

智能化技术在金属矿山采矿工程中的应用现状及发展趋势

栾文成

山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司 山东 烟台 264000

摘要: 本文梳理地质勘探、作业生产、安全运维、一体化管控四大类智能采矿核心技术,剖析露天与深部地下矿山智能化落地场景、应用成效,指出老旧矿山改造困难、工况适配性差、数据孤岛、人才短缺等问题,并剖析资金、技术、标准层面成因。结合行业发展规律,从技术、行业维度预判发展趋势,提出分层改造、产学研攻关、打通数据壁垒、完善人才体系四大优化对策,助力金属矿山智能、绿色、低碳转型发展。

关键词: 智能化技术; 金属矿山; 采矿工程; 应用现状; 发展趋势

引言: 传统金属矿山开采存在作业风险高、资源损耗大、运营成本偏高、能耗污染突出等痛点,伴随5G、数字孪生、人工智能技术迭代,智能采矿成为行业转型升级核心方向。当下国内矿山智能化建设逐步落地,但全域推广仍面临多重制约。基于此,本文系统阐释智能采矿核心技术,复盘工程应用实况,深挖现存短板与根源,研判行业未来发展走向,针对性提出落地优化策略,为金属矿山智能化提质增效、安全低碳开采提供理论参考。

1 金属矿山智能采矿核心技术概述

1.1 矿山地质数字化勘探智能技术

(1) 三维地质建模与矿体智能勘测技术。基于钻孔数据、三维激光扫描与无人机航测,构建高精度矿体地质模型,实现矿体形态、产状、厚度的可视化解析,为采矿设计提供数字化基底。(2) 矿石品位智能检测与资源储量自动核算技术。利用XRF在线分析、高光谱成像及中子活化技术,实现爆堆、铲装面矿石品位的实时检测,结合地质统计模型自动更新资源储量,指导配矿与采掘计划。(3) 围岩结构、地质灾害超前智能探测技术。采用地质雷达、微震监测与孔内摄像等技术,智能识别断层、破碎带及节理裂隙分布,超前预测岩爆、突水等灾害风险,为支护与开采提供预警依据^[1]。

1.2 采矿作业环节智能化核心技术

(1) 智能凿岩爆破与精准开采控制技术。通过高精度定位与自适应钻孔算法,实现炮孔布置、孔深、角度的自动控制,结合爆破仿真优化装药结构,降低大块率与贫化损失。(2) 采掘、铲运设备无人自主作业技术。集成激光雷达、SLAM导航与深度学习感知系统,使凿岩台车、铲运机等装备具备路径规划、障碍识别与自主行驶能力,实现采掘面无人化作业。(3) 井下运输、提升系统智能调度技术。基于矿井机车无人驾驶、胶带输送

机智能巡检及提升机负荷自适应控制,结合动态调度算法,实现矿石运输与提升的协同优化,提高运输效率。

1.3 矿山安全与运维智能化技术

(1) 井下多源环境数据实时智能监测技术。部署气体、粉尘、温度、风速及地压传感器,通过物联网实时采集环境参数,自动生成安全态势图,实现井下环境透明化管理。(2) 顶板垮塌、突水、岩爆灾害智能预警技术。利用微震、声发射、应力应变监测数据,构建灾害预测深度模型,识别前兆特征,提前发出分级预警,为人员撤离与支护决策提供时间窗口。(3) 矿山设备故障自诊断、智能运维技术。在关键设备上安装振动、温度、电流传感器,结合故障特征库与机器学习算法,实现异常自动识别、故障预判与维护建议推送,降低非计划停机时间。

1.4 矿山一体化智能管控平台技术

(1) 5G+工业矿山物联网传输技术。利用井下5G专网、WiFi6及光纤环网,构建低时延、高可靠的融合通信网络,满足视频回传、远程遥控、海量传感器接入的带宽与实时性需求。(2) 数字孪生矿山全域可视化管控技术。创建与物理矿山同步映射的数字孪生体,集成采掘、运输、通风、安全等实时数据,实现三维可视监控、仿真模拟与远程干预。(3) 采矿生产大数据分析 with 智能决策技术。汇聚地质、生产、设备、安全等海量数据,利用数据挖掘与优化算法,生成采掘计划优化、能耗管控、成本分析等决策支持,驱动矿山精益运营。

2 智能化技术在金属矿山采矿工程应用现状及现存问题

2.1 智能化技术采矿工程落地应用场景

(1) 露天金属矿山智能开采成套技术应用。目前大型露天铁矿、铜矿等已广泛应用无人机测绘、GPS/北斗智能调度、无人驾驶矿卡及远程遥控钻机,形成“穿

孔—爆破—铲装—运输—排土”全流程智能化闭环,显著提升采剥效率与作业安全性。(2)深部地下金属矿山无人采掘技术应用。在千米级深井矿山,智能凿岩台车、遥控铲运机、无人驾驶电机车逐步替代人工进入高应力、高地温采场,通过井下5G网络实现远程操控与自主导航,部分矿山已实现铲运、运输环节的常态化无人作业^[2]。(3)选矿-采矿一体化智能联动生产应用。依托工业互联网平台,将采场出矿品位、矿量数据与选厂破碎、磨矿、浮选系统实时联动,动态调整采矿计划与配矿方案,实现“以选定采、以采保质”的协同优化,降低矿石贫化率与选矿能耗。(4)绿色低碳视角下智能节能开采技术应用。通过智能通风按需调控、提升机变频优化、破碎站峰谷平用电调度等技术,降低采矿综合能耗。同时,智能充填系统根据采空区状态自动调节充填料浆配比,减少水泥用量,实现降碳减排。

2.2 智能采矿技术应用取得成效

(1)优化采矿工艺流程,提升矿产资源回采率。智能配矿与三维可视化设计使采场布置更科学,结合高精度中深孔定位,减少矿柱留设与矿石损失,回采率较传统开采提高5%~10%,有效延长矿山服务年限。(2)减少井下作业人员,降低安全生产事故发生率。通过固定设施无人值守、采掘面远程操控,重点矿山井下单班作业人员减少30%~50%,人机分离后冒顶、片帮、车辆伤害等事故显著下降,本质安全水平大幅提升。(3)实现矿山集约化管控,提升整体生产运营效益。集成生产、设备、能耗、安全等数据的智能管控中心投入使用,管理人员可实时调度各环节,设备利用率提高15%~20%,吨矿综合成本降低8%~12%,经济效益明显。

2.3 当前智能化采矿应用存在核心问题

(1)老旧矿山改造难度大,智能装备普及率区域失衡。大量服役十年以上的老矿山巷道断面小、供电与网络基础设施落后,难以部署大型智能装备;东部与西部、国有与民营矿山之间智能化水平差距显著,整体普及率不足30%。(2)井下复杂工况适配性差,智能技术落地兼容性不足。高湿、粉尘、电磁干扰及巷道变形等恶劣环境导致传感器漂移、通信中断、定位失准,通用智能化设备“水土不服”现象普遍,系统平均无故障时间短,维护成本高。(3)矿山数据孤岛突出,一体化管控平台协同性较弱。采矿、选矿、地质、设备等子系统往往由不同厂商建设,数据格式、通信协议互不兼容,无法形成统一的矿山数据中台,跨系统联动仍需人工中转,智能化协同效率大打折扣。

2.4 问题成因分析

(1)矿山企业前期智能化建设资金投入不足。智能化改造单矿投资动辄数千万元至上亿元,而近年来矿产品价格波动较大,部分企业优先保生产、保安全,智能化投入被挤压,尤其中小矿山缺乏长期资金规划,导致改造进程迟缓。(2)矿业智能技术研发贴合现场工况程度不足。高校和科技企业研发人员多缺乏井下一线经验,样机在实验室运行良好,但到井下高温高湿、震动冲击环境中故障频发;产学研用脱节,技术成果转化周期长,适用性验证不充分便仓促推广。(3)行业智能化建设标准与规范体系不完善。目前尚缺乏统一的智能矿山分级标准、数据接口规范及验收评价体系,各厂商产品互不兼容,企业选型困难;同时缺少针对深部、复杂矿体的专项智能化技术规程,导致工程建设无标可依。

3 金属矿山采矿工程智能化发展趋势与优化对策

3.1 技术层面未来发展趋势

(1)AI人工智能+机器学习深度融合,灾害预判自主化升级。未来金属矿山将构建基于海量地质数据、微震监测、应力应变数据的深度学习模型,实现对岩爆、突水、冒顶等重大灾害的自主识别、超前预警与动态决策。AI系统不再仅作为辅助工具,而是逐步替代人工进行灾害风险等级评判,推动矿山安全从“被动响应”向“主动预控”跃升。(2)数字孪生、全域物联网覆盖,全流程无人矿山普及化。通过构建与物理矿山实时同步的数字孪生体,结合井下全域5G/WIFI6物联网感知网络,实现“采、掘、运、提、排、充”全工序远程操控与自主运行。铲运机、凿岩台车、破碎锤等装备将全面去驾驶室化,地面调度中心即可完成井下全流程作业,无人矿山从示范应用走向规模化落地^[3]。(3)深部极端工况专用智能装备迭代研发、国产化替代。针对深部开采高应力、高地温、强腐蚀环境,研发耐高温、抗冲击、长寿命的智能化采掘装备与辅助机器人。重点突破深井重载自主导航、液压系统自适应控制等核心技术,加快国产化替代进程,打破国外高端装备垄断,降低智能化建设对进口装备的依赖。(4)采矿、环保、固废处置一体化智能协同技术发展。智能采矿系统将与充填制备站、尾矿脱水系统、井下分选系统深度联动,实现“采充平衡、废石不出井、尾矿资源化”的闭环控制。通过智能调度算法动态优化采矿顺序与充填配比,在保障回采安全的同时最大化消纳固废,推动矿山开采向无废、低碳方向演进。

3.2 行业建设发展趋势

(1)矿山智能化建设行业标准化、规范化发展。国家及行业层面将加快出台覆盖智能矿山设计、建设、

验收、运维全周期的技术标准与评价体系,统一数据接口、通信协议、安全等级等核心规范,解决当前各厂商系统不兼容、数据孤岛严重的问题,为智能化大规模推广提供制度保障。标准落地后,不同厂家设备可实现即插即用,显著降低集成成本。(2)大中小型金属矿山分层、差异化智能转型。不再搞“一刀切”式智能化建设,而是根据矿山规模、矿体赋存条件、现有装备水平,制定分层级、可裁剪的智能化实施方案。大型矿山率先建设全流程智能矿山,中小型矿山聚焦关键环节无人化、远程化改造,形成与自身资源禀赋和发展阶段相匹配的转型路径,避免资金与技术的过度投入。(3)智能矿山与绿色矿山、低碳矿山融合共建。智能化建设将与绿色矿山评价体系、碳足迹管理系统深度耦合,通过智能能耗优化、电动化装备替代、智能充填减排等手段,实现资源利用效率提升与碳排放强度下降的双重目标,推动形成“智能引领、绿色为本、低碳运行”的新型矿山建设范式。预计全行业吨矿能耗可降低15%-20%,助力矿业达成“双碳”目标^[4]。

3.3 智能化采矿落地优化对策

(1)分层推进矿山改造,加大智能采矿专项资金投入。按照“先易后难、效益优先”原则,优先对通风、排水、提升等固定设施实施智能化改造,再逐步推进采掘作业面远程化。同时设立国家和企业两级智能化专项资金,对中小矿山改造给予专项补贴或低息贷款,降低企业一次性投入压力。(2)产学研协同攻关,优化井下适配型智能采矿技术。依托高校、科研院所与矿山企业联合实验室,重点攻克井下复杂环境下的高精度定位、抗干扰通信、恶劣工况传感器可靠性等工程难题。建立技术成果快速转化机制,鼓励装备企业深入井下验证产品,缩短研发到应用的周期。可设立行业级“揭榜挂帅”项目,集中突破共性“卡脖子”技术。(3)打通矿山数据壁垒,搭建全域一体化智能管控体系。推动矿山

各子系统(地质、采矿、选矿、安全、设备)统一接入工业互联网平台,建立矿山级数据中台。制定企业内部数据共享标准,破除部门间数据壁垒,实现从资源勘探到闭坑复绿的全生命周期一体化智能管控。数据中台还可支撑AI模型的持续迭代,形成数据驱动型管理闭环^[5]。

(4)搭建人才培养体系,补齐矿业复合型人才短板。在矿业类高校增设“智能采矿工程”交叉学科,联合装备企业共建实训基地。推行“矿工再技能化”计划,对现有采矿、机电人员进行智能化操作与维护专项培训,同时制定激励政策引进既懂采矿工艺又掌握AI、物联网技术的复合型人才,从根本上解决人才结构性短缺问题。

结束语

综上,智能化技术有效破解金属矿山传统开采弊端,提升资源回采率与矿山本质安全水平,赋能矿山精益化运营。当前行业仍存在区域发展失衡、技术适配不足、体系标准缺失等现实难题。未来行业需依托AI与数字孪生技术迭代,完善行业标准,差异化推进矿山改造,兼顾技术革新、人才培育与绿色低碳建设,补齐行业发展短板,推动全流程无人智能矿山规模化落地,助力矿业高质量与双碳目标协同落地。

参考文献

- [1]王鑫阳.金属矿山采矿工程智能化技术应用现状与优化路径[J].黄金,2025,46(7):62-66.
- [2]李国清.地下金属矿山智能化采矿关键技术进展及行业应用综述[J].金属矿山,2024,11(5):91-94.
- [3]王连成,邵安林.金属矿山开采智能化技术应用痛点与中长期发展趋势[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
- [4]周少兵.5G+数字孪生技术在金属矿山智能采矿中的落地应用研究[J].中国矿业,2025,34(11):45-51.
- [5]吴爱祥.深部金属矿山智能开采技术体系构建与工程应用[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):589-598.