



## 库车山前固井环空钻井液低剪切流变特性研究

兰翔 张兴国 艾正青 袁中涛 徐力群 刘忠飞

### Research on the Rheological Properties of Drilling Fluids in Annular Space for Cementing at Low Shear Rates in Kuqa Piedmont

LAN Kunxiang, ZHANG Xingguo, AI Zhengqing, YUAN Zhongtao, XU Liqun, LIU Zhongfei

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021058>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 塔里木油田库车山前高压盐水层油基钻井液技术

Oil-Based Drilling Fluid Technology for High Pressure Brine Layer in Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 29-33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020007>

#### 考虑壁面滑移效应的高密度油基钻井液流变性研究

Study of the Rheological Properties of High-Density Oil-Based Drilling Fluid Considering Wall Slip Effect

石油钻探技术. 2020, 48(6): 28-32 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020085>

#### 塔里木油田库车山前超高压盐水层精细控压钻井技术

Precise Managed Pressure Drilling Technology for Ultra-High Pressure Brine Layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 23-28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020034>

#### 顺北油气田一区超深井三开长封固段固井技术

Anti-Leakage Cementing Technology for the Long Well Section below Technical Casing of Ultra-Deep Wells in the No.1 Area of Shunbei Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(6): 33-39 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020110>

#### 油基钻井液条件下西湖凹陷低孔低渗储层流体性质随钻快速识别方法

A Fluid Properties while Drilling Rapid Identification Method under Oil-Based Drilling Fluid Conditions for Low Porosity and Low Permeability Reservoirs in the Xihu Sag

石油钻探技术. 2019, 47(5): 116-120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019100>

#### 准噶尔盆地玛东油田水平井高性能油基钻井液技术

High-Performance Oil-Based Drilling Fluid Technology for Horizontal Wells in the Madong Oilfield, Junggar Basin

石油钻探技术. 2020, 48(6): 21-27 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020106>



扫码关注公众号，获取更多信息！



◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021058

引用格式: 兰焜翔, 张兴国, 艾正青, 等. 库车山前固井环空钻井液低剪切流变特性研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 55-61.

LAN Kunxiang, ZHANG Xingguo, AI Zhengqing, et al. Research on the rheological properties of drilling fluids in annular space for cementing at low shear rates in Kuqa Piedmont [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 55-61.

## 库车山前固井环空钻井液低剪切流变特性研究

兰焜翔<sup>1</sup>, 张兴国<sup>1</sup>, 艾正青<sup>2</sup>, 袁中涛<sup>2</sup>, 徐力群<sup>2</sup>, 刘忠飞<sup>2</sup>

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆库尔勒 841000)

**摘 要:** 针对塔里木盆地库车山前构造带超深天然气井四开、五开固井下套管时频繁漏失的问题, 分析了下套管过程中环空钻井液的实际剪切速率, 根据赫-巴流变模式, 用全剪切速率 ( $1.70 \sim 1\,021.40\text{ s}^{-1}$ ) 和低剪切速率 ( $1.70 \sim 340.50\text{ s}^{-1}$ ) 下的测试数据, 分别拟合了油基钻井液的全剪切和低剪切流变参数, 分析了全剪切和低剪切速率下激动压力的差异。研究发现: 库车山前固井下套管时的实际钻井液剪切速率远小于常规全剪切速率的最高值  $1\,021.40\text{ s}^{-1}$ ; 全剪切和低剪切速率下, 流变参数随温度、压力变化的差异较大; 全剪切速率下的套管激动压力小于低剪切速率, 井深越大, 全剪切和低剪切速率下的套管激动压力相差越大。研究结果表明, 对于安全密度窗口窄的天然气井, 应根据实际的钻井液低剪切速率范围, 选择测试数据拟合对应的流变参数, 并在此基础上根据允许的下套管激动压力, 合理设计套管下入速度, 从而降低下套管时的漏失量。

**关键词:** 库车山前; 超深天然气井; 固井; 油基钻井液; 漏失; 剪切速率; 流变特性

中图分类号: TE254<sup>+</sup>.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)06-0055-07

## Research on the Rheological Properties of Drilling Fluids in Annular Space for Cementing at Low Shear Rates in Kuqa Piedmont

LAN Kunxiang<sup>1</sup>, ZHANG Xingguo<sup>1</sup>, AI Zhengqing<sup>2</sup>, YUAN Zhongtao<sup>2</sup>, XU Liqun<sup>2</sup>, LIU Zhongfei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Research Institute of Oil & Gas Engineering, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

**Abstract:** Due to the frequent lost circulation of drilling fluids while running casing for cementing at the fourth and fifth sections in ultra-deep natural gas wells in the tectonic belt of Kuqa Piedmont in Tarim Basin, the actual shear rates of annular drilling fluid while running casing were analyzed. On the basis of the Herschel-Bulkley model, the test data collected at full shear rates ( $1.70 \sim 1\,021.40\text{ s}^{-1}$ ) and low shear rates ( $1.70 \sim 340.50\text{ s}^{-1}$ ) were used to fit the corresponding rheological parameters of the oil-base drilling fluid respectively, and to analyze the surge pressure difference under the two scenarios. The research found out that in Kuqa Piedmont, the actual shear rates during casing running were far less than the highest value ( $1\,021.40\text{ s}^{-1}$ ) of regular full shear rates, and the rheological parameters varied greatly with the change of temperature and pressure at full and low shear rates. Moreover, the casing surge pressure at full shear rates was lower than that at low shear rates, and with the increase in well depth, the surge pressure difference between them was greater. The results showed that for natural gas wells with narrow safety density windows, the range of actual low shear rates of drilling fluid should be taken as the basis of fitting corresponding rheological parameters, and based on which, proper casing running speed should be designed to control the lost circulation according to the allowable surge pressure in the process.

**Key words:** Kuqa Piedmont; ultra-deep natural gas well; cementing; oil-base drilling fluid; lost circulation; shear rate; rheological properties

收稿日期: 2020-12-27; 改回日期: 2021-07-31。

作者简介: 兰焜翔 (1995—), 男, 四川宜宾人, 2019年毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 油气井工程专业在读硕士研究生。E-mail: 2720554039@qq.com。

通信作者: 张兴国, 772376058@qq.com。

基金项目: 中国石油重大科技专项“塔里木油田勘探开发关键技术研究与应用”课题2“前陆冲断带超深井钻完井技术”(编号: 2014E-2102)资助。

塔里木盆地库车山前构造带蕴藏了塔里木油田60%以上的天然气,是塔里木油田天然气增储上产的主力气区<sup>[1]</sup>。但由于气层埋藏超深(6 000~8 000 m)、井筒温度超高(井底静止温度130~180 ℃)、井内压力超高(钻井液密度超过2.55 kg/L)且安全密度窗口窄,四开、五开固井下套管期间经常发生漏失,从而严重影响固井施工和固井质量<sup>[2-3]</sup>。

目前,固井下套管时的激动压力基于全剪切速率下测得的流变参数进行计算,而钻井液的流变特性随剪切速率变化而变化。但窄安全密度窗口井下套管和钻井液上返的速度慢,钻井液上返时的剪切速率达不到旋转黏度计的最高剪切速率 $1\,021.40\text{ s}^{-1}$ 。在此情况下,低剪切速率( $1.70\sim 340.50\text{ s}^{-1}$ )下的流变参数与全剪切速率( $1.70\sim 1\,021.40\text{ s}^{-1}$ )下的流变参数差异较大,导致低剪切速率时下套管的激动压力与全剪切速率时下套管的激动压力存在较大差异<sup>[4-5]</sup>。

为此,利用测试得到的库车山前超深天然气井现场环空钻井液的流变性数据,拟合了钻井液低剪切和全剪切速率下的流变参数,分析了二者及所对应下套管激动压力的差异,发现低剪切速率下的流变特性对库车山前固井下套管激动压力有较大影响<sup>[6-8]</sup>。由此可知,针对库车山前及类似区块窄安全密度窗口的超深天然气井,应根据钻井液低剪切速率下的流变参数分析下套管激动压力,为合理设计套管下入速度、降低下套管时的漏失量提供参考。该研究也进一步丰富了对流体流变性的认识。

## 1 地层特点及固井技术难点

塔里木盆地库车山前构造带超深天然气井常采用“五开五完”井身结构,如图1所示。第一至第三层套管封固盐顶及盐上地层,第四层采用尾管封固盐膏层,第五层采用尾管封固目的层。

库车山前复合盐岩层以膏盐岩、白云岩、膏泥岩为主,夹薄砂岩、软泥岩,具有塑性流动、非均质、含盐泥岩易垮塌等地质特征,显著特点是高压盐水层发育、盐水层压力系数高。由于受沉积和塑性流动的影响,盐膏层分布的深度、厚度在纵向上差异很大,钻井揭示厚度从几十米至几千米不等,最厚超过3 000 m,埋深最大超过7 300 m<sup>[9-10]</sup>。

四开盐膏层井段,通常具有在同一裸眼段高压盐水层与漏失层同层、深部井段安全密度窗口窄、地层倾角大、防斜困难等特点,同时面临着环空间

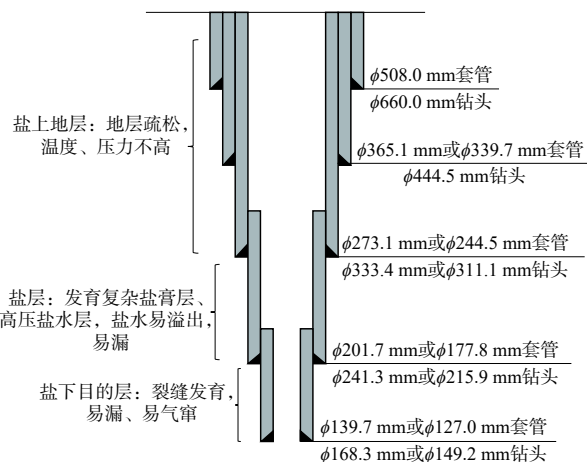


图1 库车山前常用的“五开五完”井身结构

Fig.1 Commonly used "five-section and five-completion" casing program in Kuqa Piedmont

隙小(11~19 mm)、套管容易偏心(无扶正器)、超高密度油基钻井液滤饼影响胶结质量等固井技术难点<sup>[11-12]</sup>,导致防漏和压稳矛盾突出。

针对库车山前超深天然气井的固井技术难点,通过低返速固井配套工艺,准确掌握四开、五开井段的承压能力,再准确掌握低返速固井过程中的流体流变特性,并据此精确控制下套管时的激动压力,合理设计套管下入速度,降低库车山前超深天然气井四开、五开尾管固井下套管时的漏失量。

## 2 流变参数计算及分析

### 2.1 环空钻井液流变性测试数据

在温度60~150 ℃、压力30~70 MPa条件下,利用7600型超高温高压流变仪(相较于常规六速旋转黏度计,该仪器的低剪切速率范围更广,更有利于分析低剪切速率下钻井液的流变性能),测试了库车山前盐膏层段现场环空超高密度(2.42 kg/L)油基钻井液的流变性数据,结果见表1。

### 2.2 赫-巴模式全剪切流变参数

赫-巴模式集幂律模式和宾汉模式的特点于一体,能较好地反映钻井液的流变性、描述钻井液在不同剪切速率下的流变行为,用其拟合钻井液的流变特性更为合适<sup>[13-15]</sup>。

图2和表2分别为赫-巴模式全剪切速率下钻井液的流变性拟合曲线和流变参数拟合结果。由图2和表2可知,油基钻井液在各温度、压力条件下的拟合优度 $R^2$ 都很高,均接近0.999,证明赫-巴模式适合描述库车山前环空油基钻井液的流变性。

表 1 环空钻井液流变性测试数据  
Table 1 Rheological test data of drilling fluids in annular space

| 转速/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 剪切速率/<br>s <sup>-1</sup> | 不同温度压力下的剪切应力/Pa    |                    |                     |                     |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|                               |                          | 60/30 <sup>①</sup> | 90/50 <sup>①</sup> | 120/50 <sup>①</sup> | 150/70 <sup>①</sup> |
| 600                           | 1 021.40                 | 136.950 0          | 96.732 0           | 59.225 0            | 50.845 0            |
| 300                           | 510.69                   | 82.260 0           | 56.619 0           | 33.861 0            | 29.142 0            |
| 200                           | 340.50                   | 60.710 0           | 38.625 0           | 25.714 0            | 23.614 0            |
| 100                           | 170.20                   | 35.515 0           | 24.681 0           | 17.578 0            | 16.301 0            |
| 60                            | 102.10                   | 24.273 0           | 18.089 0           | 13.542 0            | 12.572 0            |
| 30                            | 51.07                    | 15.943 0           | 12.877 0           | 10.220 0            | 9.653 0             |
| 20                            | 34.05                    | 13.133 0           | 11.038 0           | 9.198 0             | 8.105 0             |
| 12                            | 20.43                    | 9.811 2            | 8.789 2            | 7.665 0             | 7.409 5             |
| 6                             | 10.21                    | 8.482 6            | 7.716 1            | 7.051 8             | 6.647 4             |
| 3                             | 5.11                     | 6.847 4            | 6.847 4            | 6.080 9             | 5.518 8             |
| 2                             | 3.40                     | 6.438 6            | 6.694 1            | 6.062 1             | 5.467 7             |
| 1                             | 1.70                     | 5.978 7            | 6.438 6            | 6.029 8             | 5.314 4             |

注：① “/” 前面的数据为温度，℃；“/” 后面的数据为压力，MPa。

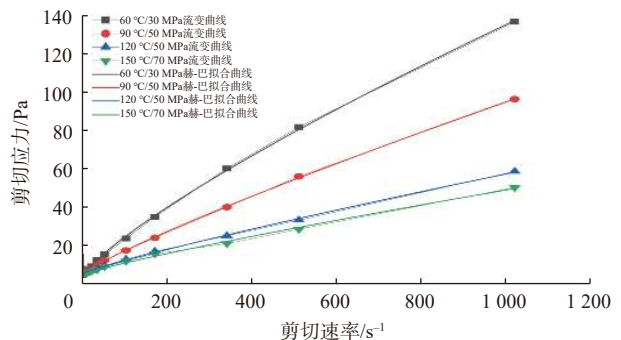


图 2 赫-巴模式全剪切速率下的钻井液流变性拟合曲线  
Fig. 2 Fitting curve for rheological parameters of drilling fluids at full shear rates in Herschel-Bulkley model

表 2 赫-巴模式全剪切速率下的钻井液流变参数拟合结果  
Table 2 Fitting results of rheological parameters of drilling fluids at full shear rates in Herschel-Bulkley model

| 温度/<br>℃ | 压力/<br>MPa | 相关系数<br>(R) | 流性指数<br>(n) | 稠度系数/<br>(Pa·s <sup>n</sup> ) | 动切力/<br>Pa |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------------------------|------------|
| 60       | 30         | 0.999 59    | 0.802 15    | 0.469 17                      | 6.412 99   |
| 90       | 50         | 0.999 84    | 0.861 41    | 0.207 31                      | 6.188 61   |
| 120      | 50         | 0.998 09    | 0.879 57    | 0.101 94                      | 5.816 63   |
| 150      | 70         | 0.998 78    | 0.889 39    | 0.080 37                      | 5.263 29   |

2.3 下套管时实际钻井液的剪切速率

下套管时，为防止压漏薄弱地层，套管下放速度

慢，环空钻井液剪切速率低，未必能达到全剪切速率最高值 1 021.40 s<sup>-1</sup>。

根据下套管工艺，将套管视为堵口管，计算了下套管过程中环空钻井液上返时的剪切速率。套管在井眼内向下运动时，会使环空钻井液产生 2 种流速：套管柱顶替力引起的钻井液上返流速  $v_1$  和套管柱黏附力引起的钻井液上返流速  $v_2$ 。 $v_1$  的表达式为：

$$v_1 = \frac{v_p D_o^2}{D_i^2 - D_o^2} \tag{1}$$

式中： $v_p$  为套管下入速度，m/s； $D_i$  为井眼直径或上层套管内径，mm； $D_o$  为套管或送入钻杆外径，mm。

为了求得  $v_2$ ，J.A.Burkhardt<sup>[16]</sup> 利用窄槽流动代替环空流动，提出了  $v_2$  与套管下入速度  $v_p$  间的关系式：

$$v_2 = K_c v_p \tag{2}$$

式中， $K_c$  为钻井液黏附常数。

将  $v_1$  和  $v_2$  叠加，可得套管在井眼内向下运动时的环空钻井液总上返流速：

$$v = v_1 + v_2 = v_p \left( \frac{D_o^2}{D_i^2 - D_o^2} + K_c \right) \tag{3}$$

式中， $v$  为环空钻井液总上返流速，m/s。

其中，当环空间隙较小（即  $D_o/D_i$  的比值大）时，激动压力表现最突出，此时  $K_c$  接近于 0.5。因此，式（3）可表示为：

$$v = v_p \left( \frac{D_o^2}{D_i^2 - D_o^2} + 0.5 \right) \tag{4}$$

则赫-巴模式下，下套管时环空钻井液的剪切速率为<sup>[17]</sup>：

$$\gamma = \left\{ \left[ \frac{8n + 4}{n} \frac{v_p D_o^2 + 0.5 v_p (D_i^2 - D_o^2)}{(D_i - D_o)^2 (D_i + D_o)} \right]^n + \frac{n}{n + 1} \frac{\tau_y}{K} \right\}^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

式中： $\gamma$  为钻井液的剪切速率，s<sup>-1</sup>； $n$  为流性指数； $K$  为稠度系数，Pa·s<sup>n</sup>； $\tau_y$  为动切力，Pa。

下面以库车山前某典型超深天然气井各井段温度压力分布为例，来说明固井下套管过程中尾管的位置变化。该典型井下套管过程中各井段的温度压力分布如图 3 所示（图 3 中，上下浅蓝色部分为套管，白色部分为钻杆与套管之间的环空，中部紫色部分为钻杆，钻杆右侧深蓝色部分为尾管）。将不同井段温度、压力对应的参数代入式（5），可得下尾管期间不同井段钻井液的真实剪切速率，结果见表 3。

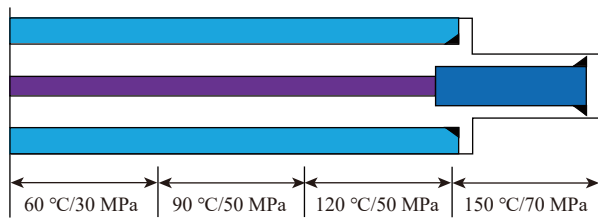


图3 库车山前典型超深天然气井温度压力分布

Fig. 3 Temperature and pressure distribution of typical ultra-deep natural gas wells in Kuqa Piedmont

表3 下套管时环空钻井液的剪切速率

Table 3 Shear rates of drilling fluids in annular space while running casing

| 温度/℃ | 压力/MPa | 环空内径/mm | 尾管外径/mm | 流性指数 ( $n$ ) | 稠度系数/( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) | 动切力/Pa   | 下入速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 剪切速率/ $\text{s}^{-1}$ |
|------|--------|---------|---------|--------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|-----------------------|
| 60   | 30     | 171.5   | 127.0   | 0.814 43     | 0.469 17                            | 6.412 99 | 0.13                                  | 81.49                 |
| 90   | 50     | 171.5   | 127.0   | 0.861 41     | 0.207 31                            | 6.188 61 | 0.13                                  | 92.76                 |
| 120  | 50     | 171.5   | 127.0   | 0.879 57     | 0.101 94                            | 5.816 63 | 0.13                                  | 114.98                |
| 150  | 70     | 149.2   | 127.0   | 0.889 39     | 0.080 37                            | 5.263 29 | 0.13                                  | 292.30                |

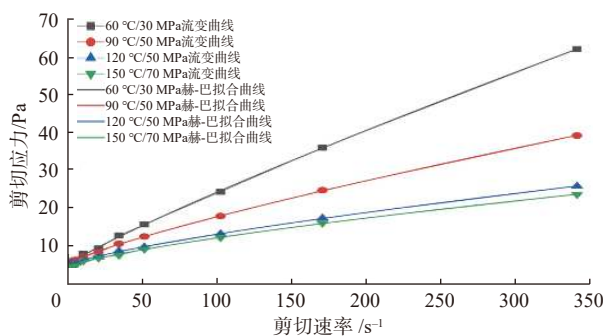


图4 赫-巴模式低剪切下的钻井液流变性拟合曲线

Fig. 4 Rheological fitting curve of drilling fluids at low shear rates in Herschel-Bulkley model

表4 赫-巴模式低剪切下的钻井液流变参数拟合结果

Table 4 Fitting results of rheological parameters of drilling fluids at low shear rates in Herschel-Bulkley model

| 温度/℃ | 压力/MPa | 相关系数 ( $R$ ) | 流性指数 ( $n$ ) | 稠度系数/( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) | 动切力/Pa   |
|------|--------|--------------|--------------|-------------------------------------|----------|
| 60   | 30     | 0.999 30     | 0.880 65     | 0.365 14                            | 5.792 75 |
| 90   | 50     | 0.999 38     | 0.837 26     | 0.283 89                            | 5.697 51 |
| 120  | 50     | 0.999 39     | 0.778 35     | 0.260 76                            | 5.539 91 |
| 150  | 70     | 0.998 58     | 0.762 15     | 0.240 43                            | 5.109 06 |

## 2.5 低剪切与全剪切速率下的流变参数对比

将低剪切速率下环空钻井液的流变参数拟合结果(相关系数、流性指数、稠度系数和动切力)与全剪切速率下的相应拟合结果进行对比,结果分别见图5—图8。

从表3可以看出,该井环空钻井液的剪切速率未超过  $292.30 \text{ s}^{-1}$ ,远低于全剪切速率最高值  $1\,021.40 \text{ s}^{-1}$ 。因此,此时用全剪切速率范围内的测试数据拟合钻井液流变参数,与实际情况不符。

## 2.4 赫-巴模式下低剪切钻井液的流变参数

采用赫-巴模式重新按拟合表1中剪切速率低于  $340.50 \text{ s}^{-1}$  的钻井液流变性测试数据,结果见图4和表4。

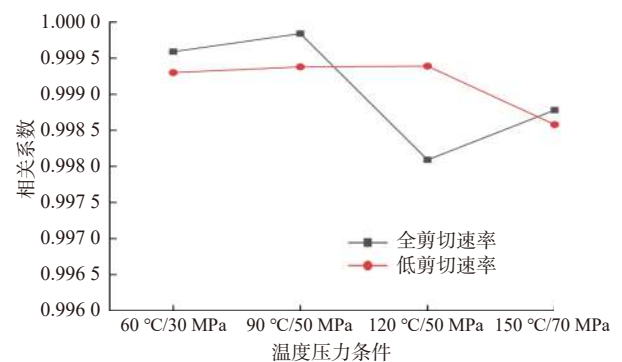


图5 相关系数对比

Fig. 5 Comparison of correlation coefficients

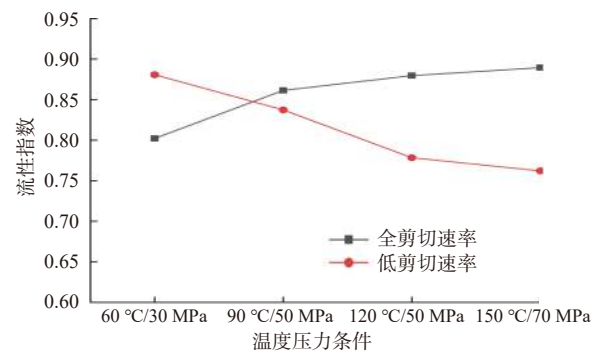


图6 流性指数对比

Fig. 6 Comparison of fluidity indexes

图5所示为低剪切速率与全剪切速率下拟合结果的相关系数对比。

从图5可以看出,低剪切速率与全剪切速率下

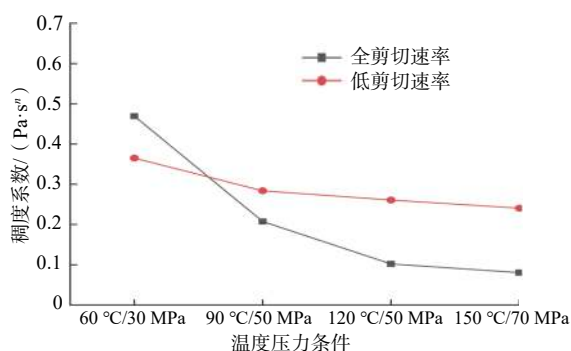


图 7 稠度系数对比

Fig. 7 Comparison of consistency coefficients

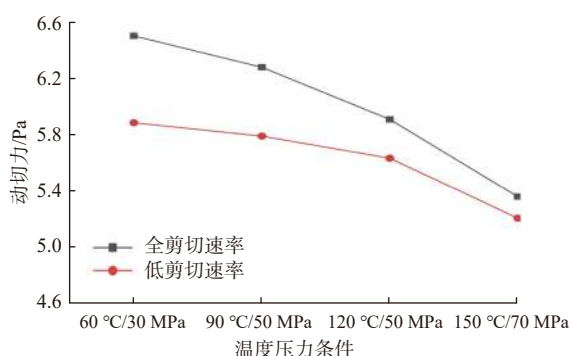


图 8 动切力对比

Fig. 8 Comparison of yield points

拟合结果的相关系数都比较大,均接近 0.999 0,但低剪切速率下的相关系数变化幅度更小、更稳定,而全剪切速率下的相关系数变化较大。

图 6 所示为低剪切速率与全剪切速率下环空钻井液的流性指数对比。

从图 6 可以看出,低剪切速率钻井液的流性指数与全剪切速率的流性指数差异较大。低温下,低剪切速率钻井液的流性指数明显高于全剪切速率钻井液的流性指数,如在 60 °C/30 MPa 条件下,低剪切速率钻井液的流性指数较全剪切速率钻井液的流性指数高 0.06。但随着温度、压力升高,全剪切速率钻井液的流性指数缓慢增大,而低剪切速率钻井液的流性指数则缓慢减小,导致高温高压下低剪切速率钻井液的流性指数明显低于高剪切速率钻井液的流性指数。

图 7 所示为低剪切速率与全剪切速率下环空钻井液的稠度系数对比。

从图 7 可以看出,低剪切速率钻井液的稠度系数与全剪切速率的稠度系数差异较大。低温下,低剪切速率钻井液的稠度系数明显低于全剪切速率的稠度系数,如在 60 °C/30 MPa 条件下,低剪切速率钻井

液的稠度系数较全剪切速率的稠度系数低 0.10 Pa·s<sup>n</sup>。但随着温度、压力升高,全剪切速率的稠度系数快速变小,低剪切速率钻井液的稠度系数则缓慢变小,导致高温高压下低剪切速率钻井液的稠度系数明显高于全剪切速率的稠度系数。

图 8 所示为低剪切速率与全剪切速率下环空钻井液的动切力对比。

从图 8 可以看出,低剪切速率钻井液的动切力与全剪切速率的动切力存在一定差异。低温下,低剪切速率钻井液的动切力明显低于全剪切速率的动切力,如在 60 °C/30 MPa 条件下,低剪切速率钻井液的动切力较全剪切速率的动切力低 0.62 Pa。但随着温度、压力升高,全剪切速率的动切力快速降低,而低剪切速率钻井液动切力的降低速度较慢,因此二者之间的差距逐渐缩小。

综合图 5—图 8 可知,在不同的温度、压力条件下,在不同的剪切速率范围内,环空钻井液的流变参数有所不同,从而影响下套管时的激动压力。因此,对于库车山前超深天然气井四开、五开固井中面临的安全密度窗口窄的问题,准确掌握低剪切速率下钻井液流变特性对控制下套管时的激动压力具有现实意义。

### 3 下套管激动压力计算与实例分析

#### 3.1 激动压力计算方法

实际下套管过程中,尾管进入裸眼段,此时有 3 种构造方式的环空,分别为钻杆与套管环空、尾管与套管环空、尾管与裸眼段环空。因此,在计算激动压力时,应考虑环空的不同<sup>[18]</sup>。下套管后井中的 3 种环空如图 9 所示,图中各部分构造与图 3 类似( $L_1$  为钻杆与套管构成环空的井段长度, m;  $L_2$  为尾管与套管构成环空的井段长度, m;  $L_3$  为尾管与裸眼段构成环空的井段长度, m)。

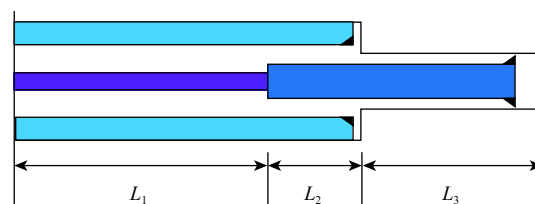


图 9 固井下套管过程中尾管的位置变化

Fig. 9 Change of liner position while running casing

已知油基钻井液的流变性基础数据、套管下入速度,以及  $L_1$  段、 $L_2$  段和  $L_3$  段环空内外径,采用式

(4)和式(5)分别计算了 $L_1$ 段、 $L_2$ 段和 $L_3$ 段钻井液的环空返速和剪切速率,结果见表5。

表5 不同环空段的钻井液返速和剪切速率

Table 5 Return velocities and shear rates of drilling fluids in different annulus sections

| 环空段   | 环空内径/<br>mm | 环空外径/<br>mm | 套管下入<br>速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 环空返速/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 剪切速率/<br>$\text{s}^{-1}$ |
|-------|-------------|-------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| $L_1$ | 127.0       | 171.5       | 0.13                                        | 0.223                                     | 118.14                   |
| $L_2$ | 139.7       | 171.5       | 0.13                                        | 0.322                                     | 185.98                   |
| $L_3$ | 139.7       | 168.3       | 0.13                                        | 0.353                                     | 214.80                   |

由表5可知, $L_1$ 段、 $L_2$ 段和 $L_3$ 段的钻井液剪切速率分别为118.14、185.98和214.80  $\text{s}^{-1}$ ,都处于低剪切速率区间。

在此基础上,可以分别计算 $L_1$ 段、 $L_2$ 段和 $L_3$ 段环空钻井液产生的激动压力,计算式分别见式(6)—式(8)<sup>[18]</sup>。

下入尾管时,钻杆在套管内产生的激动压力( $\Delta p_1$ ):

$$\Delta p_1 = 4KL_1 \left( \frac{8n+4}{n} \right)^n \frac{v_1^n}{(D_{ci} - D_p)^{n+1}} + \frac{8n+4}{n+1} \left( \frac{\tau_y L_1}{D_{ci} - D_p} \right) \quad (6)$$

下入尾管时,尾管在套管内产生的激动压力( $\Delta p_2$ ):

$$\Delta p_2 = 4KL_2 \left( \frac{8n+4}{n} \right)^n \frac{v_2^n}{(D_{ci} - D_c)^{n+1}} + \frac{8n+4}{n+1} \left( \frac{\tau_y L_2}{D_{ci} - D_c} \right) \quad (7)$$

下入尾管时,尾管在裸眼段内产生的激动压力( $\Delta p_3$ ):

$$\Delta p_3 = 4KL_3 \left( \frac{8n+4}{n} \right)^n \frac{v_3^n}{(D_h - D_c)^{n+1}} + \frac{8n+4}{n+1} \left( \frac{\tau_y L_3}{D_h - D_c} \right) \quad (8)$$

式中: $D_{ci}$ 为套管内径,mm; $D_p$ 为钻杆外径,mm; $D_h$ 为裸眼直径,mm; $D_c$ 为尾管外径,mm。

### 3.2 实例分析

库车山前KS区块某井五开用 $\phi 127.0$  mm钻杆下入 $\phi 139.7$  mm尾管,其中600 m长的尾管与套管构成环空,套管内径为171.5 mm,套管下入速度为0.13 m/s,裸眼内径为168.3 mm,裸眼段长400 m,井深6 800 m,油基钻井液密度为2.42 kg/L。

将全剪切速率流变参数拟合结果、赫-巴模式低剪切速率钻井液流变参数拟合结果和该井下套管基础数据代入式(6)—式(8),计算各井段的激动压力,再累加得到全井段下套管时的激动压力,结果如图10所示。

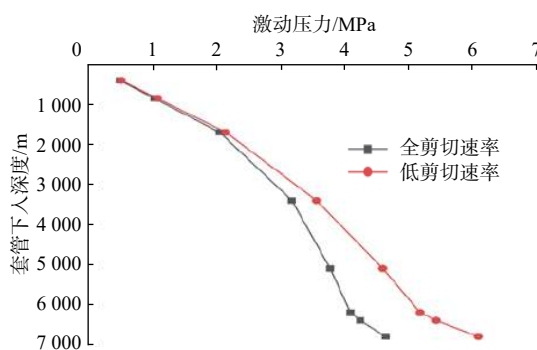


图10 下套管时赫-巴模式全剪切速率与低剪切速率下的激动压力对比

Fig.10 Comparison of drilling fluid surge pressure at full and low shear rates while running casing in Herschel-Bulkley model

从图10可以看出,在0~3 400 m井段,下套管时全剪切速率钻井液激动压力与低剪切速率钻井液激动压力相差不大,二者仅相差0.11 MPa;在3 400 m以深井段,随着井深增加,全剪切速率与低剪切速率下套管时的激动压力相差越来越大,到井底时二者之间的差值达到0.93 MPa。由此可知,在低剪切速率下,使用全剪切速率拟合计算得到激动压力的准确度低于使用低剪切速率拟合计算得到激动压力的准确度。对安全密度窗口较宽的井,该差异影响不大,但库车山前超高压气井四开、五开固井安全密度窗口窄,该差异对下套管时是否发生漏失影响较大。

## 4 结 论

1)库车山前超深天然气井四开、五开固井下套管过程中,环空钻井液的剪切速率低于340.50  $\text{s}^{-1}$ ,更低于常规全剪切速率的最高值1 021.40  $\text{s}^{-1}$ 。此时,如用全剪切速率下的流变性测试数据拟合钻井液的流变参数,与下套管期间钻井液剪切速率低的情况不符。

2)在不同温度压力条件(60  $^{\circ}\text{C}$ /30 MPa~150  $^{\circ}\text{C}$ /70 MPa)和不同剪切速率(低剪切速率范围1.70~340.50  $\text{s}^{-1}$ 、全剪切速率范围1.70~1 021.40  $\text{s}^{-1}$ )下,钻井液流变参数的差异较大,从而对下套管时的激动压力产生较大影响,进而影响下套管防漏。

3)对库车山前超深天然气井四开、五开及类似固井面临的窄安全密度窗口问题,应根据下套管时实际剪切速率区间内的流变性测试数据,拟合对应的流变参数,并据此计算下套管时的激动压力,以合理控制套管下入速度,降低下套管时的漏失量。

## 参 考 文 献

## References

- [1] 滕学清, 张兴国, 李宁, 等. 塔里木油田库车山前固井新技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2019: 1-3.  
TENG Xueqing, ZHANG Xingguo, LI Ning, et al. New cementing technology in Kuqa Piedmont of Tarim Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 1-3.
- [2] 任保友, 刘锋报, 徐兴梁, 等. 塔里木山前构造克深某区块盐膏层井漏技术处理 [J]. 西部探矿工程, 2018, 30(2): 75-78.  
REN Baoyou, LIU Fengbao, XU Xingliang, et al. Technical treatment of lost circulation in a salt-gypsum layer in a Keshen Block in the Tarim piedmont structure[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(2): 75-78.
- [3] 李健, 李早元, 辜涛, 等. 塔里木山前构造高密度油基钻井液固井技术 [J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(2): 51-54.  
LI Jian, LI Zaoyuan, GU Tao, et al. Cementing technology for wells drilled with high density oil base drilling fluid in piedmont structure of Tarim Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(2): 51-54.
- [4] 李平. 低速梯下钻井液流变性和触变性研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2009.  
LI Ping. Research on rheology and thixotropy of drilling fluid under low-speed ladder[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2009.
- [5] 张现斌, 赵冲, 王伟忠, 等. 矿物油基钻井液低剪切流变行为调节技术研究 [J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 63-70.  
ZHANG Xianbin, ZHAO Chong, WANG Weizhong, et al. Technologies to modify low-shear rate rheology behaviors of mineral oil based drilling fluids[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 63-70.
- [6] 刘伟, 周英操, 石希天, 等. 塔里木油田库车山前超高压盐水区精细控压钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 23-28.  
LIU Wei, ZHOU Yingcao, SHI Xitian, et al. Precise managed pressure drilling technology for ultra-high pressure brine layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 23-28.
- [7] 王治国, 周鹏成, 徐璧华, 等. 固井安全下套管速度分析 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2014, 27(6): 20-22.  
WANG Zhiguo, ZHOU Pengcheng, XU Bihua, et al. Velocity analysis of the safety of casing in cementing operation[J]. Journal of Jiahangan Petroleum University of Staff and Workers, 2014, 27(6): 20-22.
- [8] TENG X, YANG P, LI N, et al. Successful HPHT drilling through innovative practices: sharing the subsalt HPHT well drilling case in Tarim Basin[R]. SPE172782, 2015.
- [9] 李晓春, 李坤, 刘锐, 等. 塔里木盆地超深天然气井全过程塞流防漏注水泥技术 [J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 102-109.  
LI Xiaochun, LI Kun, LIU Rui, et al. Plug flow based full-process leakage-proof cementing technology for ultra-deep gas wells in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 102-109.
- [10] 周健, 贾红军, 刘永旺, 等. 库车山前超深超高压盐水区安全钻井技术探索 [J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 54-59.  
ZHOU Jian, JIA Hongjun, LIU Yongwang, et al. Research on safe drilling technology for ultra deep ultrahigh pressure saltwater zones in piedmont area, Kuche[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(1): 54-59.
- [11] YAN Ye, AN Wenhua, WANG Shuqi, et al. Drilling fluid challenge during the ultra-deep HT/HP/HS drilling in the mountainous area, Tarim Basin[R]. SPE 131533, 2010.
- [12] 朱仁发, 喻可彬, 熊明勇. 库车山前钻井技术难点及技术对策: 以大北 208 井为例 [C]//2017 年全国天然气学术年会论文集, 杭州: 中国石油学会天然气专业委员会, 2017: 2472-2480.  
ZHU Renfa, YU Kebin, XIONG Mingyong. Drilling technology difficulties and technical countermeasures in Kuqa Piedmont: taking Dabei 208 Well as an example[C]//Proceedings of 2017 National Natural Gas Academic Conference, Hangzhou: Member of Natural Gas Discipline of China Petroleum Society, 2017: 2472-2480.
- [13] 樊洪海, 刘希圣. 赫谢尔—巴尔克莱液体直井稳态波动压力计算模式 [J]. 石油钻探技术, 1994, 22(1): 51-54.  
FAN Honghai, LIU Xisheng. An accurate steady surge pressure model for Herschel-Bulkley fluid in a vertical well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1994, 22(1): 51-54.
- [14] 韩付鑫, 樊洪海, 彭齐, 等. 基于赫巴流体的薄弱地层套管下放速度预测 [J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 17-19.  
HAN Fuxin, FAN Honghai, PENG Qi, et al. Prediction of casing running velocity through weak formation based on Herschel-Buckley flow model[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 17-19.
- [15] 张晋凯, 李根生, 郭宇健. 钻井液流变模式的优选与评价 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(26): 7619-7623, 7628.  
ZHANG Jinkai, LI Gensheng, GUO Yujian. Optimization and evaluation on drilling fluid rheological model[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(26): 7619-7623, 7628.
- [16] BURKHARDT J A. Wellbore pressure surges produced by pipe movement[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(6): 595-605.
- [17] 刘亚鑫. 塔里木超深井窄安全密度窗口下套管防漏技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2019.  
LIU Yaxin. Research on casing leakage prevention technology under narrow safety density window in Tarim ultra-deep well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [18] 支亚靓. 库车山前固井下套管防漏失技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.  
ZHI Yaliang. Research on casing loss prevention technology for cementing in Kuche Mountain front[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

[编辑 令文学]