

文章编号: 0253-2697(2018)06-0712-07 DOI:10.7623/syxb201806010

# 水平井电缆牵引器滚轮与管壁压力的测量

孙可平<sup>1</sup> 杨东超<sup>1</sup> 常旭<sup>1</sup> 陈恳<sup>1</sup> 张福兴<sup>2</sup> 李洪军<sup>2</sup>

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084; 2. 中国石油辽河油田公司钻采工艺研究院 辽宁盘锦 124010)

**摘要:**水平井电缆牵引器滚轮与管壁之间的压力是进行牵引器结构设计和作业控制的一项关键参数。如果压力施加不当,滚轮将出现打滑或堵转。由于套管细长,滚轮与管壁的接触位置又不断在发生变化,因此压力测量的难度很大。笔者提出在套管上开窗口并用球头立柱支撑压板,使立柱与压板始终处于单点接触状态,确保压板发生变形时立柱只受到压力。为防止压板从窗口掉入套管,将压板的两个侧立面加工为楔形,与窗口侧立面具有相同的锥度。研究介绍了测力系统的设计和工作原理,提出了有无预紧力2种情况下支撑立柱的压力计算模型,建立了测试系统,并对牵引器在套管内爬行时的压力进行了测量。根据得到的16根支撑立柱的应变值,计算和分析了压板和立柱上的压力分配。

**关键词:**水平井;牵引器;法向接触力;爬行器;测量

**中图分类号:**TE927

**文献标识码:**A

## Measurement of the normal contact force between the cable tractor's wheels and the pipe wall of horizontal well

Sun Keping<sup>1</sup> Yang Dongchao<sup>1</sup> Chang Xu<sup>1</sup> Chen Ken<sup>1</sup> Zhang Fuxing<sup>2</sup> Li Hongjun<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Liaoning Panjin 124010, China)

**Abstract:** The normal contact force between the cable tractor's wheels and the pipe wall of horizontal well is a key parameter for the design of tractor structure and operation control. If the normal contact force is imposed improperly, the wheels will show the problems of slipping or lock-rotation. Because the casing is very long and thin, and the contact position between wheels and pipe walls changes constantly, it is very difficult to measure the normal contact force. To solve this problem, an effective method is put forward. The window is opened on the casing and the ball column is used to support the pressing plate, so that the column and pressing plate are always in a single point contact state, which ensures that the column is only subjected to pressure when the pressing plate is deformed. To prevent the pressing plate falling into the casing from the window, both side facades of pressing plate are machined into wedges and have the same taper with the side facade of window. This paper introduces the designing and working principle of normal contact force measuring system, and also proposes the normal contact force calculation model of bracing column under pre-tightening force or not. Then the test system is established; the normal contact force of the tractor creeping in the casing is also measured. Moreover, the normal contact force distribution on the pressing plate and column is calculated and analyzed according to the strain values of 16 bracing columns.

**Key words:** horizontal well; tractor; normal contact force; crawler; measurement

**引用:**孙可平,杨东超,常旭,陈恳,张福兴,李洪军.水平井电缆牵引器滚轮与管壁压力的测量[J].石油学报,2018,39(6):712-718.

**Cite:**SUN Keping, YANG Dongchao, CHANG Xu, CHEN Ken, ZHANG Fuxing, LI Hongjun. Measurement of the normal contact force between the cable tractor's wheels and the pipe wall of the horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 712-718.

随着水平井的广泛应用<sup>[1-2]</sup>,测井时需要使用牵引器来向井下输送仪器或设备<sup>[3-10]</sup>。水平井电缆牵引器可分为轮式和伸缩式两大类,其中以美国通用电气公司(GE)和斯伦贝谢公司研制的牵引器最为成熟。被GE收购的原 Sondex 公司生产的轮式牵引器<sup>[11]</sup>,其两

对支撑臂互相垂直布局,4个滚轮在潜油电机的驱动下同时转动。另一功率较小的电机驱动曲柄滑块机构可实现支撑臂的张开与收拢,并借此调整滚轮与套管管壁之间的压力大小,当滚轮与管壁之间的压力满足一定条件时<sup>[12-14]</sup>,滚轮即可向前爬行。

**第一作者:**孙可平,男,1979年10月生,2003年获北京理工大学机电工程专业学士学位,2006年获北京理工大学机电工程专业硕士学位,现为清华大学机械工程系博士研究生,主要从事特种机器人技术及应用等方面的研究。Email:sunkeping110@163.com

**通信作者:**杨东超,男,1975年5月生,1997年获湖南大学机械制造工艺与设备专业学士学位,2003年获清华大学机械电子工程专业博士学位,现为清华大学机械工程系副研究员,主要从事工业机器人、特种机器人及车间自动化等方面的研究。Email:ydc@tsinghua.edu.cn

滚轮与管壁之间的压力是进行水平井电缆牵引器结构设计和作业控制的一项关键控制参数<sup>[15-20]</sup>,压力过大将会导致潜油电机堵转,反之将会导致滚轮打滑<sup>[21-24]</sup>。在测量滚轮与管壁之间的压力时会面临诸多困难。首先,滚轮工作在细长的套管内,传统的测力传感器或装置很难进行安装和固定;其次,牵引器爬行时滚轮与管壁之间的接触位置始终在不断变化。

目前国内外的相关研究大多通过建立支撑臂开合机构的力学模型,先求得压力与水平推靠力之间的比例关系,再通过对水平推靠力的测量来间接计算管壁压力的大小<sup>[25-31]</sup>。这种方法对支撑臂开合机构进行了空间结构的简化处理,把滚轮与管壁的复杂三维接触简化成线接触,同时忽略了运动过程中支撑臂开合角度的动态变化,其计算结果不能真实反映管壁压力的大小。

笔者提出了一种管壁压力的测量方法,介绍了测量装置的结构和工作原理,通过建立力学计算模型,对管壁压力进行了测量实验,并根据实验结果验证和分析了各压板与立柱的压力分配。

## 1 装置与原理

### 1.1 测量装置

如图1(a)所示,测量装置由套管(1个)、压板(4块)、立柱(16根)、固定板(8块)、连接螺栓(32根)和螺母(48个)组成。在套管管壁上对称地开有4个测力窗口和4个观测窗口。4个测力窗口上放置压板,两组窗口之间的轴向距离与牵引器两组滚轮之间的轴向距离相等。4个观测窗口与相邻的测力窗口刚

好垂直,各窗口沿套管径向的开口角度均为 $45^\circ$ ,如图1(b)所示。

如果直接用螺杆固定压板,则贴在螺杆上的应变片将受到较大的弯矩,在后续数据处理时很难测得较精确的压应力。因此,采用一端具有螺纹的球头立柱来支撑压板,立柱与压板之间始终为单面点接触,即使压板由于受到滚轮碾压而发生形变,立柱所受到的弯矩也可忽略。立柱根部通过螺纹与固定板连接,可通过螺纹来调整立柱头部与压板之间的接触状态,以确保圆柱型球头与压板可靠接触并产生足够的预紧力。立柱选用硬度相对较小的材料,以确保牵引器滚轮压在压板上时,应变仪能测量到合适的应变值。为便于观察压痕,采用切割铝合金圆管来制作压板,为防止滚轮未与压板接触时压板从窗口掉入套管,将压板的两个侧立面加工为楔形,与窗口具有同样的锥度,如图1(c)所示。

### 1.2 测量原理

压板的径向受力迫使立柱发生轴向变形,实现了压力从套管管壁到立柱的等效转移;支撑每块压板的4个立柱呈矩形分布,实现了将滚轮与管壁接触点位置不断变化(压力作用点不断变化)的过程转化为4个立柱上压力分配不断变化的过程。根据管壁压力与4个立柱上压应力之间的等效关系,通过高频测量各立柱应变值即可实现对管壁压力的测量。

## 2 力学模型

### 2.1 力学建模

由于测量过程中4个立柱的相对位置不变且压板具有径向对称性,故建模时可将弧形压板简化为平板,立柱仅受到压力。由于牵引器在套管内爬行时其所受重力主要由两端的扶正器承担,牵引器自身重力对压力的影响较小,故本模型暂不考虑重力。

将压板作为力学研究对象,以压板的几何中心为原点,牵引器爬行方向为 $X$ 轴正向,以管壁压力作用方向的负方向为 $Z$ 轴正向,按照右手法则建立直角坐标系,如图2所示。

$F_n$ 为管壁所受压力大小,方向沿 $Z$ 轴负方向,作用点位置坐标为 $(x, y)$ ;  $F_1, F_2, F_3, F_4$ 分别为4个立柱对压板的支撑力大小,方向沿 $Z$ 轴正方向,作用点分别位于各立柱头部与压板的接触点处。由 $Z$ 轴方向的力平衡可得:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = F_n \quad (1)$$

将 $F_1, F_2, F_3, F_4$ 和 $F_n$ 分别相对于坐标系原点求力矩矢量,由力矩平衡可得:

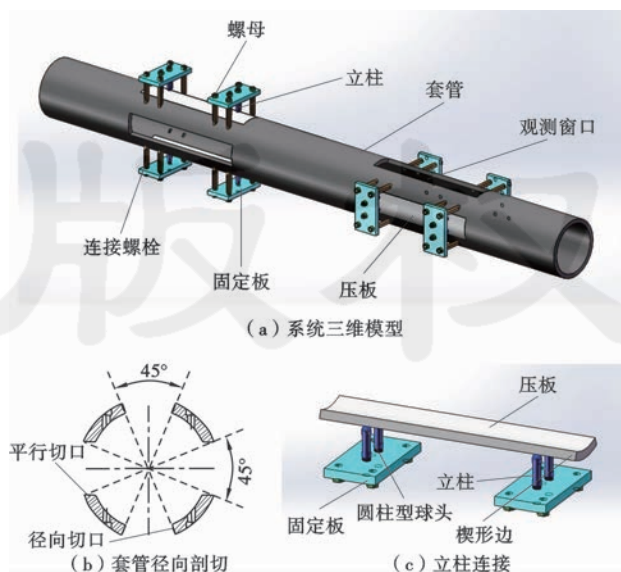


图1 测量装置

Fig. 1 Measurement device

$$\sum M_x = b \cdot (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) + F_n \cdot (-y) = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_y = a \cdot (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) + F_n \cdot (x) = 0 \quad (3)$$

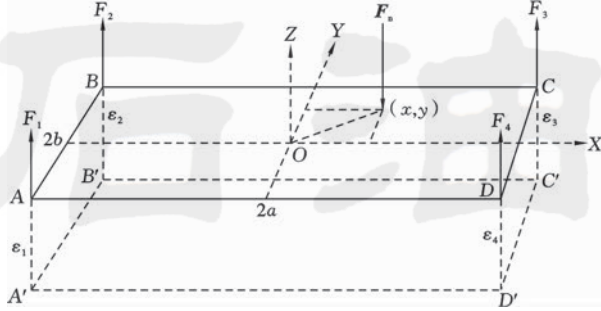


图2 压板受力分析  
Fig. 2 Force analyse of pressed plate

假定压板为刚体,在压力  $F_n$  的作用下立柱只发生弹性变形,且假定各立柱与压板之间始终可靠接触,则变形后4个立柱的接触点  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  共面,且受压后各接触点的坐标分别为:

$$A': (-a, -b, -L_0 \cdot \epsilon_1), B': (-a, b, -L_0 \cdot \epsilon_2), \\ C': (a, b, -L_0 \cdot \epsilon_3), D': (a, -b, -L_0 \cdot \epsilon_4).$$

$A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  这4点共面的充要条件是此4点构成的向量  $A'B'$ 、 $A'C'$ 、 $A'D'$  的混合积为零,由此可推导得:

$$\epsilon_1 + \epsilon_3 = \epsilon_2 + \epsilon_4 \quad (4)$$

将式(1)一式(4)联立,解得各立柱上的压力大小为:

$$\begin{cases} F_1 = F_n \cdot \frac{ab - bx - ay}{4ab} \\ F_2 = F_n \cdot \frac{ab - bx + ay}{4ab} \\ F_3 = F_n \cdot \frac{ab + bx + ay}{4ab} \\ F_4 = F_n \cdot \frac{ab + bx - ay}{4ab} \end{cases} \quad (5)$$

则管壁压力大小可表示为:

$$F_n = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4) \cdot E \cdot S \quad (6)$$

### 2.2 无预紧力的情况

立柱与压板的接触方式决定了立柱只能受压变形而无法受拉变形。假定立柱压应变为正,则  $\epsilon_1 \geq 0$ ,  $\epsilon_2 \geq 0$ ,  $\epsilon_3 \geq 0$ ,  $\epsilon_4 \geq 0$ ,当未施加预紧力时,由式(5)可得出  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  这4点共面的作用边界表达式为:

$$\begin{cases} y_1 = b - bx/a \\ y_2 = -b + bx/a \\ y_3 = -b - bx/a \\ y_4 = b + bx/a \end{cases} \quad (7)$$

式(7)边界表达式所构成的区域即图3中所示的斜划线区域。

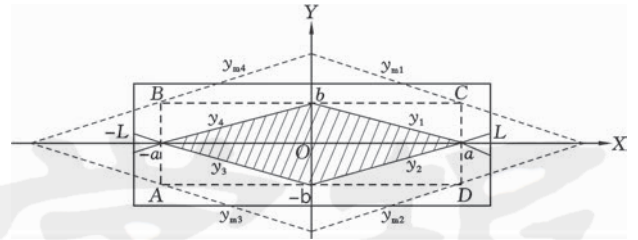


图3 立柱压应变协调边界  
Fig. 3 Boundary diagram of the pressed pillar's strain coordination

如图3所示,当滚轮在压板上4个立柱之间沿X轴运动时,各立柱的应变协调方程分别为:

当  $-a \leq x < 0$  时,

$$\begin{cases} \epsilon_3 = 0, & y \leq y_3 \\ \epsilon_1 + \epsilon_3 = \epsilon_2 + \epsilon_4, & y_3 < y < y_4 \\ \epsilon_4 = 0, & y \geq y_4 \end{cases} \quad (8)$$

当  $0 \leq x \leq a$  时,

$$\begin{cases} \epsilon_2 = 0, & y \leq y_2 \\ \epsilon_1 + \epsilon_3 = \epsilon_2 + \epsilon_4, & y_2 < y < y_1 \\ \epsilon_1 = 0, & y \geq y_1 \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)分别与式(1)一式(3)联立求解,则无预紧力时各立柱上的压力大小可表示为:

当  $-a \leq x < 0$  时

$$\begin{cases} F_1 = F_n \cdot \left(-\frac{x}{2a} - \frac{y}{2b}\right) \\ F_2 = F_n \cdot \frac{y+b}{2b} \\ F_3 = 0 \\ F_4 = F_n \cdot \frac{x+a}{2a} \end{cases} \quad y \leq y_3$$

$$\begin{cases} F_1 = F_n \cdot \frac{ab - bx - ay}{4ab} \\ F_2 = F_n \cdot \frac{ab - bx + ay}{4ab} \\ F_3 = F_n \cdot \frac{ab + bx + ay}{4ab} \\ F_4 = F_n \cdot \frac{ab + bx - ay}{4ab} \end{cases} \quad y_3 < y < y_4 \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_1 = F_n \cdot \frac{b-y}{2b} \\ F_2 = F_n \cdot \left(-\frac{x}{2a} + \frac{y}{2b}\right) \\ F_3 = F_n \cdot \frac{x+a}{2a} \\ F_4 = 0 \end{cases} \quad y \geq y_4$$

当  $0 \leq x \leq a$  时:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = F_n \cdot \left( \frac{a-x}{2a} \right) \\ F_2 = 0 \\ F_3 = F_n \cdot \frac{y+b}{2b} \\ F_4 = F_n \cdot \left( \frac{x}{2a} - \frac{y}{2b} \right) \end{array} \right. \quad y \leq y_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = F_n \cdot \frac{ab-bx-ay}{4ab} \\ F_2 = F_n \cdot \frac{ab-bx+ay}{4ab} \\ F_3 = F_n \cdot \frac{ab+bx+ay}{4ab} \\ F_4 = F_n \cdot \frac{ab+bx-ay}{4ab} \end{array} \right. \quad y_2 < y < y_1 \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = 0 \\ F_2 = F_n \cdot \frac{a-x}{2a} \\ F_3 = F_n \cdot \left( \frac{x}{2a} + \frac{y}{2b} \right) \\ F_4 = F_n \cdot \frac{b-y}{2b} \end{array} \right. \quad y \geq y_1$$

### 2.3 存在预紧力的情况

如图3所示,当滚轮压在压板上图中斜划线之外的区域时有可能引发压板倾斜,导致压板与窗口发生挤压,从而影响压力的测量精度。为避免这一现象发生,可在测量前加预紧力。

由图3及式(7)可知, $b$ 值越大,则斜划线区域的面积越大,此时压板由4个立柱有效支撑,受力情况较好。为确保压力测量过程中4个立柱与压板的接触点始终共面,则应使4点共面的作用边界至少扩大至图3中虚线  $y_{m1}$ 、 $y_{m2}$ 、 $y_{m3}$  和  $y_{m4}$  所构成的区域。

以  $y_{m4}$  为例,新的作用边界可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{m4} = 2b + \frac{b}{a}x \\ C \cdot F_4 + F_{m4} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

将式(5)和式(12)联立可解得:

$$F_{m4} = C \cdot \frac{F_n}{4} \quad (13)$$

故每个立柱最小预紧力如式(13)所示,其中  $C$  为安全系数,一般取值为  $1.5 \sim 2.0$ ,此时应变协调方程统一适用于式(4)。当各立柱均按式(13)施加了预紧力时,则各立柱上的压力可按式(5)计算。

## 3 实验与数据分析

### 3.1 实验条件

实验所用的水平井电缆牵引器由柱塞泵驱动支撑

臂的开合。实验所用的套管为外径  $139.7 \text{ mm}$ ,内径  $121.36 \text{ mm}$ 。4个立柱  $X$  向的间距为  $200 \text{ mm}$ , $Y$  向的间距为  $30 \text{ mm}$ 。实验过程中将开臂液压值控制在  $1.6 \sim 1.9 \text{ MPa}$ ,由于井下数据传输资源限制,液压值的采样频率为  $1 \text{ Hz}$ 。采用多通道应变测量仪测量16根立柱的应变值,数据采样频率为  $16 \text{ Hz}$ 。

### 3.2 压力测量结果及分析

牵引器总压力的理论值和牵引器总压力的实测值计算式为:

$$F_{nT} = pS_o \frac{F_n}{F_2} \quad (14)$$

$$F_{nR} = \sum_{i=1}^4 \left( \sum_{j=1}^4 \varepsilon_{ij} ES \right) \quad (15)$$

牵引器总压力的理论计算值和实测值对比曲线如图4所示。

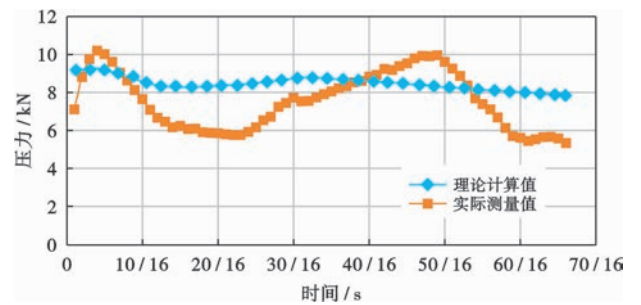


图4 总压力测量结果

Fig. 4 Measurement results of total normal contact force

从图4可以看出,牵引器总压力的实测值与理论计算值之间幅值存在一定偏差,但变化趋势基本一致。出现偏差的主要原因是实验过程中决定理论计算值的液压值的采样频率与测量精度均较低。

### 3.3 各压板压力分布及分析

牵引器总压力在各压板上的分布情况如图5所示。从图5可以看出,不论变化趋势还是幅值,水平组两个滚轮压板上的压力曲线吻合较好。竖直组两个滚轮压板上的压力曲线的变化趋势也一致,但下滚轮压

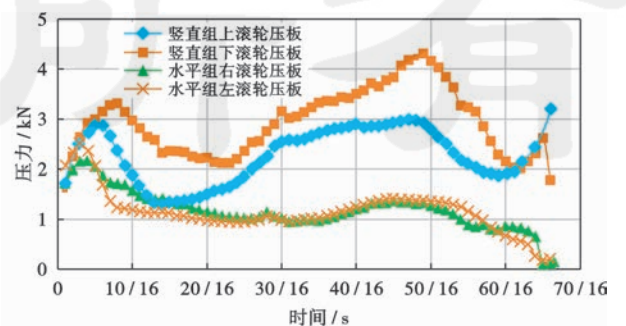


图5 总压力在各压板上的分布

Fig. 5 Distribution of total normal contact force on each the pressed plate

板上的压力幅值比上滚轮压板上的稍大。导致这种现象的主要原因是牵引器爬行时虽然其自身重力主要由两端的扶正器承担,但当支撑臂张开滚轮压紧压板后,其接触点也成为了一个支承点,而竖直组滚轮压力作用方向与重力方向一致,故竖直组滚轮也承担了牵引器的部分重力。

### 3.4 各立柱压力分布及分析

当分析牵引器爬行过程中压板上 X 轴两端立柱上的压力分布时,可根据式(5),并由:

$$F_1 + F_2 = \frac{F_{nT}}{4} \cdot \frac{a-x}{2a} \quad (16)$$

$$F_3 + F_4 = \frac{F_{nT}}{4} \cdot \frac{a+x}{2a} \quad (17)$$

计算压力理论值。其中,  $F_{nT}$  粗略地取为由式(14)计算得到的牵引器总压力理论值的 1/4(4 个滚轮的平均值)。实际测量值根据各立柱上测得的应变值求得。

以竖直组上滚轮压板为例, X 轴两端压力的理论计算值和实际测量值对比如图 6 所示。从图 6 中可以看出,实际测量值曲线和理论计算值曲线的变化趋势基本一致。

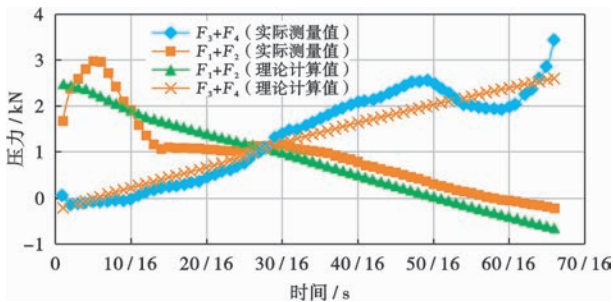


图 6 竖直组上滚轮压板上 X 轴两端压力变化

Fig. 6 Normal contact force change curves on both ends of the X axis on the upper roller plate of the vertical set

当分析牵引器爬行过程中压板上各立柱的压力分布时,理论计算值由式(5)计算得到,其中  $F_n$  取为由式(14)计算得到的牵引器总压力理论值的 1/4,滚轮压力作用点离 X 轴的距离  $y$  可根据实验结束后通过测量压板上滚轮压痕的中心线而获得。实际测量值根据各立柱上测得的应变值求得。

以竖直组上滚轮压板为例,压板上 4 个立柱压力的理论计算值和实际测量值对比如图 7 所示。从图 7 中可以看出,实际测量值曲线和理论计算值曲线的变化趋势基本一致,但幅值存在一定的误差,导致这种现象的主要原因是决定理论计算结果的液压值的测量精度较低且数据采样频率较低。

### 3.5 提高测量精度的方法

(1) 根据所测压力的大致范围,为立柱选择合适的材料类型和横截面积。既要确保应变仪能测量到合

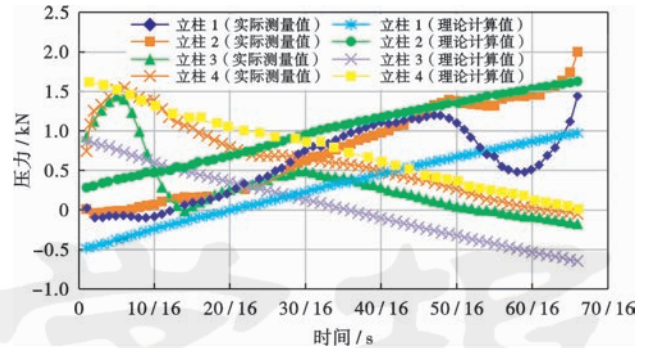


图 7 竖直组上滚轮压板上各立柱的压力变化

Fig. 7 Normal contact force change curve of the columns on the roller plate of the vertical set

适的应变值,还需避免立柱球头发生塑性变形,否则立柱与压板的接触不能简化为点接触,立柱上将承受较大的弯矩从而严重影响测量精度。

(2) 在避免出现边缘效应的前提下,  $b$  值越大,滚轮运动时 4 个立柱的受力情况越好。

(3) 测量前适当调节立柱根部的螺母,应按照式(13)设置合适的预紧力,确保压力测量过程中立柱与压板的 4 个接触点始终处于共面状态。

(4) 精确控制牵引器进入套管的初始角度,使牵引器 4 个滚轮始终压在压板的中轴线附近。必须避免滚轮压在立柱外侧,此时压板两侧的楔形面将与套管切口壁面发生挤压受力,从而影响测量精度。

(5) 控制好牵引器的爬行速度,使滚轮尽可能匀速平稳地通过压板,避免较大的加速或减速。较大的加减速将使得压板的前后两个端面与套管切口壁面发生挤压受力,从而影响测量精度。

## 4 结论

(1) 牵引器滚轮与管壁之间的压力直接影响到牵引器的井下状态和牵引力的大小,因此有必要对管壁压力进行准确测量和深入分析。

(2) 提出的牵引器管壁压力测量方法,解决了传统测力方法所面临的传感设备不便安装、接触条件不断变化的问题;实验结果证明了测量方法的有效性和力学模型的正确性。

(3) 采用一端具有螺纹的球头立柱来支撑压板,确保立柱与压板之间始终为单面点接触,是测量方法能够实现并保证测量精度的关键。

(4) 通过设置合适的预紧力,确保测量过程中立柱与压板的 4 个接触点始终处于共面状态,可以提高压力测量精度和降低后续数据处理的难度。

符号注释:  $L_0$ —立柱初始长度, mm;  $E$ —立柱材料的弹性模量, MPa;  $S$ —立柱横截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $L$ —压板

长度的一半,mm; $a$ —左右立柱 $X$ 向间距的一半,mm;  
 $b$ —前后立柱 $Y$ 向间距的一半,mm; $p$ —开臂时液压缸  
 的液压值,MPa; $S_o$ —开臂液压缸推杆的横截面积,  
 $\text{mm}^2$ ; $F_n$ —牵引器滚轮与管壁之间的压力,N,其作用点  
 位置坐标为 $(x,y)$ ; $F_i$ —立柱对压板的支撑力大小,N;  
 $F_{nT}$ —牵引器总压力的理论值,N; $F_{nR}$ —牵引器总压力  
 的实测值,N; $F_n/F_2$ —根据开合机构结构参数计算的  
 推压比系数; $M_x$ —压板在各力作用下沿 $X$ 轴向的力  
 矩大小, $\text{N}\cdot\text{m}$ ; $M_y$ —压板在各力作用下沿 $Y$ 轴向的力  
 矩大小, $\text{N}\cdot\text{m}$ ; $F_{mi}$ —立柱所需施加的最小预紧力,N;  
 $C$ —立柱最小预紧力的安全系数; $\epsilon_i$ —压板上各立柱的  
 轴向应变值; $\epsilon_{ij}$ —应变测量仪所测得的第 $i$ 块压板上  
 第 $j$ 个立柱上的应变值;下标 $i,j$ 取值分别为1,2,3,  
 4,表示立柱或压板序号。

### 参 考 文 献

- [1] HEDDLESTON D C. Horizontal-well-production logging deployment and measurement techniques for US land shale hydrocarbon plays[R]. SPE 120591, 2009.
- [2] OESTVANG K, HAUKVIK J, SKEIE T, et al. The wireline tractor operations successful in horizontal wells[J]. World Oil, 1997, 218(4):124-127.
- [3] 姜岳庆. 水平井测井及仪器输送方法研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2013.  
JIANG Yueqing. Study on horizontal well logging tools and transport method of tools[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [4] 刘清友, 李维国. Sondex 水平井下爬行器的研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5):115-117.  
LIU Qingyou, LI Weiguo. Research and application of Sondex downhole tractor for horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(5):115-117.
- [5] 李湘涛, 秦羽乔, 陈四平, 等. 水平井测井仪器输送技术及其应用[J]. 石油机械, 2014, 42(8):98-102.  
LI Xiangtao, QIN Yuqiao, CHEN Siping, et al. The horizontal well logging instrument conveying technology and its applications [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8):98-102.
- [6] 周劲辉, 张勇, 李翠. 水平井自扶正式电缆牵引器的设计[J]. 石油机械, 2015, 43(2):79-82.  
ZHOU Jinhui, ZHANG Yong, LI Cui. Design of self-righting cable tractor in horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(2):79-82.
- [7] SHEIRETOV T. Wireline tractors and mechanical services tools; comparative study of technical solutions[R]. SPE 179044, 2016.
- [8] AL OMARI M, PLESSING H. Innovation in coiled tubing tractor technology extends the accessibility of coiled tubing in horizontal wells, allowing better possibilities for well intervention [R]. SPE 105225, 2007.
- [9] HENDERSON B, HOPWOOD C, HAMILTON C, et al. Cost saving benefits of using a fully bi-directional tractor system[R]. SPE 65467, 2000.
- [10] AL-SHAWLY A S, AL-BUALI M R, DASHASH A A, et al. Wireline well tractor technology experience in extended reach horizontal well[R]. SPE 136535, 2010.
- [11] GE Oil & Gas. Logging while tracting[EB/OL]. (2015-02-04) [2017-04-25]. <https://www.geoilandgas.com/oilfield/wireline-technology/sondetrax-wireline-tractor>.
- [12] 刘清友, 李雨佳, 任涛, 等. 水平井爬行器驱动轮力学分析[J]. 钻采工艺, 2014, 37(1):68-71.  
LIU Qingyou, LI Yujia, REN Tao, et al. Mechanical analysis of driving wheels of horizontal wells tractor[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(1):68-71.
- [13] 刘振. 水平井牵引器机构分析和建模仿真技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.  
LIU Zhen. Research on mechanism analysis and modeling simulation of horizontal well tractor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [14] 于淼. 水平井牵引器拖动力数值分析[D]. 大庆:东北石油大学, 2011.  
YU Miao. The mule downhole numerical analysis of drag force on[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [15] 白相林. 水平井牵引机器人关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.  
BAI Xianglin. Key technologies for horizontal well traction robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [16] 许德宇. 水平井牵引机器人机械系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010.  
XU Deyu. Research on mechanism of wireline tractor[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2010.
- [17] 张详坡, 尚建忠, 罗自荣, 等. 管道机器人支撑臂小角度展开过程建模与分析[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(6):64-67.  
ZHANG Xiangpo, SHANG Jianzhong, LUO Zirong, et al. The modeling and analysis on deployment process of in-pipe arm within small angel[J]. Machine Design & Research, 2008, 24(6):64-67.
- [18] 尚青松. 套管油井检测仪器拖动器的设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.  
SHANG Qingsong. The research of well tractor used in the cased oil well[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [19] 陈亮帆, 高德利, 赵宁. 水平井牵引器系统力学研究[J]. 石油机械, 2016, 44(5):66-70.  
CHEN Liangfan, GAO Deli, ZHAO Ning. Mechanics analysis on horizontal well tractor system[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(5):66-70.
- [20] 白相林, 李浩昱, 刘文剑. 油田水平井牵引机器人驱动单元的设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(S2):122-127.  
BAI Xianglin, LI Haoyu, LIU Wenjian. Design of driving unit for horizontal well traction robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(S2):122-127.
- [21] 曾华军. 水平井牵引器驱动系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.  
ZENG Huajun. Research on key technologies for the master degree in engineering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [22] 朱林, 吴松平. 水平井测井仪器牵引爬行器的设计[J]. 新技术新

- 工艺,2007(12):31-34.  
ZHU Lin, WU Songping. The design of horizontal well logging instrument hauling crawling[J]. New Technology & New Process, 2007(12):31-34.
- [23] 赵永铸. 牵引机器人动作单元动力学仿真与关键部件优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
ZHAO Yongzhu. The dynamic simulation and optimal design for the movement units of well tractor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [24] 侯松伟. 水平井牵引器运动学仿真与应用研究[D]. 大庆:东北石油大学,2017.  
HOU Songwei. Research on kinematics simulation and application for horizontal well tractor[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [25] 张勇,高德利,陈亮帆,等. 水平井电缆牵引器驱动装置参数优化[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(1):30-33.  
ZHANG Yong, GAO Deli, CHEN Liangfan, et al. Parameter optimization of drive device of cable tractor in horizontal wells[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(1):30-33.
- [26] 唐德威,王新杰,邓宗全,等. 水平油井检测仪器拖动器[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(9):1395-1397.  
TANG Dewei, WANG Xinjie, DENG Zongquan, et al. Driver of horizontal oil well detecting instruments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(9):1395-1397.
- [27] 闫泽. 裸眼井检测仪器拖动器的设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.  
YAN Ze. Design and research on open hole logging tools tractor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [28] 李子丰,王长进,田伟超,等. 钻柱力学三原理及定性模拟实验[J]. 石油学报, 2017, 38(2):227-233.  
LI Zifeng, WANG Changjin, TIAN Weichao, et al. Three principles of drill string mechanics and qualitative simulation experiments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2):227-233.
- [29] 高佳佳,邓金根,闫伟,等. 基于井壁稳定控制建立井眼轨迹优化预测模型[J]. 石油学报, 2016, 37(9):1179-1186.  
GAO Jiajia, DENG Jingen, YAN Wei, et al. Establishment of a prediction model for the borehole trajectory optimization based on controlling wellbore stability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9):1179-1186.
- [30] 赵金洲,彭瑀,林啸,等. 考虑复杂应力分布的数值缝宽计算模型及其应用[J]. 石油学报, 2016, 37(7):914-920.  
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LIN Xiao, et al. Numerical fracture width model considering complex stress distribution and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7):914-920.
- [31] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报, 2016, 37(4):531-556.  
LI Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4):531-556.

(收稿日期 2017-09-25 改回日期 2018-04-08 编辑 宋 宁)

(上接第 702 页)

- [18] 孔柏岭,宋振宇. 耐温抗盐的低浓度交联聚合物体系研究[J]. 石油学报, 2000, 21(4):70-74.  
KONG Bailing, SONG Zhenyu. Study on the low concentration polymer crosslinking system at high temperature and salinity condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4):70-74.
- [19] 孔柏岭,昌润珍,海玉芝,等. 河南油田微凝胶驱技术的矿场实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(6):99-103.  
KONG Bailing, CHANG Runzhen, HAI Yuzhi, et al. Field practice and understandings of microgel flooding technique in Henan Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6):99-103.
- [20] LI Yingcheng, ZHANG Weidong, KONG Bailing, et al. Mixtures of anionic cationic surfactants: a new approach for enhanced oil recovery in Low-Salinity, high-temperature sandstone reservoir [J]. SPE Journal, 2016, 21(4):1164-1177.
- [21] 刘艳华,孔柏岭,肖磊,等. 特高含水油藏复合驱技术提高采收率研究[J]. 油田化学, 2013, 30(4):570-574.  
LIU Yanhua, KONG Bailing, XIAO Lei, et al. Study on combination flooding enhanced oil recovery technique in ultra-high water cut reservoir [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(4):570-574.
- [22] 王艳霞. 双河油田 IV 5-11 层系复合驱剩余油分布与井网重组研究[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(1):29-32.  
WANG Yanxia. Research on residual oil distribution and well pattern reconstruction of IV 5-11 layer series with combination flooding of Shuanghe oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(1):29-32.

(收稿日期 2017-10-30 改回日期 2018-04-15 编辑 王培玺)