

便携式钻机深孔钻探施工技术研究与应用

马映辉, 贾宏福*, 包清林

(四川省第三地质大队金钻公司, 四川 成都 611743)

摘要:为解决高海拔复杂地形深孔钻探中传统大型钻机运输困难、场地要求高、施工成本高及硬岩钻进效率低等问题,采用EP1500G型便携式模块化钻机在新疆高海拔林区开展1380.18 m深孔施工。通过系统性技术研究与创新,形成了一套完整的便携式钻机深孔施工技术体系。在场地建设方面,创新布置方案,搭配“块石混凝土基台+双锚杆锚定”的钻机安装工艺,有效解决了地形限制与设备稳定难题;设备配置上,优化钻杆、钻头及配套器具选型,改进夹持器支撑结构提升承载能力;钻探工艺上,设计四开钻孔结构,改进工艺技术以提升硬岩钻进效率,明确“动力头点头效应”对钻杆寿命的影响,提出“JFC冲洗液分析法”实时优化冲洗液性能,介绍孔内事故预防措施及“弹”式解卡等创新处理方法;同时构建多维度绿色钻探保障体系,实现施工区不修路、满足低扰动环保要求。实践表明,钻孔各项指标满足要求,创下近年来便携式钻机施工最深纪录之一。该技术体系为同类高海拔、复杂地形绿色勘查深孔钻探工程提供了可靠的技术参考。

关键词:便携式钻机;深孔钻探;双锚杆锚定;钻杆;动力头点头效应;JFC分析法;绿色勘查

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0228-08

Research and application of deep-hole drilling construction technology with portable drilling rig

MA Yinghui, JIA Hongfu*, BAO Qinglin

(Jinzuan Company, the 3rd Geological Brigade of Sichuan, Chengdu Sichuan 611743, China)

Abstract: To address the challenges of difficult transportation, stringent site requirements, high construction costs, and low hard-rock drilling efficiency when using conventional large drilling rigs for deep-hole drilling in high-altitude and complex terrains. Through systematic technical research and innovation, a comprehensive technical system for deep-hole drilling with portable rigs has been established. In site construction, an innovative site layout approach was adopted, incorporating a "rubble concrete base platform + double anchor rod anchoring" installation method, which effectively resolves the constraints of rugged terrain and the requirement for equipment stability. In equipment configuration, the selection of drill pipes, bits, and other auxiliary components was optimized, and the gripper support structure was improved to enhance load capacity. In drilling techniques, a four-stage borehole structure was designed, and process improvements were implemented to increase hard-rock drilling efficiency. The "power head nodding effect" was identified as a factor influencing drill pipe service life, and the "JFC drilling fluid analysis method" was proposed for real-time drilling fluid performance optimization. Preventive measures for downhole accidents and an innovative "spring-type" stuck pipe release technique were introduced. Additionally, a multi-dimensional green exploration system was established to meet the environmental requirements of no road construction and minimal disturbance within the drilling area. Field application results demonstrate that all borehole indicators meet the specifications, achieving one of the deepest boreholes drilling with portable rigs in recent years. This technical system provides a reliable reference for

收稿日期:2026-06-01; 修回日期:2026-07-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.027

第一作者:马映辉,男,汉族,1971年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事钻探工程组织管理工作,四川省成都市郫都区现代工业港北片区港通北三路260号,727325209@qq.com。

通信作者:贾宏福,男,汉族,1986年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事钻探工程技术质量管理工作,四川省成都市郫都区现代工业港北片区港通北三路260号,jia510@sina.cn。

引用格式:马映辉,贾宏福,包清林.便携式钻机深孔钻探施工技术研究与应用[J].钻探工程,2026,53(S1):228-235.

MA Yinghui, JIA Hongfu, BAO Qinglin. Research and application of deep-hole drilling construction technology with portable drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 228-235.

deep-hole drilling projects in similar high-altitude and complex terrains.

Key words: portable drilling rig; deep-hole drilling; double anchor rod anchoring; drill pipe; power head nodding effect; JFC analysis method; green exploration

0 引言

随着矿产资源勘探和重大工程勘察向深部、复杂地区延伸,高海拔、地形复杂区域的深孔钻探需求日益增加^[1-3]。传统大型钻机存在运输困难、场地要求高、施工成本高等问题,难以适应此类工况。便携式模块化钻机凭借其质量轻、拆解方便、运输灵活等优势,在山地、高原等复杂地形勘探中得到广泛应用,但受设备性能限制,其钻进深度通常局限于1000 m以内^[4-5]。

采用最新EP1500G型便携式模块化钻机,在高海拔林区开展了钻孔施工,已完成700 m以深钻孔4个,总进尺4007 m。其中新疆X钻孔终孔深度1380.18 m,是近年来便携式钻机施工最深纪录之一。施工过程中,针对高海拔复杂地形运输难题、坚硬岩石钻进效率低、深孔压水试验困难等问题,开展了系统性技术创新,形成了一套完整的便携式钻机深孔施工技术体系。本文结合X钻孔实例和其他千米以深钻孔施工经验,详细阐述施工技术方案、设备配置优化及工程应用效果,为同类工程提供技术参考。

1 工程概况

1.1 工区条件

X钻孔地处牧区,海拔约3000 m,属高山草甸与森林交错地带,区内块石密布,高大乔木呈条带状散状分布;区域多雨雪天气,施工窗口期为5—10月,秋冬降雪后,工区进出场通行难度极大。工区毗邻当地旅游景点,环保管控要求严苛;区域外部交通条件尚可,但内部山势陡峭、通行受阻,设备物资运输需通过架设索道完成。

1.2 地质概况

工区内地质构造相对简单,钻孔钻遇的主要岩石为二长花岗岩和辉绿岩。花岗岩质地坚硬,部分孔段存在岩石破碎现象;辉绿岩多分布在中深部,岩心完整性差异较大,局部发育节理裂隙。钻孔深度范围内主要发育28~31、342~350、725~734 m等断层破碎带,易发生掉块、垮塌和漏水现象,给钻探施工和压水试验带来较大挑战。

1.3 施工任务与质量要求

主要施工任务包括:孔深1380 m,倾角90°,全孔取心;完成25段压水试验,执行《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31—2003);配合开展综合测井、孔内摄像和地应力测试等工作。钻孔质量要求:岩心采取率 $\geq 95\%$,孔深误差 $\leq 1\%$,终孔孔径 $\geq \varnothing 75$ mm,孔斜满足垂直孔要求,每100 m测斜一次,偏差过大时及时纠斜。

2 设备配置与安装

2.1 钻机

便携式全液压钻机是当前重要的轻量化钻探装备,其采用模块化、轻量化与全液压集成驱动设计,主体采用高强度航空铝合金,单件质量一般 ≤ 200 kg,占地面积通常 ≤ 5 m $\times$ 5 m,可实现0°~90°全倾角稳定钻进,支撑“以钻代槽”“一基多孔”“一孔多支”等高效工法实施。设备适配薄壁绳索取心钻具,依托多泵合流恒流量液压系统实现钻压、转速、泵量无级精准调控^[5],配合环保型低固相冲洗液体系,可构建“薄壁钻具+绳索取心+低固相护壁”一体化高效钻进技术体系,大幅提升复杂地层适应性与岩心采取质量。

钻机选型应遵循钻孔设计孔深、终孔口径、地层条件和工作环境相适配原则,最大限度发挥轻量化钻机高效、绿色、高适配的综合优势。针对X钻孔设计孔深1380 m,本次选用的是EP1500G型便携式模块化钻机,该钻机整机总质量2 t,最大模块质量260 kg,NTW口径钻深可达1500 m,具有钻深能力强、动力充沛、操作安全等特点。该钻机在应用中表现出强劲的动力,提升力可达216 kN,完全能满足1380 m孔深时NTW钻杆的总重力(8.9 kg/m $\times$ 1380 m $\times$ 9.8 kg/s² $\approx$ 120 kN)。同时通过更换不同型号的动力头马达可获得600~1400 N $\cdot$ m的不同扭矩,能满足不同口径和孔深扭矩需求。

2.2 配套器具

根据钻孔结构和地质条件,配备了多种规格的钻杆: $\varnothing 146$ mm钻杆30 m,PQ钻杆300 m,HTW钻杆900 m,NTW钻杆1500 m,NTWSQQ加厚钻杆

435 m,同时配备压水试验专用钻杆 1500 m。辅助设备和仪器包括:发电机 3 台、大疆 FC30 型和 FC100 型无人机各 1 架、CX-6B 型测斜仪 1 台、高压水泵 4 台、压水试验专用器具 1 套等。

2.3 钻机安装

为保障深孔钻孔施工过程中的整体稳定性,消除施工过程中孔口塌陷、孔斜超标及动力头主轴断裂等工程隐患,将钻机安装工艺优化为“块石混凝土基台+双锚杆锚定”,具体操作流程为:“平整地基→安装工字钢→浇筑块石混凝土基台→锚杆锚定→固定钻机”。详述如下:

(1)浇筑块石混凝土基台。底座采用加厚工字钢加工制作,按事先确定的安装间距用螺栓连接工字钢,然后在工字钢间隙内填充块石,浇筑混凝土,整体厚度约 40 cm。浇筑过程中,严格控制浇筑平整度,待混凝土达到一定强度后再安装钻机进行地锚施工。

(2)“双锚杆锚定”工艺。为进一步提升钻机安装、连接的可靠性,以“双锚杆锚定”工艺作为钻机安装固定的强化措施。即先在钻孔一侧钻孔,钻孔孔径与锚杆(常用废旧 BTW 钻杆)规格匹配,钻孔深度一般 ≤ 3 m,尽量穿透软弱土层至持力层,确保后期锚固的可靠性;然后在钻孔位置另一侧再钻一个孔,设置锚杆作为第二个锚定点,形成“双锚杆”,见图 1。通过两根锚杆协同受力,进一步提升锚定刚度和稳定性,为后续钻机固定提供坚实的基准。锚杆的固定方式:采用水泥砂浆灌浆至饱满,待浆液凝固后,锚杆固定在地层内。

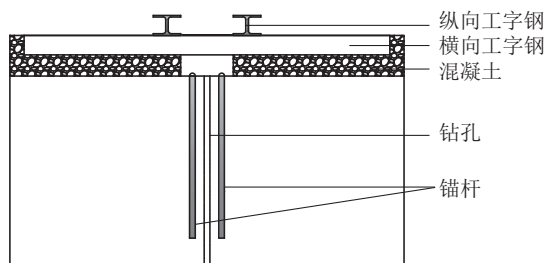


图 1 双锚杆示意

(3)固定钻机。锚杆设置完成后,调整钻机至设计方位和倾角,紧固螺栓,最后通过铁链将钻机和锚杆连接、张紧。至此,安装完成。

3 深孔钻探关键技术

3.1 钻孔结构与钻进方法

钻孔结构设计应保证钻孔稳定性、满足岩心采取和后续试验的要求。根据地质条件,通过套管分级护孔,可有效解决浅部松散层和中深部破碎带的垮塌问题。X 钻孔实际采用四开结构:

(1)0~7.8 m:采用 PQ 单管钻具开孔,钻进至 3 m 见基岩后,再用 $\varnothing 146$ mm 钻头扩孔至 7.8 m,下 $\varnothing 146$ mm 套管至 7.8 m;

(2)7.8~280 m:采用 PQ($\varnothing 122$ mm)绳索取心钻具钻进,以 PQ 钻杆作为套管;

(3)280~860 m:换用 HTW($\varnothing 95$ mm)薄壁绳索取心钻具钻进,以 HTW 钻杆作为套管;

(4)860~1380.18 m:采用 NTW($\varnothing 75$ mm)薄壁绳索取心钻具钻进至终孔。

钻孔结构见图 2。

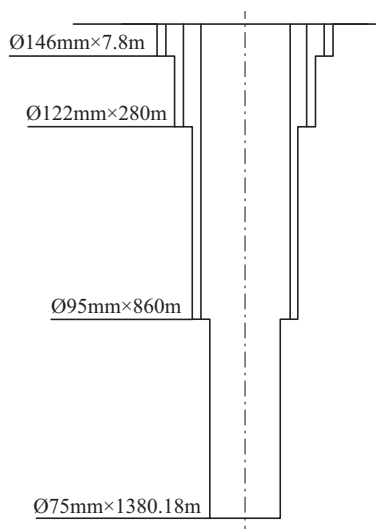


图 2 钻孔结构

3.2 钻进取心工艺

3.2.1 钻头使用

薄壁取心钻头较普通取心钻头进尺快。X 钻孔钻遇大部分岩石为二长花岗岩。二长花岗岩的可钻性主要由石英、钾长石、斜长石的含量与组合特征决定。三者莫氏硬度分别为 7、6、6,均属高硬度造岩矿物,总含量占岩石体积 85% 以上。其中石英为最硬组分,占比通常是 25%^[6]。石英研磨性强,是控制钻头打滑与钻进效率的关键矿物;钾长石与斜长石含量接近相等,岩石致密均一,进一步

提升了岩石抗压强度与破碎难度,导致“打滑”现象发生。

针对工区硬岩特点,考虑胎体硬度和结构^[7],选用了桂林箭山、唐山金石、鄂钻、中钻等多个品牌的钻头,钻头胎体硬度大多是20 HRC甚至更低,累计使用PQ钻头4个、HTW钻头12个、NTW钻头4个。钻进硬岩期间,低胎体硬度钻头金刚石仍难出刃,出现“打滑”现象,需持续采用投石英粒磨钻头的方法。磨料直径10~15 mm,数量30颗左右。该方法可在不提钻条件下实现钻头快速出刃,恢复切削能力,结合液动冲击回转钻进可显著提升硬岩钻进效能^[8]。高强度石英粒与钻头底唇面形成点接触,局部单位压力剧增,剥离钝化金刚石,形成微凹坑,促使新金刚石出露。同时,石英颗粒破碎后形成粗颗粒磨料,加速胎体均匀磨耗,重建胎体磨耗超前于金刚石磨损的自锐条件。经现场粗略统计,打磨后,单位进尺所需时间缩短约10%~30%不等,钻头寿命有所降低,不同品牌的钻头有所差异。

实践还表明,采用电力绝缘瓷瓶破碎颗粒作为磨料,同样可取得良好的磨钻头效果。据了解,电力用高压绝缘瓷瓶主要为高铝电瓷材料 Al_2O_3 ,其含量40%~60%,莫氏硬度6.5~7.5,结构致密、脆性良好^[9]。分析认为:瓷瓶碎块与石英相当且更均匀稳定,无天然节理与风化缺陷,破碎后棱角锐利,可形成稳定点接触,显著提升局部磨削压强,能快速剥离钝化金刚石并磨削胎体。其脆性好、破碎后持续保持锋利断面,磨削效率与稳定性优于天然石英;同时不产生抛光效应,避免加剧钻头打滑,可更高效重建金刚石出刃条件,在坚硬致密打滑地层中磨钻头效果更优。

3.2.2 扩孔器使用

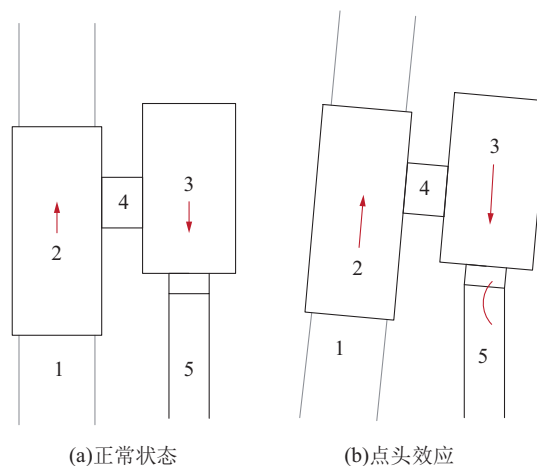
扩孔器作为钻孔和钻具关键保径构件,其外径通常较钻头外径大约0.5 mm,其环形工作台阶,对维持孔径、稳定钻具及保障正常钻进至关重要。现场实践表明,当扩孔器胎体硬度与地层及钻头不匹配时,易导致钻进异常。当其原有环形台阶被逐渐磨蚀为锥形结构后,扩孔器有效保径与扩径能力显著下降,底部钻孔易形成上大下小的不规则形态。此时钻具在孔内上下窜动中,锥形端面易与孔壁发生嵌合卡阻,出现钻具下行卡滞现象;同时因有效扩径不足、孔壁摩擦阻力剧增,钻进载荷传递受阻,

最终表现为机械钻速显著降低、进尺缓慢甚至完全不进尺,对钻进效率与施工安全构成明显不利影响。更换后,恢复正常进尺。该现象说明及时检查更换扩孔器的重要性。

3.2.3 钻杆使用

(1) 钻杆母扣断裂。深孔段(孔深>1100 m)钻杆断裂频发,共断裂NTW钻杆11根、NTWSQQ加厚钻杆13根,断裂位置通常是动力头下第一根钻杆母扣处。此外,马达输出轴与钻杆间的变径接头断裂20余个。针对深孔钻进过程中钻杆断裂问题,分析钻杆母扣处断裂的原因:①动力头点头效应。动力头套装于钻机导向桅杆,存在一定的间距。随着钻孔不断加深,孔内钻具重量越来越大,钻机桅杆、动力头和钻杆柱整体的重心向动力头偏移,承受的重量越大则重心偏移幅度越大。钻进期间,动力头在油缸背压向上支撑和钻杆柱重力向下拖拽下,动力头持续“低头”转动,这种现象即“动力头点头效应”。在点头效应的作用下动力头输出轴与钻杆连接不同心,对钻杆母扣产生弯折,母扣处因此容易断裂。该效应见图3,左图表示浅孔段无点头效应或点头效应不明显时的状态。右图表示深孔段时的动力头点头效应。图中红色箭头是受力大小或方向示意,红色弧线是点头效应导致的弯折位置和趋势示意。②点头效应作用下,钻杆母扣承载能力达到极限。便携式钻机使用的钻杆普遍较薄,丝扣处更薄,更容易断裂。

(2) 钻杆变形及分析。孔深>1100 m后,回次钻进结束,停转上提时发现上提50~60 cm后才有



1—桅杆;2—滑套;3—动力头;4—连接件;5—钻杆

图3 点头效应示意

拔断岩心的迹象。根据有关研究,约束细长钻杆在轴向压力与扭转载荷共同作用下,将依次经历直线弹性压缩、正弦屈曲、螺旋屈曲三种变形状态^[10-11]。屈曲变形使钻杆与孔壁形成多点接触,并产生接触压力与附加接触摩擦,摩擦值随变形程度与接触压力而增长,进而造成轴向力传递效率下降、钻进参数失真,表现为扭矩与功率异常偏高,掩盖地层岩性的真实响应。分析认为,钻头提离孔底前后,钻杆状态经历了以下四个阶段的变化:①钻进受力阶段。钻杆处于上部受拉、下部受压的混合受力状态^[12],中下部钻杆发生正弦屈曲,整体弹性缩短,钻头保持恒定钻压接触孔底。②停钻卸载阶段。停止转动后,动摩擦转为静摩擦,钻杆仍保持屈曲与压缩形态,钻头依旧压紧孔底,动力头上提的初始行程仅用于释放钻杆压缩变形,位移无法传至孔底。③屈曲恢复与拉直阶段。继续上提,拉力逐级向下传递,钻杆从受压屈曲状态被逐段拉直、伸长,静摩擦被逐步克服,钻杆柱由“压+拉”转为全程受拉。④钻头脱离孔底阶段。当整条钻杆完全拉直、残余钻压全部消除,拉力完整传递至孔底,钻头真正离开孔底,后续上提行程可正常带动钻具整体上升。

3.2.4 钻进参数动态调整

实践中,根据孔深、岩性和钻具类型,动态调整钻进技术参数^[13-14],以适应不同岩性的钻进需求。当前,全液压岩心钻机的钻进参数监测相当于“等效”观察。仪表盘显示的钻压、扭矩实为液压系统受钻柱摩擦阻、冲洗液浮力、液压传动效率及地层变化等多因素影响下的压力值,并非孔底真实受力。正常钻进时,以扭矩表为例,表显压力(以压力等效表示扭矩)范围通常是1000~2000 psi(1 psi≈6.895 kPa),压力随孔深和阻力增大而增大。操作人员仅能依据压力指针是否处于经验“推荐区间”判断工况,缺乏对孔底力学状态的量化认知,导致钻进参数调整依赖主观经验,制约了精细化控制和钻探效率的进一步提升,应开展深入研究。

3.3 冲洗液选型与应用

3.3.1 冲洗液材料

综合考虑钻探施工和环保要求,选用膨润土、植物胶、聚丙烯酰胺作为冲洗液添加剂,配制环保型冲洗液。该冲洗液具有以下优势:(1)润滑性能好,能有效降低钻具磨损,减少钻杆断裂事故发生

率;(2)携渣能力强,可及时将孔内岩粉排出,避免孔内堵塞;(3)环保性能优良,添加剂均为低污染材料,符合山区草原环保管控要求;(4)稳定性高,在不同孔深和温度条件下性能变化小,满足深孔钻进需求^[15]。在相对完整的花岗岩地层,可采用清水、聚丙烯酰胺组成的无固相冲洗液钻进,提高钻进效率并降低施工成本。另外,现场提前准备了质量浓度10%的聚乙烯醇PVA1799黏稠液体,钻进期间将其从孔口自环状间隙缓慢倒入后取得良好的润滑效果。聚乙烯醇高黏弹性凝胶的润滑机制主要归因于其分子链上大量羟基在金属表面形成强氢键吸附,构筑致密的高分子刷边界润滑膜,有效隔离摩擦副直接接触;同时,高浓度PVA凝胶体凭借其优异的黏弹性,在剪切作用下于接触界面间形成稳定的流体动压润滑膜。该协同机制使PVA凝胶具有良好的润滑特性^[16-17]。因此,高浓度PVA溶液在现场作为润滑剂,是利用其不同于常规护壁用途的黏弹性流体润滑功能,有利于应对高扭矩工况。

3.3.2 冲洗液性能测试

基于野外现场条件,在冲洗液性能测试方面,总结出以下有益经验:(1)配备使用漏斗黏度计、量筒,测量或观察漏斗黏度、胶体率可快速优选膨润土等材料,该方法简单有效,但现场作业人员的测量或观察意识有待提高;(2)无孔内漏失和涌水现象时,冲洗液密度测试具有重要指示作用。实践发现(实测数据见表1),冲洗液循环系统中,进入孔内的新配制的冲洗液(J)、孔口返出的冲洗液(F)和经沉淀的冲洗液(C)三者密度有如下关系: $C < J < F$ 。

表1 X钻孔冲洗液实测数据

测量次序	密度/(g·cm ⁻³)			漏斗黏度/s		
	J	F	C	J	F	C
1	1.030	1.049	1.026	24	20	21
2	1.040	1.045	1.030	23	21	20
3	1.040	1.049	1.038	22	19	20
4	1.042	1.045	1.036	22	21	21
5	1.050	1.054	1.041	22	20	21
6	1.050	1.055	1.038	22	20	21

$F > J$ 是因为冲洗液在孔内循环时携带了密度较高的岩粉(岩屑),使返出冲洗液的整体密度上升。虽然部分处理剂在孔内消耗会略微降低密度,

但岩粉的增重效应通常占主导(冲洗液 J 在孔内除了消耗处理剂,也可能因地层流体(水、油、气)的混入而进一步改变密度,但在正常钻进中,岩粉携带是密度变化的主因)。冲洗液携带出岩粉,说明钻头在有效破碎岩石,孔底清洁正常。若 F 相比 J 增幅过大,则岩粉过多,可能预示钻速过快或孔壁坍塌。 $C < J$ 是因为沉淀池中岩粉沉降去除后,冲洗液的密度下降。同时,由于冲洗液中的材料和处理剂在孔内有消耗、滤失或吸附损耗,未能完全补充,导致沉淀后冲洗液的密度低于初始时的密度——这是材料正在发挥作用的标志。如果 C 比 J 下降过快,则提示冲洗液性能衰减,需及时补充处理剂。若 $C \approx J$,且 $F \approx J$,可能意味着钻进效率极低、冲洗液未有效循环或材料未发挥作用,此时需要采取对应的措施,例如更换钻头、检查钻杆或减少材料用量。将该分析方法称为“进-返-沉冲洗液分析法”,简称“JFC分析法”。同理可用于漏斗黏度、滤失量等的分析。该分析方法的应用,有利于现场作业人员及时调整优化冲洗液性能或其他应对措施。

3.4 孔内事故预防与处理

3.4.1 孔内事故预防

基于X钻孔和其他千米级深孔施工经验,为避免严重孔内事故,以下预防措施发挥了重要作用:(1)修筑坚实的混凝土基台;(2)平稳可靠的安装和连接;(3)针对性的改进措施。例如,通过额外支撑提高了原有夹持器的承载能力;(4)套管跟进、冲洗液等护壁措施及时应用;(5)钻进期间细致的操作以及工具的合理使用。

3.4.2 孔内事故处理工具和方法

(1)处理工具。常用处理工具有内置式吊锤^[18]、可退式打捞矛、水力割刀^[19]、连续造斜器等。

(2)新方法——“弹”。当钻杆柱被卡住时,将一定条件下可脱离的接头连接在钻杆和动力头之间,然后利用动力头自身配套的油缸举升动力头,当动力头的举升力度达到一定值时,可脱离的接头分开,进而实现动力头和钻杆柱的分离。然后利用钻杆柱的“弹”实现钻杆解卡。X钻孔施工结束,起拔PQ钻杆(H口径套管)时发生卡钻,使用水力割刀经2次尝试后于277 m处割断,同时使用新方法“弹”,成功使套管解卡并打捞出。此事件表明深孔施工中应加强套管与孔壁的润滑与防卡措施。

4 保障措施

4.1 场地建设与后勤保障

X钻孔项目采用“双驻地+二级索道+二级泵站供水”的现场布置方案,保障施工有序推进。项目山下便道处设置1号驻地,供管理及后勤人员驻扎、开展前期筹备工作;山脊索道中转区域设置2号驻地,方便施工人员就近作业,缩短通勤时间。现场架设二级临时货运索道,分段完成山脚至中转点、中转点至钻孔点位的物资运输,破解地形运输难题。同时配套二级泵站供水系统,分级加压输水至钻机处,满足钻探及压水试验用水需求,各作业区域配备发电机,保障生产生活用电稳定。

4.2 钻孔质量保障措施

结合任务书并参考《固体矿产勘查钻孔质量要求》(DZ/T 0486—2024),钻孔八项指标^[20]中“钻孔弯曲”需要重点应对。考虑到硬岩纠斜困难,采用“预防为主”的孔斜控制策略,具体措施有:(1)修筑坚实的混凝土地基,钻机安装时严格找平,确保钻进过程中钻机稳定性;(2)改进夹持器安装结构;(3)上部孔段尽量采用大口径施工;(4)在钻孔变径时应上下反复扫孔进行修正;(5)适当的压力、转速和泵量等钻进参数;(6)采用陀螺测斜仪;(7)每50~100 m进行一次测斜,持续监测钻孔垂直度。终孔测斜数据(见表2)显示,钻孔斜度满足设计要求,偏差在允许范围内。

表2 钻孔测斜数据

孔深/m	顶角/(°)	方位角/(°)
0	0	0
100	0.2	217.6
200	0.0	218.4
300	0.3	218.8
400	0.1	218.8
500	0.1	219.2
600	1.0	219.3
700	0.1	219.5
800	0	220.2
900	1.0	220.4
1000	1.0	220.8
1100	0.4	221.1
1200	0	221.7
1300	0.3	222.3
1380	0.4	223.3

值得说明的是:便携式钻机配套夹持器普遍采用单侧连接的安装方式——即仅通过一侧与钻塔(或桅杆)底部通过4个螺栓固定连接,底部无额外支撑结构,形成悬空状态。在常规作业工况下,其悬空结构强度可满足基本作业需求。但在实际施工过程中,时常面临超过额定能力施工的工况,单侧悬空的结构难以承受该超额载荷,极易引发夹持器变形损坏,导致次生事故。对此,增加了支撑工字钢和调节用螺栓螺母。改进后,夹持器由原来“单侧连接”变成“单侧连接+左右两侧支撑”(见图4),其稳定性和承载能力大幅提高。

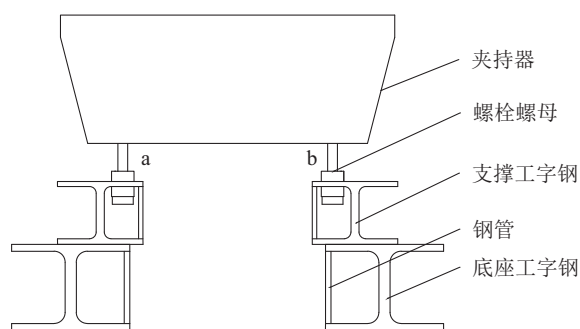


图4 夹持器支撑示意

5 绿色钻探

绿色勘查是新一轮找矿突破战略行动中统筹资源保障与生态环境保护的主要模式。在钻探领域,本单位始终坚持构建“高效率、小扰动、少污染、低碳排”的经济实用型绿色钻探模式,坚持“以人为本、创新驱动、目标导向、最短工时”这一原则,通过严控三大过程管控、落实多项具体保障措施^[21],全面实现钻探作业全过程绿色化。

绿色勘查措施主要有以下四方面:(1)工艺革新与工程优化。采用“一基多孔、一孔多用”的钻探设计方案,通过减少设备搬迁频次、道路修建规模及场地占用面积,最大限度降低对周边环境的扰动影响。(2)装备轻量化与低碳化升级。因地制宜综合应用“便携式钻机+索道/履带车/马帮/无人机”等多元运输作业模式,全面应用便携式、模块化全液压钻机及电动钻机,实现设备轻便搬运、快速拆装,同时有效降低作业噪声与碳排放水平。(3)泥浆循环与污染防控体系建设。部署“泥浆不落地”处理系统及专业净化设备,对冲洗液实施随钻净化处理,实现有害固相高效分离与泥浆性能动态维护;

配套使用环保型钻井液,对施工产生的废浆、废油、岩屑等废弃物进行无害化处理或回收再利用,严防土壤与地下水污染。(4)现场精细化管理与生态恢复。推行施工现场“定置化”管理标准,规范物料堆放秩序;铺设防渗土工布,设置接油装置与导流系统,杜绝跑冒滴漏现象;施工结束后,严格按规范完成封孔作业,对场地进行平整、覆土处理,并开展植被恢复工作,力求还原场地原有生态面貌。

X钻孔施工期间,主要采用了上述第(2)方面的方法。施工结束后正值冬季冰雪覆盖时期,与当地牧民协商后,清理外运废弃物,场地适当平整后用作牧民进场及搭建临时帐篷的场地。

6 结论

(1)实践形成的“块石混凝土基台+双锚杆锚定”钻机安装工艺、夹持器支撑结构改进及“JFC冲洗液分析法”等关键技术,有效提升了设备稳定性、硬岩钻进效率与冲洗液适配性,构成了便携式钻机深孔施工的核心技术支撑,显著提升了施工效率。

(2)EP1500G型便携式模块化钻机在1380.18 m深孔施工中的成功应用,验证了其在高海拔复杂地层中的深孔钻进能力,可以满足同类钻孔施工需求。顶驱动力头便携式钻机在桅杆与动力头设计上如何避免“动力头点头效应”及其导致深孔重载工况下钻杆母扣断裂的难题有待进一步优化改进。

(3)基于便携式钻机构建融合工艺革新、装备低碳、污染防控与生态恢复的经济实用型绿色钻探模式,通过环保与高效两方面举措,可最大限度降低施工对周边生态环境的扰动,在同类难进入地区钻探工程中具备非常高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 罗龙,白超,华宾,等.高海拔地区岩心钻探施工组织与管理的几点措施——以海拔5700 m的当惹雍措工作区实践为例[J].钻探工程,2025,52(S1):419-423.
- [3] 刘蓓,张晨,杨可,等.便携式全液压钻机在秦岭地区地质钻探中的应用[J].钻探工程,2021,48(11):94-103.
- [4] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J].钻探工程,2022,49(2):30-39.
- [5] 曾思敏,杨永顺,王艺凯,等.便携式全液压钻机在稀土矿勘查中的应用与分析[J].钻探工程,2025,52(2):80-86.

- [6] 王盘喜,王振宇.青海祁漫塔格鸭子沟地区二长花岗岩地球化学特征及地质意义[J].中国地质调查,2020,7(1):38-46.
- [7] 胡立,李俊萍,唐治建.水平定向钻进坚硬地层孕镶金刚石钻头的研究与应用[J].钻探工程,2024,51(6):85-90.
- [8] 全在平,芦建华.绳索取心钻进“打滑”地层的分析与对策[C]//第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集,2007:169-174.
- [9] 袁志勇,阎法强,许承铭,等.三种典型直流特高压用氧化铝陶瓷组成、结构与力学性能的对比研究[J].硅酸盐通报,2023,42(6):2206-2214.
- [10] Suryanarayana P V R, Mccann R C. An experimental study of buckling and post-buckling of laterally constrained rods [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1995, 117 (2) : 115-124.
- [11] Sun Xin, Cheng Jingyi, Zhang Xianxin, et al. Mechanism of drilling parameter distortion induced by drill rod buckling while MWD application[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(10):9459-9477.
- [12] 胡坤生,肖冬顺,周治刚,等.小口径深孔钻探管柱扭转振动特性分析[J].钻探工程,2023,50(3):30-36.
- [13] 汤凤林,Чихоткин В.Ф.,高申友,等.关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J].钻探工程,2015,42(10):76-80.
- [14] 汤凤林,Нескоромных В. В.,宁伏龙,等.金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J].钻探工程,2021,48(10):43-55.
- [15] 田禹,李之军,唐伟旭,等.STJ植物胶冲洗液滤饼强化研究[J].钻探工程,2025,52(6):26-33.
- [16] Němeček D, Nečas D, Shinmori H, et al. A glance into the boundary lubrication mechanism of PVA hydrogel after the reduction of interstitial fluid pressurization[J]. Friction, 2025, 13(12):9441106.
- [17] 袁浩航,赵晓铎,赵蔚祎,等.仿生层状聚乙烯醇水凝胶润滑材料的设计、制备和摩擦性能研究[J].摩擦学学报(中英文), 2024, 44(11):1592-1601.
- [18] 马映辉,范记林,泽旺多吉,等.岩心钻探用内置式吊锤的研制与应用[J].钻探工程,2023,50(S1):405-409.
- [19] 段晓,皮建伟,顾科伟,等.水力割刀在岩心钻探烧钻事故处理中的应用[J].钻探工程,2022,49(3):118-122.
- [20] 中华人民共和国自然资源部.固体矿产勘查钻孔质量要求:DZ/T 0486—2024[S].北京:地质出版社,2024.
- [21] 马映辉,贾宏福.绿色工程勘察钻探实施方案探索及应用[J].钻探工程,2020,47(11):29-36.

(编辑 王文)