

文章编号:1673-5005(2019)04-0069-06 doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2019. 04. 008

# 基于钻柱正弦屈曲的套管磨损预测模型

谭雷川<sup>1,2</sup>, 高德利<sup>1</sup>, ADEEB Samer<sup>2</sup>, 陶 红<sup>3</sup>, 陶 治<sup>4</sup>,  
王正旭<sup>1</sup>, 任韶然<sup>5</sup>, 庞琬滢<sup>6</sup>, 张馨方<sup>6</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 阿尔伯塔大学土木与环境工程学院,  
加拿大埃德蒙顿 T6G1H9; 3. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 四川广汉 618300;  
4. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司培训中心, 四川成都 610015; 5. 中国石油大学(华东)石油工程学院,  
山东青岛 266580; 6. 阿尔伯塔大学采矿与石油工程学院, 加拿大埃德蒙顿 T6G1H9)

**摘要:**在复杂井况油气勘探开发的钻井过程中, 巨大的摩阻扭矩和严重的狗腿度使钻柱和套管不可避免地发生接触, 导致严重的套管磨损。基于能量耗散原理和新的复杂几何关系, 建立一种考虑钻柱正弦屈曲的套管磨损预测模型, 并利用套管磨损因子反演的方法校正并预测具有相似结构和井眼轨迹的井的套管磨损情况。该模型应用于涪陵页岩气套管磨损预测, 通过井 X1 现场井径测试数据对具有相似结构和井眼轨迹的井 X2 进行磨损预测。结果表明: 当测深达到 2 700 m 时, 如果不考虑钻柱的正弦屈曲会导致磨损深度预测误差超过 23.9%; 对于位于 1 989 m 钻柱接头与套管的目标磨损位置, 若考虑正弦屈曲情况, 实际位于 1 794 m 处, 预测误差达到 9.8%; 忽略钻柱正弦屈曲对套管磨损的影响会导致套管磨损预测不准确。

**关键词:**套管磨损预测; 正弦屈曲钻柱; 反演计算; 预测精度; 涪陵页岩气

**中图分类号:**TE 21      **文献标志码:**A

**引用格式:**谭雷川,高德利,ADEEB Samer,等. 基于钻柱正弦屈曲的套管磨损预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(4):69-74.

TAN Leichuan, GAO Deli, ADEEB Samer, et al. Casing wear prediction model in consideration of sinusoidal buckled drill string[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019, 43(4):69-74.

## Casing wear prediction model in consideration of sinusoidal buckled drill string

TAN Leichuan<sup>1,2</sup>, GAO Deli<sup>1</sup>, ADEEB Samer<sup>2</sup>, TAO Hong<sup>3</sup>, TAO Ye<sup>4</sup>,  
WANG Zhengxu<sup>1</sup>, REN Shaoran<sup>5</sup>, PANG Wanying<sup>6</sup>, ZHANG Xinfang<sup>6</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;  
2. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G1H9, Canada;  
3. Drilling & Production Technology Research Institute, Chuanqing Drilling Engineering Company Limited,  
PetroChina, Guanghan 618300, China;  
4. Training Center, Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, PetroChina, Chengdu 610015, China;  
5. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;  
6. School of Mining & Petroleum Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G1H9, Canada)

**Abstract:** During well-drilling process, due to large drag, torque and serious buckling condition, the drill string is inevitably in contact with the casing surface, which can lead to wear of the casing. In this paper, an improved casing wear prediction

收稿日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(U1762214, 51521063); 国家科技重大专项(2017ZX05009-003); 国家重点研发计划课题(2016YFC0303303)

作者简介:谭雷川(1991-),男,博士研究生,研究方向为油气井管柱力学与控制。E-mail: tanleichuan0220@126.com。

通信作者:高德利(1958-),男,教授,博士,博士生导师,中国科学院院士,研究方向为油气井管柱力学与控制。E-mail: gaodeli@cup.edu.cn。

model in consideration of sinusoidal buckled drill string was developed based on energy dissipation principles and the geometric shape of the buckled pipe. A casing wear factor was introduced in the model, and it can be calibrated using collected parameters from wellbore caliper testing for wells with similar well structure and trajectory. The calibrated model was then applied to the casing wear prediction in Fuling shale gas field, and the prediction results of well X2 through the caliper testing data from a similar well of X1 show that, as the measured well depth to 2700 m, the calculation error of casing wear can be over 23.9% if sinusoidal buckling is not considered. Besides, the predicted location that serious wear may occur was of 1989 m using a previously proposed steady state model, but it is of 1794 m with the new model prediction, and the error is 9.8%. The results indicate that the previous models might be inaccurate in predicting the casing wear.

**Keywords:** casing wear prediction; sinusoidal buckled drill string; inversion calculation; prediction accuracy; Fuling shale gas

大位移井和超深井在钻进过程中的复杂井况使套管磨损问题变得异常严重<sup>[1-3]</sup>,从而给油气井工程带来了巨大的安全隐患<sup>[4-7]</sup>。前人针对套管磨损问题的研究主要集中在稳态井况下的室内模拟实验<sup>[8-10]</sup>与结构磨损机制<sup>[11-13]</sup>的研究方面。随着油气田开发的不断深入,复杂井型如超深井和大位移井得到了广泛的应用<sup>[14-19]</sup>。在这类复杂井型的钻井过程中,复杂的井况使钻柱不再处于稳定状态<sup>[20-24]</sup>。基于此类复杂井况,Tan 等<sup>[25-26]</sup>将钻柱的涡动和螺旋屈曲引入到套管磨损预测中,有效地提高了磨损预测的准确性。但是,关于钻柱正弦屈曲对套管磨损问题的研究还未见报道。笔者针对这一问题,建立一套基于钻柱正弦屈曲的套管磨损预测模型,以提高套管磨损预测的精确性,保障复杂井况下钻井工程的顺利实施。

## 1 套管磨损能量耗散方程

在复杂井况下的钻进过程中,处于正弦屈曲的钻柱与套管内壁将不可避免地发生接触,如图 1 所示。

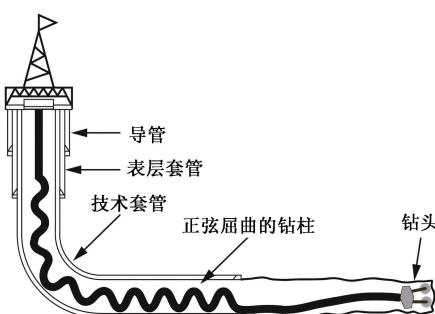


图 1 复杂井况套管磨损示意图

Fig. 1 Schematic diagram of casing wear under complex well conditions

滑动接触造成的金属材料磨损可以通过 White 和 Dawson 的能量耗散模型<sup>[12]</sup>计算,其磨损机制以 Archard 模型<sup>[29]</sup>中所考虑的磨损影响因子为基础。

套管磨损主要与钻柱接头的旋转运动有关,而起下钻过程中的套管往复运动所造成的套管磨损可以忽略不计<sup>[9]</sup>。因此在钻进进尺给定的情况下,套管某一磨损位置的磨损面积可以由所有通过该位置处发生正弦屈曲钻柱的接头所造成的磨损累加而成,其中正弦屈曲所产生的接触力可以参考相关文献[22],即

$$S = f_w \mu NL = 60\pi f_w \mu n D_{stj} N \frac{L_m}{v_{ROP}} = \\ 60\pi f_w \mu L_s \sum_{i=1}^k \frac{N_i D_{stj} n_i}{v_{ROPi}}. \quad (1)$$

式中, $S$  为磨损面积,  $\text{m}^2$ ;  $f_w$  为磨损影响因子; $\mu$  为摩擦系数; $N$  为接触力,  $\text{N}$ ;  $L$  为相对滑动距离,  $\text{m}$ ;  $n$  为转盘转速,  $\text{r}/\text{min}$ ;  $D_{stj}$  为钻柱外径,  $\text{m}$ ;  $L_m$  为钻头进尺,  $\text{m}$ ;  $L_s$  为单根钻柱长度,  $\text{m}$ ;  $v_{ROP}$  为机械钻速,  $\text{m}/\text{h}$ ;  $N_i$  为第  $i$  段钻柱与套管内壁接触力,  $\text{N}$ ;  $D_{stj}$  为第  $i$  段钻柱外径,  $\text{m}$ ;  $n_i$  为第  $i$  段钻柱转速,  $\text{r}/\text{min}$ ;  $v_{ROPi}$  为  $(i-1)L_s$  到  $iL_s$  的机械钻速,  $\text{m}/\text{h}$ 。

## 2 套管磨损深度预测模型

从垂直于井筒轴线方向观察,其正弦屈曲的钻柱在套管中的几何形态示意图如图 2 所示。将处于正弦屈曲的钻柱在某一已发生正弦屈曲的钻柱轴线位置沿着垂直于钻柱轴线方向切开。在此时切开的平面中,钻柱和套管的几何关系如图 3 所示,此处的钻柱截面是圆形,但套管截面已变为一空心椭圆。

根据几何关系,正弦屈曲的钻柱对套管的磨损深度可表示为

$$D_{sw} = a + R_{sdo} - R_{ci}. \quad (2)$$

式中, $D_{sw}$  为套管磨损深度,  $\text{m}$ ;  $a$  为偏心距,  $\text{m}$ ;  $R_{sdo}$  为钻柱接头半径,  $\text{m}$ ;  $R_{ci}$  为套管内壁半径,  $\text{m}$ 。

设磨损后钻柱截面与套管内椭圆的交点为  $(m, n)$ ,又根据图 3 所示几何关系,钻柱截面与套管内椭圆方程可以表示为

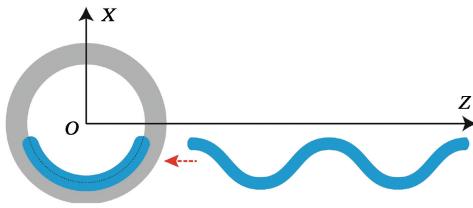


图2 钻柱正弦屈曲的套管磨损示意图

Fig. 2 Schematic diagram of casing wear caused by sinusoidal buckled drill pipe

$$x^2 + (y+a)^2 = R_{\text{sd}o}^2, \quad (3)$$

$$\frac{x^2}{\left(\frac{R_{\text{ci}}}{\cos \psi_N}\right)} + \frac{y^2}{R_{\text{ci}}^2} = 1. \quad (4)$$

式中,  $\psi_N$  为屈曲钻柱与套管轴线空间夹角,(°)。

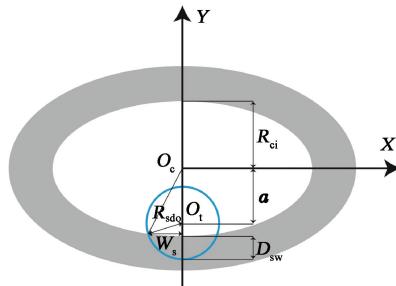


图3 基于钻柱正弦屈曲的套管磨损深度预测模型

Fig. 3 Prediction model of casing wear depth based on sinusoidal buckled drill pipe

联立式(3)、(4)所得关于未知数( $x, y$ )的解即为上述交点,为方便实际描述,将所得解直接用( $m, n$ )替代,可得:

$$n = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - \left(1 - \frac{1}{\cos^2 \psi_N}\right) \left(\frac{R_{\text{ci}}^2}{\cos^2 \psi_N + a^2 - R_{\text{sd}o}^2}\right)}}{1 - \frac{1}{\cos^2 \psi_N}}. \quad (5)$$

根据题设,  $a$  为正值,  $n$  应取负值  $n_0$ 。因此将  $n_0$  带入式(3)可得  $(m_1, n_0)$  和  $(m_2, n_0)$  两个交点。其中

$$m_1 = -\sqrt{R_{\text{sd}o}^2 - (n_0 + a)^2}, \quad (6)$$

$$m_2 = \sqrt{R_{\text{sd}o}^2 - (n_0 + a)^2}. \quad (7)$$

又因为磨损槽半宽  $W_s = m_0 = |m_1| = |m_2|$ , 所以磨损面积可以通过积分的方式求得:

$$S = 2 \int_0^{m_0} \left[ -\cos \psi_N \sqrt{\frac{R_{\text{ci}}^2}{\cos^2 \psi_N} - x^2} + \sqrt{R_{\text{sd}o}^2 - x^2} + a \right] dx = -\cos \psi_N m_0 \sqrt{\frac{R_{\text{ci}}^2}{\cos^2 \psi_N} - m_0^2} - \frac{R_{\text{ci}}^2}{\cos \psi_N} \arcsin m_0 \frac{\cos \psi_N}{R_{\text{ci}}} + m_0 \sqrt{R_{\text{sd}o}^2 - m_0^2} + R_{\text{sd}o}^2 \arcsin \frac{m_0}{R_{\text{sd}o}} + 2am_0. \quad (8)$$

联立式(8)和(1), 只有一个未知数  $a$ , 可以通过迭代的方法计算得到套管磨损深度  $D_{\text{sw}}$ , 相应的算法请参照文献[13]和[22]。

### 3 套管磨损位置预测模型

套管磨损主要是钻柱接头引起的, 因此在预测正弦屈曲钻柱对套管内壁磨损位置时, 需要确定钻柱接头与套管内壁的磨损位置。

假设一定进尺的钻柱由常规的稳定无屈曲的钻柱部分  $L_0$ , 以及长度和正弦幅度各不相同的一系列正弦屈曲段  $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{si}$  组成, 其对应的正弦屈曲段钻柱的螺距分别为  $\Delta_{s1}, \Delta_{s2}, \dots, \Delta_{si}$  (图4)。

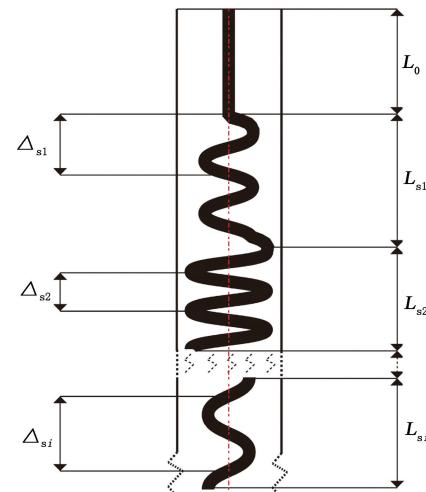


图4 基于钻柱正弦屈曲的套管磨损位置预测模型

Fig. 4 Prediction model of casing wear location based on sinusoidal buckled drill string

各正弦屈曲段钻柱可以表示为

$$y_{si} = A_{si} \sin x_{si}. \quad (9)$$

对应的正弦钻柱单位周期线长为

$$\overline{L_{si}} = 2 \int_0^\pi A_{si} \sin x_{si} \sqrt{1 + (A_{si} \cos x_{si})^2} dx_{si} = 2 [A_{si} \sqrt{1 + A_{si}^2} + \ln(A_{si} + \sqrt{1 + A_{si}^2})]. \quad (10)$$

式中,  $\overline{L_{si}}$  为第  $i$  正弦屈曲段单位周期线长,  $\text{m}$ ;  $A_{si}$  为第  $i$  正弦屈曲段正弦屈曲钻柱幅度,  $\text{m}$ 。

某一钻进进尺是由  $N$  根单根钻杆接在一起的, 那么, 第  $k$  ( $k < N$ ) 根钻杆末端钻柱接头所造成的磨损点的磨损深度为

$$H_{sk} = L_0 + \sum_{i=1}^k \frac{n_i L_{\text{gle}}}{2 [A_{si} \sqrt{1 + A_{si}^2} + \ln(A_{si} + \sqrt{1 + A_{si}^2})]} \times \Delta_{si}. \quad (11)$$

式中,  $H_{sk}$  为第  $k$  根钻杆末端钻柱接头与套管内壁磨损深度,  $\text{m}$ ;  $L_0$  为常规稳定无屈曲的钻柱部分,  $\text{m}$ ;  $\Delta_{si}$

为第*i*正弦屈曲段处正弦屈曲钻柱的螺距,m;*n<sub>i</sub>*为对应螺距为 $\Delta_{si}$ 、正弦幅度为 $A_{si}$ 的正弦屈曲钻柱部分包含的单根钻杆数量; $L_{gle}$ 为单根标准钻杆长度,m。

## 4 实例分析

涪陵页岩气田位于中国重庆市涪陵区,海拔约300~1 000 m,属典型的喀斯特山地地貌。目前,该气田已探明的总含气面积为575.92 km<sup>2</sup>,储量为 $6.008 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>。涪陵页岩气田是中国首个大型页岩气田,也是北美洲以外世界上最大的页岩气储集地,其地质条件和井眼轨迹复杂,钻井工程投资巨大<sup>[28]</sup>。因此为了有效地保障经济效益以及防止钻井事故的发生,须更加精确地对套管磨损进行预测。

涪陵页岩气X1井是一口水平井,完钻测深为5 227 m,其中垂直段深度为2 432 m,水平段长度为2 375 m。该井三开周期为41 d,钻井液密度为1.55~1.58 g/cm<sup>3</sup>,从现场收集到的页岩试样测定可知其泊松比为0.38,弹性模量为10.017 GPa。该井造斜段位于技术套管上部,由于三开钻井所遇到的井眼轨迹复杂和钻井液密度较高,导致技术套管发生严重的套管磨损。

### 4.1 套管磨损深度预测

在套管磨损的研究中,反演方法是被油田钻井现场证明的最有效的预测套管磨损的方法。该方法的具体实施方式为:首先对一口已经发生套管磨损的井进行井径测试,得到一定间隔的一系列套管磨损深度,然后分别将每一测试位置的磨损深度作为已知量带入所建立的模型中,基于不同的钻进参数,反演计算得到相应的磨损影响因子,再将得到的一系列磨损影响因子结合目标井的钻进参数进行计算,最终得到预测井相应的套管磨损深度。这种方法可以有效地预测与该井井身结构设计相似的井的套管磨损情况。对于“井工厂技术”广泛运用的涪陵区块,选取两口井身结构相似的涪陵页岩气X1

井和涪陵页岩气X2井进行预测。

在现场对涪陵页岩气X1井部分井段进行井径测试,利用前人建立的稳定状态磨损模型和本文中新建立的正弦屈曲磨损模型分别进行反演计算,得到相应的磨损影响因子,如图5所示。涪陵页岩气X1井和X2井的井眼轨迹和井身结构如图6和表1所示。

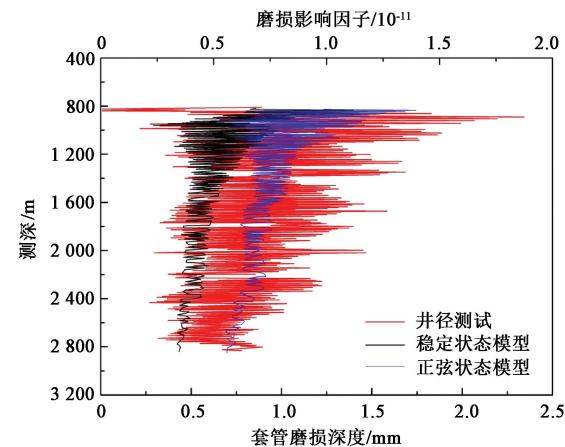


图5 X1井不同模型磨损影响因子反演对比

Fig. 5 Results and comparison of casing wear factor in different models of well X1

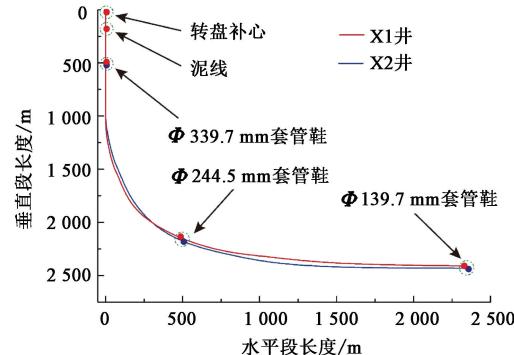


图6 X1与X2井身结构对比

Fig. 6 Comparison of casing program between well X1 and X2

表1 X1与X2井身结构关键点

Table 1 Key points for casing program of well X1 and X2

井号	转盘补心/m	泥线/m	套管鞋深度/m			套管钢级		
			Φ339.7 mm 套管	Φ244.5 mm 套管	Φ139.7 mm 套管	Φ339.7 mm 套管	Φ244.5 mm 套管	Φ139.7 mm 套管
X1	-4.3	117.82	497	2 643	5 223	L80-1	P110	TP125V
X2	-4.4	119.50	509	2 692	5 311	L80-1	P110	TP125V

分别利用稳定状态模型和正弦屈曲模型对涪陵页岩气X2井进行套管磨损预测,预测结果如图7所示。可以看出,在测深2 700 m处,误差达到

23.9%。当钻柱的正弦屈曲这一井况被忽略时,套管磨损会被严重低估,对钻井后期套管性能评估造成巨大的误差,严重时可能会导致整口井的报废,造

成巨大的经济损失。

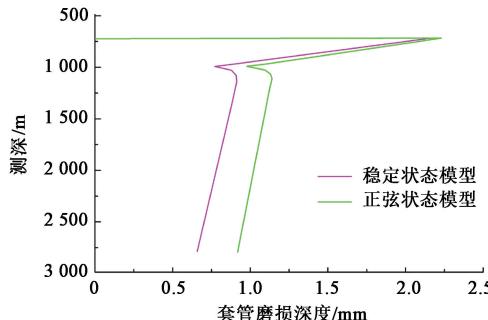


图7 X2 井套管磨损预测结果

Fig. 7 Comparison of casing wear depth prediction using different models of well X2

## 4.2 套管磨损位置预测

根据现场钻井数据分析,涪陵页岩气X1井在三开过程中部分钻柱发生了3段幅度不同的正弦屈曲,根据本文中提出的计算方法,稳定状态计算得到的1989 m处的一磨损位置,考虑正弦屈曲后实际磨损位置在1794 m处,计算误差达到9.8%。

## 5 结论

(1)对涪陵页岩气套管磨损进行预测,当测深达到2700 m时,如果不考虑钻柱的正弦屈曲会导致磨损深度预测误差超过23.9%;对于位于1989 m钻柱接头与套管的目标磨损位置,若考虑正弦屈曲情况,实际位于1794 m处,预测误差达到了9.8%,即忽略钻柱正弦屈曲对套管磨损的影响会导致套管磨损预测的不准确。

(2)该研究成果能有效地降低钻井工程风险,为井下套管选材提供合理的决策指导,保障复杂结构及复杂油气田钻井工程的安全性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] GAO Deli, SUN Lianzhong. New method for predicting casing wear in horizontal drilling [J]. Petroleum Science and Technology, 2012, 30(9):883-892.
- [2] TAN Leichuan, GAO Deli. Casing wear prediction model based on casing ellipticity in oil & gas well-drilling with complex structures [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 2018, 85(10):101005.
- [3] TAN Leichuan, GAO Deli, ZHOU Jinhui. Casing wear prediction with considering initial internal casing eccentricity [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2018, 43(5):2593-2603.
- [4] 许志倩,闫相祯,杨秀娟,等.复杂井况下油井套管柱的系统可靠性计算[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(4):125-129.
- [5] XU Zhiqian, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan, et al. Calculation of casing system reliability in complex well condition [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(4):125-129.
- [6] 陶德齐,刘同斌.中途测试技术的应用和气层参数简化计算方法[J].天然气工业,1982,2(3):62-69.
- [7] TAO Deqi, LIU Tongbin. Application of drill-stem testing techniques and simplified calculating method of gas reservoir parameters [J]. Natural Gas Industry, 1982, 2(3):62-69.
- [8] 冯耀荣,韩礼红,张福祥,等.油气井管柱完整性技术研究进展与展望[J].天然气工业,2014,34(11):73-81.
- [9] FENG Yaorong, HAN Lihong, ZHANG Fuxiang, et al. Research progress and prospect of oil and gas well tubing string integrity technology [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(11):73-81.
- [10] 刘文红,林凯,冯耀荣,等.基于Kriging模型的特殊螺纹油管和套管接头密封可靠性分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):163-169.
- [11] LIU Wenhong, LIN Kai, FENG Yaorong, et al. Analysis of sealing reliability for premium connection casing and tubing based on Kriging model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3):163-169.
- [12] RUSSEL W, LEWIS T R, WRIGHT J R. Casing wear: some causes, effects and control measures [J]. World Oil, 1974(4):99-103.
- [13] BRADLEY W B, FONTENOT J E. The prediction and control of casing wear [J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 27(2):233-245.
- [14] WILLIAMSON J S. Casing wear: the effect of contact pressure [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12):2382-2388.
- [15] SCHOENMAKERS J M. Casing wear during drilling-simulation, prediction, and control [J]. SPE Drilling Engineering, 1987, 2(4):375-381.
- [16] WHITE J P, DAWSON R. Casing wear: laboratory measurements and field predictions [J]. SPE Drilling Engineering, 1987, 2(1):56-62.
- [17] SUN Lianzhong, GAO Deli, ZHU Kuanliang. Models & tests of casing wear in drilling for oil & gas [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2012, 4:44-47.
- [18] LUBINSKI A. A study of the buckling of rotary drilling strings [R]. API 50-178, 1950.
- [19] PASLAY P R, BOGY D B. The stability of a circular rod laterally constrained to be in contact with an inclined

- circular cylinder [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(4):605-610.
- [16] LUBINSKI A, ALTHOUSE W S. Helical buckling of tubing sealed in packers [J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(6):655-670.
- [17] CHEN Yuche, LIN Yuhsu, CHEATHAM J B. Tubing and casing buckling in horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(2):140-141, 191.
- [18] 于永南, 韩志勇, 路永明. 斜直井眼中钻柱侧向屈曲的研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(3):65-67.  
YU Yongnan, HAN Zhiyong, LU Yongming. Lateral buckling of drill string in inclined hole [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1997, 21(3):65-67.
- [19] GAO Deli, LIU Fengwu, XU Bingye. An analysis of helical buckling of long tubulars in horizontal wells [R]. SPE-50931-MS, 1998.
- [20] 尹飞, 高德利. 油气井套管侧向屈曲分析与井下加强工具探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6):67-71.  
YIN Fei, GAO Deli. Lateral buckling analysis of oil and gas well casing and design of downhole reinforcement tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):67-71.
- [21] 王尊策, 曹梦雨, 徐德奎, 等. 基于梁-梁接触理论的管柱屈曲分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(2):132-138.  
WANG Zunce, CAO Mengyu, XU Dekui, et al. Post-buckling analysis of tubes based on beam-to-beam contact theory [J]. Journal of China University of Petroleum-
- um (Edition of Natural Science), 2017, 41(2):132-138.
- [22] 高德利. 油气井管柱力学与工程[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
- [23] GAO Deli, HUANG Wenjun. A review of down-hole tubular string buckling in well [J]. Petroleum Science, 2015, 12(3):443-457.
- [24] HUANG Wenjun, GAO Deli, LIU Fengwu. Buckling analysis of tubular strings in horizontal wells [J]. SPE Journal, 2015, 20(2):405-416.
- [25] TAN Leichuan, GAO Deli, ZHOU Jinhui, et al. Casing wear prediction model based on drill string whirling motion in extended-reach drilling [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2018, 43(11):6325-6332.
- [26] TAN Leichuan, GAO Deli, ZHOU Jinhui. A prediction model of casing wear in extended-reach drilling with buckled drillstring [J]. Journal of Applied Mechanics, 2018, 85(2):021001.
- [27] ARCHAED J F. Wear theory and mechanism [M]// PETERSON M B, WINER W O. Wear control handbook. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1980:35-88.
- [28] 潘军, 刘卫东, 张金成. 泸陵页岩气田钻井工程技术进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4):9-15.  
PAN Jun, LIU Weidong, ZHANG Jincheng. Drilling technology progress and recommendations for the Fuling shale gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4):9-15.

(编辑 李志芬)