

黏土层钻进存在的问题分析与采取的措施

谢雄, 高斌

(江西省地质局第七地质大队, 江西 赣州 341000)

摘要:在黏土层钻进中易出现缩径、崩塌、黏附卡钻等事故,以及泥包钻头、憋泵现象;且黏性土层具有一定的造浆能力,从而改变了冲洗液的性能参数,影响钻进效率以及岩心采取质量。通过对所钻黏土的力学特性、水化机理,自然造浆对冲洗液性能参数、钻进效率及岩心采取率的不利影响的深入分析,对钻头唇面结构、岩心采取方式、冲洗液性能参数、钻进工艺等进行了改进和优化,从而提高了黏性土层钻进效率和岩心采取质量,降低了钻进成本。

关键词:黏性土层;缩径;黏附卡钻;泥包钻头;岩心保护;油包水冲洗液

中图分类号:P634;U212.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0375-06

Problem analysis and countermeasures for drilling in cohesive soil layer

XIE Xiong, GAO Bin

(The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Provincial Geological Bureau, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: During drilling in cohesive soil layer, accidents such as shrinkage, collapse, adhesion and drilling rod stuck, are prone to occur, as well as mud-packing drill bits and pump choking-up, and the soil layer has a certain slurry-making ability, which changes the performance parameters of the flushing fluid and affects the drilling efficiency and the quality of the core. Through in-depth analysis of the mechanical properties, hydration mechanism of the soil, the performance parameter's detrimental influence of slurry-making to flushing fluid, drilling efficiency and core recovery percents, the improvement and optimization to the bit kerf structure, core recovery form, flushing fluid performance parameter and drilling technology and so on are carried out, thereupon improving the drilling efficiency in the soil layer and reducing the drilling cost.

Key words: cohesive soil layer; shrinkage diameter; adhesion and drilling sticking; bit balling; core protection; oil-contained water flushing fluid

0 引言

在2024年的新建宜昌至涪陵高速铁路五峰(不含)至恩施南(含)段木栗隧道工程地质勘察钻探施工中,常遇地表浅部黏性土层,黏性土层易出现黏附卡钻等事故,钻进效率低;黏性土层钻进在一开时,往往孔径大,钻头钻具扭矩较大,钻机动力费用单位成本高;黏性土层遇水软塑,岩心原状性有一定程度的破坏,这些问题常常被忽视^[1]。本文从钻头、取心工具、冲洗液这3方面深入探究,并加以优化和改进。

1 黏性土的力学特性与钻头设计

黏性土是指塑性指数 >10 的土,透水性小,有黏性,可胀塑。钻头是通过硬质合金或PDC刀刃对钻头底部黏土施加扭矩切力,使黏土产生破坏,从而切削钻头底部黏土。黏聚力和内摩擦角是黏土抗剪强度两大指标,法国库伦于1776年提出库伦定律^[2],对于黏性土库伦公式为式(1):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ ——土的抗剪强度,kPa; c ——土的黏聚力,kPa; σ ——剪切面上法向应力,kPa; φ ——土的内摩擦角,°。

抗剪强度与法向压应力的关系见图1。

收稿日期:2025-04-23;修回日期:2025-07-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.061

第一作者:谢雄,男,汉族,1969年生,高级工程师,探矿工程专业,从事钻探工程技术研究工作,江西省赣州市红旗大道25号,xiexiong@163.com。

引用格式: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.

XIE Xiong, GAO Bin. Problem analysis and countermeasures for drilling in cohesive soil layer[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1): 375-380.

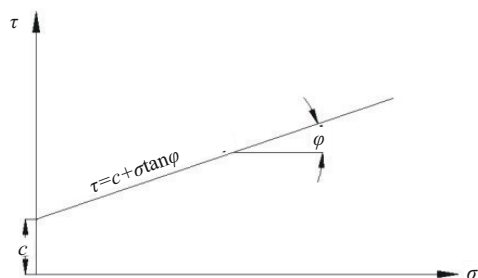


图1 抗剪强度与法向压应力关系

在直剪试验中,正应力 σ 增大,切应力 τ 也随之增大;对于某一给定正应力 σ ,随着水平位移 S 的增加,切应力 τ 增大到一峰值,表明土体已发生剪切破坏,切应力 τ 随后逐渐减小并趋于一定值^[2],如图2。

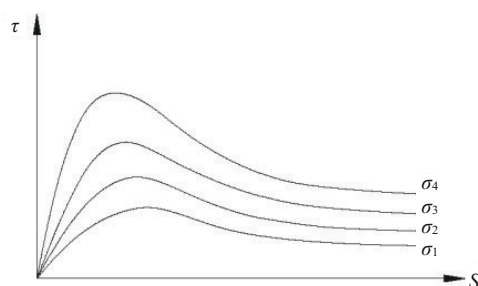


图2 切应力与位移的关系

在黏土层钻进,往往采用直焊方式的钻头,即硬质合金或PDC垂直镶焊钻头底端面,在钻头回转钻进中,钻头底部刀刃对回转方向前方土体施加应力,土中某点两侧围压为 σ_y , $\sigma_x = \sigma_y + \Delta\sigma$,轴向应力 σ_z 由于刀刃前方存在水口, $\sigma_z = 0$,见图3。当土中某点处于极限平衡状态时,破裂面与大主应力作用面的夹角(破裂角 α_t)为 $45^\circ + \varphi/2$ 。随着刀刃的回转,产生破裂面的土体向两侧挤压,两侧围压 σ_y 进一步加大,根据公式(1),土体两侧抗剪强度 τ_y 随之增大,因此钻头底部刀刃对回转方向前方土体所需施加的压力并未减小,破裂面土体也未从围土中快速切削剥离。

为了达到快速切削,避免产生破裂面的土体向两侧挤压,唯有使产生破裂面的土体斜向上向水口移动,则刀刃必需有一向上的推力,为此就需要对直焊方式的钻头改为正前角镶焊(见图4)。

对于正前角镶焊的钻头,刀刃前的土体首先沿图3中的 m - n 破裂面产生剪切破坏,随刀刃回转,刀

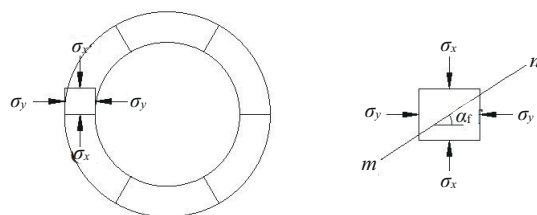


图3 土中某点的应力关系

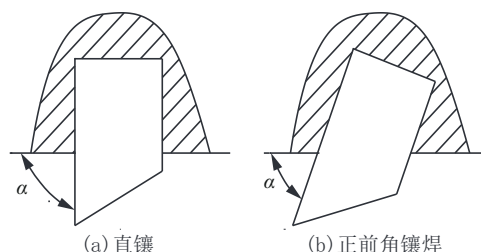


图4 硬质合金的镶焊方式

刃对前方破裂土体沿刀刃前斜面的法向施加斜向上向前推力,前方破裂土体对两侧虽有挤压,但挤压效应大为减弱,围压 σ_y 的增量相比直镶焊钻头钻进有所减小,前方破裂土体两侧抗剪强度 τ_y 也有所减小,前方破裂土体则更易快速切削,钻头的回转所需扭矩也随之减小。

直镶的刀刃与钻头底面的夹角是 90° ,黏性土易聚结于刀刃前直面,造成黏附卡钻。为避免此种情况,夹角 α 应设计成 $<90^\circ$ 的锐角,刀刃前方黏性土斜向上快速切削剥离,并被冲洗液上返携带至孔外,此夹角 α 应与水口协同设计,如图5。图5夹角 α 设计成圆弧,避免黏土堆积黏附,被切削的土体颗粒由流经刀刃前水口的钻进液冲洗上返。

在2024年的新建宜昌至涪陵高速铁路五峰(不含)至恩施南(含)段木栗隧道工程地质勘察中,工程地质钻探17个钻孔,共计7937.76 m工作量,地表覆土为黄褐色黏土,厚度较厚。在黏性土层钻进中,分孔采用了直焊和正前角镶焊两种硬质合金钻头。根据数据统计,正前角镶焊钻头的钻进每米时效提高了23%,泥包钻头黏性土量减少了25%,两种钻头施工效果对比见表1。

2 黏性土岩心采样过程的分析与保护

黏性土层钻进,单动双管取心钻具在易堵塞内外管间水路,因此大都采用单管钻具,黏土岩心在岩心管内直接被冲洗液冲刷,同时在钻进中常常存在缩径、崩塌、泥包钻头,水路堵塞等现象,往往会

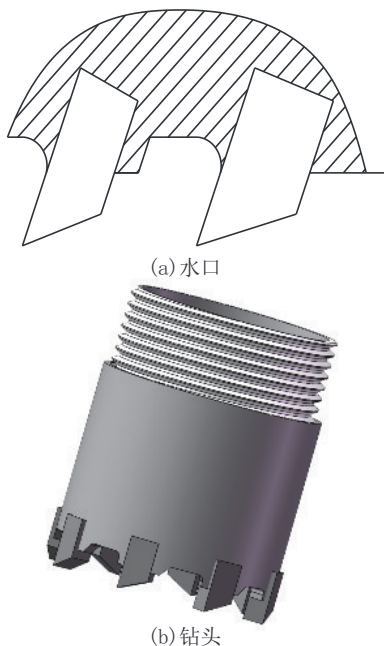


图5 正前角镶焊钻头夹角与水口

表1 两种钻头施工效果对比

钻头类型	总孔数/个	总层厚/m	平均每米钻进时效/(m·h ⁻¹)	平均钻头泥包量/kg
直焊钻头	5	126	1.54	1.2
正前角镶焊钻头	12	289	1.89	0.9

加大泵压,黏土岩心的冲刷破坏进一步加剧,岩心的原状性,完整性难以得到保障,进而影响岩土勘察中土层的物理力学性质指标。

对于黏性大,塑性强,遇水膨缩,怕冲刷的黏土钻进,可采用活动分水投球钻具,其缺点是在提卸钻杆时,钻杆内的冲洗液会在拆卸的钻杆接头端口喷出^[3-4]。因此加以改进,如图6所示。

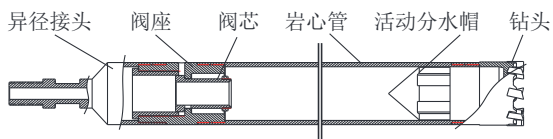


图6 活动分水钻具总成

改进后的活动分水钻具总成由钻头、活动分水帽,岩心管、阀座、阀芯,异径接头组成。在钻进时,冲洗液流经岩心管内的活动分水帽时,冲洗液经活动分水帽的槽口分流,沿岩心管内壁流至钻头水口,避免了岩心被冲洗液直接冲刷。随着钻进,岩

心不断推动活动分水帽上升;当活动分水帽上被上推到阀芯底端口时,阀芯又被活动分水帽顶推,阀芯底端水口被堵塞,此时泵压升高;继续钻进,阀芯侧面水口与阀芯水口接通,冲洗液流向岩心管外,见图7,活动分水帽顶推阀芯后水路流向,此时泵压降底,表明岩心采满需提钻;在提钻过程中,钻杆内的冲洗液会不断向钻具外溢,钻杆内的冲洗液也不断减少,避免了提卸钻杆时,钻杆内的冲洗液会在拆卸的钻杆接头端口喷出;同时,钻杆内的冲洗液与岩心隔离,避免了因冲洗液水柱压力过大,造成岩心从岩心管内脱落。

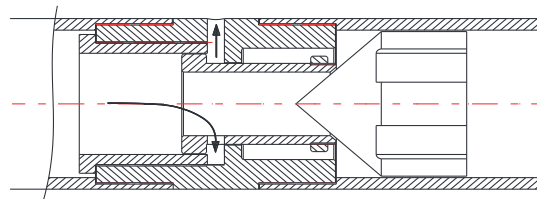


图7 活动分水帽顶推阀芯后水路流向

现场采样对比见图8,采用活动分水钻具采样方式的岩心,其原状性好于采用普通单管钻具采样方式的岩心。



(a) 采用普通单管钻具采样方式的岩心



(b) 采用活动分水钻具采样方式的岩心

图8 现场采用对比情况

3 水基钻进液在黏性土层钻进存在的问题及油性钻进液的应用

在黏性土层钻进,采用水基钻进液,往往存在缩径、崩塌、黏附卡钻以及泥包钻头,憋泵等现象。

钻孔缩径的主要原因:

(1)黏性土主要是含水的硅铝酸盐构成,化学式为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。黏土水化,一是黏土表面上的 H^+ 和 OH^- 通过氢键吸附水分子,再是通过所吸附的可交换性阳离子间接吸附水分子。黏土中可交换的阳离子如钠离子在水中解离形成扩散双电层,使片状结构表面带负电,由于静电斥力,带负电的片状结构自行分开而引起黏土膨胀,导致孔径缩小^[5]。

(2)地层被钻开后,横向自由度增加,在上覆地层压力,以及黏土层吸水软化膨胀作用下,发生径向塑性变形,引起缩径。

(3)钻遇黏土层时,含蒙脱石的地层吸水后黏土水化分散进入泥浆体系,加大泥浆稠度和度黏土遇水造浆,固相含量变高,会在孔壁形成较厚泥皮,致使钻孔孔径缩小。

黏附卡钻,泥包钻头的原因是黏性土水化后黏性极强,切削物成泥团状,并牢牢地黏附在钻头及岩心管等钻具上,甚至堵住水路,引起憋泵。

油基冲洗液是油作为连续相的冲洗液,油基冲洗液又分为全油基冲洗液和油包水乳冲洗液两种^[6]。全油基冲洗液含水量 $<10\%$,油包水乳化冲洗液含水量为 $10\% \sim 60\%$ 。在黏性土层钻进,采用油基钻进液,油基冲洗液含水量小,黏土水化作用减弱,吸水膨胀和黏性也有所减弱,流变性好,抑制性强能够较好解决径、崩塌、黏附卡钻以及泥包钻头等问题^[7]。

由于全油基冲洗液成本较高^[8],因此采用油包水乳冲洗液。油包水乳冲洗液的主要材料有:基油、乳化剂、盐水、润滑剂、亲油胶体、石灰。基油采用柴油、原油或废机油,对生态环境影响较大,采用以异丙醇改性地沟油为基油更环保。以异丙醇改性地沟油为外相、食盐水为内相,通过复配表面活性剂,制得油包水乳化型冲洗液。地沟油是一种价廉的资源,其利用不仅有利于减少环境污染,还有利于降低处理剂的生产成本,可生物降解,对环境无污染^[9];同时具有良好的润滑性、耐高温性、抗冻性、耐盐性;以及具有良好的沉降稳定性和电稳

定性能,可有效抑制黏土膨胀和分散、降低滤失量、增强抗盐污染能力。

以异丙醇改性地沟油为基油的油包水乳冲洗液,以异丙醇改性地沟油为连续相; NaCl 盐水为水相,用以控制地层的水化作用,抑制黏土矿物的膨胀率^[10-12];烷基磺酸钙为主乳化剂,分散连续相,使两种互不相溶的液体(如油和水),形成稳定的油包水乳状液^[13-14];羧甲基纤维素钠为辅助乳化剂,其本身不具备独立的乳化能力,但可以与主乳化剂协同作用,通过增加乳状液的黏度、调节界面性质或与主乳化剂形成复合膜等方式,间接提升乳状液的稳定性,进一步增强乳状液的稳定性或改善其性能^[15];氮杂石墨烯作为润滑剂^[16];石灰的作用是促进乳化和控制冲洗液的PH值。

配方优选采用正交试验,正交试验法也叫正交试验设计法,用“正交表”来安排和分析多因素试验的一种数理统计方法^[17]。这种方法的优点是试验次数少,效果好,方法简单,使用方便,效率高。在研究比较复杂的问题中,往往都包含着多种因素。把准备考察的有关影响试验指标的条件称为因素,例如配方中的组分。把在试验中准备考察的各种因素的不同状态称为水平,例如配方试验中某组分的不同含量(或比例)。为了寻求最优化的生产条件,就必须对各种因素以及各种因素的不同水平进行试验,这是多因素优选的问题。

基浆由改性地沟油与 $25\% \text{NaCl}$ 水溶液按80:20的比例配制,正交试验采用4因素3水平设计正交表,见表2,正交试验结果见表3,正交试验极差分析见表4~7,表中,4因素分别为A(烷基苯磺酸钙)、B(羧甲基纤维素钠)、C(氮杂石墨烯)、D(石灰)。

表2 油包水乳冲洗液因素及水平值设定 (kg/m^3)

序号	烷基磺酸钙	羧甲基纤维素钠	氮杂石墨烯	石灰
	A	B	C	D
1	50	14	6	30
2	55	10	12	50
3	40	12	9	60

根据正交试验各指标和极差分析,黏附系数的最优水平组合为A1C1B3D1,润滑系数的最优水平组合为C2A2B1D2,流变性的最优水平组合为

表 3 正交试验测试结果									
试 验 号	因素				试验结果				
	A	B	C	D	黏附系数/ (Pa·s)	润滑系 数	流变性 (动切 力)/Pa	膨胀量/ [mm·(4 h) ⁻¹]	
1	1	1	3	2	8.5×10 ⁻³	0.26	11.2	2.4	
2	1	2	1	1	7.9×10 ⁻³	0.31	11.0	3.2	
3	1	3	2	3	8.6×10 ⁻³	0.28	11.9	2.8	
4	2	1	2	1	9.0×10 ⁻³	0.24	12.1	3.6	
5	2	2	3	3	8.8×10 ⁻³	0.28	12.6	2.9	
6	2	3	1	2	8.0×10 ⁻³	0.30	12.2	3.2	
7	3	1	1	3	9.2×10 ⁻³	0.32	12.4	3.0	
8	3	2	2	2	9.4×10 ⁻³	0.27	11.6	3.5	
9	3	3	3	1	8.9×10 ⁻³	0.29	11.4	4.2	

表 4 正交试验黏附系数极差分析									
	A	B	C	D					
K1	25.0×10 ⁻³	26.7×10 ⁻³	25.1×10 ⁻³	25.8×10 ⁻³	Σ78.3× 10 ⁻³				
K2	25.8×10 ⁻³	26.5×10 ⁻³	27.0×10 ⁻³	25.9×10 ⁻³					
K3	27.5×10 ⁻³	25.5×10 ⁻³	26.2×10 ⁻³	26.6×10 ⁻³					
$\bar{K}1$	8.33×10 ⁻³	8.90×10 ⁻³	8.37×10 ⁻³	8.60×10 ⁻³					
$\bar{K}2$	8.60×10 ⁻³	8.83×10 ⁻³	9.00×10 ⁻³	8.63×10 ⁻³					
$\bar{K}3$	9.17×10 ⁻³	8.50×10 ⁻³	8.73×10 ⁻³	8.87×10 ⁻³					
因素优 水平	A1	B3	C1	D1					
Rj	0.84×10 ⁻³	0.40×10 ⁻³	0.63×10 ⁻³	0.27×10 ⁻³					
主次 顺序	A1C1B3D1								

表 5 正交试验润滑系数极差分析					
	A	B	C	D	
K1	0.85	0.82	0.93	0.84	Σ2.51
K2	0.80	0.86	0.79	0.83	
K3	0.88	0.87	0.83	0.88	
$\bar{K}1$	0.283	0.273	0.310	0.280	
$\bar{K}2$	0.267	0.287	0.263	0.277	
$\bar{K}3$	0.293	0.290	0.277	0.293	
因素优水平	A2	B1	C2	D2	
Rj	0.026	0.017	0.047	0.016	
主次顺序	C2A2B1D2				

A1D1C3B2,膨胀量的最优水平组合为 A1D3B1C1。在各指标的最优水平组合不完全一致的情况下,依据 4 项最优水平组合的主次顺序,可以确定 A(烷基苯磺酸钙)是主要因素,对黏附系数、流变性和膨胀

表 6 正交试验流变性极差分析					
	A	B	C	D	
K1	34.1	35.7	35.6	34.5	Σ106.4
K2	36.9	35.2	35.6	35.0	
K3	35.4	35.5	35.2	36.9	
$\bar{K}1$	11.37	11.90	11.87	11.50	
$\bar{K}2$	12.30	11.73	11.87	11.67	
$\bar{K}3$	11.80	11.83	11.73	12.30	
因素优水平	A1	B2	C3	D1	
Rj	0.93	0.17	0.14	0.80	
主次顺序	A1D1C3B2				

表 7 正交试验膨胀量极差分析					
	A	B	C	D	
K1	8.4	9.0	9.2	11.0	Σ28.8
K2	9.7	9.6	9.9	9.1	
K3	10.7	10.2	9.5	8.7	
$\bar{K}1$	2.80	3.00	3.07	3.67	
$\bar{K}2$	3.23	3.20	3.30	3.03	
$\bar{K}3$	3.57	3.40	3.17	2.90	
因素优水平	A1	B1	C1	D3	
Rj	0.77	0.4	0.23	0.77	
主次顺序	A1D3B1C1				

量的影响排第一位,而且 A1 都是最优。C(氮杂石墨烯)对润滑系数的影响排第一位,且 C2 最优。综合考虑,取 A1C2B3D1 为最优水平组合。

在 2024 年的新建宜昌至涪陵高速铁路五峰(不含)至恩施南(含)段木栗隧道工程地质勘察中,采用油包水乳冲洗液配方:800 L/m³改性地沟油、25% NaCl 水溶液 200 L/m³、烷基磺酸钙 50 kg/m³、烷基羧甲基纤维素钠 10 kg/m³、氮杂石墨烯 9 kg/m³、石灰 30 kg/m³。与之前采用水基冲洗液钻探施工效果对比情况见表 8。

工程实践表明,在黏土层钻进,采用以异丙醇改性地沟油为基油的油包水乳冲洗液较采用水基冲洗液,钻速有较大提高,对易出现缩径、黏附卡

表 8 油、水基冲洗液施工效果情况对比					
冲洗液 类型	平均钻速/ (m·h ⁻¹)	泥包钻头 泥质量/kg	井壁缩 径/mm	正常钻进 泵压/MPa	泥皮 质量
水基	1.54	1.2	6	4.2	松软
油基	2.87	0.5	2	2.9	致密、 坚韧

钻,以及泥包钻头等现象有明显改善。

4 结论

(1)黏土层钻进,易出现缩径、崩塌、黏附卡钻等事故,以及泥包钻头、憋泵现象。可以从对黏土的矿物成分、力学特性、水化机理等着手分析,找出合理可行的钻进方法和钻进工艺。

(2)根据钻进黏土层的破碎过程力学特性,正前角镶焊的钻头要优于直焊方式的钻头。在2024年的新建宜昌至涪陵高速铁路五峰(不含)至恩施南(含)段木栗隧道工程地质勘察中,工程地质钻探17个钻孔的钻进实践对比,也表明正前角镶焊的钻头钻进每米时效有较大提高,泥包钻头现象有较大改善。

(3)改进后的活动分水钻具总成,避免了岩心在岩心管内被冲洗液直接冲刷破坏,保证了岩心的原状性,大幅提高了岩心的采取率。

(4)采用油基冲洗液,油基冲洗液含水量小,黏土水化作用减弱,吸水膨胀和黏性也有所减弱,流变性好,抑制性强能够较好解决缩径、崩塌、黏附卡钻以及泥包钻头等问题。

(5)以异丙醇改性地沟油为基油的油包水乳冲洗液大幅度降低钻井液处理剂的生产成本,且有利于减少环境污染。利用正交试验,可以快速较低试验成本找出油包水乳冲洗的各因素最优组合。

参考文献:

[1] 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.

[2] 张克恭,刘松玉.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

[3] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.

[4] 谢雄,郭鹏浩,等.难取芯地层的钻探技术研究[J].探矿工程,2017,5:70-3.

[5] 代万庆,薛艳,颜巧云.水敏性地层钻探泥浆性能优化及配制[J].钻探工程,2021,48(11):22-28.

[6] 陶士先,付帆.地质钻探冲洗液技术[M].北京:地质出版社,2015.

[7] 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.

[8] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.钻井液水活度对页岩井壁稳定性影响的实验研究——以秀山龙马溪组页岩为例[J].钻探工程,2022,49(3):1-12.

[9] 王中华.国内钻井液处理剂研究进展,现状分析与发展建议[J].钻井液与完井液,2025,42(1):1-19.

[10] 王森,陈乔,刘洪,等.页岩地层水基钻井液研究进展[J].科学技术与工程,2013,13(16):4597-4602.

[11] 邱正松,钟汉毅,黄维安.新型聚胺页岩抑制剂特性及作用机理[J].石油学报,2011,32(4):678-682.

[12] 蒲晓林,罗兴树,李燕梅,等.甲酸盐与无机盐抑制性的比较评价[J].油田化学,2000(2):104-106.

[13] 唐国旺,宫伟超,于培志.强封堵油基钻井液体系的研究和应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):21-25.

[14] 董悦,盖姗姗,李天太,等.固相含量和密度对高密度钻井液流变性影响的实验研究[J].石油钻采工艺,2008,30(4):36-40.

[15] 张立新,刘瑞.高密度油基钻井液在阳101H3-6井长水平段的应用[J].钻探工程,2021,48(7):79-83.

[16] 张鸿鹄.油基钻井液用氮杂石墨烯的研制与应用[J].钻井液与完井液,2024,41(3):279-287.

[17] 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2019.

(编辑 王文)