

# 顶驱式岩心钻机在小秦岭金矿田 3500 m特深孔施工应用

葛晓华<sup>1,2,3</sup>, 胡吉祥<sup>1,2,3\*</sup>, 翟育峰<sup>1,2,3</sup>, 林大伟<sup>1,2,3</sup>, 孙飞飞<sup>1,2,3</sup>, 姜晓<sup>1,2,3</sup>

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 浅海与陆域深部地质钻探山东省工程研究中心, 山东烟台 264004; 3. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004)

**摘要:**为探明小秦岭金矿田深部成矿规律,在地质条件复杂的小河断裂带部署了一口3500 m科学钻孔。施工面临断层泥缩径、破碎带坍塌、高地应力卡钻等严峻挑战,孔内事故频发,传统钻探技术难以满足要求。本文介绍了XD-40DB型交流变频顶驱式岩心钻机的成功应用,依托其智能化集成控制、18 m长行程给进、精准动力调控等核心技术优势,结合优化的五开钻孔结构、多套针对性冲洗液体系及精细化参数调控,形成了一套适用于特深孔复杂地层的综合施工技术。该技术有效克服了孔壁失稳和卡钻等难题,终孔孔深3491.90 m,平均岩心采取率97.18%,圆满完成地质任务。研究成果不仅为小河断裂控矿机制研究提供了关键地质数据,更验证了顶驱式岩心钻机在深部复杂地层勘探中的卓越性能与核心支撑作用,为我国同类特深孔钻探工程提供了重要的技术示范和实践经验。

**关键词:**顶驱式岩心钻机;深部探测;特深孔;复杂地层;小秦岭金矿田

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)01-0111-06

## Application of a top-drive core drilling rig in the construction of a 3500 m extra-deep borehole at the Xiaoqinling gold field

GE Xiaohua<sup>1,2,3</sup>, HU Jixiang<sup>1,2,3\*</sup>, ZHAI Yufeng<sup>1,2,3</sup>, LIN Dawei<sup>1,2,3</sup>, SUN Feifei<sup>1,2,3</sup>, JIANG Xiao<sup>1,2,3</sup>

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Neritic and Continental Deep Geological Drilling, Yantai Shandong 264004, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China)

**Abstract:** To investigate the deep metallogenic regularities of the Xiaoqinling gold field, a 3500 m scientific deep borehole was deployed in the geologically complex Xiaohe Fault Zone. The drilling operation encountered severe challenges, including borehole constriction in fault gouge, collapse in fractured zones, and stuck pipe due to high ground stress, leading to frequent downhole incidents where conventional drilling techniques proved inadequate. This paper presents the successful application of the XD-40DB AC variable frequency top-drive core drilling rig. By leveraging its core technological advantages—such as intelligent integrated control, an 18m long-stroke feed system, and precise power regulation—in conjunction with an optimized five-section borehole structure, multiple targeted drilling fluid systems, and meticulous parameter control, a comprehensive construction technology applicable to extra-deep boreholes in complex formations was developed. This technological system effectively overcame challenges

收稿日期:2025-07-02; 修回日期:2025-08-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.017

基金项目:深地国家科技重大专项课题“绿色高效精准智能化钻探技术与装备应用示范”(编号:2024ZD1003106);山东省地矿局科技攻关项目“浅海海域地质勘查钻探技术创新及应用”(编号:KY202501)

第一作者:葛晓华,男,汉族,1979年生,工程师,从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,804854421@qq.com。

通信作者:胡吉祥,男,汉族,1987年生,工程师,从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,340074564@qq.com

引用格式:葛晓华,胡吉祥,翟育峰,等.顶驱式岩心钻机在小秦岭金矿田3500 m特深孔施工应用[J].钻探工程,2026,53(1):111-116.

GE Xiaohua, HU Jixiang, ZHAI Yufeng, et al. Application of a top-drive core drilling rig in the construction of a 3500 m extra-deep borehole at the Xiaoqinling gold field[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 111-116.

like borehole instability and stuck pipe, achieving a final depth of 3491.90 m and an average core recovery rate of 97.18%, thereby successfully fulfilling the geological objectives. The findings not only provide crucial geological data for studying the ore-controlling mechanism of the Xiaohu Fault but also validate the exceptional performance and pivotal supporting role of top-drive core drilling rigs in deep exploration within complex formations, offering a significant technical demonstration and practical experience for similar extra-deep drilling projects in China.

**Key words:** top-drive core drilling rig; deep exploration; extra-deep borehole; complex formations; Xiaoqingling gold field

## 0 引言

随着国内浅部矿产资源的日益枯竭,深部矿产勘探成为保障国家资源安全的重要方向。河南省灵宝市小秦岭金矿田是我国重要的黄金产地,其深部成矿潜力巨大。深孔岩心钻机智能化研发与应用是推进深部资源勘探的关键。小秦岭金矿田南中矿带深部探测项目是山东省第三地质矿产勘查院完成的9个超3000 m全孔取心深孔之一,也是首次采用XD-40DB型顶驱式岩心钻机完成的特深孔。该钻机基于交流变频电驱动与全数字控制系统,自动化程度高,具备H口径4000 m特深孔岩心钻探的能力,凭借其先进的技术性能,在该项目实施过程中发挥了重要作用,为深部钻探提供了新的技术解决方案。

## 1 地质概况与钻孔设计

河南小秦岭3500 m特深钻孔所在区域地质构造复杂,环境条件特殊,受长期地质应力作用的影响,工作区内断裂构造极为发育,存在沿断隆周缘近东西向延伸的区域边界深大断裂——小河断裂带,断隆区内次级断裂亦广泛分布,复杂的断裂系统为深部钻探工程带来诸多挑战。研究区地处华北地震区汾渭地震带,历史上地震活动频繁,累计发生地震100余次,其中31次为破坏性地震,地壳运动较为活跃<sup>[1]</sup>。

钻遇地层自上而下主要由三大单元组成,0~521.86 m主体为小河岩体,521.86~887.94 m为小河断裂影响地层,887.94 m以深为太华群片麻岩。

根据上述地层情况,以及孔深3500.00 m、终孔口径 $\geq 75$  mm等地质要求,钻孔设计为六开结构<sup>[2-3]</sup>,如图1(a)所示。

## 2 钻探设备的选择

### 2.1 钻探设备选择原则

钻探设备要在满足深钻施工的前提下,具有一定的先进性和经济性:

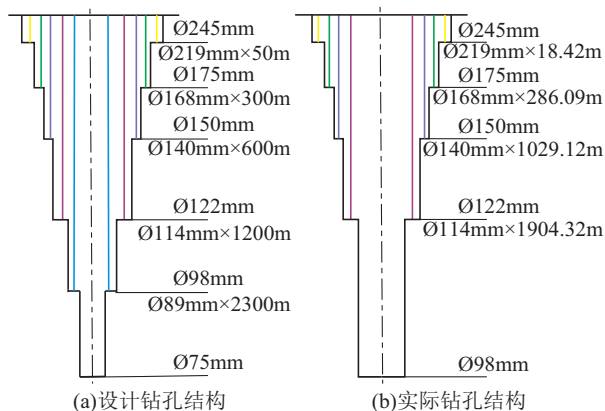


图1 钻孔结构

Fig.1 Borehole structure

(1)H口径钻探深度不小于3500 m,N口径钻探深度不小于4000 m。

(2)大钩载荷满足提升最大钻柱要求,并留有一定余量,以满足处理复杂情况需求。

(3)满足绳索取心工艺需求,配置高转速驱动设备。

(4)适用于施工区域的地形地貌、道路、水源、电力供应、气候等条件。可灵活切换网电或柴油发电机组供电,确保钻探作业不受电力条件限制。

(5)技术性能先进、易于维修且经济效益好。

结合以往施工经验,XY-9型钻机虽然能满足N口径4000 m的施工需求,但是立轴钻机行程短,不利于复杂地层的长行程跟管钻进。全液压力头钻机在深孔作业中不方便安装钻塔,雨雪天气不利于施工,提下钻需配套管材摆放区域,且工人劳动强度大。综合考虑,结合单位现有设备情况,采用XD-40DB型顶驱式岩心钻机。

### 2.2 XD-40DB型顶驱式岩心钻机技术优势

XD-40DB型钻机(图2)是一款采用交流变频电驱动、全数字控制的新型顶驱式岩心钻机,可满足4000 m孔深的深部岩心钻探作业需求。该钻机配套设备齐全,包括K31-135型钻塔、顶驱、主绞

车、电气传动控制系统、司钻房、绳索取心绞车、液  
压站及拧管机等<sup>[4]</sup>,相关参数见表1。



图2 XD-40DB型顶驱式岩心钻机

Fig.2 XD-40DB top-drive core drilling rig

表1 XD-40DB型钻机性能参数

Table 1 Performance parameters of XD-40DB rig

部 件	参 数 项	参 数 值
钻塔	H口径钻进能力/m	4000
	井架型式	K型
	高度/m	31
	最大钩载/kN	1350
顶 驱/转 盘	驱动型式	交流变频直驱
	电机额定功率/kW	75×2/75×2
	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~600/0~200
	最大扭矩/N·m	12000/30000
	额定扭矩/(N·m)	10000/20000
	导向行程/m	18
主绞车	最大输入功率/kW	250
	最大快绳拉力/kN	150
	钢丝绳直径/mm	28
	最大钩速/(m·s <sup>-1</sup> )	1.2
	刹车	盘式刹车+安全制动
绳索取心 绞车	驱动型式	交流变频
	单绳最大拉力/kN	20
	最高绳速/(m·min <sup>-1</sup> )	130
	容绳量/m	3500
泥浆泵	驱动型式	交流变频
	最大排量/(L·min <sup>-1</sup> )	400
	最高压力/MPa	30

其核心技术优势如下:

(1)智能化集成控制:整套系统采用变频控制、

数字传输技术,支持集中操作,自动化程度高,既能  
显著提升施工效率,又能降低能耗<sup>[5-6]</sup>。

(2)精准动力调控:具备优异的输出性能,对转  
速、扭矩、拉力、速度等参数的控制精准,过载保护  
机制完善。回转与给进无级调速,钻压可精确调  
节,便于根据不同地层条件灵活优化钻进参数,充  
分契合各类钻探工艺。

(3)人性化操作体验:钻机作业全程依赖电控  
元件与数字化操作,大幅减轻操作人员劳动强度,  
减少人力投入,同时改善工作环境。

(4)灵活动力配置:采用电驱动模块与钻塔结  
构件散装集成设计,回转、提升、给进、打捞等关键  
执行模块均由电动机驱动,动力来源可以是网电或  
柴油发电机组,适配多种作业场景。

(5)数据智能管理:钻机运行参数与钻进工艺  
参数支持实时存储、远程监控、传输、记录及查询,  
便于数据回溯与分析,助力钻探作业智能化管理<sup>[7]</sup>。

(6)高效维护:相较于液压传动钻机,传动效率  
更高、能耗更低,且维护保养更为便捷;相比机械传  
动钻机,简化了传动链,安装、拆卸与检修更方便<sup>[8]</sup>。

(7)高效作业设计:顶驱长行程给进,可实现18  
m加卸立根作业,有效提升钻探工作效率。

(8)安全性能升级:塔架内部配备防碰绳与导  
绳装置,显著增强操作安全性与塔架稳定性,为钻  
探作业保驾护航。

### 3 钻孔施工过程

施工过程中,结合实际情况,将钻孔调整为五  
开(图1b)结构。

#### 3.1 一开

上部沉积盖层以黏土、砾石层为主,极易发生  
坍塌。采用 $\varnothing 245$  mm金刚石单管钻具提钻取心,钻  
至18.42 m见块状岩心,下入 $\varnothing 219$  mm表层套管。

钻具组合: $\varnothing 245$  mm钻头+ $\varnothing 219$  mm单管取  
心钻具+ $\varnothing 140$  mm钻铤。规程参数:钻压5~10  
kN,转速50~180 r/min,泵量90 L/min。

冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+0.5~1.0 kg烧碱+0.5~1.0  
kg纯碱+50~100 kg钠膨润土+5~10 kg无荧光防  
塌润滑剂。

#### 3.2 二开

二开钻进地层主要为花岗质碎裂岩与未完全  
固结的古近系地层,破碎程度高。采用 $\varnothing 175$  mm单

动双管钻具提钻取心钻进,顺利钻穿上部破碎地层,钻至286.09 m下入 $\varnothing 168$  mm套管,隔离花岗质碎裂岩与未完全固结的第三系地层。

钻具组合: $\varnothing 175$  mm底喷钻头+ $\varnothing 168$  mm单动双管钻具+ $\varnothing 140$  mm钻铤+ $\varnothing 114$  mm钻杆。规程参数:钻压5~15 kN,转速60~180 r/min,泵量90 L/min。

冲洗液为低固相冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+0.5~1.0 kg烧碱+0.5~1.0 kg纯碱+25~50 kg钠膨润土+10~15 kg改性瓜尔胶+10~15 kg无荧光防塌润滑剂+5~10 kg高黏防塌剂+2~3 kg包被剂。

### 3.3 三开

三开钻进地层以伟晶岩、花岗质碎裂岩为主,裂隙发育,频繁出现卡钻、掉块现象。根据岩性变化,部分地层采用绳索取心液动锤钻进,灵活使用 $\varnothing 150$  mm底喷钻头与扩孔钻头,并依据钻遇地层条件调整孔段深度,设计深度500~600 m,最终钻进至1029.12 m,下入 $\varnothing 140$  mm套管。

钻具组合: $\varnothing 150$  mm绳索取心钻头+JS150/122绳索取心液动锤钻具+ $\varnothing 140$  mm钻铤+ $\varnothing 114$  mm绳索取心钻杆。规程参数:钻压10~15 kN,转速60~220 r/min,泵量90 L/min。

正常钻进用无固相冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+0.5~1.0 kg水解聚丙烯酰胺+10~15 kg无荧光防塌润滑剂+50 kg无机化合物+25 kg改性瓜尔胶+25 kg广谱护壁剂3型+1~1.5 kg包被剂+PVA。

破碎地层用低固相冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+0.5~1 kg烧碱+25~50 kg膨润土+5~10 kg改性沥青+15~25 kg随钻堵漏剂+15~25 kg封堵剂+2~4 kg增黏剂+1~2 kg包被剂。

严重破碎坍塌地层用LBM冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+1~2 kg烧碱+25 kg低黏增效粉+10 kg改性沥青+10 kg随钻堵漏剂+20 kg封堵剂+5 kg增黏剂+2~4 kg包被剂。

### 3.4 四开

四开钻进地层为片麻状碎裂岩与花岗碎裂岩,掉块、坍塌风险仍突出。采用S口径绳索取心液动锤钻进至1904.32 m,下入 $\varnothing 114$  mm套管。

钻具组合: $\varnothing 125$  mm绳索取心钻头+S口径绳索取心液动锤钻具+ $\varnothing 114$  mm绳索取心钻杆。规程参数:钻压10~20 kN,转速180~300 r/min,泵量72~90 L/min。

冲洗液为LBM冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+1~2 kg烧碱+25 kg低黏增效粉+10 kg改性沥青+10 kg随钻堵漏剂+20 kg封堵剂+5 kg增黏剂+2~4 kg包被剂。

### 3.5 五开

五开钻进地层以片麻状碎裂岩、花岗碎裂岩为主,破碎地层呈阶段性分布,坍塌掉块时有发生。采用H口径绳索取心钻进工艺,结合XD-40DB型岩心钻机精准动力调控、冲洗液配方的优化和性能参数的合理调整与维护,终孔孔深3491.90 m。

钻具组合: $\varnothing 98$  mm绳索取心钻头+H口径绳索取心钻具+ $\varnothing 91$  mm绳索取心钻杆。规程参数:钻压10~15 kN,转速180~300 r/min,泵量42~90 L/min。

冲洗液为LBM冲洗液:1 m<sup>3</sup>清水+1~2 kg烧碱+25 kg低黏增效粉+10 kg改性沥青+10 kg随钻堵漏剂+20 kg封堵剂+5 kg增黏剂+2~4 kg包被剂。

受复杂地质条件影响,施工全程面临诸多挑战<sup>[3]</sup>。孔壁稳定性差,破碎、掉块、坍塌、缩径、超径等问题在多个孔段反复出现,全孔频繁发生卡钻及次生事故。

## 4 钻机现场应用中应对复杂地层的核心优势

该项目中,XD-40DB型钻机凭借其先进的技术性能与智能化操控体系,在3500 m超深孔钻探施工中发挥了核心作用。面对施工区复杂地层条件带来的施工挑战,通过全流程数字化控制与精准动力输出,有效克服了孔壁坍塌、卡钻掉块等难题。

### 4.1 厚覆盖层钻探施工难题处理

在断隆区及深部断裂带区域,地层主要为第四系、古近系与断层泥构成的厚覆盖层夹杂卵砾石、漂石,在强地应力地质条件下,钻孔极易发生缩径、泥包或垮塌<sup>[9]</sup>。

钻孔钻进至621.12 m时提钻遇阻,经扫孔恢复钻进,但因地层造浆严重,冲洗液性能失控,导致453.82 m处发生吸附卡钻事故。此时,XD-40DB型钻机的顶驱长行程给进优势发挥关键作用——其18 m长行程能力可强力拉紧钻具,配合精准的反向扭矩控制,成功反开钻具丝扣;后续处理中,钻机凭借精确的参数调控系统,精准操作反丝公锥与钻杆,快速打捞孔内落鱼,相比传统钻机大幅缩短处理时间,避免孔内事故恶化。

## 4.2 孔壁坍塌破碎与掉块应对

在三开、四开孔段钻进时,XD-40DB型钻机的顶驱长行程给进系统展现出显著优势。针对片麻状碎裂岩与花岗碎裂岩等破碎地层,18 m长行程给进可减少钻杆加卸频次,降低起下钻过程中、取心过程中的钻具卡埋风险;同时,配合高精度扭矩与钻压调控,有效避免钻具在复杂地层中因受力不均引发的卡钻事故。在2413.96~2414.96 m孔段,施工中因片麻岩裂隙发育、岩屑堆积,导致时有扭矩骤增、整车憋泵现象。机组成员依托XD-40DB型钻机高精度参数控制系统,实时监测并动态调整转速、扭矩与钻压,避免钻具过载;同时,通过数字化操作界面快速响应,精准控制提拉、回转动作,高效完成解卡。相比传统钻机依赖人工经验调整,该钻机可将钻进参数误差控制在极小范围,显著降低复杂地层卡钻风险。

此外,钻机搭载的智能液压控制系统与PLC集成平台,可实时采集并分析钻进参数,当孔内出现异常扭矩或压力波动时,系统自动触发预警,调整钻进策略,如在孔深1900、2400 m附近,通过动态优化回转转速与冲洗液泵量,成功规避因岩屑堆积导致的憋泵风险,保障钻探作业连续稳定推进。

## 4.3 塌孔预防与处理技术

针对复杂地层,XD-40DB型钻机通过技术集成优势强化塌孔防治。

**泥浆泵转速协同控制:**结合北京探矿工程研究所成膜冲洗液护壁技术<sup>[10]</sup>,钻机的变频调速系统可精准调节泥浆泵排量与压力,确保冲洗液有效护壁;遇水敏地层时,快速调整泵压维持孔壁压力平衡,抑制坍塌。

**钻具适配优化:**JS150/122型异径绳索取心钻具配合钻机精确的给进控制<sup>[11-12]</sup>,在泥包事故中利用大环状间隙降低沉渣卡钻风险,同时在钻进过程中,钻机的恒扭矩输出特性保障钻进作业稳定,降低钻杆折断风险。

**套管护壁高效作业:**在套管下放过程中,钻机的电驱动模块实现套管下放速度与力度的精准匹配,避免孔壁因冲击导致失稳<sup>[13]</sup>。

**取心绞车提升内管协同控制:**钻机的变频调速系统可精准调节取心绞车提升速度,减少取心过程中的抽吸效应,避免内管提升过程中孔壁压力失衡。

## 4.4 施工流程优化中的效能提升

小秦岭3500 m深钻工程中,XD-40DB型钻机凭借智能化与动力性能优势重塑施工流程。

**钻具组合创新:**利用顶驱18 m长行程能力,搭配加长绳索钻具,回次取心长度从3 m提升至4.5 m。钻机的高精度回转控制确保加长钻具稳定钻进,减少钻具晃动和磨损。

**智能钻进管理:**通过自动化控制系统实时监控钻进参数,配合孕镶金刚石钻头,平均机械钻速达1.62 m/h,部分钻头寿命提升至110 m。钻机的数据保存功能有助于后期分析数据,优化钻进方案。

XD-40DB型钻机以精准控制、高效动力、智能管理三大核心优势,系统性突破复杂地层钻探瓶颈,成为深部岩心钻机的标杆。

## 5 施工成果与效益分析

### 5.1 施工成果

河南省灵宝市小秦岭金矿田南中矿带深部探测项目的顺利完钻创造了3491.90 m的河南省金属矿产勘查最深孔深纪录,平均岩心采取率高达97.18%,获取了完整的深部地层岩心资料,为研究小秦岭金矿田深部地质结构、成矿规律以及小河断裂对金矿田的控制作用提供了重要的地质资料。该钻孔自2020年10月开钻至2023年1月终孔,工期823天,纯钻进时间172天。

### 5.2 经济效益与社会效益

该项目的成功实施,刷新了河南省固体矿产勘查孔深纪录,创造了显著的科研价值。通过应用XD-40DB型顶驱式岩心钻机,形成了一套新的深部复杂地层的钻探技术体系,为后续深部资源勘探项目提供了借鉴,能有效降低勘探成本,提高勘探效率,显著增加经济效益。同时,项目成果为国家深部资源勘查开采与技术装备研发提供了支撑,对于推动我国特深孔钻探技术的发展也具有重要的现实意义。

## 6 结论

XD-40DB型顶驱式岩心钻机在小秦岭金矿田南中矿带深部探测3500 m特深孔施工中的成功应用,充分展示了该钻机在深部复杂地层钻探中的优势。

该钻机的自动化与精准控制、高效作业和安全

可靠性能,能有效克服施工中的难题,保障钻探施工顺利进行。项目研发的钻进工艺与装备应用技术,如:长行程给进可减少钻杆加卸频次,降低起下钻过程中、取心过程中的钻具卡埋风险;泥浆泵转速协同控制,可精准调节泥浆泵排量与压力,确保冲洗液有效护壁,形成一套涵盖钻孔结构优化、智能护壁等多环节的特深孔岩心钻探工艺体系。

通过该项目的实践,积累了深部特深孔钻探施工经验,完善了深部钻探工艺技术体系。随着渭河科钻、红河科钻等深部资源勘探、科钻项目全面开展,XD-40、XD-50系列顶驱式岩心钻机及配套技术将在深部地质勘探领域发挥更重要的作用,为我国深部资源勘探开发提供强有力的技术装备保障。

这些成果不仅为深部资源勘查开采提供了可复制的技术方案,助力完善国家深部资源勘探技术标准体系,更对我国高端钻探装备研发形成反哺,为突破特深孔钻探技术瓶颈、提升深部资源勘探核心竞争力注入强劲动力。

#### 参考文献(References):

- [1] 张元厚,李宗彦,张孝民,等.小秦岭金(钼)矿田北矿带推覆构造演化与成矿作用[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(2):244-254.  
ZHANG Yuanhou, LI Zongyan, ZHANG Xiaomin, et al. Overthrust development and its relationship to gold mineralization in the northern belt of the Xiaoqinling gold (Molybdenum) province, central China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(2): 244-254.
- [2] 王鹏飞,郭曜欣,翟育峰,等.小秦岭金矿田3500 m特深孔冲洗液技术[J].钻探工程,2024,51(5):115-121.  
WANG Pengfei, GUO Yaixin, ZHAI Yufeng, et al. The drilling fluid technology of 3500m extra-deep hole in Xiaoqinling Gold Field[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 115-121.
- [3] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构与施工分析[J].钻探工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.  
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 21-26.
- [4] 刘完全,李效生.深孔地质岩心钻机发展方向——顶部驱动[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):29-31,39.  
LIU Xianquan, LI Xiaosheng. Development trend of deep borehole core drilling rigs: top drive technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(S1): 29-31, 39.
- [5] 翟育峰.西藏甲玛3000 m科学深钻施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.  
ZHAI Yufeng. Technical proposal for the 3000m deep scientific drilling borehole in Jiama, Tibet [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6): 8-12, 53.
- [6] 刘晓阳,李大昌,叶雪峰.中国铀矿第一科学深钻施工概况[C]//第十七届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.南昌:中国地质学会探矿工程专业委员会,2013:310-312,317.  
LIU Xiaoyang, LI Dachang, YE Xuefeng. Construction overview of China's first scientific deep drilling for uranium ore[C]// Proceedings of the 17th National Conference on Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Excavation Engineering). Nanchang: Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, 2013: 310-312, 317.
- [7] 左汝强.推进钻探技术与装备现代化加快矿产资源勘查开发[J].地质装备,2008(1):11-14.  
ZUO Ruqiang. Promoting the modernization of drilling technology and equipment to accelerate the exploration and development of mineral resources[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2008, 9(1): 11-14.
- [8] 臧臣坤,黄洪波,周政,等.5000 m自动化地质岩心钻机的研制[J].地质装备,2021,22(5):3-8.  
ZANG Chenkun, HUANG Hongbo, ZHOU Zheng, et al. Development of 5000m automated geological core drilling machine [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021, 22(5): 3-8.
- [9] 孙卫志.河南省灵宝市小秦岭金矿田中深部金矿远景资源调查评价报告[Z].洛阳,河南省地质矿产勘查开发局第一地质调查队,2011-11-16.  
SUN Weizhi. Survey and evaluation report on potential resources of deep gold deposits in xiaoqinling gold mine field, Lingbao City, Henan Province [Z]. Luoyang, First Geological Survey Team of Henan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 2011-11-16.
- [10] 刘俊辉,李晓东.广西苗儿山大厚度水敏性地层冲洗液技术研究及应用[J].钻探工程,2024,51(5):154-162.  
LIU Junhui, LI Xiaodong. Research and application of drilling fluid technology for thick water-sensitive formations in the Miaoershan area of Guangxi [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 154-162.
- [11] 田志超,翟育峰,林彬,等.西藏甲玛3000米科学深钻施工技术[J].钻探工程,2022,49(3):100-108.  
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Drilling technology for 3000m deep scientific drilling in Jiama, Tibet [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 100-108.
- [12] 杨芳,曹凡,刘振新,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻高效钻进措施分析[J].钻探工程,2025,52(1):47-53.  
YANG Fang, CAO Fan, LIU Zhenxin, et al. Analysis of efficient drilling measures for 3000m scientific deep drilling in Jiajika Lithium Mine, western Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 47-53.
- [13] 刘振新,翟育峰,赵辉,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻施工技术[J].钻探工程,2023,50(4):41-48.  
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, et al. 3000m scientific deep drilling construction technology for Jiajika Lithium mine in western Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 41-48.

(编辑 王跃伟)