

智能化技术在有色金属采矿工程中的应用

赵 龙

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 智能化技术正深刻变革有色金属采矿工程。本文阐述智能化采矿技术体系, 涵盖“感知-决策-执行”闭环架构、数字孪生等核心框架, 以及物联网、人工智能等支撑技术。详细介绍其在地质勘探、采矿设计、采掘作业、通风安全监测、选矿流程等环节的具体应用。通过国内某大型地下铜矿的典型案例, 分析智能化改造方案与实施效果, 展现其在提升效率、降低成本、改善安全等方面的显著成效, 凸显其广阔应用前景。

关键词: 智能化技术; 有色金属采矿工程; 工程应用

引言: 在全球工业智能化浪潮的推动下, 有色金属采矿工程正经历着前所未有的变革。传统采矿模式面临着资源回收率低、人力成本高、安全风险大等诸多挑战, 难以满足行业可持续发展的需求。智能化技术凭借其强大的数据感知、分析决策与自动化执行能力, 为有色金属采矿工程带来了新的发展契机。它不仅能够优化生产流程、提高资源利用效率, 还能有效降低安全风险, 成为推动该行业转型升级的关键力量。

1 智能化采矿技术体系构建

1.1 智能化采矿核心框架

(1) “感知-决策-执行”闭环系统架构: 作为核心运转中枢, 通过三层协同实现全流程智能管控。感知层依托多类型传感器网络, 采集井下有害气体、矿岩应力、设备参数等数据, 同步接入人员定位、压风供水等“六大系统”核心数据(符合AQ/T2080-2023), 构建“采-掘-运-安”全环节感知网络; 决策层结合实时与历史数据, 借AI算法优化开采方案、预警风险, 生成调度指令; 执行层由智能装备完成采掘、支护等作业, 反馈数据至感知层, 形成闭环以提升效率与安全。(2) 数字孪生与透明矿山理念: 数字孪生构建1:1虚拟模型, 整合地质、生产、设备及避险设施数据(依据AQ/T2033-2023), 实现矿山动态复刻; 透明矿山依托该模型打破“信息孤岛”, 使井下地质、进度、隐患等信息透明化, 支持方案模拟与风险预判, 实现全生命周期管控。

1.2 关键支撑技术

(1) 物联网: 特种传感器实现环境、设备、人员全方位采集; 5G保障数据实时传输, 解决通信盲区, 支撑闭环架构与人员定位双向呼叫(AQ/T2080-20235.2.12)。(2) 大数据与云计算: 存储多源异构数据, 整合人员出入井、压风压力等合规数据(符合AQ/T2034-2035), 借数据融合算法挖掘规律, 为决策提供

支撑。(3) 人工智能: 机器学习预测矿岩品位与设备故障, 计算机视觉识别矿岩边界、人员违规(契合AQ/T2080-2023), 优化算法平衡资源回收率与能耗。(4) 机器人与自动化装备: 无人矿车自动运输, 智能钻爆设备提升爆破效率; 巡检机器人替代人工巡检, 数据对接安全监测系统(AQ/T2080-20235.5.4)^[1]。

2 智能化技术在有色金属采矿工程中的应用

2.1 地质勘探与资源评估智能化

(1) 三维地质建模与储量动态预测: 针对有色金属矿“多矿体、形态复杂”的特点, 通过整合钻孔数据、物探化探信息, 构建高精度三维地质模型, 直观呈现矿体空间分布与赋存状态。结合实时开采数据动态更新模型, 实现储量的动态计算与预测, 解决传统评估中“静态数据滞后”问题, 为资源高效开采提供精准的储量依据, 尤其适用于铝、铜、铅、锌、镍、锂等大型有色金属矿床的资源规划。(2) 智能探矿设备: 无人机航测搭载高分辨率相机与红外传感器, 可快速覆盖大面积有色金属矿区, 识别地表矿化蚀变带, 降低山区、高原等复杂地形的勘探难度; 便携式光谱仪能现场分析岩石矿物成分, 实时检测铜、铅、锌等有色金属元素含量, 缩短样品检测周期, 提升勘探效率与数据时效性^[2]。(3) 基于AI的矿体边界识别与品位估计: 利用机器学习算法对地质钻孔数据、矿石光谱数据进行训练, 自动识别矿体与围岩的边界, 解决传统人工识别“主观误差大”的问题; 通过建立品位预测模型, 结合实时采样数据动态修正品位分布, 精准估计矿体内部有色金属品位变化, 为开采顺序优化与选矿工艺调整提供数据支撑。

2.2 采矿设计优化与决策支持

(1) 数字化矿山设计软件: Surpac、Micromine等软件可实现有色金属矿山采场布置、巷道设计、开采进度规划的数字化建模, 同步集成紧急避险设施、压风供水

管道等“六大系统”布局（依据AQ/T2033-2035布置图要求），支持多专业协同设计，减少设计冲突；通过软件集成地质、生产数据，实现设计方案与实际开采的动态衔接，提升采矿设计的科学性与可操作性。（2）基于强化学习的开采方案优化：针对有色金属矿开采中“品位波动大、开采成本高”的问题，利用强化学习算法模拟不同开采参数（如采场尺寸、回采顺序）下的资源回收率与成本消耗，动态优化采场参数，在保障安全的前提下，实现铜、铅、锌、镍、锂等有色金属资源回收率提升3%-5%，降低开采成本。（3）虚拟现实（VR）辅助设计与人员培训：通过VR技术构建有色金属矿山虚拟开采场景，设计人员可直观验证开采方案及避灾路线的合理性（符合AQ/T2033-2023避灾路线标识要求），提前发现设计隐患；同时，利用VR模拟井下作业环境，开展凿岩、支护及压风自救设备操作等实操培训，提升操作人员技能水平，减少实际作业中的安全事故。

2.3 采掘作业自动化与机器人化

（1）智能凿岩设备：智能凿岩台车搭载激光定位系统，可自动识别炮孔位置并精准定位，定位误差控制在±50mm内；结合力反馈控制技术，实时调整凿岩力度与速度，避免卡钻、断钎问题，提升凿岩效率，适用于有色金属矿山坚硬矿岩的凿岩作业。（2）无人化运输系统：无人电机车通过激光雷达、毫米波雷达实现井下轨道环境感知，自动规划运输路径，完成矿石转运；系统可实时关联人员定位数据（AQ/T2080-20235.2.1人员识别要求），规避作业人员实现安全运输；露天有色金属矿山的无人卡车依托北斗定位与车联网技术，实现编队行驶与自动装卸，降低人工成本，提升运输效率20%以上。

（3）地下铲运机远程操控与路径规划：地下铲运机配备高清摄像头与远程操控系统，操作人员可在地面控制中心完成铲装、卸载作业，避免井下粉尘对人员的伤害；结合路径规划算法，铲运机可自动避开障碍物，选择最优运输路径，减少空驶时间，提升作业效率^[1]。

2.4 通风与安全监测智能化

（1）多参数传感器网络实时监测：在有色金属矿山井下关键区域布置多参数传感器，实时采集有害气体（CO、NO、NO₂等）数据，同步监测人员定位分站、压风管道压力、供水水质等“六大系统”运行参数（符合AQ/T2034-2035、AQ/T2080-2023监测要求），通过5G网络传输至监控中心，实现异常数据实时报警，解决传统人工巡检“覆盖范围小、响应慢”的问题，保障井下作业环境安全。（2）AI驱动的危害预警模型：利用AI算法对历史灾害数据、实时监测数据进行分析，建立岩爆、

透水、火灾等灾害的预警模型，提前2-4小时预测灾害风险，例如针对有色金属矿山深部开采的岩爆问题，预警准确率可达85%以上；预警信号可同步触发人员定位系统报警与避灾广播，为人员撤离与应急处置争取时间（契合AQ/T2033-2023应急响应要求）。（3）应急救援机器人与智能逃生系统：应急救援机器人搭载生命探测仪与高清摄像头，可进入灾后危险区域搜寻被困人员，传输现场图像；智能逃生系统通过井下定位技术（AQ/T2080-20235.2.5轨迹显示要求），为人员提供最优逃生路径指引，结合应急广播系统发布疏散指令，同步联动压风供水系统开启避险设施供给，提升灾害救援效率与人员存活率^[4]。

2.5 选矿流程智能化控制

（1）智能分选设备：X射线荧光光谱分选设备可快速检测矿石中有色金属元素含量，自动分离高品位矿与废石，提升入选矿石品位；光电分选设备通过识别矿石颜色、光泽差异，分离不同种类有色金属矿石（如铜矿、铅锌矿、锡矿等），减少后续选矿压力。（2）浮选过程参数优化：利用机器学习算法分析浮选过程中pH值、矿浆浓度、药剂用量与选矿指标的关联关系，建立参数优化模型，实时调整药剂添加量，例如在铜浮选过程中，可使铜回收率提升2%-3%，降低药剂消耗10%左右。（3）尾矿库安全监测与资源化利用技术：通过传感器网络实时监测尾矿库坝体位移、渗流量等参数，结合AI预警模型预防溃坝风险；同时，利用智能化技术分离尾矿中的有色金属成分，实现资源二次回收，例如从铜尾矿中回收铜、铁等元素，提升资源利用率，减少固废排放^[5]。

3 智能化技术在有色金属采矿工程中的典型工程案例分析

3.1 案例选择与背景介绍

本案例选取国内某年产150万吨铜矿石的大型地下铜矿（以下简称“某铜矿”）。该矿山开采历史超过30年，传统开采模式存在三大核心问题：一是井下地质条件复杂，矿体走向多变，传统人工勘探与开采方案调整滞后，导致资源回收率仅为68%，低于行业平均水平；二是井下作业依赖大量人工，采掘、运输环节需配备200余名一线操作人员，不仅人力成本高（年均人力成本超8000万元），且井下地压等风险因素易引发安全事故，近5年累计发生3起轻微安全事故；三是设备协同效率低，凿岩、运输设备多为独立作业，缺乏统一调度，设备闲置率达25%，采矿周期长达32天/采场，难以满足产能需求。为解决上述问题，该矿山于2022年启动智能化

改造项目,总投资1.2亿元,聚焦“地质勘探-采掘作业-安全监测”全流程智能化升级,同步实现与“六大系统”的深度融合。

3.2 智能化技术应用方案

(1)整体技术架构设计:硬件上,部署矿用本安型传感器320台(覆盖地压、粉尘等12项参数,含压风压力、供水水质传感器)、高清摄像头150个、北斗定位终端80套(符合AQ/T2080-2023分站布置要求),实现井下全方位感知;软件上,搭建“矿山智能管控平台”,集成三维地质建模、生产调度、设备管理及六大系统监控等6大模块,支持多源数据实时整合与可视化;网络通信采用“5G+工业以太网”双链路,井下设5G基站30座、工业交换机25台,解决信号盲区,数据传输时延<50ms,保障指令与数据实时交互。(2)重点环节实施细节:凿岩环节,改造6台传统凿岩台车,加装激光定位与力反馈装置,通过管控平台下发炮孔参数,台车自动定位(精度±30mm)、凿岩,效率提升40%,避免人工炮孔偏差;运输环节,构建“无人电机车+智能调度”系统,投入8台无人电机车,依托激光雷达与AI路径规划,自动完成矿石从采场到溜井的转运,实时规避障碍物与人员(对接人员定位数据),调度效率提升35%,减少井下人员40人;安全保障环节,升级人员定位系统实现双向呼叫,压风管道接入避灾硐室(符合AQ/T2034-20234.11要求),供水系统增加20m³辅助水池保障水质。

3.3 实施效果评价

(1)效率提升:改造后依托三维地质建模优化开采方案,采场周期从32天缩至25天,年新增矿石22万吨,提前3个月达产产能目标;智能管控平台调度设备,凿岩台车、电机车闲置率从25%降至12%,整体采矿效率提高28%,缓解产能压力。(2)成本降低:无人设备替代人工,井下一线人员从200人减至130人,年均人力成本降

2800万元;智能算法优化参数,凿岩台车能耗降15%、电机车空驶率降20%,年均能耗成本减650万元,综合成本降32%,提升盈利空间。(3)安全与环境管控改善:多参数传感器24小时监测,地压、设备故障预警准确率92%,改造后2年零安全事故,事故率降100%,符合AQ/T2080-2023安全A级标准;3台应急救援机器人5分钟内进入危险区,结合智能逃生系统与人员定位,疏散时间缩50%,避灾硐室保障达标。同时,智能喷雾降尘系统使井下粉尘浓度降40%,废水循环利用率提至85%,环境管控达标。

结束语

智能化技术于有色金属采矿工程的应用,已然取得令人瞩目的成果,在提升生产效率、降低成本、保障安全等方面成效显著。从地质勘探的精准高效,到采掘作业的自动化升级,再到选矿流程的智能调控,各个环节都彰显着智能化技术的强大优势。然而,行业前行之路仍充满挑战,技术融合、人才培养等问题亟待解决。未来,需持续创新,深化智能化技术应用,推动有色金属采矿工程向更高效、更安全、更绿色的方向迈进,实现行业的高质量发展。

参考文献

- [1]王琳.现代化采矿工艺技术在采矿工程中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2023,(18):154-156.
- [2]张瑞庆.采矿工程中绿色开采技术的应用[J].能源与节能,2023,(09):120-122.
- [3]孔广磊.采矿工程中的采煤技术与施工安全[J].能源与节能,2023,(09):130-132.
- [4]张庆元.现代化采矿工艺技术在采矿工程中的应用研究[J].能源与节能,2023,(09):145-147.
- [5]陈飞,刘见见.关于采矿工程中绿色开采技术的应用分析[J].冶金与材料,2023,43(08):85-87.