

铀矿采冶装备体系及其智能化升级路径

党俊杰, 田野

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 现有铀矿采冶装备在感知、控制、通信及本体智能化方面存在明显不足, 通过系统阐述硬岩型与砂岩型铀矿的采、运、选、冶全流程专用装备体系, 提出了差异化升级路径, 并结合群井水位法布里-珀罗腔传感系统、地下矿岩智能转运系统、超高扬程浸出液提升系统等典型成果, 展示了感知-决策-执行闭环的实现效果。这些智能化技术显著提升了铀矿采冶效率与安全性, 可为铀矿资源高效开发提供有力支撑。

关键词: 铀矿采冶; 装备体系; 智能化; 硬岩矿山; 地浸采铀

中图分类号: TD4; TD63; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)01-0107-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.10.02

铀是核能发电的关键资源, 随着核电规模的扩大, 铀资源保障能力成为制约核能发展的瓶颈之一^[1-2]。中国铀矿资源类型主要有硬岩型和砂岩型, 两种资源类型在地质条件、开采方式与环境要求等方面均存在显著差异。在砂岩型铀矿中, 原地浸出法已成为主导技术路线, 该法具有绿色、低扰动、高回收等优势。然而, 随着矿床开发深度增加、地层结构复杂化、资源品位下降, 传统铀矿采冶装备在作业效率、运行稳定性与环境适应性等方面暴露出诸多不足^[3]。

长期以来, 中国铀矿采冶装备以人工操作与经验调控为主, 存在以下突出问题: 1) 关键设备的运行状态缺乏实时感知与反馈能力; 2) 装备整体集成度不高, 信息传输与响应滞后, 难以支撑精细化管理; 3) 在高腐蚀、高温、高压等极端地质环境下, 部分装备稳定性与寿命难以保障。这些问题限制了铀回收率的提升, 增加了环境风险与人力成本。

为应对上述挑战, 近年来中国在核工业采冶领域积极推动装备更新升级, 引入传感、控制、通信等现代技术, 逐步形成了以“装备智能化”为核心的发展方向。智能化不仅是装备技术性能的提升, 更是采冶过程信息化、自动化、绿色化的关键支撑。通过将数据感知、远程控制、自主调节等功能集成到核心装备系统中, 能

够有效提升作业效率、减少人为干预、强化安全管控, 从而推动铀矿开发向更高质量、更高效益的方向转型发展。

1 铀矿采冶装备发展现状

随着中国铀矿地质勘查、开采与冶炼技术的进步^[4-6], 硬岩型与砂岩型铀矿的采冶装备体系已初步构建, 覆盖采掘、转运、冶炼及辅助作业的全流程。硬岩型矿山装备体系主要包括井下采掘机械、矿岩转运装置、提升运输系统、破碎选矿设备和水冶设施等; 砂岩型地浸采铀装备体系则以注采井口装置、溶液输送管线、地面水冶处理设备与监测传感系统为核心。整体上, 中国铀矿采冶装备已完成由人工向机械化、由分散作业向系统化配置的转型, 实现了自动化与部分国产化替代。然而, 装备在多矿型适应性、跨系统集成度以及感知、控制、决策等智能化水平方面仍存在不足^[7], 尚处于“体系初建、智能化起步、国产化加速推进”的发展阶段。

1.1 硬岩型铀矿采冶装备体系

硬岩型铀矿主要赋存于花岗岩、片麻岩等坚硬基岩中, 矿石多呈脉状或块状, 分布深度从地表到中深部不等, 因其围岩坚硬、矿体延伸稳定且结构复杂, 通常采用露天剥采与地下采矿相结合的方式开采^[8-9], 并配套多环节的选冶工艺。整个采冶过程涵盖采矿、破磨、选矿冶炼及安全保障

等环节,因此需要构建一个覆盖全流程、适应高强度作业条件的成套装备体系,实现从矿体剥离到铀产品提取的连续化、系统化生产。该体系不仅依赖传统的机械化装备,更注重自动化控制、智能化感知与绿色化冶炼技术的集成。该体系可分为4个主要子系统。

1.1.1 开采掘进装备子系统

硬岩型铀矿的开采需依托高效、坚固且适应复杂地质条件的采掘装备。在地下采矿方面,液压凿岩台车、掘进机、锚杆台车、潜孔钻机和全断面掘进机(TBM)等装备被广泛用于巷道掘进、钻孔爆破及围岩支护施工。露天采矿则多依赖大型潜孔钻机、履带式液压钻机和台阶式装载铲运机进行高台阶剥离与矿石回采。矿石装运与长距离运输主要依靠铲运机(LHD)、矿用运输卡车及窄轨智能运输车,部分运输装备已配备远程操控与可视化监控系统,以适应高风险环境。近年来,随着三维地质建模、智能炮孔布置系统与自动装药技术的发展,采掘精度显著提升,人员暴露风险大幅降低,采矿装备正逐步向无人化、智能化方向演进。

1.1.2 矿石处理装备子系统

在矿石处理环节,硬岩型铀矿需经破碎、磨矿和粒度分级等处理,实现矿物单体解离并为后续选冶提供适宜的粒度条件。破碎工段通常采用颚式或旋回式破碎机进行粗碎,圆锥破碎机进行中碎,高压辊磨机或球磨机完成细碎和粉磨;部分矿山还引入半自磨机(SAG Mill)以提高能效。在分级与筛分过程中,概率分级筛、螺旋分级机、高频振动筛等设备配合自动粒度监测系统,可实现闭路磨矿与实时粒度调控。近年来,通过引入层压破碎理论、高压辊磨技术、多力场复合分级设备^[10],显著提升了能量利用率,有效降低了矿石过粉碎率,为降低选冶成本和提高处理能力提供了技术保障。

1.1.3 选矿冶炼装备子系统

在硬岩型铀矿的选矿冶炼过程中,通常利用物理分选与化学冶金手段来实现铀矿物的高效富集与提取。在物理分选环节,为提高有用矿物的回收率,可根据矿石性质选择使用重选、浮选、磁选及离心-重力复合选别系统;放射性选矿技术利用辐射计量装置,检测通过窗口的矿块所发出的伽马射线强度,再借助机械或气动装置,将不同放

射性强度的矿块进行分离,从而实现矿石和废石的分选,达到提高矿石品位的目的^[11]。在化学冶金方面,焙烧炉用于处理难浸出矿石,酸浸或碱浸反应釜用于浸出铀,溶剂萃取系统与离子交换塔用于实现铀的分离与浓缩,再经沉淀、焙烧得到成品三氧化铀。绿色冶金技术的引入优化了选冶药剂分子结构,降低了药剂用量与毒性;通过废水废渣的循环利用系统,实现了废物的源头减量与资源化利用,从而提升了整个冶金环节的环保性能。

1.1.4 安全保障装备子系统

在硬岩型铀矿采冶过程中,安全保障装备系统直接关系到生产的稳定性与作业人员的安全。井下通风系统包括主通风机、防爆风筒和局部通风设备,确保作业空间空气流通和有害气体稀释^[12];支护作业采用喷射混凝土机械、锚杆安装设备及金属网支护系统,以防止围岩坍塌;竖井罐笼和平衡锤提升装置可实现人员与矿石的高效运输;大型排水泵站可确保在涌水条件下的矿井安全;安全监测系统包括气体检测仪、无线定位系统、围岩稳定性实时监测与微震预警装置,形成了覆盖井下的多维度安全防控网络,有助于将事故风险控制在最低水平。

硬岩型铀矿采冶装备正朝着成套化、智能化和绿色化的方向发展。为适应不断扩大的生产规模,装备大型化成为降低单位处理成本的有效途径,而成套化系统的建设则保障了采矿、运输、处理与冶炼全流程的高效衔接。在智能化方面,依托传感器网络、工业互联网与人工智能算法,装备实现了采掘、运输与选冶等环节的参数优化、路径规划与自适应控制,显著提升了系统稳定性与自动化水平。同时,绿色化与低碳化理念逐步深入装备设计与运行全过程,通过采用节能驱动系统、低毒药剂以及废弃物循环处理工艺,不断推动资源高效利用与环境影响最小化。

1.2 砂岩型铀矿地浸装备体系

砂岩型铀矿矿体通常埋藏在数百米至上千米的深部,多采用原地浸出工艺^[13]。该工艺的核心在于对地下流体运移与化学浸出反应的精准控制^[14-15],因此其装备体系的构建必须围绕“高效钻井-精准注采-绿色水冶-智能监控-低碳修复”五大环节展开。与硬岩铀矿采冶强调破碎、提升与地面冶炼不同,砂岩型铀矿装备体系更侧重于井场建设与井下-地上闭环系统的协同运行^[16],并

兼顾环境保护与长期可持续利用。

1.2.1 井场建设装备子系统

在砂岩型铀矿原地浸出前,必须完成井场基础设施与注采井群的建设。勘探与井场建设装备包括适应不同深度和地层条件的水文水井钻机(如 SPC 系列)、深层石油钻机(如 ZJ 系列)、可实现造斜和分支井的定向钻机。钻井完成后,需构建一个稳定且密封性良好的井筒,以防止井壁坍塌和溶液在不同层位间的串流。该过程先通过固井水泥车进行高压固井作业,将套管(无缝钢管或 PVC 管)固定在井壁中;随后,在完井环节使用筛管(割缝筛管或桥式筛管),确保溶液能在目标层段自由注入和抽出,同时通过封隔器将不同层段有效隔离。该阶段的装备直接决定了注采系统的稳定性与长期运行的安全性。

1.2.2 抽注液装备子系统

注采系统是原地浸出工艺的核心,装备配置需兼顾耐腐蚀性^[17]、流量控制精度和能耗经济性。注入系统包括浸出剂制备设备(溶解槽、搅拌槽、计量泵)、高压注入泵(柱塞泵、螺杆泵)、管道系统和集液系统。浸出剂制备设备确保浸出液成分稳定均匀;高压注入泵用于将浸出液高效注入矿层;管道系统采用耐酸钢管(高压段)与 PVC 塑料管(低压段)^[18]配合流量传感器进行实时监测;集液系统则配置潜水电泵^[19]、螺杆泵或气举泵将浸出液提升至地面,并通过集液池和缓冲罐稳定流量、避免溢流与泄漏。该子系统的稳定运行关系到铀溶液产率与生产经济性。

1.2.3 地面水冶装备子系统

水冶装备子系统的核心功能是将收集到的溶液进行固液分离与铀的初步富集。在固液分离工序中,一般采用板框压滤机、离心机等设备,以提高处理能力与效率。铀矿浸出液成分复杂、悬浮物含量高,常配置多级沉降澄清设备与混凝澄清一体机,在短时间内实现悬浮颗粒与胶体杂质的去除。在铀的初步富集过程中,溶剂萃取设备(如紧凑型混合澄清槽)或模块化离子交换装置可根据矿山产量灵活组合^[20-21],既能保证铀的高效捕获,又便于在不同井场间转移与安装。

1.2.4 纯化沉淀装备子系统

纯化沉淀装备子系统旨在对水冶阶段获得的富铀溶液进行深度纯化与最终产品制备。纯化环节通过多级萃取一反萃流程或高选择性离子交换

体系,去除杂质金属和残留有机物,提升铀产品纯度。沉淀阶段则利用反应釜进行自动加药反应,将铀转化为可过滤沉淀物;随后通过喷雾干燥机或带式干燥机将沉淀物脱水、造粒或粉碎,制备成符合核工业标准的三氧化铀粉末。整个纯化沉淀流程配备在线监测系统,实时跟踪 pH、温度及金属离子浓度,确保成品稳定性与批次一致性。

1.2.5 监测控制装备子系统

监测与控制装备是保障浸出过程安全性、稳定性与环境合规性的关键环节。井中流量计和液位传感器可实时记录注液量与抽液量的变化,水质传感器则实现 pH、电导率及铀浓度的在线监测。PLC 控制系统结合远程监控平台,可根据实时数据自动调节注液量和抽液速度,并在压力异常、流量突变或水质超标时触发报警与联动停机措施。对于分布广、规模大的井群,光电复合缆数据传输系统能够保证高速、低延迟的数据回传,并支持多点同步监控与控制。

2 铀矿采冶装备现状问题

2.1 硬岩型铀矿采冶装备

当前硬岩型铀矿采冶的自动化和智能化改造已在采矿、破碎、磨矿及部分水冶环节中应用,但多以局部环节的独立升级为主,缺乏贯穿矿山全流程的跨系统智能协同与统一数据融合平台。在局部化改造中,优化生产参数仍依赖操作人员的经验,系统难以基于实时数据实现矿山级的自适应运行。现有在线监测传感器在布设密度、检测精度和耐用性方面均存在局限,部分关键设备的运行状态与工艺参数仍需通过人工巡检方式获取,信息反馈存在延迟,从而影响闭环控制的及时性与精度。破碎、磨矿、浸出等工艺单元设备多为固定式结构,缺乏标准化接口与灵活拼装方案,导致在矿石性质变化或生产阶段调整时,需要耗费较长时间和较高成本进行设备改造或替换,难以快速响应产能和工艺的动态变化。另外,核心智能化改造方案在高端传感器集成、控制算法,以及工业数据平台等方面的自主化程度不足,对成套供应商依赖程度高,影响了矿山装备体系的可持续优化。

2.2 砂岩型铀矿采冶装备

砂岩型铀矿采冶以原地浸出为核心,其装备体系在智能化与模块化方面也存在短板。注采井

系统与地面溶液处理装置之间的实时数据传输多为分散式结构,集中化数据管理与全局调度平台的建设相对滞后,井下流体动态、地表溶液化学成分以及注采参数的实时耦合与联动优化尚不成熟。现有钻井、注采泵站及溶液分配系统的自动化调节大多基于预设阈值进行单参数控制,缺乏多参数融合分析、动态预测和最优决策功能,难以应对矿体渗透性变化、地下水动力条件波动等复杂工况。在模块化设计方面,井场建设和地面溶液处理系统多采用一次性固定布局,标准化程度不足,难以实现快速部署、扩容或缩减规模,对于多矿段分布广、矿体条件差异显著的项目,灵活性不够。同时,智能化改造目前更多集中于监控与数据分析软件,执行端的泵组、阀门、管网等底层硬件在模块化互换性、智能执行精度方面存在不足,新型检测与控制技术难以高效嫁接到现有装备体系中,从而在一定程度上限制了砂岩型铀矿原地浸出工艺向更高水平智能化演进的速度与深度。

3 铀矿冶实现装备智能化的差异化路径

3.1 地质与开采方式

硬岩型铀矿与砂岩型铀矿在地质条件和开采方式上的差异,是决定其智能化路径不同的根本原因。硬岩型铀矿通常赋存于坚硬基岩中,智能化改造需贯穿采矿—选矿—冶炼全流程,强调多环节协同和复杂设备群的集成优化。砂岩型铀矿多赋存于松散或半固结沉积层中,矿体连续性好且埋深适中,适宜采用原地浸出法,依靠井下溶液循环完成铀的溶解与转移,其生产环节相对集中于地面与井下流体系统的管理与优化。因此,其智能化路径更侧重地下反应过程的实时监控、流体运移预测和地面溶液处理系统的精准调控。

3.2 场景与功能定位

硬岩型铀矿装备的作业场景涵盖采掘面、井下运输系统、选矿车间和冶炼车间等,功能定位不仅是物料搬运与加工,还需实现多种工艺流程的衔接与匹配,其智能化目标在于提升复杂生产线的整体效率与能耗优化,更多依赖多设备、多工序的综合智能调度。砂岩型铀矿装备的作业场景主要分布在井场与地面处理站,功能定位则偏向于井下流体控制、化学反应管理和溶液净化回收,智能化建设集中在流体力学、地球化学与设备控制

的融合应用上,更强调连续运行系统的稳定性与反应过程的精准可控。

3.3 智能化实现方案

在智能化实现方式上,硬岩型铀矿更适合采用多源数据融合与多环节联动优化的路线。例如,通过在采矿、运输、选矿等不同环节部署传感与控制系统,构建统一的生产调度平台,实现对全流程的可视化、可预测与可优化,硬岩型铀矿的智能化改造需要较强的机械化与自动化基础。砂岩型铀矿则更倾向于构建基于模型驱动与实时反馈的动态控制体系,重点在于对井下反应前沿的跟踪、注采平衡的动态调节以及溶液化学性质的在线调控,砂岩型铀矿的智能化则更依赖流体系统建模、化学反应仿真与长周期运行数据的深度挖掘。两者的技术选择、系统架构和投资重点不同。

4 智能化技术赋能采冶装备的方向

4.1 感知层集成

感知层是智能化采冶装备的基础,其建设水平直接影响信息获取的广度与精度。对于硬岩型铀矿,可通过在采矿、破碎、磨矿及水冶各环节布设多类型、高精度传感器,实现对设备状态、矿石粒度、矿浆浓度、药剂用量等关键参数的实时监测,并引入机器视觉和激光扫描技术进行矿石块度与堆场形态识别。对于砂岩型铀矿,感知层重点在于对井下流体压力、流量、化学组分及温度等多维参数的动态感知,同时结合地球物理探测和光纤分布式传感,实现对矿层渗流场和反应前沿的精细刻画。在感知层建设中,两类矿山均需重视传感数据的时间同步与跨域集成,使不同环节、不同空间位置的数据可在同一时间基准下融合,为后续分析和控制提供可靠基础。

4.2 通信传输层

高效、稳定的通信与传输体系是智能化采冶装备实现闭环控制的前提。硬岩型铀矿由于作业区域集中,可优先构建高速工业以太网或光纤网络,实现采矿面与集控室之间的实时数据交互。而在砂岩型铀矿,井场分布广、环境复杂,需结合低功耗广域网(LPWAN)、5G专网和卫星通信等多种手段,确保远端注采井的数据能够低延时、高可靠地传回控制中心。两类矿山通信体系不仅需支持结构化的监控数据传输,还应兼容高清视频流、三维模型及实时仿真数据的传递,以满足远程

运维、虚拟调度与专家协同等应用场景。

4.3 控制层升级

控制层是感知数据向生产决策转化的核心环节。对于硬岩型铀矿,可在现有自动化系统基础上,引入基于模型预测控制(MPC)与机器学习算法的优化控制方法,使破碎、磨矿、水冶等环节能够根据实时数据动态调整参数,实现对能耗、产能与回收率的综合平衡。在砂岩型铀矿原地浸出中,控制层升级可侧重建立全流程的动态调控平台,将井下流体输送、反应效率与地面溶液处理协同纳入统一的控制框架,通过自适应调节注采流量与药剂配比,提高矿层反应的均衡性和资源利用效率。对于两类矿山而言,控制层升级不仅包括算法与软件的优化,还应涵盖与底层硬件的协同适配,确保控制策略能够在不同类型设备上稳定运行。

4.4 装备本体智能化改造

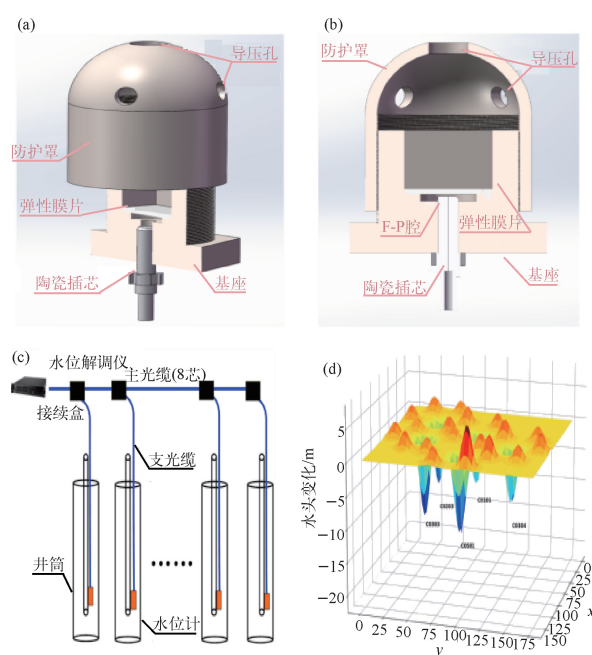
装备本体的智能化改造是实现自主感知、自主决策与自适应执行的关键环节。对于硬岩型铀矿,可在采矿机、破碎机、磨机等设备中嵌入智能控制单元,使其具备工况自识别与参数自调整能力,并配备可在线更换的模块化执行部件,以适应不同矿石性质和工艺要求。砂岩型铀矿的注采泵、井口控制阀组及地面处理装置则可集成数字化执行机构与嵌入式控制器,使其能够根据实时反馈自动优化运行状态,并支持远程参数更新与功能扩展。两类矿山的装备本体智能化不仅提升了作业效率与工艺稳定性,还为引入人工智能辅助决策、实现无人化或少人化运行奠定了基础。

5 铀矿采冶智能化装备典型案例

5.1 F-P腔光纤传感器监测系统

地浸采铀群井水位测量环境的水位个体差异大、地下水成分复杂、电磁和振动干扰强。传统液位计在设备布设、数据读取、数据分析等方面均具有延时性,且难以同时获取群井数据。张翀等利用光纤法布里-珀罗(F-P腔)原理,研制了适用于地浸采铀实际生产的光纤F-P液位传感器,该设备体积小、重量轻、抗干扰能力强、动态响应灵敏(图1)^[22]。现场试验结果表明,在0~1.5 MPa内,该传感器灵敏度可达25.4 $\mu\text{m}/\text{MPa}$,线性度为0.998;实现了对地浸采铀井场群井水位数据的实时、连续获取,具有低成本、高灵敏度、适应地

浸采铀井下复杂环境等优势。



(a)传感器结构图①;(b)传感器结构图②;

(c)传感器布设方案;(d)群井水位演化。

图1 群井水位F-P腔传感器系统

Fig. 1 Multi-well water level Fabry-Pérot cavity sensor system

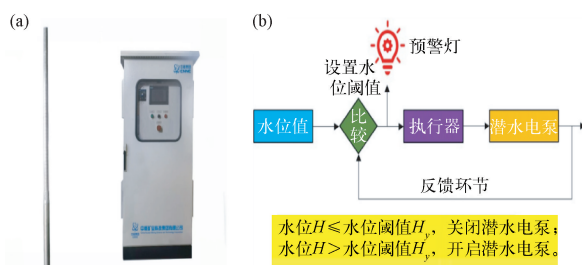
5.2 井下矿岩智能转运系统

矿岩智能转运系统以无轨运输矿卡为核心^[23],优化运载能力、动作特性及作业运输流程,并结合卸矿硐室、运输巷道和斜坡道的断面形式与尺寸,确定适配的矿卡型号与尺寸,实现了车辆及外部卸矿区域的全面智能化升级,通过集成环境感知、车载通信、边缘计算和车载定位等功能,实时获取矿卡位置信息及井下周边环境数据,进而由控制系统实现高精度的运行管理。在矿卡自主识别与卸载方面,系统通过声波探测装置实时捕获溜井充实度信息,并将该信息反馈至矿卡,根据所装载矿岩属性自动匹配卸矿溜井;基于传感器采集的位置信息与环境信息,综合分析卸矿巷道、卸矿平台,规划最佳运行路径与卸矿行为,利用融合多种算法的控制系统实现矿卡全自动泊入卸矿区域并完成卸载;运行数据通过车载控制系统和井下通讯基站同步传输至地表中控平台,平台可依据算法与位置信息精准控制车辆泊入、转向、姿态及位置调整^[24]。在矿卡智能清底方面,系统已接入有轨电机车定位信息,通过信息输入

接口与地表卸矿区域作业逻辑及清底机目标区域对接,实现电机车卸矿作业的自主运行与清底目标位置的自动识别;优化机械清底机的图像识别系统、电气控制系统及传感系统,增设远程智能控制与图像识别算法,对矿车底部残料图像进行采集、去噪、分割与增强处理,并与清底机控制系统联动下达作业指令,从而实现矿卡底部残料的全自动智能清理^[25]。

5.3 超高扬程浸出液提升装备系统

针对地浸采铀井下埋深大、腐蚀性强和连续运行时间长的特殊工况,研发了超高扬程浸出液提升装备,实现了从“进口通用”向“自有专用”的转变,打破了进口潜水泵在性能、材料及技术上的垄断。该系统采用高性能4吋电机与优化叶轮设计,满足400 m扬程和3.0 m³/h流量(7.5 kW)的提升需求,并研制出小尺寸大功率永磁电机样机(13.0 kW),见图2,在同等扬程下可将流量提升至6.0 m³/h。泵体结构选用耐高温、耐腐蚀材料,屈服强度达633 MPa的圆柱泵轴配合甩砂环及热套组装工艺,突破了泵轴断裂、偏心失稳及花键损坏等失效模式,整泵连续无故障运行时间超过180天。同时,基于高转速潜水电泵扬程提升技术,突破了高转速下的扬程-流量限制,实现埋深超400 m浸出液的高效提升。系统配套开发了潜水泵智能启停功能,利用分布式光纤传感获取井场实时水位数据,根据设定水位差阈值(1.0 m)自动控制变频器启停,停泵试验中平均响应时间仅为2.48 s,启泵试验中平均响应时间为3.02 s,波动范围均小于0.1 s。试验验证了秒级启停的可靠性,有效避免因空载或水位突变造成的泵体损坏,显著提升了井场系统运行的稳定性与效率。



(a) 超高扬程潜水泵型号产品; (b) 潜水泵智能启停方案。

图2 超高扬程浸出液提升装备系统

Fig. 2 Ultra-high-lift leaching solution lifting system

6 结论

1) 针对硬岩型与砂岩型铀矿的地质特征与工艺流程,系统总结了覆盖采掘、转运、冶炼及辅助作业的全流程采冶装备体系,确保在不同开采方式下均具备结构适配性与工艺适应性。通过对现有装备感知、控制、通信及本体智能化进行分析,提出了面向不同矿型的差异化升级路径,实现了硬岩矿山与地浸采铀装备智能化改造的针对性与高效性。

2) 部分典型智能化成果已实现工程应用。当前F-P腔光纤传感器监测系统、矿岩智能转运系统、超高扬程浸出液提升装备系统等已成功应用,构建了感知-决策-执行的闭环体系,并在实际生产中显著提升了运输效率、液体提升能力和水位监测精度。

参考文献:

- [1] 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 中国盆地铀资源概述[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2675-2696.
JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al. Review of basin uranium resources in China[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2675-2696.
- [2] 张晓, 蔡煜琦, 宋继叶, 等. 亚洲铀资源勘查开发动态与核能发展战略[J]. 铀矿地质, 2023, 39(1): 84-100.
ZHANG Xiao, CAI Yuqi, SONG Jiye, et al. Uranium resources exploration activities and nuclear energy development strategy in Asia[J]. Uranium Geology, 2023, 39(1): 84-100.
- [3] 张明林, 李胜祥, 刘悦, 等. 全球铀矿勘查进展与展望[J]. 地质论评, 2025, 71(3): 1020-1028.
ZHANG Minglin, LI Shengxiang, LIU Yue, et al. Progress and prospect of global uranium exploration[J]. Geological Review, 2025, 71(3): 1020-1028.
- [4] 原渊, 苏学斌, 李建华, 等. 世界地浸采铀矿山生产现状与进展[J]. 中国矿业, 2018, 27(B6): 59-61.
YUAN Yuan, SU Xuebin, LI Jianhua, et al. Production status and development of the world in-situ leaching of uranium mines[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(B6): 59-61.
- [5] 孙占学, Fiaz Asghar, 赵凯, 等. 中国铀矿采冶回顾与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 1-8.
SUN Zhanxue, ASGHAR Fiaz, ZHAO Kai, et al. Review and prospect of uranium mining and metal-

- lurgy in China [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(8):1-8.
- [6] 秦明宽,刘祜,叶发旺,等.铀资源勘查技术国际科技前沿动态[J].*世界核地质科学*,2024,41(1):1-11.
QIN Mingkuan, LIU Hu, YE Fawang, et al. Latest global developments in uranium resources exploration technology [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(1):1-11.
- [7] 关键,侯江,邢妍.数字地浸铀矿山顶层设计研究[J].*铀矿冶*,2021,40(2):134-138.
GUAN Jian, HOU Jiang, XING Yan. Research on top-level architecture of digital in-situ leaching uranium mine [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2021, 40(2):134-138.
- [8] 李夕兵,黄麟洪,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.
- [9] 薛希龙,戴勇,范永亮,等.硬岩铀矿无废协同开采模式及技术研究[J].*金属矿山*,2020(5):95-100.
XUE Xilong, DAI Yong, FAN Yongliang, et al. Study on the mode and technology for wasteless synergistic mining of hard rock uranium deposits [J]. *Metal Mine*, 2020(5):95-100.
- [10] 韩明.高压辊磨机在矿物加工工程中的应用[J].*世界有色金属*,2018,43(14):243-244.
HAN Ming. Application of high pressure roller mill in mineral processing engineering [J]. *World Nonferrous Metals*, 2018, 43(14):243-244.
- [11] 崔拴芳,杨帅.低品位硬岩型铀矿选冶技术的新进展[J].*铀矿冶*,2020,39(2):75-78.
CUI Shuanfang, YANG Shuai. New progress in beneficiation and hydrometallurgy technology of low-grade hard rock-hosted uranium ore [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2020, 39(2):75-78.
- [12] 李先杰,张哲,胡鹏华,等.铀矿井降氡优势通风方式研究[J].*辐射防护*,2024,44(1):80-84.
LI Xianjie, ZHANG Zhe, HU Penghua, et al. Study on the dominant ventilation method for radon reduction in uranium mine [J]. *Radiation Protection*, 2024, 44(1):80-84.
- [13] 苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].*中国矿业*,2012(9):79-83.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(9):79-83.
- [14] 郑余修,罗跃,阳奕汉,等.鄂尔多斯某砂岩铀矿试验开采过程中地下水水流场时空特征[J].*有色金属(冶炼部分)*,2024(8):94-104.
ZHENG Yuxiu, LUO Yue, YANG Yihan, et al. Spatial and temporal characteristics of groundwater flow field during experimental mining of a sandstone uranium deposit in Ordos [J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2024(8):94-104.
- [15] 杨冰,惠淑君,郭华明,等.地浸井场外围含水层砂岩对铀的吸附行为[J].*环境科学学报*,2020,40(11):3958-3963.
YANG Bing, HUI Shujun, GUO Huaming, et al. Adsorption of uranium on aquifer sandstone obtained near in-situ leaching uranium mine [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(11):3958-3963.
- [16] 陈梅芳,谭亚辉,张传飞,等.地浸采铀井网影响因素分析与评价研究[J].*中国矿业*,2024,33(3):243-248.
CHEN Meifang, TAN Yahui, ZHANG Chuanfei, et al. Analysis and evaluation of influencing factors on the well pattern of in-situ leaching uranium [J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(3):243-248.
- [17] 陈梅芳,于长贵,张传飞,等.酸法地浸采铀酸化期潜水泵腐蚀原因探讨[J].*中国矿业*,2020,29(S1):481-485.
CHEN Meifang, YU Changgui, ZHANG Chuanfei, et al. Study on corrosion causes of submersible pump in acid leaching uranium mine during its' acidification stage [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S1):481-485.
- [18] 李宏星,侯代稳,原渊,等.地浸采铀高强度玻璃钢套管性能研究[J].*铀矿冶*,2025,44(3):76-81.
LI Hongxing, HOU Daiwen, YUAN Yuan, et al. Performance of high-strength glass fiber reinforced plastic casing for in-situ leaching uranium [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2025, 44(3):76-81.
- [19] 姚益轩,王亚安,胥国龙,等.地浸采铀注液井小直径潜水泵抽水洗井试验[J].*铀矿冶*,2024,43(1):27-35.
YAO Yixuan, WANG Ya'an, XU Guolong, et al. Well washing test of small diameter submersible pump in injectionwells for in-situ leaching of uranium [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2024, 43(1):27-35.
- [20] 许春富,谢刚,贺韬,等.离子交换吸附回收地浸采铀浸出液中的铀[J].*重庆大学学报*,2009,32(12):

- 1398-1402.
- XU Chunfu, XIE Gang, HE Tao, et al. Uranium recovery from leach solution in in-situ leaching of uranium with ion-exchange absorption[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(12):1398-1402.
- [21] 郑文娟,王如意,李鹏,等.地浸采铀离子交换工艺塔顶过滤装置的优化改进[J].中国矿业,2023,32(1):158-164.
- ZHENG Wenjuan, WANG Ruyi, LI Peng, et al. Optimization and improvement of the tower top filter device of the ion exchange process for in-situ uranium leaching[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(1):158-164.
- [22] 张翀,詹洋,张志伟,等.基于 F-P 腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制[J].光通信技术,2025,49(1):71-77.
- ZHANG Chong, ZHAN Yang, ZHANG Zhiwei, et al. Development of real-time monitoring sensor for in-situ leaching uranium mining water levels based on F-P cavity[J]. Optical Communication Technology, 2025, 49(1):71-77.
- [23] 王伟.地下硬岩铀矿山无轨设备管理问题与对策探讨[J].中国科技期刊数据库:工业 A, 2021(9):33-34.
- WANG Wei. Discussion on the management problems and countermeasures of trackless equipment in underground hard rock uranium mines[J]. China Science and Technology Periodical Database: Industry A, 2021(9):33-34.
- [24] 战凯,余乐文,张达,等.地下无轨采矿装备智能避障技术和方法研究[J].黄金,2020,41(9):77-80.
- ZHAN Kai, YU Lewen, ZHANG Da, et al. Research on intelligent obstacle avoidance technology and method for underground trackless mining equipment[J]. Gold, 2020, 41(9):77-80.
- [25] 郭毅,吴富姬,钟毅,等.基于图像识别技术的翻斗式矿车结底智能清理装置研究[J].中国钨业,2021,36(2):76-80.
- GUO Yi, WU Fuji, ZHONG Yi, et al. Research on intelligent cleaning device for bottom of tipping-type car based on image recognition technology[J]. China Tungsten Industry, 2021, 36(2):76-80.

Uranium Mining and Metallurgy Equipment Systems and Its Intelligent Upgrade Paths

DANG Junjie, TIAN Ye

(China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Current uranium mining and metallurgy equipment faces significant shortcomings in perception, control, communication, and machine intelligence. This paper systematically elaborates on the dedicated equipment system for the entire process from mining, hauling, beneficiation, to hydrometallurgy of both hard-rock and sandstone-type uranium deposits. Based on this analysis, differentiated upgrade paths were proposed. Representative achievements, such as the group-well water-level Fabry-Perot cavity sensor system, the underground intelligent ore transfer system for mined rock, and the ultra-high-lift leaching solution pumping system, demonstrate the implementation of a closed-loop framework integrating sensing, decision-making, and execution. Results indicate that intelligent technologies significantly enhance the efficiency and safety of uranium mining and metallurgy, providing strong technical support for the efficient development of uranium resources in China.

Key words: uranium mining and metallurgy; equipment systems; intelligent technologies; hard-rock uranium mining; in-situ leaching of uranium