文章编号:1673-5005(2019)01-0068-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.01.008

# 考虑温度影响的摩阻扭矩计算模型及应用

张 辉1,谭天一1,李 军1,王 吴1,曾义金2,丁士东2,陶 谦2

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京102249; 2. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院,北京100101)

摘要:管柱在井下受热,产生的热应力会改变管柱轴向力,影响摩阻扭矩的计算。通过实验测量钻井液在不同温度 下的润滑系数和泥饼黏滞系数,拟合出其随温度变化关系,结合热应力的作用,建立考虑温度影响的摩阻扭矩计算 模型。实验结果表明,KCl聚合物润滑钻井液和油基钻井液的润滑系数和泥饼黏滞系数随温度升高而增大。应用该 模型对涪陵页岩气焦石坝区块 X 井进行摩阻扭矩计算,得出考虑温度影响的计算模型顶驱扭矩误差为 3.7%,大钩 载荷误差为 4.4%,计算精度较高。

关键词:摩阻扭矩;钻井循环温度;润滑系数;泥饼黏滞系数;摩阻系数;涪陵页岩气

中图分类号:TE 21 文献标志码:A

**引用格式**:张辉,谭天一,李军,等.考虑温度影响的摩阻扭矩计算模型及应用[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(1):68-74.

ZHANG Hui, TAN Tianyi, LI Jun, et al. A torque and drag calculation model with consideration of temperature effect and its application [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1):68-74.

# A torque and drag calculation model with consideration of temperature effect and its application

ZHANG Hui<sup>1</sup>, TAN Tianyi<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, ZENG Yijin<sup>2</sup>, DING Shidong<sup>2</sup>, TAO Qian<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;
2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract**: When drill pipes are subjected to variable circulating temperatures in the wellbore, the thermal stress induced will change the axial forces on the pipes, which can affect the calculation of the torque and drag. In this study, the effects of temperature on the lubricity coefficient and cake frictional coefficient of drilling fluids were measured via indoor experiments, and a torque and drag prediction model was established considering the effect of temperature on the friction coefficient and axial force. The results show that both the lubricity coefficient and cake frictional coefficient of KCl polymer drilling fluids and oil based drilling fluids can increase with temperature. A case study for well drilling in Fuling Jiaoshiba region was conducted, and the results show that the errors of the top drive torque and hook load can be of 3.7% and 4.4%, respectively, when the effect of temperature is not considered.

Keywords: torque and drag; drilling circulating temperature; lubricity coefficient; cake frictional coefficient; friction coefficient; Fuling shell gas

钻柱与井壁之间的摩阻扭矩问题一直是钻井工 程力学的核心研究课题<sup>[1-9]</sup>。随着常规油气藏的开 采殆尽,长水平段水平井和大位移井的发展,对摩阻 扭矩计算分析的精确性要求不断提高。对任何一种 计算模型,摩阻系数的合理取值都是精确预测钻杆 摩阻扭矩的必要条件。由于地温梯度的存在,地层

收稿日期:2018-05-22

- **基金项目**:国家自然科学基金重点项目(U1762211,51734010);国家自然科学基金面上项目(51574262,51774304);国家科技重大专项课题(2017ZX05009-003)
- 作者简介:张辉(1971-),女,教授,博士,博士生导师,研究方向为复杂结构并优化设计与控制技术、岩石力学、油气井管柱力学。E-mail: zhanghui3702@163.com。

· 69 ·

温度随着深度的增加而增加,并眼温度亦随之变化。 随着钻探领域的扩大,并眼深度不断加深,钻井循环 温度对钻井过程的影响越来越不可忽视<sup>[10]</sup>。目前 在钻井工程领域,通常将实测数据代入摩阻扭矩计 算模型中迭代反算<sup>[11-13]</sup>,采用单摩阻系数或分段摩 阻系数,没有考虑温度对摩阻系数的影响,这导致 预测值与施工中取得的实测值有较大偏差。笔者 从涪陵页岩气焦石坝区块现场取回钻井液样本, 考虑钻井循环温度为影响因素,通过室内实验得 出钻井液润滑系数和泥饼黏滞系数随温度变化的 规律<sup>[14-15]</sup>。管柱在井下受热产生热应力,在管柱 上产生附加轴向力,建立考虑温度影响的摩阻扭 矩计算模型,并应用该模型对焦石坝页岩气 X 井 进行摩阻扭矩计算。

## 1 不同温度下钻井液润滑系数实验

## 1.1 实验样品和仪器

实验采用的样品为 KCl 聚合物润滑钻井液(水 基钻井液)和柴油油基钻井液(图1),两种钻井液都 从重庆涪陵焦石坝页岩气田钻井现场取回。根据现 场资料,KCl 聚合物润滑钻井液的配方为:水+3% 膨 润土+0.1% 纯碱+1% 防塌剂 FT-388+1% 水解聚丙 烯腈钾盐 K-HPAN+3% KCl+0.2% 絮凝剂 PAM+ 3% 聚合醇+0.6% 降滤失剂 LV-CMC+2% 超细碳酸 钙;油基钻井液的配方为:柴油+1% 有机土+2.5% 主乳化剂 HIEMUL+1.5% 辅乳化剂 HICOAT+3.5% 降滤失剂 HIFLO+3% 油基封堵剂 HISEAL+1% 超细 凝胶封堵剂+5% 生石灰粉+重晶石。KCl 聚合物润 滑钻井液和油基钻井液各取 10 L 备用。实验使用 的主要仪器为极压润滑仪,辅助设备为电热恒温油 浴锅,如图 2 所示。



图 1 KCl 聚合物润滑钻井液样品和柴油 油基钻井液样品





图 2 极压润滑仪实验 Fig. 2 EP lubricity experiment

#### 1.2 实验原理

如图 3,极压润滑仪用一个钢摩擦环模拟钻杆, 用带凹弧面的钢摩擦块模拟井壁,摩擦块通过夹持 器固定,并使用扭矩扳手使摩擦块弧面紧贴摩擦环, 施加正向压力,模拟钻井过程中钻杆和井壁之间的 侧向力。将整个接触部分浸泡在待测液体中。电机 带动摩擦环旋转,摩擦力在转轴上施加一个扭矩。 测出该扭矩反算出钻井液的润滑系数,

 $T = F_{\rm f} R$ ,

 $F_{\rm f} = KN$ .

式中,*T*为扭矩值,N·m;*F*<sub>f</sub>为接触面间的摩擦力, N;*R*为摩擦环旋转半径,m;*K*为钻井液润滑系数;*N* 为正压力,N。







#### 1.3 实验设计

由于需要将钻井液加热到不同的温度进行测 量,根据笔者实验时的室温条件,选取10℃为最低 实验温度,每20℃为温度间隔,最高温度为90℃。 其他实验操作与常规极压润滑仪实验相同,通过清 水测定校正系数,再进行特定温度钻井液实验,最后 计算出该温度下的润滑系数,

$$\alpha_1 = \frac{34}{R_w},$$
$$K = \frac{R_m}{100}\alpha.$$

式中, a1 为校正因子; Rw 为清水值; Rm 为钻井液值。

### 1.4 实验结果

根据结果可以得出,油基钻井液的润滑系数整体低于 KCl 聚合物润滑钻井液,但两种钻井液的润滑系数都随着温度的升高而增加。实验结果如表1、2 所示。

## 表1 不同温度下 KCI 聚合物润滑钻井液润滑系数

 Table 1
 Lubrication coefficient of KCl polymer

lubricated drilling fluid at different temperatures

分组	10 °C	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
第1组	0.171	0.183	0.215	0.258	0.255
第2组	0.165	0.189	0.197	0.240	0.235
第3组	0.192	0.199	0.211	0.243	0.258
第4组	0.175	0.192	0.220	0.231	0.243
第5组	0.185	0.180	0.203	0.252	0.259
第6组	0.167	0.176	0.210	0.239	0.260
平均值	0.176	0. 187	0.209	0.244	0. 251

#### 表 2 不同温度下柴油油基钻井液润滑系数

# Table 2 Lubrication coefficient of diesel oil-based drilling fluids at different temperatures

分组	10 °C	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
第1组	0.045	0.059	0.067	0.096	0.083
第2组	0.036	0.061	0.065	0.088	0.107
第3组	0.044	0.062	0.062	0.080	0.096
第4组	0.046	0.065	0.071	0.091	0.112
第5组	0.057	0.058	0.078	0.086	0.121
第6组	0.041	0.062	0.067	0.095	0.097
平均值	0.045	0.061	0.069	0.089	0.102

润滑系数随温度变化的趋势线,如图4所示。



图 4 两种钻井液润滑系数随温度变化的关系

Fig. 4 Relationship between lubricity coefficient

and temperature

通过回归拟合,可得出两种钻井液润滑系数随 温度变化的经验公式。其中 KCl 聚合物润滑钻井液 润滑系数随温度变化的关系为

K = 0.1612 + 0.001T,  $R^2 = 0.9617$ .

油基钻井液润滑系数随温度变化关系为 K=0.0374+0.0007T, R<sup>2</sup>=0.9858. 式中,T为温度, ℃;R为相关性系数。

对于回归方式的选择,分析认为本实验结果线 性回归具有较高的相关性,且由于数据源不多,采取 二次回归、三次回归等更高次的回归方式容易出现 过拟合现象,故选择线性回归拟合。

## 2 不同温度下泥饼黏滞系数实验

#### 2.1 实验样品和仪器

钻井液样品与极压润滑仪实验相同。实验仪器 为泥饼黏滞系数仪和高温高压滤失仪。

### 2.2 实验原理

如图 5,置于倾斜平面上的滑块所受重力可以 沿着斜面的法向和切向分解,随着斜面转动增大切 向分力克服摩擦力时,滑块开始滑动,此时正切值即 为泥饼黏滞系数,即

 $K_{\rm f} = \tan \alpha$ .

式中, $K_{\rm f}$ 为泥饼黏滞系数; $\alpha$ 为滑块滑动时斜面与水平面夹角, $rad_{\circ}$ 



图 5 泥饼黏滞系数仪滑块受力

# Fig. 5 Forces on sliding block in cake frictional coefficient experiment

#### 2.3 实验设计

常规的泥饼黏滞系数仪实验(图6),要求使用 API失水仪在中压(0.69 MPa)下滤失 30 min 制得



图 6 泥饼黏滞系数仪实验 Fig. 6 Cake frictional coefficient experiment

泥饼,为了研究不同温度下泥饼的黏滞系数,实验中使用高温高压滤失仪分别在10、30、50、70、90℃中

压条件滤失 30 min 制得泥饼,其他实验步骤与常规 泥饼黏滞系数仪实验相同。

#### 2.4 实验结果

根据结果可以得出,油基钻井液的泥饼黏滞系数低于 KCl 聚合物润滑钻井液系数,两种钻井液的 泥饼黏滞系数都随着滤失温度的升高而增加。实验 结果如表 3、4 所示。

### 表 3 不同温度下 KCI 聚合物润滑钻井液泥饼 黏滞系数实验结果

Table 3Result of KCl polymer drilling fluid cakefrictional coefficient experiment at different temperatures

分组	10 °C	30 ℃	50 ℃	70 °C	90 °C
第1组	0.0349	0.0437	0.0524	0.0612	0.0612
第2组	0.0437	0.0437	0. 043 7	0.0612	0.0787
第3组	0.0349	0.0524	0.0524	0.0524	0.0524
第4组	0.0437	0.0524	0.0524	0.0612	0.0612
第5组	0.0437	0.0437	0.0524	0.0787	0.0787
第6组	0.0349	0.0437	0.0524	0.0612	0.0612
平均值	0.0402	0.0472	0.0506	0.0594	0.0664

#### 表4 不同温度下油基钻井液泥饼黏滞系数实验结果

 Table 4
 Result of oil-based drilling fluid cake frictional coefficient experiment at different temperatures

分组	10 °C	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
第1组	0.0262	0.0349	0. 043 7	0. 043 7	0.0437
第2组	0.0262	0.0262	0.0349	0. 043 7	0.0349
第3组	0.0349	0.0349	0.0349	0.0349	0.0524
第4组	0.0262	0.0262	0.0349	0. 043 7	0.0524
第5组	0.0262	0.0262	0.0349	0. 043 7	0.0437
第6组	0.0262	0.0349	0.0349	0.0349	0.0262
平均值	0. 027 7	0.0306	0.0364	0.0408	0.0422

绘制泥饼黏滞系数随温度变化的趋势线,如图





同样通过线性回归拟合出两种钻井液泥饼黏滞 系数 *K*<sub>f</sub> 随着温度变化的经验公式。KCl 聚合物润 滑钻井液的公式为

 $K_{\rm f} = 0.0366 + 0.0003T$ ,

 $R^2 = 0.9861.$ 油基钻井液为  $K_f = 0.0257+0.0002T,$  $R^2 = 0.9694.$ 

## 3 考虑温度影响的摩阻扭矩计算模型

对于摩阻扭矩的研究,目前国内外使用较多的 有软杆模型、刚杆模型、有限元模型等<sup>[16-21]</sup>。考虑 附加刚性力的修正的软杆模型误差相对较小,且便 于计算,本文在其基础上进行研究。其每个单元段 的轴向力计算公式为

$$T_1 = T_2 + \frac{L_{\rm s}}{\cos \frac{\theta}{2}} \left[ q \cos \bar{\alpha} \pm \mu (F_{\rm E} + F_{\rm n}) \right],$$

扭矩计算公式为

 $M = \mu (F_{\rm E} + F_{\rm n}) L_{\rm s} R.$ 

式中, $T_1$ 和 $T_2$ 分别为单元段上、下端轴向力, $N;L_s$ 为单元段长度, $m;\theta$ 为单元段的全角变化,rad;q为 钻杆浮重, $N/m;\bar{\alpha}$ 为上下端平均井斜角, $rad;\mu$ 为摩 阻系数; $F_E$ 为单位长度钻杆弯曲引起的附加侧向 力, $N;F_n$ 为套管或井壁对钻杆的侧向力,N;M为单 位长度钻杆扭矩, $N \cdot m;R$ 为钻杆半径, $m_o$ 其中摩 阻系数 $\mu$ 分为套管段摩阻系数和裸眼段摩阻系数。 该模型详细计算过程见参考文献[21]。

#### 3.1 热应力产生的附加轴向力

温度改变时,物体由于外在约束以及内部各部 分之间的相互约束,使其不能完全自由膨胀或者收 缩而产生的应力称为热应力。管柱在井下受热作 用,可将管柱单元段视作两端约束的空心管,故由于 热应力产生的附加轴向力为

 $F_{\rm t} = -\beta E \Delta T A.$ 

式中, $F_1$ 为热应力产生的附加轴向力, $N;\beta$ 为材料的热膨胀系数, $\mathbb{C}^{-1};E$ 为弹性模量, $Pa;\Delta T$ 为管柱的温升, $\mathbb{C};A$ 为管柱横截面积, $m^2$ 。

考虑热应力的单元段轴向力计算式为

$$T_1 = T_2 + \frac{L_s}{\cos \frac{\theta}{2}} [q \cos \overline{\alpha} \pm \mu (F_E + F_n)] + F_t.$$

#### 3.2 受温度影响的摩阻系数

摩阻系数受到钻井液和泥饼润滑性的影响,通 过实验可知钻井液润滑系数和泥饼黏滞系数随着温 度升高而增大。由于地温梯度的存在,钻井过程中 井筒内的温度随着垂深增加,故摩阻系数在不同深 度也不相同。摩阻系数由两部分组成,即与温度相 关部分和与温度无关的部分。旋转钻进时钻杆与井 壁的摩擦形式与极压润滑仪相似,钻井液形成的润 滑膜作用突出,其摩阻系数温度相关部分为润滑系 数。滑动钻井钻进时钻杆和井壁的相对运动速度较 小,泥饼对摩擦的影响明显,其摩阻系数温度相关部 分为泥饼黏滞系数。由此可得

 $\mu_{\rm r} = \mu_{\rm rl} + K_0 + aT$ ,

 $\mu_{\rm s} = \mu_{\rm s1} + K_{\rm f0} + bT.$ 

式中, $\mu_r$ 和 $\mu_s$ 分别为旋转钻进和滑动钻进的摩阻系数; $\mu_{rl}$ 和 $\mu_{sl}$ 为摩阻系数与温度无关的部分; $K_0$ 和 $K_0$ 分别为0℃时的润滑系数和泥饼黏滞系数;a和b为公式系数。

将μ<sub>r</sub>和μ<sub>s</sub> 替换原方程中的μ,并结合上文中热 应力附加轴向力,得到考虑温度影响的摩阻扭矩计 算模型。

## 4 钻井过程中井筒温度计算

要计算考虑温度影响的摩阻扭矩,需要先求得 钻井循环时不同井深的温度:

 $T_{\rm p} = C_1 e^{\lambda_1 z} + C_2 e^{\lambda_2 z} + Gz + T_{\rm mf} - GB$ , 温度剖面。 温度/℃ 温度/℃ 60 80 100 20 80 100 n 1 000 1 000 2 000 2 000 并深/m 并深/m 3 000 3 000 500 m 4 500 m 000 m 4 000 m 4 000 4 000 3 500 m 3 500 m 5 000 L 5 000 (a)钻杆内 (b) 环空中

图 8 不同井眼长度时钻杆内和环空中循环温度剖面

#### Fig.8 Circulating temperature profile in drilling pipe and annulus at different well depth

按受温度影响的摩阻扭矩计算模型反演,计算 出摩阻系数与温度无关的部分,得到旋转钻进摩阻 系数公式为

 $\mu_{r}[0] = 0.12 + 0.0007T,$  $\mu_{r}[1] = 0.198 + 0.0007T.$ 滑动钻进摩阻系数公式为  $\mu_{s}[0] = 0.12 + 0.0002T,$   $\mu_{\rm s}$ [1] = 0. 198+0. 000 2*T*.

其中,中括号内0和1分别指代套管段和裸眼段。

计算旋转钻进中的顶驱扭矩和滑动钻进中的大 钩载荷,计算结果如图9、10 所示,图中 *F<sub>P0</sub>和 F<sub>F1</sub>分* 别指不考虑温度影响的模型中套管段和裸眼段摩阻 系数。

将计算结果同现场实测值对比,用平均绝对误

 $T_a = C_1 e^{\lambda_1 z} (B\lambda_1 + 1) + C_2 e^{\lambda_2 z} (B\lambda_2 + 1) + Gz + T_{mf} - BT_{fp}$ . 式中,  $T_p$  和  $T_a$  分别为钻柱和环空中钻井液温 度,  $\mathbb{C}$ ; z 为垂深, m; G 为地温梯度,  $\mathbb{C}/m$ ;  $T_{mf}$ 为与压 耗有关的参数,  $\mathbb{C}$ ;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , B 为方程系数, 详 细求解过程见参考文献[22]。

## 5 实例计算

根据建立的考虑温度影响的摩阻扭矩计算模型, 对重庆涪陵焦石坝页岩气区块水平井 X 井进行摩阻 扭矩计算分析。该井是一口水平生产井,钻进方式为 复合钻进,井深 4 518 m。三开水平段施工井眼直径 为 21.59 cm,使用实验中的油基钻井液钻进,钻具组 合为:311.2 mmMD537+Φ216 mm×1.25°单弯螺杆+ Φ285 mm 扶正器+浮阀+Φ127 mm 无磁承压钻杆+ MWD 组件+Φ127 mm 加重钻杆×9 根+Φ127 mm 钻杆 ×171 根+Φ127 mm 加重钻杆×18 根+Φ127 mm 钻杆。 按传统方法反演取套管段摩阻系数为0.15,裸眼段为 0.25 和0.3,地温梯度为3.1 ℃/100 m。

图 8 为不同井眼长度时钻杆内和环空中的循环 温度剖面。 差分析计算精度。采用建立的受温度影响的摩阻扭 矩计算模型,顶驱扭矩计算结果误差为 3.7%。大 钩载荷计算结果误差为 4.4%,都具有较高的精度。





## 6 结 论

(1)油基钻井液的润滑系数和泥饼黏滞系数都 低于 KCl 聚合物润滑钻井液,在 10~90 ℃,二者的 润滑系数和泥饼黏滞系数都随温度增加而线性增加。

(2)从温度对钻井液润滑性和管柱热应力两方 面考虑,建立受温度影响的摩阻扭矩计算模型。对 涪陵页岩气焦石坝 X 井进行实例计算,考虑温度影 响的计算模型所得顶驱扭矩随深度变化的趋势与现 场实测值最为符合,其平均绝对误差为3.7%,大钩 载荷的平均绝对误差为4.4%,皆优于未考虑温度 影响的计算模型。

(3)考虑钻井循环温度影响的摩阻扭矩计算模 型对钻井工程设计、水平井延伸极限预测等具有重 要意义。

### 参考文献:

 [1] 王鹏,倪红坚,王瑞和,等.基于微凸体接触的钻柱纵向振动减摩阻[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2015,39(1):88-94.

> WANG Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Friction reduction research of drill-string longitudinal vibration based on asperity contact[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(1): 88-94.

 [2] 黄根炉,李伟,倪红坚,等.提拉-释放法套管下入机理
 [J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4): 85-90.

> HUANG Genlu, LI Wei, NI Hongjian, et al. Mechanism analysis of pull-up and quick release technique during casing running process[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(4):85-90.

[3] 范光第,黄根炉,李绪锋,等.水平井管柱摩阻扭矩的 计算模型[J].钻采工艺,2013,36(5):22-25.
FAN Guangdi, HUANG Genlu, LI Xufeng, et al. Calculation model of friction torque for horizontal well string
[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(5):

22-25.

[4] 韩志勇.井眼内钻柱摩阻的三维和两维模型的研究
 [J].石油大学学报(自然科学版),1993,17(增1):44-49.

HAN Zhiyong. Study on 3-D and 2-D models of drillstring torque and drag in hole[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1993,17 (sup1):44-49.

- [5] 秦永和,付胜利,高德利,等.大位移井摩阻扭矩力学 分析新模型[J].天然气工业,2006,26(11):77-79.
  QIN Yonghe, FU Shengli, GAO Deli, et al. A new model for analyzing torque and drag in extended reach wells
  [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(11):77-79.
- [6] 高德利,刘希圣,徐秉业. 井眼轨迹控制[M]. 东营:石 油大学出版社,1994.
- [7] 贺志刚,付建红,施太和,等.大位移井摩阻扭矩力学 模型[J].天然气工业,2001,21(5):52-54.

HE Zhigang, FU Jianhong, SHI Taihe, et al. Mechanical model for calculating drag and torque in extended reach well[J]. Natural Gas Industry, 2001,21(5):52-54.

[8] 章浩炯,刘运荣,石晓兵,等.钻井摩阻因数分形预测 模型研究[J].长江大学学报(自然科学版)理工, 2012,9(6):55-57.

> ZHANG Haojiong, LIU Yunrong, SHI Xiaobing, et al. A study of the fractal prediction model for drilling friction coefficient [J]. Journal of Yangtze University (Natural Scieice Edition) Science & Engineering, 2012,9(6):55-57.

[9] 高德利,覃成锦,代伟锋,等.南海流花超大位移井摩 阻/扭矩及导向钻井分析[J].石油钻采工艺,2006,28 (1):9-12.

> GAO Deli, TAN Chengjin, DAI Weifeng, et al. Numerical analysis of down hole drag torque and rotary steering system for Liu Hua mega-extended-reach wells in South China Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(1):9-12.

[10] 蔚宝华,卢晓峰,王炳印,等.高温井地层温度变化对 井壁稳定性影响规律研究[J].钻井液与完井液, 2004,21(6):15-18.

> WEI Baohua, LU Xiaofeng, WANG Bingyin, et al. Law of temperature influence on well bore stability in hot well [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004,21(6): 15-18.

[11] 薄和秋,黄根炉. 垦东 405-平 1 大位移井摩阻扭矩预 测及分析研究[J]. 石油钻探技术,2007,35(4):41-45.

> BO Heqiu, HUANG Genlu. Prediction and analysis of torque and drag in an extended reach well Kendong 405-Ping1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35 (4):41-45.

[12] 齐月魁,徐学军,李洪俊,等. BPX3X1 大位移井下套 管摩阻预测[J]. 石油钻采工艺,2005,27(增1):11-13.

> QI Yuekui, XU Xuejun, LI Hongjun, et al. Friction prediction method for extended reach well during casing running [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(sup1):11-13.

[13] 李井辉,申静波,闫铁,等. 基于 BP 神经网络的摩擦 系数预测方法研究[J].数学的实践与认识,2015,45

#### (23):179-185.

LI Jinghui, SHEN Jingbo, YAN Tie, et al. The research of friction coefficient prediction based on BP neural network [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015,45(23):179-185.

- [14] 李伟,王波,张文哲,等.极压减摩剂 JM-1 在延长油田水平井的应用[J].钻采工艺,2017,40(4):87-89.
  LI Wei, WANG Bo, ZHANG Wenzhe, et al. The application of EP friction reducing agent in Yanchang oil field horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(4):87-89.
- [15] 马勇,崔茂荣,杨冬梅,等.加重剂对水基钻井液润滑 性能的影响研究[J].天然气工业,2005,25(10):58-60.

MA Yong, CUI Maorong, YANG Dongmei, et al. Study influence of heavy weight additives on lubricity of water based drilling fluids[J]. Natural Gas Industry, 2005,25 (10):58-60.

- [16] JOHANCSIK C A. Torque and drag in directional wellsprediction and measurement [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984,36(6):987-992.
- [17] SHEPPARD M C, WICK C, BURGESS T. Designing well paths to reduce drag and torque[J]. SPE Drilling Engineering, 1987,2(4):344-350.
- [18] MAIDLA E E, WOJTANOWICZ A K. Field comparison of 2-D and 3-D methods for the borehole friction evaluation in directional wells[R]. SPE 16663, 1987.
- [19] HO H S. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells [R]. SPE 18047, 1988.
- [20] 张建群,孙学增.定向井中摩擦阻力模式及其应用的 初步研究[J].大庆石油学院学报,1989,13(4):23-28.

ZHANG Jianqun, SUN Xuezeng. A preliminary study of frictional drag model and its application to directional wells[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1989, 13(4):23-28.

- [21] 高德利.油气井管柱力学[M].东营:中国石油大学 出版社,2006.
- [22] 樊洪海.实用钻井流体力学[M].北京:石油工业出版社,2014.

(编辑 李志芬)