

金属矿床绿色开采技术与装备研究进展及未来发展趋势

周爱民^{1,2,3}, 王长军^{1,2,3}, 龚锦睿^{1,2,3}(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室; 2. 紫金矿业集团股份有限公司;
3. 紫金(长沙)工程技术有限公司)

摘要:随着全球工业化和城市化进程的加速推进,金属矿产资源的供需矛盾日益凸显。传统开采模式在资源利用率、生态环境影响等方面面临严峻挑战。在“双碳”战略目标和生态文明建设的双重驱动下,金属矿山开采正经历从粗放型向绿色智能化的深刻变革。立足当前行业发展需求,从5个维度系统探讨了绿色开采技术的发展现状:剖析了新型开采方法的技术原理,评估了智能化装备的创新突破,探讨了清洁能源的应用实践,分析了生态保护技术的实施效果,考察调研了标准体系的建设进展。通过典型案例研究,揭示了各项技术在工程应用中的优势与局限。研究指出,尽管绿色开采技术已取得显著成效,但在经济效益、工程适配性和规模化应用等方面仍存在瓶颈。展望未来,需要着力推进多学科交叉创新,构建智能化协同系统,深化资源循环利用与生态修复技术的融合,为金属矿山行业的可持续发展提供新思路和新路径。

关键词:金属矿山;绿色开采;技术进展;装备革新;可持续发展;智能化;资源循环利用

中图分类号:TD85

文章编号:1001-1277(2025)10-0001-10

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251001

引 言

随着全球工业化及城市化的快速发展,金属矿产资源作为现代工业体系的关键基础,其战略意义日益凸显^[1],从航空航天领域运用的钛合金,到信息产业依赖的稀土元素,再到新能源汽车核心部件需要的锂、钴资源,金属矿产已经深度融入国民经济的各个层面,成为推动国家科技进步、产业升级及保障国防安全的关键支撑力量^[2-5]。根据国际权威机构数据,过去十年间全球金属矿产的消耗量以年均5%的速度持续增长,中国作为全球最大的金属消费国之一,铁矿石、铜、铝等主要金属资源的对外依存度长期超过50%,这对构建高效稳定的矿产供应体系提出了急切要求^[6]。中国工业与能源金属矿产进口情况见表1。

传统金属矿山的开采模式长久以来呈现出“高投入、高消耗、高污染”的特性,这种发展路径已经致使资源与环境的矛盾日益突出^[7]。在矿石开采过程中,传统以爆破为主的落矿方式使得矿石贫化率普遍达到15%~25%,大量优质资源因为过度破碎与废石混杂而流失;在设备使用方面,高能耗的柴油动力设备增加了碳排放,还产生了噪声和粉尘污染,严重影响

表1 中国工业与能源金属矿产进口情况

Table 1 Import status on the industrial and energy metal ore end in China

类别	品种	中国储量占全球比例/%	中国产量占全球比例/%	中国进口依存度/%
基本金属	铜精矿	4.18	7.83	77.72
	铝土矿	2.34	20.67	63.10
	铅精矿	22.92	44.19	33.21
	锌精矿	20	33.33	74.68
	镍矿	3.38	3.24	88.66
	锡矿	23.81	23	42.19
能源金属	锂矿	10	17.08	67.32
	钴矿(2022年数据)	1.69	1.16	92.27

响井下作业人员的健康^[8-9]。据统计,中国金属矿山每年因开采活动造成的土地损毁面积超过120万hm²,尾矿库堆存总量已超过60亿t,由此引发的土壤沙化、水源污染及地质灾害等问题已经成为制约行业可持续发展的关键因素^[10]。

金属矿山行业在“双碳”目标及生态文明建设战略的推动下,迎来了转型发展的关键阶段,《关于加快建设绿色矿山的实施意见》等政策文件的发布,为行业指明了绿色发展方向^[11-12],绿色开采技术与装备的

收稿日期:2025-05-14; 修回日期:2025-07-03

基金项目:国家科技支撑计划项目(2024YFC2909500)

作者简介:周爱民(1957—),男,教授级高级工程师,博士,从事金属矿山采矿技术与设计方面的研究工作;E-mail:aimin139@139.com

*通信作者:龚锦睿(1997—),男,助理工程师,硕士,从事金属矿山采矿技术与设计方面的研究工作;E-mail:15243769879@163.com

创新升级,是落实国家“十四五”规划中“推动绿色低碳发展”的关键要点,也是矿山企业应对资源与环境约束、提高竞争力的必然途径^[13]。这一转型需要在技术层面实现传统开采工艺的革新,还需要建立包含智能化装备、清洁能源应用、生态修复等多方面的绿色发展体系,以实现提升资源开采效率、降低生态环境影响、控制安全生产风险的综合目标。

近年来,金属矿山绿色开采技术取得了明显进展,呈现出多点突破的良好形势^[14-15]。在开采技术方面,非爆破作业方式逐渐突破传统限制,机械连续切割和高压水射流破岩技术取得关键突破;在装备研发领域,智能化采矿台车和无人驾驶运输系统等新型设备的应用提高了作业自动化水平;在能源动力方面,电动化设备与可再生能源的结合有效减少了碳排放;

在生态环境治理方面,针对高寒、干旱等特殊区域的生态修复技术体系逐步完善。绿色矿山评价标准和智能装备互联协议等技术规范的不健全,为行业的规范发展提供了有力支持。

本文针对开采技术、装备革新、能源动力、生态环境及技术标准5个核心方向,对金属矿山绿色开采技术与装备最新进展展开系统梳理工作。通过深入解析各项技术的创新原理、典型应用案例及所面临的挑战,旨在为行业技术升级和绿色低碳转型提供全面的理论依据与实践指导。

1 金属矿山绿色开采技术与装备进展

金属矿山绿色开采技术与装备进展见图1。

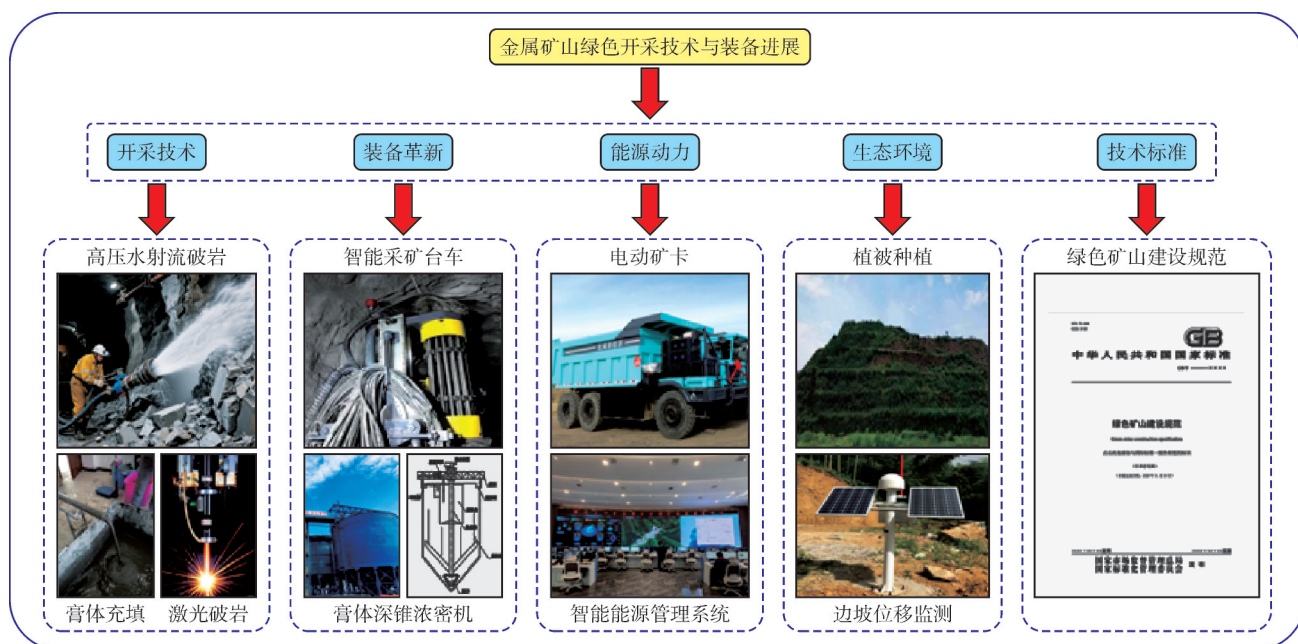


图1 金属矿山绿色开采技术与装备进展

Fig. 1 Progress in green mining technologies and equipment for metal mines

1.1 开采技术

在达成“双碳”目标及推进生态文明建设的时代背景下,金属矿山开采面临需要解决资源浪费及环境破坏等传统难题,绿色开采技术已然成为行业实现转型升级的关键推动力量^[16]。当下各类创新技术正围绕高效开采、生态保护及资源循环利用等方面展开协同攻关,并且在国内外矿山的实际应用中不断得到验证与优化,共同促使新一代绿色开采技术体系得以构建^[17]。

1)机械连续切割技术打破了传统爆破的局限,借助专用设备达成矿石的连续破碎与运输,可有效地将矿石贫化率控制在5%以内,并且生产效率有了明显提高,增幅超过40%^[18]。德国维特根公司(Wirtgen Group)研发的硬岩切割机在智利安托法加斯塔矿业

公司(Antofagasta Minerals)的大型铜矿(如埃尔特尼恩特铜矿 El Teniente Copper Mine)应用过程中,降低了矿石贫化率,提升了精矿品位。但是,该设备在应对加拿大魁北克地区形态复杂的镍矿如拉格伦镍矿(Raglan Nickel Mine)时,适应性不好,很难灵活应对不规则矿体,而且切割头在高强度作业时,磨损速度比较快,再加上设备采购及维护成本较高,限制了它在行业内的广泛应用^[19]。

2)为了克服机械破岩技术存在的局限性,高压水射流破岩技术随之出现^[20],这项技术依靠超高压水流产生的“水楔效应”来破碎岩石,刀具磨损率降低60%~80%,减少粉尘排放约90%,并且在千米深井施工可有效缩短工期30%~40%。德国培森掘进技术研究所研发了一套高压水射流辅助破岩试验平台,

成功把该技术应用到直径6.5 m的德马克型隧道掘进机(即TBM)进行井下试验;试验结果显示,该技术可以有效降低设备推力需求(约10%),同时减少盘形滚刀的使用数量,使掘进机性能得到提升^[21]。WANG等^[22]针对高抗压强度159~262 MPa的花岗岩层开展了现场试验,发现使用345 MPa超高压水射流预处理岩体后,综合掘进效率提升了40%~48%,证实了水力辅助技术在硬岩开挖中的工程应用价值。在中国福建龙岩市万安溪引水工程中,该技术的应用提高了隧道掘进机的贯入度及岩体可掘性^[23],但超高压设备存在高能耗及关键部件寿命短的问题,是限制其广泛推广的主要障碍。

3)激光破岩技术在精准开采领域具有突出优势^[24]。借助高能激光束产生的热效应,岩石可迅速实现气化或者爆裂,其破岩效率相较于传统钻头提高了10~100倍,十分适宜稀有矿脉的精细化开采。山东大学的研究指出,激光功率及照射时间对岩石强度和破坏模式具有显著的弱化作用^[25]。美国Foro Energy公司进行了一项创新性的激光辅助破岩技术试验,将高能激光与机械式PDC(Polycrystalline diamond compact

bit,PDC)钻头相结合,并且依靠连续油管钻机系统达成高效钻进;试验结果说明,经过激光预处理后,PDC钻头功率只需7.5 kW就能有效切割岩石,整体破岩效率比传统钻井方式提升了10倍多^[26]。这一研究成果证实了激光-机械复合钻井技术在提升能效和钻进速度方面有应用潜力,为深部硬岩地层的开采提供了新的技术方向,但因为设备成本高达千万元且能耗需求极大,该技术当前仍处于实验室探索阶段,还没有实现大规模产业化应用。

4)等离子破岩技术属于创新的绿色开采方式,借助电解液等离子化产生冲击波,模拟爆破效果,达成无振动、无有毒气体作业,特别适用于狭窄矿脉的精准开采^[27]。秘鲁Coimolache矿及巴西某铁矿因靠近居民区而禁止使用炸药开采,虽然部分区域可采用机械方法,但在极硬岩石区域,机械开采效率比较低。为解决该问题,Enaex公司与该铁矿合作,引入等离子破岩技术作为辅助手段,该技术契合了严格的环保要求,提升了硬岩区域的开采效率^[28],然而该技术依然面临电解液成本较高及设备稳定性不足的挑战。几种非爆破岩技术示意图见图2。

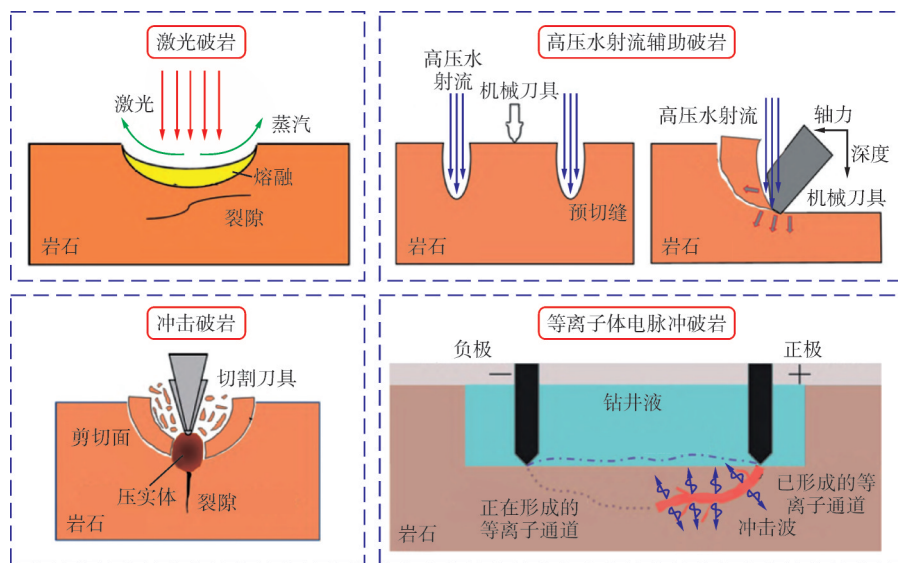


图2 几种非爆破岩技术示意图^[29-30]

Fig. 2 Diagrams of several non-blasting rock-breaking technologies

5)膏体充填技术作为解决开采后生态修复需求的关键技术,呈现出一定优势^[31]。该技术将尾砂与水泥混合制成膏体,用于回填采空区,减少水泥使用量达50%,还提升了充填体的强度约30%,其地表沉陷控制精度能达到毫米级,降低生态修复成本至原来的30%。例如:中国山东焦家金矿应用该技术,有效缓解了地表沉降问题,保护了矿区周边的生态环境^[32];瑞典基律纳铁矿利用膏体充填技术,实现了深部开采过程中地压的稳定控制。然而该技术在输送过程中对压力和流动性有较高要求,增加了实际应用的技术

难度。

6)采选一体化技术的应用进一步推动了绿色开采的进步^[33-34]。以南非Kloof金矿为例,该矿山曾采用采选一体化技术进行开采,在井下对矿石进行预选,提前分离废石并就地回填,减少了废石的提升和运输成本,同时降低了后续选矿环节的处理量及整体选矿成本;实施采选一体化技术后,选矿成本降低了25%,每年节省运输费用超过千万美元;借助井下预选抛尾、矿浆管道输送及废石就地回填等举措,Kloof金矿实现了废石减排80%和能耗降低40%的目标。

在中国,安徽冬瓜山铜矿的实践也证实了采选一体化技术的成效;该矿山凭借井下预选抛尾技术减少了废石提升量,利用矿浆管道输送技术降低了运输能耗,依靠废石就地回填实现了资源循环利用,减少了对地表环境的影响,大幅降低了能耗和废石处理量,推动了绿色开采进程。然而,井下复杂环境对选矿设备的耐腐蚀性和耐湿性能有较高要求,成为该技术推广应用的一个挑战。

7)在终极目标层面,无废开采技术要构建全流程资源化体系,将尾矿转化为建筑材料,达到废水循环利用率超95%且固体废弃物零堆存的目的,还可以将土地复垦周期缩短一半。美国卡林金矿(Carlin Gold Mine)已建立完善的无废开采体系,实现尾矿100%利用。中国江西德兴铜矿运用无废开采技术,利用尾矿里的硅、钙等成分,经特殊工艺产出高质量微晶玻璃,广泛用于建筑装饰和电子领域,有效降低了尾矿对环境的潜在威胁,又开辟了新产业增长点,促进资源循环利用与经济可持续发展^[35]。然而,即便这一理念代表行业发展关键方向,跨行业协同机制缺失及尾矿高值化技术瓶颈问题,仍需长期努力攻克。

金属矿山绿色开采技术在国内外实践中取得进展,形成多维度创新体系,但在技术经济性、工程适应性及产业化推广方面面临诸多挑战,未来研究工作应着重关键技术联合攻关,推动装备智能化升级,强化政策引导和标准体系建设,加快行业向绿色低碳方向转型步伐。

1.2 装备革新

在金属矿山绿色化转型进程中,开采装备技术升级是实现高效环保开采的关键支撑要素。近年来,智能化、自动化及低能耗的绿色开采装备不断涌现,在国内外矿山的实际应用中,有效提升了开采效率,降低了环境负荷及安全风险,推动着金属矿山开采朝着绿色可持续的方向迈进。

1)智能采矿台车配备了先进的人工智能算法及多传感器系统,可实时感知岩石的特性,并且自动对凿岩参数进行优化。例如:瑞典研发的智能台车在澳大利亚坎宁顿(Cannington)地下银铅锌矿投入应用时,借助自动调整钻孔深度和角度的功能,凿岩效率提高了45%,钻头损耗减少了35%,其远程操控功能保障了作业人员的安全^[36]。河南金源黄金矿业有限责任公司引入了国产智能采矿台车,将其与矿山管理系统进行集成,实现了凿岩数据的实时分析与优化,单台设备年作业效率提升超过40%。但是,井下复杂环境信号传输的稳定性及设备维护成本较高等问

题,仍然是限制其大规模应用的主要挑战。

2)智能天井钻机依靠自动化控制技术,实现了天井施工的高效与精准^[37-38]。中国铁建重工集团研制的ZJD系列智能天井钻机,在非洲刚果(金)卡莫阿-卡库拉金矿(Kamoa-Kakula Gold Mine)的垂直天井施工中,借助自动纠偏系统将钻孔偏差控制在0.3%以内,施工效率相较于传统钻机提高了30%,并且减少了人工操作带来的安全隐患。该纠偏系统可实时监测钻孔角度和位置,发现偏差时自动调整钻进方向,保证钻孔精度,提升施工质量与速度,保障施工人员安全。加拿大沃伊斯湾镍矿(Voisey's Bay Nickel Mine)使用智能天井钻机,并结合可视化操作界面,将天井施工周期从传统的20 d缩短至12 d,加快了开采进度,可视化界面使操作人员更直观地掌握钻机运行状态、钻进参数及地质信息,便于及时进行决策和调整,有效提高了施工效率;然而,在复杂地质条件下,如断层、破碎带或软硬不均的岩层,设备的自适应能力仍需要优化。当前智能天井钻机在复杂环境中可能会面临钻进险阻、设备磨损加剧等问题,影响施工进度和设备使用寿命。

3)膏体浓密机作为膏体充填技术的核心装备,在国内有了重大的进展,中蓝连海院、长沙矿山院研发的高效膏体仓储浓密机,在山东会宝岭铅锌矿、湖南远景钨业等矿山的应用中(见图3),成功实现了全粒级尾砂的高效絮凝及大容量储存,其溢流浊度低于50 NTU,为后续膏体的稳定输送提供了有力保障。该设备采用独特的絮凝结构及高效沉淀设计,可快速凝聚不同粒径的尾砂并加速沉淀,降低溢流中的固体含量,以此保证输送过程的稳定性。在福建紫金山铜矿引进了新型膏体浓密机,结合智能控制系统,尾砂浓缩效率提升了30%,同时有效减少了药剂的使用量;智能控制系统可实时监测尾砂的浓度、流量等关键参数,并且依据监测数据自动调整絮凝剂的投加量及设备运行参数,在提高浓缩效率的同时避免药剂浪费^[39]。需要强调的是,由于不同矿山尾砂的特性有较大差异,如粒度细、含泥量高或者化学性质特殊等,设备需要根据具体工况进行参数优化及定制化设计,才可以实现最佳运行效果。

4)高速柔性搅拌机在解决充填料浆均质化方面取得了显著成效^[41]。长沙矿冶研究院研制的双轴高速搅拌机,借助创新的搅拌桨叶设计及变频调速技术,在江西德兴铜矿充填系统中成功应用,使料浆搅拌均匀度达到98%,提升了充填体的整体质量。同样南非阿莫斯科普铂矿(Amokopi Platinum Mine)也引

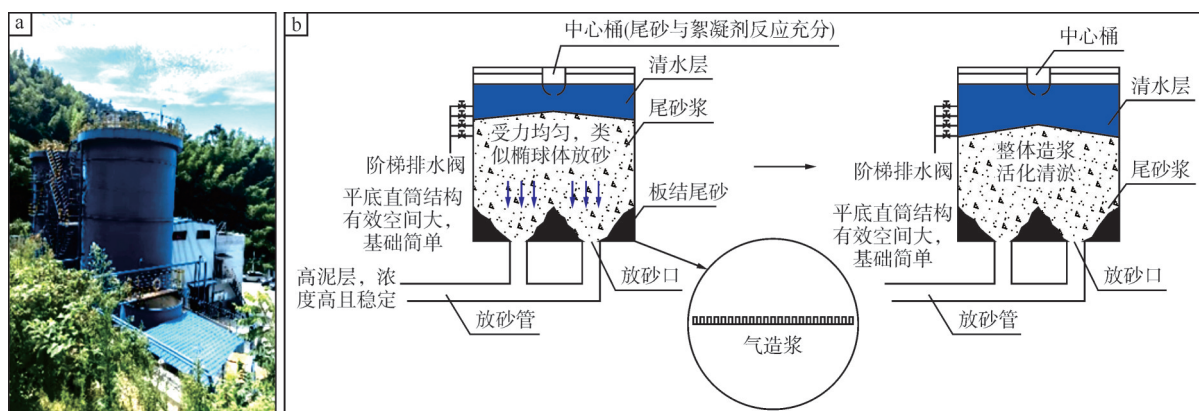
图 3 远景钨业膏体仓储浓密机^[40]

Fig. 3 Paste storage thickener of Yuanjing Tungsten Industry

入了类似设备,并且结合在线浓度监测技术,实现了对充填料浆质量的精准控制,有效减少了充填体的离析现象。然而,该设备在处理高浓度和高黏度物料时,能耗相对较高,仍需要优化。

5) 风水联动压气洗管机在矿山充填作业中展现了显著优势^[42]。在内蒙古银漫矿业分公司的实际应用中,该设备依靠风水联合作用,成功实现了充填管道的高效清洗与疏通,有效降低了管道堵塞风险达 80%,并且大幅减少了清洗用水的消耗^[43]。江西德兴铜矿将该设备与管道智能监测系统相结合,实现了管道维护的智能化管理,每年节省维护成本超过百万元。但该设备在寒冷矿区的防冻性能及复杂管路布局下的适用性仍需要优化。

6) 无人驾驶运输设备在露天矿山及地下矿山都呈现出了一定优势^[44],小松公司(Komatsu Ltd.)的无人驾驶矿用卡车车队在澳大利亚奇切斯特矿区(Chichester Hub)借助智能调度系统达成全天连续作业,运输效率提高了 30%,燃油消耗降低了 25%^[45]。力拓集团(Rio Tinto Group)在西澳大利亚的罗布河矿区(Robe River Mine)、汤姆普赖斯矿区(Tom Price Mine)等多个矿区部署了无人驾驶卡车,每年减少人工成本超过千万美元^[46]。在中国,湖南柿竹园成功应用了自主研发的井下有轨电机车无人驾驶系统,达成了精准定位和自动装卸,减轻了工人劳动强度^[47]。甘肃金川镍矿引入了无人驾驶胶轮车运输系统,与井下定位基站配合,保证了物料运输高效且安全,运输效率提升了 25%。但是露天矿无人设备在极端天气下的适应性及井下设备的精准导航和通信稳定性,依旧是行业亟须解决的技术难题。

总体来看,金属矿山绿色开采装备在智能化与环保方面有了进展,在国内外矿山实践中发挥了关键作用,但面对复杂多变的开采环境和多样化作业需求,装备在可靠性、适应性及全生命周期成本控制等方面

还有提升空间。未来要加强产学研协同创新,突破关键核心技术,推动绿色开采装备持续升级并广泛应用。

1.3 能源动力

在“双碳”目标及全球对可持续发展越发重视的大背景下,金属矿山在能源与动力技术领域正经历着深刻变革,正逐步朝着绿色、高效、低耗的方向不断迈进,电动化设备对传统燃油设备的替代已成为一种趋势,并且成效较为明显。美国卡特彼勒公司(Caterpillar Inc.)推出的 793F AC 电动卡车,在智利埃斯康迪达铜矿(Escondida Copper Mine)投入使用后,和同吨位的柴油卡车相比,每小时可减少约 1.5 t 的二氧化碳排放,能源利用效率提高了 25% 以上,大幅度降低了碳排放及对环境的污染^[45,48]。而在中国,内蒙古白云鄂博铁矿已批量应用自主研发的宽体电动矿卡,并且和矿区内建设的光伏充电设施相结合,真正实现了车辆运行过程中的“零柴油消耗”,经测算,单台车辆每年减少的碳排放量超过 2 000 t,有效减少了对化石能源的依赖,还降低了运营成本。此外,瑞典山特维克矿山与岩石技术公司(Epiroc AB)的电动凿岩台车在北欧某矿山作业时,运行噪声降低了 40%,完全消除了柴油设备运行时产生的氮氧化物和颗粒物污染,极大地改善了井下作业环境^[49]。

1) 在新能源与储能技术的应用领域,已经取得了较大进展。澳大利亚博丁顿金矿(Boddington Gold Mine),在矿区内部署了大规模的太阳能光伏电站,其装机容量高达 15 MW,这一举措成功契合了矿区 10% 的电力需求,每年减少碳排放量约 1.2 万 t,充分展现了太阳能在矿山能源供应中的潜力^[50]。南非韦塞尔斯铂金矿(Wessels Platinum Mine),凭借安装风力发电机组,并与柴油发电机共同组成混合供电系统,有效减少了柴油消耗,实现了能源结构的优化。加拿大霍姆斯特克亚当斯锌矿(Homestake Adams

Zinc Mine)的锂电池储能系统,在电网负荷低谷时储存电能,在高峰时段释放,减少了30%的电网购电成本,又提升了能源利用的经济性与稳定性,保障了矿山电力供应的可靠性。

2)能源回收与再利用技术一直在不断创新发展。山东新城金矿采用再生制动能量回收技术,将矿车下放时产生的势能巧妙地转化为电能,然后回馈至电网,使得提升系统的能耗降低了18%,达成了能量的高效利用。俄罗斯塔尔纳赫铜矿(Talnakh Copper Mine)利用选矿厂尾矿浆的余热为矿区供暖,每年节省天然气消耗量超过50万 m^3 ,减少了对化石能源的依赖,同时也降低了运营成本。在压缩空气系统中安装余热回收装置,将空压机产生的热量用于预热工艺用水或者冬季供暖,提高了能源综合利用率。

3)智能能源管理系统的应用,为矿山能源实现精细化管理提供了有力支撑。必和必拓在澳大利亚某矿山引入AI能源管理平台,该平台整合矿山设备运行数据、生产计划及能源消耗数据,运用先进算法优化设备启停时间和运行参数,使矿山整体能耗降低了12%,提高了能源利用效率。福建紫金山金铜矿部署的智能能源管理系统,能对矿区内电力、燃油等能源消耗进行实时监控与分析,并借助动态调整设备运行模式,每年节约能源成本超过800万元,实现了能源高效利用与成本有效控制^[51]。

尽管金属矿山在能源与动力技术方面已经取得了较大进展,但是新能源发电固有的间歇性、储能设备成本较高及智能能源管理系统集成难度大等问题,仍然是行业发展所面临的挑战。未来需要加强新能源与传统能源的深度融合应用、加大对储能技术的研发投入以突破现有瓶颈,不断完善智能能源管理体系,推动金属矿山能源与动力技术朝着更加高效、清洁、智能的方向持续发展,实现行业的绿色转型升级。

1.4 生态环境

在生态文明建设及矿山可持续发展需求的推动下,金属矿山生态与环境技术主要关注污染防控、生态修复及协同治理等方面,在国内外实践过程中形成了多元技术体系。针对废水污染这一难题,生物处理技术取得了较好效果,加拿大高地谷铜矿(Highland Valley Copper Mine)采用硫化杆菌生物反应器处理酸性废水,重金属离子浓度降低了超过90%,出水达到了可循环利用的标准^[52]。中国江西德兴铜矿借助构建的人工湿地系统,并结合植物与微生物协同净化的方式,选矿废水中化学需氧量(COD)去除率超过了85%,达成了水资源的循环利用^[53]。在废气治理方面,除尘与脱硫技术持续革新,美国蒙大拿州的安那康达铜矿(Anaconda Copper Mine)采用电袋复合除

尘设备,将粉尘排放浓度控制在 10 mg/m^3 以下;瑞典基律纳铁矿(Kiruna Iron Mine)应用活性炭吸附脱硫工艺, SO_2 去除率达到了92%,有效减少了大气污染物的排放^[54]。

生态修复技术从以往的被动治理转变为主动预防与系统重建^[55]。巴西淡水河谷公司(Vale S.A.)开发的表土剥离-原位修复技术,借助精准保存和回填表土,植被重建效率提高了60%,矿区生态系统在3年内基本得以恢复。中国针对西北干旱矿区研发的“土壤重构+滴灌植被”技术,在甘肃金昌镍矿废弃地的应用中,使植被覆盖率从不足5%提升到了35%;在高寒地区,西藏巨龙铜矿采用“热棒-保温材料”复合防冻技术,解决了冻土区生态修复难题,成功种植了耐寒草种^[56]。

在矿山地质灾害方面,智能监测预警系统被广泛应用。澳大利亚卡尔古利金矿(Kalgoorlie Gold Mine)部署了InSAR卫星遥感与光纤传感监测网络,可对边坡位移进行毫米级的实时监测,预警准确率超过了95%。中国安徽姑山铁矿构建了“空天地”一体化监测平台,结合AI算法分析,可以提前3~7d精准预警塌陷风险,有效减少了灾害损失。

生态协同治理模式不断创新,智利埃斯康迪达铜矿将矿区生态修复与周边社区生态农业相结合,打造了生态产业链。中国山东黄金集团推行“绿色矿山社区共建”,借助生态补偿机制,实现了矿区与周边生态环境的协同发展。

虽然生态与环境技术有一定成效,但是高海拔、干旱荒漠等极端环境下的生态修复技术仍存在瓶颈,跨区域生态协同治理机制也不完善。未来要深化多学科技术融合,推动生态修复材料创新与智能化升级,完善生态补偿与环境治理长效机制,实现金属矿山开发与生态保护的平衡。

1.5 技术标准

随着金属矿山绿色开采技术与装备快速发展,技术标准与规范体系完善成为行业有序发展的关键支撑,传统矿山开采标准多关注生产效率与安全指标,难以适应绿色转型需求。在此情形下,从国家层面到行业协会,都加快了构建全流程、多维度新型标准体系的步伐,推动绿色开采从技术创新向规范化、规模化应用转变。

1)国家政策引领方面,中国陆续出台《绿色矿山建设规范》《矿产资源节约与综合利用先进适用技术推广目录》等文件,明确绿色矿山准入门槛与评价指标^[57-58]。例如:《绿色矿山建设规范》对矿石回采率、尾矿综合利用率、废水循环率等核心指标有硬性规定,要求露天金属矿山矿石回采率不低于95%,尾矿

综合利用率达35%以上,废水循环利用率超过85%。这些标准为矿山企业提供建设指引,也为监管部门提供量化考核依据^[59]。

2)在行业标准方面,中国矿业联合会牵头制定了DZ/T 0376—2021《智能矿山建设规范》,该规范针对智能采矿装备、自动化控制系统及物联网通信协议等领域,提出了统一的技术要求^[60-61];智能采矿台车要有自动定位功能及钻孔参数自适应调节功能,定位精度误差不能超过5 cm,无人驾驶运输系统的车辆间距控制误差需在 ± 0.3 m,以此保证设备协同作业的安全性与稳定性。国际标准化组织也在积极推动全球矿山机械互联标准的制订工作,以解决不同品牌装备之间的数据交互障碍,提升矿山智能化集成水平。

3)在生态环境标准领域方面,HJ 651—2013《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》,针对矿区植被恢复、土壤重构及污染防治等环节制定了详细标准^[62]。例如:废弃矿区植被覆盖率要恢复至周边自然区域的80%以上,土壤pH、重金属含量等指标需符合国家土壤环境质量标准。针对尾矿处理,GB 18599—2020《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》明确了尾矿库防渗、防扬散及防流失的技术要求,有效降低环境风险。

绿色开采标准体系的建设十分注重产学研用协同创新。由高校、科研院所和企业联合制定的团体标准,正成为技术创新成果快速转化的关键桥梁。例如:中国有色金属工业协会发布的《金属矿山膏体充填技术标准》,融合了长沙矿冶研究院等机构的最新研究成果,对膏体配比、输送工艺及充填体强度等参数作出规范,推动了膏体充填技术在全国矿山的标准化应用^[63]。

虽然中国金属矿山绿色开采标准体系已经初步形成一定规模,但仍然面临着部分挑战。例如:新型绿色开采技术的标准还是空白,跨区域、跨行业的标准协同机制有待完善,国际标准话语权仍需要加强。未来随着技术创新不断推进,绿色开采标准体系会朝着智能化、国际化、精细化方向发展,依靠标准引领释放技术创新效能,推动金属矿山行业实现高质量绿色发展。

2 展 望

在全球资源需求持续攀升及生态环境保护这两项战略的驱动下,金属矿山开采行业正处在关键的转型阶段,随着深部开采朝着地层更深处不断拓展,绿色开采理念贯穿于整个流程,智能开采技术对作业模式进行了重塑,传统开采体系原本存在的矛盾变得日益明显,如高温高压环境下的作业安全问题、生态修

复方面的技术瓶颈及资源利用效率提升所面临的困境等^[64]。面对未来,迫切需要从有前瞻性的视角去探索技术革新路径,基于这样的情况,金属矿山绿色开采技术与装备会在跨学科技术融合、智能体协同生态构建及循环经济与生态重建融合这3个方向实现突破,为行业的可持续发展开拓新的可能性,为跨学科技术融合带来颠覆性创新突破^[65]。

1)跨学科技术融合与颠覆性创新突破。未来金属矿山绿色开采将深度融合量子计算、纳米技术、生物工程等前沿学科,催生颠覆性的技术变革。量子计算依靠其超强的并行处理能力,会革新矿体建模与开采方案设计,可在纳秒级的时间内完成传统计算需要数月才能完成的复杂矿体三维建模及开采路径优化,精准度可以提升至亚米级^[66]。纳米技术的应用将会推动破岩材料革新,研发纳米级自修复钻头,其表面涂层可在磨损瞬间实现原子级修复,使钻头寿命延长10倍以上^[67-68]。在生物工程领域,凭借基因编辑技术培育出的特殊微生物,可实现特定金属元素的靶向富集,大幅度降低低品位矿石的开采难度与成本^[69]。此外,利用可控核聚变技术实现小规模能量释放的破岩装置,有望解决传统开采高能耗、低效率的难题,以近乎零排放的方式达成高效开采。

2)智能体协同与无人化开采生态构建。智能体协同构建无人化开采生态,随着人工智能、数字孪生与6G通信技术实现飞跃发展,金属矿山将会构建全域智能体协同的无人化开采生态系统^[70-72],智能采矿机器人有自主进化能力,借助强化学习持续优化作业策略,可在复杂多变的地下环境中自主规划开采路径、智能调整作业参数^[73-74]。数字孪生技术创建与实体矿山1:1映射的虚拟空间,实时模拟开采过程中的各类物理现象,实现对开采方案的预演与优化。6G通信技术提供的超低时延、超高带宽网络,能保证海量设备数据即时传输与处理,使井下无人设备集群实现毫秒级协同作业。未来整个矿山会成为一个由智能体组成的有机整体,从钻孔、爆破、运输到选矿,全流程都不需要人工干预,作业效率可提升300%以上,同时彻底消除人员伤亡风险^[75]。

3)循环经济与生态系统重建深度融合。金属矿山以循环经济理念为核心,打造从资源开采到生态重建的全生命周期闭环体系。在资源循环利用上,运用分子识别技术对尾矿精准分选,将有用金属元素提取效率提高到99%以上;利用3D打印技术将尾矿转化为高附加值的建筑材料、催化剂载体等产品^[76]。在生态修复领域,借助合成生物学技术,设计能快速适应矿区恶劣环境的超级植物,这些植物能有效修复土壤污染,且可依靠光合作用捕集大量二氧化碳,还可以

产生高价值的生物燃料。矿山生产与周边生态系统深度融合,建设包含光伏发电、风力发电、储能设施的清洁能源基地,将废弃矿区转变为生态友好型的能源生产与生态旅游综合体,实现从“资源消耗型”到“生态贡献型”的根本性转变,为全球可持续发展提供示范样板^[77]。

3 结 语

在全球资源需求持续上升和生态环境保护意识不断提高的背景下,金属矿山开采行业正处于关键转型阶段,绿色开采技术与装备在多方面取得了进展,但仍面临技术经济性、工程适应性和产业化推广等挑战。未来金属矿山绿色开采凭借跨学科技术融合实现颠覆性创新,构建智能体协同的无人化开采生态系统,深度融合循环经济与生态系统重建,解决传统开采体系的固有矛盾,实现行业可持续发展。这不仅能够满足全球对金属矿产资源的需求,也能有效减少开采活动对环境的影响,为实现全球可持续发展提供助力。

【参 考 文 献】

- [1] CAI M F, LI P, TAN W H, et al. Key engineering technologies to achieve green, intelligent, and sustainable development of deep metal mines in China[J]. *Engineering*, 2021, 7(11): 1 513–1 517.
- [2] 张鹏飞, 张林嘉, 周瑜, 等. 钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(7): 22–36.
- [3] 陈超, 张梦莹, 李文龙, 等. 钛合金熔丝增材制造的研究现状与应用领域[J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(1): 1–19.
- [4] 杨筱筱, 罗蓉丽, 王应武, 等. 稀贵金属材料基因工程研究进展[J]. *热加工工艺*, 2025(13): 1–9, 16.
- [5] 孙晓宾, 康婷婷, 杜智锋, 等. 磷酸铁锂电池长期存储失效机理研究[J]. *有色金属科学与工程*, 1–11 [2025-05-14]. <https://link.cnki.net/urlid/36.1311.tf.20250416.1539.005>.
- [6] 陈伟, 赵晞泉, 俞肇元. 全球金属矿产贸易网络演化及其启示[J]. *地理科学进展*, 2025, 44(7): 1 406–1 421.
- [7] 柳小波, 丛峰武, 张宝金, 等. 我国金属矿山智慧化转型实践与展望[J]. *金属矿山*, 2025(5): 1–16.
- [8] 李刚, 吴将有, 金龙哲, 等. 我国金属矿山粉尘防治技术研究现状及展望[J]. *金属矿山*, 2021(1): 154–167.
- [9] 蒋仲安, 曾发镔, 王亚朋. 我国金属矿山采运过程典型作业场所粉尘污染控制研究现状与展望[J]. *金属矿山*, 2021(1): 135–153.
- [10] 朱远乐, 王淇萱, 刘文岗, 等. 尾矿库灾害风险防控研究现状及发展态势[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(8): 1 054–1 064.
- [11] 曾现来, 李金惠, 耿涌, 等. 碳中和背景下我国典型战略性金属中长期可持续供给路径[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(8): 1 099–1 109.
- [12] 顾成进, 杨宝贵, 路绍杰, 等. 双碳背景下龙王沟煤矿新型绿色矿山建设[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(增刊1): 440–448.
- [13] LI B L, GONG J R, LONG Y, et al. Experimental investigations on mechanical and failure behaviors of transversely isotropic shale containing twin fissures under true triaxial stresses[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2023, 93(8): 3 205–3 228.
- [14] ONIFADE M, ZVARIVADZA T, ADEBISI J A, et al. Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and Practices[J]. *Green and Smart Mining Engineering*, 2024, 1(2): 157–174.
- [15] MOON G H, LIM J, KIM B J, et al. Perspective on direct seawater electrolysis and electrodialysis: Innovations and future directions for mining green X[J]. *Green Chemistry*, 2024, 27(4): 982–1 005.
- [16] 刘招平, 郭云清, 蒋颖, 等. “双碳”战略目标下矿山企业减排增汇路径分析[J]. *中国矿业*, 2024, 33(增刊2): 6–9.
- [17] 袁亮, 张通, 王玥晗, 等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 1–12.
- [18] FENG X T, LIN F, ZHANG J Y, et al. Development of high-power microwave mechanical integrated continuous mining device[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(9): 3 365–3 377.
- [19] 邓昕. 加拿大拉格伦镍矿[J]. *世界有色金属*, 2009(2): 27.
- [20] 高亚楠, 王云龙. 矿山建设中现代破岩方法综述[J]. *晋控科学技术*, 2023(2): 1–8, 61.
- [21] 庄仪兴. 国外全断面掘进机的发展现状[J]. *煤矿机电*, 1996(1): 37–38.
- [22] WANG F D, MILLER R. High pressure water jet assisted tunneling[J]. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 1978, 15(2): A32.
- [23] ZHANG J L, YANG F W, CAO Z G, et al. In situ experimental study on TBM excavation with high-pressure water-jet-assisted rock breaking[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(12): 4 066–4 077.
- [24] GAO M Z, LIU J J, LI C X, et al. Damage and fracture behavior and spatio-temporal evolution of acoustic emission of sandstone before and after laser radiation[J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(9): 3 264–3 280.
- [25] GUO C G, SUN Y, YUE H T, et al. Experimental research on laser thermal rock breaking and optimization of the process parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 160: 105251.
- [26] ZEDIKER M S. High power fiber lasers in geothermal[J]. *Oil & Gas*, 2014, 8931: 89610D.
- [27] 祝效华, 唐无忌, 刘伟吉, 等. 液相冲击波破岩等离子体通道生长发展机理及敏感性探索[J]. *天然气工业*, 2025, 45(1): 14–24.
- [28] ZHANG Y Y, WANG J, XUE Q L, et al. Research status and prospects of high-voltage pulse plasma rock-fracturing technology[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(16): 7261.
- [29] 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): 3 883–3 912.
- [30] 王雁冰, 李雪, 王兆阳, 等. 围压作用下等离子体的爆破破岩效应[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(4): 136–152.

- [31] 彭亮,江科,余锦柱,等.尾砂浓密技术在膏体充填工艺中的发展及应用[J].采矿技术,2025,25(1):180-186.
- [32] 陈桢宇,李晓飞,孟文文.焦家金矿无废矿山建设工程实践[J].黄金,2022,43(5):93-96,100.
- [33] 王海军,苗勇刚,张长锁,等.某金属矿地下采选充一体化技术研究与应[J].中国钨业,2021,36(4):24-30.
- [34] 刘峰.积极发挥“采选充一体化”新技术的协同作用助推矿区生态文明建设和煤炭清洁高效利用新发展[J].煤炭加工与综合利用,2023(6):1-5.
- [35] 尹升华,王雷鸣,吴爱祥,等.我国铜矿微生物浸出技术的研究进展[J].工程科学学报,2019,41(2):143-158.
- [36] 孟丹.阿特拉斯·科普柯BoomerXE3C型三臂凿岩台车谱写台湾隧道施工新篇章[J].工程机械,2016(2):1.
- [37] 颜武刚,张浩,代建龙,等.CY-RV系列智能型天井钻机性能及其应用[J].采矿技术,2024,24(4):268-274.
- [38] 黎忠炎,龙国强,沈盛强.适用于井下狭窄巷道的铰接自行式智能化天井钻机[J].有色金属(矿山部分),2022,74(3):133-138.
- [39] 康瑞海,王旭,仵锋锋,等.紫金山金铜矿全尾砂胶结充填技术研究与应[J].矿业研究与开发,2018,38(3):20-24.
- [40] 赖伟.尾砂浆体仓式浓密技术及其充填应用[J].黄金,2023,44(9):31-35.
- [41] 刘渝强,耿立锋,郑伯坤,等.细粒级尾砂胶结充填工艺方案的优选与应用[J].采矿技术,2023,23(5):200-206.
- [42] 李成伟,祝鑫,彭亮,等.某铁矿全尾砂充填系统技改设计及应用研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):158-162.
- [43] 李跃国,赵阳,苏青山,等.银漫矿业采矿方法优化研究[J].采矿技术,2024,24(4):75-80.
- [44] 李少博,顾清华,阮顺领,等.融合小波变换的露天矿无人车视觉多任务感知方法[J].煤炭学报,1-13[2025-05-14].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1627>.
- [45] BARNDON K. FMG goes fully automatic [J]. Australia's Mining Monthly,2020(12):20.
- [46] MURDEN S. Autonomous vehicles lead Rio Tinto and BHP Billiton into cruise control [J]. Australian Mining,2015(11):2.
- [47] 刘子强,周先,陈功,等.浅谈柿竹园智能矿山建设进程及发展[J].采矿技术,2022,22(2):114-117.
- [48] SUTTON R. Caterpillar expands, refines mining technology [J]. Construction Equipment,2017(11):16-17.
- [49] LEONIDA C. Face drilling's cutting edge [J]. Engineering Mining Journal,2024,225(5):225.
- [50] RIZOS C, GAMBALE N, LILLY B. Mine machinery automation using locata-augmented GNSS [C]//ION. Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT meeting. Manassas: ION, 2013: 463-469.
- [51] 张永玺,项江波,周科平,等.紫金山金铜矿地下采场多装备协同智能开采系统研究及应用[J].金属矿山,2024(1):55-63.
- [52] OTCHERE F A, VEIGA M M, HINTON J J, et al. Transforming open mining pits into fish farms: Moving towards sustainability [J]. Natural Resources Forum,2004,28(3):216-223.
- [53] 王翠珍,周广柱,杨锋杰.江西省德兴铜矿酸性水污染区几种植物中重金属的分布特征研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2008,27(5):85-89.
- [54] ANGELBRATT J, MELLQVIST J, SIMPSON D, et al. Carbon monoxide (CO) and ethane (C₂H₆) trends from ground-based solar FTIR measurements at six European stations, comparison and sensitivity analysis with the EMEP model [J]. Atmospheric Chemistry, 2011, 11(17):9 253-9 269.
- [55] 迟崇哲,刘影,王超,等.有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J].黄金,2024,45(12):8-12,138.
- [56] 卢鑫,徐启云,兰水荣,等.仿生草垫对高原矿山生态修复应用效果评价[J].草地学报,2025,33(8):1-9.
- [57] 孟文文,李鹏,李颂.我国绿色矿山建设制度规范体系及发展趋势研究[J].中国矿业,2024,33(12):154-162.
- [58] 罗世勇,赖伟.绿色矿山尾砂综合利用技术研究[J].黄金,2024,45(9):8-11.
- [59] 王燕,陈群,徐亦萍,等.《绿色矿山建设规范》标准实施效果分析与对策研究[J].中国标准化,2019(15):95-98.
- [60] 陈连韞,国祯翔,侯杰,等.地下黄金矿山安全风险智能化综合管控系统研究与应用[J].黄金,2023,44(9):54-58.
- [61] 汪玥玢.矿山无人驾驶技术及发展前景分析 [J]. 黄金,2020,41(3):48-50.
- [62] 黎逢良,张孝坡,王夏夏.矿山生态环境污染原因及生态修复研究[J].中国金属通报,2024(9):231-233.
- [63] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1 652-1 666.
- [64] 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[J].工程科学学报,2023,45(8):1 281-1 292.
- [65] 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.
- [66] 周文略,湛景震,范才兵,等.科技创新赋能绿色矿山建设研究与实践[J].金属矿山,1-11[2025-05-23].<https://link.cnki.net/urlid/34.1055.TD.20241231.0930.002>.
- [67] 何智海,倪雅倩,杜时贵,等.纳米压痕技术在岩石材料中的应用与研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(10):2 045-2 066.
- [68] 王俊伟,车明光,宋晓,等.基于纳米压痕技术的岩石力学参数评价[J].深圳大学学报(理工版),2023,40(5):608-614.
- [69] 艾纯明,孙萍萍,王贻明,等.表面活性剂在溶浸采矿中的研究与应用现状 [J]. 金属矿山,2019(5):9-13.
- [70] 李晨鑫,王亚坤.智能矿山高速信息传输通道——解密矿用5G通信系统[J].智能矿山,2024,5(11):48-52.
- [71] 杨加文.智能矿山中5G通信技术的应用 [J]. 数字技术与应用,2023,41(12):105-107.
- [72] 李涛,孙琰,侯建硕,等.人工智能在矿山设备预测性维护中的应用研究[J].黄金,2025,46(1):1-5,19.
- [73] 胡荣华,安冬,史梦圆,等.智能矿用机器人研究现状及发展趋势[J].黄金,2023,44(9):59-68.
- [74] 沈义俊,张炜峰,周健一,等.机器人在管道提升式深海采矿系统中智能化的挑战与发展趋势 [J]. 科技导报,2024,42(12):92-106.
- [75] 付翔,王开,王然风.智能采矿数智赋能技术内涵与应用范式[J].工矿自动化,2025,51(3):1-8.
- [76] 冯晓巍,汪明坤,薛飞,等.内置等强缩尺3D打印支护系统的矿山相似物理模拟试验研究[J].中国矿业大学学报,2022,

51(2):232-243,256.

发电站模式[J].有色金属(矿山部分),2022,74(6):70-73.

[77] 李昊,孙金水.“双碳”背景下废弃矿山治理新模式研究—光伏

Research progress and future development trends of green mining technology and equipment for metal deposits

Zhou Aimin^{1,2,3}, Wang Changjun^{1,2,3}, Gong Jinrui^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores;

2. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 3. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.)

Abstract: With the acceleration of global industrialization and urbanization, the contradiction between the supply and demand of metal mineral resources has become increasingly prominent. Traditional mining models face severe challenges in terms of resource utilization efficiency and impact on ecological environments. Driven by the strategic goals of "carbon peak and carbon neutrality" and ecological civilization construction, metal deposit mining is undergoing a profound transformation from extensive practices to green and intelligent operations. Based on current industry demands for development, the development status of green mining technologies was discussed from 5 dimensions. The technical principles of innovative mining methods were analyzed, and breakthroughs in intelligent equipment were evaluated. Moreover, applications of clean energy were explored, and the effectiveness of ecological protection technologies was assessed. Progress in the construction of standard systems was investigated. Through case studies, the advantages and limitations of these technologies in engineering applications were also revealed. The research indicates that although significant achievements have been made in green mining technologies, bottlenecks remain in economic efficiency, engineering adaptability, and large-scale application. In the future, interdisciplinary innovation should be promoted; intelligent collaborative systems should be established, and the integration of resource recycling and ecological restoration technologies should be deepened to provide new ideas and pathways for the sustainable development of the metal deposit mining industry.

Keywords: metal deposit; green mining; technical progress; equipment upgrade; sustainable development; intelligentization; resource recycling