

# 高密度油基钻井液体系优选及其 在页岩气水平井的应用

邵 宁, 李子钰, 于培志

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:**为解决威远—长宁地区泥页岩地层井壁失稳、井眼清洁等问题,通过试验优选出适用于高密度油基钻井液体系使用的乳化剂、有机土和降滤失剂等处理剂;通过正交试验设计确定出一种适用于威远—长宁地区页岩气长短水平井使用的高密度油基钻井液体系。其最终配方比例为:5%主乳化剂+2.0%辅乳化剂+2.0%润湿剂+5%降滤失剂+2%有机土+3%CaO、油水比 80:20(25%CaCl<sub>2</sub>水溶液)。对其性能进行评价,结果表明该体系可加重密度至 2.2 g/cm<sup>3</sup>,加重后性能稳定,可抗水污染达 9%,抗岩屑污染至 18%,具有较好的抗污染性能,页岩回收率 95.11%,抑制性能好,乳化性能稳定。现场应用表明:高密度油基钻井液满足威 204H37-8 井页岩气水平井钻井施工需求,全井性能良好,无井漏,井径规则,测井未见异常,顺利完钻。

**关键词:**高密度油基钻井液;页岩气;水平井;井壁失稳;威远地区

**中图分类号:**P634;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)08-0030-06

## Optimization of high-density oil-based drilling fluid system and its application in shale gas horizontal wells

SHAO Ning, LI Ziyu, YU Peizhi

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of wellbore instability and wellbore cleaning in shale formation in the Weiyuan - Changning area, the treatment agents such as emulsifiers, organic soils and filtration reducers suitable for high-density oil-based drilling fluid systems were selected through experiments. A high-density oil-based drilling fluid system suitable for use in both long and short shale gas horizontal wells in the Weiyuan - Changning area was determined by orthogonal design. The final formulation ratio is: 5% primary emulsifier + 2.0% co-emulsifier + 2.0% wetting agent + 5% filtration reducer + 2% organic soil + 3% CaO, oil to water ratio 80:20 (25% CaCl<sub>2</sub> aqueous solution). Evaluation on its performance shows that the system can increase the density to 2.2g/cm<sup>3</sup>, and the performance is stable after addition of weighting material. It can resist water pollution up to 9%, anti-cutting pollution to 18%, providing good anti-pollution performance with shale recovery up to 95.11%, and good inhibition performance, as well as stable emulsification performance. The field application showed that the high-density oil-based drilling fluid met the drilling requirements of the shale gas horizontal well Wei 204H37-8. The performance of the whole well was good; there was no well leakage, the well diameter was regular, there was no abnormalities in logging, and well completing was smooth.

**Key words:** high-density oil-based drilling fluid; shale gas; horizontal wells; wellbore instability; Weiyuan area

## 0 引言

随着清洁能源页岩气的发展,国内现已完钻数

百口页岩气水平井。为解决井壁不稳定等问题,并眼水平段一般采用油基钻井液体系,但目前仍未能

收稿日期:2019-04-16; 修回日期:2019-05-20 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.08.005

作者简介:邵宁,女,汉族,1989年生,化学工程专业,硕士,从事油田化学剂及钻井液技术研究工作,北京市海淀区学院路29号,1283289685@qq.com。

通信作者:于培志,男,汉族,1962年生,教授,博士,从事钻井液及堵漏方面的研究工作,yupz@cugb.edu.cn。

引用格式:邵宁,李子钰,于培志.高密度油基钻井液体系优选及其在页岩气水平井的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):30-35.  
SHAO Ning, LI Ziyu, YU Peizhi. Optimization of high-density oil-based drilling fluid system and its application in shale gas horizontal wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):30-35.

很好解决井壁稳定性差、井眼轨迹控制难等问题<sup>[1-3]</sup>。本研究通过优选主乳化剂、降滤失剂和有机土等材料,利用正交试验适配出一种适用于页岩气水平井的高密度油基钻井液体系,通过对体系进行性能评价,结果表明该体系加重性能稳定,乳化效果好,滤失量低,可有效抑制泥页岩水化分散,施工应用中无卡钻、漏失现象,有效地解决了威远地区泥页岩层钻井液高密度条件下井壁失稳、井眼清洁等问题,对于页岩气水平井的施工技术发展具有推动作用。

## 1 区域概况及钻井液施工难点

长宁—威远地区位于四川省南部,该地区志留系的龙马溪组页岩地层是开发的重点,布井多以丛式水平井的方式,水平段长度均在 1000 m 以上,钻井中不仅遇到长水平井润滑效果差、轨迹控制难和钻井液携带岩屑能力低等问题,同时水平段页岩地层的应力性垮塌更成为影响安全快速钻井的难题<sup>[4-5]</sup>,由于水基钻井液在抑制性、润滑效果等方面较油基钻井液在同等条件下难以解决以上问题,因此油基钻井液成为其主要技术手段,但长宁—威远地区在使用油基钻井液钻进的过程中依旧存在以下难点<sup>[6-9]</sup>:

(1)安全密度窗口窄。非常规油气藏地质条件复杂,具有非均质性,地层坍塌压力和地层破裂压力较为接近,低密度容易引起缩径、卡钻,密度过高又会发生漏失,长宁—威远地区目的层位密度当量较高,并且页岩地层对钻井液性能要求高,在合适的高密度条件下,普通钻井液很难满足其性能要求,施工过程中难以使用合适的密度平衡地层压力。

(2)井壁稳定性差。地层倾角变化较大,龙马溪组页岩层应力系统特别复杂,钻进中水平段应力释放易造成剥落掉块。另外本层位的泥质含量高,水敏性较强,容易出现井壁失稳现象,造成井下复杂情况。

(3)润滑降阻要求高。水平段长度超过 1000 m,润滑困难,高密度条件下,钻井液润滑性能下降,摩阻增大,出现复杂情况的概率增大,另外随钻使用旋转导向技术,需不断调整钻井方位变化,对钻井液润滑能力提出了更高的要求。

(4)井眼净化问题。由于水平井造斜段井斜变化大,井眼清洁难度大;同时,因为水平段岩屑的重

力作用,高密度钻井液中重晶石等加重材料本身对携带岩屑的能力有影响;再者,施工密度高,泵压高,排量有限,易形成岩屑床,进一步增加摩阻、扭矩和井下复杂情况的可能性。

因此针对以上难点,需优选出一套适用于威远地区页岩气水平井的油基钻井液体系,使得其在高密度条件下,体系抑制性好,抗岩屑污染能力强,满足页岩地层对钻井液体系的性能要求,保证该区块页岩气水平井钻井施工的需要。

## 2 油基钻井液处理剂优选

### 2.1 降滤失剂优选

降滤失剂的作用是为控制钻井液中的滤液渗入地层,滤液会引起泥页岩膨胀、剥落、掉块,出现井壁不稳定,严重时引起井下复杂<sup>[8-10]</sup>。试验根据现场经济效益考虑,以油水比(体积比)80:20为基础,调节密度至 2.0 g/cm<sup>3</sup>,改变几种降滤失剂,在 130 °C 下高温老化 16 h,测试其性能,试验结果如表 1 所示。从数据可以看出,1 号和 2 号的滤失量过大,无法满足现场需求,3 号降滤失剂 OBMF 的滤失量最低且满足要求,且对比其他性能参数,3 号降滤失剂 OBMF 对他们的影响最低,因此,选用 3 号降滤失剂 OBMF 作为高密度钻井液体系的降滤失剂。

表 1 降滤失剂种类优选

Table 1 Results of different filtration reducers

种 类	试 验 条 件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>HTHP</sub> / mL
1 号	老化前	40.5	33	7.5	4/4.5	738	
	老化后	44.5	37	7.5	3/3.5	770	23.0
2 号	老化前	43.0	35	8.0	3.5/4.5	939	
	老化后	44.5	39	5.5	2.5/3	807	6.6
3 号	老化前	45.0	38	7.0	3.5/4.5	902	
	老化后	54.5	45	9.5	3.5/4	891	3.0

注:基浆为 3%主乳化剂+0.5%润湿剂+2%降滤失剂+2%有机土+2%氧化钙,密度 2.0 g/cm<sup>3</sup>,油水比 80:20;老化条件为 130 °C、16 h。

### 2.2 有机土优选

油基钻井液中有有机土用以提高和调节油基钻井液的粘度<sup>[11-12]</sup>,试验选取基浆中添加不同种类有机土来测定性能,并在 130 °C 下老化 16 h,试验结果见表 2。由结果可以看出 3 号有机土 Dynagel 对体系粘度提高作用最明显,同时其他性能也处于正常范围内,因此选取 3 号有机土 Dynagel 作为高密度油基钻井液体系的有机土添加剂。

表2 有机土种类优选

Table 2 Results of different organic soils

种 类	试验 条件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>HHP</sub> / mL
1 号	老化前	28.5	21	7.5	2.5/3.5	681	
	老化后	30.0	23	7.0	3/3.5	668	1.4
2 号	老化前	30.0	22	8.0	3/4	760	
	老化后	32.0	25	7.0	3/3.5	566	1.8
3 号	老化前	32.5	24	8.5	3.5/4	753	
	老化后	34.5	27	7.5	3.5/3.5	678	2.0

注:基浆为3.5%主乳化剂+1.5%辅乳化剂+1%润湿剂+4%降滤失剂+2%有机土+2%氧化钙,密度2.0 g/cm<sup>3</sup>,油水比80:20;老化条件为130℃、16 h。

### 2.3 乳化剂优选

乳化剂通过在油水界面形成吸附膜、降低油水界面张力等作用以形成稳定的油包水乳化钻井液体系<sup>[12-16]</sup>。试验取3组乳化剂在基浆中进行对比,通过电稳定仪测定破乳电压作为衡量指标,其性能结果见表3。

表3 乳化剂种类优选

Table 3 Results of different emulsifiers

种 类	试验 条件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>HHP</sub> / mL
1 号	老化前	46.5	38	8.5	5/8.5	930	
	老化后	57.5	43	14.5	6/7.5	763	6.0
2 号	老化前	39.0	33	6.0	3.5/4.5	948	
	老化后	42.5	35	7.5	3/3.5	902	5.5
3 号	老化前	50.0	38	12.0	5.5/7	840	
	老化后	41.0	33	8.0	6/8	942	2.3

注:基浆为3%乳化剂+0.5%润湿剂+4%降滤失剂+2%有机土+2%氧化钙,密度2.0 g/cm<sup>3</sup>,油水比80:20;老化条件为130℃、16 h。

从结果可以看出,3号破乳电压值最高,乳化效果最好,满足现场需要,且其他各项性能满足要求,故选取3号乳化剂OBMP、OBMS作为高密度钻井液体系的主、辅乳化剂。

### 3 油基钻井液体系配方确定

经过对油基钻井液处理剂的优选,确定以3号的OBMP为主乳化剂,OBMS为辅乳化剂,保证体系的稳定性,以3号降滤失剂OBMF作为降滤失剂,控制滤失量,减少页岩的坍塌,提高井壁稳定性,3号有机土Dynagel作为体系的有机土,提高体系粘度,对各种处理剂比例进行正交试验,优选出适合长宁一威远地区的高密度油基钻井液体系比例。正交试验情况如下:采用四因素三水平正交试验设计,

以钻井液体系的塑性粘度、动切力、动塑比,高温高压滤失量和破乳电压为指标,优选出最佳比例。四优化因子:主乳化剂、润湿剂、辅乳化剂、降滤失剂。正交试验设计的因素和水平见表4。

表4 钻井液体系正交试验因素与水平

Table 4 Factors and levels of orthogonal test for drilling fluid system

水 平	因 素			
	A主乳化剂/%	B润湿剂/%	C辅乳化剂/%	D降滤失剂/%
1	3	1	1.0	3
2	4	2	1.5	4
3	5	3	2.0	5

按照四因素三水平正交试验的方法,选取9组油水比80:20、加重至2.15 g/cm<sup>3</sup>的钻井液组成配方,经过130℃、16 h老化后性能测定结果,性能数据如表5所示。

表5 钻井液体系正交试验性能数据

Table 5 Performance data of drilling fluid system orthogonal test

序 号	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>HHP</sub> / mL
1	73.0	56	17.0	6.5/8.5	446	5.6
2	61.0	47	14.0	6/7.5	610	4.4
3	67.0	51	16.0	7/9.5	897	3.6
4	57.5	45	12.5	6/8	764	4.0
5	57.0	47	10.0	6/7	806	9.0
6	54.5	42	12.5	5.5/7	782	3.6
7	60.0	45	15.0	6.5/8	860	6.2
8	67.0	51	16.0	7/8.5	770	3.6
9	53.0	40	13.0	5.5/6.5	940	4.8

按照正交试验设计数据处理方法,以现场钻井液要求性能为判定原则,确定最终比例:油水比80:20(25%CaCl<sub>2</sub>水溶液)、5%主乳化剂+2.0%辅乳化剂+2.0%润湿剂+5%降滤失剂+2%有机土+3%CaO+重晶石。

## 4 油基钻井液体系性能评价

### 4.1 体系加重性能

室内试验通过评价不同密度下油基钻井液体系的性能,确定体系的加重稳定性和适合的流变性能。使用重晶石将油基钻井液体系分别加重至2.1、2.15、2.2 g/cm<sup>3</sup>,在130℃条件下热滚16 h,老化后性能结果见表6。

由表6可以看出,随着重晶石加量的提高,不同密度的油基钻井液体系在老化后破乳电压都维持在800 V以上,满足现场要求400 V以上,说明体系的

表 6 钻井液体系加重试验性能

Table 6 Drilling fluid system performance of weighting test

密度/ (g· cm <sup>-3</sup> )	试验 条件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>H<sub>2</sub>THP</sub> / mL
2.10	老化前	50.0	37	13.0	6/7.5	1147	
	老化后	57.0	45	12.0	5/6	813	4.4
2.15	老化前	57.0	42	15.0	7/8.5	1360	
	老化后	64.0	52	12.0	5.5/7	949	5.0
2.20	老化前	72.0	54	18.0	8.5/10	1410	
	老化后	72.5	57	14.5	7/8	937	5.6

注:基浆为油水比 80 : 20(25% CaCl<sub>2</sub> 水溶液)、5% 主乳化剂 + 2.0% 辅乳化剂 + 2.0% 润湿剂 + 5% 降滤失剂 + 2% 有机土 + 3% CaO + 重晶石;老化条件为 130 °C、16 h。

乳化稳定性良好。同时较高的初终切及动切力对于悬浮岩屑及重晶石提供良好支持,说明体系携带岩屑能力较强,井眼清洁效果好,尤其在水平段不易形成岩屑床。

#### 4.2 抗污染性能

针对现场可能遇到的岩层出水情况和实际钻进时岩屑混于钻井液中的情况,室内进行了抗岩屑污染和抗水污染试验,试验方法如下:

(1)向体系中添加不同比例的水,经过 130 °C、16 h 老化后性能测定结果如表 7 所示。

表 7 钻井液体系抗水污染试验性能

Table 7 Drilling fluid system performance of water pollution resistance test

加水 量/%	试验 条件	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>H<sub>2</sub>THP</sub> / mL
0	老化前	57.0	42	15.0	7/8.5	1360	
	老化后	64.0	52	12.0	5.5/7	949	5.0
2	老化前	48.0	35	13.0	6/7.5	1034	
	老化后	73.5	57	16.5	7/8	733	6.2
4	老化前	56.0	41	15.0	7/8.5	1133	
	老化后	65.5	53	12.5	6/7	547	8.0
6	老化前	57.0	42	15.0	7/8.5	887	
	老化后	66.5	53	13.5	6/8.5	478	

注:基浆为油水比 80 : 20(25% CaCl<sub>2</sub> 水溶液)、5% 主乳化剂 + 2.0% 辅乳化剂 + 2.0% 润湿剂 + 5% 降滤失剂 + 2% 有机土 + 3% CaO + 重晶石;老化条件为 130 °C、16 h。

(2)选取相同岩层不同质量的岩屑加入到高密度油基钻井液体系中,老化条件 130 °C、16 h,评价体系的抗岩屑污染性能,试验结果见表 8。

由表 7 和表 8 可以看出,钻井液中随着水量的增加,当水量增加至 6% 时,此时油水比已达到 76 : 24,破乳电压依旧维持在 400 V 以上,满足现场施工要求,同时粘度及切力变化不大,滤失量略有上升,

表 8 钻井液体系抗岩屑污染试验性能

Table 8 Drilling fluid system performance of cuttings pollution resistance test

岩屑加 量/g	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	Gel/ Pa/Pa	ES/ V	FL <sub>H<sub>2</sub>THP</sub> / mL
0.00	64	52	12	5.5/7	949	5
25.24	73	60	13	6/7	799	13
50.56	75	59	16	6.5/7.5	893	18
75.30	51	43	18	3.5/5	896	30

注:基浆为油水比 80 : 20(25% CaCl<sub>2</sub> 水溶液)、5% 主乳化剂 + 2.0% 辅乳化剂 + 2.0% 润湿剂 + 5% 降滤失剂 + 2% 有机土 + 3% CaO + 重晶石。

可见体系的乳化稳定性良好;岩屑加入后,体系粘度变化不大,波动范围很小,表明体系稳定性好,岩屑对体系的影响小,75 g 岩屑已相当于混入 18% 的比例,远远超过正常施工的可能性,各项性能数值依旧保持在可控正常范围内,说明体系在施工中具有很好的抗岩屑污染能力。

上述两项试验结果表明,高密度油基钻井液体系具有良好的抗污染能力。

#### 4.3 抑制性能

抑制性反映了钻井液稳定井壁的能力。试验按照测定岩屑回收率的方式测试钻井液体系的抑制性能,选取现场相同层位岩性的岩屑,6~10 目烘干后岩屑 50 g,分别加入到清水和高密度油基钻井液体系中,同时在 130 °C 条件下滚动 16 h,使用 40 目过筛,烘干恒定后称取质量,清水下岩屑剩余 11.39 g,计算滚动回收率为 22.72%,油基钻井液岩屑剩余 47.56 g,滚动回收率为 95.11%,这表明钻井液具有很好抑制岩屑分散的能力,有利于稳定井壁和减少井下复杂情况的发生。

综上所述,高密度油基钻井液体系性能稳定,加重后性能稳定,抑制性和抗污染能力较强,能够满足威远地区对于高密度,强抑制钻井液的要求,可以用于现场施工。

### 5 现场应用

威 204H37-8 井位于四川省内江市资中县陈家镇付氏祠村 8 组,是一口水平开发井,钻探目的层位为志留系龙马溪组,属威远中奥顶构造南翼。2018 年 8 月 11 日开钻,2018 年 11 月 1 日完钻,完钻井深 5165 m,水平段入靶点井深 3665 m,完钻出靶点井深 5165 m,水平段长 1500 m,钻井周期 83 d,三开采用油基钻井液钻进,体系比例:基础油 +

3%~6%主乳化剂+1%~3%辅乳化剂+1%~3%润湿剂+2%~4%CaO+1%~3%有机土+4%~6%降滤失剂+15%~20%盐水(浓度为20%~

30%的CaCl<sub>2</sub>溶液),在三开长水平段页岩情况下,顺利完钻,无井漏,井径规则,测井未见异常,钻井液性能参数如表9所示。

表9 钻井液性能

Table 9 Drilling fluid performance parameters

日期	井深/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	FV/s	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	Gel/Pa/Pa	ES/V	FL <sub>HTHP</sub> /mL
2018-10-12	3107	2.01	92	111.0	90	21.0	8.5/14	548	2.6
2018-10-13	3221	2.09	92	106.0	85	21.0	8.5/15	689	2.6
2018-10-15	3487	2.13	84	93.5	74	19.5	8.5/14	806	2.0
2018-10-17	3696	2.13	78	80.0	63	17.0	7.5/13.5	944	2.6
2018-10-19	3942	2.12	75	75.5	58	17.5	8.5/13.5	902	2.6
2018-10-27	4516	2.13	96	104.0	77	27.0	11/21	1497	2.4
2018-10-28	4675	2.12	100	117.5	86	31.5	13.5/23.5	1589	2.2
2018-10-29	4860	2.13	112	120.5	87	33.5	14.5/26	1405	2.4
2018-10-31	5032	2.10	137	131.0	94	37.0	17/32	1319	2.2
2018-11-01	5165	2.10	125	124.5	88	36.5	17.5/29.5	1613	2.0

该井维护措施如下:

(1)在配制罐中放入大约罐体容积2/3的基础油,按比例顺序加入有机土 Dynagel、主乳化剂 OBMP、辅乳化剂 OBMS、生石灰,经充分搅拌、循环剪切后,加入预先配制的浓度为25%~30%的氯化钙盐水溶液,然后加入降滤失剂 OBMF,充分搅拌、循环调整其常规性能,再根据密度需要补充加重剂(加重时加入适量润湿剂)并充分搅拌、循环均匀。

(2)钻进过程中要求维护好电稳定性(使用乳化剂和基础油调节)、HTHP 滤失量(使用降滤失剂和封堵剂)和油水比等性能,并控制钻井液流变性以减小ECD和压力激动,防止井壁失稳和井漏;同时注意监测钻井液静切力,防止重晶石沉降。本井应当注意二氧化碳酸性气体侵入,加强性能监测,视情况向钻井液中补充石灰防止酸性气体污染。

(3)钻进中100%地使用振动筛,除砂器、除泥器使用率达85%,离心机使用率20%~40%,但在使用离心机时应随时监测钻井液性能和密度,发现异常及时处理。掏洗罐池,尽量降低井浆的含砂量和钻屑含量。

(4)本段在钻进中参照邻井实钻密度,在井壁稳定的前提下尽量按设计低限实施;大斜度井段、水平段中钻具在井下应保持旋转或上下运动,并采取分段循环钻井液清理岩屑床,减少遇阻现象,起钻前,循环井浆1~2周,起钻至直井段前再次循环井浆。同时本井段要做好防塌工作,井下若发生坍塌现象时可根据井下实际情况适当提高井浆密度,并增加

防塌、封堵处理剂加量。

(5)按设计储备高密度钻井液和加重材料,高密度钻井液循环周期 $\geq 7$  d。

该油基钻井液体系性能稳定,有很好的抑制性、润滑性、携砂性和油气层保护作用,在该井长水平段,高密度油基钻井液施工中无憋泵、脱压、卡钻现象,井壁稳定、摩阻低、钻速快,缩短了钻井周期,降低了钻井成本,满足了裸眼水平段高效携岩的需求。

## 6 结论与应用建议

(1)通过对主要处理剂优选,针对威远—长宁地区井壁失稳等问题,正交试验优化出一套油基钻井液体系,其比例为:油水比80:20(25%CaCl<sub>2</sub>水溶液)、5%主乳化剂+2.0%辅乳化剂+2.0%润湿剂+5%降滤失剂+2%有机土+3%CaO。

(2)该体系具有良好的流变性,乳化效果好,密度加重可达到2.2 g/cm<sup>3</sup>,具有良好的抗污染能力,抑制性强。

(3)通过现场应用表明,高密度油基钻井液体系滤失量低,流变性好,破乳电压高,配合施工措施能够有效解决龙马溪组层位易坍塌掉块等难题,三开井段钻进顺利,期间性能稳定,无井漏,很好地满足了威204H37-8井的施工要求,具有推广作用。

(4)现场水油钻井液体系转换初期,出现破乳电压较低,乳化稳定性较弱的现象,推测是转换初期,油水分层,乳化需要一个过程,这项问题值得注意和改进,避免转换初期出现井下复杂情况。

## 参考文献 (References):

- [1] 王建华, 王立辉, 杨海军, 等. 高密度白油基钻井液研究及在长宁 H4 平台应用[C]// 2015 年度钻井液完井液学组工作会议暨技术交流研讨会论文集. 北京: 中国石油集团钻井工程技术研究院, 2015: 394—398.  
WANG Jianhua, WANG Lihui, YANG Haijun, et al. High-density white oil-based drilling fluid research and application in Platform Changning - H4[C]// Proceedings of the 2015 Drilling Fluid/ Completion Fluid Group Working Conference and Technical Exchange Seminar. Beijing: China Petroleum Group Drilling Engineering Technology Research Institute, 2015: 394—398.
- [2] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 533—537.  
WANG Zhonghua. Research and application progress of oil-based drilling fluid at home and abroad[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18(4): 533—537.
- [3] 王中华. 国内外超高温高密度钻井液技术现状与发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 1—7.  
WANG Zhonghua. Status and development trend of ultra-high temperature and high density drilling fluid at home and abroad [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 1—7.
- [4] 王兰, 刘滨, 刘伟. 长宁—威远龙马溪页岩气丛式井组钻井液技术[C]// 2013 年全国天然气学术年会论文集. 中国石油川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院, 2013: 38—46.  
WANG Lan, LIU Bin, LIU Wei. Drilling fluid technology for Changning - Weiyuan Longmaxi shale gas cluster wells[C]// Papers of the 2013 National Natural Gas Academic Annual Conference. Drilling and Production Engineering Technology Research Institute, Chuanqing Drilling Engineering Company, PetroChina, 2013: 38—46.
- [5] 李功玉, 王华平, 张德军, 等. 泥浆盖帽强钻技术在威远页岩地层的应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(1): 1—2.  
LI Gongyu, WANG Huaping, ZHANG Dejun, et al. Application of managed pressure drilling technique with mud-cap in Weiyuan Shale Gas Well[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(1): 1—2.
- [6] 何睿, 张振华, 彭云涛, 等. 高密度油基钻井液在威远页岩气水平井的规模化应用[C]// 2015 年度钻井液完井液学组工作会议暨技术交流研讨会论文集. 北京: 中国石油长城钻探工程有限公司钻井液公司, 2015: 399—403.  
HE Rui, ZHANG Zhenhua, PENG Yuntao, et al. Scale application of high density oil-based drilling fluid in Weiyuan Shale Gas Horizontal Well[C]// Proceedings of the 2015 Drilling Fluid Completion Fluids Group Working Conference and Technical Exchange Seminar. Beijing: China Petroleum Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd., Drilling Fluid Company, 2015: 399—403.
- [7] 杨洪志, 张小涛, 陈满, 等. 四川盆地长宁区块页岩气水平井地质目标关键技术参数优化[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 60—65.  
YANG Hongzhi, ZHANG Xiaotao, CHEN Man, et al. Optimization on the key parameters of geologic target of shale-gas horizontal wells in Changning Block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 60—65.
- [8] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 1—5, 91.  
HE Tao, LI Maosen, YANG Lanping, et al. Application of oil-based drilling fluid in shale gas horizontal well in district of Weiyuan[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(3): 1—5, 91.
- [9] 李哲. 抗高温油基钻井液体系的研制[D]. 东营: 中国石油大学, 2011.  
LI Zhe. Research on oil based drilling fluid with high temperature resistance[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2011.
- [10] Van Oort, Eric Hale, A. H., Mody, et al. Transport in shales and the design of improved water-based shale drilling fluids[J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(3): 137—146.
- [11] 王中华. 页岩气水平井钻井液技术的难点及选用原则[J]. 中外能源, 2012, 17(4): 43—47.  
WANG Zhonghua. Difficulty and applicable principle of the drilling fluid technology of horizontal wells for shale gas[J]. Sion-Globa Engeey, 2012, 17(4): 43—47.
- [12] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2001: 236—252.  
YAN Jienian. Drilling fluid technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001: 236—252.
- [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.  
TANG Guowang, GONG Weichao, YU Peizhi. Research and application of strong plugging oil-based drilling fluid system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(11): 21—25.
- [14] 陈安明, 李国楠. 低油水比油基钻井液在保页 3 井的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(7): 121—124.  
CHEN Anming, LI Guonan. Application of oil-based drilling fluid with low oil-water ratio in Baoye Well - 3[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7): 121—124.
- [15] 张建阔, 王旭东, 郭保雨, 等. 油基钻井液用固体乳化剂的研制与评价[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 58—64.  
ZHANG Jiankuo, WANG Xudong, GUO Baoyu, et al. Development and evaluation of a solid emulsifier for oil based drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 58—64.
- [16] 覃勇, 蒋官澄, 邓正强, 等. 抗高温油基钻井液主乳化剂的合成与评价[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 6—10.  
QIN Yong, JIANG Guancheng, DENG Zhengqiang, et al. Synthesis and evaluation of a primary emulsifier for high temperature oil base drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 6—10.

(编辑 韩丽丽)