

厚松散层小口径钻探护壁与提效技术

漆学忠¹, 赵俊¹, 胡洪飞¹, 蔡正水^{1*}, 于磊¹, 王欢庆¹, 李春²

(1. 安徽省地质矿产勘查局313地质队, 安徽六安 237010; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:在皖北阜阳、亳州等厚松散层覆盖区, 钻探中缩径、坍塌等孔内事故率 $>80\%$ 。通过分析松散层特性, 揭示了孔壁“水化膨胀-颗粒运移-泥皮破坏”连锁失稳机制。提出冲洗液滤失量 $\leq 5\text{ mL}/30\text{ min}$ 、泥皮黏聚力 $>8\text{ kPa}$ 为关键控制指标, 可保障长裸眼钻进超3个月。研发了KPAM+ NH_4 -HPAN+PAC-LV+超细碳酸钙复合冲洗液体系, 形成“分层施策+随钻封堵+短程提钻”工艺。4个钻孔验证表明: 孔壁稳定系数由0.51提至0.89, 事故处理时间缩短100%, 机械钻速提高32.8%, 台月效率突破800 m。成果可为同类厚松散层钻探提供技术支撑。

关键词:厚松散层; 孔壁失稳; 复合冲洗液体系; 护壁提效; 小口径钻探

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0189-09

Borehole wall protection and efficiency enhancement technology for small-diameter drilling in thick loose strata

QI Xuezhong¹, ZHAO Jun¹, HU Hongfei¹, CAI Zhengshui^{1*}, YU Lei¹, WANG Huanqing¹, LI Chun²

(1. Anhui Geology and Mineral Bureau 313 Team, Lu'an, Anhui 237010, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: In thick loose overburden covered areas such as Fuyang and Bozhou in northern Anhui, the incidence of downhole accidents including borehole shrinkage and collapse during drilling exceeds 80%. By analyzing the characteristics of loose layers, this paper reveals the chain instability mechanism of borehole walls dominated by "hydration expansion-particle migration-mud cake failure". The key control indicators are proposed, including the filtration loss of flushing fluid $\leq 5\text{ mL}/30\text{ min}$ and mud cake cohesion $>8\text{ kPa}$, which can ensure the safety of long open-hole drilling for more than three months. A composite flushing fluid system consisting of KPAM, NH_4 -HPAN, PAC-LV and ultrafine calcium carbonate is developed, and a technical process featuring "layered targeted treatment+plugging while-drilling+short tripping" is formed. The verification of four test boreholes shows that the borehole wall stability coefficient increases from 0.51 to 0.89, the accident handling time is reduced by 100%, the mechanical drilling rate is increased by 32.8%, and the monthly drilling efficiency of a single rig exceeds 800 m. The research results can provide technical support for drilling engineering in similar thick loose overburden layers.

Key words: thick loose strata; borehole instability; composite flushing fluid system; wall protection and efficiency enhancement; small-diameter drilling

0 引言

淮北—亳州—阜阳一带广泛发育巨厚第四系松散层及下伏新近系弱固结地层。第四系厚度

30~560 m, 新近系厚度可达1000 m以上, 岩性以黏土、粉细砂、砾石及弱固结砂泥岩互层为主, 普遍具有结构松散、富水性强、水敏性高的特点, 是区域钻

收稿日期: 2026-05-15; 修回日期: 2026-07-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.022

第一作者: 漆学忠, 男, 汉族, 1973年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事固体矿产勘探、油气钻井、采矿理论研究等工作, 安徽省六安市金安区佛子岭中路103号, 2608210861@qq.com。

通信作者: 蔡正水, 男, 汉族, 1974年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 从事深部钻探技术研究与应用工作, 安徽省六安市金安区佛子岭中路103号, czs582362342@qq.com。

引用格式: 漆学忠, 赵俊, 胡洪飞, 等. 厚松散层小口径钻探护壁与提效技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 189-197.

QI Xuezhong, ZHAO Jun, HU Hongfei, et al. Borehole wall protection and efficiency enhancement technology for small-diameter drilling in thick loose strata[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 189-197.

探工程面临的主要地层问题^[1]。

孔壁失稳形式因岩性而异:黏土层以水化缩径为主,砂砾层易发生坍塌与漏失,新近系泥岩水化变形显著,孔内复杂事故频发。统计表明,缩径、坍塌、流砂引发的事故占总事故的81.2%,单孔平均事故处理时间5.5 d,直接经济损失3~20万元,严重时造成钻孔报废,直接制约施工效率,降低成孔质量^[2]。

常规低固相冲洗液体系适应性有限,难以满足多岩性交替、高渗透、强水敏复合地层的护壁需求,深厚松散层孔壁稳定控制问题至今仍是该类地层钻探的主要技术难题。为此,本文针对该类复杂地层开展钻探护壁关键技术研究,以期为皖北同类工程提供技术参考^[3]。

1 松散层特征与失稳机理

1.1 地层结构与物理力学参数

研究区第四系自上而下可划分为四个地质层段(表1),各层段在矿物组成、粒度、渗透性方面差异显著^[4]。对典型岩性取样测试(每组不少于5个样),得到力学参数范围,见表2。

表1 第四系分层特征(以皖北某矿区为例)								
层段	深度/m	主要岩性	厚度/m	黏土矿物/%			渗透系数/ (m·d ⁻¹)	主要工程问题
				蒙脱石	伊利石	高岭石		
Q ₄	0~25	耕植土、粉质黏土	10~30	15	40	45	0.05~0.1	孔口坍塌
Q ₃	25~120	粉质黏土、粉砂互层	80~100	18	45	37	0.1~3.5	缩径+粉砂坍塌
Q ₂	120~380	黏土、细砂互层	200~260	25	40	35	0.01~8.0	严重缩径+细砂坍塌
Q ₁	380~560	黏土夹砾石、粗砂	140~240	12	50	38	0.01~25	漏失+砾石层坍塌

表2 典型岩性力学参数					
岩土类型	天然密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	膨胀率/%
粉质黏土	1.85~1.92	25~32	22~35	12~16	6~10
黏土	1.92~2.01	22~28	38~50	10~14	12~18
粉砂	1.78~1.85	20~25	2~8	28~32	<2
细砂	1.85~1.93	16~20	1~5	32~36	
中粗砂	1.92~2.00	12~16	0~3	36~40	

X射线衍射分析显示:黏土中蒙脱石含量10%~30%,伊利石40%~55%,高岭石30%~40%。蒙脱石含量超过20%的层段,线膨胀率普遍>15%,是缩径的主要层段^[5]。新近系地层特征分析见表3^[6]。

1.2 孔壁失稳的动态演化过程

通过孔内电视成像与事故反演发现,松散层孔壁失稳并非瞬时发生,而是经历三个连续演化阶段:

阶段Ⅰ——泥皮形成与局部破损:钻进初期,冲洗液在孔壁表面形成泥皮。但因孔壁粗糙,钻柱

表3 新近系地层特征						
层段	深度/m	主要岩性	厚度/m	矿物组成	渗透系数	主要工程问题
新近系上统 N ₂	74~672	上部:浅棕黄色粉砂质泥岩与泥质粉砂岩互层;下部:粉砂质泥岩与细一中粒砂岩互层。上下部均有铁锰质结核和钙质结核	598~758	黏土矿物(伊利石、高岭石为主,含少量蒙脱石);砂质部分以石英、长石为主	泥岩段:极低(<0.001 m/d);砂岩段:受粒度结构控制,约0.1~5 m/d	泥岩水化膨胀导致缩径、泥包钻头;砂泥互层导致孔壁力学稳定性差
新近系下统 N ₁	672~915	上部:细砂岩、粉砂质泥岩;中部:含砾粗砂岩、夹粉砂质泥岩,见少量黄铁矿及煤线;下部:砂砾岩及砂质泥岩夹煤线	243~305	砂砾成分以石英、燧石、岩屑为主;泥质胶结物含量高,胶结极松散	中—强透水:与粒度结构密切相关,黏粒含量越低、不均匀系数越大,渗透性越强;砾石层可达5~20 m/d	颗粒运移导致漏失、超径;弱胶结砂砾层易坍塌、卡钻;是“链式失稳”的关键层段

横向振动反复刮削泥皮,导致局部减薄甚至露出原始地层。表现为泵压小幅波动,返出岩屑中可见泥皮碎片。

阶段Ⅱ——滤失侵入与水化/运移:泥皮破损处滤失量剧增。黏土层中,滤液使矿物水化膨胀,当环向应力超过土体强度时,孔壁地层发生塑性流动,形成缩径;砂层中,滤液渗入孔隙,降低颗粒间有效应力,细颗粒随滤液运移造成内部冲蚀,形成空洞,粗颗粒失稳后突然坍塌。

阶段Ⅲ——连锁失效:缩径导致提钻阻力增大,强行提钻产生抽吸压力,诱发下部砂层坍塌;坍塌岩块堵塞环空,泵压骤升,进一步破坏泥皮,形成恶性循环^[7]。

该“泥皮破损→滤失侵入→膨胀/剥落→连锁失效”的动态过程表明,单一防塌措施难以奏效,必须同时控制滤失量、提高泥皮质量并优化水力参数^[8]。

1.3 孔壁失稳主控因素的定量分析

根据正交试验设计,在皖毫地1井不同深度开展了12组单因素变化试验,获得以下定量规律^[9]:

(1)滤失量:API中压滤失量 $>15\text{ mL}/30\text{ min}$ 时,80%的孔段24 h内失稳; $10\sim15\text{ mL}/30\text{ min}$ 时,失稳率25%; $7\sim10\text{ mL}/30\text{ min}$ 为12%; $5\sim7\text{ mL}/30\text{ min}$ 为8%; $3\sim5\text{ mL}/30\text{ min}$ 时 $<3\%$ (详见表4)。

表4 滤失量与孔壁稳定对应时间统计

滤失量/ $[\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}]$	稳定时间	适用工况
15~30	2~5天	孔深 $<200\text{ m}$
10~15	10~15天	孔深 $200\sim500\text{ m}$
7~10	2至4周	常规钻孔、短裸眼
5~7	约1~12个月	一般松散层、中等裸眼
3~5	约3个月	厚松散层+超长裸眼
≤ 3	3~6个月	极端复杂地层

(2)密度:冲洗液密度在 $1.08\sim1.16\text{ g}/\text{cm}^3$ 时孔壁最稳定,提下钻顺畅;密度 $>1.16\text{ g}/\text{cm}^3$ 时,泥浆黏切增长过快,易发生钻头泥包、泵压升高且不稳、钻速下降;密度 $<1.08\text{ g}/\text{cm}^3$ 时,钻孔易失稳,孔壁缩径,提下钻遇阻。

(3)黏度:苏式漏斗黏度在 $23\sim35\text{ s}$ 时,钻孔指标正常,钻速较快,泵压稳定;黏度 $>35\text{ s}$ 时,切力增大,泵压升高,提下钻阻力大,钻速下降,泥岩地层可能出现“打滑”;黏度 $<23\text{ s}$ 时,切力下降,携屑能

力差,易形成砂桥,孔底大颗粒岩屑堆积,泵压升高,回次取心长度缩短,取心钻具内管常因沉砂卡滞导致打捞失败。

(4)泥皮力学性能评价:依托API滤失试验制备泥皮试样,联合微型十字板剪切仪快速筛查、微型直剪仪精准测定泥皮黏聚力,量化表征泥皮抗冲刷、抗钻具刮蹭能力。

标准化测试流程:①采用API滤失试验制备泥皮试样,设定试验压差 0.69 MPa ,滤失时长 30 min ;②利用微型十字板剪切仪测试试样破坏扭矩,换算黏聚力完成试样快速初筛;③筛选结构完整的泥皮试样开展微型直剪快剪试验,拟合剪切应力-法向应力(τ - σ)曲线,读取纵轴截距得到精准黏聚力,完成数据校核。

试验结果显示:泥皮厚度 $>0.5\text{ mm}$ 或黏聚力 $<5\text{ kPa}$ 时,整体抗剪强度较差,起下钻作业过程中极易被钻具刮裂、脱落;当泥皮厚度控制在 $0.15\sim0.25\text{ mm}$ 、黏聚力 $>8\text{ kPa}$ 时,泥皮结构致密、韧性优良,适配常规小口径绳索取心钻进工况,可承受35次往复提钻操作而不出现剥落、破损现象。该薄层高黏聚力泥皮由固相颗粒紧密堆积形成隔水屏障,既可有效抑制松软地层水化缩径,还能持续抵御钻具往复摩擦带来的力学扰动。

(5)环空返速:粉细砂层中,环空返速 $<0.8\text{ m}/\text{s}$ 时,岩屑在孔底重复破碎,加剧孔壁冲刷;返速 $0.8\sim1.2\text{ m}/\text{s}$ 时携岩良好且不冲蚀孔壁;返速 $>1.5\text{ m}/\text{s}$ 时对松散砂层有明显冲蚀。该实测值仅代表本孔段工况条件,不作为通用设计依据。

(6)提下钻速度:提下钻速度控制在 $0.10\sim0.20\text{ m}/\text{s}$ 时,对孔壁的负压抽吸和不均匀挤压较小,孔壁相对稳定;提钻速度从 $0.3\text{ m}/\text{s}$ 增至 $0.5\text{ m}/\text{s}$,抽吸压力增加 $0.3\sim0.5\text{ MPa}$,足以诱发松散砂层坍塌。

基于以上规律,提出后续技术研发的控制指标:API滤失量 $\leq 5\text{ mL}/30\text{ min}$;泥皮厚度 $0.15\sim0.25\text{ mm}$,黏聚力 $>8\text{ kPa}$;环空返速 $0.8\sim1.2\text{ m}/\text{s}$ (对应泵量 $180\sim270\text{ L}/\text{min}$,视孔径而定);提钻速度 $\leq 0.20\text{ m}/\text{s}$ ^[10]。

2 护壁技术研究与参数优化

2.1 复合冲洗液体系设计

2.1.1 处理剂选择依据

针对“强抑制+低滤失+致密封堵”的三重需

求,选择以下处理剂进行复配^[11]:

主抑制剂:KPAM(聚丙烯酸钾,分子量300万~500万)。通过吸附黏土颗粒表面、压缩双电层抑制水化。单独使用0.2% KPAM可使页岩膨胀降低率约50%。

辅助抑制剂: $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ (水解聚丙烯腈铵盐)。兼具降滤失和抑制性,与KPAM协同使用可将膨胀降低率提升至70%以上。

降滤失剂: PAC-LV(低黏聚阴离子纤维素)。在低浓度下即可形成薄而致密的泥皮,且不显著增黏。

封堵剂:超细碳酸钙(粒度800目)与磺化沥青(软化点80~100℃)复配使用:前者以刚性颗粒架桥封堵砂层大孔隙,后者虽未达软化温度,但其可变形颗粒在压差作用下充填微孔隙,两者粒径级配协同,形成致密泥皮^[12]。

流型调节剂:XC(黄原胶),在卵砾石层或高携屑需求时适量添加。

杀菌剂:裸眼钻进时间超过3周,适量加入异噻唑啉酮类杀菌剂(如BIT,推荐加量0.05%~0.15%),抑制PAC降解。

2.1.2 配方优化与性能评价

通过在相似地层条件下的12个钻孔中实验,验证了孔壁稳定性与滤失量、泥皮厚度、页岩膨胀降低率关系密切,总结出具体指标,优化KPAM、 $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ 、XC、超细碳酸钙、PAC-LV等处理剂的加量,达到最佳护壁效果。极差分析表明:配方中对滤失量影响最大的是PAC-LV,对抑制性影响最大的是KPAM,对泥皮厚度影响最大的是超细碳酸钙^[13]。

确定最优配方(质量分数,以水为基数):清水1 m³+钠膨润土2%~4%+ Na_2CO_3 (膨润土质量的3%~5%,预水化用)+KPAM 0.1%~0.2%+ $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ 0.5%~1.5%+超细碳酸钙(800目)1.5%~3.0%+磺化沥青1.0%~2.0%+PAC-LV 0.3%~0.5%+随钻堵漏剂0.3%~0.5%(备用)+石墨润滑剂0.5%~1.0%(全孔连续取心时按1.0%加入)。预水化后用NaOH调节pH值至9.0~9.5,依次加入处理剂。

室内性能(新浆静置24 h,常温常压):密度1.06~1.08 g/cm³、漏斗黏度28~32 s、API滤失量8.5~9.0 mL/30 min、泥皮厚度0.5~0.7 mm(致密坚

韧,黏聚力约8~10 kPa)、页岩膨胀降低率78%(相比清水,24 h线性膨胀)、砂床侵入深度(20/40目砂,0.7 MPa,30 min)2.8 cm。80℃热滚16 h后性能衰减率<10%,与皖北矿区1800 m孔底温度(约75~80℃)匹配。

对比常规低固相冲洗液(4%膨润土+0.3% CMC+0.2% PHP):本体系API滤失量(8.5~9.0 mL/30 min)显著低于后者(18 mL/30 min);泥皮厚度(0.5~0.7 mm)薄于后者(1.2 mm)且致密性提高;页岩膨胀降低率(78%)较后者(42%)提升36个百分点,抑制防塌与降滤失护壁性能更优^[14]。

2.1.3 现场维护要点

与其他降失水剂配合,冲洗液材料充分水化后,滤失量会进一步降低。循环使用过程中,如发现冲洗液某一方面性能不足,可在原浆中加入针对性化学处理剂,使冲洗液性能达到要求指标,确保孔壁稳定,钻速正常。

冲洗液性能维护要点:

(1)每2 h检测漏斗黏度、密度、滤失量、pH值;每8 h检测全套性能及含砂量;

(2)每钻进20~30 m,补充0.05%~0.1% KPAM和0.5%~1.5% $\text{NH}_4\text{-HPAN}$,以弥补固相控制中对聚合物的损耗;

(3)当滤失量>5 mL/30 min时补充0.3% PAC-LV,>7.0 mL/30 min时补充0.5% PAC-LV;当黏度下降>5 s,补充0.1% KPAM或0.3~0.5% PAC-HV。

(4)使用三级固控(振动筛+除砂器+离心机),控制含砂量<0.4%,密度<1.16 g/cm³。

(5)穿越黏土层前,提前50 m将KPAM浓度提高至0.3%;穿越砂层前,提前30 m将超细碳酸钙提高至2.0%。

(6)若地层变化频繁而难以实施分级护壁,则应以最不稳定地层的稳定为优先控制目标^[15]。

2.2 钻进参数优化

2.2.1 钻头与钻具组合

2.2.1.1 钻头选择

黏土层、砂层、砾石层可选三翼刮刀钻头(硬合金齿)或PDC钻头(浅锥形、 $\Phi 13/19$ mm复合片)。前者不易泥包(需控制钻压以防孔斜),后者进尺快。

成孔方式有两种:先小径取心后大径扩孔,或条

件允许时取心钻进一径成孔。取心钻进推荐阶梯式底喷PDC钻头,可采用提钻取心或绳索取心^[16]。

2.2.1.2 钻具组合

(1)全面钻进或扩孔:Ø152 mm钻头+Ø127 mm钻铤×4根+Ø89 mm加重钻杆×2根+Ø73 mm API钻杆。规格及数量视孔径、孔深调整。

(2)提钻取心:Ø135 mm取心钻头+Ø127 mm岩心管+Ø135 mm扩孔器+Ø130 mm接头+Ø121 mm钻铤×4根(36 m)+Ø73/Ø60.3 mm钻杆。

(3)绳索取心:Ø127 mm取心钻头+Ø127.5 mm(螺旋)下扶正器+Ø118 mm取心钻具外管(内管Ø91 mm)+Ø127.5 mm(螺旋)上扶正器+Ø114.3 mm(杆体)/Ø120 mm(接头)绳索取心钻杆+Ø127 mm。

钻杆扶正器(间距9 m,设2~4个)+Ø114.3 mm绳索取心钻杆+Ø89 mm主动钻杆。

黏土层占比较高时,钻头外径可加大至Ø135 mm。松散层厚度>500 m时,可采用Ø152 mm全面钻具组合,在取心后分段扩孔以消除缩径。

2.2.2 参数区间优化

在皖毫地1井开展参数分段试验,每套参数组合钻进30 m,记录转速、泵压、扭矩及孔壁稳定情况,综合得出最优参数区间(见表5),表中环空返速是在满足井眼清洁的前提下,理论设计值。频繁变层时,泥浆性能应以满足最不稳定地层的护壁需求为主,钻进参数亦相应兼顾。表中推荐参数适用于以某单一地层为主的绳索取心钻进工况,实际操作中灵活调整。

表5 不同岩性的推荐钻进参数

岩性	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/kN	泵量/(L·min ⁻¹)	相对环空返速/(m·s ⁻¹)	提钻速度/(m·s ⁻¹)
黏土	120~300	10~15	300~500	2.0~3.0	≤0.15
粉质黏土	120~300	8~14	200~400	1.5~2.5	≤0.15
粉砂	100~250	8~12	200~300	1.5~2.0	≤0.15
细砂	80~220	10~14	150~200	1.0~1.5	≤0.15
中粗砂	60~180	12~16	80~150	0.5~1.0	≤0.10
砾石层	40~120	8~12	60~120	0.4~0.8	≤0.10
砂质泥岩	120~300	10~15	200~500	1.5~3.0	≤0.10
泥质砂岩	80~220	8~12	200~300	1.5~2.0	≤0.15

2.2.3 参数与孔壁失稳的定量关系

采用井径仪实施孔径测井,取松散层全段各测点孔径算术平均值作为实测平均孔径,按下式计算孔壁稳定系数 K_{up} :

$$K_{up} = \frac{\text{实测平均孔径}}{\text{钻头直径}}$$

该指标越接近1,孔壁完整性越好,地层缩径、垮塌程度越轻微;数值越小,地层缩径失稳风险越高。

基于多组现场试验数据拟合,建立砂层段孔壁稳定系数与冲洗液性能、钻孔直径、粗径钻具外径、钻孔曲率、提钻速度的经验关系式,模型拟合决定系数 $R^2=0.87$:

$$K_{up} = 1 - \left[u \cdot \left(\frac{v_{up}^2}{D_h - D_p} \right) + \frac{\theta}{30} + 0.8\eta + 0.2\gamma \right]$$

式中: u ——冲洗液综合扰动系数,无量纲,取值区

间0~1; v_{up} ——提钻速度,m/s; D_h ——实测钻孔平均直径,mm; D_p ——粗径钻具外径,mm; θ ——钻孔曲率,(°)/30 m; η ——冲洗液塑性黏度相对值,实测塑性黏度/20 mPa·s,无量纲; γ ——泥皮摩擦系数,无量纲,取值区间0.05~0.3。

当 $K_{up}<0.7$ 时,地层缩径发育显著,孔壁失稳概率大幅提升。施工过程中提钻速度执行硬性上限约束: $v_{up}\leq 0.5$ m/s。即便经验公式计算得到的孔壁稳定系数处于安全区间,实际起钻作业仍不得超速,避免环空瞬时压力激动扰动孔壁。提钻速度越低,压力激动效应越微弱,现场施工需兼顾孔壁稳定与钻进效率。

2.3 分层护壁与漏卡处理工艺

2.3.1 分层套管程序设计

根据地层稳定性及失稳类型,将第四系及下部松散层划分为三个工程层段,采用不同的护壁方式:

(1)0~50 m(松软粉质黏土、粉砂):表层套管固井刚性护壁。浅层地层松散易垮塌,下入 $\Phi 244.5 \times 10.03$ mm表层套管坐于埋深 ≥ 50 m稳定黏土层;采用密度 $1.75 \sim 1.80$ g/cm³水泥浆全段固井,水泥浆返至地面,加固浅层不稳定地层。

(2)50~400 m(硬塑黏土、细砂互层,缩径、坍塌频发):技术套管护壁。该段孔壁失稳风险高,下入 $\Phi 193.68 \times 9.53$ mm技术套管至埋深 ≥ 380 m致密黏土层,采用孔底水泥塞固井或悬挂工艺;遇强缩径地层时,先用 $\Phi 168$ mm钻头扩孔,再下入 $\Phi 146 \times 5.5$ mm套管,环空间隙约11 mm,确保套管顺利下放。

(3)400 m至基岩接触面(中粗砂、砾石、松软泥岩与砂岩互层,渗透性强、易漏失):冲洗液柔性护壁。本段采用裸眼钻进,依靠冲洗液实现孔壁防护。冲洗液预先掺入质量分数1%~2%随钻堵漏剂封堵地层孔隙,现场储备复合堵漏浆液,发生渗漏时及时堵漏,保障孔壁稳定。

2.3.2 堵漏技术

漏失是砂层、砾石层失稳的前兆。一旦出现泵压突降(降幅 >1 MPa)、返出量减少($>20\%$)或钻速突然加快(岩屑见粗粒),立即执行以下程序:

(1)判断漏失类型:停止钻进,上提钻具至漏失层以上20 m,循环观察。泵压稳定、返出量持续偏低为渗透性漏失;泵压波动、返出量时有时无为裂隙性漏失。

(2)配制堵漏浆(以裂隙性漏失为例):取现场冲洗液1 m³,加入CMC-HV 1.5%、锯末(1~3 mm)2%、核桃壳(2~5 mm)1%、单向压力封闭剂(DF-1)1.5%,搅拌均匀备用。

(3)堵漏操作:将堵漏浆泵入漏失段(泵入量按段长估算),泵完后上提钻具至安全位置,静止2~4 h。下钻至漏失段以上5 m,以小泵量(50~150 L/min)循环,逐步增至正常。返出量恢复则继续钻进;仍漏失则重复上述步骤或改注水泥浆。裂隙性漏失还可增加高黏堵漏剂及惰性材料加量。

试验案例:某地质勘查孔在680 m中粗砂层发生渗透性漏失,泵入3 m³堵漏浆后静止3 h,漏失完全消除,后续钻进未再发生。

2.3.3 卡钻与坍塌处理预案

松散层钻进中,与地层特性相关的常见孔内事故为“两卡一埋”。

2.3.3.1 缩径卡钻

征兆:提钻阻力逐渐增大,泵压缓慢上升。

处理:立即停止提钻,下放钻具8~10 m,小排量顶通2~3个循环周后,逐渐加大泵量至300~500 L/min,同时上下活动钻具(幅度1~2 m,频率10次/min)。30 min内无效时,配制定量解卡液(5% NaOH + 2% KCl + 0.3% XC),泵入卡钻段,浸泡2 h后尝试正转(扭矩 ≤ 15 kN·m)并上提。

2.3.3.2 泥皮黏附卡钻

发生条件:钻具静止 >0.5 h,孔斜较大、孔深 >200 m,位于泥岩、砂岩、石膏层、破碎带等易吸水膨胀或透水性强的孔段,且冲洗液性能较差(滤失量大、含砂量高、pH值低等)。该类事故冲洗液可正常循环,为处理创造了条件。

预防:冲洗液滤失量 <5 mL/30 min, K^+ 、 NH_4^+ 含量 >20000 mg/L;钻具静止 ≤ 15 min/次,活动范围 >3 m;设备故障检修前将钻具提至套管内或孔口。

处理:判断卡点位置(多发生在粗径钻具处,主要原因为环空间隙小、接触面积大,黏附力强)。一旦发生,立即开泵循环,大幅度上提下压并尝试转动钻具。无效时,在原配方基础上将烧碱或纯碱加量加倍,配制足量解卡液,泵入卡钻孔段静止等待,每隔15~30 min泵入顶替液15~30 L,2 h后每隔0.5~1.0 h活动钻具一次。轻微卡钻约2 h见效,严重者8~24 h解卡。

2.3.3.3 坍塌埋钻

处理:先大排量循环带出掉块。循环不畅时使用卷扬或拔管器强力起拔;仍无效时判断卡点位置,采用爆炸松扣后下入套铣筒清理,或使用反丝钻杆倒扣取出上部钻具后套铣清理。无法彻底处理时,注入水泥浆固结后侧钻。

事故统计:上述情况在试验孔未发生,对比孔FJ03发生过一次,处理耗时7 d。

3 工程应用效果

3.1 试验方案

选取FJ03、JSFJ-02两个孔作为对照孔;FJ02、LQFJ-03两个钻孔作为试验孔,松散层厚度分别为1380、1350、1375、1358 m。设计孔深分别为1800、1600、1800、1600 m(孔底连续100 m取10个样做单轴抗压强度测试,最小抗压强度 ≥ 15 MPa为终孔指

标)。试验孔采用本文研发的综合技术,对照孔采用常规技术(4%膨润土+5%Na₂CO₃+0.3%KPAM泥浆,苏式漏斗黏度35~45 s,密度1.06~1.10 g/cm³,滤失量12~16 mL/30 min;钻进参数凭经验;下表层套管后裸眼钻进)。所有钻孔由统一型号设备和取心工艺施工,为减少操作水平差异,机长、班长统一培训。

本项目所用设备机具见表6、图1。

表 6 主要设备机具一览

名 称	型 号	产 地	能 力	备 注
钻机	XY-8 C	张家口	114.3 mm 钻杆 1800 m	
钻塔	A-27/90	石家庄	额定承载能力 90 t	
泥浆泵	BW-300/12 B	衡阳	P 口径 2000 m	
钻杆、钻具	Ø114.3 mm	唐山	P 口径 2500 m	绳索取心
取心钻头	Ø133.4 mm	北京	3000 m 以内	定制
离心机	FDLW450-842	沧州	40 m ³ /h	主电机 18.5 kW
振动筛	FZS225I	沧州	180 m ³ /h	
测斜仪	JB Y-5G(W)	上海景华	2000 m	
六速黏度计	WT-ZNN-D6	北京		
其他	泥浆材料	阳谷		



图 1 厚松散层钻进施工现场

3.2 护壁与提效实施过程

从开孔至进入基岩 2 m,记录以下数据:每班冲洗液性能及消耗量(1次/2 h);每 2 m 记录钻进参数;每次提下钻记录阻力变化、遇阻位置及灌浆情况、事故原因及处理情况、下套管情况等。关键施工数据汇总如下:

(1)冲洗液性能:密度 1.12~1.16 g/cm³,漏斗黏度 23~35 s,塑性黏度 10~18 mPa·s,动切力 6~12 Pa,动塑比 0.4~0.6;API 滤失量 4~5 mL/30 min,泥皮厚度 0.15~0.25 mm,泥皮摩擦系数 0.06;pH 值 8.5~9.5,含砂量 0.1%~0.2%,有效膨润土含量 2.0%~3.0%,初切力 3~5 Pa、终切力 6~10 Pa。

(2)提钻控制:速度 0.10~0.15 m/s,每提 3 根立根(54 m)灌浆一次或连续回灌。

(3)分层套管:原设计 0~155 m 下 Ø193.68 mm

套管、0~420 m 下 Ø146 mm 技术套管。优化冲洗液性能后,除 0~6 m 下 Ø339.7 mm 孔口管(根据取心直径可下入一层技术套管)外,其余裸眼取心钻进至设计孔深。

(4)钻头选型:泥岩与砂岩互层、岩性变化频繁,设计使用广谱型 PDC 取心钻头(图 2)。施工中先后试用 12 种钻头,综合钻效无明显差异,表明冲洗液性能和钻进参数是提效主要手段。

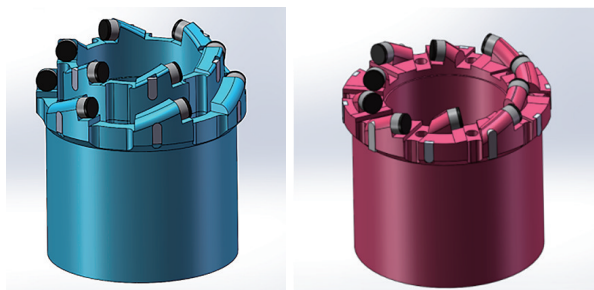


图 2 松散层取心钻头

(5)钻进参数监测:使用可靠仪表监测,控制范围:钻压 5~18 kN,转速 40~300 r/min,泵量 150~500 L/min,泵压<5 MPa 且波动<1.0 MPa,扭矩<3000 N·m 且波动<5%。孔浅或不稳时取小值,孔深或稳定时取大值。泵压波动>1.0 MPa、最大泵压>5 MPa 且持续>3 min,或扭矩波动>20%且持续>1 min 时,须查明原因及时消除,禁止强行钻进。

(6)事故预防:该区域黏土属强水敏性,易缩径

卡钻,受成本、工艺(一孔两用)及环保限制,不宜随意下套管。除优质冲洗液护壁外,采取分段扩孔工艺:每取心钻进200~300 m或每次提钻换钻头时,用 $\varnothing 152$ mm PDC 导向钻头扩孔,消除缩径风险。此措施每孔多耗5~7 d,但节约套管及冲洗液材料成本,降低事故率,整体工期及总成本明显降低,已推广应用。

3.3 效果对比

由表7可知,试验孔冲洗液材料成本增加2.88万元,增幅28.6%;但工期缩短65 d,节约工期成本39.0万元,综合节省成本36.12万元,单孔总成本降低约20%。

试验孔均一次顺利成孔,保障了勘探进度与岩心采取率(松散层平均97.5%,高于合同要求的85%)。

表7 试验孔与对照孔关键指标对比

指标	松散层平均厚度/m	缩径事故率 (孔数/比例)/%	坍塌、漏失事故率(孔数/比例)/%	单孔平均事故处理时间/h	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)	平均台月效率/(m·台月 ⁻¹)	平均孔壁稳定系数	冲洗液材料成本/(元·m ⁻¹)
对照孔	1365	50(2/4)	50(2/4)	124	1.28	312(第一个月最大820 m)	0.51	36
试验孔	1366.5	25(1/4)	25(1/4)	0	1.70	498(第一个月最大916 m)	0.89	72
改善幅度		↓50%	↓50%	↓100%	↑32.8%	↑59.62%	↑74.5%	↑100%
备注		试验孔未造成误工	试验孔随钻堵漏,未造成误工					试验孔综合成本降低28.6%

3.4 对照孔案例分析

3.4.1 实例1:FJ03孔缩径卡钻处理

发生原因:钻进至1294.94 m提钻换钻头时,粗径钻具在815 m处遇阻(新近系泥岩,蒙脱石含量26%)。开泵循环,泵压先稳于2 MPa(5 min)后升至3 MPa;转动或窜动钻具时泵压骤升至8 MPa,无法上提。

黏土水化膨胀,加之提钻速度偏快(0.4 m/s),抽吸作用使缩径段抱紧钻具。

处理措施:

- (1)立即停泵,下放钻具2 m(至817 m),松弛卡点以上钻柱;
- (2)配制解卡液5 m³(5% NaOH+2% KCl+0.3% XC),泵入卡点;
- (3)浸泡8~16 h,期间每15~30 min小范围活动钻具(幅度0.1~0.3 m);
- (4)以10 kN·m扭矩正转,缓慢上提,连续回灌泥浆,成功起钻。

事后检查发现,812~818 m段有黏土黏附,改进措施为,提钻速度 ≤ 0.20 m/s,进入黏土层前将KPAM浓度提至0.3%。后续未再卡钻。

3.4.2 实例2:FJ02孔漏失与堵漏

发生原因:钻进至680 m(Q₁中粗砂层,渗透系数 ≈ 25 m/d),泵压由4 MPa突降至2.2 MPa,返出量减少30%,岩屑中粗砂颗粒增多、棱角分明、大小不一。判断为渗透性漏失诱发局部坍塌。

处理措施:

- (1)停钻,上提钻具至650 m(漏失层以上30 m);
- (2)配制复合堵漏浆3 m³(配方见2.3.2),泵入漏失段,泵速50~150 L/min,泵压平稳;
- (3)泵完后上提钻具至630 m,静止3 h;
- (4)下钻至660 m,以200 L/min循环,返出量逐渐恢复,泵压稳定于3.8 MPa;
- (5)逐步增至300 L/min,继续钻进。

后续每钻进50 m补充0.5%随钻堵漏剂,未再漏失。

4 结论与推广建议

(1)深厚松散层孔壁失稳是“泥皮破损→滤失侵入→膨胀/剥落→连锁失效”的动态过程。控制滤失量(≤ 5 mL/30 min)并形成高质泥皮(厚度0.15~0.25 mm,黏聚力 > 8 kPa)是护壁关键。

(2)研发的KPAM+NH₄-HPAN+PAC-LV+超细碳酸钙复合冲洗液体系,实现了强抑制(页岩膨胀降低率78%,较常规PHP冲洗液提高86%)、低滤失(≤5 mL/30 min)、致密封堵(砂床侵入<3 cm)的协同效应。

(3)优化钻进参数(根据孔深、环空间隙选择):黏土层转速120~300 r/min、砂层100~220 r/min,泵量150~500 L/min,提钻速度≤0.15 m/s;配合“分层护壁+随钻封堵+短程提钻”工艺,使孔壁稳定系数从0.51升至0.89(深厚覆盖层很难大于1,0.89属于“工程可接受的动态平衡状态”),事故处理时间减少100%,机械钻速提高32.8%。

(4)该技术已在皖北地区多个钻孔成功应用,综合成本降低约20%,均一次成孔,松散层岩心平均采取率97.5%,满足规范要求。可推广至华北黄河冲积平原、汾渭地堑、长江中下游等厚第四系覆盖区的固体矿产勘探、地热钻探及工程地质勘察。

(5)后续研究建议:①针对高矿化度地下水环境,优化抗盐冲洗液配方;②开发随钻孔壁稳定监测装置(如环空压力、井径实时成像),实现风险预警;③研究环保型泥浆体系(如甲酸盐/聚胺),降低对土壤及地下水的影响。

参考文献:

[1] 刘建平,周策,罗超.第四系松散层孔壁失稳机理及防塌技术综述[J].地质科技情报,2018,37(2):235-241.

- [2] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):21-26.
- [3] 谢雄,高斌.黏土层钻进存在的问题分析与采取的措施[J].钻探工程,2025,52(S1):375-380.
- [4] 孙振添,邹志飞,何铁柱,等.双聚防塌钻井液在北京某地热井中的应用研究[J].钻探工程,2025,52(4):121-128.
- [5] 刘蓓,蔡正水,杨可,等.塞上金矿复杂地层深孔岩心钻探技术[J].钻探工程,2023,50(S1):240-245.
- [6] 朱迪斯,赵洪波,刘恩然,等.长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程难点及对策分析[J].钻探工程,2022,49(5):11-21.
- [7] 郑洪涛.嵩县某金矿区复杂地层强抑制防塌泥浆技术[J].钻探工程,2022,49(4):81-86.
- [8] 王胜,欧兴贵,解程超,等.钻井利器故事之“护壁堵漏材料”[J].钻探工程,2024,51(3):118-124.
- [9] 王胜,潘安邦,向杰,等.基于响应面试验的深厚覆盖层植物胶成膜冲洗液体系研究[J].钻探工程,2026,53(5):121-130.
- [10] 蔡正水,王强,刘兵,等.小口径金属矿产勘探钻探关键技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(S1):186-192.
- [11] 孙平贺,曹函,张绍和.聚合物泥浆在砂卵石层中的护壁机理[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(5):1276-1282.
- [12] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新.强水敏性地层泥浆抑制剂优选与性能评价[J].地质科技通报,2022,41(1):287-293.
- [13] 刘振新,孙宏晶,田志超,等.黄河三角洲区域地面沉降监测钻孔施工实践[J].钻探工程,2025,52(S1):283-288.
- [14] 张伟,胡郁乐,乌效鸣.深厚松散层钻探泥浆护壁技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):1-7.
- [15] 王志祥,欧涛,韩庆.绳索取心钻孔堵漏新工艺研究[J].钻探工程,2025,52(S1):193-198.
- [16] 李之军,陈礼仪,王胜.第四系强水敏性地层钻井液技术[J].石油钻探技术,2018,46(4):45-50.

(编辑 王文)