

我国铀矿钻探装备主要进展和发展建议

李柏军^{1,2}, 曾 令³, 侯江楠³, 王 康^{3*}

(1. 中国地质大学(武汉)卓越工程师学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中核地质勘查集团有限公司, 北京 100013; 3. 核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512029)

摘要: 铀资源是重要的战略资源和能源矿产, 针对铀矿钻探装备难以满足新时代安全、绿色、高效钻探要求的现状, 本文系统梳理了21世纪以来我国铀矿钻探装备的发展历程。结合国内外装备对比, 指出了当前行业存在的核心问题: 砂岩铀矿勘查钻探施工仍以自动化程度低的立轴钻机为主, 劳动强度大、安全风险高; 地浸采铀钻探装备体系不完善, 效率与能耗矛盾突出; 特殊地形区装备进场困难, 冲洗液固控技术落后。针对这些瓶颈, 本文提出了未来3年发展建议, 包括: 开展立轴钻机及钻塔的自动化与数字化升级改造; 研发难进入地区高效低成本施工装备; 深化智能冲洗液固控技术研究; 加强全液压钻机、绳索取心工艺等先进成熟技术装备的引进与推广。本研究为推进我国铀矿钻探装备换代升级提供了科学依据和技术路线, 对推动地质钻探行业技术进步具有重要参考价值。

关键词: 铀矿钻探; 钻探装备; 立轴钻机; 顶驱钻机; 地浸采铀; 固控设备

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0004-09

Major progress and development suggestions of China's uranium drilling equipment

LI Baijun^{1,2}, ZENG Ling³, HOU Jiangnan³, WANG Kang^{3*}

(1. China University of Geosciences College for Elite Engineers, Wuhan Hubei 430074, China; 2. CNNC Geological Exploration Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Research Institute No.290, CNNC, Shaoguan Guangdong 512029, China)

Abstract: Uranium resources are important strategic resources and energy minerals. In view of the current situation where uranium drilling equipment struggles to meet the requirements for safe, green, and efficient drilling in the new era, this paper systematically reviews the development history of China's uranium drilling equipment since the 21st century. By comparing domestic and foreign equipment, the core problems existing in the current industry are pointed out: spindle drill rigs with low automation are still the main equipment for sandstone uranium exploration drilling, resulting in high labor intensity and safety risks; the equipment system for in-situ leaching (ISL) uranium drilling is incomplete, with prominent contradictions between efficiency and energy consumption; equipment mobilization in special terrain areas is difficult, and drilling fluid solid control technology is backward. To address these bottlenecks, this paper puts forward development suggestions for the next three years, including: carrying out automation and digitalization upgrades for spindle drill rigs and derricks; developing high-efficiency and low-cost construction equipment for hard-to-access areas; deepening research on intelligent solid control technology for drilling fluids; and strengthening the introduction and promotion of advanced and mature process equipment such as fully-hydraulic drill rigs and wireline coring technology. This study provides a scientific basis and a technical pathway for promoting the

收稿日期: 2025-10-02; 修回日期: 2025-12-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.002

基金项目: 中国核工业地质局科研项目“热液岩型铀矿钻探泥浆净化一体化集成技术研究与应用”(编号: 202539-5)

第一作者: 李柏军, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事铀矿钻探生产工艺研究与管理工作, 北京市东城区和平里七区15号楼, 303390464@qq.com。

通信作者: 王康, 男, 汉族, 1994年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事铀矿钻探生产技术与管理工作, 广东省韶关市武江区广前路, 605755529@qq.com。

引用格式: 李柏军, 曾令, 侯江楠, 等. 我国铀矿钻探装备主要进展和发展建议[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 4-12.

LI Baijun, ZENG Ling, HOU Jiangnan, et al. Major progress and development suggestions of China's uranium drilling equipment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 4-12.

upgrading of China's uranium drilling equipment and has important reference value for advancing the technological progress of the geological drilling industry.

Key words: uranium drilling; drilling equipment; spindle drill rig; top drive drilling rig; in-situ leaching of uranium; solid control equipment

0 引言

铀矿钻探按勘查和采冶阶段分为铀矿勘查钻探和地浸采铀钻探。按钻遇地层、成矿类型,通常将砂岩型铀矿勘查钻探简称为砂岩铀矿钻探,将火山岩型、花岗岩型、碳硅泥岩型铀矿勘查钻探简称为硬岩铀矿钻探。砂岩铀矿钻探施工主要在伊犁、鄂尔多斯、二连、松辽等沉积盆地^[1-2],硬岩铀矿钻探主要在相山、诸广南、下庄、鹿井等老矿田及龙首山、康滇地轴等成矿带^[3]。地浸采铀钻孔是地浸采铀矿山含矿浸出液的开采通道,利用原地浸出采铀工艺实现铀矿开采。我国地浸采铀钻孔施工主要集中在北方沉积盆地。

核电的快速发展对铀资源需求迅速增加^[4],中央财政投入的铀矿勘查钻探工作量自“十四五”以来保持高位^[5-6],主要由中国核工业地质局所属地勘单位组织实施。铀矿勘查开发相比其他固体矿产,工作量投入大、环保要求高(项目实施前需编制环境影响评价报告并获得自然资源部批复)、钻探冲洗液和废弃岩心放射性污染防治要求高、砂岩型铀矿勘查岩心采取率要求高,具有专门的行业钻探施工规范,其钻探装备发展代表着行业现状。当前铀矿钻探装备尚不能很好满足新时代安全、绿色、高效要求,有必要梳理总结铀矿钻探装备发展历程,聚焦问题难点,制定科学合理的铀矿钻探装备发展计划,推进铀矿钻探装备换代升级,对我国小口径深孔岩心钻探和水文地质钻探装备发展具有参考意义。

1 我国铀矿钻探装备发展历程

为满足不同时期铀矿钻探设备搬迁、生产工艺、作业环境和安全生产需求,在国家国防科技工业局、中国核工业地质局支持下,实施铀矿地质勘查能力建设项目和钻探生产科研项目,有力保障了铀矿钻探装备更新换代,满足国家铀矿勘查和采冶钻探生产能力需求。

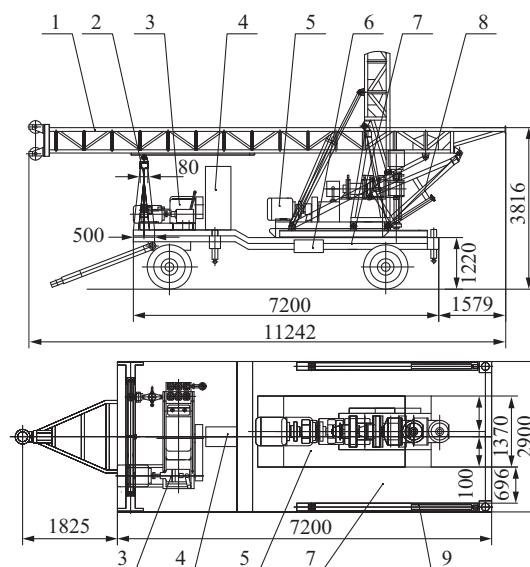
1.1 研发适合平坦地区施工的“三车一组”钻探装备

20世纪90年代起,我国铀矿勘查重心由南方硬

岩向北方砂岩转移,为满足松辽、二连等盆地地形平坦地区快速搬迁需求,中国核工业总公司地质总局(现中国核工业地质局)联合核工业西北210厂(现陕西核昌机电装备有限公司)研制了HXY-800QT拖车式钻探机组,联合保定北奥石油物探特种车辆制造有限公司定制机台用移动生活车,配套钻探机组牵引车、移动式发电机组,形成钻机车、牵引车和生活车的“三车一组”装备体系,该钻探装备组合体系成熟应用至今。

HXY-800QT拖车式钻探机组底盘安装HXY-1500型机械式立轴钻机、NBB250/6型泥浆泵、液压拧管机、配电箱和A型钻塔(图1)^[7]。经多年生产验证,该钻探机组减轻了钻机搬迁劳动强度,钻机搬迁、安装、找平、现场建设效率大幅提升,技术性能安全可靠,较好地满足了800 m($\Phi 60$ mm 钻杆)以浅铀矿勘查和500 m($\Phi 89$ mm 钻杆)以浅地浸采铀钻孔施工快速搬迁、环境友好的施工要求。

1.2 研发国内首台XD-35DB交流变频电动顶驱岩



1—上塔体;2—落塔支架;3—泥浆泵;4—配电箱;5—HXY-1500型钻机;6—液压操纵阀;7—拖车底盘;8—下塔体;9—钻塔底座

图1 HXY-800QT型钻机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of HXY-800QT drilling rig

心钻机

2012年,核工业北京地质研究院承担了国家国防科技工业局批复下达的核能开发科研项目,计划在江西相山铀矿田实施2500 m的科学钻探,最大限度获取深部成矿环境和条件信息。为此,中国核工业地质局联合中国地质装备总公司(现中国地质装备集团有限公司)研发了国内首台XD-35DB交流变频电动顶驱岩心钻机(图2),钻机设计钻深能力3500 m,具有智能化控制、钻进参数数字化显示的特点。该科学深钻应用XD-35DB钻机施工仅9.5个月顺利终孔,终孔深度2818.88 m^[8],标志着核工业深孔、特深孔钻探技术装备与施工工艺技术的重大突破。



图2 XD-35DB 钻机

Fig.2 XD-35DB drilling rig

1.3 研发国内首台XD-10DK型模块化小口径电动顶驱钻机

当前砂岩型铀矿勘查最大深度已超过1000 m,广泛应用的机械式立轴钻机和常规提钻取心工艺暴露的问题突出:提下钻劳动强度大,频繁倒杆影响钻进效率和取心质量,钻机操作者凭经验和体感不能准确判断孔底工况,钻进参数控制偏差较大,孔内事故预防和控制难度大。

中国核工业地质局所属核工业二一六大队和河北永明地质工程机械有限公司联合研发了国内首台XD-10DK型模块化小口径电动顶驱钻机(图

3)。该钻机设计钻深能力1000 m($\Phi 60$ mm 钻杆),钻进参数精准控制和数字化采集,长行程钻进,设备集成操控,机械手辅助加减钻杆,防顶天车和拉力过载等自动安全防控^[9]。自2022年在准噶尔、伊犁盆地应用至今,不仅较好地实现了设计目标,且受益于顶驱动力、长行程钻进、钻进参数精准控制,钻孔偏斜控制、全面钻进效率得到显著提升。



图3 XD-10DK 钻机

Fig.3 XD-10DK drilling rig

1.4 研发适合砂岩和硬岩铀矿勘查钻探的小型冲洗液净化设备

砂岩铀矿勘查钻探主要采用低固相冲洗液,通常配备振动筛、除砂器或除泥器等机械净化设备。硬岩铀矿勘查钻探主要采用无固相冲洗液,通常用自然沉降净化冲洗液。上述泥浆净化方法工艺匹配性差,冲洗液循环利用率低,废弃泥浆排放量较大。“十四五”期间,中国核工业地质局分别委托核工业二〇三研究所、二九〇研究所开展适用砂岩和硬岩铀矿勘查钻探的小型冲洗液净化处理设备研发。

核工业二〇三研究所联合北京探矿工程研究所等单位研发了小型一体化泥浆不落地设备,通过液位自反馈控制系统,实现了过渡泵自动智能运行,融合物联网技术,实现了变频过渡泵和变频离心机远程可视化控制,施工过程泥浆不接触地表,循环净化处理^[10]。核工业二九〇研究所联合国内

有关科研院所研发了小型撬装式隔膜压滤装置(图4),分离固相含液率降低到20%以下,分离液相通过芬顿法进一步处理后可直接排放^[11]。

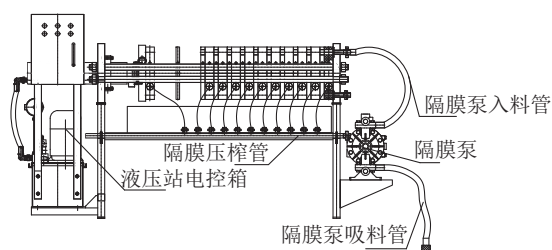


图4 小型撬装式隔膜压滤装置示意

Fig.4 General structure of small diaphragm filter press device

1.5 顶驱钻机和螺杆钻具助力地浸采铀钻探施工提质增效

相比地质勘查钻孔,地浸采铀钻孔具有终孔孔

径大(一般不小于215.9 mm)、钻孔间距小(最小钻孔单元间距约30 m)、成井程序复杂、验收指标多等特点^[12],当前国内地浸采铀钻孔最大深度已突破800 m。以往地浸采铀钻探使用的机械式立轴钻机高转速、低扭矩的特性已不能满足地浸采铀钻探需求。拖车式转盘水井钻机逐渐应用到地浸采铀钻探施工,形成以拖车式转盘水井钻机为主的钻探装备体系,施工效率显著高于立轴钻机^[13]。

近几年来,为进一步提高钻进效率,将全液压/电动顶驱深水井钻机应用到地浸采铀钻探施工。以伊犁盆地某施工为例,对比使用徐工集团XSL720全液压深水井钻机(配螺杆钻具)与石家庄煤矿机械有限责任公司SPT800拖车式转盘钻机(配常规钻具)的施工成效(表1),由于全液压深水井钻机可上下划眼、螺杆钻具提供孔底动力等原因,钻进速度提高65%以上,但其额定功率是转盘钻机的近3倍,能耗较大。

表1 XSL720钻机和SPT800钻机主要性能参数、钻进效率统计

Table 1 Main performance parameters and drilling efficiency statistics of XSL720 drilling rig and SPT800 drilling rig

钻机	最大钻深(Ø89 mm 钻杆)/m	最大扭矩/(kN·m)	最高转速/(r·min ⁻¹)	额定功率/kW	基岩平均钻速/(m·h ⁻¹)	覆盖层平均钻速/(m·h ⁻¹)
XSL720	1500	24/12	90/180	240	5.16	4.04
SPT800	800	11	139	62.5	3.14	2.33

2 核工业铀矿钻探装备现状和存在的问题

对比国内外同行业钻探装备现状和发展趋势,梳理和聚焦核工业铀矿钻探装备难题。

2.1 国内外地质岩心钻探装备现状

2.1.1 国外地质岩心钻探装备

国外固体矿产勘查最大钻深超4000 m,砂岩型铀矿勘查深度一般在500 m以浅,对岩样的要求一般不局限于柱状岩心。

欧美等发达国家地质勘查主要在硬岩中进行,钻机以全液压力头钻机为主,山区及复杂地形地区施工主要采用模块化钻机或轻便型全液压力头钻机,且搬迁采用拆卸运输或直升机吊装运输。中亚国家砂岩钻探施工设备普遍为20世纪70年代机型,以机械式立轴钻机(ЗИФ-1200MP等)为主,全部钻探设备为“四车一组”,即钻探主车、发电机车、搅拌机车和管材工具车^[14]。

国外先进岩心钻机单价相对较高,一般为国产全液压钻机的2倍,较国产钻机优势是故障率较低、

液压先导控制系统管道压力较小、钻杆上卸扣时自动保护螺纹、主卷扬单向离合功能可避免跑钻、可选配自动化管具处理系统。国外先进全液压力头钻机正在逐步国产化,其中液压油泵和油马达等核心部件主要靠进口,其他部件均为国产。

2.1.2 国内地质岩心钻探装备

国内小口径固体矿产勘查钻探施工深度逐渐加大,山东等地勘查深度已突破4000 m^[15],岩样一般要求为柱状岩心。

当前我国地质钻探装备以国产为主(国产率高达96%),只有部分全液压岩心钻机为国外品牌^[16]。机械式立轴钻机凭借传动效率高、维修简单等优势,在国内小口径地质岩心钻探中仍占主导地位^[17-19]。全液压岩心钻机相比立轴钻机,具有给进行程长、金刚石钻进工艺适配性好等优点^[20],市场占比逐渐增大,尤其便携式岩心钻机,模块化设计,满足绿色勘查发展需求,在国内高山、丘陵地区应用广泛。砂岩铀矿勘查、煤田勘查等沉积岩钻探设

备主要为XY-8、XY-6B、XY-5N、TXB-1000、TXB-2000型等机械式立轴钻机。河南、四川等地较大规模钻探施工均以立轴钻机为主,占比73%~89%,使用全液压动力头岩心钻机较少。

2.2 我国铀矿钻探装备现状和存在的问题

2.2.1 铀矿勘查钻探装备

2025年,共有166台套钻探装备投入到中央财政铀矿勘查项目工作中,以机械式立轴钻机为主,占比75.9%。砂岩铀矿钻探施工共开动113台套钻机,其中112台为拖车式/落地式立轴钻机、1台为XD-10DK型电动顶驱岩心钻机。硬岩铀矿钻探施工共开动53台套钻机,其中9台套履带式全液压钻机、30台套模块化便携式全液压钻机、14台套立轴钻机。

砂岩铀矿钻探主要使用落地式/拖车式立轴钻机,使用单管/双管提钻取心工艺。在鄂尔多斯北部等少部分地区试验绳索取心工艺^[21],钻孔设计深度多在1000 m以浅,一般以 $\varnothing 110$ mm口径终孔。存在的主要问题:(1)立轴钻机自动化程度较低、劳动强度较大、作业环境较差,给进行程短、工作平稳性差、转速不能无级调节、对金刚石钻进工艺适应性差,行业缺少成熟的规模化替代产品;(2)立轴钻机配套的A型钻塔拆装、塔上作业安全风险较高,部分钻塔载荷与钻机能力匹配性差;(3)行业缺少沙漠覆盖区和泥泞地区高效进场钻探施工装备,进场施工实效性差、成本高。

硬岩铀矿钻探使用全液压岩心钻机/机械式立轴钻机,配合金刚石绳索取心钻进工艺,一般以N规格终孔,钻孔设计深度多在1000 m以浅。存在的主要问题:(1)装备搬迁受地形和天气严重制约,山区复杂地形和雨季装备搬迁效率低,且安全风险高;(2)立轴钻机配套的四角钻塔拆装需高空作业,安全风险高、效率低;(3)便携式全液压钻机复杂地层条件下施工能力和孔内事故处理能力弱,传动效率低,行业缺少险峻地形和茂密林区进场效率高、施工能力强的成熟机型。

此外,砂岩和硬岩铀矿钻探普遍存在冲洗液固控设备配备不足,或使用不科学的现象。

2.2.2 地浸采铀钻探装备

2025年,地浸采铀钻探累计投入钻机202台套,以转盘式水井钻机为主(172台套),其余为立轴钻机(15台套)、全液压/电动顶驱深水井钻机(12台

套)和全液压水井钻机(3台套)。

地浸采铀钻探主要使用转盘式水井钻机,配合牙轮/PDC钻头、低固相泥浆正循环全面钻进,一般以215.9 mm或311.2 mm口径终孔,钻孔设计深度多在800 m以浅。存在的主要问题:(1)地浸采铀钻探施工主要采用的转盘式水井钻机和全液压/电动顶驱钻机优缺点突出,行业缺少专用的成熟、高效、自动化程度高的装备。地浸钻探施工主要采用的转盘式水井钻机自动化程度低,劳动强度高;钻具需平铺摆放在钻机前方,提下钻具效率低,且钻具占地面积较大,影响作业安全。近年地浸钻探施工引进的全液压/电动顶驱钻机能耗较大,依靠顶驱提下钻具效率较低。(2)钻机、泥浆泵、固控装备、搬迁装备、螺杆钻具等装备性能参数、规格不一,未形成科学的标准化钻探装备体系。

3 铀矿钻探装备未来3年发展建议

针对当前铀矿勘查和采冶钻探装备存在的难题,笔者在征询中国核工业地质局所属地勘单位、国内相关钻探装备制造商和部分专家学者意见的基础上,提出未来3年铀矿钻探装备发展重点工作建议,总体技术路线见图5。

3.1 加强铀矿钻探装备科研攻关

通过加强重点科研项目实施,协同国内科研院所、高校和钻探装备制造厂商,巩固已有先进装备科研成果,并进一步研究,形成适应铀矿钻探特点的装备体系。

3.1.1 立轴钻机及配套钻塔的升级改造

为提升立轴钻机自动化水平,实现钻机集成数字化显示和控制,钻塔安全高效自动起放,塔上无人作业,每班组减少1名作业人员,开展立轴钻机及配套钻塔的升级改造。

(1)改造立轴钻机。研究以交流变频电传动为主、液压传动为辅的传动路线,钻机实现模块化、数字化、电传动;研究远程电动、液动、气动控制的主机钻进功能;研究钻进作业与起下钻作业的集成控制系统。

(2)改造钻塔平台。将钻塔、底座与天车作为成套钻机的基本平台,液压自起升式钻塔;研究主机在钻进作业过程中与钻塔的空间/载荷匹配;研究主机在安装、拆除、起升、运输等辅助作业过程中,与钻塔的组成结构/起升模型匹配。



图5 技术路线

Fig.5 Technology roadmap

(3)实现塔上无人作业。研究塔上无人的半自动化系统,研究孔口作业与塔上无人作业所需要的执行机构,实现塔上机械手与地面辅助设备之间的作业衔接。

3.1.2 难进入地区钻探施工高效低成本工艺装备研究

2025年,我国在塔里木盆地地下1820 m发现全球最深的砂岩型工业铀矿化^[22],进军沙漠腹地是铀矿勘查攻深找盲的重要方向。此外,近年来为了实现松辽盆地北部找矿新突破,亟需进入富含有机质的黑土地和稻田开展钻探施工,这些地区保水能力强,雨后泥泞不堪,严重制约钻探设备搬迁效率和成本管控。南方陡坡山区设备搬迁同样受地形和雨季影响。有必要开展沙漠覆盖区、陡坡山区和泥泞地区钻探施工高效低成本工艺装备研究。

(1)开展沙漠覆盖区钻探装备进场和简易道路修筑方法的调研,研究制定高效低成本的进场方式、装备组合和施工工艺。

(2)开展陡坡山区无人机搬迁试验,论证人工、车辆、无人机搬迁适用条件,并进行经济性评价,制定无人机搬迁操作技术和安全规范。

(3)开展泥泞地区自动铺路机械和履带式运输车辆搬迁方案调研,以及引进履带式钻机的可行性调研,论证经济高效的进场施工方案。

(4)研究施工能力强,适合常规提钻取心作业、难进入地区场景下的新型模块化钻机,优选机械、液压和电传动的组合方式,平衡施工能力、传动效率、工艺适配性、模块化等需求。

3.1.3 冲洗液固控装备研究与推广应用

冲洗液性能直接影响孔壁稳定、孔内安全、机械钻速、钻具钻头寿命、设备磨损程度和综合成本,固相控制是关键的技术手段^[23]。当前砂岩铀矿钻探和地浸采铀钻探冲洗液固控设备使用不科学,硬岩铀矿钻探依靠自然沉降控制冲洗液固相含量,有必要进一步开展冲洗液固控装备研究与推广应用。

(1)开展砂岩铀矿钻探除砂设备(旋流除砂器

与振动筛的组合)使用和配套循环系统优化研究,包括振动筛筛网目数、振动频率与固相颗粒直径、成分组成的关系研究,旋流除砂器进口压力、流量优化,孔口导流装置、循环槽、沉淀池与泥浆池优化设计。

(2)开展地浸采铀钻探施工泥浆泵、除砂除泥设备、循环系统设计,以及除砂除泥效果调研,考量集中冲洗液处理站建设和机台各自配备固控装备经济性、实效性,制定冲洗液处理站装备组合和机台小型固控装备组合方案,编制地浸采铀钻探施工冲洗液固控设备技术规范。

(3)对已研发的冲洗液固控设备进行低成本经济性改造,综合考量搬迁便捷、处理能力、工艺需求等,在铀矿勘查钻探施工中进一步优化已研发的冲洗液固控设备。

3.1.4 地浸采铀钻探装备优化设计与试验

当前地浸采铀钻探主要采用的电动/全液压顶驱深水井钻机和拖车式转盘钻机优缺点突出,有必要对两类钻机和配套装备进行改造,形成两类地浸采铀钻探装备体系。此外,经生产验证,螺杆钻具能够显著提高钻效但应用范围有限,有必要对地浸采铀钻探装备进行优化设计与试验,进一步提升电动/全液压顶驱深水井钻机自动化水平和拖车式转盘钻机机械化水平,减少班组作业人员和劳动强度,提高钻进效率。

(1)开展电动/全液压顶驱深水井钻机及配套装备改造,包括功率适配性优化、柴电双动力可选、变频电机配置等动力节能研究;变频无级调速、加减油压精准控制、各执行动作集中操控和显示,配套猫道机、钻杆盒及专用提引器等集中操控和自动化改造;转速调节范围广,扭矩满足施工需求的顶驱优化设计;生产验证装备性能和工艺适配性的工程化试验,持续优化改进。

(2)开展拖车式转盘钻机及配套装备改造,包括配备轮式钻具拖车,钻具通过滑轨摆放在钻具拖车中,配套使用爬杆式提引器实现塔上无人、班组减少一人的目标,同时提高搬迁效率,减少钻机钻具占地面积;开展“转盘+螺杆钻具”复合钻进工艺研究,总结试验泥浆泵与螺杆钻具排量匹配关系,总结螺杆钻具检查和维护要点,形成标准化技术规范。

3.2 加强先进成熟装备引进和推广应用

当前国内外先进的钻机、液动冲击器、液压拧管机等成熟工艺器具引进不足,已被证实在砂岩铀矿钻探中取得良好成效的绳索取心钻进等工艺^[6]应用范围不足,有必要加强先进成熟钻探装备引进。

通过中央财政铀矿勘查能力建设项目和自筹资金引进先进适用的钻探装备,及时淘汰技术和安全性能差的钻探装备,提高钻探生产效率。硬岩铀矿钻探引进全液压钻机,地形条件较好、搬迁较便利的地区引进履带式全液压动力头钻机,山区、施工进场困难的地区引进模块化便携式全液压钻机,更好地适配金刚石绳索取心工艺;引进液动冲击器和液压拧管机,提高坚硬和破碎地层取心钻进效率、回次进尺和提下钻效率。砂岩铀矿勘查引进XD-10DK电动顶驱钻机并不断优化改进,根据搬迁条件等选择撬装式或拖车式装载模式;在伊犁、巴音戈壁、鄂尔多斯、二连、松辽盆地,尤其是600 m以深、设计取心较多的钻孔,加强绳索取心钻进工艺的推广应用,可显著提升效率,降低作业强度;编制沉积地层绳索取心钻进配套冲洗液、钻头钻具、钻进参数等关键技术规程,逐步总结固化标准化工艺流程。地浸采铀钻探引进螺杆钻具,提高钻进效率。

4 结论

(1)本文总结了21世纪以来,我国铀矿钻探装备在不同时期、不同生产需求条件下的发展历程,从优化钻探装备装载形式的“三车一组”体系,到用于科学深钻的电动变频顶驱钻机,再到小口径模块化电动顶驱岩心钻机,铀矿钻探装备发展历程和相关发展建议可为国内地质勘查钻探装备发展提供重要参考。

(2)近年来国内全液压钻机发展迅速,尤其是模块化便携式全液压钻机应用广泛,较好地满足了钻探生产自动化和绿色勘查需求。但全液压钻机主要配套金刚石绳索取心工艺,中深孔地质勘查普遍使用的立轴钻机自动化程度低、钻进参数无法精准控制的现状仍未改变,相关立轴钻机升级改造的研究很少^[19]。本文提出了立轴钻机系统化改进升级建议,能够给钻探装备研发专业人员一定启发,促进立轴钻机改造或研发替代产品。

(3)我国水井和地浸采铀钻探施工条件类似,

均普遍使用性价比较高的转盘式水井钻机^[24],短时间内无法被自动化程度和成本更高的全液压深水井钻机替代。本文提出的转盘式水井钻机配套钻具拖车和螺杆钻进工艺的组合,已通过地浸采铀钻探生产验证能够有效提升钻探生产机械化水平和钻进效率^[25],可在地浸采铀钻探和水井钻探施工中进一步推广应用。

(4)本文基于行业特点提出了未来3年铀矿钻探装备发展建议,覆盖了钻机、钻塔、冲洗液固控、搬迁设备、孔底动力钻具和取心钻具研究,并取得了行业主管单位、国内部分钻探装备制造厂商和科研院所的认可,然而在基于物联网技术的钻探信息化采集、远程专家智能决策钻进系统等数智化赋能装备发展方面考虑较少,需结合铀矿钻探生产实际推进装备数智化发展。

参考文献(References):

- [1] 周意如.地浸采铀矿山提升铀浸采效率的关键问题研究[D].衡阳:南华大学,2024.
ZHOU Yiru. Research on key problems of improving uranium leaching efficiency in in-situ leaching Uranium mines[D]. Hengyan: University of South China, 2024.
- [2] 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]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2021, 46(8):2675-2696.
- [3] 秦明宽,李子颖,蔡煜琦,等.对加强我国铀资源勘查“三新”突破的战略性思考[J].世界核地质科学,2022,39(3):383-398.
QIN Mingkuan, LI Ziyang, CAI Yuqi, et al. Strategic thinking on strengthening three new breakthroughs for the uranium exploration in China[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3):383-398.
- [4] 蔡煜琦,张金带,李子颖,等.中国铀矿成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地质志·铀矿卷》研编[J].地球学报,2025,46(1):52-68.
CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Metallogenic regularity, centennial exploration results of uranium deposits in China, and suggestions for a new round of prospecting: research and compilation of "geology of mineral resources of China· uranium deposits volume"[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2025, 46(1):52-68.
- [5] 自然资源部办公厅.2024年全国非油气地质勘查统计年报[EB/OL].(2025-05-21)[2025-09-29].https://gi.mnr.gov.cn/202505/t20250527_2884805.html.
Ministry of Natural Resources, OfficeGeneral. 2024 Statistical annual report on non-oil and gas geological exploration[R/OL]. (2025-05-21) [2025-09-29]. https://gi.mnr.gov.cn/202505/t20250527_2884805.html.
- [6] 李柏军,童俊涛,王琳,等.铀矿地质钻探月效率影响因素分析及提升建议[J].钻探工程,2023,50(3):44-53.
LI Baijun, TONG Juntao, WANG Lin, et al. Analysis of influencing factors on the drilling efficiency of uranium geological drilling and suggestions for improvement[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):44-53.
- [7] 胡仲杰,张联库,邓小军,等.HXY-800QT型拖车钻机的研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(6):34-37.
HU Zhongjie, ZHANG Lianku, DENG Xiaojun, et al. Development and application of trailer mounted rig HXY-800QT[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(6):34-37.
- [8] 聂江涛.中国铀矿第一科学深钻[J].铀矿地质,2014(2):128.
NIE Jiangtao. The first scientific deep drilling project for uranium mines in China[J]. Uranium Geology, 2014(2):128.
- [9] 胡向阳,李东,张笃昌,等.XD-10DK型小口径电动顶驱钻机的研制与应用[J].钻探工程,2022,49(6):87-95.
HU Xiangyang, LI Dong, ZHANG Duchang, et al. Development and application of XD-10DK small diameter electric top drive drill[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):87-95.
- [10] 温得全,冯美贵,李斌,等.智能高效小型一体化泥浆不落地系统的应用[J].钻探工程,2022,49(4):49-54.
WEN Dequan, FENG Meigui, LI Bin, et al. Research and application of the intelligent and efficient small-size integrated mud non-landing system[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):49-54.
- [11] 蒋睿,李柏军,王康,等.新型隔膜压滤装置在地质钻探废浆无害化处理中的应用[J].地质装备,2024,25(S1):176-182.
JIANG Rui, LI Baijun, WANG Kang, et al. Research and application of a new type of diaphragm filter press in harmless treatment of waste pulp from geological drilling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024, 25(S1):176-182.
- [12] 李柏军.通辽钱家店铀矿床地浸采铀钻孔施工技术研究[D].长春:吉林大学,2017.
LI Baijun. Study on drilling technology for in-situ leaching of uranium in Tongliao Qianjiadian uranium deposit[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [13] 杨俊.某砂岩型铀矿床地浸工艺钻孔施工效率分析[J].铀矿冶,2024,43(2):47-52.
YANG Jun. Analysis on drilling efficiency of in-situ leaching technology in a sandstone type uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):47-52.
- [14] 李博,刘晓阳,段志强.国外铀矿勘查钻探技术现状及发展趋势[J].世界核地质科学,2022,39(1):153-164.
LI Bo, LIU Xiaoyang, DUAN Zhiqiang. Current situation and development trend of drilling technology for uranium exploration abroad[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1):153-164.
- [15] 陈师逊,张英传,刘作达.中国岩金勘查第一深钻——山东莱州西岭金矿区ZK96-5孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):108-112.
CHEN Shixun, ZHANG Yingchuan, LIU Zuoda. The drilling technology of ZK96-5 borehole in Xiling Gold mining area,

- Laizhou, Shandong province: the deepest core drill for lode Gold exploration in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(S1): 108-112.
- [16] 梁健, 李小洋, 周红军, 等. “十四五”我国地质岩心钻探技术装备发展现状及趋势分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 1-14.
- LIANG Jian, LI Xiaoyang, ZHOU Hongjun, et al. Analysis of the development status and trends of geological core drilling equipment in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 1-14.
- [17] 王悦, 王金平, 王春蕾, 等. 数字化立轴钻机在科钻深孔中的应用[J]. 地质装备, 2025, 26(2): 40-44, 50.
- WANG Yue, WANG Jinping, WANG Chunlei, et al. Application of digital spindle drill in deep scientific drilling holes[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2025, 26(2): 40-44, 50.
- [18] 卢春阳, 李明星, 欧喜生, 等. 岩心钻机长行程的探索与应用[J]. 地质装备, 2023, 24(6): 1-4.
- LU Chunyang, LI Mingxing, XishengOU, et al. The exploration and application of long-stroke core drilling machine[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2023, 24(6): 1-4.
- [19] 高明帅, 孙军盈, 臧臣坤, 等. 基于XY-6型立轴钻机的数字化升级改造[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 471-475.
- GAO Mingshuai, SUN Junying, ZANG Chenkun, et al. Digital upgrading of vertical shaft drilling rig based on XY-6[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 471-475.
- [20] 薛倩冰, 王晓赛, 樊广月, 等. 钻井利器故事之“全液压岩心钻机”[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 172-176.
- XUE Qianbing, WANG Xiaosai, FAN Guangyue, et al. The story of a drilling weapon: Full hydraulic core drill[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 172-176.
- [21] 刘晓阳, 李博. 地浸砂岩型铀矿钻探现状及提高钻探效率的技术措施[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 35-41.
- LIU Xiaoyang, LI Bo. Current status of in-situ leachable sandstone-type Uranium drilling and technical measures of improving drilling efficiency[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 35-41.
- [22] 甘晓. 我国发现全球最深砂岩型工业铀矿化[N]. 中国科学报, 2025-07-21(001).
- GAN Xiao. China discovers the world's deepest sandstone-type industrial Uranium mineralization [N]. China Science Daily, China Science Daily, 2025-07-21(001).
- [23] 冯美贵, 刘启栋, 郭伟, 等. 钻井液离心机预防绳索取心钻杆内壁结垢研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 118-124.
- FENG Meigui, LIU Qidong, GUO Wei, et al. Research on the prevention of scaling on the inner wall of the wire-line drill rod by drilling fluid centrifuge[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 118-124.
- [24] 许刘万, 王艳丽, 左新明. 我国水井钻探装备的发展及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(4): 1-7.
- XU Liuwan, WANG Yanli, ZUO Xinming. Development and the application of water well drilling equipment in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(4): 1-7.
- [25] 李坡, 梁其深, 胡柏石, 等. 随钻测斜及纠斜技术在地浸采铀钻孔中的应用前景[J]. 铀矿冶, 2016, 35(3): 165-169, 174.
- LI Po, LIANG Qishen, HU Baishi, et al. Application prospect of measuring and straightening technology on deviation while drilling in in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(3): 165-169, 174.

(编辑 王跃伟)