

雪峰造山带东侧复杂地层岩心钻探关键技术

崔海龙¹, 李岩^{1,2*}, 郭鹏飞¹, 胡敏¹, 胡海滨¹, 左同欢¹

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600; 2. 长沙市深部钻井工程技术创新中心, 湖南长沙 410600)

摘要:雪峰造山带东侧桃江地区受多期构造叠加影响, 地层破碎、软硬岩层互层、裂隙发育, 岩心钻探面临孔壁失稳、冲洗液漏失严重、取心困难等突出难题, 亟需构建一套适用于该区域的系统化钻探技术体系。以该区 ZK0001、ZK1901、ZK2402 三个典型钻孔为工程实例, 系统分析钻遇地层岩性特征与复杂构造条件, 针对各类孔内复杂工况, 集成应用钻头序列化优选、三级钻孔结构动态优化、破碎地层取心工具改进与钻进参数调控等成套工艺, 建立依据漏失速率分级的“随钻防漏-桥接堵漏-复合凝胶堵漏”堵漏技术体系。工程实践表明: 优选孕镶金刚石钻头后, 含砾砂岩段单只钻头有效进尺提升至 80~150 m; 侧喷式钻头搭配轻压慢转钻进规程, 破碎含锰矿层岩心采取率稳定达到 95% 以上, 局部可达 100%; 该堵漏体系可高效处置漏失速度 3~11 m³/h 各级漏失; ZK2402 承压涌水层段采用加重冲洗液控压钻进, 施工完成后套管永久保留, 实现勘查钻孔“一孔多用”, 转化为乡村供水设施。研究形成了一套适配雪峰造山带东侧复杂地层的高效、安全岩心钻探关键技术体系, 可为同类陆内造山复杂构造区矿产勘查钻探工程提供技术参考。

关键词:雪峰造山带; 复杂地层; 岩心钻探; 钻头优选; 钻孔结构; 分级堵漏; 取心技术; 孔内事故处理

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0260-08

Key core drilling technologies for complex strata on the eastern margin of the Xuefeng orogenic belt

CUI Hailong¹, LI Yan^{1,2*}, GUO Pengfei¹, HU Min¹, HU Haibin¹, ZUO Tonghuan¹

(1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha Hunan 410600, China; 2. Changsha Engineering Technology Innovation Center for Deep Drilling, Changsha Hunan 410600, China)

Abstract: The Taojiang area on the eastern side of the Xuefeng orogenic belt has been subjected to multi-stage tectonic superposition, resulting in fractured strata, interbedded soft and hard rocks, and well-developed fractures. Core drilling in this area faces prominent challenges, including borehole wall instability, severe drilling fluid loss, and difficult core recovery, necessitating the establishment of a systematic drilling technology system tailored to this region. Taking three typical boreholes (ZK0001, ZK1901, and ZK2402) in the study area as engineering cases, the lithological characteristics of the drilled formations and complex structural conditions were systematically analyzed. To address various downhole complexities, an integrated suite of techniques was applied, including serialized bit optimization, dynamic optimization of the three-stage borehole structure, improvement of coring tools for fractured formations, and adjustment of drilling parameters. Furthermore, a graded lost circulation control system based on leakage rate classification was established, featuring "loss prevention while drilling, bridging plugging, and composite gel plugging." Engineering practice demonstrates that: After optimizing impregnated diamond bits, the effective footage per bit in

收稿日期: 2026-04-08; 修回日期: 2026-05-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.032

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20240202101); 长沙市自然科学基金项目(编号: kq2502356)

第一作者: 崔海龙, 男, 汉族, 1986 年生, 探矿工程专业, 主要从事钻探工程相关工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路 258 号, cuihailong2026@163.com。

通信作者: 李岩, 男, 汉族, 1985 年生, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, 硕士, 主要从事页岩气基础地质调查与钻井、录井相关工作, 湖南省长沙市宁乡市城郊街道学府路 258 号, m13874839475@163.com。

引用格式: 崔海龙, 李岩, 郭鹏飞, 等. 雪峰造山带东侧复杂地层岩心钻探关键技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 260-267.

CUI Hailong, LI Yan, GUO Pengfei, et al. Key core drilling technologies for complex strata on the eastern margin of the Xuefeng orogenic belt[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 260-267.

gravel-bearing sandstone intervals increased to 80~150 m; using side-jet bits combined with low weight-on-bit and low rotary speed drilling parameters, the core recovery rate in fractured manganese-bearing ore layers consistently exceeded 95% and locally reached 100%; the plugging system efficiently handled various levels of lost circulation with leakage rates ranging from 3 to 11 m³/h. In borehole ZK2402, weighted drilling fluid was employed for managed-pressure drilling in the confined water-influx zone, and the casing was permanently retained after completion, thereby achieving "one hole for multiple purposes" and transforming the exploration borehole into a rural water supply facility. This study establishes a key technology system for efficient and safe core drilling adaptable to the complex strata on the eastern side of the Xuefeng orogenic belt, providing a technical reference for mineral exploration drilling projects in similar complex intracontinental orogenic structural zones.

Key words: Xuefeng orogenic belt; complex strata; coring drilling; bit optimization; borehole structure; graded lost circulation control; coring technology; downhole accident handling

0 引言

雪峰造山带作为华南陆内构造演化的关键区域,其东侧(湘中后陆逆冲构造带)经历了多期次、多方向的构造叠加与改造,形成了极为复杂的构造格架与地层序列^[1-2]。该区域不仅是揭示华南大地构造演化的重要窗口,也是页岩气、地热及多金属矿产等深部资源勘探的潜力区^[3-7]。然而,强烈的构造活动导致该区地层普遍破碎、产状紊乱、软硬岩层频繁互层,并发育多组高角度裂隙,使得岩心钻探施工长期面临孔壁坍塌、冲洗液漏失、岩心堵塞与磨损、钻孔弯曲等诸多难题,严重制约了钻进效率与工程质量,影响了地质信息的精准获取和资源的准确评价^[8-9]。

针对复杂地层的钻探技术,国内学者已开展了大量研究。在雪峰山地区,已有钻探实践表明,采用优选钻头、优化钻具及冲洗液配方、各种堵漏技术等,可有效应对部分复杂情况^[10]。然而,现有研究多集中于特定工艺或局部区域的个案总结,对于雪峰造山带东侧这一特定构造单元,前人研究缺少针对该构造单元系统的钻探难题归纳及配套成套钻探技术体系研究。特别是对于桃江县松木塘镇这类位于造山带前缘、受多期构造影响强烈的具体工区,仍缺乏全面系统的总结^[11-12]。

因此,本文选取雪峰造山带东侧桃江县松木塘镇的ZK0001、ZK1901、ZK2402三个具有代表性的岩心钻孔为工程实例,旨在系统梳理该区域钻探施工中面临的关键技术瓶颈与典型孔内复杂情况。通过深入分析这些难题的成因并制定应对措施,总结阐述为解决这些问题所采用的关键技术及应用效果,最终形成一套适用于该区域的高效、安全岩心钻探施工关键技术体系,为雪峰造山带东侧桃江地区岩心钻探施工提供宝贵的技术借鉴。

1 地质特征及施工难点

1.1 地层情况

ZK0001、ZK1901两个钻孔自上而下依次钻遇南华系洪江组、大塘坡组和富禄组地层,岩性主要为砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩。目的层大塘坡组岩性以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、碳质泥岩等细粒岩为主,含锰、硅质、碳质及钙质,整个大塘坡组均含锰,为本次研究的“湘潭式”海相沉积型锰矿的赋存层位^[13-14]。ZK2402孔自上而下依次钻遇志留系两江河组、龙马溪组及奥陶系烟溪组地层,岩性主要为泥质粉砂岩、碳质泥岩、硅质页岩和黏土岩,夹条带状砂岩,整体以细粒岩为主,烟溪组岩性主要为黏土岩、碳质泥岩及含锰灰岩,为本次研究的“桃江式”海相沉积型锰矿的赋存层位^[15]。钻遇地层划分与岩性特征见表1。

1.2 地质构造

益阳市桃江县松木塘镇构造上隶属于扬子陆块雪峰造山带冷家溪隆起三级构造单元之内,该区域北邻洞庭湖盆地,东接幕阜山隆起,南邻沅山隆起和韶山凹陷,西接沅麻盆地。区内先后经历了俯冲碰撞、陆陆碰撞造山,以及板内造山作用,奠定了区域极为复杂的地质基础,形成了隆、盆相间,深大断裂交错发育的复杂构造格局,给钻探施工带来了较大困难与挑战^[16]。

1.3 施工难点

根据地质特征分析,本区域钻探面临的核心挑战^[17]主要有四个方面。

(1)孔壁稳定性差。第四系地层松散、胶结差,易坍塌埋钻;深部构造破碎带发育,冲洗液浸泡后极易剥落掉块。

(2)漏失问题严峻。多期构造运动导致地层裂

表1 钻遇地层划分与岩性特征				
钻 孔	系 组	钻遇厚度/m	岩 性 及 地 层 特 征	
ZK0001/ZK1901	第四系	5.73~9.10	黄色黏土,易漏	
	洪江组	163.77~238.20	灰色含砾泥质粉砂岩,岩石破碎,裂隙发育,易漏	
	大塘坡组	7.20~33.97	灰色粉砂岩、灰色粉砂质泥岩,中下部夹棕褐色含锰白云岩、碳质泥岩及含锰钙质泥岩,其中灰色粉砂质泥岩和灰褐色含锰泥岩岩性软,易抱钻卡钻,含锰白云岩易漏	
	富禄组	7.63~88.80	灰色含砾杂砂岩,岩石硬度高、研磨性强导致钻头易磨损,未钻穿	
	第四系	2.56	黄色黏土,易漏	
ZK2402	两江河组	288.41	灰色泥质粉砂岩夹碳质泥岩,夹层易造浆	
	志留系 龙马溪组	28.53	中上部为灰黑色碳质泥岩,岩性软,易抱钻卡钻;下部为灰黑色硅质页岩,岩性硬度高、研磨性强导致钻头易磨损	
	烟溪组	58.35	主要为深灰色黏土岩,底部为9 m余灰黑色碳质泥岩夹灰色含锰灰岩。黏土岩岩性软,易抱钻卡钻,含锰灰岩易漏	
	奥陶系 桥亭子组	67.75	深灰色粉砂质板岩,岩性硬,易磨损,未钻穿	

隙、微裂缝网络密集,钻遇破碎带及含锰灰岩层段时,冲洗液漏失频繁,且漏层位置难以精准定位,常规随钻堵漏效果不佳。

(3)取心质量难以保障。目的层含锰岩系受构造影响,岩心极为破碎。钻进中易发生岩心堵塞、磨损等复杂情况,提钻时松散岩心易脱落,导致采取率低,无法满足地质编录要求。

(4)涌水风险大。目的层(奥陶系烟溪组)为承压含水层,钻穿目的层段后易发生涌水,严重破坏

冲洗液性能,增加钻进风险与封孔难度。

2 工程概况

钻孔部署于雪峰造山带东侧桃江县松木塘镇的锰矿勘查区内,ZK0001、ZK1901孔主要揭露南华系含锰岩系中的碳酸锰矿层,ZK2402孔主要揭露奥陶系烟溪组锰矿层。三个钻孔均在设计的孔深范围内见矿,且达到地质目的。钻孔结构均为三级,终孔直径均为75 mm,如表2、图1所示。

表2 钻孔基本数据						
孔号	隶属勘查区	设计孔深/m	完钻孔深/m	钻 探 目 的	终孔直径/mm	钻孔结构
ZK0001	白竹山锰矿区	220.00	211.10	揭露南华系含锰岩系中的碳酸锰矿层	75	三开
ZK1901	白竹山锰矿区	380.00	343.80	揭露南华系含锰岩系中的碳酸锰矿层	75	三开
ZK2402	王家湾锰矿区	450.00	445.60	揭露奥陶系烟溪组锰矿层	75	三开

3 钻探关键技术

为解决复杂地层带来的难题,本次集成应用了多项关键技术,并形成了标准化的技术流程。

3.1 钻头优选

钻头优选是提升钻探效率、保障取心质量与成本控制的核心技术,其优化策略需遵循“因岩施钻”原则^[17-19]。根据地层岩性与可钻性差异,建立了钻头序列化优选方案,见表3。

3.2 钻孔结构优化

ZK1901孔考虑ZK0001孔岩心较完整、漏失少的特点,为压缩周期,原计划采用二级结构:一开使

用 $\varnothing 95$ mm钻头钻至45.10 m,下 $\varnothing 89$ mm套管至45.08 m,二开 $\varnothing 75$ mm裸眼终孔。钻进至7 m时发现岩石破碎严重,6.70~9.10 m岩心采取率不足50%,预判孔内复杂情况将增多,遂变更为三级结构: $\varnothing 122$ mm钻头扩孔至9.10 m,下 $\varnothing 114$ mm套管至9.02 m;二开使用 $\varnothing 95$ mm钻头钻至43.30 m,下 $\varnothing 89$ mm套管至43.22 m;三开 $\varnothing 75$ mm裸眼终孔。调整后孔径放大一级,为后期处理孔内复杂情况留有余地。

3.3 破碎地层取心技术

针对目的层岩心破碎、取心困难的问题,采取

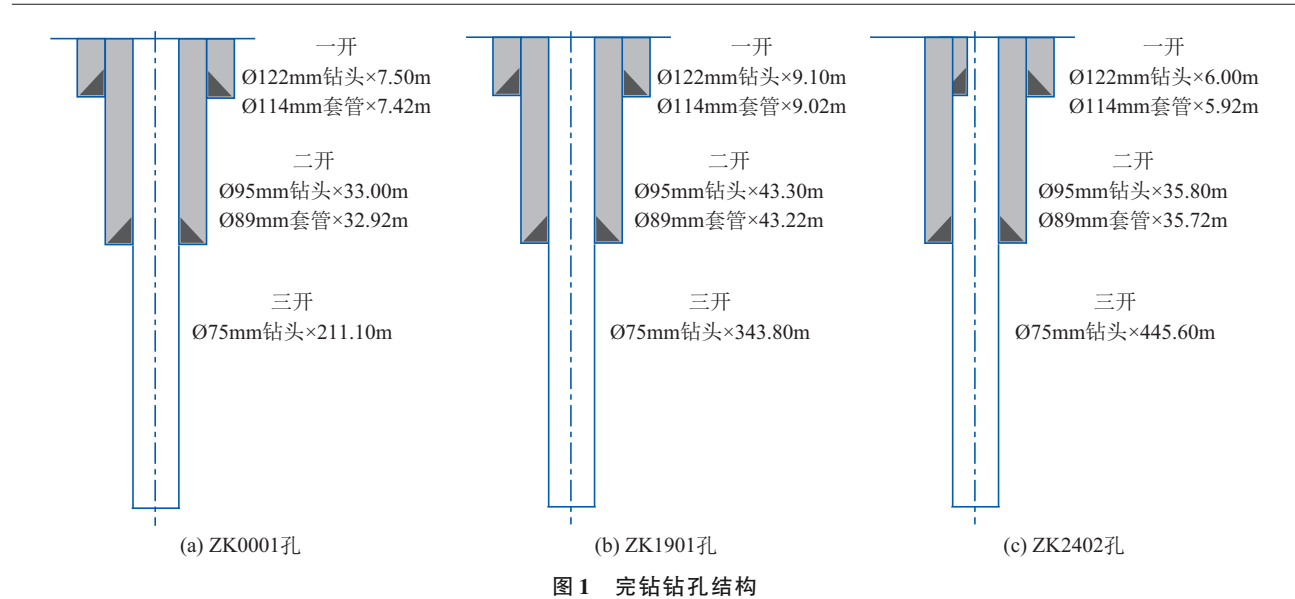


表3 基于地层特性的钻头优选及应用效果

地层岩性	岩石特性与可钻性	核心挑战	推荐钻头	推荐理由与技术要点	应用效果
松散表土层	未固结或弱胶结,松散,黏聚力小。抗压强度<1 MPa,可钻性极好(1~2级)	(1)孔壁极易坍塌、漏失;(2)钻孔防斜困难;(3)钻进效率高,但需快速穿过以减少风险	硬质合金钻头或PDC钻头	(1)破岩效率高,快速钻进,缩短不稳定层段裸露时间;(2)成本低廉,适合浅部松散表土层段	(1)机械钻速由1.5~2.5 m/h提高至3.0~4.0 m/h,快速建立稳定孔口;(2)单只钻头可完成开孔段,成本低
含砾泥质粉砂岩/含砾砂岩	非均质性强,软硬颗粒混杂,研磨性中等至强。抗压强度30~45 MPa,可钻性变化大(4~7级)	(1)软硬交错导致钻头崩齿、寿命骤减;(2)岩心易沿砾石边界破碎,采取率低;(3)钻头受力不均,易导致孔斜	孕镶金刚石钻头或尖齿形PDC钻头	(1)孕镶钻头磨削破岩,对软硬变化不敏感,耐磨;(2)尖齿PDC结构坚固,抗冲击,遇砾石不易崩碎;(3)钻进平稳,利于取心和防斜	(1)孕镶钻头单只进尺由40~60 m提高至80~150 m,磨损均匀;(2)岩心采取率可稳定在90%以上
粉砂岩/泥质粉砂岩	胶结较好,均质,硬度中低,研磨性弱。抗压强度10~35 MPa,可钻性好(3~5级)	地层理想,是提高全孔平均机械钻速的关键层段	常规PDC钻头	(1)PDC钻头在此类地层中剪切破岩效率最高;(2)一只高性能PDC钻头可完成长孔段钻进,减少起下钻,经济效益好	机械钻速由2.0~3.0 m/h提高至4.0~5.0 m/h,显著缩短施工周期
粉砂质泥岩/碳质泥岩	质软,塑性较强,遇水易水化膨胀、缩径。抗压强度15~60 MPa,可钻性好(4~5级)	(1)钻头泥包导致钻效下降甚至糊钻;(2)水化膨胀导致缩径,可能引发卡钻;(3)岩心遇水软化,影响化验结果	大水口PDC钻头或表镶金刚钻头	(1)大水口、宽流道确保排屑通畅;(2)表镶钻头出刃好,排粉空间大,防糊钻	(1)钻头泥包次数由每100 m 2~3次降为0~1次,机械钻速维持在2~3 m/h;(2)减少因缩径导致的遇阻、卡钻风险
含锰灰岩(目的层段)	硬度中等,但常因构造发育而破碎,裂隙可能含水。抗压强度50~90 MPa,可钻性中等(4~6级)	(1)岩心易破碎、冲蚀,采取率常低于70%;(2)频繁堵心、卡心,回次进尺短;(3)获取的岩心破碎,原生结构信息丢失,样品代表性差	侧喷式钻头或孕镶金刚石钻头	改变冲洗液流向,避免直接冲刷岩心根部	(1)岩心采取率提升至100%;(2)获取柱状岩心,保留原生构造与矿化特征;(3)减少堵心次数,提高取心作业时效

了“改进工具+控制参数”的组合策略。

(1)改进工具。定制内径更小、开口更大的专用卡簧,提钻时能多点抱紧破碎岩心,有效防止脱落^[20]。

(2)控制参数。严格执行“轻压、慢转、限尺”的钻进规程,并适配侧喷式钻头,避免冲洗液直接冲刷岩心根部,最大限度保护岩心原状结构。

3.4 复杂地层堵漏技术

针对不同级别的漏失,形成了岩心钻探“防-堵-固”分级堵漏技术体系^[21-24],见表4。

(1)随钻防漏。针对渗漏(漏失速度 $<5\text{ m}^3/\text{h}$),在冲洗液中加入超细碳酸钙等材料,在钻进过程中动态封堵微裂隙,实现“边钻边堵”,对钻进效率影响最小。

(2)桥接堵漏。针对小漏(漏失速度 $5\sim 10\text{ m}^3/$

h),配制核桃壳、橡胶粒、云母片等复合桥接浆液,采用静止或挤注方式在裂缝口形成桥塞。

(3)复合凝胶堵漏。针对中漏及以上(漏失速度 $>10\text{ m}^3/\text{h}$),采用“刚性颗粒+弹性纤维+化学凝胶”的复合配方(如DF-1、FD-1、核桃壳等),通过承压挤注,在裂缝内部形成高强度封堵层,显著提高地层承压能力。

4 复杂情况处理

本次三个钻孔均位于雪峰山构造带东侧,多期构造叠加导致孔壁失稳、冲洗液漏失、涌水及取心困难等复杂情况发生^[25],严重影响钻进效率。

4.1 胶结性差的表土层段成孔

钻孔表土层段胶结性差,岩心碎裂(图2),厚度 $6.00\sim 9.10\text{ m}$ 。开钻后,钻出的孔壁无法自稳,上部孔壁在钻柱敲击及冲洗液冲刷作用下立即坍塌,加

表4 堵漏关键技术应用分级

漏失级别	漏失速度/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	漏失类型与 特征	关键技术方案	关键材料及工艺	应 用 效 果
渗漏(ZK0001)	<5	返浆量减少10%,液面缓慢下降,持续消耗	(1)强化随钻堵漏;(2)利用压差使颗粒在微裂缝架桥成功	超细碳酸钙等颗粒状材料;循环加入,维持钻进,可短时静止	在 ZK0001 孔 27.90~34.60、86.80~96.78、108.60~116.20 m 层段堵漏成功,应用后漏失速度由 $3\sim 4\text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $<0.1\text{ m}^3/\text{h}$,后期未再漏失
小漏(ZK1901)	$5\sim 10$	返浆量减少10%~30%,孔内液面明显下降	(1)起钻至安全孔段,配制粒径级配桥接浆液;(2)静止候凝4 h,低压挤注堵漏	细颗粒核桃壳、锯末、云母片、随钻堵漏剂复配,浓度8%~15%;起钻至安全孔段,配浆泵入,静止或低压憋挤候凝	在 ZK1901 孔 193.30~204.60、248.50~257.80 m 层段快速堵漏成功,后期未再漏失
中漏(ZK2402)	$10\sim 20$	返浆量不足50%,偶尔短暂失返	(1)中细颗粒复配成复合凝胶,进行桥塞堵漏;(2)承压挤注堵漏	细核桃壳、棉籽壳、云母等惰性材料、随钻与弹性堵漏剂、固结剂等化学凝固材料,结合DF、FD等纤维材料复配成复合凝胶堵漏材料,浓度15%~25%;严格起钻、配浆、泵送、憋压、长时间候凝(4~8 h)	在 ZK2402 孔 236.10~239.60 m 等多层段堵漏效果明显,堵漏后冲洗液密度由 $1.02\sim 1.05\text{ g}/\text{cm}^3$ 提高至 $1.05\sim 1.10\text{ g}/\text{cm}^3$,满足后续钻进密度窗口要求
大漏或恶性漏失(未涉及)	>20	大型裂缝、溶洞、孔口完全失返	(1)水泥浆堵漏;(2)工艺性封隔(跟管/套管隔离)	高强度水泥及技术套管;先注入水泥浆充填并固化溶洞,再下套管封隔	解决极端难题:能处理传统方法无效的恶性漏失,但施工工艺复杂、周期长、成本高,是保障工程继续的重要手段

之土层松散、孔隙度大,地层渗透性极强,表土层段成孔较难^[26]。



图2 ZK1901表土层段岩心

应对策略:针对以上施工难题,遵循“预防为主,工艺保障,安全施工”的原则,采取“快速隔离,重建稳定”策略,将表土层段用套管隔离,其中ZK0001孔表土层段 $\Phi 114$ mm套管下深7.42 m,ZK1901孔 $\Phi 114$ mm套管下深9.02 m,ZK2402孔 $\Phi 114$ mm套管下深5.92 m,均穿过表土层进入岩层1~2 m,封隔表土层并固定一开套管。另外在一开钻进过程中,时刻保持“轻压、快转、大排量”的钻进节奏,连续作业,一次成孔,密切观察孔内返屑情况。

4.2 漏失处理

岩层因构造作用破碎,形成大量相互连通的微裂缝,这些裂缝的张开度有限,但数量多、网络复杂。因此,漏失往往发生在整个破碎层段,而非单一深度点,给漏层定位带来较大困难,加之冲洗液密度稍高、泵排量增大或起下钻速度过快产生的“激动压力”,都极易诱发或加剧漏失^[27]。

此次钻孔施工的地层岩性主要为砂泥岩及含砾泥岩或含砾砂岩,大段灰岩层段较少,仅目的层段发育2~6 m的含锰灰岩,厚度较小。ZK0001孔岩心整体较为完整,漏失层段较少,多数为渗漏,主要采取边漏边堵边钻的策略,效果较为明显。而ZK1901和ZK2402孔岩心相对较为破碎,裂隙发育,漏失较为严重(图3),尤其是ZK2402孔漏失点多,目的层含锰灰岩厚度不大,但岩心破碎,给堵漏工作带来较大影响。

ZK0001孔漏失的应对策略:ZK0001孔岩心较为完整,整体漏失情况不严重,漏失层段主要集中在27.90~34.60、86.80~96.78、108.60~116.20 m层段,漏失速度平均 $2\text{ m}^3/\text{h}$,最大不超过 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 。进入第一个漏失层段后,向冲洗液循环系统中均匀加入超细碳酸钙,加量为冲洗液总体积的1%~3%。对



图3 ZK2402孔碳质泥岩

于渗漏稍严重层段,提高至3%~5%。保持正常钻进和循环,让含有堵漏材料的冲洗液持续流经孔壁,材料在压差作用下被挤入地层微孔隙,逐渐形成内泥饼和外封堵带。进入86.80~96.78、108.60~116.20 m层段,加入超细碳酸钙后漏失仍未缓解,随即向冲洗液中加入少量的单向压力封闭剂和超细纤维材料,静置1.0~2.0 h,漏失量明显减少,堵漏成功。

ZK1901孔漏失的应对策略:ZK1901孔岩心与ZK0001孔岩心类似,整体完整,但在局部层段漏失较ZK0001严重,漏失速度平均 $6\text{ m}^3/\text{h}$,最大不超过 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 。漏失层段主要集中在38.20~41.60、193.30~204.60、233.82~239.60、248.50~257.80 m。借鉴ZK0001孔堵漏经验,结合本孔漏失情况,在上述漏失层段冲洗液中直接加入细核桃壳等颗粒材料及纤维材料,等待20 min后,38.20~41.60、233.82~239.60 m层段堵漏成功,其他两个层段漏失仍未缓解,于是停止钻进,但保持钻具在孔底缓慢旋转(防止沉砂卡钻),将钻具提离孔底2~3 m,进行低排量循环观察,准备进行专项堵漏作业。配制堵漏浆液,具体配方为冲洗液+3%~5%随钻堵漏剂(细)+2%~4%弹性堵漏剂(如橡胶粒)+1%~2%纤维状堵漏剂+2%~3%片状封堵剂(如云母片),总浓度控制在8%~15%,随后用光钻杆将堵漏浆泵送至堵漏点,随即提钻、憋压、静置2~3 h,漏失量明显减小,堵漏成功。

ZK2402孔漏失的应对策略:相较于ZK1901和ZK0001孔,岩心较为破碎,漏点较多,漏点主要集中在6.00~21.70、105.30~107.80、197.00~200.50、236.10~239.60、255.30~266.31、271.65~275.90、294.20~301.20、306.80~311.40、329.60~336.90 m。在ZK2402孔开钻前,仔细分析研判了该孔设计书,并对ZK0001和ZK1901孔堵漏技术进行了总结与分析,分别对6.00~21.70、105.30~107.80、197.00~

200.50、271.65~275.90 m层段采用了随钻堵漏材料堵漏及桥接堵漏材料进行堵漏,堵漏效果较明显,但在 236.10~239.60、255.30~266.31、294.20~301.20、306.80~311.40、329.60~336.90 m层段效果不佳。在对漏失情况仔细分析后,决定采用复合凝胶堵漏技术进行堵漏,所用配方为钻孔冲洗液+4%DF-1+6%随钻堵漏剂+4%FD-1+3%弹性堵漏剂+2%细核桃壳+1%棉籽壳+1%云母+2%固结剂+0.2%超级纤维。采用该堵漏技术后,漏失速度由最开始的 $11\text{ m}^3/\text{h}$ 减少为 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 以下,随后再加入锯末等纤维材料,最终漏失速度几乎为零,堵漏成功。

4.3 涌水处理

ZK2402孔目的层为奥陶系烟溪组含锰灰岩,上覆岩层为黏土岩,下伏岩层为碳质泥岩,岩性均致密。含锰灰岩刚好被相对致密、隔水的两套岩层所夹持,形成一个局部的承压含水层。当钻孔揭穿该含水层的顶板(隔水层)时,高压地下水便沿钻孔喷涌而出。涌水会导致孔内流体性质失控、冲洗液性能急剧恶化与护壁能力丧失、岩心采取率与品质下降,同时也会给测井和封孔工作带来较大风险。

应对策略:发现涌水后,迅速停止钻进,配制加重冲洗液。考虑到破碎地层承压能力有限,密度增加应循序渐进,每次提高 $0.02\text{ g}/\text{cm}^3$,避免压漏地层;将加重冲洗液泵入孔内,逐步重建并维持孔底压力略高于地层压力,在加重的同时,加入增黏剂、降滤失剂和防塌剂,快速恢复冲洗液抑制性能,稳定上部孔壁,采用“较低泵排量、适当钻压”钻进,形成微过平衡,确保钻进过程中涌水不会造成衍生事故。在钻孔施工完毕后,发现仍有涌水现象,经综合考虑,一开套管不取出,留在孔内,未进行封孔,而是将其设计成一套取水装置,解决了村民用水困难的问题。

4.4 事故处理

当ZK2402孔正常钻进至358.10 m时,发现悬重明显减轻,且无法正常提钻。经综合分析,该孔目前已进入含锰灰岩层段,且地层破碎,加之前期处理孔漏等复杂情况时钻杆磨损较为严重。因此,初步判断钻具已在孔内某处断裂。通过计算钻具长度和悬重变化,确认断点位于孔深348.50 m,钻杆断点距离孔底9.60 m。

结合ZK2402孔钻孔设计、地层岩性及构造发

育情况,分析认为钻杆在长期载荷(拉、压、扭、弯)作用下产生疲劳,348.50 m处刚好位于目的层奥陶系烟溪组含锰灰岩顶部一个破碎带,钻杆在此处受“狗腿度”效应产生的弯曲应力最大,且该处钻杆因疲劳已发生磨损,在岩石破碎的环境下显著增加了钻杆断裂风险。

应对策略:针对ZK2402孔钻具断裂事故,采用公锥打捞技术来处理。打捞前,下入 $\varnothing 75\text{ mm}$ 钻头通至断点以上,确保孔壁畅通、规则,防止打捞工具中途遇阻。同时,调整冲洗液性能,确保孔壁稳定,防止在打捞过程中发生坍塌埋鱼,使用平底磨鞋或引子钻头下探,确认鱼顶的准确深度、是否偏斜、是否破损。在确认孔壁通畅后,缓慢下放打捞组合钻具至鱼顶以上1~2 m,开泵循环,冲洗鱼顶周围沉砂,然后极其缓慢地旋转下放,使公锥尖端精准导入鱼顶内孔,确认公锥进入鱼顶后,施加适当的恒定钻压,并保持低转速进行造扣,造至5扣后,确认捞获鱼顶且落鱼已松动后,平稳操作,将落鱼全部起出孔口。至此,通过上述公锥打捞技术,成功将钻具打捞上来,钻杆断裂事故处理完毕(图4)。



图4 钻具断裂及磨损情况

5 结论

通过雪峰造山带东侧3个典型钻孔的工程实践,系统总结了该区域复杂地质条件下的钻探技术难题,形成了一套安全、高效、可靠的岩心钻探关键技术体系,显著提升了钻进效率,保障了工程质量。

(1)通过优选钻头、优化钻孔结构,显著提升了钻进效率,尤其是在复杂地层层段,合理选择钻孔结构可为后期施工留下足够安全余地。

(2)明确了复杂工况下处理事故必须要遵循“精准诊断、精细化作业”原则。针对ZK2402孔的涌水问题,实现了“一孔多用”,创新性地将地层承

压涌水转化为社会效益。

(3)通过改进取心钻具、优化“轻压、慢转、少进尺”等钻进参数,并配合优选好的钻头,使岩心采取率得到显著提升,为精准评价矿产资源提供了高质量的实物资料。

(4)针对复杂地层不同漏失速度,创新性地集成了“随钻防漏-桥接堵漏-复合凝胶堵漏”的分级堵漏技术体系,改变了以往单一堵漏方法应对复杂漏失的被动局面,显著提升了堵漏成功率。

参考文献:

- [1] 柏道远,钟响,贾朋远,等.雪峰造山带淑浦-靖州断裂活动历史及构造属性[J].地球科学与环境学报,2016,38(3):306-317.
- [2] 陈峰.华南雪峰陆内造山带东向构造扩展隆升与转换研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [3] 崔建军,施伟,董树文,等.雪峰山科学钻先导孔发现承压热水层和优质烃源岩[J].中国地质,2020,47(4):1268-1269.
- [4] 李建青,滕龙,方朝刚,等.华南江南-雪峰造山带逆冲推覆构造体系与油气资源效应[J].地质通报,2025,44(5):746-765.
- [5] 曹进良,吕书君,苏康明,等.江南造山带南段雪峰金矿田控矿构造解析及找矿预测[J].地质通报,2025,44(9):1585-1606.
- [6] 余爱民,严加永,王栩.湖南麻阳盆地深部电性特征及对构造和地热资源的指示[J].地质通报,2024,43(11):2077-2088.
- [7] 李岩,鱼磊,蔡宁波,等.湘中坳陷与湘东南坳陷上二叠统龙潭组页岩气形成条件及资源潜力探讨[J].矿产与地质,2021,35(4):654-662,692.
- [8] 韩毅,张绍和,王文彬,等.湘西北复杂构造区雪峰山先导孔钻进技术[J].钻探工程,2021,48(7):20-25.
- [9] 潘德元,贺前平,蔡隽,等.雪峰弧构造带钻孔轨迹控制关键技术研究[J].钻探工程,2024,51(5):108-114.
- [10] 胡晨,闫家,张恒春,等.泥页岩地层绳索取心钻进钻头应用及优化设计研究[J].钻探工程,2021,48(12):65-71.
- [11] 蔡隽,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.
- [12] 王杰,潘德元,蔡隽,等.鄂西地区鄂鹤页3井钻探施工技术[J].钻探工程,2024,51(S1):332-340.
- [13] 刘莉萍,吴文昌,江祖州,等.扬子东南缘“湘潭式”锰矿的地球化学特征及成矿机制[J].地球化学,2022,51(6):696-715.
- [14] 史富强,朱祥坤,闫斌,等.湖南湘潭锰矿的地球化学特征及成矿机制[J].岩石矿物学杂志,2016,35(3):443-456.
- [15] 柏道远,唐分配,李彬,等.湖南省成矿地质事件纲要[J].中国地质,2022,49(1):151-180.
- [16] 柏道远,李彬,周超,等.江南造山带湖南段金矿成矿事件及其构造背景[J].岩石矿物学杂志,2021,40(5):897-922.
- [17] 何焘,张绍和,王文彬,等.湖南永顺永页2井破碎地层取心问题分析与处理对策[J].钻探工程,2021,48(12):14-19.
- [18] 李奉霖,王汉昌,辛宗成,等.长距离水平孔绳索取心钻进关键技术研究及应用[J].钻探工程,2025,52(6):77-85.
- [19] 白云勃,高亮,李捷,等.破碎地层取心技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(2):144-150.
- [20] 韩毅,张绍和,白锐,等.囊袋多节捆绑式绳索取心钻具的设计与应用[J].煤田地质与勘探,2019,47(5):220-224.
- [21] 苏舟,张绍和,王文彬,等.黔水地1井钻探施工技术难点及对策[J].钻探工程,2021,48(5):54-59.
- [22] 谢春来,胡清富,张凤臣,等.伊拉克哈法亚油田 Mishrif 组碳酸盐岩储层防漏堵漏技术[J].石油钻探技术,2021,49(1):41-46.
- [23] 刘金华.顺北油气田二叠系火成岩漏失分析及堵漏技术[J].钻探工程,2023,50(2):64-70.
- [24] 孙金声,杨景斌,白英睿,等.裂缝性地层桥接堵漏技术发展综述与展望[J].石油科学通报,2023,8(4):415-431.
- [25] 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.
- [26] 郭军,李岩,王文彬,等.下扬子皖南地区皖泾地2井地质特征与优快钻井对策[J].中国地质调查,2021,8(5):45-52.
- [27] 李岩,郭军,王文彬.滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J].钻探工程,2021,48(8):12-18.

(编辑 王跃伟)