

# 页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用

王显光, 李 雄, 林永学

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘 要:**国内页岩油气水平井用油基钻井液(OBM)存在切力低、流变性能差等问题,难以完全满足页岩油气长水平井钻井施工井壁稳定与井眼清洁的技术要求。针对上述问题,在借鉴国外先进技术的基础上,开展了页岩油气水平井用 OBM 体系构建,在研发核心处理剂的基础上,形成了一套高性能油基钻井液体系,对其综合性能进行了系统研究,该钻井液体系整体性能指标达到国外同类钻井液体系水平。该油基钻井液在彭页 2HF 井水平段钻进中进行了成功应用,并创造了国内陆上页岩气水平井水平段和水平位移最长的新纪录。高性能油基钻井液技术的成功研究与应用,提高了我国高性能油基钻井液技术的自主化水平。

**关键词:**页岩 水平井 高性能油基钻井液 井眼稳定 井眼净化 彭页 2HF 井

**中图分类号:**TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)02-0017-06

## Research and Application of High Performance Oil Base Drilling Fluid for Shale Horizontal Wells

Wang Xianguang, Li Xiong, Lin Yongxue

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** Starting late, study on high performance oil base drilling fluid in China lags way behind that in overseas countries. Domestic oil base drilling fluid, with shortcomings like low yield value and poor rheologic property, can not fully meet the requirements of wellbore stabilization and hole cleaning in the drilling of shale horizontal wells. In view of the above-mentioned questions, by learning from advanced overseas technology, high performance oil base drilling fluid (HPOBM) for shale horizontal wells was designed. Then, a new HPOBM formula was studied after some key materials were developed, and its comprehensive performance was evaluated systematically. The test result showed that the technological parameters of this formula could compare with those of the similar overseas HPOBM. The new oil base drilling fluid formula was used successfully in shale gas horizontal well of Pengye 2HF, and this well set a new record of the longest horizontal well section and horizontal displacement in China. So, the development and application of this technology is of great significance in bringing the manufacture of domestic HPOBM to a higher level.

**Key words:** shale; horizontal well; high performance oil base drilling fluid; hole stabilization; hole cleaning; Well Pengye 2HF

## 1 概 述

近年来,随着美国在页岩油气资源商业开发上取得成功,页岩油气水平井开发用高性能钻井液技术成为各国钻井液从业人员关注的焦点和研究的热点<sup>[1-5]</sup>。用于商业开发的页岩油气水平井水平段一般长达 800~2 500 m<sup>[6]</sup>,施工过程中对钻井液的井眼清洁能力和润滑性能<sup>[7-8]</sup>要求极高;页岩油气富集

的目的层其硬脆性矿物含量高、页岩层理和微裂隙

收稿日期:2013-01-06;改回日期:2013-03-12。

**作者简介:**王显光(1979—),男,山东青州人,2002年毕业于山东师范大学化学专业,2007年获中国科学院理化技术研究所油田化学专业博士学位,高级工程师,主要从事钻井液新技术与新材料方面的研究工作。

**联系方式:**(010)84988192, wangxg\_sripe@sinopec.com。

**基金项目:**中国石化科技攻关项目“页岩气藏水平井油基钻井液技术研究”(编号:P11053)部分研究内容。

发育,钻井过程中钻井流体的侵入易导致井壁失稳;另外,为了利于大规模的水力压裂和提高产能,页岩油气水平井通常沿最小水平主应力的方位钻进,容易导致严重的井壁失稳。因此,页岩油气水平井对钻井液技术提出了严峻的挑战<sup>[9]</sup>。

国外油基钻井液(OBM)技术的发展始于20世纪60年代,至90年代已经形成了完善的油基钻井液技术系列,可以满足页岩水平井、超大斜度定向井、高温高压超深井等现场施工。2005年前后,伴随着美国页岩油气水平井的大规模开发,其相应的高性能油基钻井液技术已经成熟<sup>[10-13]</sup>,钻井液成本大幅度降低。

国内OBM技术的发展始于20世纪80年代,大庆、胜利和中原等油田先后开展过相关技术探索,但由于成本高、投入产出比差、环保压力大等问题,OBM的应用范围和规模较小<sup>[14-15]</sup>,技术水平发展缓慢。国内与国外的技术差距主要表现为<sup>[16-18]</sup>:1)OBM体系虽然具有较好的乳化稳定性,但流变性能较差、切力低、悬浮能力差;为提高其切力、增强携岩能力,大量使用有机土、乳化剂等亲油胶体,导致其黏度大幅度升高、环空压耗明显上升,不仅导致钻井速度下降,而且大幅度增加了薄弱地层井漏的风险;2)OBM体系处理剂用量大,为降低综合成本带来了极大的难度。为此,笔者针对国内OBM体系存在的突出问题,根据页岩油气水平井的施工要求,在借鉴国外先进技术的基础上,开展了页岩油气水平井用OBM体系构建,形成了一套高性能油基钻井液体系(HPOBM),并在彭水地区的彭页2HF井成功应用,创造了国内陆上页岩气水平井水平段和水平位移最长的新纪录,对于国内其他地区的页岩油气水平井钻井施工也具有一定的借鉴意义。

## 2 设计思路

页岩油气水平井钻井过程中井壁失稳风险高、井眼清洁难度大、钻具摩阻大,因此用于页岩水平井的油基钻井液必须具有良好的乳化稳定性和流变性能,以及较强的随钻封堵性能。在借鉴国外公司相关技术的基础上,按照页岩水平井的施工要求,对页岩水平井用高性能油基钻井液体系进行了设计:

1)采用逆乳化油基钻井液,以有效降低成本。该钻井液体系油水比使用范围为90:10~60:40,为便于现场控制流变性能,油水比随着其密度的升高而逐渐增大。

2)注重油水两相的乳化稳定性<sup>[19]</sup>。常规乳化剂存在流变性能差、加量大、综合成本高等不足,根据亲水亲油平衡原理和表面活性剂分子结构与表面活性的关系<sup>[20]</sup>,开发出类似国外高性能油基钻井液用的聚合类表面活性剂,有效乳化油水界面,确保钻井过程中侵入地层的滤液完全为油相;同时,大分子量乳化剂可以显著增加钻井液体系的结构力,改善钻井液体系的流变性能,提高携岩能力。

3)注重钻井液体系流变性能的改善。根据相似相容原理和电性吸附作用原理,设计并研发了特殊结构的流型调节剂,进一步增强了钻井液体系的内部结构力,提高了钻井液体系的切力、低剪切条件下的结构力和动塑比,确保其具有良好的井眼清洁能力。

4)注重封堵材料的颗粒尺寸分布和刚性、塑性材质的选择。对多个地区的页岩储层岩样进行分析,获得页岩储层微裂隙的尺度范围,依据有效堆积和架桥理论<sup>[21]</sup>,设计合理粒径范围的刚性与塑性混配的随钻封堵材料,封堵裂隙、强化井筒,为油基钻井液合理密度的使用提供了保障。

## 3 配方与性能评价

基于上述页岩水平井用高性能油基钻井液体系设计原则,开展并完成了新型乳化剂、流型调节剂和随钻封堵剂等关键钻井液处理剂的研究与开发。在上述关键处理剂开发的基础上,通过对有机土、乳化剂、降滤失剂等处理剂的加量进行优化、油水比调整试验,得到了高性能油基钻井液体系(HPOBM)的配方组成:0号柴油+20.0%CaCl<sub>2</sub>盐水(CaCl<sub>2</sub>质量分数为25%)+1.5%主乳化剂+1.0%辅乳化剂+0.5%润湿剂+2.0%CaO+1.8%有机土+2.0%降滤失剂+0.3%提切剂+3.0%封堵剂。

### 3.1 基本性能

按照上述配方在室内进行了HPOBM体系的配置,步骤如下:加入配比量的柴油、乳化剂和润湿剂,高速搅拌10min后加入盐水,再高速搅拌20min;然后依次加入有机土、CaO、降滤失剂、提切剂和封堵剂,每种处理剂加入后高速搅拌15min,所有处理剂加完后再高速搅拌30min,得到密度为0.95kg/L的HPOBM体系。配置完毕,在150℃下老化16h,然后在50℃条件下测定钻井液体系老化前后的流变性能,在150℃、压差3.5MPa条件下测定其高温老化后的滤失量,结果见表1。

表 1 HPOBM 的基本性能

Table 1 Basic performance of HPOBM

试验条件	破乳电压/V	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比	φ6/φ3	静切力/Pa	API 滤失量/mL	高温高压滤失量/mL
老化前	1 327	15.0	6.5	0.43	6/5	2.5/3.5	0.4	
老化后	1 064	20.0	8.5	0.43	8/7	3.5/4.0	0	3.2

从表 1 可以看出, HPOBM 在 150 °C 老化前后乳化稳定性好, 破乳电压均在 1 000 V 以上; 同时 HPOBM 均具有良好的流变性能, 其动塑比高达 0.43, φ6/φ3 值较高, 高温高压滤失量较低, 达到了页岩水平井用高性能油基钻井液体系设计的要求。

### 3.2 抑制性能评价

选用宣城区块小陈岭组、黄平区块九门冲组和彭水区块龙马溪组地层的页岩岩样, 利用线性膨胀试验和岩屑回收试验对 HPOBM 的抑制性能进行了评价。膨胀率试验用岩样制备: 称取在 105±2 °C 温度下烘干的页岩岩屑粉(过 100 目筛) 10.0 g, 在压样机模具中以 4 MPa 压力压制 5 min, 制成柱状试样; 在 OFIT 页岩膨胀仪上, 分别测定其在蒸馏水和 HPOBM 中浸泡 12 h 后的膨胀率(见表 2)。用 6~10 目页岩钻屑进行回收试验, 在 150 °C 下热滚 16 h 后, 用 60 目筛回收, 使用石油醚冲洗干净后, 在 105±2 °C 干燥后称重, 结果见表 2。

表 2 膨胀率、回收率试验结果

Table 2 Results of swelling and recovery rate

页岩层位	区块	膨胀率, %		回收率, %	
		清水	HPOBM	清水	HPOBM
小陈岭组	宣城	8.1	0.3	68.2	96.8
九门冲组	黄平	10.5	0.3	69.9	97.5
龙马溪组	彭水	7.4	0.2	84.5	98.2

由表 2 可知, HPOBM 具有良好的抑制性能, 可以有效抑制页岩水化膨胀与分散。

### 3.3 抗污染性能评价

针对页岩水平井施工过程中油基钻井液可能受到的污染, 分别进行了抗钻屑、抗盐和抗水污染试验, 其结果见表 3~5。

由表 3~5 可知, 随着钻屑和盐等固相的侵入, HPOBM 的破乳电压基本不变, 其塑性黏度和切力略微上升, 说明其具有良好的乳化稳定性, 具有良好的抗钻屑和抗盐污染的能力; 当 HPOBM 中水的侵入量增加时, 其塑性黏度与切力上升, 但变化不大,

表 3 抗钻屑污染试验结果

Table 3 Results of cutting pollution resistance test

钻屑加量, %	破乳电压/V	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa	高温高压滤失量/mL
0	1 064	20.0	8.5	3.5/4.0	3.2
5	1 057	21.0	9.0	3.5/4.5	3.0
10	1 017	22.0	9.5	4.5/5.0	2.8

注: 试验所用的钻屑粉为黄平区块九门冲组地层的页岩。

表 4 抗盐污染试验结果

Table 4 Results of salt resistance test

盐加量, %	破乳电压/V	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa	高温高压滤失量/mL
0	1 064	20.0	8.5	3.5/4.0	3.2
5	1 081	22.0	9.5	4.0/4.5	2.8
10	1 017	23.0	10.0	4.5/5.5	2.8

注: 试验所用的盐为 NaCl 与 CaCl<sub>2</sub> 的组合, 两者质量之比为 1:1。

表 5 抗水污染实验结果

Table 5 Results of water resistance test

水加量, %	破乳电压/V	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa	高温高压滤失量/mL
0	1 064	20.0	8.5	3.5/4.0	3.2
5	1 042	22.0	9.0	4.0/4.5	2.6
10	927	24.5	10.5	4.5/6.0	3.4
15	683	27.5	11.0	5.5/7.5	3.4

说明其流变性能稳定。同时, 水的大量侵入导致其破乳电压下降, 当水侵入量为 15% 时, 实际油水比为 68:32, 此时破乳电压仍达 683 V, 表明 HPOBM 具有良好的乳化稳定性。

上述试验结果表明, HPOBM 具有优良的抗污染性能。

### 3.4 封堵性能评价

页岩微裂隙的有效模拟是钻井液封堵性能评价的难点。通过对比多种模拟评价方法, 采用针对性强和重复性高的高温高压页岩床模拟封堵试验对 HPOBM 的封堵能力进行了评价。在 GGS71-A 型高温高压滤失仪浆杯中先后加入高温高压滤纸、粒径为 0.43~0.85 mm 的黄平区块九门冲组地层页

岩屑和粒径为 0.15~0.25 mm 的岩屑粉,端面平整后沿杯壁缓慢加入 400 mL 的 HPOBM,密封后通过气源加压,测定其在不同压力条件下的滤失量(见表 6)。

表 6 不同封堵剂加量下 HPOBM 的高温高压页岩床封堵效果  
Table 6 Plugging performance evaluation of HPOBM by the method of HTHP simulated shale formation

封堵剂加量, %	滤失量/mL	
	3.0 MPa×150 °C	4.5 MPa×150 °C
0	8.6	14.2
1.5	1.2	1.8
3.0	0	0.2
4.5	0	0

试验结果表明,HPOBM 在加入合理粒度级配的封堵剂后,在模拟页岩床中的高温高压滤失量大大幅度降低,表现出良好的页岩微裂隙封堵效果。当加量至 3.0%时,在 3.0 和 4.5 MPa 压力下,滤失量降低为 0 和 0.2 mL,说明封堵材料的粒径分布与模拟页岩具有较好的匹配性,封堵材料中刚性粒子与塑性变形粒子配比合理,形成的封堵层具有良好的承压能力。

### 3.5 高温高压流变性能评价

为了研究井下高温高压条件下 HPOBM 的流变性能,采用 Anton Paar Physica MCR101 型高温高压流变仪,测定了密度 1.40 kg/L HPOBM 在 6 MPa 压力下,20,40,60,80,120 和 150 °C 温度下的流变性,结果见图 1。

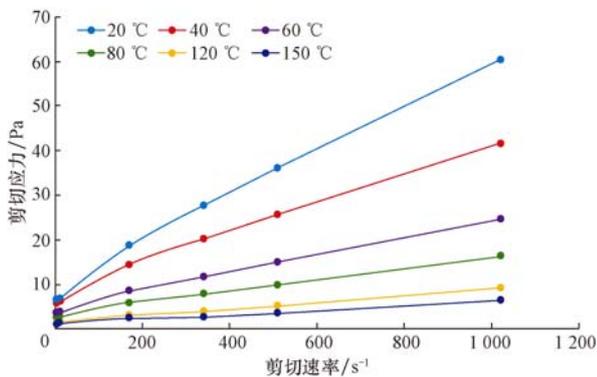


图 1 HPOBM 高温高压流变性能曲线

Fig. 1 Curve of HPOBM rheologic property under HTHP

#### 3.5.1 温度对流变曲线的影响

从图 1 可以看出,在同一剪切速率下 HPOBM 的剪切应力随着温度的升高而降低,从 20 °C 升至

60 °C 时,剪切应力降低明显;当温度进一步升至 150 °C 时,剪切应力随温度变化的幅度减小;高剪切速率下 HPOBM 的剪切应力变化幅度明显大于低剪切速率下的剪切应力变化幅度。同时,可以发现 HPOBM 的流变曲线不过原点,但随着温度的升高,曲线趋向接近原点,并趋于直线,这表明在温度低于 40 °C 时,HPOBM 属于典型的塑性流体,可以用宾汉模式来描述;当温度高于 40 °C 时,HPOBM 接近于假塑性流体,可以用宾汉模式或幂律模式来描述。

#### 3.5.2 温度对流变参数的影响

为了考察温度对 HPOBM 流变参数的影响,在同等条件下测定了 Baroid 公司同密度 Integrade OBM 的流变参数,结果见图 2。

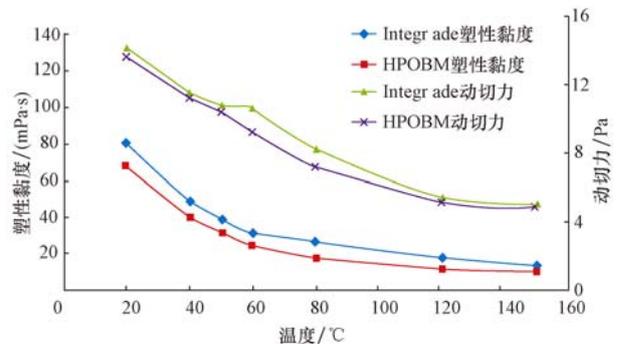


图 2 温度对 HPOBM 和 Integrade OBM 流变参数的影响

Fig. 2 Effect of temperature on HPOBM and Integrade OBM rheologic property

从图 2 可以看出,温度对 HPOBM 和 Integrade OBM 的流变参数的影响规律完全一致。在 20~150 °C 时,随着温度的逐渐升高,HPOBM 和 Integrade OBM 的塑性黏度与动切力均下降,表现出油基钻井液温敏性的特征,尤其在 20~40 °C 时,二者降幅明显。当温度高于 60 °C 后,HPOBM 和 Integrade OBM 的塑性黏度与动切力均逐渐下降,150 °C 时其塑性黏度、动切力分别为 10.0 mPa·s、4.8 Pa 和 13.1 mPa·s、5.0 Pa,表明新研发的 HPOBM 与 Integrade OBM 一样,在高温高压条件下具有良好的流变性能。

### 3.6 与国外油基钻井液体系性能的对标

为确保现场施工时的井下安全,在室内评价了同等条件下 HPOBM 的性能指标,并与中国石化应用国外油基钻井液的几口页岩水平井的钻井液性能进行了对比,结果见表 7。

表 7 HPOBM 与 Baroid 油基钻井液体系的性能对比

Table 7 Performance comparison between HPOBM and Baroid oil-base mud

体系名称	应用井	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	破乳电压/ V	塑性黏度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	动切力/ Pa	静切力/ Pa	动塑比	高温高压滤 失量/mL
Baroid Integrate OBM	彭页 HF-1 井	1.40	650	30	9.0	4.0/7.0	0.30	2.8
HPOBM		1.40	1 235	29	12.5	5.0/7.0	0.44	2.4
Baroid Integrate OBM	涪页 HF-1	1.70	720	56	13.5	9.0/18.0	0.24	2.6
HPOBM		1.70	1 051	39	12.5	5.0/8.0	0.32	2.6
Baroid @Invert OBM	建页 HF-1	1.45	1 003	33	13.5	6.5/12.0	0.41	2.2
HPOBM		1.45	1 048	32	13.0	5.0/8.0	0.40	2.4

从表 7 可以看出, HPOBM 的室内性能与 Baroid 公司的 OBM 相当, 具有良好的乳化稳定性、较低的塑性黏度、较高的切力和理想的动塑比, 表明 HPOBM 达到了设计的预期目的, 其整体性能可以满足页岩油气水平井油基钻井液现场施工的技术要求。

#### 4 现场应用及效果

彭页 2HF 井是部署在彭水德江褶皱带桑柘坪向斜构造的一口页岩气评价水平井, 采用三级井身结构。三开( $\phi 215.9 \text{ mm}$  井眼)钻探目的层为下志留统龙马溪组, 主要为深灰色—灰黑色页岩、灰黑

色—黑色碳质页岩, 设计页岩水平段长 1 200 m。由于龙马溪组地层页岩层理和微裂隙发育, 且该井设计水平段长, 易形成岩屑床导致钻具托压, 因此施工过程中存在井壁稳定难度大、井眼清洁要求高、钻具摩阻大和漏失风险高等钻井难点。

针对彭页 2HF 井存在的上述钻井难点, 在进行室内试验与技术论证的基础上, 三开采用了 HPOBM 进行施工, 施工井段为 1 620~3 990 m, 累计进尺 2 370 m, 完钻水平段长 1 650 m, 水平位移 1 932.84 m, 创国内陆上页岩气水平井水平段和水平位移最长的新纪录, 不同层段 HPOBM 的性能见表 8。

表 8 彭页 2HF 井三开井段 HPOBM 性能

Table 8 Properties of HPOBM in the 3rd spud section of Well Pengye 2HF

井段/m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	漏斗 黏度/s	破乳电压/V	塑性黏度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	动切力/Pa	静切力/Pa	高温高压滤 失量/mL	Cl <sup>-</sup> 质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1 620~1 994	1.26~1.27	65~70	800~1 000	22~24	9.0~12.0	3.5~4.5/4.0~6.0	0.4~0.8	12 000~14 500
1 994~2 173	1.27~1.29	65~75	1 000~1 100	19~25	7.5~9.5	3.5~5.0/5.0~6.0	0.4~0.8	13 000~16 500
2 173~3 100	1.29~1.31	65~78	1 000~1 100	21~27	8.5~11.0	4.5~6.5/5.0~8.0	1.2~2.4	14 500~17 500
3 100~3 700	1.30~1.32	67~90	1 000~1 400	23~28	10.0~12.5	4.5~8.0/6.0~12.0	1.8	15 000~16 500
3 700~3 990	1.32	80~90	1 350~1 450	26~27	12.5~13.5	6.5~7.5/8.0~13.0	1.8	16 500

彭页 2HF 井三开井段实钻结果表明, HPOBM 性能稳定, 流变性良好, 携岩返砂正常, 润滑性良好, 起下钻通畅, 随钻封堵效果好, 成功解决了页岩井壁失稳、长水平段携砂困难、摩阻大和漏失频发等技术难题, 顺利完成了该井段的钻井施工, 确保了套管的顺利下入。

#### 5 结论与建议

1) 在借鉴国外先进技术的基础上, 根据相似相溶、表面活性与分子结构关系、亲水亲油平衡、电性吸附作用和裂隙有效封堵等理论, 提出了页岩

水平井用高性能油基钻井液的构建与设计方法。

2) 在核心处理剂研发的基础上, 形成了一套高性能油基钻井液体系, 室内对其综合性能进行了系统评价, 结果表明其抑制性强、高温高压流变性好, 同时具有良好的抗污染能力与封堵效果, 整体性能与国外先进油基钻井液体系相当。

3) 彭页 2HF 井现场应用表明, 高性能油基钻井液可解决页岩水平井井壁失壁、井眼清洁要求高、钻具摩阻大等技术难题, 完全满足页岩油气水平井现场施工的技术要求。

4) 为了扩大高性能油基钻井液的应用范围、降

低成本,建议进一步开展高性能油基钻井液回收再利用和配套堵漏技术研究与试验。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] 张抗,谭云冬.世界页岩气资源潜力和开发现状及中国页岩气发展前景[J].当代石油石化,2009,17(3):9-12.  
Zhang Kang, Tan Yundong. The status of world shale gas resources potential and production status as well as development prospect of China's shale gas[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2009, 17(3): 9-12.
- [2] 李新景,胡素云,程克明.北美裂缝型页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.  
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [3] Aragao A F L, Quintero L, Martins A L, et al. A novel approach for drilling and gravel packing horizontal wells in the presence of reactive shales using a solids-free synthetic fluid [R]. SPE 102295, 2006.
- [4] Deville Jay P, Fritz Brady, Jarrett Michael. Development of water-based drilling fluids customized for shale reservoirs [R]. SPE 140868, 2011.
- [5] Oleas Andres, Osuji Collins E, Chenevert Martin E, et al. Entrance pressure of oil-based mud into shale: effect of shale, water activity, and mud properties [R]. SPE 116364, 2008.
- [6] 崔思华,班凡生,袁光杰.页岩气钻完井技术现状及难点分析[J].天然气工业,2011,31(4):72-75.  
Cui Sihua, Ban Fansheng, Yuan Guangjie. Status quo and challenges of global shale gas drilling and completion [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 72-75.
- [7] 江怀友,宋新民,安晓璇,等.世界页岩气资源勘探开发技术综述[J].天然气技术,2008,2(6):26-30.  
Jiang Huaiyou, Song Xinmin, An Xiaoxuan, et al. Global shale gas resources and its E & P technologies [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 26-30.
- [8] 张卫东,郭敏,杨延辉.页岩气钻采技术综述[J].中外能源,2010,15(6):35-40.  
Zhang Weidong, Guo Min, Yang Yanhui. Shale gas drilling technologies at a glance [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(6): 35-40.
- [9] 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]. Sino-Global Energy, 2012, 17(4): 43-47.
- [10] Hutton Alistair, Vickers Stephen, Davidson Marcus, et al. Design and application of invert emulsion drilling and aqueous completion fluids for long horizontal multilateral wells [R]. SPE 121905, 2009.
- [11] Wagner M, Webb T, Maharaj M, et al. Horizontal drilling and openhole gravel packing with oil-based fluids: an industry milestone [R]. SPE 87648, 2006.
- [12] Ladva H K J, Brady M E, Sehgal P, et al. Use of oil-based reservoir drilling fluids in open-hole horizontal gravel-packed completions: damage mechanisms and how to avoid them [R]. SPE 68959, 2001.
- [13] Hemphill T, Duran W. Changing shale strengths with invert emulsion drilling fluids: theory, measurement, and modeling [R]. SPE 123013, 2009.
- [14] 张伟,刘振东,刘宝锋,等.油基钻井液的推广及循环利用[J].石油钻探技术,2008,36(6):34-38.  
Zhang Wei, Liu Zhendong, Liu Baofeng, et al. Popularization and recycling of oil-based drilling fluid [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(6): 34-38.
- [15] 许明标,张春阳,龚纯武,等.一种简化现场作业的高性能油基钻井液[J].石油天然气学报,2008,30(3):120-122.  
Xu Mingbiao, Zhang Chunyang, Gong Chunwu, et al. Research of a simplified field operation and high performance oil base drilling fluid [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(3): 120-122.
- [16] 何振奎,泌页 HF-1 井油基钻井液技术 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 32-37.  
He Zhenkui. Oil base drilling fluid technology applied in Well Biye HF-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 32-37.
- [17] 姜政华,童胜宝,丁锦鹤,彭页 HF-1 页岩气水平井钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 28-31.  
Jiang Zhenghua, Tong Shengbao, Ding Jinhe. Key technologies adopted for shale gas horizontal Well Pengye HF-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 28-31.
- [18] 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 & Gas Field, 2011, 18(4): 533-537.
- [19] 鄢捷年.钻井液工艺学 [M]. 东营:石油大学出版社, 2001: 240-260.  
Yan Jienian. Drilling fluid technology [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 240-260.
- [20] 肖进新,赵振国.表面活性剂应用原理 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003: 51-52.  
Xiao Jinxian, Zhao Zhenguo. Application principle of surfactants [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 51-52.
- [21] Loeppke Gelan E, Glowka David A, Wright Elton K. Design and evaluation of lost-circulation materials for severe environments [J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(3): 328-337.