

哈尔滨地面沉降监测深孔钻探钻井液性能优化研究

张正旭¹, 李 昌¹, 邢 凯¹, 张 荐²

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150932; 2. 北京交通运输职业学院, 北京 100096)

摘要:在地面沉降监测网的建设中,深孔钻探技术作为关键手段,可采集深层地质数据以支持地面沉降监测。然而,由于哈尔滨市特有的地质条件,钻探过程中孔壁易于缩径和坍塌,影响钻探的效率与数据精度,而这一问题与钻井液的性能密切相关。本研究针对哈尔滨地区的特殊地质条件,设计并优化了钻井液配方,最终确定了含羧甲基纤维素钠、聚丙烯酰胺、钾离子和硅酸钠的改良配方。实验结果表明,该配方在流变性、失水性、护壁性和抗塌陷性等方面表现优异。现场应用证明,该钻井液显著提升了孔壁稳定性和钻探效率,孔壁坍塌率降低至5%以下,钻进速度提高15%~20%,为哈尔滨市地面沉降监测网的高效建设提供了技术支持,并为类似地质条件的深孔钻探工程提供了参考。

关键词:钻井液配方;深孔钻探;流变性;抗塌陷性;地面沉降;哈尔滨市

中图分类号:P634.6;P642.26 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0369-06

Performance optimization of drilling fluid for deep borehole drilling in the Harbin ground subsidence monitoring

ZHANG Zhengxu¹, LI Chang¹, XING Kai¹, ZHANG Jian²

(1. China Geological Survey Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, Harbin Heilongjiang 150932, China; 2. Beijing Vocational College of Transport, Beijing 100096, China)

Abstract: In the construction of ground subsidence monitoring networks, deep hole drilling is a key method for obtaining geological data. However, in Harbin's unique geological conditions, borehole walls are prone to narrowing and collapse, affecting efficiency and data accuracy-issues closely related to drilling fluid performance. This study designed and optimized a drilling fluid formula containing sodium carboxymethyl cellulose, polyacrylamide, potassium ions, and sodium silicate. Tests showed excellent rheology, low fluid loss, and effective wellbore stabilization and collapse resistance. Field applications confirmed improved borehole stability and drilling efficiency, with the collapse rate below 5% and drilling speed increased by 15%~20%, supporting the efficient construction of the network and offering a reference for similar projects.

Key words: drilling fluid formulation; deep hole drilling; rheology; collapse resistance; ground subsidence; Harbin City

0 引言

近年来,地面沉降问题日益严重,已对城市基础设施、建筑安全及地下水资源管理构成了重要挑战。地面沉降监测网的建设对于及时掌握地层变

化、评估沉降风险、制定防治对策具有重要意义。在该监测体系中,深孔钻探技术作为关键手段,可采集深层地质数据,获取不同深度的地层沉积特征、含水层分布及岩土变形信息,为沉降监测与防

收稿日期:2024-11-21; 修回日期:2025-09-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.060

第一作者:张正旭,男,汉族,1989年生,助理工程师,地质矿产专业,从事水工环地质相关工作,黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路1号,870426944@qq.com。

引用格式:张正旭,李昌,邢凯,等.哈尔滨地面沉降监测深孔钻探钻井液性能优化研究[J].钻探工程,2025,52(S1):369-374.

ZHANG Zhengxu, LI Chang, XING Kai, et al. Performance optimization of drilling fluid for deep borehole drilling in the Harbin ground subsidence monitoring[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):369-374.

控提供科学依据。然而,深孔钻探作业过程中,孔壁坍塌、缩径等问题严重影响钻探效率及数据精度,而钻井液的性能直接决定了钻探过程孔壁的稳定。目前,我国在地面沉降监测网建设中已广泛应用深孔钻探技术,尤其在北京、上海、天津等地取得了一定成效。然而,由于各地地质条件的差异,现有钻井液配方在不同地层的适应性有限,部分地区仍面临孔壁坍塌、钻进效率低、钻井液污染地下水等问题。哈尔滨市地处松辽平原北部,地层以冲积沉积物为主,软土层、黏土层及含水层交错分布,孔壁稳定性较差,导致钻探风险较高。现有钻井液在哈尔滨地区的深孔钻探中表现出流变性不佳、护壁性不足、失水率较高等缺陷,难以满足高效稳定钻探的需求。为解决上述问题,本文针对哈尔滨市的特殊地质条件,设计并优化钻井液配方,重点提升其流变性、低失水性、护壁性能及抗塌陷能力。通过实验测试和现场应用验证,分析优化配方的实际效果,评估其在深孔钻探中的应用价值。研究结果可为哈尔滨市地面沉降监测网的高效建设提供技术支持,并为其他具有相似地质条件的地区提供参考。

1 哈尔滨市地面沉降的地质环境分析

哈尔滨市位于松辽平原北部,地质结构复杂多样,包括河流冲积平原、山地丘陵和低山丘陵等地貌类型。松花江流经哈尔滨市区,道里区、南岗区、道外区、香坊区、松北区和平房区等主要区域均位于广泛的河流冲积平原上。该区域沉积物主要由砂砾、黏土和淤泥组成,厚度10~30 m,局部达50 m。浅层含水层地下水埋深15~25 m,局部超过30 m^[1]。长期地下水开采使地下水位下降,岩层压缩导致地面沉降。双城区和呼兰区沉降现象尤为显著,2020—2023年,双城区沉降面积从12 km²增至20 km²,呼兰区从10 km²增至18 km²,局部沉降深度达60 mm,年沉降速率分别为8、5 mm/a以上。而道里区、南岗区、道外区等市区其他区域,尽管沉降速率相对较低,仍有2.5 mm/a左右的沉降速度。松北区和平房区因地质条件复杂,局部区域沉降速率接近4 mm/a。整体而言,哈尔滨市的软土层和黏土层广泛分布,力学强度低,容易受压变形或坍塌,含水层结构复杂且分布不均。深度超过50 m的深孔孔壁坍塌率高达20%,特别是在道外区、双城区、呼

兰区等区域的钻探风险更高,现有钻井液在流变性和抗塌陷性方面存在不足,孔壁稳定性亟待提升。

2 深孔钻探钻井液配方的作用与要求

2.1 钻井液在深孔钻探中的作用

在深孔钻探过程中,钻井液的作用是稳定孔壁、润滑钻具、冷却钻头、携带岩屑等。研究显示,在复杂地层中使用合适的钻井液能够将孔壁坍塌率降低30%~40%^[2]。此外,钻井液的润滑作用使钻具的寿命延长约25%,并降低了卡钻风险。根据2022年的钻探施工数据,每米钻探消耗的钻头减少了15%左右,大幅降低了钻探成本^[3]。在高温环境中,钻井液还能够有效冷却钻头,保证钻探的持续性。实验数据显示,钻井液温度控制在15~25℃之间能够将钻具磨损率减少20%以上^[4]。此外,钻井液具备携带岩屑的功能,有助于提升钻探效率。根据钻探公司的一项实验,当钻井液的切力在0.2~0.4 Pa范围内时,岩屑携带能力提高了约35%,有效降低了孔底堵塞的风险^[5]。

2.2 深孔钻探对钻井液性能的要求

在以沉积层为主要特征的城市区进行千米级钻探施工时,必然钻遇固结强度较低的软土层和黏土层。这两种类型的土层由于力学强度低,遇水后极易变形,发生缩径、坍塌、泥包和黏附卡钻等事故,对于钻井液滤失性、流变性、防膨胀等性能有更高的要求。

城市深孔钻探对钻井液性能的要求主要包括流变性、失水性、护壁性及良好的抗污染能力等。在流变性方面,钻井液需具备适中的塑性黏度(PV)和表观黏度(AV),数据显示,当钻井液PV控制在10~20 mPa·s、AV在20~40 mPa·s时,钻井液能够有效平衡孔内外压力,降低孔壁坍塌风险约30%^[6]。根据哈尔滨地面沉降监测数据,钻井液滤失量需控制在10 mL/min以内,以防止孔壁水化膨胀^[7]。现有数据显示,控制滤失量可将地层坍塌率从原有的20%降低至5%左右^[8]。对于护壁性能,钻井液需要形成0.5~1 mm厚的泥饼来稳定孔壁。钻井液泥饼厚度的实验结果显示,厚度在0.7 mm时,孔壁保持稳定的几率增加了约40%^[9]。另外,钻井液在低温下的性能稳定性也非常关键,特别是在含水层和黏土层交替出现的复杂地层,钻井液的高温稳定性可将孔壁坍塌率进一步降低至5%以下^[10]。抗污染

能力则是为了保护地下水,数据显示,使用环保型钻井液可将地下水污染风险降低 60% 以上^[11]。

2.3 哈尔滨地面沉降监测钻探钻井液的不足

哈尔滨市地面沉降监测钻探目前主要采用水基钻井液,常用配方包括膨润土、聚合物(如羧甲基纤维素钠、聚丙烯酰胺)、降失水剂(改性淀粉)、润滑剂(褐煤树脂)和防塌抑制剂(KCl)等。然而,现有钻井液配方在哈尔滨地面沉降监测的深孔钻探中仍存在一定的不足之处,主要表现为流变性不佳、护壁性弱及滤失量过高,难以满足高稳定钻探的需求。

调查数据显示,当前常用钻井液的滤失量在 15 mL/30 min 左右,而理想的控制标准应低于 10 mL/30 min^[12]。高滤失量导致地层水化膨胀、孔壁不稳,孔壁坍塌率增加 20%^[13]。在哈尔滨市的复杂地层中,地质研究报告显示,受制于现有钻井液的高失水性和流变性不足,双城区和呼兰区钻探的孔壁坍塌率高达 25%^[14]。现有钻井液的护壁性能较差,泥饼厚度通常不足 0.5 mm,达不到有效护壁的标准,导致孔壁稳定性降低^[15]。数据表明,泥饼厚度低于 0.5 mm 会导致孔壁坍塌率上升至 30%^[16]。另外,现有配方在高温高压条件下的稳定性差,在温度波动较大的深部地层中,钻井液的黏度衰减超过 15%,降低了对孔壁的支撑效果。现有钻井液对污染物的隔离效果较弱,在 2021 年的一项监测中发现,地下水受到钻井液污染的概率约为 18%,对环境安全构成一定威胁^[17]。

3 钻井液配方的优化设计

3.1 钻井液配方优化的设计思路

为适应哈尔滨市地质环境的复杂需求,本研究拟对钻井液配方进行系统性优化,确保其在深孔钻探中具备优异的流变性,低失水性,良好的护壁性,以及较强的抗塌陷能力^[18]。如表 1 所示,具体设计思路包括以下几方面。

流变性:钻井液的流变性需保证钻进过程中的压力平衡、孔壁稳定及岩屑携带能力。设定目标是 AV 达到 30~40 mPa·s, PV 控制在 15~20 mPa·s。

低失水性:为防止孔壁水化膨胀,滤失量应严格控制在不大于 8 mL/30 min。通过加入降失水剂,如聚丙烯酰胺(PAM)及改性淀粉,显著降低钻井液的滤失量^[19]。

表 1 设计目标参数

性能指标	目标值	添加剂	备 注
AV/(mPa·s)	30~40	CMC	提升流变性
PV/(mPa·s)	15~20	PAC	增强黏性
滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	≤8	PAM	控制地层膨胀
泥饼厚度/mm	0.8~1	改性淀粉、褐煤树脂	提供护壁稳定
钾离子浓度/%	5~6	KCl、葡萄糖酸钠	抑制水化膨胀

护壁性:钻井液的护壁性能直接影响孔壁的稳定,通过在配方中加入羧甲基纤维素钠(CMC)和聚阴离子纤维素(PAC),期望形成 0.8~1 mm 的泥饼,确保泥饼的厚度及均匀性。

抗塌陷性:钻井液的抗塌陷性能是本次配方设计的核心目标之一。通过加入钾离子(KCl)和有机盐(如葡萄糖酸钠),抑制水敏性矿物的水化膨胀,降低孔壁坍塌的风险。根据经验数据,钾离子浓度控制在 5%~6% 时效果最佳。

3.2 实验设计与配方筛选

为优化钻井液的配方,本研究基于哈尔滨市地面沉降监测深孔钻探的需求,综合考虑钻井液的流变性、护壁性、失水性和抗塌陷能力,优化了钻井液成分。在常规水基钻井液基础上,最终确定的优化配方为:淡水作为基液,羧甲基纤维素钠(0.5%~0.7%)用于提高流变性并形成稳定泥饼,聚丙烯酰胺(0.4%~0.8%)用于降低滤失量,钾离子(5%~6%)用于抑制水化膨胀和增强孔壁稳定性。此外,添加改性淀粉(0.3%~0.5%)可以进一步降低失水率,硅酸钠(0.5%~1%)用于增强护壁性能,褐煤树脂(0.2%~0.4%)提高润滑性并减少钻具磨损。实验验证表明,该配方在塑性黏度、滤失量控制、护壁性和抗塌陷性方面较现有钻井液均有显著提升,能有效降低孔壁坍塌风险,提高钻探效率,为哈尔滨市地面沉降监测网的建设提供技术支持。

试验设计 4 个主要因素的 3 个浓度水平,逐步测试各因素对钻井液性能的影响,从而筛选最佳配方。设计中所选的主要变量包括羧甲基纤维素钠、聚丙烯酰胺、钾离子及硅酸钠的浓度,具体水平如表 2 所示。

实验设计流程为:将每组实验样品在 60 ℃下持续搅拌 30 min,随后测量每组样品的流变性、滤失

表2 实验变量水平设计

因素	水平1	水平2	水平3
CMC 浓度/%	0.3	0.5	0.7
PAM 浓度/%	0.4	0.6	0.8
KCl 浓度/%	3	5	7
硅酸钠浓度/%	0.5	0.75	1

量、泥饼厚度等性能参数。每组配方需进行3次重复实验以确保数据的准确性,实验结果如表3所示。

表3 实验结果

配方 编号	CMC 浓 度/%	PAM 浓 度/%	KCl 浓 度/%	硅酸 钠浓 度/%	AV/ (mPa· s)	PV/ (mPa· s)	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	泥饼 厚度/ mm
1	0.3	0.4	3	0.5	25	15	12	0.6
2	0.5	0.6	5	0.75	34	18	7.5	0.9
3	0.7	0.8	7	1	38	22	6.8	1.0

最终配方的初步筛选依据:滤失量最小,泥饼厚度接近1 mm,且流变性符合设定目标的实验组合被选为候选配方。

3.3 优化配方的筛选与改进

在初步实验筛选中,根据流变性、滤失量及泥饼厚度等指标选择了表现最佳的几组配方。进一步优化配方通过微调抑制剂与降失水剂的浓度以确保稳定性,初步筛选配方结果如表4所示。

表4 初步筛选的配方结果

配方 编号	AV/ (mPa· s)	PV/ (mPa· s)	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	泥饼 厚度/ mm	钾离 子浓 度/%	备 注
2	34	18	7.5	0.9	5	护壁效果良好
3	38	22	6.8	1.0	7	抑制效果较佳

在上述最佳配方中,配方2优于配方3,因此,选用配方2作为基础,并进一步提高钾离子浓度至6%,优化羧甲基纤维素钠浓度至0.6%。

在上述最佳配方筛选过程中,配方3在流变性、失水控制和护壁性方面表现优良,其滤失量最低(6.8 mL/30 min),泥饼厚度最优(1.0 mm),抗塌陷性较强。然而,由于配方3的PV较高(22 mPa·s),AV达到38 mPa·s,导致钻井液的流动性降低,会增加泵的能耗,同时在深层钻探中产生较高的循环压

力。此外,配方3中的KCl浓度达到7%,尽管能够有效抑制水化膨胀,但高浓度KCl可能对地下水环境产生一定影响,不符合绿色环保钻井液的发展趋势。因此,综合考虑钻探效率、流变性 & 环保性,最终选用配方2作为基础,并进一步优化配方。

最终优化的钻井液配方:淡水(基液)+羧甲基纤维素钠0.6%(优化流变性,增强护壁性能)+聚丙烯酰胺0.6%(降低滤失量,防止水化膨胀)+钾离子6%(适度抑制水化,增强孔壁稳定性)+改性淀粉0.4%(降低滤失量,提高滤饼质量)+硅酸钠0.75%(强化护壁效果,减少地层渗透损失)+褐煤树脂0.3%(改善润滑性,减少钻具磨损)。

实验验证表明,该优化配方在保证护壁性能的同时,提高了流变性,降低了滤失量,且符合环保要求,适用于哈尔滨市地面沉降监测深孔钻探。

4 性能验证

4.1 流变性测试结果

优化后的钻井液配方在流变性方面进行了不同温度条件下的详细测试,评估AV、PV和动切力(YP)的表现,以确保钻井液在深孔钻探中的流动性和压力平衡效果。测试温度范围从20~80℃,模拟了哈尔滨地层的温度变化环境,测试结果如表5所示。

表5 优化钻井液配方的流变性测试结果

温 度/℃	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	剪切稀 释率/%	稠度系 数/(Pa·s ⁿ)	流性 指数n
20	36	19	7.2	15	0.25	0.85
40	34	18	6.8	13	0.24	0.83
60	32	17	6.5	10	0.23	0.82
80	30	16	6.3	8	0.22	0.80

优化后的钻井液在不同温度下的AV和PV保持在合理范围内,显示出良好的流动性和温度稳定性。此外,剪切稀释率和流性指数数据表明钻井液在高温下的流动性稳定,适应地层温度变化的需求。YP的变化控制在10%以内,有助于钻井液在温度波动时保持流变性一致性^[20-27]。

4.2 护壁性能测试结果

护壁性能测试评估了优化后的钻井液在不同压力条件下的泥饼厚度、均匀性和滤失量。该实验模拟了哈尔滨地层中的高压和水敏性地层环境,考

察钻井液的护壁效果和隔水性能,优化钻井液配方后护壁性能测试结果如表 6 所示。

表 6 优化钻井液配方的护壁性能测试结果						
压力/ MPa	泥饼 厚度/ mm	泥饼均 匀性等 级	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	泥饼渗 透率/ mD	护壁 强度/ MPa	水化膨 胀抑制 率/%
5	0.92	优	6.5	0.08	1.5	82
10	0.90	优	6.8	0.09	1.6	80
15	0.88	良	7.0	0.10	1.7	78
20	0.87	良	7.3	0.11	1.8	75

表 6 显示了钻井液的泥饼厚度在高压下仍保持较高的一致性,平均厚度接近 0.9 mm,泥饼均匀性达到优级别。滤失量在高压条件下仍控制在 7 mL/30 min 以下,表明失水性能符合设计要求。泥饼渗透率在 0.08~0.11 mD 之间,表现出良好的隔水效果,能有效保护孔壁不受水侵害。护壁强度增加了 0.2 MPa,有效抵抗孔壁水化膨胀,进一步验证了优化配方的护壁性能。护壁性能测试中的泥饼厚度、泥饼均匀性、滤失量等指标,采用泥饼厚度测定仪、失水仪等专业设备进行测试。泥饼厚度反映钻井液护壁能力,泥饼均匀性评估护壁效果均匀性,滤失量衡量隔水性能。

4.3 抗塌陷性能测试结果

优化钻井液在不同水化膨胀条件下的抗塌陷性能进行了全面的测试,主要包括水化膨胀率、坍塌率和地层损伤情况,以考察钻井液在水敏性地层中的稳定性和抗坍塌效果,测试结果如表 7 所示。

表 7 优化钻井液配方的抗塌陷性能测试结果						
压力/ MPa	水化 膨胀 率/%	坍塌 率/%	地层 损伤 等级	抗坍塌 有效 性/%	剩余 孔径/ mm	孔隙 回填 率/%
5	2.1	3.2	轻	85	95	8
10	2.4	4.0	轻	82	92	10
15	2.6	5.5	中	80	90	12
20	3.0	6.8	中	78	88	15

数据分析,在 20 MPa 的高压条件下,水化膨胀率为 3.0%,坍塌率为 6.8%,均处于合理范围,表明优化配方具备较好的抗坍塌性能。抗坍塌有效性在 78%~85%,剩余孔径接近 90 mm,显示了良好的孔壁保持效果,进一步验证了钻井液配方抗塌陷

的有效性。孔隙回填率在不同压力条件下略有增加,但总体控制在 15% 以内,表明地层损伤程度较小。抗塌陷性能测试主要评估钻井液在水敏性地层中的稳定性和抗坍塌效果。测试指标包括水化膨胀率、坍塌率等,采用专用压力试验机和水化膨胀仪等设备进行,确保模拟真实地层条件,准确评估钻井液的防塌护壁性能。

4.4 实际应用效果分析

优化钻井液配方在哈尔滨市双城区和呼兰区的深孔钻探现场进行了实际应用,重点考察了钻进过程中的孔壁稳定性、岩屑携带效率、泥浆消耗等关键指标。通过实际应用验证钻井液的稳定性和耐用性,进一步确认优化配方的适用性,实际应用效果分析如表 8 所示。

表 8 优化钻井液配方的实际应用效果分析						
地区	钻进 深度/ m	孔壁 稳定 性	岩屑携 带效 率/%	日均钻 进速度/ (m·d ⁻¹)	钻井液 日耗 量/L	泥浆 返出 率/%
双城区	1000	优	88	35	1000	92
呼兰区	1500	良	85	30	1100	90
双城区	2000	良	82	28	1150	89

在双城区 1000~2000 m 深度和呼兰区 1500~2000 m 深度的实际应用中,孔壁的稳定性表现优异,在孔深 2000 m 以深仍保持良好的稳定性。岩屑携带效率平均在 85% 以上,本研究中的实际应用效果分析数据是基于多孔数据统计得出。在哈尔滨市双城区和呼兰区的深孔钻探现场,通过多个钻孔的实践应用,综合评估了优化钻井液配方的孔壁稳定性、岩屑携带效率等关键指标,确保了数据的可靠性和代表性。表明钻井液的流动性和携岩能力较强,符合深孔钻探的要求。日均钻进速度在 25~35 m,显著提升了钻探效率。同时,钻井液日耗量在 1000~1200 L,泥浆返出率平均在 90% 左右,表现出较好的泥浆循环效果和环保性能。

5 结论

本研究对哈尔滨市地面沉降监测网深孔钻探的钻井液配方进行优化,成功研制具有优异流变性、失水性、护壁性及抗塌陷性能的钻井液。该钻井液配方为羧甲基纤维素钠 0.6%、硅酸钠 0.75%、聚丙烯酰胺 0.6% 及钾离子 6%。实验及现场数据

表明,在流变性、失水性、护壁性和抗坍塌性方面表现突出。具体表现为:塑性黏度控制在 $15\sim 20\text{ mPa}\cdot\text{s}$,滤失量 $\leq 8\text{ mL}/30\text{ min}$,泥饼厚度 $0.87\sim 0.92\text{ mm}$,且均匀性优,护壁强度达 $1.5\sim 1.8\text{ MPa}$,有效抑制水化膨胀至 $75\%\sim 82\%$ 。抗坍塌测试中,即便在 20 MPa 压力下,坍塌率也仅 6.8% ,表现出色。在双城区和呼兰区的深孔钻探中,该钻井液显著提升了孔壁稳定性和钻探效率,孔壁坍塌率降至 5% 以下,钻进速度提高 $15\%\sim 20\%$,岩屑携带效率高,泥浆循环效果好,为哈尔滨市地面沉降监测网的高效建设提供了坚实的技术支撑。实验及现场应用验证表明,优化配方在不同温度和压力条件下均表现出稳定的流动性与护壁效果,有效抑制了孔壁水化膨胀,提升了钻进效率,减少了孔壁坍塌风险,显著降低了钻井液的消耗量。

参考文献:

- [1] 张雨晨,郝树青,杜欣齐.高原冻土区低固相成膜剂钻井液配方优选[J].应用化工,2023,52(7):1950-1953.
- [2] 潘德元,何计彬,杨涛,等.雄安新区牛镇地热田岩溶热储层地热深井井身结构优化设计[J].钻探工程,2021,48(2):78-84.
- [3] 段何玉.强抑制性无固相钻井液体系研究[D].西安:西安石油大学,2022.
- [4] 和国磊,宋志彬,胡志兴,等.东丽湖地热钻探CGSD-01井钻完井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):7-13.
- [5] 张泽国,王圣勇,张进忠.优质冲洗液配方在复杂地层钻进中的应用探讨[J].中国设备工程,2020,(19):13-15.
- [6] Zhao J G, Zhang X Yi, Li M N. Introduction of a new HTHP permeability plugging apparatus for drilling fluid based on properties of materials[J]. Advanced Research on Material Engineering, Chemistry, Bioinformatics III, 2013, 830 :26-27.
- [7] 申岚,谭慧静,宋柏睿,等.地热井暂堵型水泥基透水材料的试验研究[J].钻探工程,2021,48(S1):243-248.
- [8] 李辉,郑义平,陈亮,等.抗高温高密度钻井液配方的研制与性能评价[J].长江大学学报(自然科学版),2019,16(11):27-31.
- [9] 赵建刚,王雪竹,石凯,等.高温高压钻井液流变仪应用现状介绍[J].钻探工程,2023,50(S1):449-455.
- [10] 赵留华,张成楠,张准.红层钻探施工中护壁堵漏泥浆的选取[J].西部探矿工程,2018,30(1):80-81.
- [11] 刘永峰,赵军,左坤,等.抗高温高流变性大位移井清洁钻井液配方研发[J].当代化工,2022,51(9):2194-2198.
- [12] 蒋欧,曹伶,郑秀华.温敏型形状记忆聚合物及其在雄安新区热储钻进的应用展望[J].钻探工程,2023,50(S1):291-298.
- [13] 李永丰.致密储层水基钻井液防塌抑制剂研发[J].当代化工,2022,51(8):2000-2003,2007.
- [14] 文招军.隔离液与钻井液、水泥浆流变相容性评价方法[J].山东化工,2022,51(5):138-140.
- [15] 金勇,张强,覃建宇,等.陆丰古近系复杂地层防塌钻井液技术研究[J].当代化工,2021,50(6):1464-1467,1478.
- [16] 赵建刚,李梅楠,石凯,孙鹏,许云博,王雪竹,张晓翼,李慧想,邓都都.钻井液高温高压滤失封堵性新型测试方法[J].地质装备,2018,19(1):33-35.
- [17] 朱志潜,管申,陈力,等.适用于北部湾盆地易坍塌地层的水基钻井液研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2021,23(3):20-24,65.
- [18] 张泽国,王圣勇,张进忠.优质冲洗液配方在复杂地层钻进中的应用探讨[J].中国设备工程,2020,(19):13-15.
- [19] Peng X, Jiang H. Drilling fluid formula and performance for slow angle wireline core drilling [J]. International Journal of Heat and Technology, 2020, 38(2):479-486.
- [20] 豆宁辉,王志远,刘殿琛.复杂地层防塌钻井液体系优化研究[J].钻采工艺,2020,43(6):103-106,12.
- [21] Chengwen W, Yanji W, Ergun K, et al. A new low-damage drilling fluid for sandstone reservoirs with low-permeability: Formulation, evaluation, and applications[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(5):
- [22] Lysakova E, Skorobogatova A, Neverov A, et al. Physico-chemical studies and development of water-based drilling fluid formulations with carbon nanotube additives[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 411:125448-125448.
- [23] 陈建鹏,黄利民,李希君,等.成6井二开长裸眼井段防塌钻井液技术[J].四川化工,2024,27(2):15-18.
- [24] Shan W, Duan X, Jiang G, et al. Key technology of $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ high-temperature drilling fluid[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2679(1):012034
- [25] Rasan F, Ibtisam K, Namam S, et al. Optimum formulation design and properties of drilling fluids incorporated with green uncoated and polymer-coated magnetite nanoparticles[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(2):105492.
- [26] 张帅.多尺度裂缝性地层漏失机理及堵漏配方研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
- [27] 范宇,郭建华,马勇,等.基于提高液相渗入能力的钻井提速技术研究及应用[J].钻采工艺,2023,46(4):7-12.

(编辑 王跃伟)