



引用格式:杨加伟,熊青山,吴胜,等.页岩气水平井防塌水基钻井液体系研究[J].科学技术与工程,2021,21(12):4891-4896.

Yang Jiawei, Xiong Qingshan, Wu Sheng, et al. Anti-sloughing water based drilling fluid system for shale gas horizontal wells[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 4891-4896.

石油、天然气工业

## 页岩气水平井防塌水基钻井液体系研究

杨加伟,熊青山\*,吴胜,李成龙,刘恒

(长江大学石油工程学院,武汉430100)

**摘要** 为解决油基钻井液在页岩气水平井中应用时带来的环保问题和钻井液处理成本较高的问题,通过室内实验优选出了性能优良的封堵剂、抑制剂和润滑剂,并结合其他处理剂,研究出一套适合页岩气水平井的防塌水基钻井液体系,室内对其综合性能进行了评价。结果表明:钻井液体系经过130℃老化后,其流变性能稳定、滤失量较小,具有良好的耐温性能;钻井液体系低渗砂盘封堵实验的瞬时滤失量和静态滤失速率分别为0.6 mL和0.33 mL/min,具有良好的封堵性能;钻井液体系的抑制性能和润滑性能与现场油基钻井液体系基本相当,能够很好的起到抑制页岩水化分散和降低摩擦阻力的作用;另外,钻井液体系中加入20% NaCl、2% CaCl<sub>2</sub>和20%岩屑后,体系老化前后的流变性能和滤失量变化均不大,说明体系具有较强的抗污染能力。现场应用结果表明,使用防塌水基钻井液施工的X-101井钻井过程顺利,各项施工参数均达到设计要求,并且与前期已钻井X-3HM井相比,钻井周期、井下复杂时间以及平均井径扩大率均明显降低,水平段钻速明显提高,达到了良好的钻井效果。

**关键词** 页岩气储层;水平井;水基钻井液;封堵性;抑制性

**中图分类号** TE254.3; **文献标志码** A

### Anti-sloughing Water Based Drilling Fluid System for Shale Gas Horizontal Wells

YANG Jia-wei, XIONG Qing-shan\*, WU Sheng, LI Cheng-long, LIU Heng

(School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

**[Abstract]** In order to solve the problems of environmental protection and high cost of drilling fluid treatment caused by the application of oil-based drilling fluid in shale gas horizontal wells, plugging agents, inhibitors and lubricants with excellent performances were selected through laboratory experiments, and an anti-sloughing water-based drilling fluid system suitable for shale gas horizontal wells was developed in combination with other treatment agents, and its comprehensive performance was evaluated in the laboratory. The results show that after aging at 130 °C, the rheological property of the drilling fluid system is stable, the filtration capacity is small, and it has good temperature resistance. The instantaneous filtration rates and static filtration rates of the plugging experiment of the low permeability sand pan of the drilling fluid system are 0.6 mL and 0.33 mL/min, respectively, which have good plugging performance. The inhibition and lubrication performance of the drilling fluid system are basically the same as that of the field oil-based drilling fluid system. In addition, when 20% NaCl, 2% CaCl<sub>2</sub> and 20% cuttings are added into the drilling fluid system, the rheological properties and filtration capacity of the system before and after aging do not change much, indicating that the system has strong anti-pollution ability. The field application results show that the drilling process of well X-101 using the new anti-sloughing water-based drilling fluid is smooth, all construction parameters meet the design requirements, and compared with the previously drilled well X-3HM, the drilling cycle, downhole complex time and average well diameter expansion rate are significantly reduced, and the drilling speed in the horizontal section is significantly improved, achieving good drilling results.

**[Keywords]** shale gas reservoir; horizontal well; water-based drilling fluid; plugging; inhibition

收稿日期:2020-10-27; 修订日期:2020-12-25

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05043,2016ZX05025-004-003)

第一作者:杨加伟(1995—),男,汉族,湖北潜江人,硕士研究生。研究方向:油气钻完井工艺技术与钻井液。E-mail:1924962391@qq.com。

\*通信作者:熊青山(1971—),男,汉族,湖北荆州人,博士,教授。研究方向:油气钻完井工艺技术与工程流体力学。E-mail:1924962391@qq.com。

中国的页岩气资源分布广泛、储量丰富,主要分布在四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地以及松辽盆地等地区,其中四川盆地的长宁和威远地区是我国率先开展页岩气开采的实验地区,其探明的页岩气可开采储量占比非常高,具有比较广阔的勘探开发前景<sup>[1-3]</sup>。页岩气储层与常规储层相比,通常具有低孔、低渗的特点,并且还普遍具有微裂缝发育以及水敏性较强的特点,在钻井过程中极易引起黏土水化分散,进而造成井壁失稳、垮塌等井下复杂事故的发生,而钻井液作为长井段页岩气水平井钻井的关键技术,其性能好对页岩气储层的开发起着至关重要的作用<sup>[4,6]</sup>。

油基钻井液通常具有较强的抑制性、良好的润滑性以及封堵性能,往往成为页岩气水平井钻井施工的首选,但随着近年来环保要求越来越严格,并且由于油基钻井液配制和后期处理的成本较高等问题,国内外各大油气服务公司逐渐将研究的重点转移到高性能水基钻井液上来。林永学等<sup>[7]</sup>总结了中石化近年来油基钻井液技术研究的进展与应用情况,认为国内的油基钻井液体系还存在着流变性能较差、高性能处理剂缺乏以及配套技术不够完善等问题,并且还存在着含油钻屑或废弃油基钻井液的处理困难问题等,建议应该加大高性能水基钻井液的研究与技术攻关,实现页岩气的低成本、绿色开发。刘振东<sup>[8]</sup>分析了油基钻井液在胜利油田页岩储层应用过程中存在的问题,并提出了相应的对策,认为油基钻井液还存在着乳液稳定性差、封堵性能差、原油污染以及油基钻屑和钻井液回收处理困难等问题,建议在提高油基钻井液综合性能的同时,应采用更先进的方法研究泥页岩水化稳定性机理,以指导泥页岩储层的勘探开发。李文涛等<sup>[9]</sup>分析了四川页岩气井油基钻井液的损耗问题,认为油基钻屑携带是造成油基钻井液损害的最主要原因,应该将其进行回收继续利用,以避免污染环境和资源浪费,并降低钻井液成本,研究了回收现场钻井液的设备,评价了回收钻井液的性能。

与油基钻井液相比,高性能水基钻井液具有良好的环保性能和成本优势,在满足抑制性、润滑性和封堵性能要求的前提下,高性能水基钻井液逐渐成为页岩气水平井钻井液技术发展的趋势。国外的哈利伯顿、贝克休斯以及斯伦贝谢等油气服务公司已经研究开发出一系列的页岩气水基钻井液技术,并在一些油田成功进行了应用<sup>[10-14]</sup>。而近年来,中国的页岩气水基钻井液技术也取得了一些研究成果,景岷嘉等<sup>[15]</sup>针对长宁地区龙马溪组页岩气水平井钻井过程中存在井壁失稳的问题,以

疏水抑制剂 CQ-SIA 和液体润滑剂 CQ-LSA 为主要处理剂研制了一套疏水抑制水基钻井液体系,该钻井液体系具有良好的抑制性能、封堵性能、润滑性能和抗污染性能,并在现场成功进行了应用,可以满足长宁地区页岩气水平井施工的需要。景丰等<sup>[16]</sup>针对延长组页岩气水平井段易发生井塌、井漏等复杂情况,而使用油基钻井液容易对环境造成污染的问题,研究了一种可代替油基钻井液的高性能抑制防塌水基钻井液体系,该钻井液体系具有较强的抑制性能和封堵性能,并且兼具良好的润滑性和热稳定性,可以满足延长组页岩气井钻井的需求。林永学等<sup>[17]</sup>为解决威远地区深层页岩气水平井长水平段井眼失稳的问题,研究了一套强抑制、强封堵水基钻井液体系,在威页 23 平台 3 口页岩气水平井成功进行了应用,取得了良好的现场应用效果。但整体而言中国的页岩气水基钻井液技术与国外相比仍存在一定的差距,因此,需要针对中国页岩气储层的特点,研究出相应的高性能水基钻井液体系,为推动中国页岩气资源的合理高效开发做出一定的贡献<sup>[18-20]</sup>。现以威远地区页岩区块为研究对象,针对页岩气水平井井壁坍塌、失稳等问题,通过关键处理剂的优选及评价,研究一套适合页岩气水平井的新型防塌水基钻井液体系,室内评价该体系的流变性能、封堵性能、抑制性能、润滑性能和抗污染性能,并在现场进行应用试验。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及仪器

(1)实验材料:NaCl、CaCl<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KCl、降滤失剂 PAC-LV、降滤失剂 FLO、流型调节剂 HZN-2、抑制剂 SYH-1、SYH-2、SYH-3、润滑剂 HLB、LUBE、RHJ-101、RHJ-102、RHJ-103、封堵剂 FT-102、纳米乳液、碳酸钙、重晶石、膨润土;储层段页岩钻屑;现场用油基钻井液。

(2)实验仪器:ZNN-D6B 型六速旋转黏度计;ZNS-2 型中压滤失仪;KC-GS175 型高温高压滤失仪;Fann 型 PPA 全自动高温高压堵漏仪;NP-03 型高温高压页岩膨胀仪;EP-2 型极压润滑仪;GNF 高温高压黏附系数测定仪。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 钻井液基本性能评价

钻井液流变性能和切力使用 ZNN-D6B 型六速旋转黏度计测定;钻井液 API 滤失量使用 ZNS-2 型中压滤失仪测定;钻井液 HTHP 滤失量使用 KC-GS175 型高温高压滤失仪测定。

### 1.2.2 封堵性能评价

封堵剂优选采用高温高压滤失量实验结果进行评价,通过测定基浆中加入不同封堵剂后的累积滤失量来评价其封堵性能。钻井液体系封堵性能评价通过低渗砂盘封堵(permeability plugging apparatus, PPA)实验来进行,实验仪器使用 Fann 型 PPA 全自动高温高压堵漏仪。

### 1.2.3 抑制性能评价

抑制剂优选采用岩屑滚动回收率实验结果进行评价,通过测定加入不同抑制剂后储层段岩屑的滚动回收率来评价其抑制性能。钻井液体系抑制性能评价通过岩屑滚动回收率实验和页岩线性膨胀率实验来进行,线性膨胀率实验仪器使用 NP-03 型高温高压页岩膨胀仪。

### 1.2.4 润滑性能评价

润滑剂优选采用极压润滑系数实验结果进行评价,通过测定基浆中加入不同润滑剂后的极压润滑系数来评价其润滑性能。钻井液体系润滑性能评价通过极压润滑系数和高温高压黏附系数实验来进行,极压润滑系数测定仪器使用 EP-2 型极压润滑仪,高温高压黏附系数测定仪器使用 GNF 高温高压黏附系数测定仪。

### 1.2.5 抗污染性能评价

在钻井液体系中加入不同的污染物后,测定体系流变性能、切力和滤失量的变化情况,以此评价钻井液体系的抗污染性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 关键处理剂优选及钻井液体系配方

#### 2.1.1 封堵剂优选

封堵剂是防塌水基钻井液体系的关键处理剂之一,性能优良的封堵剂能够有效降低钻井液滤液的侵入,进而降低泥页岩井壁垮塌的风险。参照 1.2.2 节中的实验方法,室内采用高温高压静失水实验方法对不同类型的封堵剂及其复配后的封堵效果进行了评价,实验用基浆配方为:4% 膨润土浆 + 0.8% 降滤失剂 PAC-LV,实验条件为 120 °C × 3.5 MPa,测定 30 min 内基浆中加入不同封堵剂后的累计滤失量,实验结果如图 1 所示。

由图 1 结果可知,在基浆中加入不同类型的封堵剂后,高温高压滤失量均出现明显的下降趋势,其中复配封堵剂 5% 纳米乳液 + 5% FT-102 的封堵效果最好,30 min 的累计滤失量仅为 5.4 mL,降滤失效果较好。因此,选择复配体系 5% 纳米乳液 + 5% FT-102 作为新型防塌水基钻井液体系的封堵剂。

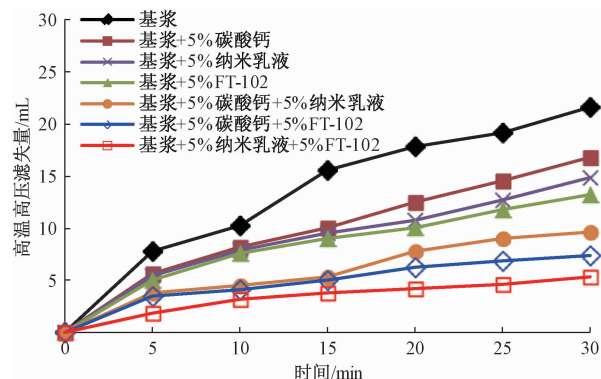


图 1 封堵剂优选评价实验结果

Fig. 1 Experimental results of plugging agent optimization and evaluation

#### 2.1.2 抑制剂优选

页岩储层通常含有较多的黏土矿物,在钻井过程中极易引发黏土颗粒水化膨胀、分散运移的情况,因此,在页岩气井用水基钻井液中必须加入抑制剂来抑制黏土矿物的水化作用。参照 1.2.3 节中的实验方法,室内采用测定岩屑滚动回收率的实验方法对不同抑制剂的效果进行了评价,实验用岩屑取自目标页岩气区块的储层段,滚动老化实验条件为 120 °C × 16 h,实验结果如图 2 所示。

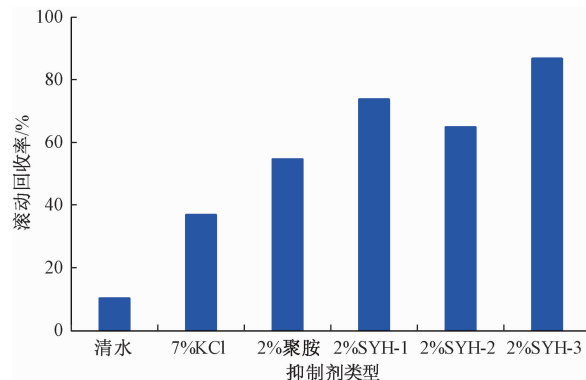


图 2 抑制剂优选评价实验结果

Fig. 2 Experimental results of inhibitor selection and evaluation

由图 2 结果可以看出,目标区块储层段岩屑在清水中滚动回收率仅为 10% 左右,说明该页岩具有较强的水化膨胀分散作用;加入不同的抑制剂后,岩屑的滚动回收率均有所增大,其中 2% 抑制剂 SYH-3 的抑制效果最好,岩屑滚动回收率可以达到 85% 以上,起到了良好的抑制黏土水化分散的作用。因此,选择 2% SYH-3 作为新型防塌水基钻井液体系的抑制剂。

#### 2.1.3 润滑剂优选

由于页岩气水平井井段较长,井壁与钻具之间的接触面积通常比较大,这就需要钻井液体系具有

良好的润滑性能来降低钻具与井壁之间的摩擦。参照 1.2.4 节中的实验方法,室内采用测定极压润滑系数的实验方法评价了不同润滑剂的润滑性能,在基浆(配方同 2.1.1 节)中加入不同类型的润滑剂,润滑剂加量均为 3%,实验温度为常温,实验结果如图 3 所示。

由图 3 结果可知,在基浆中加入不同类型的润滑剂后,体系的极压润滑系数均出现了不同程度的降低,其中润滑剂 RHJ-102 的极压润滑系数最小,能够起到良好的降低摩擦阻效果。因此,选择 3% RHJ-102 作为新型防塌水基钻井液体系的润滑剂。

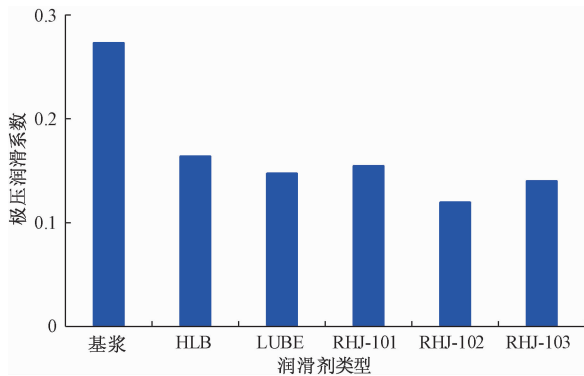


图 3 润滑剂优选评价实验结果

Fig. 3 Experimental results of lubricant optimization evaluation

#### 2.1.4 新型防塌水基钻井液体系配方

通过对以上关键处理剂的优选及评价,并结合流型调节剂、降滤失剂以及重晶石等其他处理剂,形成了一套适合页岩气水平井的新型防塌水基钻井液体系,具体配方为:4% 膨润土浆 + 0.3%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 0.8% 降滤失剂 PAC-LV + 0.15% 流型调节剂 HZN-2 + 2% 降滤失剂 FLO + 5% 纳米乳液 + 5% FT-102 + 2% 抑制剂 SYH-3 + 3% 润滑剂 RHJ-102 + 7% KCl + 重晶石至密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ 。

### 2.2 新型防塌水基钻井液性能评价结果

#### 2.2.1 基本性能

通过对目标区块储层资料的调研分析可知,该区块页岩储层段龙马溪组的地层温度一般在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,最高温度一般不会超过  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因此,室内测定了在不同温度老化后新型防塌水基钻井液体系的流变性能和滤失性能,实验结果如表 1 所示。

表 1 新型防塌水基钻井液体系的基本性能

Table 1 Basic performance of new anti-sloughing water based drilling fluid system

老化条件	表观黏度 AV/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	塑性黏度 PV/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	动切力 YP/Pa	静切力 Gel/Pa	常温常压滤失量 FL <sub>API</sub> /mL	高温高压滤失量 FL <sub>HHP</sub> /mL
老化前	76.5	64.0	12.5	5.0/9.5	—	—
110 $^\circ\text{C}$ 老化后	74.0	62.0	12.0	5.0/9.0	0.8	3.6
120 $^\circ\text{C}$ 老化后	72.5	61.0	11.5	4.5/8.5	1.1	4.0
130 $^\circ\text{C}$ 老化后	71.5	60.0	11.5	4.0/8.0	1.2	4.2

由表 1 结果可以看出,新型防塌水基钻井液体系经过不同温度老化后流变性能和动切力变化均不大,API 滤失量小于 1.5 mL,高温高压滤失量小于 4.5 mL。可见该钻井液体系经过高温老化后仍具有良好的流变性能和较低的滤失量,并且还具有良好的耐高温性能。

#### 2.2.2 封堵性能

室内采用低渗砂盘封堵实验(PPA)对新型防塌水基钻井液体系的封堵性能进行了评价,并与现场油基钻井液体系进行对比。实验条件为  $120 \text{ }^\circ\text{C} \times 7.0 \text{ MPa}$ ,砂盘的孔径中值为 350 nm,实验结果如图 4 所示。

由图 4 结果可以看出,新型防塌水基钻井液体系的 PPA 瞬时滤失量和静态滤失速率分别为 0.6 mL 和 0.33 mL/min,稍高于现场油基钻井液体系的 0.5 mL 和 0.31 mL/min,但差距不大,说明新型防塌水基钻井液体系具有良好的封堵性能,能够有效页岩储层中的纳米级和微纳米级的裂缝,起到良好的井壁稳定效果。

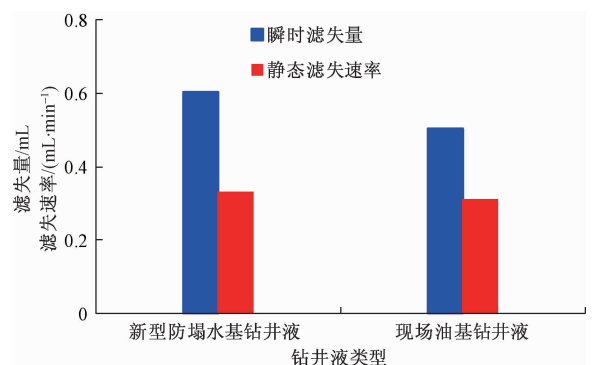


图 4 钻井液封堵性能评价结果

Fig. 4 Evaluation results of plugging performance of drilling fluid

#### 2.2.3 抑制性能和润滑性能

室内采用线性膨胀率和岩屑滚动回收率 ( $120 \text{ }^\circ\text{C} \times 16 \text{ h}$ ) 实验评价了新型防塌水基钻井液体系的抑制性能,并采用极压润滑系数和高温高压黏附系数 ( $120 \text{ }^\circ\text{C} \times 3.5 \text{ MPa}$ ) 实验评价钻井液的润滑性能,并与现场油基钻井液体系进行了对比。实验结果如表 2 所示。



表2 钻井液抑制性能和润滑性能评价结果

Table 2 Evaluation results of inhibition and lubrication performance of drilling fluid

实验介质	抑制性能		润滑性能	
	线性膨胀率/%	滚动回收率/%	极压润滑系数	高温高压黏附系数
清水	47.16	10.2	—	—
防塌水基钻井液	1.94	95.1	0.101	0.059 2
现场油基钻井液	1.35	96.9	0.095	0.043 6

由表2结果可以看出,新型防塌水基钻井液体系具有良好的抑制性能,线性膨胀率和岩屑滚动回收率均与现场油基钻井液体系相当,可以达到有效抑制泥页岩水化分散膨胀的目的;另外,新型防塌水基钻井液体系还具有良好的润滑性能,极压润滑系数和高温高压黏附系数也基本与现场油基钻井液体系相差不大,可以有效降低井壁与钻具之间的摩擦阻力,避免长水平井段钻进时出现卡钻等井下复杂事故的发生。

#### 2.2.4 抗污染性能

在页岩气水平井钻井过程中,不仅要求钻井液体系具有良好的流变性、抑制性和润滑性等,还要求其具有较强的抗盐以及岩屑污染的能力。因此,

室内对新型防塌水基钻井液体系的抗污染性能进行了评价,污染物分别选择为NaCl、CaCl<sub>2</sub>和储层段岩屑,分别测定污染物加入前后钻井液体系性能的变化情况,钻井液老化条件为120℃×16h,实验结果如表3所示。

由表3结果可以看出,新型防塌水基钻井液体系中加入20%NaCl、2%CaCl<sub>2</sub>和20%岩屑后,钻井液的黏度、切力和滤失量出现小幅波动,但整体变化幅度不大,说明钻井液体系具有良好的抗污染能力,能够满足页岩气水平井钻井时对钻井液性能的要求。

### 3 现场应用

新型防塌水基钻井液体系在威远地区某页岩气区块进行了现场应用试验,通过调研分析该区块内前期已钻水平井的资料,认为该区块内页岩气水平井在钻遇斜段时易出现井壁失稳、垮塌等复杂事故,钻具与井眼之间的摩擦阻和扭矩较大,钻井周期较长。而在使用新型防塌水基钻井液体系的X-101井钻井施工过程中,较好的解决了以上问题,未出现井壁失稳和垮塌现象,现场钻井液性能稳定,与前期已钻井相比较,钻井时间明显缩短,达到了良好的钻井施工效果。具体施工参数对比如表4所示。

表3 钻井液抗污染性能评价结果

Table 3 Evaluation results of anti-pollution performance of drilling fluid

污染物及加量	实验条件	表观黏度 AV/	塑性黏度 PV/	动切力 YP/Pa	静切力 Gel/Pa	常温常压滤失量	高温高压滤失量
		(mPa·s)	(mPa·s)			FL <sub>API</sub> /mL	FL <sub>HTHP</sub> /mL
空白	老化前	76.5	64.0	12.5	5.0/9.5	—	—
	老化后	72.5	61.0	11.5	4.5/8.5	1.1	4.0
20% NaCl	老化前	75.0	63.0	12.0	4.5/9.0	—	—
	老化后	71.0	60.0	11.0	4.0/8.0	1.2	4.2
2% CaCl <sub>2</sub>	老化前	78.0	65.0	13.0	4.0/8.5	—	—
	老化后	75.5	63.0	12.5	3.5/7.5	1.8	5.4
20% 岩屑	老化前	79.5	65.0	14.5	4.5/8.5	—	—
	老化后	77.5	64.0	13.5	4.0/7.5	1.5	4.8

表4 前期已钻井X-3HM与X-101井钻井参数对比结果

Table 4 Comparison of drilling parameters between well X-3HM and well X-101

井号	X-3HM	X-101
完钻井深/m	4 092	4 107
水平段长度/m	1 445	1 460
水平段钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	9.65	11.82
起下钻时间/h	304	216
钻井时间/h	1 761	1 022
复杂时间/h	157	0
井径扩大率/%	6.53	5.76

由表4结果可知,与前期已钻井X-3HM井相比,使用新型防塌水基钻井液施工的X-101井的水平段钻速明显提高,而起下钻时间、钻井时间、复杂

时间和平均井径扩大率均明显下降,说明研究的新防塌水基钻井液体系能够满足目标区块页岩气水平井的正常钻井作业的需要。

### 4 结论

(1)通过大量室内实验,优选出了性能优良的封堵剂(纳米乳液和FT-102复配)、抑制剂(SYH-3)和润滑剂(RHJ-102),并在此基础上结合其他处理剂形成了一套适合页岩气水平井的新型防塌水基钻井液体系。

(2)室内性能评价结果表明,该钻井液体系具有良好的流变性能、降滤失性能和耐温性能,此外,体系还具有良好的封堵性能、抑制性能、润滑性能

和抗污染能力,能够满足页岩气钻井时对钻井液各项性能的要求。

(3)现场应用结果表明,使用新型防塌水基钻井液施工的 X-101 井施工过程顺利,各项钻井参数均达到设计要求,与前期已钻井相比,钻井周期明显缩短,无井下复杂事故发生,达到了良好的钻井施工效果。

### 参 考 文 献

[1] 方朝刚,殷启春,滕 龙,等. 萍乐坳陷区中二叠统茅口组南港段页岩气基本特征——以 ZK01 井为例[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 31-41.  
Fang Chaogang, Yin Qichun, Teng Long, et al. Basic characteristics of the shale gas in the Nangang part of the Maokou formation of middle permian series in Pingle depression—taking ZK01 hole as example [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 31-41.

[2] 曹 园,邓金根,蔚宝华,等. 深部泥页岩水化特性研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 118-120.  
Cao Yuan, Deng Jingen, Yu Baohua, et al. Hydration properties research of deep formation shale [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 118-120.

[3] 吴辰泓,张丽霞,高 潮. 下寺湾地区延长组陆相页岩孔隙特征及影响因素[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(6): 990-998.  
Wu Chenhong, Zhang Lixia, Gao Chao. Pore characteristics and influential factors on lacustrine shale in Yanchang Formation, Xiasiwan Area [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(6): 990-998.

[4] 谢晓永,王 怡. 川西须家河组页岩气水基钻井液技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 802-805.  
Xie Xiaoyong, Wang Yi. Water-based drilling fluid technology for Xujiahe Formation shale gas in western Sichuan [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(6): 802-805.

[5] 陈在君. 高密度无土相油基钻井液研究及在四川页岩气水平井的应用[J]. 钻采工艺, 2015, 38(5): 70-72. Chen Zaijun. Development of high density clay-free oil-based drilling fluid and its application in Sichuan shale gas horizontal well [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 70-72.

[6] 高 莉,张 弘,蒋官澄,等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩气井壁稳定钻井液[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 508-512.  
Gao Li, Zhang Hong, Jiang Guancheng, et al. Drilling fluid for wellbore stability of shale gas in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(4): 508-512.

[7] 林永学,王显光. 中国石化页岩气油基钻井液技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 7-13.  
Lin Yongxue, Wang Xiangguang. Development and reflection of oil-based drilling fluid technology for shale gas of Sinopec [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 7-13.

[8] 刘振东. 油基钻井液应用中存在的问题分析及对策[J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(3): 84-88.  
Liu Zhendong. Problem analysis and countermeasure of the application of oil-base drilling fluid [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2015, 44(3): 84-88.

[9] 李文涛,南 旭,王 刚,等. 页岩气油基钻井液损耗分析与

回收利用[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(5): 40-43, 66.  
Li Wentao, Nan Xu, Wang Gang, et al. Research of oil-based mud loss analysis and recycling technology for shale gas development [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2018, 28(5): 40-43, 66.

[10] Deville J P, Frita B, Jarrett M. Development of water-based drilling fluids customized for shale reservoirs [C]//SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Woodlands: SPE, 2011: 484-491.

[11] Ramirez M A, Benaissa S, Ragnes G, et al. Aluminum-based HPWBM successfully replaces oil-based mud to drill exploratory well in the Magellan Strait, Argentina [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim: SPE, 2007: 351-357.

[12] Mejrnan S, Samad S. The effect of the TiO<sub>2</sub>/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties [J]. Powder Technology, 2015, 272(11): 113-119.

[13] Montilva J C, Oort E V, Brahim R, et al. Using a low-salinity high-performance water-based drilling fluid for improved drilling performance in Lake Maracaibo [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim: SPE, 2007: 11-14.

[14] Kosynkin D V, Ceriotti G, Wilson K C, et al. Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(1): 222.

[15] 景岷嘉,陶怀志,袁志平. 疏水抑制水基钻井液体系研究及其在页岩气井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 28-32.  
Jing Minjia, Tao Huaizhi, Yuan Zhiping. Study of hydrophobic inhibitive water base drilling fluid system and application in shale gas well [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(1): 28-32.

[16] 景 丰,姚志奇. 延长组页岩气水平水基钻井液体系研制与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 155-161.  
Jing Feng, Yao Zhiqi. Development and application of the water-based drilling fluid system in Yanchang-Formation shale-gas horizontal well [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 155-161.

[17] 林永学,甄剑武. 威远区块深层页岩气水平水基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 21-27.  
Lin Yongxue, Zhen Jianwu. Waterbased drilling fluid technology for deep shale gas horizontal wells in block Weiyuan [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 21-27.

[18] 龙大清,樊相生,王 昆,等. 应用于中国页岩气水平井的高性能水基钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(1): 17-21.  
Long Daqing, Fan Xiangsheng, Wang Kun, et al. Highperformance water base drilling fluid for shale gas drilling [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(1): 17-21.

[19] 彭碧强,周 峰,李茂森,等. 用于页岩气水平井的防塌水基钻井液体系的优选与评价——以长宁-威远国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 89-94.  
Peng Biqiang, Zhou Feng, Li Maosen, et al. Optimization and evaluation of anti-collapse water-based drilling fluids for shale gas horizontal wells: a case study of the Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Area [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 89-94.

[20] 陈庚绪,刘 奥,王 茜,等. 适用于页岩气井的强抑制防塌高性能水基钻井液体系[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 529-532.  
Chen Gengxu, Liu Ao, Wang Qian, et al. High inhibition and anti-sloughing water-based drilling fluid system for shale gas horizontal wells [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(4): 529-532.