

中国深部金矿资源开发对策和建议

王伟^{1,2}, 刘博^{3,4*}

(1. 中国黄金集团有限公司; 2. 中国科学院科技战略咨询研究院;
3. 长春黄金研究院有限公司; 4. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室)

摘要:深部金矿资源开发对于保障国家资源安全、支撑战略性新兴产业发展具有重要意义。围绕中国深部金矿资源开发的现实背景及其具备的战略价值展开系统分析,并且针对当前深部金矿资源的开发现状和主要制约因素进行了深入探讨。中国在深部金矿资源开发过程中面临着诸多挑战:地质勘探的精度需要进一步提升,岩爆、高温热害等各类灾害发生的风险相较于浅部明显增加,智能装备的深地适应性存在不足,安全与环保方面的投入持续上升,相关政策体系需进一步健全等。中国深部金矿资源开发面临的挑战与机遇并存,对于存在问题提出了相应应对策略:推动深部成矿理论和人工智能融合应用,针对岩爆防治、热害防治和地热资源利用等关键技术展开攻关,进一步完善深部开采本质安全及尾矿资源化利用相关体系,并且对风险勘查基金机制和财税激励政策加以优化。加强科技创新是解决深部金矿资源开发瓶颈的关键因素,政策方面的引导则是实现金矿资源可持续开发的重要支撑,安全绿色开采则是始终坚守的基本准则,在国家战略统筹和产学研协同推进下,中国有望实现从“黄金资源大国”向“黄金资源强国”跨越。

关键词:深部开采;金矿开发;资源安全;科技创新;灾害防控;绿色安全;政策协同

中图分类号:TD8

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0011-08

doi:10.11792/hj20251002

引言

在全球贸易局势紧张、金融市场波动和地缘政治冲突等因素的影响下,世界经济不确定性逐渐加剧,黄金作为重要的国际储备资产,其自身不仅是一种经济资源,更是全球金融体系和地缘政治格局中的重要变量,而金矿资源的分布与开采影响着国家在全球经济中的地位^[1]。中国作为全球范围内最大的黄金生产国,同时也是最大的黄金消费国^[2],所呈现出来的供需格局对于国内外市场的供需关系具有深远影响。当前,随着开发力度的加大,浅层资源逐步减少,金矿资源开发正逐渐向深部走进,呈现出“三深趋势”,即深地、深海和深空^[3]。其中,深地开发主要依靠精准地质勘探、先进的采矿工艺和选矿技术协同创新,以此来应对愈发复杂的矿体赋存条件;深海金矿资源的开发须突破海洋工程和深海作业装备方面的技术瓶颈;而深空资源开发尚处于理论研究阶段,但其潜在价值已经引发国际社会的广泛关注。

深部金矿资源的开发,即深地开采,已然被视作未来黄金矿业发展的关键方向之一,伴随着勘探技术

的进步和开采方法不断的优化,深部资源在经济层面的可采性有了显著提升,这为黄金矿业的产业转型升级提供了新的突破契机^[4]。在未来一段时间内,深部金矿资源将会成为全球矿业开发的重点聚焦领域,作为支撑黄金产业可持续发展、保障国家资源安全的重要方向,这需从国家战略层面进行统筹规划,加大在科技研发方面的技术创新力度^[5],提升深部金矿资源开发效率。

中国在这一特定领域拥有广阔的深耕空间和发展机遇,但同时也面临着前所未有的挑战^[6]:一方面,深部资源的开采成本较浅部开采更为高昂,同时生态环境保护方面的要求日趋严格;另一方面,国际上针对深地、深海等复杂环境区域中矿产资源竞争激烈程度不断加剧。在此形势下,加速对深部金矿资源勘探和开发工作对于中国黄金产业高质量、可持续发展具有重要推进作用。

1 中国深部金矿资源开发的必要性

在浅层金矿资源逐渐走向枯竭的趋势下,中国黄金产业正面临着资源供给方面的压力和挑战,为了满

收稿日期:2025-06-23; 修回日期:2025-07-30

基金项目:深地国家科技重大专项(2024ZD1003800)

作者简介:王伟(1987—),男,高级工程师,博士,从事科研项目、科技成果转化、新产业培育及矿业工程等方面研究工作;E-mail:wangwei@Chinagoldgroup.com

*通信作者:刘博(1997—),男,助理工程师,硕士,从事金属矿山地下开采和岩石力学研究等工作;E-mail:785812755@qq.com

足国内黄金产品不断增长的需求,深部金矿资源的勘探与开发工作既是应对当前资源短缺问题的现实选择,也是黄金行业发展需重点关注的战略方向。这一战略方向不仅能够缓解黄金资源供应压力,同时对于提升中国在国际黄金市场的地位、强化资源安全和保障方面的能力具有重要作用。随着开采技术的不断进步,深部金矿的开发潜力正逐渐被释放,这不仅会促使黄金产业自身实现转型升级,而且还能够带动相关产业链条协同发展,进而为经济增长添加新动力。因此,加快深部金矿资源开发既与当前的发展需求相契合,同时具有深远的战略意义。

随着全球经济一体化程度持续加深,黄金所起的作用,不仅是个人投资者的避险工具,更是国家层面维护经济安全与金融主权的重要战略资产^[7],特别是在人民币国际化进程不断加快的当下,加强黄金储备和黄金供应能力对于提升国家在世界经济领域的话语权和货币的稳定性具有重要支撑作用。

2 中国深部金矿资源开发现状与挑战

2.1 深部金矿资源勘查现状及技术趋势

2.1.1 主要成矿区带

中国深部金矿资源开发前景广阔,潜力巨大,尤其在主要成矿区带持续取得重大突破。胶东、小秦岭—熊耳山、滇黔桂“金三角”等金矿集区(金矿带)是中国目前深部找矿成果显著的核心区带,辽东—吉南、西秦岭、东天山等金矿集区(金矿带)也具有重要的深部找矿潜力^[8]。随着勘探理论和技术的不断进步,这些深部区带将继续为中国黄金资源的稳定供应提供重要保障。

其中,胶东金矿集区是中国重要的黄金产出地,也是全球主要集中区之一。该地区主要矿床类型为石英脉型和蚀变岩型,代表性深部矿带有三山岛金矿带、焦家金矿带和招平金矿带等。目前,胶东金矿集区在深部空间仍存在巨大的找矿空间^[9-11],多个已知矿床深部找矿不断有重大突破,是深部金矿勘探的热点地区。小秦岭—熊耳山金矿带是中国传统的黄金主产区之一^[12],矿床类型以石英脉型为主,代表性深部矿床有杨砦峪金矿床、金渠金矿床等,该区域受地形和早期开采深度限制,深部勘探相对滞后,但该地区是深部找矿的重要靶区。滇黔桂“金三角”金矿带是中国卡林型金矿重要集中区^[13],具有品位低、规模大、矿体细碎、普遍含砷碳的特点,代表性深部矿床有烂泥沟金矿床^[14]、水银洞金矿床^[15]等,卡林型金矿床常具有“多层楼结构”,在已知大型矿床的深部和外围找矿潜力巨大。辽东—吉南金矿带是中国重要黄金产区^[16-17],以五龙金矿床和夹皮沟金矿床为代表,矿

床类型包括岩浆热液型、蚀变岩型、浅成热液型、斑岩型,该区域地形高差大,早期开采多在浅部,深部勘探程度相对较低,但由于地质背景较为有利,是寻找深部石英脉型、蚀变岩型乃至斑岩型金矿床的潜力区。西秦岭金矿带以发育造山型金矿床为主^[18-19],代表性深部矿床有李坝金矿床、大桥金矿床等,造山型金矿床通常具有较大的延伸潜力,由于西秦岭金矿带地形复杂,深部勘探难度大,但成矿预测和部分钻孔验证表明该地区深部是重要的找矿方向。东天山金矿带是新疆重要的黄金产区^[20-21],与铜矿共生密切,主要矿床类型有浅成低温热液型、造山型、斑岩型、矽卡岩型,代表性深部矿床有康古尔金矿床、马头滩金矿床等,该区域深部勘探程度总体不高,是探索深部金矿的潜力地区。

2.1.2 深部金矿赋存特点

深部金矿的赋存规律显著区别于浅表,其核心特点主要有4个方面^[22-25]:

1)构造控矿主导,垂向延伸大。矿体受区域性深大断裂及其次级构造控制,控矿构造向深部延伸稳定,导致矿体垂向延伸远超走向长度,形成“探边不如拓深”的资源格局。

2)“多层楼”阶梯式成矿模式普遍。同一成矿系统在不同构造层次发生多期次矿化叠加,形成垂向叠置的阶梯状矿化富集带,如滇黔桂卡林型金矿多级控矿构造^[26],使深部盲矿体成为增储主力。

3)蚀变—矿化组合具深部响应标志。强硅化、黄铁矿化及绢英岩化等蚀变广泛发育,深部矿化呈现复杂变异性,可在构造优势部位发现高品位厚大矿体,矿物组合同时具有高温演化趋势,揭示成矿系统的垂向分带性。

4)深部蕴含系统根带与新资源类型潜能。勘探不仅可揭示成矿热液“根部”特征,同时具有发现与浅部矿化成因关联的新资源类型的可能性,极大拓展资源边界。

2.2 深部金矿资源开发现状及技术趋势

2.2.1 中国千米以深金矿概况

目前,中国采深超过千米的黄金矿山约有20座,主要集中在胶东金矿集区、夹皮沟金成矿带、灵宝—秦岭金成矿带等^[27]。其中,山东三山岛金矿开采深度已达1 400 m,其新立矿区开采深度已超过1 600 m;同位于山东的焦家金矿、玲珑金矿、新城金矿开采深度均已超过1 000 m;纱岭金矿、新城金矿建成竖井深度均超过1 500 m。西岭金矿资源主要分布在1 000~2 500 m,是目前全国发现的深度最大的单体金矿,设计开采深度超1 500 m,钻探控制矿体已至2 000 m深度以下。这些矿山凭借巨大的资源潜力和先进的深

部开采技术,成功实现了超深井开采,是目前中国深部黄金资源开发的前沿阵地。未来胶东金矿集区黄金矿山的开采深度将持续向更深部拓展,引领全球深部黄金开发技术新方向。

除胶东金矿集区外,吉林夹皮沟金矿开采深度达1 600 m,陕西潼关秦岭金矿开采深度达1 400 m,山西繁峙东峪金矿开采深度达1 300 m,湖南万古金矿田在地下2 000 m以深发现了多条金矿脉。由此看来,黄金矿山开采深度普遍向千米以深进军是必然趋势,未来会有更多黄金矿山加入此行列。

2.2.2 中国深部资源开发主要技术和装备

中国在深部资源开发的技术与装备方面取得了显著的突破。就建井环节而言,斜井TBM智能化建井模式^[28]、竖井大直径深孔爆破技术、钻机精准凿岩技术及高强度井壁支护技术的应用^[29-30],形成了针对千米级建井的高效掘进工艺,能够成功应对高地压、高渗水地层带来的一系列挑战。当遇到破碎岩层时,应用井壁预加固技术^[31],借助超前注浆对含水构造进行封堵,从而在很大程度上提升了井筒施工过程中的安全性。

在开采工艺方面,推广深部无轨机械化协同作业模式。通过深井凿岩台车、遥控铲运机及智能锚网台车协同应用至开采工作面^[32-33],以此逐步达成采场支护、落矿及出矿整个流程的机械化作业。针对井下高温热环境,着力开发阶梯式通风^[34]与集中制冷的相关技术,从而构建井下区域性降温网络,对深部作业环境进行有效改善。

在提升系统方面,超深井多绳摩擦提升瓶颈正逐渐被突破^[35]。大容量深井提升机^[36]装配抗冲击钢丝绳和高效减速制动装置,与远程智能监控平台相互结合,以此实现千米级物料的安全高效运输。另外,同步展开深井柔性输送技术的研发工作^[37],对带式输送和管道提升的复合模式加以探索,以期实现深井矿石运输效率和安全性的同步提升。

岩体力学方面,着重聚焦于深部岩体非线性行为,进而构建适用于高地应力环境的岩爆倾向性动态评价模型^[38],借助微震监测手段,对岩体稳定性进行实时预警,为采场结构的优化和支护设计提供指导。恒阻大变形锚杆锚索^[39]、可缩性支架及喷浆注浆联合支护体系^[40]在具体工程中的应用,使深部巷道稳定性极大提升。

2.3 深部金矿资源开发面临的挑战

2.3.1 地质勘探难度大

深部地质勘探是一项复杂且专业的活动,面临的难度主要体现在技术精度、模型适用性和经济成本等方面。

1)探矿精度有待提高^[41]。当下所运用的金矿资源地质勘探技术,大多是依据地表及浅层的相关信息,对深部地质结构及资源分布情况加以推断。然而,随着勘探深度不断增加,深部地质环境所呈现出高度复杂性及不可见性等特点,使得当前所采用的勘探技术难以满足高精度要求,地震勘探、重力勘探等传统方法在进行深部勘探工作时会受到诸多限制,难以提供详尽准确的地质数据。与此同时,深部矿体物化特性的复杂多变进一步加大了深部探矿工作的难度。

2)找矿模型需进一步优化。在深部勘探工作中,精准的找矿模型极为关键,地质条件随着时间不断发生变化,新的黄金矿产资源也在持续被发现,现有的找矿模型往往存在滞后的情况,难以对深部矿体的分布状况和赋存特征进行有效预测。另外,勘探技术的不断进步要求找矿模型持续进行迭代更新,然而,模型迭代需要大量地质数据作为支撑^[42],并且还需经过反复的验证,因此,必然会耗费大量的资源和时间。

3)勘探成本高。在进行深部地质勘探时,需要投入巨额的资金及大量的人力,包括配备高精度的钻探设备,组建专业的技术团队,开展诸多的地质分析及测试工作。与此同时,环境保护方面的约束及安全风险方面的管控,明显提升了勘探成本和风险。即使是探明的潜在资源,也会存在经济可行性不足的风险。

2.3.2 开采技术瓶颈

1)岩爆防控与地压管理瓶颈突出。在深部高地应力环境下,高地应力所主导的岩体灾变已然成为深部开采过程中关键性难题,岩爆频发、围岩大变形及巷道支护失效等问题构成了深部资源开发的核心挑战^[43]。脆性围岩在受到开挖扰动后,其储能会突然释放,当集中应力超出岩体强度极限时就会诱发岩爆,这对矿井结构及人员安全构成了严重威胁。同时深部高地应力作用会造成围岩显著变形,进而致使通风、排水系统等功能受损,甚至导致巷道失稳。目前,传统的支护技术难以应对深部岩体变形,进而导致巷道年返修率增高频繁的支护失效不仅增加了巷道维护成本,同时对深部资源开发效率形成严重制约。除此之外,深部巷道支护还需要耐受高地温高湿度的环境,在这种情况下,材料的耐久性与稳定性面临着极为严峻的考验。

2)深井高温热害控制难度剧增。地温随开采深度增加对井下环境的影响愈发明显,深部涌水、断层等复杂地质条件叠加,极大增加了工程稳定性管理难度和作业风险,对人员与设备构成严重威胁,这对深部开采安全保障工作提出了更高要求^[44]。现有的降温技术,如集中制冷、阶梯通风等,虽然能够搭建区域

性的降温网络,但其系统组成较为复杂,且投资成本和运维成本高昂,这些因素共同构成了深井高温热害防治的制约条件,并且在实施过程中可能伴随着难以预见的技术风险。

3) 高效采矿方法适应性亟待提升^[45]。传统的采矿方法在面临深部高地应力、高地温及复杂地质条件时,其局限性十分明显,作业效率明显降低,而且由于存在强化支护、注浆治水及深井降温等方面的需求,开采成本更是急剧增加。深部高效采矿方法应当具备多种适应性,要能够在高地应力、高地温条件下依然维持较高的回采效率,降低采矿损失贫化,并且要依靠先进的支护技术及岩石力学分析来对安全风险进行有效管控,以此来提升资源的利用率,进而增加经济效益。

4) 智能装备研发滞后于深部开采需求。在深部高地应力、高地温及强扰动环境下,现有的钻探、采掘装备在耐用性、稳定性及智能化程度等方面严重滞后于深部开采需求。在无人驾驶运输系统方面,其应用程度尚处于初级阶段,对于路径规划、障碍识别避让及通信协同等关键技术亟待突破^[46]。远程遥控技术^[47]虽然在一定程度上提升了开采安全性和效率,但在信号稳定传输、人机交互友好性及远程维护能力等方面,仍需进行改进。当下需要借助技术创新与跨学科协同方式,来加快深部智能装备研发与应用进程。

2.3.3 安全环保压力显著

深部金矿资源开采面临的安全与环保压力显著。在高地应力、高孔隙水压力和高地温环境下,岩爆、热涌水和高温热害等灾害风险激增,使矿山运营风险大大增加,这对安全管理提出了更高要求。深井灾害往往具有突发性,并且存在链式演化的特性,这倒逼安全管理体系向智能化、动态化方向进行重构,导致安全风险防控成本和难度明显增加。在矿井通风方面,深井通风需克服超长巷道所带来的通风阻力,制冷降温工程则须持续对抗空气压缩热及巷道岩壁放热。排水系统由于存在高水压与大涌水量的情况,排水能耗急剧增加。废水、尾矿处置更为复杂,深部矿井水普遍具有高矿化度与重金属富集特征,含硫化物尾矿处置更依赖先进的环保技术与设备,成本将大幅上升,“边采边治”的生态修复刚性要求进一步压缩利润空间。在诸多因素相互叠加情况下,最终致使深部吨矿综合能耗远超浅部,在“双碳”目标背景下,碳排放压力较为严峻。

2.3.4 政策法规与管理体系有待完善

矿业政策法规与管理体系的建设水平,直接影响深部金矿资源开发的可持续发展。现行矿业标准多基于浅层开采经验制定,缺少针对深部“三高一扰动”

等复杂环境的专业性规范,尤其在安全限值设定、灾害防控流程及生态环境修复等方面,仍存在较多空白,亟须建立适应深部资源开发的专项标准体系。此外,深部金矿勘探周期长、不确定性高、前期投资大,但目前风险补偿机制与税收支持政策等方面仍显不足,难以有效吸引社会资本参与。与此同时,在科研投入、创新激励及成果转化方面缺乏系统性支持,深部开采所依赖的智能勘探、岩体加固和井下制冷等关键技术攻关,亟须政策引导与资源倾斜,且缺少专项资金与示范工程带动,导致技术成果难以实现产业应用转化。

3 中国深部金矿资源开发的对策与建议

3.1 强化深部地质勘查理论与技术创新

深部金矿资源勘查是中国黄金安全保障的关键战场,国家财政应定向增加对深部金矿成矿动力学研究的投入,支持深部地质基础研究和战略矿产勘查活动,鼓励地质学家和科研人员深入探索深部地质结构和成矿规律^[48],支撑胶东、滇黔桂等金矿集区向更深部区域拓展,激活万亿吨级金资源潜力。

高精度地球物理勘探技术的发展对于提升深部金矿勘查水平具有重要意义。以胶东金矿集区为例^[49],通过构建以高精度深反射地震为核心的综合地球物理探测体系,成功实现了对深部控矿构造关系的精细识别,推动了该区域金矿深部勘查的技术突破。在云南北衙金矿区^[50],则结合重力、磁法及电法等多种地球物理手段,针对不同类型的矿体开展了有针对性的探测工作。未来应进一步加大高精度地球物理勘探技术的研发力度,提升三维地质建模的准确性,完善深部勘查与精细探测的技术体系,从而为深部金矿资源的高效勘查提供坚实的技术支撑。

深化有关深部成矿理论和找矿模型方面的研究,这已然成为强化深部金矿地质勘查工作极为关键的核心驱动力。通过对深部成矿理论和成矿规律开展系统研究^[51],可为深部金矿的勘查工作给予理论层面的指导及模型层面的有力支持。同时,结合地质勘查技术、大数据及AI精准找矿等多种手段和方式,构建更为科学且精准的深部金矿找矿模型,从而有效降低盲探带来的风险,进而为深部金矿勘查工作筑牢坚实的理论支撑根基。

推广“就矿找矿”和深部预测相互结合的综合勘查模式,该方法以已知的矿床相关线索为依托,同时结合构造岩相学分析等方面的内容,将已被探明矿区所涉及的地质数据、地球物理数据和地球化学数据等进行深度整合处理,运用机器学习算法和三维可视化建模等相关手段,精准解析矿体在深部的延伸趋势及

其赋存规律,进而精准圈定深部矿化的靶区位置,实现对深部潜在矿体立体预测与高效勘查的目标。以胶东焦家金矿带为例^[52],利用“三位一体”找矿预测理论,并结合钻探验证工作和对地球物理异常情况的具体分析,最终成功在深部发现了厚大矿体,由此证实该综合勘查模式具备有效性。

建立国家深部矿产资源信息共享平台,将全国典型金矿床的钻孔数据、蚀变矿物光谱库及成矿年龄等数据集进行整合,依此开发AI找矿系统,使其能够对地质背景和成矿模型进行智能匹配,从而对潜在的深部金矿信息加以挖掘,并生成靶区三维预测图,精准圈定找矿潜力区域所在地。通过建立国家深部矿产资源信息共享平台,能够打破现存数据壁垒,使深部矿产资源勘查和开发的相关信息在科研机构、地勘单位和企业之间实现高效流通,进而推动各方开展深度合作和经验交流互动。这种信息的共享及技术的融合,可在很大程度上提高深部金矿勘查工作水平与效率,对中国深部金矿资源勘探开发给予有力的技术支撑和数据保障。

3.2 突破深部金矿安全高效开采关键技术瓶颈

1)岩爆风险预警与防控。深部金矿开采过程中的岩爆预警与防控工作,需在地质风险感知的基础上,同步强化相关岩体的支护措施。加强针对地应力场的探测和实时监测预警,是主动开展岩爆预警与防控工作的重要基础,具体来说,通过高灵敏微震监测设备,来捕捉岩体破裂前所释放的前兆信号,从而对深部地应力场进行精细预警^[53]。与此同时,借助智能钻孔装备实现深部地应力场三维重构的目的,构建融合多参数的地应力监测预警系统,以便对地应力变化进行动态监测,从而提升岩爆风险动态评估的准确性和时效性,最终实现针对岩爆风险的早期预警功能。另外,在岩爆预警与防控过程中,支护材料与支护结构方面的创新,是抵御岩爆的又一重要环节。通过在材料科学领域及工程技术方面的技术创新,研发具备高强度、高韧性且大变形让压特性的支护材料,以此实现动能冲击的高效耗散,降低支护失效的概率,从而提高整体支护系统的稳定性和适应性,切实有效防控岩爆的发生。

2)深部热害防治与地热利用。目前,深部开采作业正面临着愈发严峻的高温热害所引发的致灾效应,热力灾害已成为制约深部开采安全的重要影响因素。深部矿井热害治理需要综合利用高效节能制冷降温技术、通风系统优化和个体防护等措施^[54]。其中,研发高效节能的深部矿井制冷降温技术与装备是治理热害的关键所在,借助多级循环和工艺优化,辅助使用先进的制冷剂及制冷循环,在提高制冷效率的同时

降低能耗。另外,通风系统的优化设计重点聚焦于对热环境展开全区域的智能调控,依照热源在空间上的分布情况按需智能分配风量,通过自动通风构筑物 and 局部加强通风的方式来消除热积聚,同时高温巷道的岩壁上喷涂高性能矿用复合隔热降温材料,阻隔围岩与巷道风流间的热辐射和热对流,以此可有效降低矿井内的温度,改善工作环境。工人在深井环境下进行作业时,个体热防护同样重要,开发具备智能温控功能的防护装备,运用相变材料来维持环境温度处于舒适安全阈值之内。与此同时,矿井热能的资源化利用是具备潜在热害防治价值的另一种形式,如将矿井热涌水^[55]中的热量回收后转化成矿区能够使用的能源,进而形成一条“制冷—回收”的闭环路径,这样既能够降低制冷负荷,又可以减少碳排放,还可提升能源利用效率。通过构建热环境动态风险时间评估模型,未来将会朝着地热能协同开发及通风系统智能调控的方向不断发展演变,实现热环境治理从“被动疏热”向着“主动利用”的战略性转型。

3)智能开采装备研发。当下深部金矿资源开发,正处在从传统人力驱动朝着智能化主导方向过渡的进程中,其关键在于构建能够自适应深部地质环境的智能化装备体系,同时搭建由大数据驱动的全局管控平台,以此达到安全高效可持续的目的。

智能钻爆技术是深部金矿开采过程中的首要环节,开发具备自感知和决策能力的智能钻爆系统,借助多源信息融合实时对爆破参数加以优化,进而能够精准把控岩体破碎情况,同时在钻孔过程中融合应用机器人技术和智能控制系统,便可实现钻爆与掘进设备的自动化操作,从而使掘进作业效率得以提升。

在矿石运输和提升环节,无人驾驶运输系统和智能遥控铲运设备成为深井矿石运输的主要支撑力量,通过搭载环境感知传感器和精确定位系统,结合智能决策算法,使其能够在复杂危险的深部巷道内实现自主导航、避开障碍来完成高效的运输作业,同时智能化设备也可以由操作人员在安全区域进行远程精准操控,这样可显著降低作业人员在深部环境下所面临的安全风险,同时提升矿石运输效率。

4)创新深部采矿方法。就深部金矿采矿方法创新而言,首先需要关注处于高应力状态下的矿岩稳定性问题^[56],而创新的关键要点在于构建集“主动卸压、柔性支护和应力优化”为一体的资源开发体系,通过科学合理布置卸压工程,促使高应力朝着深部岩体或非开采区域进行转移。除此之外,深部金矿采矿方法创新还需要解决在破碎矿(岩)体条件下如何实现高效采矿的问题,破碎矿岩一般具有低稳定性和高渗透性,在开采深部破碎矿体时,其核心技术在于“超前预

加固、过程精准监控和风险预警”。针对采动影响区域内的破碎矿(岩)体,通过开发具有高渗透性和快凝早强的注浆材料,对破碎矿(岩)体进行超前预加固,以达到对破碎矿(岩)体主动加固的目的。

3.3 构建深部矿山本质安全与绿色开发体系

面对深部开采高地压、高渗流、强热害及岩体劣化的挑战,构建本质安全与绿色开发体系^[57]已成为深部金矿可持续发展的核心命题,需从安全防控、资源循环与生态协同等多方面入手,确保矿山生产的安全性和环保性。

1)制定深部金矿专属安全技术规程和标准体系,确保黄金矿山生产过程中各项操作符合安全要求。针对深部特有的“三高一扰动”环境,构建涵盖地质勘探、采矿工艺、巷道支护设计、通风除尘、热害防治和裂隙注浆等全环节的技术规范,为深部金矿勘探、设计与生产建立统一安全标准,从源头规避安全风险。

2)构建深部矿山重大灾害在线监测预警与智能应急响应系统,集成微震监测、多参数应力应变监测、水文动态感知、热成像及气体分析等多元感知网络,实现对矿山环境变化的实时监测,及时发现潜在安全隐患,确保灾变发生时能够快速响应、科学决策与高效处置,保障矿山安全生产。

3)研发深部矿山废水高效处理与循环利用技术,针对高矿化度、含重金属及复杂有机物的矿井涌水与选矿废水,突破高效预处理、深度脱盐和靶向污染物去除的技术瓶颈,使深部矿山废水达到循环利用的标准,实现对废水的资源化回收,大幅削减新水取用与环境污染负荷。

4)推广固废资源化协同利用,实现“矿冶固废资源化”。通过优化尾砂活化改性、高效浓缩与管道输送工艺,将选矿尾砂转化为性能稳定的充填材料,规模化回填采空区,同步消除地表尾矿库潜在风险,实现固废就地转化利用,最大限度降低能耗和运输成本。

3.4 创新深部开发经济模式与强化政策法规支持

深部金矿开发面临基建成本高、投资风险大、技术门槛高等多重约束,亟须通过创新经济模式与强化政策法规支持实现破局^[58],以推动深部资源开发从高风险投入向可持续盈利转型。

1)技术创新驱动采选降本增效,实现深部金矿规模化集约开发。通过智能化凿岩装备、高精度爆破控制、遥控无人化运搬等关键技术升级,提升采矿效率与安全性。整合相邻矿体资源,建设集约化提升、通风、排水等系统,降低吨矿开采成本。同时优化选矿流程,依托大型智能化选矿基地,应用高效分选技术与自动化控制系统,提高金属回收率并降低能耗物

耗。

2)设立国家深部矿产资源风险勘查基金,实施财税激励政策。针对深部勘探高风险特性,建立专项风险勘查基金,降低企业投资风险,激发企业投资深部矿产资源的积极性,促进深部矿产资源有效开发和利用。同时,对深部金矿开发企业给予资源税减免和所得税优惠等专项政策,对绿色技术应用提供额外补贴,增强市场投资信心。

3)构建产学研用深度融合创新生态,建立国家级深部矿产资源开发技术创新联盟或平台。通过整合高校基础研究、科研院所技术攻关、龙头企业工程化应用及装备制造商产业化能力,定向突破深井支护、高效碎矿、高温环境治理和智能化装备运行等“卡脖子”技术,在典型深部矿山设立技术试验基地,加速创新成果工程验证,推动深部矿产资源开发技术创新与应用,提升中国深部矿产资源开发的整体水平和国际竞争力。

4 结 语

中国深部金矿开发对保障国家资源安全、提升国际竞争力具有重大战略意义。然而,在实际开展过程中,面临着严峻的挑战,深部金矿处在“三高一扰动”的特殊环境中,地质勘查工作的难度大幅增加,岩爆、热害等各类灾害发生的风险急剧上升,智能装备的发展情况还存在欠缺之处,安全环保方面所需投入的成本高,且相关政策存在一定的滞后性。尽管面临这些挑战,但深部金矿开发也蕴含着诸多机遇。通过创新AI预测和信息共享勘查等相关技术,突破岩爆预警、智能采矿、热害防治和地热利用等诸多技术领域所存在的瓶颈问题,进而构建安全、高效、绿色的发展体系。在此过程中,科技创新是最核心的驱动力,而政策方面给予的支持则是关键的保障条件,安全绿色更是不可被逾越的底线要求。展望未来,需要国家层面、相关企业及科研机构等各方协同合作、共同发力,推动实现深部金矿资源安全、高效、绿色的开发目标,以此支撑中国从“黄金大国”向“黄金强国”跨越性发展。

【参 考 文 献】

- [1] 王寿成,王京.黄金战略重要性的变化与展望[J].中国国土资源经济,2019,32(5):33-37.
- [2] 中国黄金行业领军之路[N].中国黄金报,2024-07-26(002).
- [3] 邓久帅,姚伟,林艳,等.“三深”金属矿产资源开采利用的绿色化思考[J].绿色矿山,2023,1(1):186-192.
- [4] 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.
- [5] 罗娜.以科技创新为核心驱动力 保障矿产资源安全[N].中国有色金属报,2023-05-09(008).

- [6] 李夕兵,周健,黄麟淇,等.中国黄金矿山开采技术回顾与展望[J].黄金,2020,41(9):41-50.
- [7] 孙立行,刘子恒.全球安全资产变化对各国黄金储备的影响[J].金融发展,2024(1):1-20.
- [8] 张振山.中国金矿成矿地质特征、预测模型及资源潜力[J].中国金属通报,2020(6):30-31.
- [9] 张军进,丁正江,薄军委.胶东三山岛北部海域金矿地质特征及成矿规律研究[C]//山东省地质学会.华东六省一市地学科技论坛文集.烟台:山东省第三地质矿产勘查院,2023:183-190.
- [10] 杨立强,邓军,张良,等.胶东型金矿[J].岩石学报,2024,40(6):1 691-1 711.
- [11] 刘向东.胶东招平金矿带典型金矿床深部成矿预测[D].北京:中国地质大学(北京),2022.
- [12] 李照义,李中明,张宇,等.河南省金矿成矿规律及成矿系列[J/OL].矿产勘查,1-23[2025-07-10].<https://link.cnki.net/urlid/11.5875.TD.20250517.1030.002>.
- [13] 韦启锋,李昌明,张忠伟.滇黔桂(金三角)地区金矿时空演化规律与成矿模式[J].南方自然资源,2022(3):22-29,35.
- [14] 支太云,杜丽娟,陈军.贵州烂泥沟金矿成矿规律及成矿预测[J].冶金与材料,2023,43(3):90-93.
- [15] 李德东,王玉往,张会琼,等.贵州水银洞金矿床成矿规律与找矿预测模型[J].黄金,2024,45(9):57-66.
- [16] 刘建民,赵国春,徐刚,等.辽东半岛金矿成矿作用与深部资源勘查[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1 613-1 635.
- [17] 马玉波,邢树文,肖克炎,等.辽东-吉南Fe-菱镁矿-Cu-Au成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J].地质学报,2016,90(7):1 298-1 315.
- [18] 宋朝阳.西秦岭东段崖湾一大桥地区金锑矿成矿规律与成矿预测[D].长春:吉林大学,2024.
- [19] 彭小刚,李伟,宋欣,等.西秦岭造山带东段李坝金成矿带中发现金长沟中型金矿床(5.015吨)[J/OL].中国地质,1-2[2025-07-10].<https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250415.1452.004>.
- [20] 郎学聪,韩效斌,支元栋,等.新疆东天山康古尔一带金矿地质特征及成矿机制[J].地质找矿论丛,2024,39(2):177-185.
- [21] 张连昌,董志国,陈博,等.东天山重要成矿区带、成矿系统与成矿规律[J].地球科学与环境学报,2021,43(1):12-35.
- [22] 周文俊,王琦,张园.金矿床深部矿体地质特征及成矿机制研究[J].中国金属通报,2020(7):119-120.
- [23] 胡海祥,牛桂强,刘洪澜,等.焦家金矿主矿区金矿的赋存特征[J].岩矿测试,2013,32(6):931-937.
- [24] 洪家彬.大型复杂矿山中深部金矿资源前景勘查研究[J].世界有色金属,2020(19):107-108.
- [25] 胡文宣,孙睿,张文兰,等.金矿成矿流体特点及深-浅部流体相互作用成矿机制[J].地学前缘,2001,8(4):281-288.
- [26] 刘建中,王泽鹏,宋威方,等.滇黔桂地区卡林型金矿多层次构造滑脱成矿系统构建和找矿实践[J].地质论评,2023,69(2):513-525.
- [27] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
- [28] 范京道,封华,宋朝阳,等.可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J].煤炭学报,2022,47(1):499-514.
- [29] 谭杰,刘志强,宋朝阳,等.我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势[J].金属矿山,2021(5):13-24.
- [30] 刘志强,宋朝阳,荆国业,等.井筒建设行业格局与智能建井新局发展策略[J].建井技术,2025,46(1):1-14.
- [31] 徐叶.止浆塞深孔注浆法在近海高涌水竖井中的应用[J].建井技术,2022,43(2):67-70.
- [32] 牟少良.基于5G通信技术的地下遥控铲运机开发及应用[J].现代矿业,2021,37(12):69-71.
- [33] 崔冰,赵辉军,魏威,等.地下矿无人驾驶铲运机系统设计与应用[J].金属矿山,2024(7):181-188.
- [34] 田志云,李闻杰,胡子浩.小寺沟铜矿通风系统节能优化[J].河北冶金,2023(6):82-85.
- [35] 李广,史志远,余洪伟.金属矿山深井大规模提升关键技术装备进展与发展趋势[J].矿业研究与开发,2024,44(9):1-8.
- [36] 王麒,赵辉军,马俊生,等.适用于深井大载重提升的双驱多绳摩擦提升系统的研究[J].矿山机械,2024,52(10):22-27.
- [37] 秦扬阔.柔性罐道约束下超深井振动特性及过渡区长度研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [38] 陈璐,郭利杰,杨小聪.金属矿深部开采岩爆灾害防控研究进展与工程实践[J].矿冶,2024,33(4):482-494,514.
- [39] 赵明珠,吴学震,叶青,等.缩管式恒阻大变形锚杆抗冲击特性及其治理岩爆潜力研究[J].岩土力学,2024,45(11):3 355-3 365,3 377.
- [40] 李志,张席芝,吴迪.某铜矿高应力采矿扰动不良围岩巷道SSG联合支护技术研究[J].中国矿山工程,2024,53(5):16-21,27.
- [41] 孙伟光.金矿地质找矿勘查技术的趋势与发展[J].科技创新与应用,2021,11(13):150-152.
- [42] 肖克炎,李程,唐瑞,等.大数据智能预测评价[J].地学前缘,2025,32(4):20-37.
- [43] 杜久华,刘海波,高新雨,等.深部金矿岩爆倾向性分析与防控支护设计研究[J].中国矿业,2023,32(增刊1):404-408.
- [44] 赵洪凯,曲星军,程力,等.深井矿山高温热害防控技术现状[J].黄金,2024,45(8):28-32.
- [45] 王福中.黄金矿山深部高效开采技术及安全管理研究[J].中国金属通报,2023(10):29-31.
- [46] 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].工程科学学报,2024,46(12):2 147-2 158.
- [47] 李子杰.智能装备在深部采矿作业中的应用分析[J].智慧中国,2025(6):92-93.
- [48] 熊川川,杨成智,王贵忠,等.深部矿产勘查技术发展与高效利用研究[J].世界有色金属,2024(19):178-180.
- [49] 严加永,黄宗理,张昆,等.基于地幔通道流理论的郯庐断裂东侧三个巨型成矿带地球物理特征与成矿背景探讨[J].地质学报,2025,99(3):778-793.
- [50] 杨剑,王绪本,曾琴琴,等.北衙金矿重磁场特征与综合找矿评价[J].地球物理学进展,2014,29(4):1 856-1 862.
- [51] 毛先成,邓浩,陈进,等.金属矿山深部资源三维智能预测理论与方法[J].矿产勘查,2024,15(8):1 365-1 378.
- [52] 周明岭,孙亮亮,吕军阳,等.焦家式金矿勘查与研究[J].地质力学学报,2024,30(5):747-767.
- [53] 乔兰,董金水,刘建,等.我国地下金属矿山岩爆灾害发生机制及预测方法研究进展[J].金属矿山,2023(3):14-28.
- [54] 王运敏,李刚,徐宇,等.我国深部矿井热环境调控研究近20 a进展及展望[J].金属矿山,2023(3):1-13.
- [55] 纪海维,张进,范红,等.矿井涌水冷热利用深井降温系统[J].

- 西安科技大学学报,2022,42(1):83-90.
- [56] 杨小聪,蒋合国.深部金属矿山卸荷开采与预处理技术综述[J].中国矿业,2025,34(4):64-75.
- [57] 郝美英,李亮,赵冠楠.我国黄金行业绿色矿山建设规范解读[J].中国矿业,2018,27(8):80-84,87.
- [58] 齐剑,潘成龙,田惠敏.我国黄金行业发展趋势及政策建议[J].中国市场,2021(15):1-8.

Countermeasures and suggestions for deep gold mineral resource development in China

Wang Wei^{1,2}, Liu Bo^{3,4}

(1. China National Gold Group Co., Ltd.; 2. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences;
3. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.;

4. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines, National Mine Safety Administration)

Abstract: The development of deep gold mineral resources is of great significance for ensuring national resource security and supporting strategic industrial development. A systematic analysis was conducted on the practical background and strategic value of deep gold mineral resource development in China, and an in-depth discussion was provided on the current development status and main constraints. China now faces numerous challenges in the process of deep gold mineral resource development: The accuracy of geological exploration needs further improvement; risks of disasters such as rockburst and high temperature-induced heat damage are significantly increased compared to shallow mining; the adaptability of intelligent equipment in deep environments is insufficient; investments in safety and environmental protection continue to rise, and the policy system requires further refinement. Challenges and opportunities coexist in China's deep gold mineral resource development. Corresponding strategies are proposed to address existing problems: promoting the integration of deep metallogenic theory and artificial intelligence, tackling key technologies such as rockburst prevention, heat damage control, and geothermal energy utilization, further improving related systems for intrinsic safety of deep mining and tailings resource utilization, and optimizing risk exploration fund mechanisms and fiscal incentive policies. At present, strengthening technological innovation is a key factor in addressing the bottlenecks of deep gold mineral resource development, and policy guidance serves as an important support for achieving sustainable development of gold mineral resources. In addition, safe and green mining remains the fundamental principle. Under national strategic coordination and industry-university-research collaboration, China is expected to achieve a transition from a "major gold resource country" to a "strong gold resource country".

Keywords: deep mining; gold mineral development; resource security; technological innovation; disaster prevention and control; green and safe mining; policy coordination