

基于哈根-泊肃叶流的 TCP 管柱下放压力场分析

于秋来

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:yuqiulai@petrochina.com.cn

项目支持:大庆油田重大科技专项“深井、超深井管输射孔管柱优化设计及配套技术研究”(DQP-2013-CS-KY-001)

引用:于秋来. 基于哈根-泊肃叶流的 TCP 管柱下放压力场分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(5):7-12.

Cite: YU Qiulai. Pressure field analysis of setting downing the TCP string based on Hagen- Poisenille flow [J]. Well Testing, 2018, 27(5):7-12.

摘要 油管传输式射孔管柱下放过程中会形成激动压力直接影响点火头的安全性,严重的可能导致点火头提前击发,发生误射孔事故。基于哈根-泊肃叶流理论,研究了油管传输射孔作业中管柱下放时的井筒内压力场,建立了数学模型。以特定结构的管柱为算例,分析了管柱下放时,点火头所受波动压力与管串各段器材直径及下放速度之间的关系。研究结果表明,管柱下放速度越大,管柱外径越大,封隔器以下的“憋压”效应越大;在未出现明显“憋压”效应时,点火头压主要取决于井液的静水压力。此方法可预先计算油管传输式射孔管柱下放过程中的激动压力,为后续射孔施工方案编制安全压力值的设计和现场施工操作防范措施制定提供科学的依据。

关键词 油管传输射孔;哈根-泊肃叶流;点火头;激动压力;管柱;层流

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.05.002

Pressure field analysis of setting downing the TCP string based on Hagen-Poiseuille flow

YU Qiulai

Well Testing Company of PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: The surging pressure of the wellbore will be formed during the downing of the TCP string, which directly affects the safety of the ignition head. Seriously, the ignition head may be fired in advance, and a false perforation accident may occur. Based on the Hagen- Poisenille flow theory, a mathematical model of the pressure distribution along the wellbore is established, and the pressure field in the wellbore when downing the TCP pipe string is studied. In addition, taking the string of a specific structure as an example, this paper analyzes the relationship between the surging pressure of the ignition head and the diameter as well as the running speed of the various sections of the string. The results show that the greater the running speed and the outer diameter of the pipe string, the greater the “shutoff pressure” effect below the packer; and when there is no obvious “shutoff pressure” effect, the ignition head pressure mainly depends on the hydrostatic pressure of liquid in the wellbore. This method can pre-calculate the surging pressure during the process of setting down the TCP pipe string, provide a scientific basis for the design of the safety pressure value in the subsequent perforation construction plan and the precaution in the on-site construction operation.

Keywords: TCP; Hagen- Poisenille flow; ignition head; surging pressure; tube column optimization; laminar flow

油管传输射孔(TCP)工艺是利用油管(钻杆)连接射孔枪,送至油层部位射孔,以打开油气层的一种采油工艺。其最大优点是可在大负压条件下射孔,易于解除射孔对油层的伤害,且一次射孔层段的厚度较大^[1]。郭希明等^[2]针对大庆油田不同井况确定了油管输送式射孔起爆方式的优选方法,提高了油管输送式射孔的一次成功率。马英文等^[3]针对常规射孔聚能射孔弹射孔后形成射孔压实带严重影响油井产能的问题,将油管传输的外置式复合射孔技术应用于低渗透油田渤中34-2/4油

田。钟伟明等^[4]报道了采用钻杆输送的负压射孔技术在月东油田高黏度油藏中的应用。在以上报道的TCP工艺中,射孔弹的引爆方式包括井口管柱内投棒引爆、管柱加压引爆、环空加压引爆和压差式引爆^[5]等。由于大部分引爆方式均与井液作用于点火头上的压力相关,当管柱下过程中的激动压力过大时,存在误击发点火头的风险。朱建新等^[6]报道了胜利油田垦东斜411井在射孔测试联作施工中的异常起爆事故,经诊断分析发现在施工管柱下放过程中突然下放管柱,形成的溜钻、缴钻引

起波动压力,致使压力起爆器安全销钉提前剪断从而引起压力起爆器起爆是造成事故的主要原因。李贵吉等^[7]报道了南堡油田公司的 NP511 井在射孔施工过程中发生误射事故,分析认为在下管柱的过程中,起爆装置处受到静水压力和波动压力作用的总压力大于起爆装置的抗剪切压力,起爆装置提前发火,射孔枪发生起爆。从以上事故可以看出,了解管柱下放过程中点火头的压力尤为重要^[8-9]。

目前,针对射孔或者测试施工过程中井筒内压力场的研究主要集中在管柱受力分析基础上研究管柱强度的校核,例如窦益华等^[10]针对高温高压深井试油及其管柱进行管柱轴向屈曲分析,给出了井下管柱载荷、变形、应力计算方法与公式。刘延鑫等^[11]给出了试油井下管柱轴向受力、变形、应力计算方法,开发了深井试油井下管柱力学分析软件,在胜利油田和大港油田已实际运用多次。但是针对射孔管柱下放过程中引起的环空压力场分布研究较少。仅有蔡庆俊等^[12]分析了液压封隔器管柱的下井运动和发生中途坐封及密封失效的原因,推导出了有关计算公式,进行了实例计算分析。因此,本文应用哈根-泊肃叶流理论,以计算管柱下放过程中套管和管柱之间的环形空间的压力场,进而确定点火头处的综合压力,从而在方案编制和现场施工时提前做好预防措施,确保施工安全和质量。

1 圆管层流理论

牛顿流体在长直圆管中的层流流动,即为哈根-泊肃叶流^[13]。考虑如图 1 所示流体域空间被不可压缩的牛顿流充满,流动动力来自自由沿轴线方向的压强梯度。假设圆管内的流体质点都沿其轴线方向运动,即处于平行剪切流动状态。同时,假定圆管在其轴线方向上充分长,以保证流场有充分发展以获得稳定流态的空间。

选取流场已充分发展的流体域 Ω , 建立如下之柱坐标系 (x, r, φ) : x 轴与空间轴线重合, 正方向沿压力梯度反方向(图 1)。

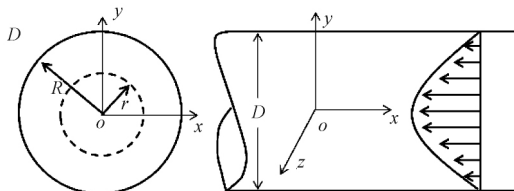


图 1 流体域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the fluid domain

在 Ω 上有控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) &= \frac{G}{\mu} \\ \frac{dp}{dx} &= G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: G 为压力梯度, 10^{-1} MPa/cm; p 为流体静压, 10^{-1} MPa; μ 为流体黏度, μm^2 ; v 为流体沿 x 方向的速度, cm/s; r 为流体域内某一半径为 r 的区域。

控制方程(1)有边界条件:

$$\text{当 } r = R \text{ 时, } v = 0 \quad (2)$$

式中: R 为管状流体域的半径, cm。

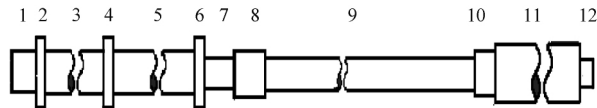
联立方程(1)与(2)的解即为哈根-泊肃叶解。

2 力学模型

对 TCP 管柱在套管中的流态进行了假设, 将哈根-泊肃叶解推广到环形流体域, 推导了解析解。

2.1 基本假设

TCP 管柱组合通常由钻杆、接箍、封隔器、油管、减震器、点火头、射孔枪等各级管柱组成, 如图 2 所示。各级管柱的共同特征是其外表面呈圆柱形, 而套管亦呈圆柱形, 这样套管内壁与管柱间便构成环形的流体域, 流体域被井液或空气所充满, 且二者之间始终有一明晰的界面, 即自由液面。



1, 3, 5-钻杆; 2, 4-接箍; 6-封隔器; 7, 9-油管;
8-减震器; 10, 12-点火头; 11-射孔枪

图 2 TCP 管柱示意图

Fig.2 Schematic diagram of TCP string

为了应用哈根-泊肃叶流理论, 需要对流态引入如下假设:

(1) 环形空间内的流动为沿轴向的层流流动。

(2) 环形空间内, 不能满足(1)的流动区域, 流动是缓变流, 且水头损失可忽略不计^[14]。

(3) 套管内壁和管柱外表面近似光滑。

由于管柱变径影响区域与管柱长度相比小的多, 且正常工艺条件下, 套管内壁和管柱外表面近似光滑, 因此以上假设适合工程条件。

2.2 解析解推导

选取完全充满井液的一段流体域, 构建如图 3 所示柱坐标系。为了建立压井液的力学模型, 需将

哈根-泊肃叶解推广到环形流体域。对应的边界条件为:

$$\begin{aligned} \text{当 } r = a \text{ 时, } v &= 0 \\ \text{当 } r = a + b \text{ 时, } v &= \bar{v} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: a 为部件半径, cm; b 为套管内壁与管柱间的距离, cm; \bar{v} 为管柱下放速度, cm/s。

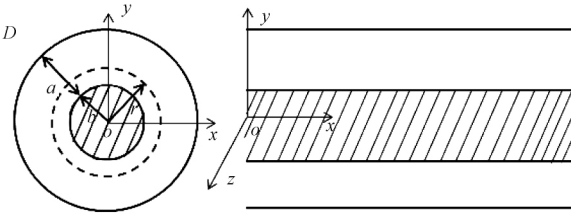


图3 环形流体域示意图

Fig.3 Schematic diagram of the annular fluid domain

$$\begin{aligned} M &= AG + B \\ A &= -\frac{r_2^4 - r_1^4}{16\mu} + \frac{c_2(r_2^2 - r_1^2)}{2} + \frac{c_0(r_2^2 \ln r_2 - r_1^2 \ln r_1)}{2} - \frac{c_0(r_2^2 - r_1^2)}{4} \\ B &= -\frac{c_3(r_2^2 - r_1^2)}{2} + \frac{c_1(r_2^2 \ln r_2 - r_1^2 \ln r_1)}{2} - \frac{c_1(r_2^2 - r_1^2)}{4} \\ c_0 &= \frac{r_1^2 - r_2^2}{4\mu \ln \frac{r_1}{r_2}}, c_1 = \frac{\bar{v}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \\ c_2 &= \frac{r_1^2}{4\mu} - \frac{\ln r (r_1^2 - r_2^2)}{4\mu \ln \frac{r_1}{r_2}}, c_3 = \frac{\ln r \cdot \bar{v}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \end{aligned} \quad (6a)$$

由(6a)式有:

$$G = A^{-1}(M - B) \quad (6b)$$

经过管柱上任意一点,作一垂直于管柱轴线的平面,将在环形空间内形成一环状过流截面,记为C。通过C的井液流量可由如下方法计算,即取C截面以下直到井底的流体域为控制体积。由流体的不可压缩性,单位时间内流出控制体的流体体积等于控制体体积的变化率,即

$$Q = \pi \bar{v} r_c^2 \quad (7)$$

式中: Q 为体积流量, cm^3/s ; r_c 为C截面所通过的管柱半径, cm。

而质量流量又有

$$M = \rho Q \quad (8)$$

联立方程(6b)与(8),可建立管柱任意截面的半径与同一平面井液压力梯度的关系。显然,在同一管柱的截面上,此压力梯度为一常量。

设自由液面与大气接触,设管柱上有距自由液

联立方程(1)与(3),可得

$$\left. \begin{aligned} v &= -\frac{Gr_1^2}{4\mu} + C_1 \ln r_1 + C_{II} \\ r_1 &= b, r_2 = a + b \\ \bar{v} + \frac{G(r_1^2 - r_2^2)}{4\mu} \\ C_1 &= \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \\ C_{II} &= \frac{Gr_1^2}{4\mu} - C_1 \ln r_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

考虑井液的不可压缩性,则通过流体域的质量流量可由下式得出

$$M = \rho \int_{r_1}^{r_2} v \times 2\pi r dr \quad (5)$$

式中: M 为质量流量, g/s ; ρ 为压井液密度, g/cm^3 。

将(4)代入(5),可得

面深度 D 的一测点,则有:

$$D = \sum_i L_i + \bar{D} \quad (9)$$

式中: L_i 为位于测点之下各级管柱的长度(除了测点所在的部件), cm; $\sum_i L_i$ 为测点以下完全浸入液面的各级管柱的总长, cm; \bar{D} 为当前浸入管柱的浸入液面深度, cm。

测点处的井液静压可由下式得出,即

$$p = \sum_i G_i L_i + G_d \bar{D} \quad (10)$$

式中: G_i 为完全浸入液面的各级管柱压力梯度(可由(6b)式计算), 10^{-1}MPa/cm ; G_d 为当前浸入管柱的沿程压力梯度, 10^{-1}MPa/cm 。

考虑重力加速度的作用,需对(10)式进行修正,即

$$p' = p + \rho g \bar{D} \quad (11)$$

式中: p' 为修正后的井液静压, 10^{-1}MPa ; g 为重力加速度, m/s^2 。

(10)与(11)式即为管柱任意高度测点的井液静压表达式。

2.3 自由液面的修正

随着管柱的下放,井筒中的自由液面将上升。约定管柱接触到井液液面的瞬间为零时刻,此时的自由液面位置为零位置。在零时刻之后 t 时刻,管柱底端距零位置的距离 X 称为下放深度。显然有

$$X = \bar{v}t$$

由于管柱的下放,将有部分井液溢出进入零位置以上的环形空间。设这部分井液的体积为 V ,有

$$V = \sum_l \pi r_l^2 L_l + \pi r_x^2 \bar{X} \quad (12)$$

式中: L_l 为 t 时刻完全浸入在液面以下各级管柱的长度,cm; r_l 为对应各级管柱的半径,cm; \bar{X} 为 t 时刻的当前浸入管柱位于零位置之下的长度,cm; r_x 为当前浸入管柱的半径,cm。

显然,下放深度有如下关系:

$$X = \sum_l L_l + \bar{X} \quad (13)$$

同时,溢出液体的体积有如下关系式:

$$V = \sum_j \pi (a + b)^2 L_j - \sum_j \pi r_j^2 L_j \quad (14)$$

式中: L_j 为 t 时刻处于零位置与自由液面之间各级管柱的长度,cm; r_j 为各级管柱对应的半径,cm。

由(12)式与(14)式可得出自由液面的修正位置。同时,由于自由液面不能高于井口,则有:

$$X' = \begin{cases} \sum_j L_j & (\sum_j L_j \leq X_m) \\ X_m & (\sum_j L_j > X_m) \end{cases} \quad (15)$$

式中: X' 为修正后的自由液面位于零位置之上的高度,cm; X_m 为零位置到井口的距离,cm。

在(8)~(11)式中,应使用修正之后的自由液面位置。

3 算例分析

分析一特定结构的管柱,各级管柱的编号如图2所示,相应几何尺寸见表1。

假设井筒内径157.3 mm,自由液面距井口的距离为104 m,井液的物理性质同于水。定义“测点高度”为管柱外表面上任意一点到管柱底端的距离。由于管柱下放过程中,井液的流动具有轴对称性,因此管柱上具有相同“测点高度”的点具有相同的压力和速度。分别取管柱下放速度 \bar{v} 为1.5 m/s与5.0 m/s,得出管柱下放深度为1 000 m时,管柱的沿

程压力与测点高度关系曲线,如图4所示。图中的“测点压力”指按(8)~(11)式计算得到的管柱外表面流体静压。由于射孔枪的长度较大,为了避免抹掉曲线整体的变化规律,故图4从测点高度为500.27 m的上点火头(部件10)的下端面开始绘制。

表1 各级管柱尺寸

Table 1 Column size of each level

部件编号	长度/m	直径/mm
1	9.00	89.00
2	0.20	127.00
3	9.00	89.00
4	0.20	127.00
5	9.00	89.00
6	1.24	154.40
7	18.00	73.00
8	1.20	127.00
9	18.00	73.00
10	0.27	43.00
11	500.00	114.00
12	0.27	43.00

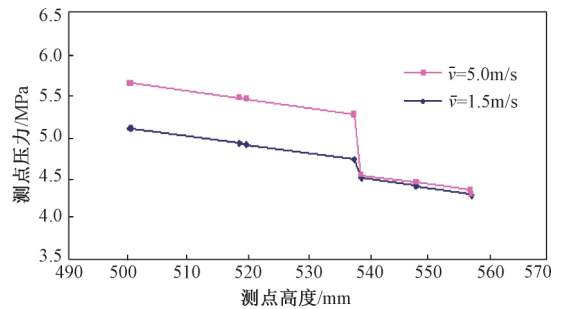


图4 压力—测点高度关系曲线

Fig.4 Pressure-measuring point height relation curve

由图4可见,在各级管柱沿程压力随测点高度线性下降,且其斜率相接近,这样上点火头的压力主要与射孔枪长度相关。式(11)表明,对于在不同的管柱,重力所引起的流体静压与测点高度的关系具有完全相同的形式。通过数值比较可知,通常管柱的静压主要来自井液自身的静水压,管柱下放速度引起的动压是个小量。

对比图4中的两条曲线可以发现,封隔器的沿程压力出现了明显的突变。这是由于封隔器的外径与套管内径仅相差几毫米,由式(6a)和式(6b)可知,封隔器与套管内壁间的环形区域面积越小,其压力梯度越大。由式(10)可知,封隔器处的压力将传递到封隔器以下管柱,即形成所谓“憋压”效应。同时,式(4)和式(5)表明,下放速度越大,“憋压”效应越明显。对比图4中两条曲线即可证实这一点。

另外需要指出的是,按式(4)~(6b),在套管内径一定的情况下,管柱外径越大,环空井液的压力梯度也越大,“憋压”效应则是环空间隙量减小的突出表现^[15-16]。为此作如下算例,下放速度 \bar{v} 为1.5 m/s,封隔器直径较前一算例的154.4 mm仅增加2.1 mm,为156.5 mm,其他参数与表1相同。计算得到管柱的测点压力与测点高度关系曲线,如图5所示,可见封隔器处的“憋压”效应成为上点火头压力值增加的主要原因^[17]。因此,建议保证封隔器和套管一定的间隙量,以防止过大的“憋压”效应。另外,在套管形变量较大的情况下,需尽量降低管柱下放速度^[18-19],并辅以必要的压力监测。

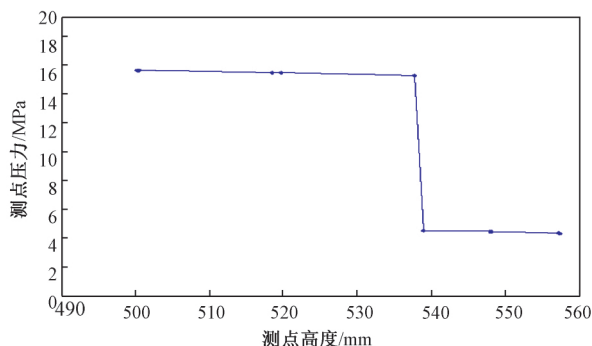


图5 压力—测点高度关系曲线(II)

Fig.5 Pressure - measuring point height relation curve(II)

采用基于哈根-泊肃叶流的TCP管柱下放压力场分析方法,分析胜利油田垦东斜411井在射孔测联作施工中的异常起爆事故。在射孔管柱下放过程中,突然加快下放速度,形成的溜钻、缴钻,在封隔器处形成憋压效应产生波动压力,根据计算,起爆器活塞处的压力峰值达到28 MPa,致使压力起爆器安全销钉提前剪断而引起压力起爆器起爆。因此,建议管柱下放速度严格按标准执行,杜绝溜钻、缴钻。

利用该方法分析NP511井的误射事故。当油管传输射孔的油管外径为89 mm、下深为3 068.6 m、下管速度为0.86 m/s时,点火头处的总压力已经达到了46.90 MPa,而设计的最大抗剪断压力为46.76 MPa,估计此时起爆装置起爆,射孔枪发射。因此,建议油管外径小于86 mm,管柱下井速度不能超过标准值,并适当增加起爆器的剪钉数,确保射孔施工的安全性。

4 结论

(1)基于哈根-泊肃叶流理论,推导了TCP管柱下放时井筒内沿程压力的解析解,发现管柱下放速

度越大,管柱外径越大,封隔器以下的“憋压”效应越大;在未出现明显“憋压”效应时,点火头压主要取决于井液的静水压力。

(2)此方法可预先计算油管传输式射孔管柱下放过程中的激动压力,为后续射孔施工方案编制安全压力值的设计和现场施工操作防范措施的制定提供科学的依据。

(3)该方法可以扩展到试油管柱下放过程中的井筒压力场计算,为试油管柱的设计提供借鉴。

致谢:感谢大庆油田有限责任公司试油试采分公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 谢寿昌.动态负压射孔技术研究及在新疆油田夏盐11井区的应用[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 35-37.
XIE Shouchang. Study on dynamic underbalanced perforating technology and its application in well block Xi-ayan 11 at Xinjiang oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2): 35-37.
- [2] 郭希明, 蒋宏伟, 郭庆丰, 等. 油管输送式射孔技术起爆方式的设计与应用分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(3): 96-99.
GUO Ximing, JIANG Hongwei, GUO Qingfeng, et al. Application and design of detonating models of tubing conveyed perforation technology [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(3): 96-99.
- [3] 马英文, 付团辉, 吴泽林, 等. 渤中34-2/4油田外置式复合射孔技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 31-36.
MA Yingwen, FU Tuanhui, WU Zelin, et al. External composite perforation technology in the Bozhong oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 31-36.
- [4] 钟伟明, 裘磊. 负压射孔技术在月东油田高黏度油藏中的应用[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(2): 81-83.
ZHONG Weiming, QIU Lei. Application of negative pressure perforating technology in high viscosity oil reservoir in Yuedong oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2016, 9(2): 81-83.
- [5] 毛军, 张同义, 毛庆, 等. APR完井测试技术在异常压力储层测试策略分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 52-55.
MAO Jun, ZHANG Tongyi, MAO Qing, et al. Pilot application of APR completion testing technology in abnormal pressure reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 52-55.
- [6] 朱建新, 庄新勇. 射孔测试联作异常起爆原因的诊断及改进措施[J]. 测井技术, 2009, 33(6): 601-604.
ZHU Jianxin, ZHUANG Xinyong. Abnormal initiation diagnosis and improving measures for combined perforation tests [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(6): 601-604.

- [7] 李贵吉,张建民,王承恩.南堡油田 NP511 井下管柱误射孔事故原因分析[J].测井技术,2008,32(5):471-475.
LI Guiji, ZHANG Jianmin, WANG Cheng'en. Analysis of the wrong perforation accident at NP511 well in Nanpu oil-field [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5):471-475.
- [8] 张锋,王峰,宋留群,等.数值模拟计算射孔管柱在碰撞情况下引起的压力波动[C].//中国石油学会测井专业委员会射孔分会第五届年会论文选集.陕西应用物理化学研究所 中国工程物理研究院,2006:148-152.
- [9] 杨学贵,张慧,李宏清,等.浅析油管输送射孔中波动压力对压力起爆器的影响[C].//中国石油学会测井专业委员会射孔分会第五届年会论文选集.中国兵器工业集团第213研究所,2006:145-147.
- [10] 窦益华,张福祥.高温高压深井试油井下管柱力学分析及其应用[J].钻采工艺,2007,30(5):17-20.
DOU Yihua, ZHANG Fuxiang. Mechanical analysis of well testing down-hole string in deep well with HTHP and its application [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(5):17-20.
- [11] 刘延鑫,王早祥,侯乃贺,等.深井试油管柱力学分析及其应用[J].钻采工艺,2012,35(4):71-73.
LIU Yanxin, WANG Hanxiang, HOU Naihe, et al. Mechanical analysis of oil test string for deep wells and its application [J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(4):71-73.
- [12] 蔡庆俊,孙宝泉.操作因素对下放液压封隔器管柱的影响[J].石油机械,1996,24(11):34-38.
CAI Qingjun, SUN Baoquan. Influence of operational factors on seating and sealing of hydraulic packer [J]. China Petroleum Machinery, 1996, 24(11):34-38.
- [13] BIRD R B, STEWART W E, LIGHTFOOT E N. Transport phenomena [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2002:48-52.
- [14] ZHOU M, GARNER C P, REEVES M. Numerical modeling and particle image velocimetry measurement of the laminar flow field induced by an enclosed rotating disc [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2015, 22(4):283-296.
- [15] 孔祥伟,林元华,邱伊婕.下钻中气液两相激动压力滞后时间研究[J].应用力学学报,2014,31(5):710-714.
KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, QIU Yijie. Research on lag time of surge pressure in gas-liquid two-phase flow during tripping operations [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014,31(5):710-714.
- [16] 汪海阁,许震芳.油井中卡森流体稳态波动压力研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(4):457-463.
WANG Haige, XU Zhenfang. Steady surge pressure of Casson's fluid in oil wells [J]. Journal of Hydrodynamics, 1995,10(4):457-463.
- [17] 李同桂,张治华,黄中会.新型 DST 跨隔射孔—测试联作工艺技术研究与应用[J].油气井测试,2004,13(4):45-47.
LI Tonggui, ZHANG Zhihua, HUANG Zhonghui. Study and application for new model DST straddle perforation and testing combination technology [J]. Well Testing, 2004,13(4):45-47.
- [18] 郑继红.井下工具下放过程中摩擦力和下放速度的计算[J].江汉石油学院学报,2003,25(S2):156-157.
ZHENG Jihong. Calculation of friction force and running velocity in the process of running downhole tool [J]. Journal of Jianhan Petroleum Institute, 2003, 25(S2):156-157.
- [19] 刘巨保,肖兵,丁宇奇,等.水平井连续油管下放速度及下入深度分析[C].//2015 中国力学大会论文集.东北石油大学,2015:146.

编辑 刘述忍

第一作者简介:于秋来,男,1985年出生,工程师,2008年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现从事射孔完井工程技术工作。电话:13836957569;Email:yuqiulai@petrochina.com.cn.com。通信地址:黑龙江省大庆市乘南18街试油试采分公司工程技术大队,邮政编码:163412。