

# 焦页 197-4HF 井油基钻井液技术

蔡巍<sup>1</sup>, 龚厚平<sup>1</sup>, 邵兆美<sup>1</sup>, 王亚宁<sup>1</sup>, 赵世贵<sup>2</sup>, 石水健<sup>1</sup>, 申效莲<sup>1</sup>, 嵇绍吾<sup>1</sup>

(1.中石化华东石油工程有限公司江苏钻井公司,江苏扬州 225000;  
2.荆州市学成实业有限公司,湖北荆州 434000)

**摘要:**焦页 197-4HF 井是涪陵页岩气田平桥南区 197 平台的一口三开制大位移开发水平井。该井长水平段位于志留系龙马溪组页岩地层,在钻井施工中面临着极大挑战,一是长水平井段易形成岩屑床,扭矩摩阻大;二是页岩易水化膨胀,造成井壁失稳;三是页岩地层微裂隙发育,钻井液滤失量大。为保证钻井施工正常进行,前期通过室内对比实验,优选出了合适油基钻井液配方。现场使用情况表明,优选出的钻井液配方完全满足现场施工要求,安全顺利地完成了三开长水平段作业。

**关键词:**页岩气;油基钻井液;井壁稳定;润滑性

**中图分类号:**P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0028-06

## Oil-based drilling fluid technology for Well Jiaoye 197-4HF

CAI Wei<sup>1</sup>, GONG Houping<sup>1</sup>, SHAO Zhaomei<sup>1</sup>, WANG Yanning<sup>1</sup>,  
ZHAO Shigui<sup>2</sup>, SHI Shuijian<sup>1</sup>, SHEN Xiaolian<sup>1</sup>, JI Shaowu<sup>1</sup>

(1.Jiangsu Drilling Branch, Sinopec East China Petroleum Engineering Company, Yangzhou Jiangsu 225000, China;  
2.Jingzhou Xuecheng Industrial Limited Company, Jingzhou Hubei 434000, China)

**Abstract:** Jiaoye 197-4HF was a three-section long reach horizontal well drilled from the No.197 platform in the Fuling Pingqiao Shale Gas Field. The long horizontal section of the well was located in the shale member of Longmaxi Formation in Silurian. Great challenges were faced in drilling: (1) It was easy to form cuttings beds over the long horizontal section with high torque friction; (2) The shale was easy to hydrate and expand, resulting in wellbore instability; (3) Micro-fissures were developed in shale formation, leading to large loss of drilling fluids. In order to ensure the normal drilling operation, the appropriate formulation of the oil-based drilling fluid was optimized through indoor comparative experiments in the early stage. Field application showed that the optimized drilling fluid formulation fully met the requirements of the field work, achieving safe and smooth completion of the third-section horizontal drilling.

**Key words:** shale gas; oil-based drilling fluid; wellbore stability; lubricity

### 1 概述

焦页 197-4HF 井位于重庆市南川区水江镇大顺村 1 组,属于川东高陡褶皱带万县复向斜平桥背斜南部构造,完钻层位为下志留系龙马溪组龙一段③小层。该井三开 A 靶斜深 3488 m,井斜 76.04°,靶前水平位移 1152.87 m,完钻井深 4941 m,井斜 85.56°,全井水平位移 2593.92 m,三开水平段长 1453 m。井身结构如表 1 所示。

表 1 井身结构

Table 1 Casing program

开次	钻头尺寸/mm	井深/m	套管层序	套管外径/mm	套管下深/m	水泥返深/m
导眼	609.6	65.77	导管	473.1	64.77	地面
一开	406.4	720.00	表层套管	339.7	719.07	地面
二开	311.2	2614.00	技术套管	244.5	2611.91	地面
三开	215.9	4941.00	生产套管	139.7	4936.00	地面

收稿日期:2018-05-06; 修回日期:2019-04-19 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.05.005

作者简介:蔡巍,男,汉族,1986 年生,从事钻井液开发与研究工作,江苏省扬州市江都区邵伯镇甘棠路 101 号,414936954@qq.com。

引用格式:蔡巍,龚厚平,邵兆美,等.焦页 197-4HF 井油基钻井液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):28-33.

CAI Wei, GONG Houping, SHAO Zhaomei, et al. Oil-based drilling fluid technology for Well Jiaoye 197-4HF[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):28-33.

## 2 油基钻井液技术难点

根据南页 1 井和焦页 8 井钻井资料显示,在志留系龙马溪组地层钻进过程中容易发生井壁坍塌、掉块等井壁失稳问题,这是由地层岩石性质和水平钻井工艺特点决定的。渝东南涪陵页岩气井目的层是志留系龙马溪组页岩层<sup>[1-4]</sup>。水平井段完全在页岩地层中钻进,水平位移较长,泥页岩易水化膨胀,井壁稳定性差<sup>[5-8]</sup>。因此要优选抑制坍塌性强的钻井液体系,做好井壁稳定工作<sup>[9-10]</sup>。为避免由于长水平井段导致的摩阻过大,要求钻井液具有良好的流变性和润滑性<sup>[11-13]</sup>。本井位于川东南武陵褶皱带,邻区页岩气探井南页 1 井在小河坝组发生一次溢流,原因是钻井液密度偏低,通过压井提高钻井液密度恢复正常钻进。龙马溪组为本井主要产层,因此在钻进过程中要根据实际情况及时调整钻井液密度,确保安全钻井<sup>[14-15]</sup>。

## 3 油基钻井液配方优选

为了探究添加剂对油基钻井液的影响,优选出合适的钻井液配方。在室内配制了 4 组油水比(0 号柴油:26% CaCl<sub>2</sub> 水溶液)为 8:2 的油基钻井液,实验配方见表 2。老化 130 °C 后对其基本性能进行了测试,实验结果见表 3。

表 2 室内实验配方  
Table 2 Laboratory test formula

序号	主乳/ %	辅乳/ %	氧化 钙/%	有机 土/%	增粘 剂/%	降滤失 剂/%	加重密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
1	2.5	1.0	2.8	1.5	1.5	3	1.45
2	2.5	1.3	2.8	1.5	1.5	3	1.60
3	2.5	1.0	2.8	2.0	2.0	3	1.45
4	2.5	1.3	2.8	2.0	2.0	3	1.60

表 3 室内实验结果  
Table 3 Laboratory results

序号	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度/ (mPa·s)	动切 力/ Pa	动 塑 比	静切力/Pa 初切 终切	高温高 压滤失 量/mL	破乳 电压/ V
1	36.5	24	12.5	0.52			606
老化	42.5	37	5.5	0.15	0.5 1.5	2.0	277
2	45.5	41	4.5	0.11			623
老化	43.5	38	5.5	0.14	1.5 2.5	2.7	355
3	57.5	46	11.5	0.25			620
老化	75.5	60	15.5	0.26	3.0 6.0	1.6	417
4	73.5	60	13.5	0.23			660
老化	78.5	61	17.5	0.29	3.0 7.0	1.6	427

室内实验表明,辅乳化剂的加量从 1% 增加到

1.3% 能够显著提高油基钻井液的破乳电压。钻井现场一般要求钻井液的破乳电压 > 400 V, 随着钻井液的不循环和剪切, 现场钻井液的破乳电压一般比室内实验要高。因此, 优选辅乳化剂的加量为 1.3%。加入有机土也有利于提高钻井液的破乳电压, 但是有机土对油基钻井液的粘度和切力有较大影响。随着有机土加量增加, 钻井液的塑性粘度、动切力、初切和终切都显著增加。有机土加量的增加, 会使钻井液体系中粘土颗粒之间形成空间网状结构的能力增强, 因此动切力明显增大。动切力的大小关系到钻井液体系的携岩性能, 根据现场钻井的经验, 对于非加重钻井液动切力取值一般在 1.4 ~ 14.4 Pa。过高的有机土加量会使动切力过高, 增大钻井“激动”压力, 增加泥浆泵的负载。有机土加量的增加也会使体系中固相含量有所增加, 钻井液塑性粘度也会增加。因此, 根据上述实验优选有机土加量为 1.5%。

根据室内实验结果, 最终优选出的油基钻井液基础配方为: 2.5% 主乳 + 1.3% 辅乳 + 2.8% CaO + 1.5% 有机土 + 1.5% 增粘剂 + 3% 降滤失剂 + 重晶石, 加重至 1.45 g/cm<sup>3</sup>。根据基础配方配制的钻井液在 130 °C 老化 16 h 后, 其基本性能如表 4 所示。

表 4 基浆基本性能  
Table 4 Basic properties of base drilling fluid

状 态	塑性粘度/ (mPa·s)	动切 力/ Pa	$\phi_6 / \phi_3$	静切力/Pa 初切 终切	破乳 电压/ V	高温高 压滤失 量/mL
130 °C 滚 16 h 后	31	11	7/6	4 9	566	2.4

从表 4 可以看出, 该基础配方在密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 和高温老化(130 °C) 的情况下, 塑性粘度和动切力均在合理范围内, 钻井液流变性较好; 高温高压失水量仅为 2.4 mL, 有效减少钻井液向地层的滤失, 有利于井壁稳定性的提高; 其破乳电压为 566 V (55 °C 时测量), 大于标准值(400 V), 完全满足现场钻井要求。

## 4 油基钻井液性能评价

### 4.1 不同密度油基钻井液性能

钻井液的密度对于钻井液的流变性和稳定性有着较大影响, 为了保证在不同密度情况下油基钻井液都能具有良好的性能, 采用重晶石将配制好的油基钻井液分别加重至 1.30、1.35、1.40、1.45、1.50、

1.55 g/cm<sup>3</sup>,检测其在130℃下老化16h后的基本性能。结果如表5所示。

表5 不同密度油基钻井液性能  
Table 5 Properties of oil-based drilling fluids with different densities

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比	静切力/Pa 初切 终切	破乳电压/V	高温高压滤失量/mL
1.30	27	7	0.259	3 7	562	2.7
1.35	28	8	0.286	4 8	571	2.7
1.40	30	8	0.267	4 9	578	2.5
1.45	31	11	0.355	4 9	566	2.4
1.50	34	13	0.382	5 11	621	2.6
1.55	35	14	0.400	5 12	620	2.4

由表5可看出,在130℃下老化16h后,钻井液密度从1.30 g/cm<sup>3</sup>增大到1.55 g/cm<sup>3</sup>时,随着密度增大该油基钻井液塑性粘度从27 mPa·s逐渐增加到35 mPa·s,塑性粘度增加不大且始终保持在适宜范围之内。动切力和动塑比都随钻井液密度增大而逐渐增大,当密度>1.45 g/cm<sup>3</sup>时,动塑比始终大于0.35,钻井液具有很好的携岩性能。因此可知,在不同密度情况下,该油基钻井液体系都具有良好的流变性能。随着密度增加,其破乳电压逐渐增大,高温高压滤失量逐渐降低。该油基钻井液体系破乳电压始终保持在560 V以上,高温高压滤失量<2.4 mL,说明该体系在不同密度情况下具有良好的稳定性。

#### 4.2 不同温度油基钻井液性能

将密度为1.50 g/cm<sup>3</sup>的油基钻井液在90、110、130、150、170℃下老化16h,然后检测其基本性能,实验结果如表6所示。

表6 不同温度老化后油基钻井液性能  
Table 6 Oil-based drilling fluid properties after aging at different temperatures

温度/℃	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比	静切力/Pa 初切 终切	破乳电压/V	高温高压滤失量/mL
90	36	13	0.361	3 7	652	1.7
110	32	10	0.313	4 7	631	2.1
130	30	8	0.267	4 9	578	2.5
150	29	6	0.241	3 8	568	2.8
170	22	5	0.227	2 6	416	4.0

由表6可以看出,随着温度从90℃升高至150℃,破乳电压始终大于550 V,高温高压滤失量<2.8 mL。说明该油基钻井液体系在90~150℃下具有良好的乳化稳定性和流变性。表明该油基钻井液体系抗温性能达到150℃,满足焦页197-4HF

井三开钻井需要。

#### 4.3 抗污染性

为了应对钻井液可能受到的污染,通过加入不同量的污染物,在130℃下老化16h,对油基钻井液的抗污染性能进行了评价。实验结果如表7所示。

表7 油基钻井液抗污染实验结果  
Table 7 Anti-pollution experiment results of oil-based drilling fluids

污染物	加量/%	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比	静切力/Pa 初切 终切	破乳电压/V	高温高压滤失量/mL
劣质土	3	32	10	0.313	4 10	587	2.5
	5	35	11	0.314	4 11	604	3.8
	10	37	14	0.378	5 13	636	4.1
NaCl	5	31	10	0.323	4 10	589	2.7
	10	33	11	0.333	4 10	563	2.7
CaCl <sub>2</sub>	15	35	10	0.285	5 11	557	3.5
	3	32	10	0.312	4 9	621	2.6
原油	5	35	11	0.314	4 9	598	2.9
	10	36	12	0.333	5 10	574	3.0
原油	10	37	11	0.297	9 12	676	1.5
	15	40	14	0.350	11 15	784	1.9
	20	46	15	0.326	11 16	905	2.1

从表7可以看出,随着劣质土加量增加至10%,钻井液流变性没有明显变化,高温高压滤失量增加不明显,说明该钻井液体系对劣质土不敏感。随着氯化钠和氯化钙含量的增加,钻井液塑性粘度和高温高压滤失量有稍微增加,破乳电压没有明显降低,说明该钻井液具有良好的抗盐侵性能<sup>[13-14]</sup>。随着原油量的增加,该钻井液破乳电压升高,表观粘度和高温高压滤失量有少量增大,说明该钻井液体系具有较好的抗原油污染能力。

## 5 油基钻井液现场应用

### 5.1 钻井液现场配制

(1)二开中完固井后,将循环罐中钻井液清空,并将地面罐清理干净;

(2)用清水清洗所有泥浆罐、循环管线和泥浆泵;

(3)在配浆罐中注入0#柴油;

(4)根据优选好的配方,在混合漏斗处依次加入2.5%主乳化剂、1.3%辅乳化剂、1.5%有机土、2.8%CaO、1.5%增粘剂、3%降滤失剂;

(5)在胶液罐仓内加入20 m<sup>3</sup>清水+5.2 t CaCl<sub>2</sub>配制26%的CaCl<sub>2</sub>水溶液;把配好的盐水在混合漏斗处通过泥浆泵缓慢加入钻井液中;

(6)使用搅拌器进行充分搅拌,确保油基钻井液充分乳化。

(7)钻井液充分乳化后,继续搅拌,加入 3%~4%的超细碳酸钙和重晶石,调整泥浆密度至 1.45 g/cm<sup>3</sup>,最后检测钻井液性能。

## 5.2 油基钻井液替浆步骤

(1)准备 10 m<sup>3</sup> 柴油作为隔离液备用。

(2)先泵入 6 m<sup>3</sup> 柴油隔离液,然后泵送配制好的油基钻井液。在泵送油基钻井液的过程中,要求排量要尽可能大,并且不能停泵,以保证顶替效果较好。

(3)在泵送油基钻井液的过程中,要时刻关注出口处返浆。当隔离液全部返排到分离池,直到未受污染的油基钻井液出现时,才将钻井液导入循环罐中。

(4)油基钻井液替浆完成后,使用大排量循环钻井液,直至钻井液性能稳定。并且利用大排量循环期间筛除油基钻井液中的堵漏材料。

(5)油基钻井液循环均匀后,测定全套性能,符合设计要求后开始三开钻井施工。

## 5.3 油基钻井液主要性能控制

### 5.3.1 密度的控制

根据前期地质勘探资料显示的地质压力系数以及邻井资料作为参考,确定焦页 197-4HF 井三开钻井液密度为 1.45~1.51 g/cm<sup>3</sup>。根据表 4 所示不同密度油基钻井液性能评价结果显示,设计油基钻井液体系在密度为 1.45~1.51 g/cm<sup>3</sup> 时具有良好的流变性和稳定性。

在钻进过程中,根据井下返砂和气测值的大小等情况,逐步调整钻井液密度<sup>[2]</sup>。另外,在钻井液中起加重作用的重晶石会在钻进过程中不断消耗,因此钻进过程中要适时补充重晶石,保持钻井液密度稳定。过低的钻井液密度会导致井壁不稳定和地层流体的侵入,但是过高的钻井液密度不利于提高钻速和保护储层。在保证钻井安全的前提下,要尽可能使用低密度钻井液。本井最终完钻密度为 1.51 g/cm<sup>3</sup>。

### 5.3.2 流变性的控制

固相含量和温度是影响油基钻井液塑性粘度的主要因素。而温度和由加重材料导致的固相含量增量是很难避免的,因此在使用油基钻井液的过程中,要控制好由钻屑、劣质土等劣质固相导致的固相含

量的增加。振动筛是钻井液固相控制的第一道防线,三开钻进时振动筛要使用 200~250 目筛网,能够有效减少较大颗粒的劣质固相。另外要适当使用离心机,减少细颗粒的劣质固相,避免塑性粘度快速升高。在水平井钻进过程中,要尤其注意钻井液的携岩性能。使用有机土提高低剪切力钻井液流变性,有助于降低岩屑沉降现象<sup>[15]</sup>。根据表 3 室内实验结果,为了使钻井液体系有较好的动切力,钻井液应时常补充有机土,以保证有较好的携岩能力。同时,在现场钻进时,要根据油基钻井液固相含量的增加和密度的提高,适量补充辅乳化剂,从而改善钻井液体系中固相的润湿性,提高钻井液体系的稳定性,改善流变性能。

### 5.3.3 滤失量控制

焦页 197-4HF 井水平井段完全在页岩地层中钻进,页岩具有强的亲水性,但是不亲油。油基钻井液中的连续相是柴油,因此使用油基钻井液在页岩地层中钻进时滤失量很低。根据上述室内实验结果,本文优选和使用的油基钻井液体系高温高压滤失量在 3 mL 以下。为了提高对近井壁地层的封堵能力,减少油基钻井液对储层的伤害,井深 3500 m 后选用液体沥青和 1200 目超细碳酸钙进行复配,提高钻井液封堵能力,降低油基钻井液的消耗。

### 5.3.4 乳化稳定性控制

确保乳状液的稳定性是保证油基钻井液性能稳定的关键,通常是用破乳电压( $E_s$ )定量衡量乳状液稳定性。破乳电压越高就表明油基钻井液体系具有越好的乳化稳定性。破乳电压的大小通常跟油水比、固相润湿程度、剪切状况、电解质的浓度、温度等有关。在配制油基钻井液时,要一次性加入足量的主乳化剂,并且充分搅拌、剪切。在钻进过程中,要根据钻井液乳化稳定性的变化,适时加入主乳化剂和辅乳化剂。

## 5.4 钻井液应用效果

### 5.4.1 稳定性好

在现场施工过程中,钻井液性能没有出现大的波动。在维护钻井液性能时,只需用配制的新浆补充循环量,就能满足钻进要求。油基钻井液施工过程中性能变化见表 8。

从表 8 可以看出,钻井过程中,油基钻井液的粘度和切力没有发生太大变化,固相含量始终控制在 26% 以下,钻井液流变性控制的很好。高温高压

表8 焦页197-4HF井三开钻井液性能  
Table 8 Drilling fluid properties for the third section of Well Jiaoye 197-4HF

井深/ m	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	塑性 粘度/ (mPa·s)	动切 力/ Pa	静切力/Pa		高温高 压滤失 量/mL	破乳 电压/ V	固相分 析/%		
				初切	终切			V <sub>固</sub>	V <sub>水</sub>	V <sub>油</sub>
2614	1.43	37	12.0	5.0	13.0	2.8	627	26	17	54
3035	1.45	34	13.0	7.0	14.0	2.4	1065	22	17	61
3333	1.47	40	13.5	9.0	16.0	2.8	1274	22	16	62
3568	1.49	38	13.0	9.0	15.0	2.2	1300	24	16	60
4011	1.50	37	12.5	8.5	17.5	2.4	1200	26	13	61
4072	1.49	34	13.0	9.0	19.0	2.4	1244	24	14	62
4420	1.51	37	11.0	8.0	18.0	2.2	1321	27	12	61
4735	1.51	36	11.0	8.0	18.0	2.8	1280	26	12	62
4873	1.51	42	12.0	8.0	18.0	2.6	1387	26	10	64

滤失量始终小于3 mL,降滤失效果好。在维护过程中没有加乳化剂的情况下,破乳电压仍保持上升的趋势,表明该钻井液体系具有较好的稳定性。

#### 5.4.2 井壁稳定性好、防塌效果强

使用该油基钻井液体系钻进,返排的岩屑棱角分明、大小均匀,如图1所示,说明岩屑在钻井液中并没有被分散。将岩屑掰开,岩屑内部并没有被钻井液润湿,表明该钻井液体系具有较强的抑制性。



图1 三开岩屑样品

Fig.1 Cuttings sample from the third section

表9是三开井段电测数据,该井三开平均井径为228.7 mm,平均井径扩大率仅为5.92%。表明该井三开钻进过程中,井壁没有出现坍塌、掉块等井壁不稳定的情况。也表明该钻井液抑制性强,使用该钻井液能够有效提高井壁稳定性,保证井下钻进的安全。因此可以认为,该油基钻井液具有较好的井壁稳定和防塌效果。

表9 焦页197-4HF井三开井径数据  
Table 9 The third section diameter data of Jiaoye 197-4HF Well

斜深/ m	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	井径/ mm	斜深/ m	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	井径/ mm
2710	1.43	230.06	3910	1.49	233.89
2910	1.43	229.29	4110	1.50	223.21
3110	1.45	229.90	4310	1.50	217.13
3310	1.45	227.61	4510	1.51	219.29
3510	1.47	222.52	4710	1.51	219.38
3710	1.49	233.85	4860	1.51	233.64

#### 5.4.3 封堵性强

三开前期仅使用3%降滤失剂,根据表8可以看出,高温高压滤失量在2.8 mL以下,降滤失效果较好。钻进至3500 m后,增加3%~4% 1200目超细碳酸钙和2%液体沥青,提高钻井液体系的封堵性。从表8可以看出,加入超细碳酸钙和液体沥青后,钻井液的高温高压滤失量降低到了2.2 mL左右,钻井液失水得到了有效的控制。因此可以说明该油基钻井液体系封堵性强,有利于减少钻进过程中的钻井液消耗。

## 6 结论与认识

(1)通过室内实验,优选出了适用于焦页197-4HF井三开的油基钻井液体系,并对该油基钻井液体系进行评价。实验表明,在不同密度、不同温度以及受污染的情况下,该油基钻井液具有较好的流变性和稳定性,符合现场使用要求。

(2)三开钻井液密度确定为1.45~1.51 g/cm<sup>3</sup>。在钻进过程中,加强一级固控,三开钻进振动筛使用200~250目,适当使用离心机,减少无用固相。钻进时要根据钻井液性能参数的变化,适时补充主乳化剂、辅乳化剂和重晶石。

(3)采用超细刚性粒子与可变形封堵剂复配使用,能够有效地增强油基钻井液对近井壁地层的物理封堵性,降低失水,较少油基钻井液的损耗。

(4)现场应用表明,该油基钻井液具有稳定性好、抑制性强、防塌效果好和封堵性强等优点,适合在该地区推广使用。

### 参考文献(References):

- [1] 伍鹏常,赵兰.油基钻井液在涪陵地区页岩气水平井的应用[J].中国化工贸易,2015,(29):181.  
WU Pengchang, ZHAO Lan. Application of oil-based drilling fluid in shale gas horizontal wells in Fuling Area[J]. Chinese Chemical Trade, 2015, (29):181.
- [2] 臧伟伟,向锋.油基钻井液在梁页1HF井的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2013,(3):184.  
ZANG Weiwei, XIANG Feng. Application of oil-based drilling fluid in Liangye 1HF Well[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, (3):184.
- [3] 曾涛.焦页60-5HF井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):52-58.  
ZENG Tao. Drilling technology for Jiaoye Well 60-5HF[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(7):52-58.
- [4] 王国庆,王建波,陈广,等.焦页非常规页岩气井优快钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,(10):17-21.  
WANG Guoqing, WANG Jianbo, CHEN Guang, et al. Optimized and fast drilling for construction of Jiaoye unconventional shale gas well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,(10):17-21.
- [5] 梁大川.泥页岩水化机理研究现状[J].钻井液与完井液,1997,(6):29-31.  
LIANG Dachuan. Review on the study of shale hydration mechanism[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1997, (6):29-31.
- [6] 罗健生,鄢捷年.页岩水化对其力学性质和井壁稳定性的影响[J].石油钻采工艺,1999,21(2):7-13.  
LUO Jiansheng, YAN Jienian. Impact of shale hydration on its mechanical property and borehole wall stability[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999,21(2):7-13.
- [7] 刘厚彬,孟英峰,李皋,等.泥页岩水化作用对岩石强度的影响[J].钻采工艺,2010,33(6):18-20.  
LIU Houbin, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. Theoretical simulation and experimental evaluation of the effect of Hydration on the shale rock strength[J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(6):18-20.
- [8] 周华安,王德承,杨兰平.强抑制封堵性防塌钻井液研究及应用[J].钻采工艺,1996,19(2):71-76.  
ZHOU Huaan, WANG Decheng, YANG Lanping. Research and application of anti-collapse drilling fluids with strong sealing performance[J]. Drilling & Production Technology, 1996, 19(2):71-76.
- [9] 褚奇,李涛,王栋,等.龙凤山气田强抑制封堵型防塌钻井液技术[J].钻井液与完井液,2016,33(5):35-40.  
CHU Qi, LI Tao, WANG Dong, et al. Plugging inhibitive drilling fluid used in Longfengshan Gas Field[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(5):35-40.
- [10] 邵兆美,赵世贵,秦波波.油基钻井液在焦页197-4HF井的应用[J].山东化工,2018,47(10):79-81,83.  
SHAO Zhaomei, ZHAO Shigui, QIN Bobo. Application of oil base drilling fluids in Jiaoye 197-4HF[J]. Shandong Chemical Industry, 2018,47(10):79-81,83.
- [11] 赵冀川,王诗琪,张春生.页岩气开发钻井液技术研究[J].当代化工,2018,(1):187-189.  
ZHAO Jichuan, WANG Shiqi, ZHANG Chunsheng. Study on drilling fluid technology for shale gas development[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018,(1):187-189.
- [12] 匡韶华,蒲晓林,柳燕丽.高密度钻井液稳定性和流变性控制技术[J].钻井液与完井液,2011,28(3):5-8.  
KUANG Shaohua, PU Xiaolin, LIU Yanli. Study on stability and rheology control technology of high-density drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(3):5-8.
- [13] 王磊,罗勇,刘胜,等.油基钻井液流变性调控技术研究[J].化学与生物工程,2015,(11):48-51.  
WANG Lei, LUO Yong, LIU Sheng, et al. Research of rheological control technology of oil-based drilling fluid[J]. Chemistry & Bioengineering, 2015,(11):48-51.
- [14] 王凯,吴事难,徐彤,等.压力控制钻井技术高效开发页岩气藏[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(6):112-113.  
WANG Kai, WU Shinan, XU Tong, et al. Pressure-controlled drilling technology to efficiently develop shale gas reservoirs[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017,37(6):112-113.
- [15] 蔚宝华,邓金根,闫伟.层理性泥页岩地层井壁坍塌控制方法研究[J].石油钻探技术,2010,38(1):56-59.  
WEI Baohua, DENG Jingen, YAN Wei. Borehole sloughing control in shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1):56-59.

(编辑 韩丽丽)