

延页平3井大偏移距水平井减阻降摩技术研究

马振锋¹, 闫志远², 杨全枝¹, 杨先伦¹, 李红梅¹, 赵毅¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075; 2. 陕西宇阳石油科技工程有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要:减阻降摩技术是大偏移距水平井成功完钻的关键技术之一。通过对井眼轨迹参数优化, 优选出具有低摩阻系数的井眼轨迹; 建立摩阻/扭矩分析模型, 分析了钻井液粘滞力和管柱屈曲对摩阻的影响, 推导出摩阻/扭矩计算公式, 提出了摩阻/扭矩预测的方法; 采用低摩阻系数的油基钻井液, 将摩阻系数降低了65.2%; 采用漂浮下套管技术, 极大地降低了下套管过程中的摩阻。延页平3井中成功应用上述技术, 准确地预测了钻井过程的摩阻, 解决了大偏移距水平井钻井过程中的托压问题, 实现了套管一次性下放到位。延页平3井的应用表明: 上述技术可以在大偏移距水平井中推广使用, 并对国内其他地区大偏移距水平井施工有一定借鉴意义。

关键词:水平井; 大偏移距; 减阻降摩; 井眼轨迹; 油基钻井液; 漂浮下套管

中图分类号: P634; TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)07-0076-04

Research on Friction Drag Reducing Technology of Long Horizontal Shift Well—YYP3/MA Zhen-feng¹, YAN Zhi-yuan², YANG Quan-zhi¹, YANG Xian-lun¹, LI Hong-mei¹, ZHAO Yi¹ (1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Corp., Ltd., Xi'an Shaanxi 710065, China; 2. YuYang Petroleum Engineering Technology, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: Friction drag reduction is one of the key technologies in long horizontal shift well drilling. By optimizing the parameters of well track, a well track with low frictional coefficient is obtained. By the establishment of friction/torque analysis model, the influence of viscous force of drilling fluid and buckling of drill string on frictional drag was analyzed and friction/torque calculating formula was derived and a method to predict drag/torque was also presented. By using low friction coefficient oil-based drilling fluid, the friction coefficient was decreased by 65.2%. With casing floating technology, friction in casing running was significantly reduced. The above technologies were applied in well—YYP3, the friction in drilling process was accurately predicted to solve backing pressure in long horizontal shift well drilling and realize casing running in place in one time. The application in well—YYP3 show that these above technologies can be widely used in long horizontal shift well and can provide reference in long horizontal shift well drilling in other parts of China.

Key words: horizontal well; long horizontal shift distance; friction drag reducing; well track; oil-based drilling fluid; casing floating

随着钻井技术特别是大偏移距水平井的不断发展, 钻井的难度也不断增加, 对钻井过程中的力学分析和计算要求越来越高。大偏移距水平井的最大特点是水平位移大, 裸眼段长, 在斜井段的钻探过程中, 不仅要增加井斜, 还要对方位进行同步调整, 极大地增加了钻柱和套管柱在井筒内的摩阻扭矩, 严重制约了三维水平井的发展^[1-2]。延页平3井位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡南部, 设计偏移距600 m, 作为国内偏移距最大的一口三维水平井, 摩阻扭矩是影响该井施工的关键因素。通过从井眼轨迹、摩阻/扭矩监测、油基钻井液和漂浮下套管等方面对大偏

移距水平井的减阻降摩进行研究, 采取合理的工程措施, 保证钻井施工顺利, 为国内同类型井的施工提供参考。

1 井眼轨迹优化研究

一口井井眼轨迹的好坏很大程度上由井眼“狗腿”度决定。“狗腿”度对摩阻具有很大影响, 主要是因为弯曲井段管柱的刚度效应明显增强, 钻柱与井壁间的接触力增大, 导致摩阻也随之增大^[2]。在造斜点与靶点一致的情况下, 分别模拟计算不同“狗腿”度和不同摩擦系数下的摩阻, 得出曲线如图1所示。

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-06-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目“页岩气钻完井及储层评价与产能预测技术研究”(编号: 2013AA064501); 陕西省科技统筹创新工程计划课题“陆相页岩气水平井钻完井工艺技术攻关”(编号: 2012KTZB03-03-02)

作者简介: 马振锋, 男, 汉族, 1984年生, 硕士, 从事石油天然气钻井工艺研究工作, 陕西省西安市科技二路75号, 249690334@qq.com。

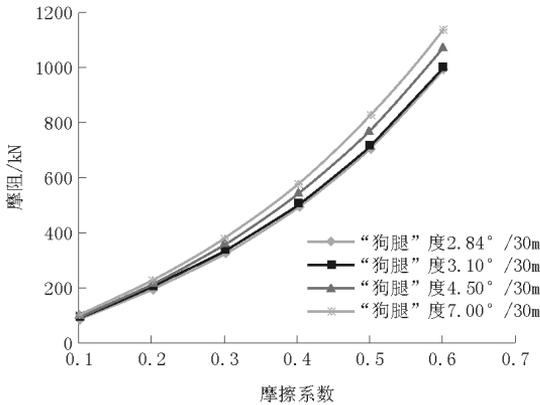


图 1 不同井眼条件的摩阻分析图

从图 1 可以看出,当“狗腿”度降至 3.1°/30 m 后,摩阻几乎不随“狗腿”度的变化而变化,当摩擦系数降至 0.2 以下,摩阻随井眼条件的变化不大。由此可见,将“狗腿”度控制在 3.1°/30 m 左右,摩擦系数控制在 0.2 以下能有效降低钻井过程中的摩阻。

2 扭矩/摩阻监测及预测模型

2.1 摩阻计算模型

为了建立三维井眼中管柱载荷的计算模型,取钻柱微元如图 2 所示,忽略剪切变形、振动阻尼和钻柱的动力效应,可得钻柱微元的平衡方程^[3]:

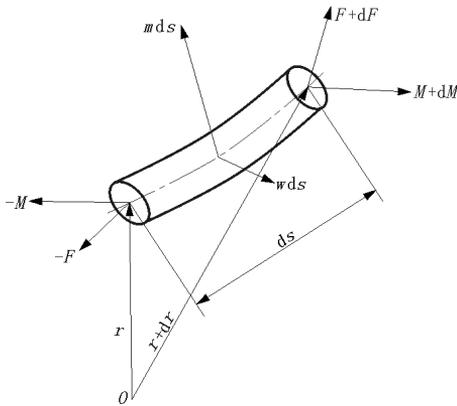


图 2 三维井眼中的钻柱微元示意图

$$\frac{dM}{ds} + tF + m = 0 \quad (2)$$

假设在 $n-b$ 平面内钻柱与井壁的接触方向线与 n 向量之间的夹角为 θ ,则钻柱单位长度的接触力 w_c 和摩擦力 w_d 及外力距 m 为:

$$w_c = -w_d (\cos\theta n + \sin\theta b) \quad (3)$$

$$w_d = \mu_w w_c (\sin\theta n - \cos\theta b) - \mu_a w_c t - w_v t \quad (4)$$

$$m = -\mu_a r_o w_c (\sin\theta n - \cos\theta b) - \mu_w w_c r_o t - m_v t \quad (5)$$

式中: μ_w ——周向摩阻系数; μ_a ——轴向摩阻系数,下放时为正,上提时为负; w_v ——钻井液动力粘滞阻力, N; r_o ——钻柱接头外径, m; m_v ——钻井液粘性扭矩, $N \cdot m$; t, n, b ——钻柱微元的单位切向量、正法向量、副法向量。

钻柱为弹性体,其合内力 F 与合内力距 M 可表示如下:

$$F = F_e t + F_n n + F_b b \quad (6)$$

$$F_e = F_a + F_{st} = F_a + (p_o + \rho_o v_o^2) A_o - (p_i + \rho_i v_i^2) A_i \quad (7)$$

$$M = EIk b + M_t t \quad (8)$$

式中: F_e ——有效轴向力, N; F_n, F_b ——剪切力, N; F_a ——轴向力, N; F_{st} ——流体对钻柱的反推力, N; p_o ——环空中钻井液压力, Pa; p_i ——钻柱内钻井液压力, Pa; v_o ——环空中钻井液流速, m/s; A_o ——钻柱的外截面面积, m^2 ; v_i ——钻柱内钻井液流速, m/s; A_i ——钻柱的内截面面积, m^2 ; E ——弹性模量, N/m^2 ; I ——惯性矩, m^4 ; k ——井眼曲率, m^{-1} ; M_t ——扭矩, $N \cdot m$ 。

将上式代入式(1)和式(2),整理,可得钻柱受力平衡方程为:

$$\frac{dF_e}{ds} + EIk \frac{dk}{ds} + w_{bp} t_z - \mu_a w_c (1 - kr_o \cos\theta) - w_v = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dF}{ds} + w = 0 \quad (1) \quad \frac{dM_t}{ds} - \mu_a r_o w_c - m_v = 0 \quad (10)$$

$$w_c = \frac{\sqrt{(F_e k + \tau^2 EIk + w_{bp} n_z - \tau k M_t)^2 + [w_{bp} b_z - (2\tau EI - M_t) \frac{dk}{ds}]^2}}{\sqrt{1 + \mu_a^2 + \tau^2 \mu_a^2 r_o^2 + 2\mu_a \mu_a r_o \tau}} \quad (11)$$

$$F_e(0) = W_{ob} \quad (12)$$

$$M_t(0) = T_{ob} \quad (13)$$

式中: t_z ——钻柱微元的单位切向量在铅垂方向的分量; θ ——钻柱接触方向线与 n 向量之间的夹角,

($^\circ$); τ ——井眼挠率, m^{-1} ; n_z ——钻柱微元的正法向量在铅垂方向的分量; b_z ——钻柱微元的副法向量在铅垂方向的分量; W_{ob} ——钻压, N; T_{ob} ——钻头扭矩, $N \cdot m$ 。

应用数值方法求解常微分方程就可以获得钻柱的有效轴向力、侧向力、扭矩、接触位置角等参数。由于该摩阻/扭矩模型包含了轴向与周向的摩阻,因此,它可以适用于各种钻井工况下的管柱受力分析^[4]。

2.2 钻井液粘滞力分析模型

钻井液为非牛顿流体,一般认为钻井液的流变模型为宾汉模式,忽略钻柱偏心的影响,通过同心环空螺旋流的分析来计算钻井液粘性扭矩。宾汉流体流变方程为:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_0 \quad (14)$$

管柱内宾汉流体雷诺数为:

$$R_e = \frac{\rho d_i v}{\eta} \quad (15)$$

宾汉流体流态转化临界雷诺数由以下方程联立求得:

$$R_{ec} = \frac{He}{8X} \left(1 - \frac{4}{3}X + \frac{1}{3}X^4\right) \quad (16)$$

式中 He 与 X 皆为中间变量,其计算方法如下:

$$He = \frac{\rho \tau_0 d_i^2}{\eta^2} \quad (17)$$

$$\frac{X}{(1-X)^3} = \frac{He}{16800} \quad (18)$$

若 $R_e < R_{ec}$ 则为层流,反之为紊流。

层流摩阻系数为:

$$\frac{f}{16} = \frac{1}{R_e} + \frac{He}{6R_e^2} \frac{He^2}{3R_e^8} \quad (19)$$

紊流摩阻系数为:

$$f = \frac{0.053}{(3.2R_e)^{0.2}} \quad (20)$$

环空流动计算只需将以上各式中圆管内径 d_i 替换为环空当量内径 $d_w - d_o$ 即可。

钻柱所受钻井液粘滞阻力为:

$$w_v = \frac{\pi}{2} f_v f_r f_i \rho_o v_a^2 d_o \operatorname{sgn}(v_a) - \frac{\pi}{2} f_i \rho_i v_{ap}^2 d_i \operatorname{sgn}(v_{ap}) \quad (21)$$

层流:

$$f_e = 1 - 0.072 \frac{e_{avg}}{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.8454} - 1.5 e_{avg}^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.1852} + 0.96 e_{avg}^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.2527} \quad (22)$$

紊流:

$$f_e = 1 - 0.048 \frac{e_{avg}}{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.8454} - \frac{2}{3} e_{avg}^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.1852} +$$

$$0.285 e_{avg}^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_o}{d_w}\right)^{0.2527} \quad (23)$$

$$f_r = \sqrt{1 + 1.5 e_{max}^2} \quad (24)$$

$$e_{avg} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\sqrt{\frac{3}{2} e_{max} + 1} - 1 \right)} \quad (25)$$

$$e_{max} = \frac{d_w - d_c}{d_w - d_o} \quad (26)$$

式中: f_o ——环空钻井液的摩阻系数; f_e ——钻柱偏心影响系数; f_r ——钻柱旋转影响系数; v_a ——环空内钻井液平均流速, m/s; ρ_o ——管柱外流体密度, kg/m³; f_i ——钻柱内钻井液的摩阻系数; ρ_i ——管柱内流体密度, kg/m³; v_{ap} ——钻柱内钻井液的平均流速, m/s。

2.3 管柱屈曲分析模型

管柱屈曲是管柱摩阻/扭矩计算中不可或缺的重要部分。滑动钻进时管柱临界屈曲载荷采用 Wu 与 Juvkam - Wold 和高德利的理论模型^[4-6]。

垂直井段:

$$\begin{cases} F_{cr} = 2.55 (EI w_{bp}^2)^{1/3} \\ F_{hel} = 5.55 (EI w_{bp}^2)^{1/3} \end{cases} \quad (27)$$

造斜井段:

$$\begin{cases} F_{cr} = \frac{4EI}{Rr_c} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{R^2 r_c w_{bp} \cos \alpha}{4EI}}\right) \\ F_{hel} = \frac{12EI}{Rr_c} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{R^2 r_c w_{bp} \cos \alpha}{8EI}}\right) \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} F_{cr} = 2 \sqrt{\frac{EI w_{bp} \sin \alpha}{r_c}} \\ F_{hel} = 2.75 \sqrt{\frac{EI w_{bp} \sin \alpha}{r_c}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: F_{cr} ——滑动钻进时管柱正弦屈曲临界载荷, N; F_{hel} ——滑动钻进时管柱螺旋屈曲临界载荷, N; R ——弯曲井眼的曲率半径, m; r_c ——管柱与井眼之间的环空半径, m。

实验发现钻柱旋转对屈曲临界载荷具有较大影响,它可以减小螺旋屈曲的临界载荷,大约为钻柱不旋转时的 1/2,但是在旋转的情况下,即使发生了螺旋屈曲,钻柱轴向力依然可以很好的传递至钻头。通过进行水平井段管柱屈曲实验研究,建立了管柱屈曲条件下的扭矩/摩阻方程。

管柱正弦屈曲临界载荷为:

$$E_{cs} = 2 \sqrt{\frac{Ehw_c}{r_c}} \quad (30)$$

将计算值与实验值对比,可知正弦与螺旋屈曲后管柱的附加侧向力均为:

$$N = \frac{r_c F_c^2}{8EI} \quad (31)$$

式中: N ——螺旋屈曲管柱的附加接触力, N ; r_c ——管柱的有效环隙, m ; F_c ——屈曲管柱的有效轴向力, N 。

2.4 扭矩/摩阻监测与预测

摩阻/扭矩计算的核心是管柱受力分布的计算,本软件采用自主开发的摩阻/扭矩模型(参见图3),考虑了管柱刚度、钻井液粘滞力、管柱屈曲等因素,使用有限差分的方法来确定不同工况下管柱的受力。在管柱受力计算的基础上,进行钩载和转盘扭矩以及摩阻系数反演的计算。

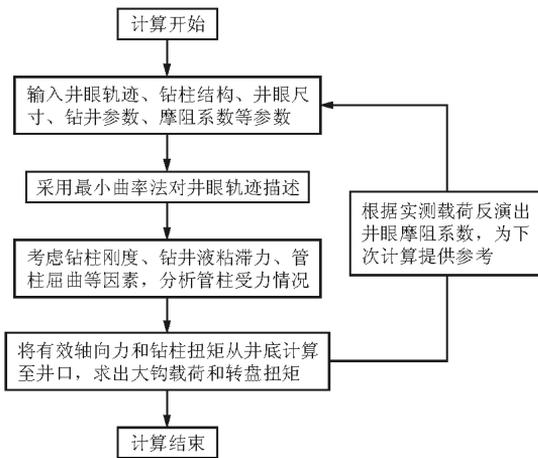


图3 扭矩/摩阻监测与预测计算流程图

3 油基钻井液技术

钻井液的润滑性对钻井工作影响很大,特别是钻大斜度井、水平井和大偏移距井时,会大幅提高管柱的旋转阻力和提拉阻力^[7]。良好的润滑性能能有效减少卡钻等井下复杂情况,保证安全、快速钻进。大多数水基钻井液可以将摩阻系数维持在0.20左右,但大偏移距水平井一般研究尽量将钻井液摩阻系数保持在0.10以内,以实现较好的摩阻控制。室内采用EP-B极压润滑仪对该井所用油基钻井液性能作了评价,实验结果见表1。

从表1可以看出:低固相水基钻井液润滑系数则达到0.23,不能满足大偏移距水平井对摩阻系数的要求;而该井所用油基钻井液摩阻系数为0.08,

表1 摩阻及润滑系数评价实验数据

钻井液类型	扭矩读数	自来水	摩阻系数	摩阻系数降低率
油基钻井液	8	34	0.08	65.2%
水基钻井液	23	34	0.23	

具有优良的润滑性能,摩阻系数降低率达65.2%。

4 漂浮下套管技术

由于套管质量一般较钻柱轻,摩阻对套管的影响较钻柱更为显著。特别是在大偏移距水平井完井作业中,下套管十分困难,而且套管磨损严重,有时还需要补丁衬管,甚至更换全部套管^[8-9]。采用漂浮下套管的方式能有效减小套管与井壁之间的接触力,保证套管顺利下放到位。选取合适的漂浮长度是套管漂浮技术的关键,通过分别模拟不漂浮和漂浮800、1200、1500和1800m长度的情况,计算套管的受力情况,其结果如图4、图5所示。

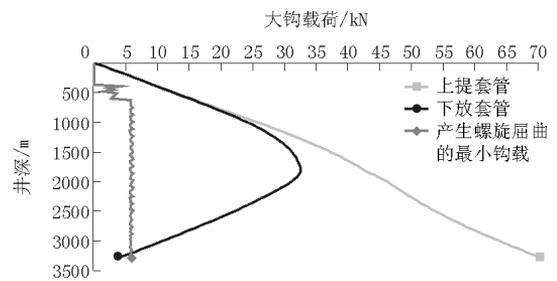


图4 常规下套管过程中的大钩载荷图

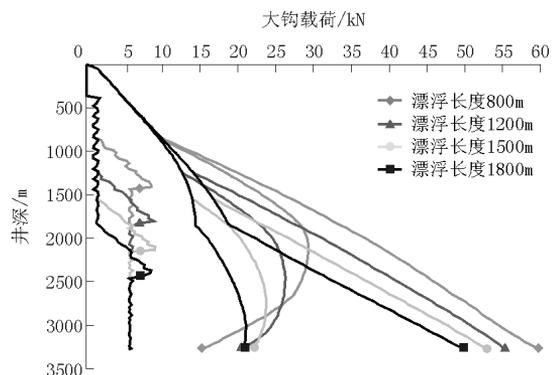


图5 不同漂浮长度下套管过程中的大钩载荷图

从图4、图5可以看出:漂浮长度不同时,下套管过程中的大钩载荷不同,漂浮长度为1500m时,大钩载荷最大,达220.7kN。而不漂浮状况下,大钩载荷仅为41.0kN,且可能会产生螺旋屈曲。最终选择套管漂浮长度为1500m,实现了套管一次性顺利下入。

(下转第83页)

现场分析认为现使用的钻具组合不适合该地层的钻进,无法有效提高钻进效率。

5.2.2 处理措施

改用 $\varnothing 152.4$ mm 五翼 PDC 钻头 + $\varnothing 121$ mm 螺杆钻具 + $\varnothing 121$ mm 钻铤的钻具组合进行复合钻进。复合钻进采用所能达到最大泥浆排量,保证泥浆具有良好的携砂性及润滑性,适当提高粘度和切力;每钻进一个单根,提起划眼一次,使岩屑分散,保证接单根的安全,同时接单根速度要快,要晚停泵早开泵,防止沉砂卡钻。采用该钻具组合以后进尺效率明显提高,平均进尺可达到 3.2 m/h。但钻遇含砾石地层时钻头磨损很快,需根据地层变化结合牙轮钻头使用。

6 结语

(1)页岩气参数井对井斜要求非常严格,各井段都要注意优选钻具组合及钻进参数,必要时可以使用无线随钻测斜仪及单弯螺杆进行纠斜。

(2)保证岩心采取率是页岩气参数井施工的重中之重,要根据取心层段的岩性特点合理选择取心钻具并严格按照规范操作,以保证岩心采取率达到要求。

(3)页岩气孔钻探都会遇到大段泥岩地层,本

孔采用的氯化钾泥浆体系可以有效抑制泥岩缩径、坍塌等孔内事故的发生。

(4)复合钻进可大幅度提高钻井速度,但应用局限性也较强,应注意使用范围。复合钻进钻时较快,在油气层井段钻进时,应按井控条例,对快钻时循环观察,防止井喷事故发生。

参考文献:

- [1] 武汉地质学院,等. 钻探工艺学(中册)[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [2] 陈庭根,等. 钻井工程理论与技术[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2000.
- [3] 孙丹. 若尔盖铀矿强水敏性地层泥浆体系研究[D]. 四川成都:成都理工大学,2014.
- [4] 艾中华,郭健康,唐德钊. 新型 KCl/硅酸钠钻井液在强水化分散泥页岩中的应用[J]. 石油钻探技术,2009,37(5):77-80.
- [5] 米合江,张飞. 新疆页岩气调查井准页2井钻井施工技术及问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):25-30.
- [6] 陈养龙,魏风勇,王宏杰,等. 螺杆加 PDC 钻头复合钻进技术[J]. 断块油气田,2002,9(4):57-60.
- [7] 王勇军,赵长亮,郑宇轩,等. 牛热四井膏泥岩钻井液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):33-34.
- [8] 郭昊,袁玲. 页岩气钻井关键技术及难点研究[J]. 石油化工应用,2013,32(6):12-14,19.
- [9] 王建华,刘杰,张进. 页岩气开发钻完井技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):1-5.

(上接第79页)

5 结论

(1)通过对井眼轨迹进行优化和钻井过程中摩阻/扭矩监测,保证了延页平3井顺利完钻,钻井过程中未发生卡钻等各种井下复杂情况,成功穿透了1200 m的储层,页岩穿透率达100%;

(2)建立了摩阻/扭矩计算和监测的模型,准确地计算了钻井过程中的大钩载荷和大盘扭矩,并对下步施工过程中的摩阻/扭矩进行预测;

(3)优选油基钻井液配方,有效地降低了钻井和下套管过程中的摩阻;

(4)采用漂浮下套管的技术,选取合理的漂浮长度,有效减小了下套管过程中的摩阻,保证套管一次顺利下入,对国内大偏移距水平井的下套管作业有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 马振锋,于小龙,闫志远,等. 延页平3井钻完井技术[J]. 石油钻采工艺,2014,36(3):23-26.
- [2] 陶红胜,杨全枝,于小龙,等. 鄂尔多斯盆地东部低浅层渗透油藏大位移水平井钻井实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):37-40.
- [3] 窆玉玲. 长水平段大位移井井眼轨道优化设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):50-52.
- [4] 练章华,林铁军,刘健等. 水平井完井管柱力学—数学模型建立[J]. 天然气工业,2006,26(7):61-64.
- [5] 杨姝,高德利,徐秉业. 定向井钻柱摩阻问题的有限差分分解[J]. 石油钻探技术,1992,20(3):22-26.
- [6] H - S. Ho. An Improved Modeling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells[R]. SPE18047, 1988.
- [7] 欧阳建勇,潘广业,肖俊锋,等. 安深3-1HF井钻井液的配制与应用[J]. 石油地质与工程,2014,28(4):109-111.
- [8] Rae G, Williams H, Hamilton J. Selective flotation of casing from a floating vessel[R]. SPE 88841, 2004.
- [9] 陈建兵,安文忠,马健. 套管漂浮技术在海洋钻井中的应用[J]. 石油钻采工艺,2001,23(5):19-22.