浅部矿体开采工艺,应革新采矿工艺,采用与深井特点相适应的新工艺,如采用机械非爆连续破岩取代传统基于钻爆法的采矿工艺,或采用高压水射流、激光、高应力诱导致裂等破岩技术;另外要大幅提高机械化、智能化程度,大幅减少人员深井作业风险与劳动强度[33]。

(5) 深井开采相关设备问题:深井高温、高地压等特点要求设备更强大和更耐用,以适应深井的各种极端环境,甚至需要使用专门的深井开采设备[34]。

(6) 成本控制问题:深井开采的成本较高,包括高额的设备投入、人力资源成本、更大体量的能源与材料消耗,以及更高的提升成本与难度等。如何有效控制成本,提高开采效率是深井开采中需要解决的重要问题[35]。

(7) 安全问题:深井开采环境恶劣,岩体稳定性相对更差,安全风险大。在开采过程中,需要采取有效的安全措施与多种监测预警手段,以保证开采安全[36]。

总之,深井开采从安全、效率、设备应用、作业环境、经济效益等方面都存在大量亟需解决的问题,导致目前深井矿山回采存在低效率、低产能、高风险、高成本的特点。如前文所述,目前国内各个深井矿山,主要从个别方面入手,以解决深井开采带来的部分问题,但若要系统性解决上述难题,还需从工艺入手,形成完整的深井开采工艺体系,以规模化、连续化、智能化的回采工艺实现深井矿山高效率、高产能、低风险、低成本开采。

4 深井开采发展趋势

据统计显示,我国金属矿产资源的开发正以年均 10～30 m 的速度逐渐向深部延伸。预计未来 15 年内,超过 30%的矿山将进入深地开采阶段,最大开采深度将达到 2 000～3 000 m[37]。随着开采深度的不断增加,相应的回采成本也将随之上升,同时深井开采带来的“三高一扰动”问题也将严重影响矿山企业的安全、高效生产。为应对这一挑战,深部矿产资源开发势必需要进行革新。

4.1 总体发展战略:从“间断与被动”走向“连续与智能”

未来深井开采必须突破国内矿山典型的“一矿一法一工艺”的经验主义局限,构建标准化的技术体系。为了实现我国深井开采的安全、高效、智能、经济这一目标,必须有针对性地开发出完整、可推广的深井矿山开采工艺体系,其核心在于实现三大转变:从间断低效作业向连续规模化作业转变,从人工调控向智能决策转变,从被动支护向主动地压调控转变。规模化、智能化、连续化则是未来开发深井安全开采工艺体系的必然方向[38]。

“智能化”将在深井开采中发挥关键作用,通过

实时数据监测、远程操作和自动化控制系统,可以更有效地管理深井开采作业。此外,大型化的设备和非爆连续化的技术应用将有助于提高生产效率,减少对开采扰动的影响,并降低作业安全风险。

根据我国深井矿产资源赋存特点,结合当前深井开采工艺与装备现状,以及大量工程实践经验,本文认为,为实现深井开采的“规模化”“智能化”“连续化”,可以从以下 4 个具有显著特点和巨大推广应用价值的工艺技术体系方向开展技术攻关。

(1) 基于高应力耦合破岩大规模深孔爆破技术的厚大连续矿体开采工艺;

(2) 基于环境重构技术的软破矿体中深孔卸压开采工艺;

(3) 基于高效精细化中深孔爆破技术的薄矿脉开采工艺;

(4) 基于机械化非爆破岩、落矿技术的深井连续开采工艺。

从以上 4 个方面,对三种具有典型赋存特点的深井矿体回采,引进对应的先进工艺,同时引入非爆连续这一前瞻性技术,以实现深井矿山规模化、安全化、智能化、连续化回采,以下将围绕上述四大工艺技术体系,详细阐述其技术攻关方向与价值。

4.2 针对深井厚大稳固矿体的“诱导崩落与连续开采”协同范式

深部厚大且较稳固的深部矿体开采主要面临的问题是如何提高深部开采效率、降低深井回采成本,为了应对此类厚大稳固深部矿体开采的挑战,相关学者提出了基于高应力耦合破岩大规模深孔爆破技术的厚大连续矿体开采工艺[5,39],构建“诱导崩落与连续开采”的协同范式。该工艺涵盖大规模时-空-场模块化连续开采模式及理论、大结构模块化阶段深孔采矿方法、高应力耦合破岩的绿色低碳崩矿技术等多项具体技术模块,以实现深井厚大稳固矿体的高效、绿色、低碳开采。

大规模时-空-场模块化连续开采模式及理论研究如何实现高地应力场的平衡连续回采,通过在时域、空域和场域上的模块化设计,能够更好地适应深部矿体的异质性和复杂性,提高开采的整体效益,以保障开采过程的安全性和效率。该理论可指导深井复杂地质环境下的连续开采,提高资源利用率和降低开采成本。

大结构模块化阶段深孔采矿方法针对厚大矿体的特点,采用模块化设计和大结构参数的采矿方法。通过模块化的设计,可以更好地适应深井复杂多变的地质条件与不同特点的深井矿山,而阶段深孔爆破技术的应用则进一步提高采场生产能力,此技术能更好地掌握开采进度和安全性,提高开采效率。

高应力耦合破岩的绿色低碳崩矿技术研究如何利用深井高应力的特点进行耦合破岩和崩矿。该技术将在高应力场辅助下进行大规模深孔爆破,以最小的破坏力、最低的能耗将矿石崩落。同时,这项技术探索如何将爆破过程中的冲击能、地震波等转化为可利用的能源形式,通过减少能源消耗和环境碳排放,实现在高应力场下的可持续破岩,符合绿色开采理念[40-41]。

此外,还构建了厚大矿体模块化连续高效开采技术体系(见图 2),研究如何将各项技术进行整合、优化,形成一套完整的开采技术体系。该体系基于模块化设计理念,涵盖勘探、设计、回采的各个环节,采用超大采场采充出并行作业的连续采矿工艺技术,实现采充出工艺的连续进行(见图 3),取代过往钻爆法间断式的作业模式。通过这种工艺技术,可以提高矿山开采效率、降低作业成本,并保障作业的安全性。

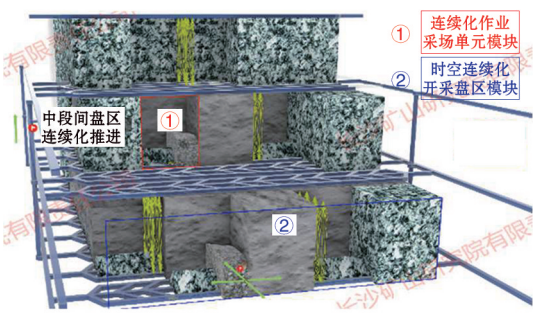


图 2 模块化连续高效开采技术示意

Fig.2 Schematic diagram of modular continuous and efficient mining technology

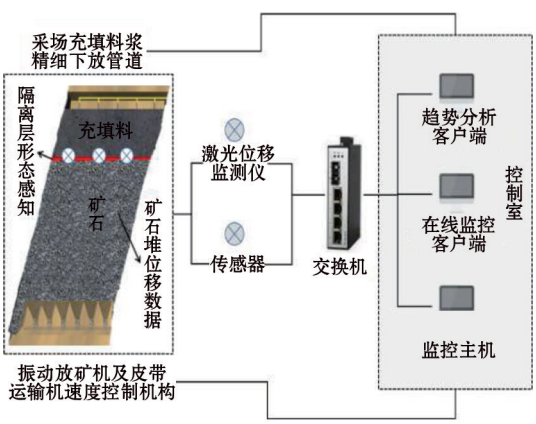


图 3 采充出并行智能连续采矿工艺

Fig.3 Parallel, intelligent and continuous mining process with synchronous mining, filling and ore drawing

采场智能连续出矿控制技术将研究如何利用各类传感器、物联网通信和控制技术对采场进行智能化控制。通过实时监测矿石的位置、质量、品位等信息,实现对出矿过程的精确控制,并采用多点连续提升技术,实现从采场出矿到矿石提升的全运输流程连续化,有助于提高出矿效率,降低出矿成本,提高深井开采的自动化水平,降低操作风险并保障连续出矿过程的安全性。

综上所述,针对深部厚大且较稳固的深部矿体开采,进行这一系列技术的整合,旨在实现高地应力场平衡连续、单元模块化连续推进、作业工序在时间上并行连续等目标。这将为深井装备作业的协同智能化提供场景与平台,推动我国深井厚大稳固类矿产资源开发的进步和提高资源利用率。构建"采-充-出并行作业时空模型",打破传统工序的时间序列约束,实现模块化连续推进,为实现深部稳固厚大矿床采矿的全面连续规模化作业提供技术支撑[42-43]。

这一工艺技术体系的完善可保障国内未来深井厚大矿体的超大型矿山(如思山岭铁矿、陈台沟铁矿)的生产能力[44],对提升我国矿山开采技术水平和未来市场的竞争力具有重要的支撑作用,并可在诸多大型矿山中形成规模化智能回采的示范效应,为深井大型矿山的规模化开采保驾护航。

4.3 针对深井软破矿体的"环境重构与卸压开采"协同范式

面对深井高应力影响,深部矿岩相对于浅部矿岩更为破碎,回采作业环境的安全风险也相应增大。为此,针对深埋厚大、软破的矿体,学者们开发了一套基于环境重构技术的软破矿体中深孔卸压开采工艺,构建"环境重构与卸压开采"的协同范式。这一创新工艺涵盖多项关键技术应用,包括破碎矿岩环境重构技术与材料、破碎矿体大跨度空场嗣后充填采矿技术、低扰动中深孔控制爆破技术、软破矿体中深孔高效开采技术等,旨在确保深部软破矿体的安全、高效回采[45]。

具体来说,破碎矿岩环境重构技术与材料的应用,有助于改善矿岩的物理性质和结构,提高矿体的整体稳定性和可开采性。破碎矿体大跨度空场嗣后充填采矿技术则通过采场合理优化布置以及环境重构技术的应用,最大限度扩大采场结构参数,实现破碎矿体的大跨度回采。图 4 为环境重构大跨度空场嗣后充填采矿方法示意图,通过对采场周边破碎的矿岩环境进行加固与重构,以实现破碎矿体大跨度条件下的安全开采。低扰动中深孔控制爆破技术通过灵活的采矿工艺,合理设计爆破方案,实现对周围岩体的精准爆破,最大限度地减少爆破对周围岩体的扰动和破坏。软破矿体中深孔高效开采技术可为软破矿体的安全高效、大规模开采提供全面的技术支持。

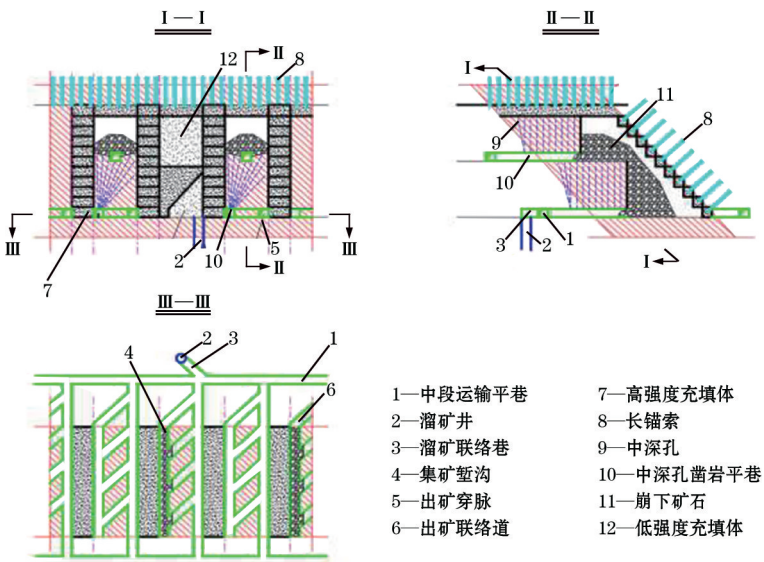


图 4 环境重构大跨度空场嗣后充填采矿示意

Fig.4 Schematic diagram of large-span open stope subsequent filling mining based on environmental reconstruction

通过协同运用上述技术,成功克服了上向水平充填法、上向进路法、浅孔留矿法等传统采矿方法中人员暴露在危险顶板下作业的缺陷,实现了对软破矿体的深部高效开采。这一工艺技术体系对于金川矿、凡口铅锌矿等典型深井破碎矿体矿山及未来更多的深井破碎矿体来说,不仅可以提高矿山生产能

力,还大幅度提高了采矿作业的安全性,降低了破碎矿体回采安全风险,为我国未来深井厚大软破矿产资源的开发利用提供新的解决方案[46-48]。

4.4 针对深井薄矿脉的“精细化爆破与高效无废开采”协同范式

面对深井薄矿脉矿山,若继续沿用浅部的小参数采场和浅孔爆破的开发模式,将严重制约矿山的经营生产。为了克服这一困境,学者们研发了基于高效精细化中深孔爆破技术的薄矿脉开采工艺[49-51],构建了“精细化爆破与高效无废开采”的协同范式。这一工艺集成了多项关键技术,旨在推动深井薄矿脉的高效智能回采。

首先,引入了采-选-充协同集约化开采技术,通过整合采矿、选矿和充填等环节,以实现各个环节的协同作业,提高矿山生产效率和资源利用率;结合小型智能装备,实施采选充一体化作业,实现废石井下原位充填,最大限度减少对深部地层的扰动。这种集约化开采技术适用于深井有限的作业环境,有助于克服薄矿脉传统开采模式的限制,降低回采成本,并实现无废开采。其次,采用约束空间下中深孔爆破技术,以适应深井薄矿脉的独特特点[52]。该技术通过在有限的空间内精确控制爆破参数和爆破方式,实施精细化中深孔爆破,极大地提高了薄矿脉生产能力,同时降低对周边矿岩的扰动,提高了爆破效果,确保薄矿脉的安全、高效开采。针对小型化凿岩-出矿装备,研发的适用于薄矿脉开采的紧凑型设备,不仅可以适应深井薄矿脉有限的工作空间,还可以提升开采作业的精准度和效率,减轻工人劳动强度,提高作业安全性。最后,通过构建薄矿脉中深孔高效开采技术体系,整合各项技术,使其协同工作,以适应深井薄矿脉的开采需求[53-54]。

此工艺技术体系成熟后,可大量应用于如贵州李家湾锰矿、辰州矿业等深井薄矿脉矿体开采中[55],通过克服薄矿脉矿山生产能力低、工人劳动强度大、资源回收利用率低的缺点,实现深井薄矿脉的高效智能回采;同时,也可大幅提高深井薄矿脉回采的安全性和生产效率,降低作业成本,为深井矿山的可持续经营提供了新的路径[56-57]。

4.5 前瞻性技术体系:深井非爆机械化连续开采

由于深井开采环境具有复杂性和高风险性,传统钻爆法开采存在安全条件差、作业环节分散不连续等问题,这给实现深井回采的安全高效化、自动化和智能化带来了挑战。随着机械设备的不断发展,已经生产出可以应用于较硬矿岩的非爆掘进设备,如小型的硬岩悬臂掘进机(见图 5),此类设备的出现也为深井矿山开采提供了新的思路。应用智能非爆采矿关键技术,可以从源头上改变深井矿产资源的开发模式,提高深井矿山开采的自动化和智能化水平[58]。研发的基于机械化非爆破岩、落矿技术的深井连续开采工艺应用了多项关键技术,可推动深井开采的智能非爆连续回采[59]。



图 5 悬臂式掘进机

Fig.5 Boom-type roadheader

引入基于机械破岩的连续采矿方法及工艺,通过机械化的破岩方式代替传统钻爆法,实现了破岩落矿过程的连续性和高效性。研发非均质硬岩规模组合破岩技术,针对不同物理力学性质岩体,采用不同的破岩方法和工艺,可适应深井矿山中非均质硬岩的复杂环境,并提高破岩效率和降低破岩成本。采用非爆多机多工艺高效协同掘支一体化综合技术,可实现掘进、支护不同机械设备和工艺流程之间的高效协同作业,降低作业环节的分散性。提高作业效率和安全性[15,60]。

此外,应用开采环境感知及装备智能决策控制技术,通过传感器和智能化控制系统,实现设备对开采环境的实时感知与信息收集,并对开采环境变化做出智能决策。构建基于深井矿山数字孪生技术的虚拟多功能交互系统搭载平台构建技术,通过数字孪生技术和虚拟现实技术,实现对深井矿山的全方位数字化模拟和可视化监控,为决策者提供更加直观和准确的数据支持,为深井开采提供全方位的监测和控制[61-62]。

此工艺技术体系的形成,代表了采矿工业的“去爆破化”革命。传统爆破产生的震动波是深部诱发岩爆的主要外部动载源,而机械破岩(如截齿、盘形滚刀、高压水射流等)能从源头上消除爆破动载,是实现深部本质安全的终极路径,可大幅推广应用至深井软岩乃至硬岩矿山,以提高深井采掘作业的安全性和效率,降低深井采掘作业的成本,创造显著的

社会经济效益[63]。

5 总结与展望

5.1 研究总结与意义

深部矿产资源开发是解决国家资源问题的战略途径,也是全球矿业发展的必然趋势[64]。然而,面对深井"三高一扰动"的极端力学环境,传统基于浅部经验的"间断、被动、人工"作业模式已触及安全与效率的"天花板"。本文通过剖析国内外深井开采技术现状,明确了深井开采必须向"规模化、连续化、智能化"转型的核心论点。

基于此,本文针对三种典型赋存条件的深部矿体,构建了差异化的技术范式:针对厚大稳固矿体,提出了"诱导崩落与连续开采"协同范式,利用高应力辅助破岩实现低碳规模化作业;针对软破矿体,提出了"环境重构与卸压开采"协同范式,通过改变围岩介质属性实现由"被动支护"向"主动调控"的转变;针对薄矿脉,提出了"精细化爆破与高效无废开采"协同范式,解决了资源回收率低与贫化率高的矛盾。此外,非爆机械化连续开采技术的提出,为从源头上消除爆破动载诱发的动力灾害提供了变革性路径。

5.2 现存问题与不足

尽管我国在深井开采领域已取得了长足进步,但当前技术体系仍存在以下瓶颈与不足。

(1) 深部岩石力学基础理论滞后于工程实践:对深部高应力、高地温耦合作用下的岩体流变、岩爆孕育演化机制尚缺乏定量的精细化描述,导致采矿设计往往依赖过大的安全系数,增加了开采成本。

(2) 核心智能装备适应性有待提升:虽然引进了部分国外先进设备,但国产深井高地压、高地温环境下的智能感知传感器、耐高温电子元器件及无人化采掘装备的可靠性(MTBF)仍低于国际先进水平,制约了连续化工艺的全面落地。

(3) 技术标准体系尚未统一:国内深井矿山多呈"一矿一法"的离散状态,缺乏统一的深井开采工艺标准与规范,导致成熟技术难以快速复制推广,规模效应难以释放。

5.3 发展建议与展望

为了突破上述瓶颈,推动我国深井开采技术由"并跑"向"领跑"跨越,针对下一步需要重点开展的工作提出以下建议。

(1) 深化基础理论研究。应该加强深部多场耦合环境下岩体力学行为的研究,构建基于能量耗散与释放的深部岩体破坏准则,为"环境重构"与"应力调控"提供更精准的理论支撑。

(2) 攻克核心装备技术。可以重点布局耐高温、抗冲击的智能感知终端与执行机构研发,加速推进悬臂式掘进机、智能凿岩台车等非爆连续开采装备的深井适应性改造,实现装备与工艺的深度融合。

(3) 建设示范工程与标准体系。建议依托国内在建的千米级超大规模矿山(如思山岭铁矿、陈台沟铁矿等),建立深井智能化开采示范基地,验证并迭代本文提出的三大工艺技术体系,进而形成可推广的国家级或行业级深井开采技术标准。

综上所述,深井开采是一项复杂的系统工程。未来通过基础理论、工艺技术与核心装备的协同创新,必将形成具有中国特色的深井开采新质生产力,为保障国家矿产资源安全提供坚实的科技支撑,使我国跻身世界矿产资源开发强国前列。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰.深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(3):1-9.
Cai Meifeng. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2020,2(3):1-9.

[2] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
Xie Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1283-1305.

[3] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
Li Xibing, Zhou Jian, Wang Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.

[4] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
Li Xibing, Huang Linqi, Zhou Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.

[5] He Mingming, Zhao Jinrui, Deng Bianyuan, et al. Effect of layered joints on rockburst in deep tunnels[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2022,9(2):70-90.

[6] 刘育明,马俊生,郭雷,等.国外深井充填法矿山开采技术综述[J].中国矿山工程,2018,47(6):1-6.
Liu Yuming, Ma Junsheng, Guo Lei, et al. Summarization of mining technology with backfilling in foreign deep mines[J]. China Mine Engineering,2018,47(6):1-6.

[7] Nosov Viktor V, Borovkov Alexey I, Artyushchenko Artem P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission[J]. Resources,2022,11(10):87.

[8] Li Qi, You Shuang, Ji Hongguang, et al. Numerical analysis of thermal environment in deep mining[J]. Shock and Vibration,2021(3):5386002.

[9] Zhao Yuan, Zhao Guoyan, Zhou Jing, et al. Mining stress evolution law of inclined backfilled stopes considering the brittle-ductile transition in deep mining[J]. Mathematics, 2022,10(8):1308.

[10] 李俊平,管婷婷,冯嘉禹,等.矿震与冲击地压防治研究进展[J].中国安全科学学报,2024,34(1):85-93.
Li Junping, Guan Tingting, Feng Jiayu, et al. Research progress on prevention and control of mine earthquake and rock burst[J]. China Safety Science Journal,2024,34(1):85-93.

[11] 宫凤强,闫景一,李夕兵.基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性判据[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):1993-2014.
Gong Fengqiang, Yan Jingyi, Li Xibing. A new criterion of rock burst proneness based on the linear energy storage law and the residual elastic energy index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(9):1993-2014.

[12] 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[J].黄金,2020,41(9):58-65.
Zhao Guoyan, Wu Pan, Pei Dianfei, et al. Study on the mining mode in deep metal mines and its technological system based on green mining[J]. Gold,2020,41(9):58-65.

[13] 李真,闫广亮,宋建村,等.思山岭铁矿超深超大规模开采工艺与思考[J].矿业研究与开发,2023,43(8):1-6.
Li Zhen, Yan Guangliang, Song Jiancun, et al. Study and consideration on mining method of ultra deep and ultra large-scale in Sishanling Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):1-6.

[14] Wan Wenkai, Li Charlie C. Microscopic and acoustic interpretations of the physics of rock burst and the difference in fracturing patterns in class Ⅰ and class Ⅱ rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2022,55(11):6741-6862.

[15] Gao Feng, Zhou Keping, Dong Weijun, et al. Similar material simulation of time series system for induced caving of roof in continuous mining under backfill[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(3): 356-360.

[16] 林卫星,张芫涛,刘奇,等."双碳"目标下矿产资源开发布局思考[J].矿业研究与开发,2022,42(6):153-159.
Lin Weixing, Zhang Yuantao, Liu Qi, et al. Thoughts on the layout of mineral resources development under Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals[J]. Mining Research and Development,2022,42(6):153-159.

[17] 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[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):956-972.
Jiang Feifei, Zhou Hui, Liu Chang, et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):956-972.

[18] Chen Denghong, Li Chao, Hua Xinzhu, et al. Rebound mechanism and control of the hard main roof in the deep mining roadway in Huainan mining area[J]. Shock and Vibration,2021:4562365.

[19] 杨志强.金川镍矿床深部资源高效开发与综合利用的关键技术研究[J].Engineering,2017,3(4):276-291.
Yang Zhiqiang. Key technology research on the efficient exploitation and comprehensive utilization of resources in the deep Jinchuan nickel deposit[J]. Engineering, 2017, 3(4): 276-291.

[20] 寇永渊,李光,邹龙,等.金川二矿区+1 000 m中段水平矿柱回采方法研究[J].黄金科学技术,2020,28(3):353-362.
Kou Yongyuan, Li Guang, Zou Long, et al. Study on mining method of horizontal pillar in the middle section of +1 000 m in Jinchuan No.2 mining area[J]. Gold Science and Technology,2020,28(3):353-362.

[21] 路明福,宋嘉栋,扈守全,等.盘区交错式上向水平分层充填采矿法在玲南金矿的应用实践[J].矿业研究与开发,2016,36(4):1-3.
Lu Mingfu, Song Jiadong, Hu Shouquan, et al. Application of panel interlacing upward horizontal slicestoping and backfilling method in Lingnan Gold Mine[J]. Mining Research and Development,2016,36(4):1-3.

[22] 杨志国,于润沧,郭然,等.微震监测技术在深井矿山中的应用[J].岩石力学与工程学报,2008(5):1066-1073.
Yang Zhiguo, Yu Runcang, Guo Ran, et al. Application of microseismic monitoring to deep mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008(5):1066-1073.

[23] 党建东,张君.微震监测技术在冬瓜山铜矿的应用[J].现代矿业,2019,35(9):240-242.
Dang Jiandong, Zhang Jun. Application of microseismic monitoring technology in Dongguashan Copper Mine[J]. Modern Mining,2019,35(9):240-242.

[24] 崔峰,张廷辉,来兴平,等.冲击地压矿井科学产能确定初步构想[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1):48-59.
Cui Feng, Zhang Tinghui, Lai Xingping, et al. Preliminary conception of scientific productivity determination in rockburst mines[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2023,40(1):48-59.

[25] 王少锋,孙立成,周子龙,等.非爆破岩理论和技术发展与展望[J].中国有色金属学报,2022,32(12):3883-3912.
Wang Shaofeng, Sun Licheng, Zhou Zilong, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(12):3883-3912.

[26] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673.
Feng Xiating, Xiao Yaxun, Feng Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(4):649-673.

[27] Zhang Xiangyu, Yan Peng, Luo Sheng, et al. Numerical investigation of blasting damage characteristics and optimization of fan-pattern boreholes in deep mining[J]. Arabian Journal of Geosciences,2022,15(19):10663-9.

[28] 乔河,唐春安,李晓,等.岩爆及采矿诱发岩体失稳破坏过程数值模拟新方法[J].地质力学学报,1999(1):62-66.
Qiao He, Tang Chun'an, Li Xiao, et al. New numerical simulation method of rock failure process under rockburst and excavating[J]. Journal of Geomechanics, 1999(1):62-66.

[29] 梁正召,钱希坤,张亚芳,等.深部高地压条件下岩石动态断裂特性的数值模拟(英文)[J].Journal of Central South University,2022,29(2):624-644.
Liang Zhengzhao, Qian Xikun, Zhang Yafang, et al. Numerical simulation of dynamic fracture properties of rocks under different static stress conditions[J]. Journal of Central South University,2022,29(2):624-644.

[30] 苏超,弓培林,康红普,等.深井临空高应力巷道切顶卸压机理研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(6):1104-1113.
Su Chao, Gong Peilin, Kang Hongpu, et al. Mechanism of roof cutting and pressure relief in gob-side and high-stress roadway in deep coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2020,37(6):1104-1113.

[31] 何满潮,徐敏.HEMS深井降温系统研发及热害控制对策[J].岩石力学与工程学报,2008(7):1353-1361.
He Manchao, Xu Min. Research and development of hems cooling system and heat-harm control in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008(7):1353-1361.

[32] 葛启发,朱维根,朱瑞军,等.深井难采矿体开采与通风控制技术研究[J].有色金属工程,2017,7(6):86-89.
Ge Qifa, Zhu Weigen, Zhu Ruijun, et al. Research of mining method and ventilation control for difficult-to-mine ore bodies in deep mine[J]. Nonferrous Metals Engineering,2017,7(6):86-89.

[33] 刘焕新,王剑波,赵杰,等.深井开采关键技术难题与解决途径初探[J].矿业研究与开发,2018,38(5):1-5.
Liu Huanxin, Wang Jianbo, Zhao Jie, et al. Critical technical problems of deep mining and preliminary solutions[J]. Mining Research and Development,2018,38(5):1-5.

[34] 唐礼忠,杨承祥,潘长良.大规模深井开采微震监测系统站网布置优化[J].岩石力学与工程学报,2006(10):2036-2042.
Tang Lizhong, Yang Chengxiang, Pan Changliang. Optimization of microseismic monitoring network for large-scale deep well mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(10):2036-2042.

[35] 吴姗,杨小聪,郭利杰.高应力环境下深部金属矿整体规划的思考与展望[J].煤炭学报,2019,44(5):1432-1436.
Wu Shan, Yang Xiaocong, Guo Lijie. Thinking and prospect of overall planning for deep metal mine in high stress environment[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1432-1436.

[36] 蔡鑫,陈立业,周子龙,等.扰动诱发高应力岩石动力响应及岩爆灾变机制[J].中国有色金属学报,2024,34(7):2463-2475.
Cai Xin, Chen Liye, Zhou Zilong, et al. Dynamic response law of high-stressed rock triggered by dynamic loading and mechanism of rockburst occurrence[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(7):2463-2475.

[37] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering Sciences,2019,41(4):417-426.

[38] 高玉兵,杨军,张星宇,等.深井高应力巷道定向拉张爆破切顶卸压围岩控制技术研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(10):2045-2056.
Gao Yubing, Yang Jun, Zhang Xingyu, et al. Study on surrounding rock control of roadways in deep coal mines based on roof cutting and pressure release technology by directional tensile blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(10):2045-2056.

[39] Castro RaúL, Riquelme José, Widzyk-Capehart Eleonora, et al. Automation fundamentals of continuous mining system[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment,2015,29(5):419-432.

[40] Dong Longjun, Zhu Huanyu, Yan Fang, et al. Risk field of rock instability using microseismic monitoring data in deep mining[J]. Sensors, 2023,23(3):1300.

[41] Li Huaibin, Zhao Xingdong, Dai Bibo, et al. Study on the evolution and prediction of fracture depth of surrounding rock in deep mining roadway based on numerical analysis and borehole detection[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:1024240.

[42] Long Hezhi, Ping Lucai, Feng Zhangxiu, et al. Numerical and field investigations of rockburst mechanisms triggered by thick-hard roof fracturing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2022,55(11):6863-6886.

[43] Eremenko A A, Mulev S N, Shtirts V A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions[J]. Journal of Mining Science,2022,58(1):10-19.

[44] 闫广亮,李真,张芫涛,等.思山岭铁矿地应力分布规律与采场结构参数优化[J].金属矿山,2023(10):1-9.
Yan Guangliang, Li Zhen, Zhang Yuantao, et al. In-situ stress distribution characteristics and optimization of stope structure parameters in Sishanling Iron Mine[J]. Metal Mine,2023(10):1-9.

[45] 康红普,姜鹏飞,杨建威,等.煤矿千米深井巷道松软煤体高压锚注-喷浆协同控制技术[J].煤炭学报,2021,46(3):747-762.
Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Yang Jianwei, et al. High-pressure grouting-shotcreting collaborative control technology for soft coal in roadways of 1 000-meter-deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(3):747-762.

[46] 曹港,欧任泽,朱晨迪,等.不良充填体条件下Ⅱ步骤采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2022,42(5):1-6.
Cao Gang, Ou Renze, Zhu Chendi, et al. Optimization of second step stope structure parameters under poor backfill condition[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):1-6.

[47] 康红普,范明建,高富强,等.超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2227-2241.
Kang Hongpu, Fan Mingjian, Gao Fuqiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than 1 000 meters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(11):2227-2241.

[48] 张晓君,刘啸,何俊玲.基于锚杆预紧力的深部硬岩岩爆监测及防控研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊1):3498-3506.
Zhang Xiaojun, Liu Xiao, He Junling. Study on monitoring and control of rock burst in deep hard rock based on bolt pre-tightening force[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(Supp.1):3498-3506.

[49] 戚伟,曹帅,宋卫东.中深孔嗣后废石充填采矿法在急倾斜薄矿脉开采中的试验应用[J].黄金,2017,38(2):30-33.
Qi Wei, Cao Shuai, Song Weidong. Application of medium long-hole blasting and subsequent waste rock filling method in the extraction of steeply inclined thin orebody[J]. Gold,2017,38(2):30-33.

[50] 付建新,宋卫东,杜建华,等.中深孔开采急倾斜薄矿体采场顶板力学模型及围岩扰动规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3277-3283.
Fu Jianxin, Song Weidong, Du Jianhua, et al. Study of stope roof mechanical model and wall rock disturbance law of steeply-inclined thin orebody mining using medium-deep hole [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Suppl.1):3277-3283.

[51] 孙新博,朱先洪.中深孔机械化采矿法在急倾斜薄矿体中的应用[J].矿业研究与开发,2014,34(6):5-8.
Sun Xinbo, Zhu Xianhong. The application of medium-length hole mechanized mining in steeply-inclined and thin orebody[J]. Mining Research and Development,2014,34(6):5-8.

[52] Ivan Sakhno, Svitlana Sakhno. Numerical studies of floor heave control in deep mining roadways with soft rocks by the rock bolts reinforcement technology[J]. Advances in Civil Engineering,2023:2756105.

[53] 聂兴信,甘泉,娄一博,等.基于协同开采理念的急倾斜薄矿脉群集群连续化回采工艺研究[J].金属矿山,2019(9):28-33.
Nie Xingxin, Gan Quan, Lou Yibo, et al. Study of cluster continuous mining method with steeply inclined thin ore groups based on synergistic mining theory[J]. Metal Mine,2019(9):28-33.

[54] Gao Feng, Li Xin, Xiong Xin, et al. Refined design and optimization of underground medium and long hole blasting parameters: a case study of the gaofeng mine [J]. Mathematics,2023,11(7):1612.

[55] 张荒涛,林卫星,欧任泽,等.深埋复杂倾斜薄矿体高效回采方案研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):1-5.
Zhang Yuantao, Lin Weixing, Ou Renze, et al. Study on efficient mining scheme for deep-buried complex inclined thin ore body[J]. Mining Research and Development,2023,43(10):1-5.

[56] 程勃,徐家庆,谢伟斌,等.沃溪坑口深井开采采矿方法优化[J].矿业研究与开发,2021,41(3):1-4.
Cheng Bo, Xu Jiaqing, Xie Weibin, et al. Research and practiceon mining method optimization in Woxi Pithead Deep Mine[J]. Mining Research and Development,2021,41(3):1-4.

[57] 赖伟,刘婉莹,王刚,等.急倾斜极不稳固薄矿体脉外分段空场采矿法[J].矿业研究与开发,2017,37(10):93-95.
Lai Wei, Liu Wanying, Wang Gang, et al. Extra unstable and thin orebody with steep incline mined by vein sublevel open-stope method[J]. Mining Research and Development,2017,37(10):93-95.

[58] 陈维,杜坤,陈伟.地下金矿非爆破机械化连续协同开采技术[J].金属矿山,2020(5):70-75.
Chen Wei, Du Kun, Chen Wei. Non-explosive machinery continuous synergetic mining technique for underground gold mine[J]. Metal Mine,2020(5):70-75.

[59] Orellana L F, Castro R, Hekmat A, et al. Productivity of a continuous mining system for block caving mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(13):657-663.

[60] Shang Junlong, Zhao Zhiye, Aliyu M M. Stresses induced by a demolition agent in non-explosive rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,107:172-180.

[61] 王少锋,孙立成,唐宇,等.深部硬岩矿山高频冲击锤非爆机械化开采现场应用(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(9):3051-3064.
Wang Shaofeng, Sun Licheng, Tang Yu, et al. Field application of non-blasting mechanized mining using high-frequency impact hammer in deep hard rock mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(9):3051-3064.

[62] 钟杰,盛佳,王亚军,等.二步骤采场机械化上向高分层充填采矿法研究[J].矿业研究与开发,2018,38(12):1-5.
Zhong Jie, Sheng Jia, Wang Yajun, et al. Study on mechanized upward high stratified filling mining method in two-step stope[J]. Mining Research and Development, 2018,38(12):1-5.

[63] 张遂,曹洋兵,詹淦基,等.贵州松桃李家湾锰矿矿体顶板变形破坏演化特征[J].福州大学学报(自然科学版),2020,48(2):236-243.
Zhang Sui, Cao Yangbing, Zhan Ganji, et al. Deformation and failure evolutionary characteristics of the roof of Lijiawan manganese mine in Songtao county, Guizhou Province[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition),2020,48(2):236-243.

[64] 李夕兵,刘冰.硬岩矿山充填开采现状评述与探索[J].黄金科学技术,2018,26(4):492-502.
Li Xibing, Liu Bing. Review and exploration of current situation of backfill mining in hard rock mines[J]. Gold Science and Technology,2018,26(4):492-502.