

提拉-释放法套管下入机理

黄根炉¹, 李 伟¹, 倪红坚², 孟祥伟¹, 于 凡¹, 王书超¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580)

摘要: 提拉-释放法是钻井现场下套管遇阻时最常用且易用的增加套管下入能力的方法, 但其应用主要是凭经验操作, 缺乏机理分析和必要的理论指导。根据提拉-释放后一段水平井眼中套管柱的运动机理和实际井眼中套管柱的运动机理本质上相同这一认识, 建立提拉-释放法套管下入机理分析模型, 阐明该方法的套管下入机理, 以此为基础研究套管长度、摩阻系数、轴向压力、无因次提拉力和管柱释放方式等因素对套管下入能力的影响。结果表明: 提拉-释放法进行套管下入是利用提拉-释放过程产生的应力波减小摩阻, 即使在原始轴向压力小于总摩阻的情况下仍然可以推动套管柱前进; 套管长度、摩阻系数与提拉-释放法套管下入的单次轴向位移呈负相关, 轴向压力、无因次提拉力与提拉-释放法套管下入的单次轴向位移呈正相关, 快速释放管柱时的单次轴向位移明显更大。

关键词: 套管下入; 提拉-释放法; 摩阻; 应力波; 影响因素

中图分类号: TE 21 **文献标志码:** A

引用格式: 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.

Mechanism analysis of pull-up and quick release technique during casing running process

HUANG Genlu¹, LI Wei¹, NI Hongjian², MENG Xiangwei¹, YU Fan¹, WANG Shuchao¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Institute of Unconventional Hydrocarbon and New Energy Sources in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to solve a suck-up problem during casing running process in well completion, the most frequently used and accessible method is the pull-up and then quick release technique. However, its application is mainly based on experience, and lack of mechanism analysis and theoretical guidance. In essence, the motion of the casing string in a section of horizontal well after a pull-up and then quick release is similar to that in an actual wellbore, and thus an analysis model for the mechanism of casing running during the pull-up then release process was established, and corresponding programs were coded. The influences of many factors on the trip-in ability of the casing have been analyzed, including the casing length, friction coefficient, axial pressure, dimensionless tensile force and different release ways. The results indicate that casing running during the pull-up and then release can make use of the stress wave produced in the process to reduce friction, which can push the casing to move forward even though the original axial compression force is less than the total friction. The length of the casing and the friction coefficient are negatively correlated to the axial movement of the casing, while the axial pressure and dimensionless tensile force are positively correlated to the axial displacement during the pull-up and then release process. Meanwhile, the axial movement of the casing in a rapid release process is much larger than that in a slow release process.

Keywords: casing running; pull-up and then release method; friction; stress wave; influence factors

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274234)

作者简介: 黄根炉(1971-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为油气井管柱力学、定向井优化设计及井眼轨迹控制。E-mail: hgenlu@upc.edu.cn。

下套管作业是固井过程中的关键环节,也是整个钻井过程中最容易出现问题的一环之一,其问题突出表现为井眼质量不高或在位垂比较大的井中套管下不到井底。针对不同的原因,可以采取反复通井修整井眼^[1]、漂浮下套管^[2-3]、套管钻井井口加压^[4]、套管钻井^[5]或提高钻井液润滑性^[6]等措施进行解决。然而,这些措施的实施大都须使用新的装置或显著增加作业时间,造成钻井成本上升,有些措施由于装置的可靠性不高还会带来作业风险,因此在可能的情况下,会少采用或不采用这些措施。套管在少数井段遇阻或难以完全下到井底时,可以利用在井口提拉-释放套管柱产生的冲击作用使其通过遇阻井段或下至井底。此外,在下套管特别困难的井中,即使采取了各种措施也不能使套管下至井底时,可以配合使用提拉-释放法增加套管成功下入的可能性。尽管提拉-释放法在钻井现场套管下入遇阻时会被普遍采用,但现场应用基本都是凭经验操作,缺乏机理分析和必要的理论指导。针对这种情况,笔者对提拉-释放法的套管下入机理进行研究,分析摩阻系数、轴向压力等因素对套管下入能力的影响,为现场更好地应用提供指导。

1 提拉-释放法套管下入机理分析模型的建立

要阐明提拉-释放法套管下入的机理,须建立

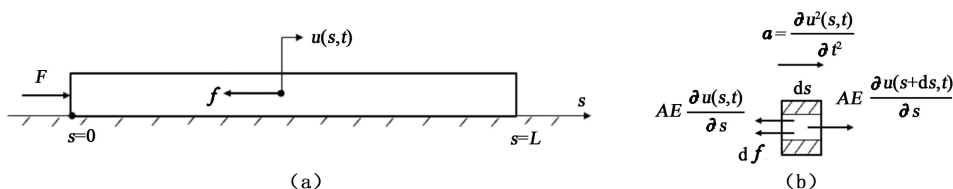


图1 套管柱及其微元的轴向受力

Fig. 1 Axial load of casing string and casing infinitesimal

图1中, F 为轴向压力,N; f 为沿程摩阻力和钻井液阻尼的合力,N; $u(s,t)$ 为轴向位移,m; s 为距套管柱跟部端的距离,m; t 为时间,s; a 为加速度, m/s^2 ; A 为管柱横截面积, m^2 ; E 为管柱钢材弹性模量,Pa; ds 为微元管柱长度,m; df 为微元管柱摩阻力和钻井液阻尼的合力,N。

在图1(b)中,根据水平方向上微元受力的平衡条件可以得到套管柱的控制微分方程^[11-13]为

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} ds = AE \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} ds - g \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) ds - C \frac{\partial u}{\partial t} ds, \quad (1)$$

必要的理论模型。套管所在的实际井眼理论上是一条三维圆柱形井筒^[7-8],管柱在井眼中的受力和变形较为复杂,导致套管下不到井底的根本原因是套管与井壁之间的正压力和摩阻力过大而推动管柱前进的轴向力偏小^[9-10]。提拉-释放法产生的冲击波在套管中的传播打破了轴向上摩阻力和向前推动力的平衡,使其向前移动。显然,轴向摩阻力、向前推动力和冲击力是机理分析的关键,研究提拉-释放后一段水平井眼中套管柱的运动机理和实际井眼中套管柱的运动机理在本质上相同。为了聚焦所研究问题的本质,对提拉-释放后水平段单一套管柱进行动力学分析。

1.1 控制微分方程

如图1(a)所示,假设有一段很长的套管柱横躺在水平段,忽略套管接头的影响,且套管为单一尺寸,用参数 s 表示套管中不同位置, $s=0$ 表示水平段的跟部, $s=L$ 表示水平段的趾部。在水平方向上,套管柱跟部端受到轴向压力 F 的作用,同时受到与其运动方向相反的沿程摩阻力和钻井液阻尼的作用,套管柱上各微元在不同时刻偏离原始平衡位置(原始平衡位置是指套管柱所有轴向力均为0时的微元位置)的轴向位移可以用函数 $u(s,t)$ 表示。由于该模型主要研究处于静止状态的套管柱经过提拉-释放后的轴向运动情况,认为套管柱在与轴向垂直的平面内始终平衡,无任何运动。套管柱中任一微元在轴向的受力如图1(b)所示。

$$g \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = \begin{cases} \mu q_m, & \frac{\partial u}{\partial t} > 0; \\ -\mu q_m, & \frac{\partial u}{\partial t} < 0; \\ \mu q_m, & \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \text{ 且 } AE \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} > \mu q_m; \\ -\mu q_m, & \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \text{ 且 } AE \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} < -\mu q_m; \\ AE \frac{\partial^2 u}{\partial s^2}, & \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \text{ 且 } -\mu q_m < AE \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} < \mu q_m. \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ 为管柱钢材密度, kg/m^3 ; μ 为摩阻系数; q_m 为管柱线浮重,N/m; C 为钻井液作用在管柱上的阻

尼系数, $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}$ 。

1.2 初始条件

提拉-释放法下入套管时,初始状态为跟部端受到一个提拉力 T ,在提拉力影响范围内(提拉力应不大于套管段的起钻摩阻力,否则会起出套管,所以其影响范围应小于或等于套管段长度),套管因拉伸而产生变形,其初始位移为

$$u(s,0)=\begin{cases} 0, & s>\frac{T}{\mu q_m}; \\ \frac{T}{2AE}\left(\frac{T}{\mu q_m}-s\right), & s\leq\frac{T}{\mu q_m}. \end{cases} \quad (3)$$

1.3 边界条件

在套管柱下入过程中,套管柱跟部端受到轴向压力 F 的作用,趾部端是自由端,跟部端和趾部端的边界条件为

$$\begin{cases} \left.\frac{\partial u}{\partial s}\right|_{s=0}=-\frac{F}{AE}, \\ \left.\frac{\partial u}{\partial s}\right|_{s=L}=0. \end{cases} \quad (4)$$

2 提拉-释放法套管下入过程及机理分析

针对建立的提拉-释放法套管下入机理分析模型,利用有限差分法^[14-15]进行求解并且编写相应计算程序,可以通过计算得到套管柱在提拉-释放后的实际运动过程,由此可以进一步分析提拉-释放法套管下入机理。

以算例具体说明其下入过程。算例的基本计算条件为:水平段套管长 4 000 m,单根套管长度 9 m,套管外径 139.7 mm,套管内径 124.26 mm,套管线重 248 N/m,钻井液密度 1 630 kg/m³,钻井液阻尼系数 0.01 (N·s)/m,摩阻系数 0.30,套管材料的弹性模量 201 GPa,轴向压力 230 kN。水平井眼长度大于套管柱的长度,可以满足套管柱的轴向移动而不被井底阻挡。显然,轴向压力小于套管柱总摩阻,套管柱不会移动。在用 220 kN 的提拉力进行提拉-释放后,该套管柱的实际运动过程如图 2 所示。

由图 2(a)可知,在释放提拉力瞬间($t=0$ s),套管柱此前由于受到提拉力的作用,其作用范围内的套管柱轴向位移为负值并呈线性变化;超过其作用范围,套管柱的轴向位移为零。在释放后,套管柱产生的应力行波从跟部端向趾部端传播($t=0.4, 0.7$ s)。应力行波未到达部分的套管柱轴向位移与释放前相同;应力行波经过后,其获得一个正向速度,并且位移不断增大;当应力行波到达套管柱趾部端时会返回,

从趾部端向跟部端继续传播($t=1$ s)。应力行波不断地在两端部之间来回传播,并不断衰减,直至行波消失、套管柱停止向前移动,如图 2(b)所示。

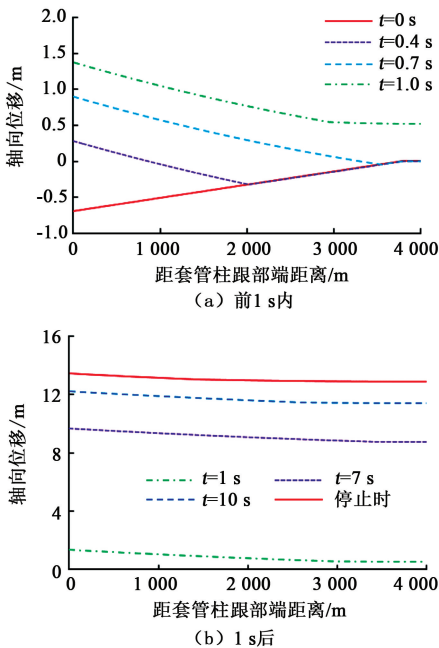


图 2 套管下入过程中不同时刻、不同位置处的轴向位移

Fig. 2 Axial displacement of casing running process at different time and locations

图 3 为套管柱跟部端、趾部端轴向位移随时间的变化曲线。

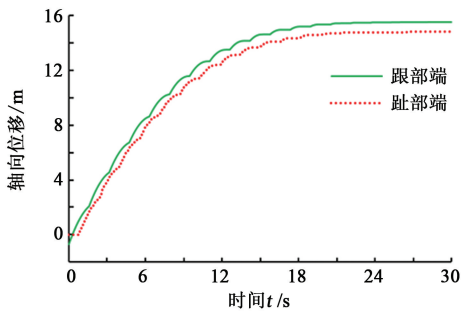


图 3 套管柱跟部端、趾部端轴向位移随时间变化曲线

Fig. 3 Axial displacement of toe and heel of casing string changed with time

由图 3 可知,套管柱跟部端最先开始运动,获得一个初始速度,位移逐渐增大,但随着时间的推移,增大的速度逐渐减小;当应力行波从套管柱跟部端传播到趾部端时($t\approx 0.8$ s),趾部端套管开始运动,随着时间的推移,其位移逐渐增大,但增大的速度逐渐减小;当应力行波从套管柱趾部端再次传播到跟部端并被反射回来后($t\approx 1.6$ s),趾部端的速度再次增大,但增大后的总速度小于初始速度。应力行

波就是这样沿着套管柱在跟部端和趾部端来回反射,表现为明显的周期性,其周期即为应力波从一端传至另一端并从另一端返回所用的时间,两端的相位正好相差半个周期。在一个周期内,尽管两端的位移一直都在增大,但增大的速度逐渐减小,直至新的周期开始获得一个速度增量,然后再次逐渐衰减。每个新的周期相对前一个周期,其速度都在减小,如此循环,随着时间的延长,正向速度越来越小,但轴向位移仍在增大,直至正向速度衰减为0,套管柱停止向前移动。

通过具体算例对套管下入过程的描述可以得出提拉-释放法套管下入机理:提拉-释放法套管下入是利用套管本身的弹性,在提拉过程中积聚弹性能,利用释放过程将所积聚的弹性能转换为应力波,通过应力波在套管中的传播减小摩阻^[16],即使原始轴向压力小于总摩阻但仍然可以推动套管柱前进。由于应力波的衰减受净摩阻力(指套管柱总的摩阻力与跟部端轴向压力的差值)影响较大,所以当净摩阻力较大时应力波的能量衰减得越快,允许套管向前运动的时间越短,单次提拉-释放后下入的深度越小。

3 提拉-释放法套管下入影响因素

影响提拉-释放法套管下入能力的因素^[17-20]很多,主要有摩阻系数、水平段管柱长度、跟部端轴向压力、无因次提拉力、管柱释放方式等。以算例井的计算条件为基础,研究上述参数的变化对套管下入能力的影响。由于进行下套管作业时须接单根,因此进行一次提拉-释放法套管下入的轴向位移不能超过单根套管长度,对于单次下入轴向位移超过套管长度的情况,为绘图考虑均按单根长度9 m计算。同时,考虑到套管不同位置处的轴向位移不同,文中的轴向位移指套管跟部端的轴向位移。

3.1 摩阻系数

图4为3种不同长度套管在轴向压力为180 kN时不同提拉力条件下套管轴向位移随摩阻系数的变化曲线,其中提拉力为无因次量(T_D),为套管总摩阻的倍数。由图4可知,在相同轴向压力下,3种不同长度套管在不同提拉力条件下都表现为套管在井眼中的轴向位移随摩阻系数增加而减小。对于长度为7000 m的套管,无因次提拉力较小且摩阻系数较大时出现了轴向位移为负值的情况。这是由于初始的提拉导致套管产生负位移,但由于提拉力较小,

释放产生的应力波不足以克服摩阻,应力波无法在套管内传播,使套管内的负向位移被保存下来。

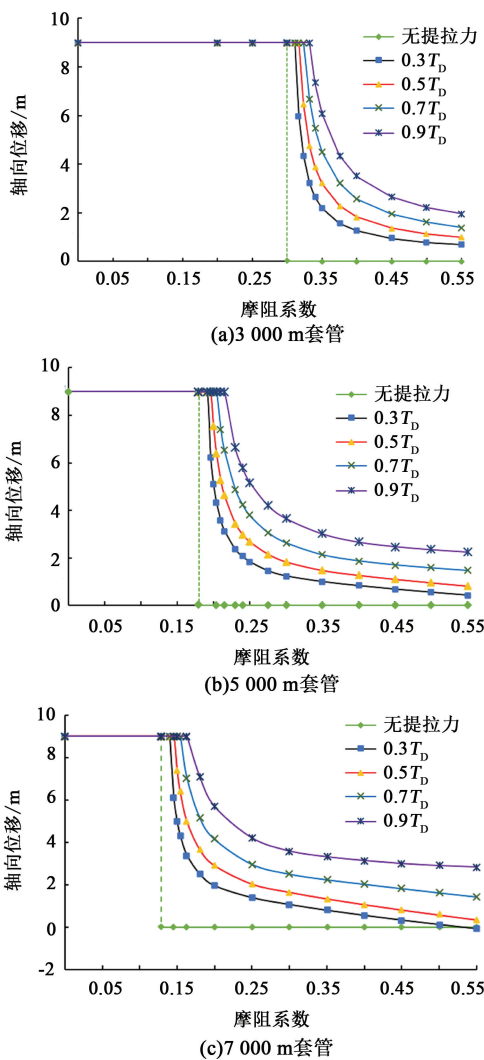


图4 摩阻系数对不同长度套管轴向位移的影响

Fig.4 Effect of friction coefficients on axial displacement of casing with different length

3.2 轴向压力

图5为3种不同长度套管在摩阻系数为0.30时不同提拉力条件下套管轴向位移随轴向压力的变化曲线,其中提拉力为无因次量,为套管总摩阻的倍数。由图5可知,在相同摩阻系数下,3种不同长度套管在不同提拉力条件下均表现为套管在井眼中的轴向位移随轴向压力的增加而增大。但当套管跟部端轴向压力较小时套管中出现了负向位移,且管柱长度越长,相同轴向压力下的负向位移越大。现场操作中在不造成管柱屈曲的情况下增大管柱轴向压力可以增大提拉-释放法套管下入的能力。

3.3 套管长度与无因次提拉力

由图4可知,在摩阻系数和无因次提拉力取不

同值时,套管在井眼中的轴向位移均随套管长度的增大而减小。由图 5 可知,在一定情况下,摩阻系数和套管长度取不同值时,套管在井眼中的轴向位移均随无因次提拉力的增大而增大。摩阻过大或轴向压力过小时,提拉并释放套管柱产生的应力波可能不足以克服摩阻,用较小提拉力对套管柱进行提拉-释放并没有显著效果,相反还可能会产生负向位移。现场操作中在不起出套管的前提下增大提拉力可增大提拉-释放法套管下入的能力;但如果摩阻极大或套管允许的轴向压力过小时对套管进行提拉-释放并没有显著效果,此时不建议现场施工采取此方法。

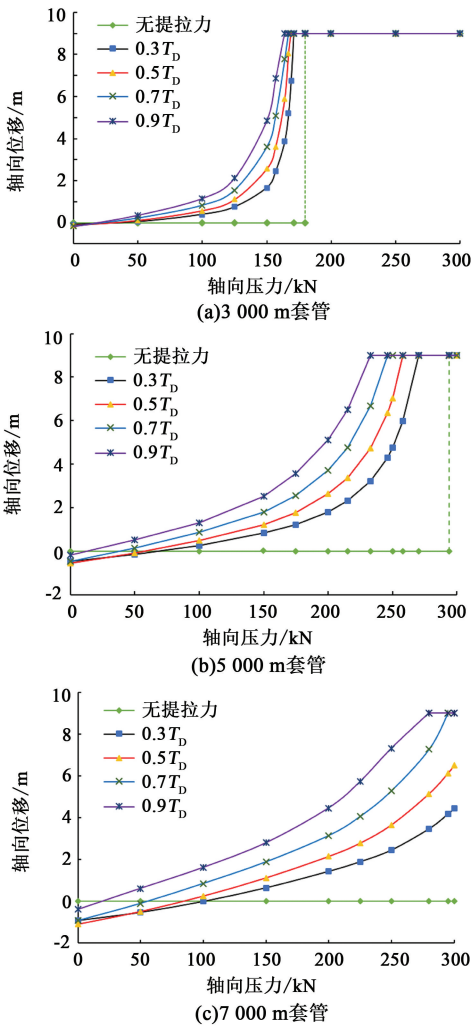


图 5 轴向压力对不同长度套管轴向位移的影响
Fig. 5 Effect of axial pressure on axial displacement of casing with different length

3.4 管柱释放方式

现场操作中,在释放套管时可以直接快速释放,也可以使用绞车刹车慢放,两种释放方式下使用提拉-释放法进行套管下入的轴向位移如图 6 所

示,其中管柱长度为 5 000 m,提拉为管柱总摩阻的 9/10。相同条件下,快速释放管柱时的轴向位移明显高于刹车慢放,所以现场操作中在进行提拉-释放法套管下入时为了获得更好的套管下入能力应该尽量快速释放套管。

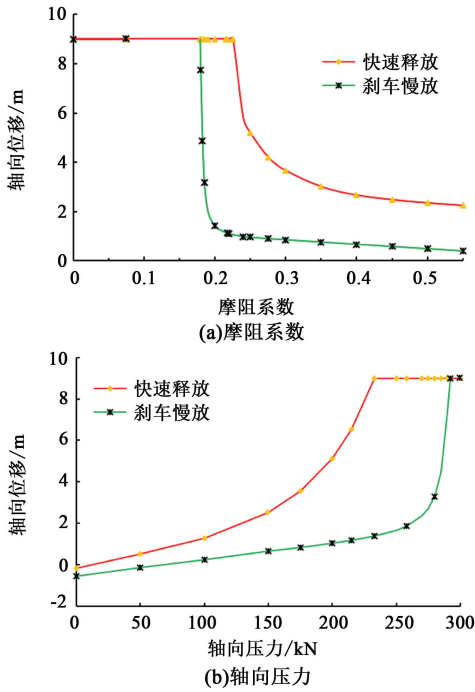


图 6 不同管柱释放方式对套管轴向位移的影响
Fig. 6 Effect of different release ways on axial displacement

4 结 论

(1) 提拉-释放后一段水平井眼中套管柱的运动机理和实际井眼中套管柱的运动机理在本质上相同,基于这一认识,建立了提拉-释放法套管下入机理分析模型。

(2) 利用提拉过程中套管柱内积聚的弹性能,通过释放将其转换为应力波,并通过应力波在套管中的传播减小摩阻,即使原始轴向压力小于总摩阻仍然可以推动套管柱前进。

(3) 套管长度、摩阻系数与提拉-释放法套管下入的单次轴向位移呈负相关,在一定情况下,轴向压力、无因次提拉力与轴向位移呈正相关,快速释放套管时轴向位移明显更大。现场操作中,在不造成管柱屈曲的情况下增大管柱轴向压力、在不起出套管的前提下增大提拉力和尽量快速释放套管,均可增大提拉-释放法套管下入的能力;但如果摩阻极大或套管允许的轴向压力过小时对套管进行提拉-释放并没有显著效果,此时不建议现场施工采取此方

法。

(4)建立的提拉-释放法套管下入机理分析模型主要是用以进行理论研究,并未考虑实际井眼中井眼轨迹、钻具组合、管柱屈曲、井身质量等因素的影响,实际井眼中提拉-释放法套管下入预测模型的建立有待进一步研究。

参考文献:

- [1] OZHAYOGLU E M, SORGUN M, SAASEN A. Hole cleaning performance of light-weight drilling fluids during horizontal underbalanced drilling[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010,49(4):21-26.
- [2] 陈述,张文华,王雷,等.委内瑞拉浅层高水垂比三维水平井下套管工艺[J].石油钻探技术,2013,41(1):56-60.
CHEN Shu, ZHANG Wenhua, WANG Lei, et al. Casing running technology for high horizontal-displacement to vertical-depth ratio 3D shallow layer horizontal well in venezuela[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(1):56-60.
- [3] 陈彬.大位移井套管柱设计及下套管技术研究[D].武汉:长江大学,2013.
CHEN Bin. The research on casing designing and casing running for extended reach well[D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.
- [4] 梁政,张力文,蒋发光,等.顶驱下套管驱动工具现状与发展建议[J].石油矿场机械,2013,42(1):1-5.
LIANG Zheng, ZHANG Liwen, JIANG Faguang, et al. Present state and proposal of casing drive tool[J]. Oil Field Equipment, 2013,42(1):1-5.
- [5] 刘玉民,金志富,张洪君,等.大庆油田油层套管钻井技术研究[J].石油钻探技术,2007,35(5):22-24.
LIU Yumin, JIN Zhifu, ZHANG Hongjun, et al. Production-casing drilling technology in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(5):22-24.
- [6] 吴爽,李骥,张焱.大位移井技术研究的现状分析[J].石油钻探技术,2002,10(5):17-19.
WU Shuang, LI Ji, ZHANG Yan. Current situation of extended-reach drilling techniques[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002,10(5):17-19.
- [7] 唐雪平,苏义脑,陈祖锡.三维井眼轨道设计模型及其精确解[J].石油学报,2003,24(4):90-93,98.
TANG Xueping, SU Yinao, CHEN Zuxi. Three-dimensional well path planning model and its exact solution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4):90-93, 98.
- [8] 刘修善.井眼轨迹的平均井眼曲率计算[J].石油钻采工艺,2005,27(5):11-15.
- LIU Xiushan. Average borehole curvature calculation of hole trajectory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(5):11-15.
- [9] 王德新,于润桥.套管柱在水平井弯曲段的可下入性[J].石油钻探技术,1997,25(3):12-13.
WANG Dexin, YU Runqiao. Tripability of casing string in the curved interval of horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997,25(3):12-13.
- [10] 高德利,覃成锦,李文勇.南海西江大位移井摩阻和扭矩数值分析研究[J].石油钻探技术,2003,25(5):7-12.
GAO Deli, QIN Chengjin, LI Wenyong. Research on numerical analysis of drag and torque for Xijiang extended reach wells in South-China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003,25(5):7-12.
- [11] 黄根炉.大位移井钻柱扭转振动研究[D].东营:石油大学,2002.
HUANG Genlu. Study on drillstring torsional vibration in extended reached well [D]. Dongying: University of Petroleum, China, 2002.
- [12] 张恒.小井眼管柱动力学研究[D].成都:西南石油学院,2005.
ZHANG Heng. The research on slim hole casing kinetics [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [13] 祝效华,刘清友,童华.三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J].石油学报,2008,29(2):288-295.
ZHU Xiaohua, LIU Qingyou, TONG Hua. Research on dynamics model of full hole drilling-string system with three-dimensional trajectory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(2):288-295.
- [14] 郇中丹,黄海洋.偏微分方程[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [15] 董渊,杨慧珠,杜启振.有限元有限差分法二维波动逆时偏移初探[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):25-29.
DONG Yuan, YANG Huizhu, DU Qizhen. Study on reverse-time migration of two-dimensional wave equation with finite element-finite difference method[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(6):25-29.
- [16] 付加胜,李根生,史怀忠,等.井下振动减摩技术研究进展[J].石油机械,2012,40(10):6-10.
FU Jiasheng, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Research progress of the downhole vibration antifriction technology[J]. China Petroleum Machinery, 2012,40(10):6-10.

(编辑 李志芬)