

文章编号: 100025870(2000) 022000 203

水平井段管柱屈曲与摩阻分析

高德利 高宝奎

(石油大学石油工程系, 北京 102200)

摘要: 利用有限差分法和 Newton 迭代法, 计算了斜直井段管柱螺旋屈曲临界力、沿螺旋段分布的管柱与井壁接触力以及后屈曲平均侧向接触力。分析了钻杆接头对水平井段钻柱屈曲临界力和弯曲应力的影响, 提出了计算钻柱正弦屈曲临界力的新方法。结果表明, 当轴向压力较小时, 钻杆接头引起钻柱弯曲应力; 当轴向压力较大时, 接头会抑制螺旋屈曲的发生, 降低钻柱的弯曲应力。另外, 给出了水平井段钻柱出现反转的判别式。

关键词: 水平井段; 钻柱; 屈曲; 临界力; 摩阻力矩; 计算模型

中图分类号: TE 21 **文献标识码:** A

引言

大位移井及水平井中管柱的变形与运动状态直接影响钻柱的摩阻, 因此, 蛇形屈曲临界力 F_{cr} 、螺旋屈曲临界力 F_{hel} 和螺旋屈曲后管柱与井壁平均接触力 N , 成为人们研究的热点。在确定临界屈曲力和侧向接触力时, 许多人把钻柱当作光滑管柱来处理。例如, 在水平井段, Chen^[1] 利用能量法, 推出 F_{hel} 的计算式, Mitchell^[2] 推出 N 及 F_{cr} 的计算式。由于均没有考虑接头的影响, 计算结果要有一定误差。使用转盘钻时, 如果钻柱局部发生螺旋屈曲, 就有可能出现钻柱局部沿井壁反向滚动(下称反转)。钻柱反转引起滚动摩阻, 在计算摩阻力矩时应该予以考虑。本文提出用接头处的环隙和已有的公式来计算正弦屈曲及螺旋屈曲临界力, 探讨接头对变形过程和弯曲应力的影响及水平井段钻柱出现反转的必要条件。

1 水平井段管柱螺旋屈曲的数值计算

1.1 基本方程

对于水平井段管柱螺旋屈曲问题, 可采用图 1 所示的坐标系进行分析^[3], 从而得到如下微分方程、边界条件及接触力计算式:

微分方程为

$$EI d^4 \theta / ds^4 = 6(\theta)'' \theta'' + \frac{F}{EI} \theta - \frac{w}{fEI} \sin \theta \quad (1)$$

边界条件为

$$\begin{cases} H(0) = 0, \\ H(L) = 2P, \\ H\theta(0) = H\theta(L), \\ H\dot{\theta}(0) = H\dot{\theta}(L), \\ H\ddot{\theta}(0) = H\ddot{\theta}(L). \end{cases} \quad (2)$$

接触力计算式为

$$N_d = w \sin H \left[EI f \left[(\theta)''^4 - 3(\theta)''^2 - 4H\theta\ddot{\theta} \right] - fF(\theta)'' \right] \quad (3)$$

其中

$$(\theta) = \frac{\theta(s)}{5s}; (\theta)' = \frac{\theta'(s)}{5s^2}; (\theta)'' = \frac{\theta''(s)}{5s^3}; (\theta)''' = \frac{\theta'''(s)}{5s^4}.$$

式中, EI 为抗弯刚度; w 为有效线重力; f 为环隙; F 为轴向力; N_d 为接触力; s 为弧长坐标变量; L 为一个满螺旋的管柱长度, 即螺距; H 和 r 的意义如图 1 所示。

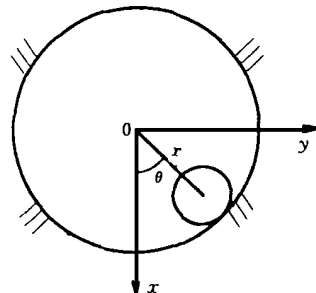


图 1 坐标系

收稿日期: 199920@10

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(59825115)

作者简介: 高德利(1958-), 男(汉族), 山东禹城人, 教授, 博士生导师, 从事油气井工程力学与控制方面的研究。

1.2 计算结果分析

利用有限差分法对基本方程和边界条件进行离散,然后再用Newton迭代法进行计算。计算的基本参数:井眼直径为215.9 mm,钻杆直径为127 mm, $EI = 2118.9 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$, $w = 200.5 \text{ N/m}$ 。

1.2.1 屈曲临界力

屈曲临界点的判断标准是:当 $H = 180b$ 时,接触力 $N_d|_{180} = 0$ 。经计算,管柱屈曲临界力为266 kN。若按Chen的公式计算,得 $F_{hel} = 276.5 \text{ kN}$,两者相差约为4%。Chen的公式计算结果偏大是由于他在推导公式时作了螺旋均匀假设,相当于增加了约束条件。

1.2.2 临界点侧向接触力沿螺旋段分布

图2给出了数值计算的接触力分布规律。图中螺旋最低点($H = 0b$)的 N_d 值最大,最高点($H = 180b$)的 N_d 值最小,两个侧点($H = 90b, 270b$)的 N_d 值为整个螺旋段接触力的平均值。

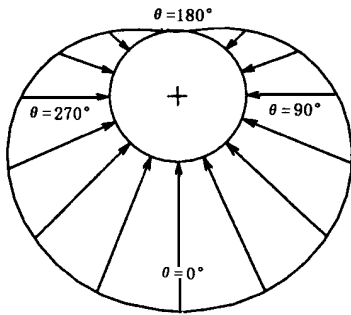


图2 N_d 值沿螺旋分布

1.2.3 后屈曲平均侧向接触力

计算了轴向力 F 大于 F_{hd} 时的接触力。此时 N_d 的分布与图2相似,只是各点数值都有增加。将 N_d 在整个螺旋段积分,然后除以螺距得平均接触力 N 。计算结果与Mitchell公式非常吻合。在螺旋屈曲临界点, $N = 370.38 \text{ N/m}$,比不发生任何屈曲时的 $N = w = 200.5 \text{ N/m}$ 高出84.7%。当轴向力为300 kN时, $N = 471 \text{ N/m}$,比不发生屈曲时高出135%,说明螺旋屈曲会引起很大摩擦。

2 水平井段钻柱接头的力学效应

2.1 分析方法

由于管柱接头的外径 d_j 大于管体的外径 d_p ,且受有效线重力 w 的作用,当轴向压力 F 较小时,可将接头处简化为支撑点(只限制向下的位移,如图3),按纵横弯曲理论求解变形和弯曲应力。当轴向力 F 大到一定程度时,钻柱会发生复杂的弯曲变

形。为了利用光滑钻柱的分析结果,用 $r = (d_h - d_j)/2$ 作为环隙来计算屈曲临界力。其中 d_h 为井眼直径。

计算基本数据:接头间距 $L_1 = 9 \text{ m}$,截面惯性矩 $I = 1.009 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ 。

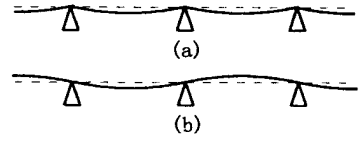


图3 钻柱变形示意图

2.2 接头对变形过程的影响

为简单起见,只考虑接头引起环隙减小所致屈曲临界力的变化,忽略钻柱抗弯刚度 EI 和有效线重力 w 的变化。有如下三种情况:

1 当轴向力 $F < F_{cr}$ 时,钻柱变形如图3(a),类似连续梁的纵横弯曲问题。

2 当轴向力 $F_{hel} > F_{cr}$ 时,钻柱为正弦屈曲。

根据参数的大小, F_{cr} 有两种算法。一种是 $F_{cr1} = 2\sqrt{EIw/r}$;另一种按单根钻杆两端铰支欧拉公式 $F_{cr2} = EI(P/L)^2$ 来求解。这是由于当 $F > F_{cr2}$ 时,钻柱会出现垂直面内的正弦屈曲,如图3(b)。因此, F_{cr} 的计算式应为

$$F_{cr} = \min(F_{cr1}, F_{cr2}) = \min\left\{2\sqrt{\frac{EIw}{r}}, \frac{EIP^2}{L^2}\right\} \quad (4)$$

令 $F_{cr1} = F_{cr2}$,则可求得 $r^* = \frac{4wL^4}{EIP^4}$ 。

当环隙 $r > r^*$,即接头外径 d_j 较小时, $F_{cr} = F_{cr1}$;反之 $F_{cr} = F_{cr2}$ 。

3 当轴向力 $F > F_{hel}$ 时,钻柱为螺旋屈曲,临界力为

$$F_{hel} = 2\sqrt{2EIw/r} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)求得屈曲临界力随接头外径的变化曲线如图4。

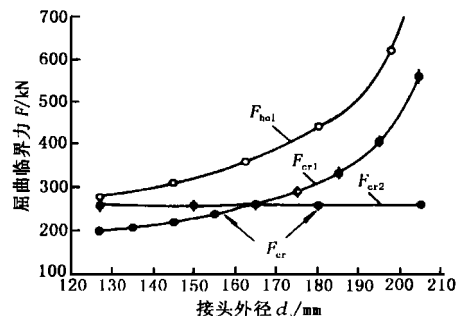


图4 接头外径与屈曲临界力的关系

图4中曲线的最左端对应不考虑接头时的 F_{hel} 和 F_{α} , 此时的值最小;随着接头外径的增大, F_{hel} 和 F_{α} 也增大。由于 $F_{cr} = \min(F_{\alpha 1}, F_{\alpha 2})$, 所以在环隙 $r < r^*$ 之后, $F_{cr} = F_{\alpha 2}$ 。由此可见, 接头外径增大会使螺旋屈曲临界力 F_{hel} 不断增加, 因而具有抑制钻柱发生螺旋屈曲的作用。

2.3 接头对弯曲应力的影响

由于受接头的影响, 即使轴向力为零, 钻杆也会发生弯曲变形, 并有较大的弯曲应力。只有当轴向力非常大, 并接近单根钻杆两端固定时的临界屈曲载荷(约 1 030 kN) 时, 纵横弯曲引起的变形和应力才较大。但这时钻柱早已发生正弦屈曲和螺旋屈曲变形, 需要从整体上进行分析。

考虑接头的影响时, 计算所得到的螺旋屈曲引起的弯曲应力远小于不考虑接头影响时的应力。因此, 考虑接头影响时不会引起弯曲应力计算值的增加。

3 钻柱屈曲对其运动状态的影响

钻柱发生螺旋屈曲后, 与井壁的接触力变大。当接触力达到一定程度时, 就会引起钻柱反转。从能量平衡的角度进行分析, 同时考虑钻柱滚动摩阻的影响^[5], 得到钻柱发生反转时与井壁的临界接触力 N_c 为

$$N_c = \frac{m r_p^2 X^2 R D}{[L r_p (R - r_p) - R D] (R - r_p)} \quad (6)$$

式中, m 为钻柱线密度, kg/m ; R 为井眼半径, m ; X 为钻柱滑动速度^[4], rad/s ; r_p 为钻柱外半径, m ; L 为滑动摩擦系数; D 为滚动摩阻系数, m , 当 $N < N_c$ 时, 钻柱向后的纯滚动为稳定运动状态。

N 的大小可以通过静力计算得到。目前的接

触力计算公式包含了重力影响, 如在水平井段, 可用 Mitchell 公式求解接触力。由 $N = N_c$ 得钻柱在水平井段发生反转时的临界轴向力为

$$F_c = \frac{r_p X}{R - r_p} \sqrt{\frac{4EI R m D}{L r_p (R - r_p) - R D}} \quad (7)$$

从理论上讲, 当轴向力超过 F_c 时, 钻柱就会出现反转运动。

4 结 论

(1) 利用数值方法得到的螺旋屈曲临界力及管柱与井壁的接触力计算公式与现有计算公式比较接近。

(2) 钻柱接头对弯曲应力的影响表现在两方面: 当轴向力较小时, 接头引起弯曲应力, 局部应力增加; 当轴向力较大时, 接头抑制钻柱发生螺旋屈曲, 降低或至少不增加弯曲应力值。

(3) 钻柱发生螺旋屈曲后, 在一定条件下会出现局部反转。钻柱反转时, 应考虑滚动摩阻的影响。

参考文献:

- [1] Chen Y C, et al. Tubing and casing buckling in horizontal wells[J]. JPT, Feb, 1990: 140~ 141.
- [2] Mitchell R F. Simple frictional analysis of helical buckling of tubing[J]. SPE/ DE, 1986: 457~ 465.
- [3] Gao Deli, et al. Buckling of tubular subjected to axial thrust and torsional moment in horizontal well[J]. SPE 50931, 1998.
- [4] 高德利, 刘希圣, 徐秉业. 井眼轨迹控制[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.
- [5] 高宝奎, 高德利. 滚动钻柱摩阻研究. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(2): 26~ 28.

(责任编辑 陈淑娴)

/ 建场法解释软件的研制及应用0达到了国内领先水平

由石油大学全兆岐、宋维琪等完成的《建场法解释软件的研制及应用》达到了国内领先水平。

科研人员对建场法地电模型进行了算法的设计, 完成了相应软件的研制, 把该软件用于实际地电模型的计算, 并且对其结果进行了特征曲线的分析, 对建场法反演解释和野外施工方法给予了正确的理论指导。

建场法是由前苏联提出并发展起来的一种电磁勘探方法, 针对该方法研制的这套软件应用到胜利油田老油区实测资料的分析、处理和解释中, 取得了较好的效果, 受到专家的好评。

(摘自校报)

MAIN ABSTRACTS OF PRESENT ISSUE

Gao Deli and Gao Baokui/ EFFECTS OF TUBULAR BUCKLING ON TORQUE AND DRAG IN HORIZONTAL WELL/ 2000, 24(2): 1 ~ 3

The critical load of the pipe helical buckling, contact force distribution of pipe on the borehole and the average side contact force of the pipe postbuckling in the horizontal section of horizontal well are calculated by using the finite difference method and the Newton iteration method. The effects of the connectors on the critical buckling load and the bending stress of pipes in horizontal section are analyzed. The results of calculation show that the connector can cause the bending stress of drill pipes when axial force is small, and it can restrain the helical buckling behavior and reduce the bending stress of drill pipes when the axial force is large. Thus, a new calculating method is given for the sinusoidal buckling load in horizontal section of drill pipes with connectors. In addition, a criterion is deduced theoretically for predicting the backward whirling of pipes in horizontal section.

Key words: horizontal well; drill string; buckling; critical load; frictional and drag moment; calculation model
About the first author: Gao Deli, male, graduated from the University of Petroleum with Ph. D degree in 1991. Now he works on mechanics and control of oil and gas well engineering in the University of Petroleum, China (Beijing: 102200).

Bu Yuhuan, Wang Ruihe and Zhou Weidong/ EXPERIMENTAL STUDY ON CAPACITY OF BRINGING DEBRIS OF PITCHING IN NOZZLE/ 2000, 24(2): 4~ 6

A kind of pitching nozzle beneficial to bringing debris is designed using the principles of bringing debris of drilling. The axial pressures and capacities of bringing debris of pitching nozzle, guide vanes nozzle and circular jet nozzle are compared experimentally. The jet formed by pitching nozzle is rotational. Axial pressure profile shows that the distribution performance is of OM0 type. The capacity of bringing debris of pitching nozzle is optimal, and its change shows a tendency of increase first and reduction afterwards with the increase of pitching angle. Under this experimental condition, the optimal pitching angle is about 60°. The optimal jet distance of bringing debris is 815 ~ 817 times of ratio of jet distance to radius at the optimal pitching angle.

Key words: pitching nozzle; axial pressure; capacity of bringing debris; pitching angle; jet distance
About the first author: Bu Yuhuan, female, received MS degree from the University of Petroleum in 1996. Now she works on oil and gas drilling engineering at the Department of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China (Dongying: 257062).

Liu Ruiwen and Guo Xuzheng/ DEVELOPMENT OF THE REALTIME REMOTE TRANSMISSION SYSTEM OF DRILLING DATA/ 2000, 24(2): 7~ 8

The realtime transmission of drilling data from well site to commanding base is an important technique of modern production management for multi-separating targets. This paper introduces the current status of realtime remote transmission of drilling data and the transmission methods using communication satellite, microwave and telephone line under different conditions. The computer network is analyzed. Realtime remote transmission and monitoring softwares are developed by using client-server model on the basis of realtime data interception from mud logging system.

Key words: data transmission; communication satellite; mud logging; computer network
About the first author: Liu Ruiwen, male, gained MS degree from Beijing Graduated School in the University of Petroleum in 1990. He now works on the application of well drilling and mud logging technique at the Department of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China (Dongying: 257062).

Lu Miaocong/ MECHANICS OF DEFORMATION OF CASING STRING DURING PRIMARY CEMENTING/ 2000, 24(2): 9 ~ 12

During the primary cementing, wellbore temperature rises because of hydration heat of cement slurry accompa-