新疆伊犁盆地深部铀矿地浸井钻完井关键技术研究与应用

马德义[1]，杨新江[1]，吴　雄[2]
（1.新疆维吾尔自治区地质局阿克苏地质大队，新疆 阿克苏 843000；2.核工业二三〇研究所，湖南 长沙 410007）

摘要：针对新疆洪海沟深部复杂地层铀矿地浸开采井面临的钻探效率低、成本高、成井质量要求高等难题，开展优快钻进技术研究。通过对水源钻机、工程钻机、石油钻机三类设备进行性能与钻进效率对比，明确不同装备适用性；优化钻头选型、环保低固相防塌钻井液、防斜技术、套管结构及切割开窗成井工艺。现场完成19口钻井，总进尺13731 m，施工指标满足设计要求。实践表明，履带式深井钻机更适配深部钻探需求；优化组合式井身结构兼顾稳固性与经济性；PDC钻头、环保低固相防塌钻井液、PVC套管及切割开窗工艺可提升钻进效率、保护矿层渗透性、延长井筒寿命。形成的优快钻进技术体系有效解决深部、复杂地层及地浸工艺特殊要求带来的施工难题，为洪海沟及同类砂岩型铀矿高效绿色勘探开发提供技术支撑。

关键词：深部铀矿；地浸开采井；复杂地层；优快钻井；钻头选型；低固相防塌钻井液；切割开窗
中图分类号：TD868；P634.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)S1-0323-09

Research and application of key drilling and completion technologies for in-situ leaching wells in deep uranium deposits of the Yili Basin, Xinjiang

MA Deyi[1], YANG Xinjiang[1], WU Xiong[2]
(1. *Aksu Geological Brigade, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Aksu Xinjiang* 843000, *China*; 2. *Research Institute No.*230, *CNNC, Changsha Hunan* 410007, *China*)

Abstract: Aiming at the difficulties faced by in-situ leaching mining of uranium deposits in deep and complex formations of Honghaigou, Xinjiang, such as low drilling efficiency, high cost and strict well completion requirements, this paper conducts a study on high-quality and rapid drilling technology. By comparing the performance and drilling efficiency of three types of equipment, namely water well rigs, engineering rigs and petroleum rigs, the applicability of different equipment is clarified. Meanwhile, drill bit selection, environment-friendly low-solid anti-sloughing drilling fluid, deviation control technology, casing structure and slotting completion technology are optimized. A total of 19 boreholes were constructed on site with a total footage of 13731 m, and all construction indicators met the design requirements. Results show that crawler-type deep well rigs are suitable for deep drilling; the optimized composite casing program achieves both stability and economy; PDC bits, environment-friendly drilling fluid, PVC casings and cutting and windowing completion technology can improve drilling efficiency, protect formation permeability and extend well service life. The established high-quality and rapid drilling technology system effectively solves construction challenges caused by deep burial, complex formations and special requirements of in-situ leaching, providing technical support for efficient and green exploration and development of Honghaigou and similar sandstone-type uranium deposits.

收稿日期：2026-06-21；**修回日期**：2026-07-25　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.S1.042
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(编号：41802196)；中国地质调查局地质调查项目(编号：DD20242067)
第一作者：马德义，男，汉族，1970年生，高级工程师，探矿工程专业，主要从事固体矿产钻探施工、定向钻进施工、高原冻土层施工方法研究，新疆阿克苏市迎宾路57号，290581000@qq.com。
引用格式：马德义，杨新江，吴雄.新疆伊犁盆地深部铀矿地浸井钻完井关键技术研究与应用[J].钻探工程，2026，53(S1)：323-331.
MA Deyi, YANG Xinjiang, WU Xiong. Research and application of key drilling and completion technologies for in-situ leaching wells in deep uranium deposits of the Yili Basin, Xinjiang[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 323-331.

Key words: deep uranium deposits; in-situ leaching production well; complex formations; high-quality and rapid drilling; bit selection; low-solid anti-sloughing drilling fluid; cutting and windowing

0 引言

新疆洪海沟项目面临“深部”、“复杂地层”和“地浸工艺特殊性”三大挑战，传统钻探方法在该区域存在效率低、成本高、成井质量难以保证等问题，严重制约了矿床的经济有效开发[1-3]，新疆洪海沟矿床头屯河组铀矿体属于深部矿体，钻探深度通常较大（目前普遍钻深600～700 m）[4-6]。随着深度增加，地层压力、温度升高，岩石可钻性变差，钻遇复杂情况（如漏失、坍塌）的风险急剧增大。常规钻探方法机械钻速慢，钻井周期长，成本呈指数级增长。头屯河组地层通常为砂岩、泥岩互层，这种“软硬交错”的地层对钻头的选型、钻井参数的优化提出了极高要求[7-10]。同时，地层中可能含有高压水层、易坍塌的泥岩层或裂隙发育带，容易导致井壁失稳、钻井液漏失等井下事故，处理事故耗时耗力，严重影响建井质量和进度。地浸工艺对井筒质量的极端要求是地浸采铀与常规矿产钻探最根本的区别，首要目标是保障井筒质量。地浸采铀需要通过注液井将溶浸液注入矿层，并通过抽液井将含铀溶液提取出来，这就要求井筒（尤其是过滤管段）必须完全隔离目标矿层上下的隔水层。任何因钻井技术不佳造成的井斜、井壁坍塌、水泥环固结不牢等问题，都可能导致溶浸液“串层”污染地下水，或无法有效控制液流路径，使整个采区浸出效率低下甚至失败[11-13]。研究项目累计完成钻井19口，总进尺13731 m，其中：抽液井4口，进尺3052 m；观测井6口，进尺3801 m；注液井9口，进尺6878 m。施工过程严格按设计要求及规范执行，井型、数量及深度均符合设计方案要求。

1 地质概况及工程难点

1.1 地质概况

1.1.1 区域地质背景

伊犁盆地在大地构造单元划分上归属于天山造山带中的伊犁-中天山微地块，是在塔里木板块和哈萨克斯坦板块南北对冲挤压应力作用下形成的大型内陆山间拗陷盆地。

伊犁盆地南部斜坡带是伊宁凹陷内构造相对稳定区，总体上可以分为相对稳定区、过渡区和活动区，由西向东，可进一步划分出洪海沟西部凹陷、库捷尔太微凸、苏东布拉克微凹、乌库尔其微凸、扎基斯坦向斜、郎卡倒转凹陷和库鲁斯泰-达拉地复式向斜等次级构造单元，地层发育较齐全。

1.1.2 地层特征

洪海沟地区的地层自下而上依次为三叠系中上统小泉沟群（$T_{2+3}xq$）、侏罗系（J）、新近系（N）和第四系（Q）。侏罗系西山窑组（J_2x）、罗统艾维尔沟群（$J_{2-3}aw$）和头屯河组（J_2t）为该区主要含矿层。西山窑组上段（J_2x^3）在整个盆地南缘均有发育，厚度20.1～123 m，变化较大，平均厚度为61.4 m。西山窑组上段在洪海沟地区具有明显的顶底界线，下伏地层为M10煤，上覆地层为M12煤。头屯河组（J_2t）地层在该区域内普遍发育，为辫状河三角洲平原亚相沉积，厚度11.2～242.2 m，厚度变化大，平均厚度为63.8 m，头屯河组顶底界线清楚，上覆地层为新近系底部的钙质砂砾岩，下伏地层为西山窑组顶部的M12煤层。头屯河组（J_2t）垂向可分为上下两段，呈两套下粗上细的正韵律产出，二者间发育一套厚层红色、黄色泥岩，砂体岩性主要为中细粒砂岩、含砾粗砂岩，其中下段砂体发育相对上段较为稳定。钻遇地层及主要岩性见表1。

1.2 工程难点

洪海沟地区覆盖层厚，厚度约280～300 m，主要岩性为大颗粒卵石层（图1），地层可钻性差，易坍塌，易偏斜，钻井施工周期长[14-16]。

目的层普遍为砂岩、泥岩、粉砂岩频繁互层。砂岩坚硬耐磨，泥岩软弱易水化。对成井质量的影响：（1）井眼不规则：钻遇坚硬砂岩时井眼规则，钻遇软弱泥岩时易发生“缩径”或“剥落坍塌”，形成“糖葫芦”串状的井眼。这会导致后续固井时水泥环厚度不均、胶结质量差，为“串层”埋下隐患。（2）钻具振动与井斜：软硬交替的岩性使钻头工作负荷剧烈变化，易引起井斜，偏离设计轨迹，影响中靶精度。

泥岩地层遇水后极易发生水化膨胀、分散，造成井壁失稳，导致剥落、坍塌，甚至造成卡钻事故。

储层伤害：如果含矿砂岩中富含泥质胶结物，水敏效应会堵塞矿层孔隙喉道，降低其渗透性，使

表1　地层分层及岩性描述

深度/m	厚度/m	地层单元	岩性描述
2	2	第四系全新统(Q_3)	黄土,亚砂土
265	263	第四系更新统(Q_{2-3})	卵砾石、砂、砂土,松散堆积,半固结
681	416	新近系(N)	上部为褐、红、杂色钙质砂砾岩、砂岩夹粉砂岩、泥岩互层;下部为砂质泥岩和泥质砂岩为主,泥钙质胶结,底部为厚层钙质砂砾岩
765	84	中侏罗统头屯河组(J_2t)	为钻井目的层。上部为褐红色弱钙质胶结的含砾泥岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,中部为泥质粉砂岩与细砂岩、中砂岩不等厚互层,底部为含砾粗砂岩、粗粒砂岩

图1　覆盖层及鹅卵石

后续地浸液无法有效注入和渗透,严重影响浸出效率[17-19]。

地层胶结疏松与弱成岩性,对成井质量的影响:(1)在施工期,胶结程度差、成岩性弱的井段,井壁围岩自身稳定性差,在钻井液扰动及机械作用下易发生局部剥落、掉块,造成井径扩大形成不规则井眼,直接影响井身质量与后续固井质量,为后期生产埋下安全隐患。(2)在生产运行期,地层流体在采出过程中会持续冲刷井壁,胶结疏松的砂岩颗粒易被携带脱落,引发地层出砂而堵塞筛管、加剧泵具磨损,增大生产故障风险,严重时可导致井眼失效报废,见图2。

伊犁盆地南部斜坡带虽构造背景简单,但其软硬互层、弱胶结、强水敏的详细工程地质性质给地浸采铀的成井质量带来了巨大挑战。任何钻完井作业都必须以“井壁稳定”和“储层保护”为核心,采取针对性的技术措施(如优快钻进、个性化钻井液设计、优质固井等),才能克服这些不良地质条件,形成高质量的注采井,保障地浸采铀的成功实施[20-22]。

成井质量方面:重点是套管安装与固井质量,套管的材质(如HDPE高密度聚乙烯的抗化学腐蚀性)、缝隙尺寸(需与地层砂粒粒度匹配)、安装深度

图2　井内返出的岩屑

准确性都至关重要。套管外的水泥环必须密封良好,确保层间隔离。水泥浆窜槽或封固不严将是永久性缺陷,无法补救。

2　设备选型研究

2.1　钻井设备选型

伊犁盆地洪海沟施工深度大、地浸钻井口径大、井网密集转场频繁、严控施工成本与井斜等工况,从动力性能、地层适配、井斜控制、转场搬迁、综合成本、自动化、复杂事故处理等方面,系统梳理水源钻机、履带工程钻机、石油钻机的优选优势、适用场景与短板。

2.1.1　水源钻井设备

近年在洪海沟头屯河组矿床(深度在780 m以内)采用水井钻井设备组合施工地浸钻井,钻机主要为水源S1000、S2000型,泥浆泵为BW850、F1000型,钻塔为有效高度13 m的前开口桅杆式(配拖车

式S-1000型钻机)、有效高度18 m的A字型井架(配落地式S-2000型钻机),固控设备是GNZS52型振动筛,见图3。

(a)S-1000型钻机 (b) S-2000型钻机

图3 水源钻机

主要优缺点对比:水源钻机整机配套功率300 kW以内,单井能耗仅10000~12000元,远低于工程、石油钻机;配套泥浆泵、固控设备简单,配件通用性强,维修成本低,转场便捷,适配密集井网,适合大规模井网批量施工,大幅降低地浸井整体建井投资。缺点是整机扭矩、提升力、泵压上限低;500 m以深硬砂岩段钻进难度大,携砂弱;无随钻测斜一体化接口,井斜控制难,深部易出现"糖葫芦"井眼;复杂漏塌地层处理能力弱,深部综合时效仅为履带工程钻机60%左右。主要适合孔深≤600 m、地层完整无严重坍塌漏失、批量低成本勘探观测孔;作为辅助备用钻机,承担浅层先导孔施工。

2.1.2 工程钻井设备

工程钻机主要为XSL680、XSL1000型,泥浆泵为F1000型,主要采用一体式钻塔。全液压顶驱系统;履带自走式;自动化程度高。其中工程钻机XSL680适合井深≤700 m、地层中等复杂、工程量适中的现场;XSL1000型工程钻机适合井深在800 m以深、厚大卵石覆盖层、破碎漏失发育区块,见图4。

工程钻机主要优缺点对比:

XSL680型履带全液压工程钻机最大扭矩24 kN·m、提升力680 kN;XSL1000型钻机扭矩32 kN·m、提升力1000 kN,匹配600~800 m深部硬砂岩、砾石互层破碎地层,破碎带划眼、起下套管处理能力强。高压大流量泥浆泵(F1000,泵压21 MPa),可解决深部岩屑沉降、微孔地层封堵难题,

(a)XSL680型钻机 (b)XSL1000型钻机

图4 工程钻机

保护铀矿层渗透性。钻压、转速无级微调,软硬交替地层自动匹配切削参数,减少跳钻、钻头磨损,适配本区砂岩-泥岩频繁互层地质特征。整机可直接配套MWD随钻测斜、单弯螺杆纠斜钻具组合;0~300 m卵石层钟摆防斜、300 m以深螺杆定向纠斜两套工艺均可稳定搭载,有效抑制漂卵石侧向偏斜,规避后期串层污染地下水风险,钻井一次合格率显著提升。无需拖车牵引,泥泞、戈壁凹凸矿区自主移位,无需大型转运车辆;搬迁1 d即可完成,兼顾石油钻机的钻进能力与水源钻机快速转场优势,适配大面积铀矿连片井网施工。集成自动上卸扣、钻参实时监测(钻压、扭矩、泵压)、液压差动快速起下钻;同等760 m井深,裸眼平均时效5.16 m/h,覆盖层时效4.04 m/h,比S2000型水源钻机提升60%以上,大幅缩短钻井周期。单井能耗20000~22000元,介于水源与石油钻机之间;但时效提升抵消能耗成本,且减少井斜报废、卡钻事故带来的返工损失,700 m左右深部地浸井综合施工成本最优。

2.1.3 石油钻井设备

石油钻机主要为ZJ20、ZJ30型,泥浆泵为F1300型,主要采用AS24-50、JJ170/41-K型钻塔。固控系统主要采用三级固控分离(振动筛+除砂器+离心机)。适用于800 m以上超深钻井、大规模漏失、高压水层等极端复杂工况,处理卡钻、埋钻等恶性事故能力远超前两类钻机。配置测斜设备保障井斜。该类设备组合具有:设备笨重操作复杂,动迁困难安全性较低,整体施工效率不高,运行成本很高等特点,见图5。

2.2 不同钻机钻井效率对比

伊犁盆地洪海沟地区覆盖层厚(厚度约280~

图5　现场施工的石油钻机

300 m),地层岩性主要以鹅卵石为主,地层可钻性差,钻井易超斜,钻井施工周期长,成井率低。经过对本项目19口钻井时效进行统计,在平均井深、覆盖层厚度大致相同情况下,水源钻机裸孔钻进效率是工程钻机的60.85%,是石油钻机的55.28%;水源钻机覆盖层钻进效率是工程钻机的57.67%,是石油钻机的56.14%。工程钻机与石油钻机相比,无论在裸眼钻进效率还是覆盖层钻进效率大致一致(表2)。

表2　钻进效率统计

钻机类型	平均井深/m	平均裸眼钻进时间/h	平均裸眼钻进效率/(m·h^{-1})	平均覆盖层厚度/m	平均覆盖层钻进时间/h	平均覆盖层钻进效率/(m·h^{-1})
水源钻机	762.0	243.0	3.14	299	128.57	2.33
工程钻机	763.0	148.0	5.16	299	74.00	4.04
石油钻机	763.6	134.4	5.68	299	72.00	4.15

2.3　钻机选型结果

兼顾深部钻进能力、井斜控制、转场效率与综合成本,适配伊犁盆地600~800 m深部砂岩铀矿常规地浸井,首选XSL680/XSL1000履带工程钻机为一体化钻完井技术核心装备。S1000/S2000水源钻机用于≤600 m浅部观测孔、先导勘探孔,控制整体投资,批量搭配工程钻机使用。针对超深、严重漏塌、高压地层少量特殊钻井,采用ZJ20/ZJ30石油钻机。

3　高效提速技术研究

3.1　钻头选用

3.1.1　上部地层牙轮钻头

上覆地层0~80 m岩性主要是卵砾石层,以石英岩、砂岩砾石为主,地层松散,胶结差,粒径不一,可钻性差,浅层钻进,钻具重量轻,跳钻严重,考虑钻头的抗冲击性,且上部软泥岩黏附性强易泥包钻头,主要采用研磨性强的牙轮钻头(HJ537),见图6。

强研磨性三牙轮钻头(HJ537)主要优点:

(1)适应性强:适合常规、定向及硬地层钻进,可应对极软至极硬各类地层。

(2)钻进效率高:优化齿型与齿面焊接技术,提高了破岩效率,同时降低冲击载荷对钻具损伤。

(3)使用寿命长:轴承密封性能高,同时配备先进的切削、保径和水力结构,切削元件耐磨抗冲击,部分牙轮采用金刚石复合齿,以提升耐用性。

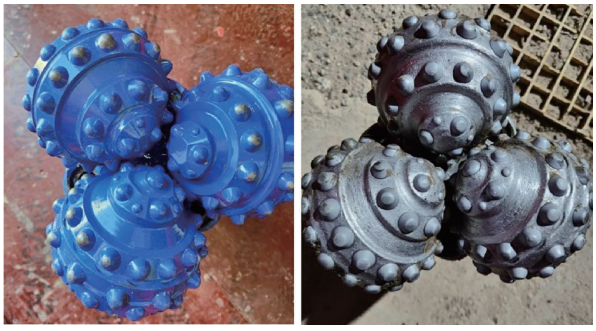

图6　研磨性强的牙轮钻头(HJ537)

(4)密封效果好:采用双金属密封+橡胶静密封+橡胶储油囊,有效防钻井液侵入,保障轴承润滑。

(5)保径效果好:选用大直径的主动切削保径球头齿,具有良好的保径作用和倒划眼功能,可有效维持井眼直径的稳定,减少钻头缩径等问题。

3.1.2　五刀翼PDC钻头(P1636S)

地层450 m以深主要是钻遇灰色粗砂岩、含砾砂岩;褐、红、杂色钙质砂砾岩、砂岩夹粉砂岩、泥岩互层。本井采用的五刀翼PDC钻头P1636S,主要采用了超级复合片工艺,提高了钻头的进尺效率,较原先的进尺速度提高了31.2%,见图7。

图7 五刀翼PDC钻头P1636S

超级复合片主要特点:(1)超高压合成;(2)超厚金刚石层:3~4 mm;(3)超深脱钴技术:端面1300 μm,侧面2800 μm以上,复合层加厚,抗研磨能力提升。

3.1.3 PDC取心钻头

该钻头牙齿最大,牙齿下部为圆柱型镶焊在胎体内,上部为另一个圆柱型,在切削部焊有圆型的金刚石薄片,金刚石薄片的厚度和质量决定了钻头的品质和价格,见图8。

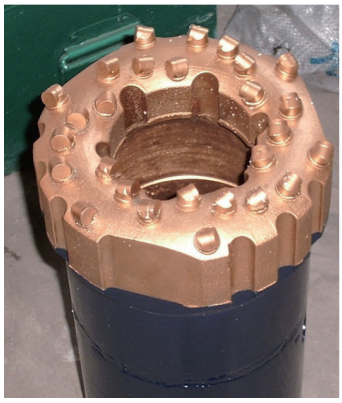

图8 PDC取心钻头示意

该钻头由于牙齿大,机械钻速高,广泛用于浅层松软地层取心。近年来,为了提高机械钻速,PDC取心钻头得到大面积推广,已成为现场普遍使用的取心钻头。

现场在Ⅷ ZK-5和Ⅷ CK-1两口钻井的含矿含水层段进行取心,取心结果见表3。

表3 Ⅷ ZK-5和Ⅷ CK-1井岩心采取结果统计

井号	取心位置/m	取心进尺/m	取出岩心长度/m	岩心采取率/%	岩心直径/mm
Ⅷ ZK-5	734.3~771.1	36.8	36.6	99.46	105
Ⅷ CK-1	734.3~771.0	36.7	36.6	99.73	105

可以看出,头屯河组钻井应用川-84型取心钻具,获得了99%以上的岩心采取率,效果良好,见图9。

图9 现场取出的比较完整的岩心

3.2 环保低固相防塌钻井液技术

结合蒙其古尔矿床东段的地层特点,针对深部钻井施工中,钻遇弱胶结型、裂隙型、硬脆性以及泥岩为主的水化不稳定地层,经常出现井壁岩石破碎、掉块、坍塌等现象,传统的钻井液封堵剂尺寸对第四系微孔、微裂缝来说太大,起不到良好的封堵效果。为阻止钻井液滤液向地层扩散,必须在钻井液中加入纳米材料才有可能对微孔、微裂缝实现封堵,达到稳定井壁的目的[23]。

3.2.1 钻井液与地层适配性

(1)松散漂卵石地层:具有松散、大孔隙、弱胶结特征,所适配钻井液应具有低失水率和高黏度性能,可抑制松散漂卵砾石间填隙物软化,提高胶结力。

(2)新近系泥岩地层:主要成分为黏粒级的矿物碎屑(石英、云母等)和黏土矿物,其中黏土矿物中含有亲水性较强的蒙脱石,具有吸水软化膨胀的特征,所适配的钻井液应有较低的失水率,能阻止钻井液中的水脱离体系进入泥岩层,并具有表面活性(润滑、清洁)可防止泥岩钻屑黏附钻具。

(3)西山窑组泥岩、砂岩地层:泥岩地层具有与新近系泥岩相同特征,钻井液适配性一致;松散砂岩地层,以泥质胶结为主,泥质含量一般为20.0%,岩石强度低,在钻井施工中,易压裂漏失和坍塌流砂,所适配的钻井液应有低失水率、网状结构,能抑

制地层破裂漏失和坍塌流砂。

3.2.2　钻井液配制

针对本井不同钻进地层及井段特征,分层配制对应性能的钻井液,精准匹配地层钻进需求。

3.2.2.1　第四系地层(井深80 m以内)

钻井液配方:清水+10%土粉+0.1%高黏PAC-HV+0.05%纯碱+0.1%烧碱。

性能:黏度80~120 s,密度1.05~1.10 g/cm^3,动切力8~12 Pa。具有良好的岩屑携带能力,规避井下复杂情况。

施工控制要点:本层段卵石层缝隙大,钻进过程易发生钻井液漏失,需提前储备足量土粉浆,随井深加深及时补充;根据漏失情况适量添加堵漏剂。同时严格执行井底清砂制度,每钻进30 m配制稠浆推送井底沉砂,有效避免接单根遇阻、井下复杂故障等问题。

3.2.2.2　80 m至完钻井段

配方:原浆+20%清水+1.5%防塌封堵剂NS+1%降黏降失水剂+1%成膜胶结固砂剂+0.1%烧碱+0.2%聚丙烯酸钾。

性能:黏度37~45 s,密度1.10~1.13 g/cm^3,失水量5 mL以内。

3.3　防斜技术

在钻井施工中,钻头钻遇漂卵石向其侧面较软填隙物偏转,是覆盖层发生井斜的主要原因。

现场根据漂卵砾石覆盖层特征,地层0~300 m使用钟摆钻具组合,加强覆盖层的防斜;地层300~760 m使用纠斜钻具组合,见表4,纠斜仪器见图10。

表4　钻具组合

井段/m	地层	钻具组合	
0~300	覆盖层	钟摆钻具组合	牙轮钻头+Ø203 mm钻铤×2根+Ø210 mm螺扶×1根+Ø177.8 mm钻铤×2根+Ø165 mm钻铤×6根+Ø127 mm斜坡加重钻杆3柱+Ø127 mm斜坡钻杆
300~760	沉积层	纠斜钻具组合	PDC钻头+Ø172 mm 1.25°单弯螺杆(螺扶210 mm)+Ø177.8 mm无磁钻铤×1根+MWD(LWD)短节+Ø177.8 mm钻铤×2根+Ø165 mm钻铤×6根+Ø127 mm斜坡加重钻杆3柱+Ø127 mm斜坡钻杆

图10　纠斜仪器示意

3.4　套管选型

洪海沟砂岩型铀矿是我国重要的砂岩型铀矿床之一,采用地浸采铀技术。该技术通过从地表向含矿层注入溶浸液,在地下与铀矿物发生反应,形成含铀溶液,再从抽液井将其提升至地表进行处理。在这种环境下,井管的材料选择至关重要,常规的石油套管存在很多问题,主要对比见表5,试验井套管材质规格见表6。

3.5　切割开窗成井工艺研究

3.5.1　施工设备及钻具

采用立轴钻机或者S800水源钻机,功率55 kW,转速30、45、79、136 r/min;TBW850/5A双缸双作用泥浆泵,功率90 kW,装Ø95 mm小缸套,排量350 L/min,泵压8 MPa。

89/79 mm两方钻杆+Ø60 mm钻杆+Ø114/300 mm液压单刀切割器。液压单刀切割器型号TYD114/300,压降2.5 MPa,切割直径300 mm。

3.5.2　切割施工技术方法

(1)切割方法及参数:采用转盘复合钻进,给进速度1.2~1.5 m/h,泵量350 L/min。理论塑料管屑切片厚度0.1~0.13 mm。采用无固相冲洗液,配方为1 m^{3}水+植物胶4 kg+CMC 2 kg+腐钾5 kg,密

表5 蒙其古尔铀矿套管优选对比

对比维度	PVC井管	钢 套 管	对比分析及对地浸采铀的影响
耐腐蚀性	对酸性(硫酸)或碱性(碳酸盐)溶浸液都有优异的耐受性,化学稳定性高	在酸性或富氧环境下会发生剧烈的电化学腐蚀,迅速被破坏	钢材在腐蚀后会产生两个致命问题:(1)井管寿命短,可能在试验结束前就因腐蚀穿孔而报废,导致试验中断失败;(2)污染溶浸液,铁锈等腐蚀产物会堵塞矿层孔隙,降低渗透性,并干扰后续铀的提取工艺
经济性	材料价格低廉,质量轻,运输、安装成本低,无需焊接等复杂工艺	材料本身昂贵质量大,需要重型设备安装,焊接或螺纹连接成本高	试验阶段需要控制投资风险。PVC可以显著降低建井成本,使试验在经济上更具可行性,尤其适合需要打大量试验井网的阶段
对溶液品质影响	不引入金属离子,能保持溶浸液的化学纯净度	腐蚀会向溶液中持续释放Fe^{3+}等阳离子,可能生成氢氧化物沉淀堵塞矿层,影响铀浸出效率	保证试验数据的准确性和可靠性。使用PVC能确保观测到的铀浸出效果是溶浸液与矿石反应的真实结果,而非被管道污染干扰后的假象
机械强度	抗压、抗拉强度低,对深井适应性差	机械强度高,能承受深井的高压和自身重量	蒙其古尔是砂岩型铀矿,埋深通常不深(多在200~300 m以内),地层压力相对温和,PVC管的强度足以满足要求。其机械强度的"短处"在此得以规避
水力性能	内壁光滑,摩擦阻力小,有利于降低泵送能耗	内壁相对粗糙,摩擦阻力较大	PVC具有一定优势,能略微提高注液和抽液效率,节约运行能耗

表6 试验井套管材质规格

名称	材质	型 号 规 格
套管	UPVC	Ø200 mm×15 mm
	UPVC	Ø154 mm×13.8 mm
	UPVC	Ø152 mm×12.8 mm
	玻璃钢管	Ø138 mm×7.8 mm
	无缝钢管	Ø200 mm×8 mm
	无缝钢管	Ø180 mm×8 mm
	无缝钢管	Ø148 mm×10 mm
管箍	UPVC	Ø218 mm×19 mm
	UPVC	Ø166 mm×17 mm
	玻璃钢	Ø148 mm×8 mm
	钢管箍	Ø220 mm×10 m
	钢管箍	Ø146 mm×10 m
变径管箍	尼龙	Ø218 mm/Ø174 mm、Ø210 mm/Ø148 mm Ø167 mm/Ø174 mm、Ø167 mm/Ø146 mm

度1.01 g/cm³,漏斗黏度28~35 s。切割完毕后用清水顶替出井内无固相聚合物钻井液。

(2)切割过程及质量控制:通过井口返渣判断切割程度,出砂即切穿水泥环,视为质量合格;切割完毕顶替清水后,井内水位下降速度>1 m/min,视为地层与井连通,可进行过滤器安装。通过物探测井,检测切割位置、切割直径和井底深度。

3.5.3 内置过滤器管柱安装及填砾

(1)内置过滤器管串组成:如图11所示,自上而下为Ø125/80 mm尼龙导向头0.2 m+Ø114 mm尼龙膨胀橡胶套环封悬挂装置0.2 m+Ø89 mm不锈钢引管2 m+Ø114不锈钢伸缩式内置管固定装置0.3 m+Ø100 mm不锈钢夹网过滤器+Ø110 mm不锈钢填砾装置0.3 m+Ø104 mm PVC沉砂管。整串管柱内径均为80 mm。

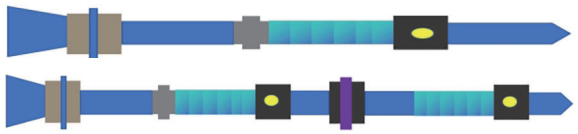

图11 内置过滤器管柱

(2)过滤器结构及过滤能力:316L材质不锈钢夹网过滤器,由筛管中间夹滤网组成。内筛管均布Ø8 mm圆孔,空隙率25%;中间40目316L不锈钢滤网,孔径0.37 mm,孔隙率29%;外筛管均布2×10 mm缝,空隙率32%。过滤器设计过滤粒径≥0.37 mm,阻止中粗砂以上砂粒。

(3)砾料及填砾方法:从过滤器上端向过滤器外向下正向填砾,如图12所示,采用插入法,将Ø42 mm投砾管的分液封隔插头插入到投砾装置内孔

中,用投砾罐和水泵输送砾水混合物经地面管汇→Ø42 mm投砾管→分液封隔插头的进水通道→投砾装置→至套管与引管环空向下→过滤器外切割腔,然后砾水分离,砾料留在切割腔内,水从切割腔→过滤器内→分液封隔插头的回水通道→套管环空→地面回水管汇→水槽循环。

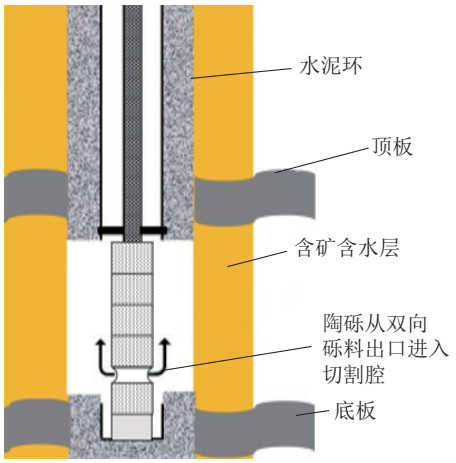

图12　过滤器上端正向填陶砾

(4)填砾过程控制:按切割腔体积的120%备砾料装入投砾罐,整个填砾过程一次性完成,中间不停顿;投砾罐压力表读数突然增大,表示砾料填满切割腔,计量投砾罐内残余砾量、投砾管路中残余砾量,算出实际充填量,评价充填率,充填率≥95%合格。

4　结论

(1)现场采用履带式钻机可实现快速移位,提升能力可保障深部硬岩地层施工稳定高效,有效地提升了勘探作业效率。同时配套高耐磨、抗冲击特性的PDC取心钻头,大幅提升机械钻速与取心完整度、岩心采取率,有效缩短钻井周期、降低施工成本。

(2)通过优化井身结构,上部采用高强度无缝钢管,中段采用多规格PVC套管,主力矿层段使用耐腐蚀玻璃钢管,可满足地浸采铀服务周期长的要求。

(3)采用环保低固相防塌钻井液,可有效减少劣质固相侵入铀矿主力层,保护矿层原始渗透性,兼顾安全钻进与绿色环保要求,为后续溶浸作业提供保障。创新应用切割开窗成井工艺,以机械精准切割PVC套管开窗替代传统射孔完井方式,可杜绝矿层砂粒入井、降低注液阻力,以微扰动施工保护矿层原始结构,保障溶浸液与铀矿石充分均匀接触,显著提升铀资源回收率,助力矿区绿色高效开采。

参考文献:

[1] 易超,刘红旭,蔡煜琦,等.隐伏砂岩型铀矿成矿机理与成矿地质信息识别研究进展[J].铀矿地质,2020,36(2):73-83.
[2] 张晓,宋继叶,倪仕琪,等.伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿年龄及其表征意义[J].世界核地质科学,2020,37(2):84-96.
[3] 李胜祥,陈戴生,王瑞英,等.伊犁盆地含煤系地层沉积相特征及其与层间氧化带砂岩型铀矿成矿关系[J].铀矿地质,1995,12(3):129-133.
[4] 朱鹏飞,蔡煜琦,郭庆银,等.中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J].地学前缘,2018,25(3):148-158.
[5] 孟云飞.伊犁盆地南缘三工河组沉积特征与铀成矿关系[J].世界核地质科学,2022,39(2):186-196.
[6] 邱余波,罗星刚,张磊,等.伊犁盆地南缘侏罗系沉积相对铀成矿的控制作用[J].科学技术与工程,2022,22(31):13672-13679.
[7] 牟全斌,韩保山,张培河,等.潘庄地区煤层气U型水平井技术工艺研究[J].中国煤炭地质,2014,26(11):53-56.
[8] 王栋,赵虎,乔宏实,等.樊试U1井组远端连通关键技术[J].石油钻采工艺,2015,37(4):23-26.
[9] 黄巍,王军,郝世俊,等.煤层气开发U型井施工技术及增产措施试验研究——以寺河煤矿15号煤2014ZX-U-05V/H井组为例[J].煤炭地质与勘探,2015,43(6):133-136.
[10] 王海,杨兆中,李岳.煤层气U型水平井定向井远端连通钻井工艺研究[J].煤炭科学技术,2018,46(6):206-210.
[11] 翟丽娟.中深层U型对接井"取热不取水"技术研究[J].中国煤炭地质,2020,32(S1):12-15.
[12] 张强.大口径井先导孔精确中靶技术研究[J].煤炭工程,2016,48(9):81-83.
[13] 闫立鹏.纳岭沟铀矿床地浸工艺孔高效快速施工工艺研究[J].钻探工程,2025,52(S1):363-368.
[14] 李柏军,童俊涛,王琳,等.铀矿地质钻探钻月效率影响因素分析及提升建议[J].钻探工程,2023,50(3):44-53.
[15] 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.
[16] 申庆民,贾肃.提高地浸砂岩型铀矿钻探工程效益的综合技术措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):122-124.
[17] 刘晓阳.孕镶金刚石-针状合金复合式取心钻头的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):377-381.
[18] 贾生来,晋少东,王琳,等.地浸采铀开窗式切割钻孔施工技术[J].钻探工程,2023,50(S1):371-374.
[19] 肖长城.伊犁盆地砂岩型铀矿孔斜防控实践分析[J].钻探工程,2022,49(4):99-103.
[20] 王琳.地浸砂岩型铀矿钻探施工技术[J].现代矿业,2021(4):223-225.
[21] 刘文武,欧阳志勇,赵志涛,等.青海花土沟地区砂岩型铀矿钻探施工技术研究[J].矿产勘查,2019,10(5):1228-1232.
[22] 王立民,廖文胜,赵良仁,等.地浸钻孔施工中低伤害钻井液的设计及应用[J].中国矿业,2012,21(S1):424-430.
[23] 晋少东,李颖,王琳,等.复合硅酸盐成膜冲洗液在砂岩型铀矿钻探中的应用[J].铀矿地质,2021,37(6):1155-1163.

(编辑　王文)