

水平井下套管摩阻分析研究

陈志鸣¹, 赵 琥¹, 温达洋¹, 冯青豪¹, 刘天乐^{2*}

(1. 中海油田服务股份有限公司, 河北 三河 065201; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 套管下入过程中大钩载荷的预测是成功的关键因素之一, 水平井由于其特殊的井眼轨迹, 在下套管的过程中摩阻比常规井大。因此, 准确地预测套管下入摩阻对水平井固井的设计和施工具有重要的指导作用。目前业界开发出了许多摩阻预测分析模型, 并开展了相关理论研究及案例分析, 常用的分析方法有软杆模型、刚杆模型和有限元法。后续学者使用各种理论方法在这3种方法的基础上建立了考虑套管多种受力情况下的摩阻分析模型, 但是目前还没有相关研究针对现有模型算法进行汇总及优缺点分析, 无法在具体应用时进行模型优选。因此, 本文根据基础理论的不同, 对目前下套管摩阻模型进行了归类分析, 并探讨了下套管摩阻研究与预测存在的技术“瓶颈”与下步发展方向, 以期后续固井三维下套管摩阻分析深度融合发展提供指导和帮助。

关键词: 固井; 水平井; 套管摩阻; 力学分析; 计算模型

中图分类号: TE256; P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0067-10

Analysis of casing friction in horizontal well

CHEN Zhiming¹, ZHAO Hu¹, WEN Dayang¹, FENG Qinghao¹, LIU Tianle^{2*}

(1. China Oilfield Services Limited, Sanhe Hebei 065201, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The prediction of the hook load during casing insertion is one of the key factors for success. Due to its special wellbore trajectory, the frictional resistance during casing insertion in horizontal wells is higher than that in conventional wells. Therefore, accurately predicting the frictional resistance of casing insertion plays an important guiding role in the design and construction of horizontal well cementing. At present, many friction prediction analysis models have been developed in the industry, and relevant theoretical research and case analysis have been carried out. The commonly used analysis methods include Soft-String Model, Stiff-String Model and finite element method. Subsequent scholars used various theoretical methods to consider the friction analysis model of casing under various stress conditions on the basis of the three methods, but there is currently no relevant research that summarizes and analyzes the advantages and disadvantages of existing model algorithms, making it impossible to conduct model optimization in specific applications. Therefore, according to different basic theories, this paper classifies and analyzes the current casing friction models, and discusses the existing technical bottlenecks in casing friction research and prediction as well as the next development direction, in order to provide guidance and help for the in-depth integration development of casing friction analysis in the future.

Key words: cementing; horizontal well; casing friction; mechanical analysis; computational model

0 引言

在水平井下套管作业中, 套管在水平井内的受力比较复杂, 且套管柱在井眼中下入时一般依靠自

重作为动力, 当下入造斜段时, 随着井斜角的增加, 套管柱逐渐开始紧贴下井壁, 下至水平段就完全躺在下井壁上, 这时, 套管与地层的接触面积变得很

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-06-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.008

第一作者: 陈志鸣, 男, 汉族, 1997年生, 主要从事钻井、钻具开发等工作, 河北省三河市燕郊镇海洋石油局中院, chenzhm21@cosl.com.cn。

通信作者: 刘天乐, 男, 汉族, 1984年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 主要研究方向为非常规固井与特种加固技术、钻完井过程中井内传热传质规律、井下电热蒸汽发生器等, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, liutianle2008@163.com。

引用格式: 陈志鸣, 赵琥, 温达洋, 等. 水平井下套管摩阻分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 67-76.

CHEN Zhiming, ZHAO Hu, WEN Dayang, et al. Analysis of casing friction in horizontal well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 67-76.

大,井筒对套管的摩阻也随之增大,导致管柱难以依靠自身重力继续下入,使得下入受阻^[1-6]。为了保证在水平井下套管施工中套管柱能够顺利下入井底,必须要对管柱下入过程中有关的力学问题进行深入研究,定量分析摩阻与载荷,以此为基础建立数理模型算法,为下套管施工作业提供科学合理的意见和必要的技术支持。

自从水平井得到迅猛发展以来,国内外许多专家对钻柱在井内钻井时所受到的力进行了分析,并对影响钻柱受力的因素进行简化,建立起了推导钻柱摩阻的计算公式,即“软杆模型(Soft-String Model)”、“刚杆模型(Stiff-String Model)”和有限元分析法。以后多种管柱在井内的受力分析都是在这3种分析方法基础之上进行修正计算的。

本文将就目前下套管过程中的摩阻分析进行系统性调研,对现有下套管摩阻模型优缺点进行分析,帮助相关研究人员根据需求选择合适的模型,并针对未来摩阻分析发展提出了一些建议。

1 下套管摩阻计算模型

1.1 软杆模型

Johancsik等^[7]根据皮带传送原理,把钻柱看作是有质量的软索,不考虑钻柱的刚度对钻进的影响,提出了计算摩阻和扭矩的数学模型,即软杆模型。他首先对管柱受力进行简化,只考虑钻井液对管柱产生的浮力作用,忽略产生的其他作用力,并且将摩阻和扭矩的产生假设是管柱与井壁之间简单的滑动摩擦,摩擦力的大小为摩擦系数与正压力简单的乘积,提出了一个计算管柱轴向拉力和扭矩的受力模型。将整个管柱看作很多个管柱单元段,利用管柱在井内所受到的力是平衡的,建立力学平衡方程,然后根据已知的井底边界条件,利用迭代的方法推导出管柱拉力、扭矩的计算公式。

$$\Delta F = q\Delta L \pm \mu N$$

$$\Delta M = \mu NR_0$$

$$N = \sqrt{(F\Delta\varphi \sin\alpha)^2 + (F\Delta\alpha + W\sin\alpha)^2}$$

式中: N ——轴向力; ΔM ——扭矩; φ ——方位角; α ——井斜角; R_0 ——半径; F ——主法线方向上的力; μ ——摩阻系数; W ——浮重。

该模型简单易行,但是由于该模型只考虑了重力与井眼曲率对正压力的影响,所以有很大的局限

性,其假设条件与实际偏差较大,只在垂直井眼中具有一定的精度,在弯曲井段特别是曲率较大的井眼中误差较大。

为了使摩阻预测更加准确,后续各学者对模型进行了改进及优化。Sheppard等^[8-9]考虑了钻井液内外压差以及起下钻时对钻柱轴向力的影响,将轴向力计算公式进行优化。Maidla等^[10-12]对拉力、扭矩的计算进行了空间扩展,分别建立了二维和三维的理论模型,考虑了井眼轨迹在空间上的变化、压力梯度产生的粘滞力以及钻井液对管柱摩阻的影响,但是同样没有考虑管柱弯曲应力对预测结果造成的影响。He等^[13]提出了三维管柱摩阻模型。可以根据“狗腿”严重度的大小相应地选择管柱微元段的长度以研究“狗腿”度对摩阻的影响。此外,模型将摩阻系数分解成了管柱轴向运动摩阻系数和周向运动摩阻系数,用以计算管柱周向运动和轴向位移对管柱轴向力和扭矩的影响。Wu等^[14-17]使用逐步先行逼近法建立了计算管柱拉力、扭矩的受力模型,该模型针对常曲率井眼进行了简化,假设管柱曲率与井眼曲率相同,并且只和井壁一侧产生接触,适用于井眼轨迹形变较大的情况。张建群等^[18]对定向井中钻柱摩阻力作了进一步的细化,考虑了钻柱的拉力与所受侧向力具有相关性这一因素,将侧向力分解在井斜和方位两个平面进行分析,建立了更符合现场情况的模型。

$$N_\alpha = W_b \cdot \sin \bar{\alpha} + \left[T \cdot \sin \frac{\Delta\alpha}{2} + (T + \Delta T) \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right]$$

$$N_\beta = (T \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \frac{\Delta\beta}{2} + [(T + \Delta T) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha)] \cdot \sin \frac{\Delta\beta}{2}$$

$$N^2 = N_\alpha^2 + N_\beta^2$$

$$\Delta T = W_b \cos \alpha \pm \mu N$$

$$\Delta M = \mu NR$$

式中: W_b ——单元体浮重; N ——单元体所受侧向力; T ——单元体下端拉力; ΔT ——拉力增值; ΔM ——转矩增值; R ——单元体半径; α 、 β ——单元体下端井斜角、方位角; $\bar{\alpha}$ ——单元体中点井斜角。

贺志刚等^[19]、李庆明^[20]在软杆模型的基础上,考虑实钻井眼轨迹的井斜角和方位角的不同,得到了三维条件下的大位移井摩阻扭矩计算模型。

韩志勇^[21-23]根据定向井测斜计算方法的假设,

建立了“斜面圆弧”和“圆柱螺线”两种三维模型计算钻柱的摩阻。通过其二维模型可以判断增斜段管柱与井壁的接触状态,其公式更具有实用性。

眭满仓等^[24]将水平井管柱分为3段,即水平段、造斜段和倾斜段,建立受力平衡方程,推导出水平井管柱入井时摩阻计算的力学模型,分析计算了在稳定和旋转方式下管柱入井时的大钩载荷和井口扭矩等重要技术参数的解析公式。

(1)水平段:

$$F_c = -W_{e0}L_H\mu g$$

(2)造斜段(管柱底部轴向力为负,轴向受压, $N \geq 0$;处于上部, $N < 0$):

$$\frac{dF(\alpha)}{d\alpha} = \mu F(\alpha) + gW_{e1}R \times (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (N \geq 0)$$

$$\frac{dF(\alpha)}{d\alpha} = -\mu F(\alpha) + gW_{e1}R \times (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (N < 0)$$

$$T_i = T_{i-1} + \left\{ \omega \Delta L \cos \bar{\alpha} \pm \mu \left| \omega \Delta L \sin \alpha_i - T_{i-1} \sin \beta_{ab} \right| / \left(\cos \frac{\beta_{ab}}{2} - \mu \sin \frac{\beta_{ab}}{2} \right) \right\} / \cos \frac{\beta_{ab}}{2}$$

$$M_i = M_{i-1} + \mu R_c \left[\left| \omega \Delta L \sin \bar{\alpha} - T_{i-1} \sin \beta_{ab} \right| / \left(\cos \frac{\beta_{ab}}{2} - \mu \sin \frac{\beta_{ab}}{2} \right) \right]$$

(3)等井斜变方位井眼:

$$T_i = T_{i-1} + \left\{ \omega \Delta L \cos \alpha \pm \mu \left[\left(2T_{i-1} \sin \frac{\theta_{ab}}{2} \right)^2 + \left(\omega \Delta L \sin \alpha \right)^2 \right]^{1/2} \right\} / \cos \frac{\beta_{ab}}{2}$$

$$M_i = M_{i-1} + \mu R_c \left[\left(2T_{i-1} \sin \frac{\theta_{ab}}{2} \right)^2 + \left(\omega \Delta L \sin \alpha \right)^2 \right]^{1/2}$$

(4)变井斜变方位井眼:

$$T_i = T_{i-1} + \left\{ \left[\left(\omega \Delta L \sin \bar{\alpha} - 2T_{i-1} \cos \frac{\theta_{ab}}{2} \sin \frac{\beta_{ab}}{2} \right)^2 + \left(2T_{i-1} \cos \frac{\beta_{ab}}{2} \sin \frac{\theta_{ab}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} / \left(\cos \frac{\beta_{ab}}{2} \cos \frac{\theta_{ab}}{2} \right)$$

$$M_i = M_{i-1} + \mu R_c \left[\left(\omega \Delta L \sin \bar{\alpha} - 2T_{i-1} \sin \frac{\beta_{ab}}{2} \cos \frac{\theta_{ab}}{2} \right)^2 + \left(2T_{i-1} \sin \frac{\theta_{ab}}{2} \cos \frac{\beta_{ab}}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

式中: T_i ——轴向载荷; M_i ——扭矩; $\bar{\alpha}$ ——单元体上下端所在井眼处的平均井斜角; β_{ab} ——单元体上下端所在井眼处的井斜角的变化量; θ_{ab} ——单元体所在井段的“狗腿”角; R_c ——套管半径; ΔL ——单元体长度。

唐佩瑜等^[26]以水平井三维井眼轨迹描述为基础,建立了综合考虑套管柱重力、浮力、摩擦阻力、

$$N = gW_{e1} \cos \alpha - F(\alpha)/R$$

(3)倾斜段:

$$F_s = F_2 + gW_e L_s \cos \theta - \mu gW_e L_s \sin \theta$$

式中: L_s ——倾斜段长; R ——曲率半径; L_H ——水平段全长; α ——造斜段圆心角; α_0, α_2 ——造斜段结束、开始时的圆心角; W_{e0}, W_{e1}, W_e ——水平段、造斜段、倾斜段管柱单位长度质量; F_2 ——开始造斜点处轴力。

沈献良等^[25]采用空间分析方法详细分析了三维井眼中套管单元体的受力情况,推导了计算套管轴向载荷和扭矩的统一公式。他根据静力学平衡原理将各类型井眼轨迹分别进行分析。

(1)斜直井眼:

$$T_i = T_{i-1} + \omega \Delta L \cos \alpha \pm \mu \omega \Delta L \sin \alpha$$

$$M_i = M_{i-1} + \mu R_c \omega \Delta L \sin \alpha$$

(2)变井斜等方位井眼:

弯曲应力和接触应力等作用的套管柱下入摩阻计算三维力学模型。将微元段所受压力在主法线方向分量的正负,即套管与上下井壁接触两种情况,得到套管摩阻分析模型。

1.2 硬杆模型

Ho^[27-28]对钻柱受力分析时采用了大变形理论,并建立了硬钻柱整体受力模型,该模型是在静力变

形控制方程的基础上,通过有限差分法求得的。虽然刚杆模型考虑的因素比较多,与实际更接近,但是其建立的模型计算比较复杂,精确求解是非常困难的。

$$\begin{aligned} \frac{dM_t}{dS} &= frN \\ \frac{d}{dS} (T + M_b^2/2EI) - fN + q\vec{g} \cdot \vec{t} &= 0 \\ -\frac{d^2M_b}{dS^2} + K_n(K_bM_t + K_nM_b) + TK_b + N_n + \\ q\vec{g} \cdot \vec{n} &= 0 \\ -\frac{d}{dS} (K_bM_t + K_nM_b) - K_n\frac{dM_b}{dS} + N_b + q\vec{g} \cdot \vec{b} &= 0 \end{aligned}$$

式中: S ——钻柱曲线坐标; M_b ——钻柱弯矩; q ——单位长度钻柱的浮重; \vec{g} ——重力场方向单位矢量; \vec{t} ——井眼切线方向单位矢量; \vec{n} ——井眼主法线方向单位矢量; \vec{b} ——井眼副法线方向单位矢量; K_n ——井眼挠率; K_b ——井眼曲率; N_n —— N 在 \vec{n} 方向分量; N_b —— N 在 \vec{b} 方向分量; EI ——钻柱的抗弯刚度。

李黔等^[29]、黄志强^[30]根据弹性梁的受力情况和平衡微分方程,通过对水平井下套管摩阻的分析计算,推导出在二维平面内弯曲井段的套管微元体摩阻计算模型,之后将套管单元体的受力与变形分解到P平面即井斜平面和R平面即鲁宾斯基定义的“狗腿”角平面上来研究,得到三维空间下的弯曲井眼内套管单元体上端轴向力的计算公式。

李子丰等^[31-34]对管柱模型进行了更详细的假设研究,考虑了钻柱在井内钻进运动的状态、钻井液性能对管柱摩阻力的影响,对弯曲井眼中管柱所受的拉力、扭矩进行分析,重新建立了管柱在井内受力模型的微分方程并进行了公式的推导。但是在计算钻井液粘滞力和结构力的影响时进行了一定的简化。

$$\begin{aligned} \frac{dM_t}{dS} &= f_1rN + m_0 \\ \frac{dT}{dS} + EIK_b\frac{dK_b}{dS} - f_2N - Cv - B + q\vec{g} \cdot \vec{t} &= 0 \\ -EI\frac{d^2K_b}{dS^2} + K_n(K_bM_t + K_nM_b) + TK_b + \\ N_n + f_1N_b + q\vec{g} \cdot \vec{n} &= 0 \end{aligned}$$

$$-\frac{d}{dS} (K_bM_t + K_nM_b) - K_n\frac{dM_b}{dS} + N_b -$$

$$f_1N_n + q\vec{g} \cdot \vec{b} = 0$$

$$f_1 = \frac{2\pi r\omega_0 f}{[v^2 + (2\pi r\omega_0)^2]^{1/2}}$$

$$f_2 = \frac{\nu f}{[v^2 + (2\pi r\omega_0)^2]^{1/2}}$$

$$m_0 = 4\pi^2 r^3 \omega_0 \left[\frac{\tau_0}{\sqrt{v^2 + (2\pi r\omega_0)^2}} + \frac{2\mu}{D_w - 2r} \right]$$

$$B = \frac{2\pi r\tau_0 v}{[v^2 + (2\pi r\omega_0)^2]^{1/2}}$$

$$C = \frac{2\pi\mu}{\ln D_w - \ln(2r)}$$

式中: v ——起钻或上行速度; ω_0 ——钻柱圆频率; τ_0 ——钻井液的结构力; μ ——钻井液的动力粘度; D_w ——井径。

祖峰^[35]、隋顾磊等^[36]以弯曲圆管的钻柱摩阻力学模型为基础,对定向井的摩擦阻力问题进行了分析研究。

$$q_y = EI \frac{d^2}{dx^2} (\sin \theta \frac{d\alpha}{dx}) - F_t \sin \theta \frac{d\alpha}{dx}$$

$$q_z = -EI \frac{d^3\theta}{dx^3} + F_t \frac{d\theta}{dx} + W \sin \theta$$

$$q_n = \sqrt{q_y^2 + q_z^2}$$

式中: F_t ——钻柱轴向张力; q_y 、 q_z ——接触力; q_n ——法向接触力; W ——单位长度钻柱在钻井液中的重量; EI ——弯曲模量。

1.3 有限元分析

有限元法是一种近似的数值解法。其基本思路是将管柱离散成若干个空间梁单元。然后对梁单元进行研究,根据虚功等效原理建立起梁单元的平衡方程,然后再经过坐标变化和“对号入座”的拼装过程,就可得到整个管柱的平衡方程。求解该方程可得管柱节点处的位移和单位内力。

Millheim等^[37]、付建红等^[38]利用有限元ANSYS分析软件,对管柱在井内的受力情况进行数值模拟研究,模拟出管柱结构的应力变化值,利用间隙单元法考虑了井壁的应变问题,用几何非线性力学问题描述了钻柱与井壁的接触情况。

申昭熙等^[39]使用有限元数值模拟计算方法,分析了二维平面状态下套管下入过程中与井壁的接

触情况。得到套管下入过程中与井筒内表面并非均匀接触,接触压力(摩擦力)较大区域主要是在造斜段,包括造斜段起始、中间及结束点附近,直水平段与井壁接触压力分布较均匀,管端部位的接触压力大于其他部位的接触压力。

1.4 改进模型

由于水平井的发展,对下套管摩阻的研究预测仅使用一种模型已经不能得到准确的结果,后续研究多数采用多井段多模型的预测方法,大大提高了准确性。

王建军等^[40-41]主要考虑了起下钻过程的摩阻,假定钻柱在起下钻过程中紧贴下井壁,分析中还考虑到水平井井眼的曲率半径和摩阻系数随井深的变化(见图1),且钻柱的单元长度质量也随井深而改变,因此他们对钻柱拉力和摩阻采用分段计算形式,分别得到单元稳斜段或水平段和垂直段摩阻公式。

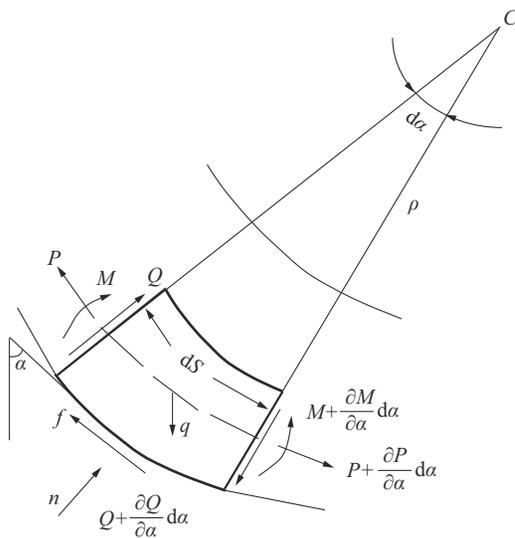


图1 套管与井壁接触时的受力分析
Fig.1 Force analysis of casing in contact with wellbore wall

$$P + nR_1 = R_2q \sin \alpha$$

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} \pm n\mu R_1 = -R_2q \cos \alpha$$

其中: $R_1 = \rho + D_w/2$; $R_2 = \rho + D_w/2 - D_c/2$ 。

$$P = Ae^{\pm\mu\alpha} + \frac{qR_2}{1 + \mu^2} [(\mu^2 - 1) \sin \alpha \pm 2\mu \cos \alpha]$$

$$f = -\frac{2q\mu R_2}{(1 + \mu^2)R_1} (-\sin \alpha \pm \mu \cos \alpha) - \frac{\mu A}{R_1} e^{\pm\mu\alpha}$$

式中: A ——待定系数,由边界条件确定; P ——轴向拉力; q ——钻柱单位长度质量; n ——单位长度钻柱所受的井壁支持力; f ——单位长度钻柱上的摩阻; ρ ——井眼曲率半径; α ——井斜角; D_w ——井眼直径; D_c ——钻柱外径。

马善洲等^[42]、闫铁等^[43]根据水平井的特点,提出对钻柱摩阻分段计算的方法,即对底部钻具组合(BHA)段,采用纵横弯曲梁理论计算摩阻;对BHA以上井段,用微单元力平衡分析法具体分析钻柱的受力,给出不同工况下水平井摩阻力计算的简化条件,并将泥浆粘滞力对钻柱刚性效应的影响考虑在内。

范光第等^[44]、杜现飞等^[45]根据井眼轨迹、管柱与井壁接触和受力特点,利用分段计算方法,增斜井段采用三维纵横弯曲梁模型;直井段、稳斜段、水平段采用修正软杆模型。同时,他将套管刚性考虑在内,认为管柱与井壁接触正压力由两部分组成:一部分是按照原软模型计算的正压力;另一部分是附加的刚性正压力。

翟鹏^[46]使用三次样条函数拟合井斜角和方位角,并根据井下套管柱的接触和受力特点,通过计算各井段的临界载荷,分段建立了一种复杂结构井套管摩阻计算的新模型,对于井眼曲率较小的井段采用软杆模型;对于井眼曲率较大、下套管困难的井段,由于管柱刚度不可忽略,则采用刚杆模型,提高了复杂结构井套管摩阻扭矩计算的精度,并在此基础上考虑管柱发生屈曲产生的附加接触力。

廖华林等^[47]通过对井眼内安装扶正器和未安装扶正器套管柱的受力与变形进行分析,推导出大位移井中套管柱的摩阻计算模型,用来预测套管下入过程中的大钩载荷和摩阻。是否安装扶正器在受力分析上会有差别,主要表现在后者的套管柱不与井壁接触,井壁对管柱的支承力集中在扶正器上,同时由于刚性效应,必须考虑初始弯曲的影响;而未安装扶正器井段的套管柱可以认为与井壁连续接触,管柱变形曲线与井眼重合,需要考虑剪力作用,为后续套管摩阻分析提供了新的方向。

何世明等^[48]考虑了套管刚性、安装扶正器以及下套管速度对套管柱单元体受力的影响,并且对实测井斜数据进行平滑和插值处理,建立了加扶正器的套管在水平井内的力学模型,且通过实例计算表

明摩阻计算模型有较好的准确性。

牛成成等^[49]在考虑波动压力影响的基础上优化了套管柱的摩阻计算模型,得出考虑波动压力的套管摩阻预测值比不考虑时更符合实测值,考虑波动压力的摩阻预测模型更适合作为指导套管下入的依据。

$$p_{sb} = \frac{196f\rho L \bar{v}^2}{D_h - d_0}$$

式中: p_{sb} ——波动压力; ρ ——泥浆密度; L ——运动管柱长度; D_h ——井眼直径; d_0 ——运动管柱外径; \bar{v} ——环空平均流速; f ——摩阻系数,层流 $f = 24/Re$,

紊流宾汉流体 $f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$,紊流幂律流体 $f = a/Re^b$,

$a = (\lg n + 3.93)/50b = (1.75 - \lg n)/7$ 。

$$K_0 = \frac{1}{1 - \sigma_0^2} \frac{\frac{\lambda^2}{2} (\delta_0^2 - \delta_i^2 - \sigma_0^2 - 1) + \frac{1}{4} (\delta_0^4 - \delta_i^4 + \sigma_0^4 - 1)}{\lambda^2 \ln(\sigma_0/\sigma)} \frac{\frac{1}{3} (\delta_0^3 + \delta_i^3 - \sigma_0^3 - 1)}{-(\sigma_0 - \sigma) [(\sigma_0 + \sigma)/2 + T]}$$

幂律流体:

$$K_0 = \frac{n}{1 + 3n} \frac{1}{1 - \sigma_0^2} \frac{(1 - \lambda^2)^{\frac{1+n}{n}} - \sigma_0^{\frac{n-1}{n}} (\lambda^2 - \sigma_0^2)^{\frac{1+n}{n}}}{\int_{\sigma}^{\sigma_0} [(\lambda^2/x) - x]^{\frac{1}{n}} dx}$$

式中: K_0 ——泥浆粘附系数; v_p ——下一单根或立柱管柱过程中的最大瞬时速度; n ——流性指数; $\sigma = R_1/R$, $\sigma_0 = R_0/R$, $\lambda = R_2/R$, $\delta = r/R$, 其中 R ——井眼半径, R_1 ——管柱外半径; R_0 ——等效半径; δ_i 、 δ_0 ——流核内、外无因次半径; $T = 2\tau_0 s / (pR)$; τ_0 ——屈服值。

2 模型的比较

以乌石区块某三开井为例,对下入套管的摩阻力进行软件模拟计算,并对两种模型计算结果进行分析对比。

乌石某井的井深为4215 m,井身结构为表层套管 $\varnothing 508 \text{ mm} \times 156 \text{ m}$,技术套管 $\varnothing 339.725 \text{ mm} \times 2613 \text{ m}$,生产套管 $\varnothing 244.475 \text{ mm} \times 4215 \text{ m}$,其中造斜点为2140 m。模拟不同模型下套管的下入摩阻,结果如图2所示。

通过模拟曲线分析,刚杆模型在造斜段,即曲率较大段井眼更接近实际摩阻情况;而在井眼曲率较小的造斜段,软杆模型的正确率优于刚杆模型;直井段两种模型结果相似,与实际结果相符。

宾汉流体:

$$Re = \frac{(D_h - d_0) \bar{v} \rho}{\eta \left[1 + \frac{\tau_0 (D_h - d_0)}{8\eta \bar{v}} \right]}$$

幂律流体:

$$Re = \frac{12^{1-n} (D_h - d_0)^n \bar{v}^{2-n} \rho}{K \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n}$$

式中: η ——塑性粘度; τ_0 ——泥浆切动力; n ——流性指数; K ——稠度系数。

$$\bar{v} = \left(\frac{d_0^2}{D_h^2 - d_0^2} + K_0 \right) v_p$$

$$v_p = 1.5 \bar{v}_p$$

宾汉流体:

$$K_0 = \frac{1}{1 - \sigma_0^2} \frac{\frac{\lambda^2}{2} (\delta_0^2 - \delta_i^2 - \sigma_0^2 - 1) + \frac{1}{4} (\delta_0^4 - \delta_i^4 + \sigma_0^4 - 1)}{\lambda^2 \ln(\sigma_0/\sigma)} \frac{\frac{1}{3} (\delta_0^3 + \delta_i^3 - \sigma_0^3 - 1)}{-(\sigma_0 - \sigma) [(\sigma_0 + \sigma)/2 + T]}$$

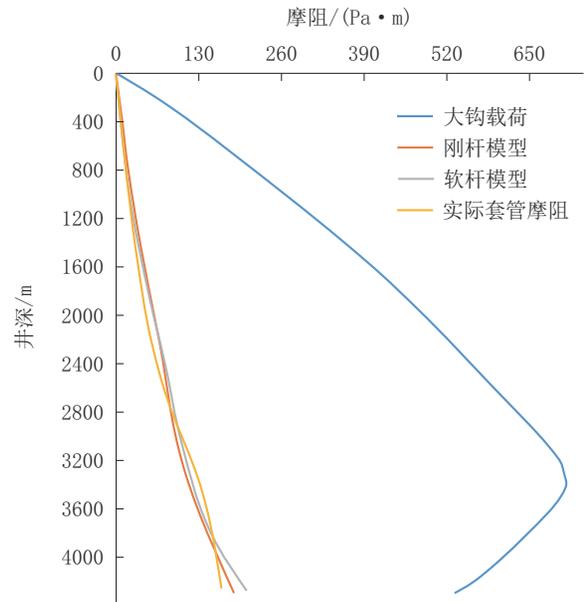


图2 乌石某井套管下入摩阻

Fig.2 Friction resistance during casing insertion in a certain well in Wushi

不同模型的适用情况见表1。

表1 三种分析模型的假设及适用情况
Table 1 Assumptions and applicability of three analysis models

模型	基本假设	适用情况
软杆模型	(1)钻柱类似于一个软绳,刚性很小,可以忽略; (2)刚性井壁,套管模型管体与井眼轴线完全一致; (3)忽略套管的局部形状,如浮箍、扶正器等对摩阻扭矩的影响; (4)套管受力平衡时,忽略钻柱截面剪切力的影响; (5)忽略套管动态因素的影响	(1)曲率较小; (2)光滑井眼
刚杆模型	(1)刚性井壁,套管模型管体与井眼轴线不一致; (2)未忽略套管的局部形状,如浮箍、扶正器等对摩阻扭矩的影响; (3)忽略套管动态因素的影响	(1)曲率较大; (2)管柱刚度较大
有限元分析模型	(1)套管弯曲变形为理想圆形; (2)当套管与井壁均匀接触或大部分接触,套管内弯矩沿轴线基本不变; (3)根据弯矩与剪力的关系,套管承受的剪力为零	适应性强,对管柱的材料和几何形状都没有限制,便于考虑管柱的非线性作用,但是计算模拟复杂

3 模型设计及优化方向

通过对软杆模型和刚杆模型的分析,我们发现这两种模型各有优点和适用范围。软杆模型忽略了管柱的刚度,在曲率不大的光滑井眼条件下,用来计算管柱的摩阻扭矩能够给出足够的精度;但应用在井眼曲率变化较大或管柱刚性较大的单元,会产生明显的误差。刚杆模型在曲率较大的井眼或刚度较大的管柱的条件下,其计算结果具有更高的精度,但用于曲率较小、刚度较小的平滑井眼中,计算结果收敛困难,对测点数据敏感,解的稳定性较差。

3.1 扶正器安放间距

目前在水平井下套管过程中,为提高顶替效率并使套管更好地入预定位置,普遍使用套管扶正器,可以减少套管与井壁之间的接触,从而减少下套管摩阻,但不是安装的扶正器个数越多下套管就越容易,因为过多的套管扶正器,会增大套管的刚度,使套管在造斜井段产生的切向力不可忽视,同

时也会减少稳斜井段和水平井段井壁与套管接触。要避免扶正器使用过多,同时也要让扶正器的扶正作用发挥出来,那就必须结合现场实际的井眼工况和地层等因素,选择适合现场作业的套管扶正器安放间距,并将套管摩阻分析与套管居中度共同考虑。

3.2 扶正器类型及关键参数(摩阻系数、外径、恢复力等)

摩擦系数是应用水平井下套管摩阻计算模型计算水平井下套管大钩载荷和摩阻的基础,关系着大钩载荷和摩阻计算的准确与否,因此对不同类型扶正器摩阻系数的研究至关重要。

3.3 波动压力

在大位移井套管下入过程中,在充满钻井液的井眼中套管的运动会产生波动压力,套管与井眼间的环空间隙越小产生的波动压力越大,继而引起的下入阻力也越大。由于套管与井眼间的环空间隙小,套管柱运动产生的波动压力引起的阻力不能忽视。这个阻力会随套管下入速度的增大而增大。

波动压力产生主要由流体的粘滞力、惯性力和泥浆的静切力引起,因此波动压力与套管的运动速度、加速度和钻井液性质等密切相关。实验证明,套管柱运动速度最大时,由泥浆粘滞力引起的波动压力最大。

3.4 模型组合

对于稳斜井段,由于井斜比较小、井眼曲率也比较小,用软杆模型计算;对使用扶正器的造斜井段,由于“狗腿”度比较大、井眼曲率也比较大,是下套管的最困难的地方;另外由于扶正器的使用,套管刚度随之增加,应该考虑其对摩阻的影响,所以选择刚杆模型计算;最后的水平井段根据扶正器的间距及下入过程中的轴向载荷和自重分力产生的屈曲,根据其挠度与居中度的大小关系,判断套管与井壁的接触形态,并进行相应的摩阻分析(见图3)。

4 结论及建议

本文通过对多种下套管模型进行分析,比较了它们的优缺点及适用情况:对于曲率不大的光滑井眼条件下,使用软杆计算模型精确度更高;反之,对于曲率较大的井眼或刚度较大的管柱的条件应优先考虑刚杆计算模型。但是目前两种模型均未考

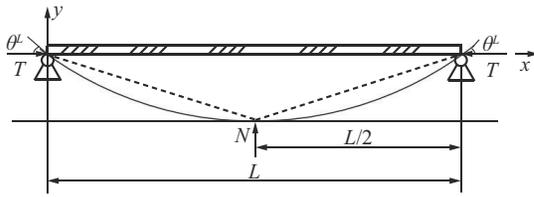


图3 套管与井壁接触时的挠度曲线

Fig.3 Deflection curve of casing in contact with wellbore wall

考虑套管动态过程中的摩阻变化,因此对后续模型研究提出以下建议:

(1)进行套管摩阻分析需将扶正器安放及套管居中度分析综合考虑。

(2)研究套管与井壁的接触形态时,没有考虑井壁的变形,下步工作可以考虑套管与井壁接触时,井壁发生形变对摩阻预测产生的影响。

(3)考虑波动压力对摩阻的影响首先要考虑流体的粘滞力、惯性力和泥浆的静切力等,需要对各体系泥浆的粘度等性质做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 谭元铭,段海波,李若莹,等.川西地区水平井下套管复杂情况分析改进措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(12):16-19,23.
TAN Yuanming, DUAN Haibo, LI Ruoying, et al. Casing RIH difficulties and improvement measures for horizontal wells in western Sichuan Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(12):16-19,23.
- [2] 陈立强,王晓鹏,吴智文,等.渤海油田大位移井下套管设计难点及对策研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):23-30.
CHEN Liqiang, WANG Xiaopeng, WU Zhiwen, et al. Casing running design difficulties and solutions for extended reach wells in Bohai Oilfield [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):23-30.
- [3] 闵江本,向蓉,陈博.长庆油田小套管二次固井工艺技术研究与应用[J].钻探工程,2021,48(8):26-32.
MIN Jiangben, XIANG Rong, CHEN Bo. Research and application of secondary cementing technology for slim casing in Changqing Oilfield [J]. Drilling Engineering, 2021, 48 (8) : 26-32.
- [4] 白刚.煤矿井下定向钻孔超长套管下放技术[J].钻探工程,2021,48(6):57-62.
BAI Gang. RIH of over-long casing in underground directional boreholes in coal mines[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):57-62.
- [5] 李奎.泸州深层页岩气水平段钻井提速关键技术[J].钻探工程,2022,49(5):100-105.
LI Kui. Key technologies for improving deep shale gas horizontal

drilling ROP in Luzhou[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):100-105.

- [6] 熊亮,谢文卫,张伟,等.跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):16-22,35.
XIONG Liang, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Application of casing-while-drilling technology in ocean drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):16-22,35.
- [7] Johancsik C A, Friesen D B, Dawson R. Torque and drag in directional wells-prediction and measurement[J]. SPE Journal of Petroleum Technology, 1984,36(6):987-992 (SPE 11380).
- [8] Sheppard M C, Wick C, Burgess T. Designing well paths to reduce drag and torque[J]. SPE Drilling Engineering, 1987,2(4):344-350.
- [9] Sheppard M C, Wick C. Method and apparatus for investigating drag and torque loss in the drilling process:4760735[P].1988-08-02.
- [10] Maidla E E, Wojtanowicz A K. Field comparison of 2-D and 3-D methods for the borehole friction evaluation in directional wells[J]. SPE, 1987,16663:27-30.
- [11] Maidla E E, Wojtanowicz A K. A field method for assessing borehole friction for directional well casing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1988,1(4):323-333.
- [12] Maidla E E, Wojtanowicz A K. Laboratory study of borehole friction factor with a dynamic-filtration apparatus[J]. SPE Drilling Engineering, 1990,5(3):247-255.
- [13] He X, Kyllingstad A. Helical buckling and lock up conditions for coiled tubing in Curved Wells[J]. SPE 25370,1993.
- [14] Wu J, Jukamwold H C. Helical buckling of pipe in extend reach and horizontal wells-Part 1: Preventing helical buckling [J]. Jour. of Energy Resources Tech., 1993,115(3):190-195.
- [15] Wu J. Slack-off load transmission in horizontal and inclined wells[J]. SPE 2496,1995:489-494.
- [16] Wu J. The Effect of wellbore curvature on tubular buckling and lockup [C]//Proc. ETCE Drilling Technology Symposium, New Orleans, LA, 2004:23-26.
- [17] Wu J, 孙志刚.用于现场简化的水平井摩阻和扭矩计算[J].钻井工艺情报,1992,2(4):1-12.
Wu J, SUN Zhigang. Horizontal well friction and torque calculation for on-site simplification [J]. Drilling Process Information, 1992,2(4):1-12.
- [18] 张建群,孙学增,赵俊平.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 Xuezheng, ZHAO Junping. Preliminary study on friction resistance mode and its application in directional wells [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1989,13(4):23-28.
- [19] 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(5):52-54,7.
HE Zhigang, FU Jianhong, SHI Taihe, et al. Mechanical model of friction and torque in large displacement wells[J]. Natural Gas Industry, 2001(5):52-54,7.
- [20] 李庆明.水平井套管下入摩阻力学分析[J].石油工业技术监督,2018,34(6):27-29.
LI Qingming. Mechanical analysis of frictional resistance during

- casing insertion in horizontal wells[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2018, 34(6):27-29.
- [21] 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(A00):44-49.
HAN Zhiyong. Research on three-dimensional and two-dimensional models of drill string friction in wellbore[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 1993, 17(A00):44-49.
- [22] 韩志勇. 循环条件下钻柱轴向力计算及强度校核[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1997, 21(2):27-32.
HAN Zhiyong. Calculation and strength verification of axial force of drill string under cyclic conditions[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 1997, 21(2):27-32.
- [23] 韩志勇. 倾斜钻柱轴向力计算及强度校核[J]. *石油钻探技术*, 1995, 23(S1):14-18.
HAN Zhiyong. Calculation and strength verification of axial force on inclined drill string [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1995, 23(S1):14-18.
- [24] 睦满仓, 孟坤六. 水平井管柱下入摩阻分析及应用[J]. *石油机械*, 1999, 27(2):5-8.
SUI Mancang, MENG Kunliu. Analysis and application of frictional resistance during horizontal well string insertion[J]. *China Petroleum Machinery*, 1999, 27(2):5-8.
- [25] 沈献良, 曹庆和, 王爱宽, 等. 定向井套管入井摩阻分析[J]. *断块油气田*, 2003(2):73-76, 94.
SHEN Xianliang, CAO Qinghe, WANG Aikuan, et al. Analysis of frictional resistance of casing in directional wells [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2003(2):73-76, 94.
- [26] 唐佩瑜, 孙洪训. 水平井套管柱可下入性摩阻计算三维力学模型[J]. *油气田地工程*, 2010, 29(12):25-27.
TANG Peiyu, SUN Hongxun. A three-dimensional mechanical model for calculating the frictional resistance of the casing string in a horizontal well[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2010, 29(12):25-27.
- [27] Ho H S. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells[J]. *SPE18047*, 1988.
- [28] Ho H S. General formulation of drill string under large deformation and its use in BHA analysis[J]. *SPE15562*, 1986.
- [29] 李黔, 陈忠实. 大斜度井下套管摩阻计算[J]. *天然气工业*, 1993, 13(5):50-54.
LI Qian, CHEN Zhongshi. Frictional resistance computation of setting casing in highly deviated well[J]. *Natural Gas Industry*, 1993, 13(5):50-54.
- [30] 黄志强. 定向井下套管摩阻数值计算及其应用[J]. *石油地质与工程*, 2009, 23(4):79-81.
HUANG Zhiqiang. Numerical calculation and application of directional downhole casing friction [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2009, 23(4):79-81.
- [31] 李子丰, 李敬元, 孔凡君. 钻柱拉力-扭矩模型述评[J]. *石油机械*, 1993, 21(8):43-46.
LI Zifeng, LI Jingyuan, KONG Fanjun. Review of drill string tension torque model[J]. *China Petroleum Machinery*, 1993, 21(8):43-46.
- [32] Li Z F, Liu X S, Zhuo D Q, et al. A steady tension-torque model for drillstring in horizontal wells[J]. *SPE26295*, 1993.
- [33] 李子丰, 赵新润, 赵德云. 通用下部钻具三维小挠度静力分析的数学模型及应用[J]. *工程力学*, 2000, 17(6):121-129.
LI Zifeng, ZHAO Xinrun, ZHAO Deyun. A mathematical model for 3D analysis of general buttonhole assembly under small deflection and its application[J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(6):121-129.
- [34] 李子丰, 李敬元, 马兴瑞, 等. 油气井杆管柱力学基本方程及应用[J]. *石油学报*, 1999, 20(3):87-90.
LI Zifeng, LI Jingyuan, MA Xingrui, et al. Basic mechanics equations and applications of rod and pipe string in oil and gas wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(3):87-90.
- [35] 祖峰. 定向井钻柱摩阻预测与应用[J]. *石油钻采工艺*, 2001(6):9-11, 81.
ZU Feng. Prediction and application of directional drilling string friction in directional wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2001(6):9-11, 81.
- [36] 隋顾磊, 荣继光, 岳庆友, 等. 大位移井斜井段下套管摩阻影响规律研究[J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(10):75-78.
SUI Gulei, RONG Jiguang, YUE Qingyou, et al. Research on the influence of casing friction in the deviated section of extended reach wells [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(10):75-78.
- [37] Millheim K, Jordan S, Ritter C J. Bottom-hole assembly analysis using the finite-element method [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1978, 30(2):265-274.
- [38] 付建红, 龚龙祥, 胡顺渠, 等. 基于ANSYS的水平井下套管摩阻分析计算[J]. *石油钻采工艺*, 2007(4):32-35, 121.
FU Jianhong, GONG Longxiang, GU Shunqu, et al. Analysis and calculation of horizontal downhole casing friction based on ANSYS[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007(4):32-35, 121.
- [39] 申昭熙, 张超, 纪海涛, 等. 水平井下套管过程中套管与井壁接触状态有限元分析[J]. *石油管材与仪器*, 2022, 8(6):50-53. DOI:10.19459/j.cnki.61-1500/te.2022.06.008.
SHEN Zhaoxi, ZHANG Chao, JI Haitao, et al. Finite element analysis of the contact state between casing and wellbore during the process of horizontal downhole casing[J]. *Petroleum Pipes and Instruments*, 2022, 8(6):50-53. DOI:10.19459/j.cnki.61-1500/te.2022.06.008.
- [40] 王建军, 张绍槐, 狄勤丰, 等. 水平井套管摩阻解析分析[J]. *西安石油学院学报*, 1996, 11(6):17-19.
WANG Jianjun, ZHANG Shaohuai, DI Qinfeng, et al. Analysis of frictional resistance of horizontal well casing [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute*, 1996, 11(6):17-19.
- [41] 王建军, 张绍槐, 狄勤丰, 等. 多扶正器套管串在弯曲井段下套中的摩阻分析[J]. *西安石油学院学报*, 1995(1):29-32.
WANG Jianjun, ZHANG Shaohuai, DI Qinfeng, et al. Friction analysis of multiple centralizer casing strings in curved wellbore sections [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute*, 1995(1):29-32.
- [42] 马善洲, 韩志勇. 水平井钻柱摩阻力和摩阻力矩的计算[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1996, 20(6):24-28.
MA Shanzhou, HAN Zhiyong. Calculation of frictional resis-

- tance and frictional torque of horizontal well drill string [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 1996, 20(6):24-28.
- [43] 闫铁,李庆明,王岩,等.水平井钻柱摩阻扭矩分段计算模型[J].大庆石油学院学报,2011,35(5):69-72.
YAN Tie, LI Qingming, WANG Yan, et al. Segmented calculation model for frictional torque of horizontal well drill string [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(5): 69-72.
- [44] 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 for frictional torque of horizontal well string [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(5):22-25.
- [45] 杜现飞,王海文,王帅.深井作业管柱摩阻计算分析[J].中国海洋平台,2008(4):41-45.
DU Xianfei, WANG Haiwen, WANG Shuai. Calculation and analysis of frictional resistance of deep well operation string [J]. China Offshore Platform, 2008(4):41-45.
- [46] 翟鹏.复杂结构井套管摩阻分析理论与应用研究[D].西安:西安石油大学,2013.
ZHAI Peng. Theoretical and applied research on frictional analysis of casing in complex structured wells [J]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [47] 廖华林,丁岗.大位移井套管柱摩阻模型的建立及其应用[J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(1):29-31.
LIAO Hualin, DING Gang. Establishment and application of a friction model for casing strings in extended reach wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2002, 26(1):29-31.
- [48] 何世明,郭小阳,徐壁华,等.水平井下套管摩阻分析计算[J].西南石油学院学报,1997,19(2):21-26.
HE Shiming, GUO Xiaoyang, XU Bihua, et al. Calculation of frictional drag of casing running in horizontal wells [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1997, 19(2):21-26.
- [49] 牛成成,郑德帅,杨顺辉,等.大位移井套管下入摩阻预测新方法[J].科学技术与工程,2014,14(6):130-134.
NIU Chengcheng, ZHENG Deshuai, YANG Shunhui, et al. The new drag prediction method of casing string in extended reach wells [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6):130-134.

(编辑 荐华)