

西藏高海拔工作区复杂地层岩心钻探施工 难点与对策

罗 龙, 何 军*, 廖麟祥, 杨 科
(中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036)

摘要: 西藏罗布莎工作区海拔高, 地质条件复杂, 岩层破碎且裂隙发育显著, 地层稳定性差, 存在地层破碎、漏失、缩径等钻探难题。本文聚焦该工作区设计孔深800 m的中深孔施工实践, 对以破碎绿泥石化橄榄岩为主、严重漏水且缩径频繁的极端复杂地层中的施工过程进行了总结。针对人员短缺、设备组装要求特殊、严重漏水致使孔壁失稳、冲洗液易污染失效、频繁缩径引发卡钻等核心难题, 系统归纳了钻机-钻塔创新组合技术、基于动态堵漏与抗污染配方的冲洗液体系优化、套管护壁结合周期性提钻扫孔防缩径、阶段性人员动态调整与快速培养模式等关键应对技术。经实践验证, 此次钻孔施工成功克服了各种困难, 顺利终孔。本案例对施工实践进行的系统总结和所积累的施工经验, 可为类似高海拔、复杂地层条件下的岩心钻孔施工提供技术参考和管理经验借鉴。

关键词: 复杂地层; 岩心钻探; 破碎地层; 漏失地层; 钻孔缩径; 冲洗液污染; 高海拔

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0117-08

Difficulties and countermeasures of core drilling in complex strata in high altitude working area of Xizang

LUO Long, HE Jun*, LIAO Linxiang, YANG Ke

(Military-civilian Integrated Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: Xizang Luobusha working area is located at a high altitude with complex geological conditions, featuring fractured rock layers and significant fissure development, resulting in poor formation stability and drilling challenges such as strata fragmentation, leakage, and shrinkage. This paper focuses on the construction practice of medium-deep holes designed to a depth of 800 m in this working area, summarizing the construction process in extremely complex formations dominated by fractured chlorite petrified olivine, which suffer from severe leakage and frequent shrinkage. To address core challenges such as personnel shortages, special equipment assembly requirements, hole wall instability caused by severe leakage, flushing fluid contamination and failure, and frequent shrinkage leading to stuck bits, the key technologies were systematically summarized, including innovative combination technologies of drilling rigs and drill towers, optimization of flushing fluid systems based on dynamic plugging and anti-contamination formulations, casing protection combined with periodic drilling and hole sweeping to prevent shrinkage, and phased dynamic personnel adjustment and rapid training models. Through practical verification, this drilling operation successfully overcame various difficulties and completed the hole smoothly. The case study provides technical reference and management experience for core drilling under similar conditions of high altitude and complex strata.

Key words: complex strata; core drilling; broken strata; leakage strata; borehole shrinkage; flushing fluid pollution; high altitude

收稿日期: 2025-08-09; 修回日期: 2025-11-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.018

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“西部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(军民融合中心)”(编号: DD20240207203)

第一作者: 罗龙, 男, 汉族, 1983年生, 工程勘察室副主任, 高级工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探施工管理及技术研究工作, 四川省成都市金牛区茶店子路399号, 61937162@qq.com。

通信作者: 何军, 男, 汉族, 1991年生, 助理工程师, 机长, 探矿工程专业, 主要从事一线钻探施工及技术指导工作, 四川省成都市金牛区茶店子路399号, 1228649459@qq.com。

引用格式: 罗龙, 何军, 廖麟祥, 等. 西藏高海拔工作区复杂地层岩心钻探施工难点与对策[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 117-124.

LUO Long, HE Jun, LIAO Linxiang, et al. Difficulties and countermeasures of core drilling in complex strata in high altitude working area of Xizang[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 117-124.

0 引言

高海拔深部资源勘探常遭遇强破碎、严重漏失、易缩径等复杂地层,极大制约钻进效率与成孔质量。其中,绿泥石化橄榄岩地层因结构松散、遇水易软化崩解及软硬互层显著,成为公认的钻探难题。面对这一严峻挑战,2009—2012年,山东省第三地质矿产勘查院在海拔4500 m的西藏罗布莎铬铁矿区,成功完成了孔深达1853.79 m的钻探施工。针对破碎、垮塌及缩径等复杂地层难题,创新性地采用了活动套管跟管钻进工艺,并将套管鞋替换为管靴钻头,显著提升了破碎地层的钻进效率。在工艺参数优化方面,上部大口径孔段采用大排量(120~150 L/min)、大钻压与低转速的组合,而下部小口径孔段则采用小排量(35~72 L/min)、小钻压配合高转速的策略。同时,通过提高冲洗液密度、增大环空间隙,有效促进了岩屑的上返,并抑制了缩径现象。在破碎裂隙层段,通过降低钻头胎体高度、增加外径1~2 mm,成功减小了扭矩,稳定了钻具。针对卡钻、埋钻等风险,采取了起拔套管、提高冲洗液黏度、短起下钻扫孔等一系列预防措施^[1]。然而,此次施工在设备方面仍使用传统的四角管子塔,且冲洗液工艺未充分利用高原易得的材料(如牛粪),还存在一定的优化空间。

2024年,军民融合中心钻探团队在藏北无人区开展钻探作业期间,面对冻土地层在钻进过程中易发生融冻坍塌的技术难题,采用了短行程干钻取心工艺。该工艺不使用冲洗液,有效减轻了对地层的热侵蚀与机械扰动,从而抑制了冻土融化和孔壁失稳。此外,在裂隙发育强烈、岩体较为破碎的层段,团队进一步采用套管封隔与跟管钻进相结合的方式,增强了对复杂地层的护壁效果与成孔可靠性^[2]。然而,在涌水地层中采用冲洗液或水泥灌注进行封堵依旧面临挑战。

在西藏甲玛3000 m科学深钻项目中,采用了HXY-8VB型变频手自一体钻机进行钻探施工。现场应用了 $\varnothing 150/122$ mm绳索取心“钻扩一体”钻进工艺,该工艺通过加大环状间隙,有效增强了粗颗粒岩屑的携带与排出能力,降低了冲洗液循环压降,显著提升了钻进效率与应用效果。同时,在施工过程中注重机台标准化建设,优化钻探机具选型,并采用环保型冲洗液体系,最大限度地减轻了对周边生态环境的扰动,体现了绿色勘查的先进理

念^[3]。然而,在该深孔施工过程中,护壁和防塌依然是钻进时面临的主要难题。

本文以罗布莎工作区一设计孔深800 m的钻孔施工为例(2024年8月20日开孔,11月26日终孔,历时99天,终孔深度800.08 m),该孔施工中遭遇了持续严重漏失、孔壁失稳垮塌缩径、岩粉泥化污染冲洗液等极端复杂工况。旨在系统梳理施工暴露的关键问题及所采取的创新解决方案,提炼适用于此类地层的钻探工艺与管理策略。

1 工程概况

1.1 交通地理概况

罗布莎工作区地处西藏自治区山南市曲松县罗布莎镇,海拔在4300~4500 m之间。工作区距离曲松县城25 km,距离山南地区行署所在地泽当镇65 km,交通较为便利。工作区内的主要河流西临德热曲,东接龙给曲,两条河流均由南向北汇入雅鲁藏布江。其水源补给主要依靠大气降水和冰雪融水。区内河流水质优良,水量较为充沛,能够满足矿山生产和生活的需求。区内简易公路纵横交错,连接着各个主要采区(场)。在雨季期间,道路会变得泥泞不堪;冬季,路面则常常会有积雪。

1.2 地层概况

罗布莎铬铁矿床赋存于罗布莎超基性岩体,此岩体隶属于藏南超基性岩带东部。钻孔所钻遇的地层包括:第四系残积坡积层、上三叠统地层、岩浆岩、第三系罗布莎群等。第四系残积坡积层由超基性岩角砾或砾石、砂质黏土等混杂堆积而成。上三叠统地层为一套浅海相类复理石建造,其主要岩性有砂质泥板岩、石英砂岩、千枚岩、砂板岩以及少量透镜状灰岩。岩浆岩形成于燕山晚期至喜山早期,有超基性、基性、中性到酸性岩体出露。第三系罗布莎群地层呈东宽西窄的狭长带状分布,其北界沉积且不整合于酸性岩体之上,南界与断层接触。上三叠统、上白垩统地层和罗布莎超基性岩体逆掩而上,受雅江断裂带控制。该地层以山麓堆积、河床相为主,在罗布莎一带出现湖泊、沼泽相,其主要岩性有砾岩、砾砂岩、含砾中粗砂岩、中粗砂岩、粉细砂岩等^[4]。地层特征如表1所示。

工作区岩石的研磨性较强,岩石可钻性级别为5~8级。在破碎漏失地层及部分缩径地层实钻岩心的情况如图1所示。

表1 地层特征		
Table 1 Stratigraphic characteristics		
层 位	岩性组合	工程特性
第四系	超基性岩角砾+砂质黏土	松散易塌
上三叠统	砂板岩、千枚岩	中硬—硬,局部破碎
超基性岩体	绿色橄榄岩为主	破碎,漏失严重
第三系罗布莎群	砾岩、含砾砂岩	胶结差,易缩径



(a)破碎漏失段岩心



(b)缩径段岩心

图1 破碎及缩径段实钻岩心

Fig.1 The actual drilling core from broken and shrunk strata

2 施工难点

在工作区施工该钻孔,是团队组建以来在青藏高原高海拔地区开展的首个中深孔施工任务。在人员调配、装备运用、技术实施以及施工组织等各个方面,均面临着全新的挑战。主要面临的问题如下^[5-9]:

- (1)地层复杂:工作区岩石以绿色橄榄岩为主,其质地松散破碎,软硬夹层交替频繁,容易造成堵心,且排粉困难。
- (2)漏失严重:全孔段持续存在漏水现象,前期漏水情况剧烈,后期呈微漏状态,护壁工作难度较大。
- (3)频繁失稳:孔壁垮塌、缩径现象频繁发生,尤其是在570 m处,垮塌缩径情况极为严重,致使该钻孔被迫提前下入 $\varnothing 96$ mm套管。

(4)岩粉泥化:磨细后的岩粉高度泥化并融入泥浆之中,导致泥浆迅速增稠、受到污染(泵压升高、流动性急剧下降),但地表沉淀池却无显著砂粒析出。

(5)管理挑战:人员短缺,骨干力量匮乏(仅有1名有经验的班长),多数人员缺乏高原深孔钻探施工经验。

3 施工设备

钻探施工设备的选择取决于施工钻孔的目的、工作区施工环境、钻探技术方法、钻孔设计孔深等因素^[10]。在此次钻孔工程施工中,综合考虑钻孔设计深度(800 m)、钻遇地层性质、设备物资保障等多方面因素,选用了HXY-6B II型立轴式岩心钻机。该钻机动力配置充足,钻进与提升能力强劲,施工过程中未出现动力不足的情况。并且从以往施工经验来看,该钻机处理孔内事故的能力较强。此外,配备了水刹车装置,能够调节钻具下降速度,确保施工平稳安全。同时,此次施工还配备了1台BW-250型泥浆泵、1台300 kW发电机和1台1000 m绞车以及附属设备,采用柴油发电机组供电。主要钻探施工设备如表2所示。

表2 主要钻探施工设备					
Table 2 The main drilling equipment					
序号	名 称	规格型号	功率/ kW	数量	备 注
1	岩心钻机	HXY-6B II	75	1台	电机驱动
2	钻塔	A15-35		1副	SPS-600
3	柴油发电 机	康明斯	300	1台	柴油机驱动
4	泥浆泵	BW-250	15	1台	电机驱动
5	绳索取心 绞车	JS-1000	7.5	1台	电机驱动
6	搅拌桶	1 m ³	4.5	1个	电机驱动
7	配电箱			2个	

4 钻探施工技术

4.1 钻孔结构

由于工作区钻遇地层的地质条件复杂,地层较为破碎,现场根据地层、管材以及设备能力的实际情况,动态调整钻孔结构,采用5级口径($\varnothing 172$ mm $\rightarrow\varnothing 151$ mm $\rightarrow\varnothing 122$ mm $\rightarrow\varnothing 98$ mm $\rightarrow\varnothing 77$ mm)成

孔。钻孔终孔结构如图2所示。

一开,采用 $\varnothing 172\text{ mm}$ 硬质合金钻头干钻至孔深 2 m ,接着使用 $\varnothing 172\text{ mm}$ 金刚石钻头钻进至 17.78 m ,下入 $\varnothing 168\text{ mm}$ 套管;二开,采用 $\varnothing 151\text{ mm}$ 金

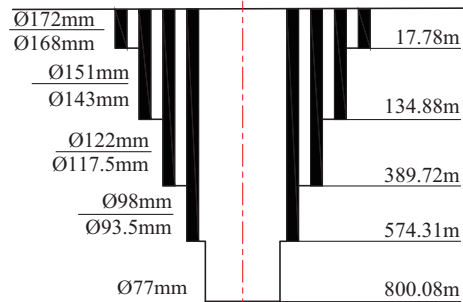


图2 钻孔结构示意图
Fig.2 Borehole structure

石钻头钻进至 134.88 m ,下入 $\varnothing 143\text{ mm}$ 套管;三开,采用 $\varnothing 122\text{ mm}$ 金刚石钻头钻进至 389.72 m ,下入 $\varnothing 117.5\text{ mm}$ 套管;四开,采用 $\varnothing 98\text{ mm}$ 金刚石钻头钻进至 574.31 m ,下入 $\varnothing 93.5\text{ mm}$ 套管;五开,采用 $\varnothing 77\text{ mm}$ 金刚石钻头钻进至 800.08 m ,完成终孔。为防止冲洗液漏失,在孔口孔壁与套管以及套管间的环状间隙处,使用橡胶皮进行封堵。

4.2 钻进方法

根据不同的目标孔径,采用相应的取心钻进工艺。针对 $\varnothing 172\text{ mm}$ 口径钻孔,由于其孔径较大,为了确保岩心采取率 and 操作可靠性,采用了提钻取心钻进方法。而对于 $\varnothing 151$ 、 122 、 98 及 77 mm 这些口径,则分别选用了与之匹配的绳索取心钻进方法。钻具组合如表3所示。

表3 钻具组合
Table 3 BHA parameters

孔段/m	钻 进 方 法	钻 具 组 合
0~17.8	$\varnothing 172\text{ mm}$ 复合片钻头和 $\varnothing 172\text{ mm}$ 金刚石钻头单管钻进	$\varnothing 172\text{ mm}$ 硬度合金钻头+ $\varnothing 168\text{ mm}$ 单管钻具(4.88 m)+变径接头+ $\varnothing 143\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 主动钻杆 $\varnothing 172\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\varnothing 168\text{ mm}$ 单管钻具(4.88 m)+变径接头+ $\varnothing 143\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 主动钻杆
17.8~134.55	$\varnothing 151\text{ mm}$ 金刚石绳索取心钻进	$\varnothing 151\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\varnothing 151.5\text{ mm}$ 扩孔器+ $\varnothing 143\text{ mm}$ 绳索取心钻具(4.32 m)+扶正器+ $\varnothing 143\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 主动钻杆
134.88~389.72	PQ金刚石绳索取心	$\varnothing 122\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\varnothing 122.5\text{ mm}$ 扩孔器+ $\varnothing 117.5\text{ mm}$ 绳索取心钻具(4.32 m)+扶正器+ $\varnothing 117.5\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 主动钻杆
389.72~574.31	HQ金刚石绳索取心	$\varnothing 98\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\varnothing 98.5\text{ mm}$ 扩孔器+ $\varnothing 93.5\text{ mm}$ 绳索取心钻具(4.26 m)+扶正器+ $\varnothing 93.5\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $\varnothing 89\text{ mm}$ 主动钻杆
574.31~800.08	NQ金刚石绳索取心	$\varnothing 77\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\varnothing 77.5\text{ mm}$ 扩孔器+ $\varnothing 74\text{ mm}$ 绳索取心钻具(4.31 m)+扩孔器+ $\varnothing 74\text{ mm}$ 钻杆+变径接头+ $53\text{ mm}\times 59\text{ mm}$ 主动钻杆

4.3 冲洗液配方

冲洗液是保障钻探工作优质、高效、安全、低耗完成的关键因素,其性能直接影响钻进速度、岩心采取率、孔内安全和材料消耗。为此,项目组邀请冲洗液材料供应商进行现场指导,最终确定了适用于不同地层的冲洗液配方,并根据钻遇地层情况动态调整。针对地层破碎、漏失的孔段,冲洗液配方如下^[11]:每 1 m^3 冲洗液中添加高黏膨润土 $20\sim 25\text{ kg}$ 、纯碱 2 kg 、高黏防塌剂 2 kg 、高黏纤维素 1 kg 、随钻堵漏剂 4 kg 以及由供应商配好的破碎地层配方冲洗液 4 kg 。该配方的主要作用是提高冲洗液的黏度,增强其携砂悬浮能力,同时具备护壁堵漏的

功能。

5 关键问题解决技术与实践

5.1 设备组合技术创新

钻机-钻塔创新组合技术。开展HXY-6BⅡ型钻机与A15-35型钻塔的集成组装实践。A15-35型钻塔和塔机组合分别如图3、图4所示。

面对没有成熟方案的困境,项目团队创新性地采用上压块连接法:通过定制加工连接件,并在A型钻塔底座打孔定位,利用高强度压块将钻机主体刚性固定在钻塔底座上,确保钻机稳固,施工时不移位,如图5所示。

固定钻机的同时,要确保钻机立轴与A型塔天



图3 A15-35钻塔

Fig.3 A15-35 drill tower



图4 塔机组合

Fig.4 Drill tower and rig combination

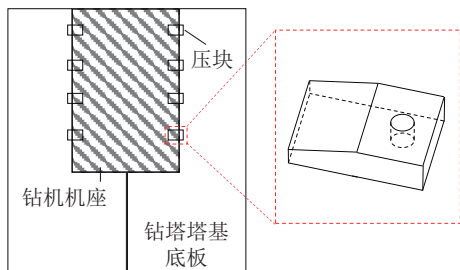


图5 上压块连接法示意

Fig.5 Connection of upper pressure block

车和孔口处于同一垂直线上。该方案成功经受了800 m深孔施工全程的严苛载荷考验,解决了核心设备稳定运行的基础问题,为同类设备组合提供了可靠的借鉴。

经过上压块连接法改造后的HXY-6B II型钻机与A15-35(SPS-600)钻塔组成了钻机-钻塔创新组合技术,在青藏高原严苛的施工环境中展现出显

著优势:

(1)安全性与人力成本得到较大优化。原17 m四角管子塔需依赖4~6名工人高空协同作业,人员需频繁攀爬塔架进行螺栓紧固与组件吊装。在海拔4000多米缺氧环境下,人员反应能力下降,高空坠落风险激增,单次搭设耗时长达8~10 h,且需全程配备安全监护团队。而A型钻塔采用地面预组装+机械整体竖立模式,仅需2~3名工人全程地面操作,彻底规避高空作业风险;吊车辅助下,通常30~60 min内完成钻塔竖立,效率提升超80%。将高危高空作业转化为低风险的地面操作,从根源消除人员伤亡隐患,提高了高原施工安全效益。

(2)时效性与施工窗口精准把控。四角塔搭建受制于天气突变(如强风、暴雪),常因单日施工窗口不足导致搭设中断,延误工期。A型塔模块化设计支持分体运输、快速拼装,适应狭窄崎岖高原运输条件,短时间内实现进场—立塔—开钻全流程,大大压缩了设备准备时间,施工窗口利用时间得到大幅提升,为高原短暂暖季(年均有效工期<120天)争取宝贵时间。

5.2 复杂漏失地层冲洗液体系动态调控

冲洗液失效是本工程最大挑战,核心矛盾是堵漏需求与岩粉泥化污染。初期严格按厂家配方配浆,效果短暂,循环后冲洗液迅速增稠、脏污(呈现高黏度、高密度、低流动性),泵压异常升高,但泥浆沟无显著沉砂(岩粉高度泥化溶解)。误判为过浓而稀释,导致携砂能力骤降,诱发孔壁失稳(垮塌)及沉砂卡钻风险^[12-13]。

优化调整方法:

(1)就地取材。因地层漏失,就地取材,选用干牛粪作为配方材料之一进行堵漏,不但堵漏效果显著,而且经济环保。其主要配方为:水12.5 kg,干牛粪2.5 kg,高分子聚合物1 kg,随钻堵漏剂0.5 kg。如图6所示为加入牛粪的冲洗液。

(2)引入动态堵漏。每班次针对性添加堵漏材料(如随钻堵漏剂、纤维状或片状材料)进行灌井式处理,有效缓解了前期严重的漏失问题,确保孔内能够维持一定的静水压力。

(3)抗污染配方调整。在厂家技术人员的指导下,优化配比,并有针对性地提升冲洗液的抗污染能力(例如,适当增加降失水剂和分散剂的比例)。新配比显著改善冲洗液稳定性,有效抑制增稠速度。



图6 加入牛粪的冲洗液

Fig.6 Flushing fluid added to cow dung

(4)高频置换策略。认识到冲洗液污染不可避免,采取勤换浆策略(1~2天/次),及时排出劣化冲洗液,维持冲洗液体系基本性能。虽然增加了成本,但保障了孔壁相对稳定,钻进持续进行^[14-16]。

5.3 缩径卡钻预防与处理技术

针对频繁缩径(表现为泵压突然升高、提钻和下钻时遇到阻力)的问题,采取了以下几种方法:

(1)控制起下钻速度并规范操作。在缩径孔段,快速起钻会产生过大的抽吸压力,有可能将钻具抽向缩径点;快速下钻会产生过大的激动压力,有可能将钻具压向缩径点,这两种情况都容易诱发卡钻。因此,在易缩径孔段起钻时,施工人员严格控制起钻速度,防止产生过大的抽吸压力。下钻至易缩径孔段时,提前减速,缓慢通过,避免产生过大的激动压力冲击孔壁^[17-20]。

(2)主动预防。经团队讨论,采取每钻进约50 m将钻具提至上部套管内的钻进方法。这样能让钻杆在相对稳定的套管内停留,释放可能存在的缩径点应力,并将其作为后续下钻的“基准点”。

(3)精准处理。在下钻过程中遇到阻卡情况,立即在卡点位置进行定点扫孔,破除新形成的缩径环,确保钻头能够顺利到达孔底。

这一控制下钻速度+周期性提钻+定点扫孔的方法显著降低了卡钻事故的发生率,保障了施工有效进尺。

5.4 人力资源动态优化与技能速成

在团队钻探施工人员紧缺的情况下,前期(第1~20天)安排7人,采用两班制(9:00—23:00),集中有限人力保障日间高效作业,以牺牲作业连续性为代价换取核心时段的作业效率。后期(第21~99

天),及时将人员补充至10人,采用三班两倒制,实现24 h连续作业,显著提升纯钻时间的利用率。

在技能提升方面,采用老带新+岗位速成模式。老机长全程指导,新提拔的班长(原副班长或骨干班员)在实践中快速成长。通过高强度的现场实操培训,让无经验的班员迅速掌握高原深孔岩心钻探的基础操作与应急处置流程,有效缓解了骨干短缺的压力。

6 施工效果分析

6.1 设备组合技术创新成效显著

(1)安全性提升:A型钻塔地面预组装+机械整体竖立模式,将高空作业转为地面操作,彻底消除高原缺氧环境下采用四角管子斜塔时的坠落风险。

(2)时效性优化:钻塔模块化设计适应高原地形,实现进场—立塔—开钻快速衔接,将搭建钻塔时间从8~10 h缩短至0.5~1 h,设备准备效率提升超80%,为年均有效工期不足120天的高原施工窗口期争取宝贵时间,。

6.2 冲洗液体系动态调控解决核心矛盾

(1)漏失控制:动态添加堵漏剂(如纤维或片状材料)的灌井式处理,成功维持孔内静水压力,使全孔漏失从剧烈漏水转为微漏状态。

(2)冲洗液污染抑制:优化配方(提高降失水剂比例)结合高频置换策略(1~2天/次),显著缓解岩粉泥化导致的冲洗液增稠、泵压飙升问题,保障孔壁稳定和连续钻进。

6.3 缩径卡钻预防措施有效降低事故率

(1)主动预防机制:周期性提钻至套管内释放应力的方法(每钻进50 m提钻一次),成功解决应力累积引发的缩径风险。

(2)精准事故处理:孔内遇阻或被卡时定点扫孔破除缩径环,使卡钻事故发生率大幅下降,保障了574.31 m严重垮塌段后仍能继续施工至800.08 m终孔。

6.4 人员优化保障施工连续性

(1)动态调配策略:前期两班制(7人)集中保障日间效率,后期三班两倒(10人)实现24 h连续作业,钻探时间利用率显著提升。

(2)技能速成模式:老带新+岗位实操使无经验人员快速掌握高原深孔操作,缓解骨干短缺压力,支撑99天完成800 m钻孔施工任务。

6.5 整体施工结构设计合理

(1)五级套管结构适应性:动态调整孔径($\varnothing 172\text{ mm}\rightarrow\varnothing 77\text{ mm}$)并封堵环隙,有效应对破碎地层漏失与垮塌(如570 m垮塌后提前下入 $\varnothing 93.5\text{ mm}$ 套管)。

(2)工艺灵活性: $\varnothing 172\text{ mm}$ 口径提钻取心保障大孔径岩心采取率,其余口径绳索取心提升效率,终孔深度800.08 m,验证结构设计可靠性。

综合施工成效如表4所示。

表4 综合施工成效	
Table 4 Comprehensive construction effect	
指 标	成 效 表 现
工期控制	计划120天,实际99天完成(节省21天),高原严苛环境下效率提升17.5%
事故率	冲洗液调控前孔内事故(如卡钻、垮塌)频率达到70%以上,通过冲洗液调控、周期性提钻等措施,孔内事故降低至10%以下,发生率降低60个百分点以上。
成本控制	前期班组按照传统的方式使用冲洗液,孔内事故频发,效率低下,综合成本达到825元/m,采用高频换浆后,虽增加冲洗液成本,但事故减少和工期得以缩短,综合成本降低到701元/m,总成本降低约15%
技术适应性	创新设备组合(钻机-钻塔)和高原人力管理模式,为同类地层钻探提供可复制方案

7 结论与建议

面对青藏高原高海拔、强破碎绿泥石化橄榄岩地层的极端挑战,项目通过设备集成创新、冲洗液动态调控、预防性孔壁维护及人力资源优化四大核心技术,成功克服持续漏失、孔壁失稳、岩粉泥化等难题。施工效率、安全性、成孔质量均达到预期目标,为高原深部资源勘探提供了可推广的工艺与管理范式。通过此次高原钻探施工实践,提出以下几点建议:

(1)设备体系创新是基础:HXY-6B型钻机与A15-35型钻塔采用的上压块连接法安全可靠,值得推广。

(2)冲洗液是核心要素:在强漏失且岩粉高度泥化的地层中,单一配方的冲洗液往往难以取得理想效果。建议采用动态堵漏+抗污染配方优化+高频置换的组合策略。同时,迫切需要研发针对性更强的抗泥化污染冲洗液处理剂或高效固控技术。

(3)预防性措施保障安全:周期性提钻至套管+遇阻定点扫孔是预防和处理橄榄岩地层缩径卡钻问题的有效方法之一。

(4)动态管理提升效能:根据工程不同阶段动态调整人员编制与班制(如前期集中力量作业、后期实行连续作业),并结合老带新+速成培训的模式,是应对人力短缺和经验不足问题的有效策略。

(5)综合应用是关键:复杂地层深孔钻探的成功,依赖于设备稳定性、工艺优化、冲洗液调控、孔壁维护以及人员管理等多方面的系统性协同。

参考文献(References):

[1] 刘祥,兰沁,许飞,等.西藏罗布莎铬铁矿高海拔巨厚覆盖层钻探技术[J]. 钻探工程,2021,48(6):49-56.
LIU Xiang, LAN Qin, XU Fei, et al. Drilling technology for massive overburden at high altitude in Luobusa Chromite Mine, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6):49-56.

[2] 牟程江,廖麟祥,孙昌伟,等.藏北无人区高原冻土复杂地层钻探施工实践[J]. 钻探工程,2025,52(2):65-71.
MU Chengjiang, LIAO Linxiang, SUN Changwei, et al. Drilling construction practice in complex strata with frozen soil in the no man's land of northern Tibet Plateau[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2):65-71.

[3] 翟育峰,王鲁朝,丁昌盛,等.西藏罗布莎科学钻孔冲洗液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):1-4.
ZHAI Yufeng, WANG Luchao, DING Changsheng, et al. Flush fluid technique in scientific drilling hole situated in luobusa of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(4):1-4.

[4] 张英传,王鲁朝,宋世杰,等.罗布莎科学钻探工程技术及应用[J]. 西部探矿工程,2022,34(6):84-88,90.
ZHANG Yingchuan, WANG Luchao, SONG Shijie, et al. Robsa scientific drilling engineering technology and application[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(6):84-88,90.

[5] 王志祥,陈冲,郭如伦,等.羌塘盆地油气地质调查井地层条件与施工难点[J]. 钻探工程,2025,52(4):111-120.
WANG Zhixiang, CHEN Chong, GUO Rulun, et al. Stratigraphic conditions and construction difficulties of oil and gas geological survey wells in Qiangtang Basin[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4):111-120.

[6] 范杰,尹飞,李泽群,等.山东莱芜富铁矿LW23ZK01深孔钻探技术研究[J]. 地质与勘探,2024,60(6):1228-1236.
FAN Jie, YIN Fei, LI Zequn, et al. Drilling technology of the deep drillhole LW23ZK01 in the Laiwu iron-rich area of Shandong Province[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(6):1228-1236.

[7] 刘志龙,陈磊,石岩,等.内蒙古哈达门沟矿区复杂地层钻探技术研究——以ZK20312钻孔为例[J]. 钻探工程,2023,50(S1):246-250.
LIU Zhilong, CHEN Lei, SHI Yan, et al. Research on drilling

- technology of complex strata in Hadamengou mining area in Inner Mongolia: A case study of ZK20312[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(S1):246-250.
- [8] 田志超,于森,翟育峰,等.甘肃张掖三岭湾ZC1井超厚沉积层岩心钻探施工技术[J]. *钻探工程*, 2025, 52(1):54-61.
TIAN Zhichao, YU Sen, ZHAI Yufeng, et al. Core drilling technology for ultra thick sedimentary layers of ZC1 well in Sanlingwan, Zhangye, Gansu[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1):54-61.
- [9] 李增梁,陈永平,穆元红,等.甘肃杨岭铁矿区复杂地层岩心钻探技术[J]. *钻探工程*, 2024, 51(S1):287-291.
LI Zengliang, CHEN Yongping, MU Yuanhong, et al. Core drilling technology for complex strata in Yangling iron mine area, Gansu Province[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1):287-291.
- [10] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2012, 39(11):1-3,9.
CHEN Shixun, ZHAI Yufeng, WANG Luchao, et al. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in luobusha of Tibet[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012, 39(11):1-3,9.
- [11] 刘兵.四川尔呷地吉铅锌矿区复杂地层钻探施工技术[J]. *钻探工程*, 2022, 49(4):87-92.
LIU Bing. Drilling technology for complex formation in the Ergadiji lead-zinc mine area in Sichuan[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(4):87-92.
- [12] 隗德祥,高金华,刘维平,等.岩心钻探漏失地层水泥堵漏技术的实例分析与研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(S1):327-331.
KUI Dexiang, GAO Jinhua, LIU Weiping, et al. Case study and analysis of cement plugging technology for core drilling in lost circulation formation[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1):327-331.
- [13] 王志祥,许非,陈冲,等.地质钻探完全漏失地层处理方式探讨[J]. *钻探工程*, 2023, 50(S1):218-222.
WANG Zhixiang, XU Fei, CHEN Chong, et al. Discussion on treatment of completely leak strata for geological drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(S1):218-222.
- [14] 杨科,罗龙,曹灶开,等.阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践[J]. *钻探工程*, 2024, 51(2):119-126.
YANG Ke, LUO Long, CAO Zaokai, et al. Drilling technology and engineering practice for seriously lost and collapsed formation in Yangshan Mining Area[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(2):119-126.
- [15] 胡文辉,李奋强,王穗,等.察瓦龙深井接地极地质调查绿色钻探技术[J]. *钻探工程*, 2024, 51(S1):275-279.
HU Wenhui, LI Fenqiang, WANG Sui, et al. Green drilling technology for deep dell electrode geological survey in Tsavaron[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1):275-279.
- [16] 吴金生,张统得,刘卫东,等.高原生态脆弱区钻探技术体系综合研究与示范[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10):117-121.
WU Jinsheng, ZHANG Tongde, LIU Weidong, et al. Research and demonstration of drilling technology system in the ecological fragile zone of plateau[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10):117-121.
- [17] 蔡隼,王步清,王虎,等.南方丘陵地区岩心钻探关键技术措施[J]. *钻探工程*, 2025, 52(2):28-37.
CAI Juan, WANG Buqing, WANG Hu, et al. Key technical measures of core drilling in hilly area of southern China[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(2):28-37.
- [18] 杨芳,张明德,王勇军,等.深部钻探绳索取心跨口径钻具的应用研究与拓展[J]. *钻探工程*, 2023, 50(4):25-31.
YANG Fang, ZHANG Mingde, WANG Yongjun, et al. Research and development of cross-diameter wire-line coring system in deep drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(4):25-31.
- [19] 周小龙,许非,贾光强,等.羌塘盆地QS7井钻探施工技术[J]. *四川地质学报*, 2024, 44(S1):55-59.
ZHOU Xiaolong, XU Fei, JIA Guangqiang, et al. Drilling construction technology of QS7 well in Qiangtang Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2024, 44(S1):55-59.
- [20] 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. 3000 m scientific deep drilling construction technology for Jiajika Lithium mine in western Sichuan[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(4):41-48.

(编辑 王文)