

文章编号:1673-5005(2007)01-0091-04

等曲率井眼中钻柱与井壁间接触力分析

闫相祯¹, 李茂生¹, 杨秀娟¹, 高德利²

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘要:建立了等曲率井眼中考虑轴向力和重力的钻柱平衡方程式,采用理论和非线性有限元的方法分析了等曲率井眼中钻柱与井壁之间的接触力。采用牛顿-拉普森方法对非线性有限元方程进行了迭代求解。要保证理论分析的精度,同样需要考虑边界条件。计算结果表明,由于外力的作用,钻柱紧贴于井壁的一侧时,钻柱的刚度对钻柱与井壁间的接触力无影响,此时,井眼曲率越大,钻柱与井壁之间的接触力越大。当外力不足以使钻柱紧贴于井壁的一侧时,钻柱的刚度对钻柱与井壁之间的接触力有影响。与理论分析相比,非线性有限元方法应用范围更广,解的精度更高。

关键词:钻柱; 井壁; 接触力; 理论分析; 非线性有限元; 曲率

中图分类号:TE 242 **文献标识码:**A

Study of contact force between drill string and borehole wall in constant-curvature wellbores

YAN Xiang-zhen¹, LI Mao-sheng¹, YANG Xiu-juan¹, GAO De-li²

(1. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum,
Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The equilibrium equations of drill string considering weight and axial force in constant-curvature wellbore were derived. The contact force between drill string and borehole wall was analyzed using nonlinear finite element and theory analysis method. Nonlinear finite element equilibriums were solved by Newton-Raphson method. Boundary conditions were considered to make the result accuracy. The results show that the stiffness of drill string is irrelative with the contact force when the force can contact drill string with one side of the borehole wall, and the more curvature of hole, the more the contact force is. When the force can not contact drill string with one side of the borehole wall, the stiffness of drill string can influence the contact force. Compared with theory analysis, nonlinear finite element can be used widely, and the precision is higher.

Key words: drill string; borehole wall; contact force; theory analysis; nonlinear finite element; curvature

目前大斜度井、水平钻井日益普遍,在水平井和大斜度井的弯曲井段,钻柱存在较严重的磨损。钻柱的磨损与钻柱与井壁或套管间的接触力密切相关,有必要从理论和有限元的角度对钻柱与井壁间的接触力进行分析。于永南等^[1]提到了钻柱和井壁的接触力问题。陈浩等认为钻柱与井壁之间的接触力是造成套管磨损的重要原因之一^[2]。但有关弯曲井眼中钻柱和井壁的接触力与哪些因素有关的

研究未见报道。为此,笔者采用等曲率井眼中钻柱的理论和有限元分析方法,对实际井眼条件下的钻柱受力进行分析计算。

1 钻柱与井壁间接触力的理论分析

1.1 钻柱的分析模型

取井眼内一段钻柱为研究对象,其上作用有均布的重力,假设在钻柱的端部作用有轴向力,在重力

收稿日期:2006-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50234030)

作者简介:闫相祯(1956-),男(汉族),教授,博士生导师,从事石油机械设计及油气工程力学方面的研究。

和轴向力的共同作用下,钻柱紧贴于井壁的一侧。钻柱在井眼中的变形受井眼空间的限制,假定井眼曲线是光滑的,井壁是刚性的,与井眼轴线平行,井眼横截面是圆形的。因此可以将钻柱看成是一个变形受井筒限制的弹性梁,忽略钻井液^[3]以及井壁摩擦的影响。假设应力—应变保持线弹性关系。

以井眼曲线的圆心 O 为原点建立坐标系(图1), i 轴沿着钻柱曲线变形的方向向右, j 轴铅直向下,假定轴向力以压力为正,拉力为负。由文献[4, 5]可知,忽略钻柱端部边界条件的影响后钻柱弯曲变形的微分方程为

$$-(EIu'')'' + (\lambda u')' + q = 0. \quad (1)$$

其中

$$\lambda = T - EI\kappa^2$$

式中, EI 为钻柱的弯曲刚度; κ 为井眼的曲率; T 为钻柱的轴力; q 为作用于钻柱的分布载荷。

将 λ 代入式(1)得

$$-EIu'''' + (T' - 2EI\kappa\kappa')u' + (T - EI\kappa^2)u'' + q = 0. \quad (2)$$

式(2)中,由于 T, κ 均为未知量,因此 T', κ' 不易得到。为简化计算,取常曲率的特殊情况,式(2)可简化为

$$-EIu'''' + T'u' + (T - EI\kappa^2)u'' + q = 0. \quad (3)$$

设 $u = (R + r)(\sin \theta i + \cos \theta j) = -(R + r)n$, 其中

$$r = \frac{d_h - d_c}{2}.$$

式中, R 为井眼轴线半径; r 为环空间隙; d_h 为井眼的直径; d_c 为钻柱的直径。

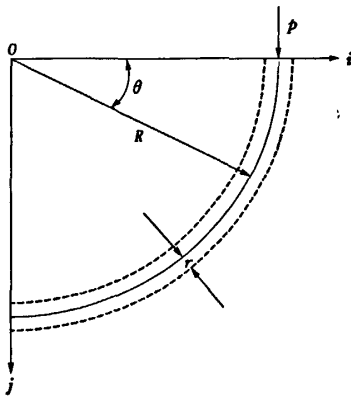


图1 钻柱受力图

根据曲率定义可知, $\kappa \approx \frac{1}{R + r}$, 由几何关系知

$$\theta' = k = \frac{1}{R + r}.$$

则

$$\begin{aligned} u' &= \tau, & u'' &= -\kappa n, \\ u''' &= -\kappa^2 \tau, & u'''' &= \kappa^3 n. \end{aligned}$$

将 u 的各阶导数代入式(3),得

$$-EI\kappa^3 n + T'\tau - (T - EI\kappa^2)\kappa n + q = 0. \quad (4)$$

作用在钻柱上的分布力为重力和钻柱与井壁间的接触力,将分布力分解为

$$q = (W_n - W_c \sin \theta)n + W_c \cos \theta \tau. \quad (5)$$

式中, W_c 为钻柱重力; W_n 为钻柱与井壁间的接触压力。则式(4)可化为

$$(-TK + W_n - W_c \sin \theta)n + (T' + W_c \cos \theta)\tau = 0, \quad (6)$$

则

$$W_n = W_c \sin \theta + T\kappa, \quad (7)$$

$$dT = -W_c \cos \theta ds. \quad (8)$$

式中, ds 为所取钻柱微段弧长。

1.2 理论计算结果分析

上面的分析是假设钻柱处于压缩状态下的,假定在轴向力和重力的共同作用下,钻柱紧贴于下井壁。当钻柱处于受拉的状态下,钻柱中的张力将会使钻柱和井壁之间的接触力变小,钻柱有可能脱离下井壁,而接触上井壁,此时,钻柱的曲率将变为 $\kappa = 1/(R - r)$ 。

当钻柱紧贴于井壁的一侧时,钻柱与井壁的接触力和钻柱的浮重、轴向力及曲率半径有关。理论分析表明,在以上假设条件下,钻柱和井壁的接触力与钻柱的刚度无关。从式(6)可以看出,沿曲线 τ 方向钻柱有加速度,这表明钻柱处在一个静力不平衡的状态,这是由于以上分析未考虑动态影响,仅考虑静力状态,因此所得到的结果与实际有一定的误差。

2 钻柱与井壁间接触力的非线性有限元分析

2.1 非线性有限元方程

对于弯曲井眼中的钻柱而言,钻柱的变形是有限的,应变是微小的,应力—应变保持线弹性关系,且满足叠加原理;同时为了使有限元方程有解,考虑了钻柱端部的边界条件^[6]。

以弯曲井眼内的钻柱为研究对象,钻柱在井眼内可视为一根细长的任意空间曲线梁。将钻柱沿轴线离散成许多直梁小单元。在此基础上,建立单元平衡方程为

$$[K_e]\{u\} = \{f\}.$$

式中, $[K_e]$ 为单元刚度矩阵; $\{u\}$ 为单元结点位移向量; $\{f\}$ 为单元结点力向量。

单元的结点位移向量为

$$\{u\} = \{u, u_y\} = [UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ];$$

单元的结点力向量为

$$\{f\} = \{f, f_y\} = [FX, FY, FZ, MX, MY, MZ].$$

在单元平衡方程的基础上,用结构力学的方法,将所有的单元刚度矩阵集成整体矩阵,其有限元基本方程组为

$$[K]\{U\} = \{F\}.$$

式中, $[K]$ 为整体非线性刚度矩阵; $\{U\}$ 为整体结点位移向量; $\{F\}$ 为整体结点力向量。

$$\text{或者 } [K]\{U\} = \{F^a\} + \{F^r\},$$

其中

$$[K] = \sum_{m=1}^N K_m^e; [K_e] = \int [B]^T [D] [B] dL,$$

$$\{F^r\} = \int \{\delta\}^T \{q\} dL.$$

式中, $[B]$ 为应变矩阵; N 为单元的个数; $\{F^r\}$ 为井壁对钻柱的反力向量; $\{F^a\}$ 为有浮重造成的载荷向量; $\{q\}$ 为浮重分布载荷向量; $\{\delta\}$ 为单元位移向量。

2.2 非线性有限元方程的求解

在钻柱的变形过程中,钻柱的整体刚度矩阵 K 不是一个常数,它成为施加位移载荷的函数。非线性响应可以用具有修正功能的线性迭代法来分析。在本文中所采用的是牛顿-拉普森方法。

$$[K^T]\{u\} = \{F\}.$$

式中, $[K^T]$ 为钻柱的切线刚度矩阵。

令

$$\Psi(U) = [K]\{U\} - \{F\},$$

设 $\Psi(U)$ 为具有一阶连续导数的函数,初始近似值为 $\{U\}^0$,第 n 次迭代的近似值为 $\{U\}^n$,由文献[7]可以得到如下的迭代式:

$$\{U\}^{n+1} = \{U\}^n - (K_r^{(n)})^{-1} \Psi(U^n).$$

式中, $K_r^{(n)}$ 为位移有限元分析中结构的切线刚度矩阵。

求解步骤如下:

(1) 设初始值 $\{U\}^0$, 令 $n = 0$;

(2) 计算切线刚度矩阵 $K_r^{(n)} = \frac{\partial \Psi}{\partial U} \Big|_{U=U^n}$;

(3) 计算不平衡量 $\Psi^n = \Psi(U^n) = K(U^n)U^n - F$;

(4) 解方程组 $K_r^{(n)} \Delta U^{(n)} + \Psi^n = 0$;

(5) 计算 $n+1$ 次迭代近似值 $\{U\}^{n+1} = \{U\}^n + \Delta U^{(n)}$;

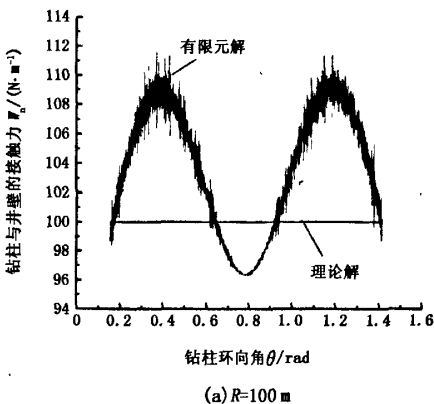
(6) 判断是否收敛,如果收敛,迭代结束,否则令 $n = n+1$,转求步骤(2)。

在实施以上的求解过程中,可以采用自编程序,本文中是采用 ANSYS 的 APDL 语言来实现的。

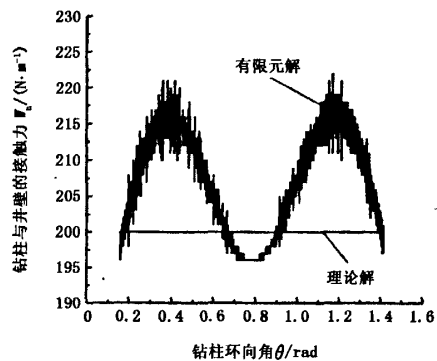
2.3 算例

某钻柱内径 $d = 0.112$ m, 外径 $D = 0.127$ m, 钻柱材料的弹性模量 $E = 210$ GPa, 密度 $\rho = 7800$ kg/m³。考察不同井眼曲率情况下重力和压力对钻柱与井壁间接触力的影响。

图2为假定钻柱的下端固定,不计钻柱自重,仅受上部作用压力 $p = 10$ kN 时,钻柱与井壁之间接触力的理论解和有限元解的对比曲线。



(a) $R=100$ m



(b) $R=50$ m

图2 上部压力为 10 kN 时钻柱与井壁间接触力随钻柱环向角的变化

由图2可知,在 $\theta = 0.4$ 和 $\theta = 1.2$ 时,解的相对误差达到 12%。由于算法和单元数量的限制,非

线性有限元解的精度比线性有限元要低^[8],认为这样的误差是可以满足现场应用的。从有限元解与理论解的对比来看,当钻柱紧贴于井壁的一侧时,钻柱和井壁的接触力与钻柱的刚度无关。模拟中发现,当井眼曲率半径减小到一定程度时,由于钻柱刚度的影响,钻柱将不再紧贴于井壁的一侧,此时理论分析的假设不再成立。可见,理论分析是有一定的局限性的。钻柱是否紧贴于井壁的一侧与钻柱的刚度、井眼的曲率半径以及作用在钻柱上的轴向力有关。

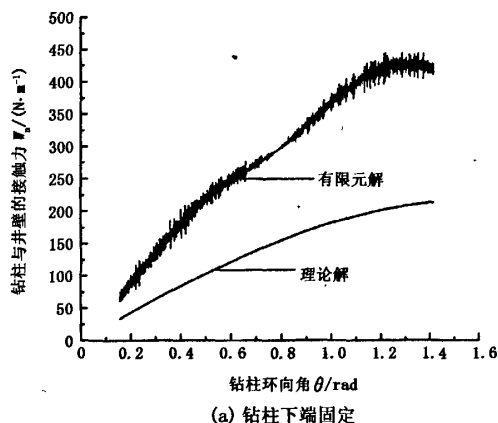
图 3 为只考虑重力的情况下,钻柱接触压力有限元解和理论解的对比曲线。

图 3(a) 中有限元解用二次曲线拟合为
 $W_n = -1.53643 + 488.024\theta - 123.279\theta^2$;

图 3(b) 中有限元解用二次曲线拟合为
 $W_n = -233.202 + 539.772\theta - 155.853\theta^2$ 。

理论解拟合为

$W_n = -8.44966 + 262.588\theta - 74.073\theta^2$ 。



由图 3(a) 以及拟合方程可知,有限元解求得的钻柱与井壁的接触力比理论解的数值大得多。这是因为,在理论解的情况下,钻柱将处于一个不平衡状态,接触力的一个分力与重力平衡,此时接触力必将大于理论解情况下的接触力,这是符合常理的。

由图 3(b) 看出,钻柱与井壁有限元解接触力的方向(正负)发生了变化,可知在这种边界条件下,钻柱不再保持与井壁的一侧接触。在这种情况下,理论解与非线性有限元解不再具有可比性,此时钻柱的刚度对钻柱与井壁间的接触力有影响。这里也验证了当轴向力变化时,钻柱将有可能不再紧贴于井壁的一侧,从而上面的理论分析结果将不再适用。在正常的生产过程中,由于钻柱中的轴向力相当大,除了中性点附近和井口处的一小段钻柱没有紧贴于钻柱的一侧外,绝大部分的钻柱都将紧贴于井壁的一侧,从这个方面来说,理论分析是有一定的实际意义的。

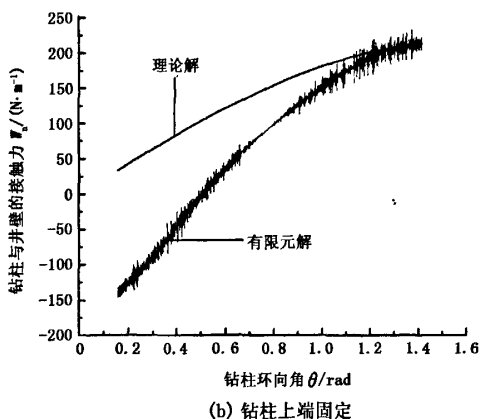


图 3 只考虑钻柱自重时钻柱与井壁间接触力随钻柱环向角的变化

3 结 论

(1) 当钻柱紧贴于井壁的一侧,在钻柱轴向压力一定的条件下,井眼曲率越大,钻柱与井壁的接触力也就越大。在理论分析过程中,由于使用了钻柱紧贴于井壁的一侧这一假设条件,使得理论分析的结果有一定的局限性。

(2) 在理论分析过程中得到的轴力对钻柱与井壁间接触力是有影响的。要求解由于重力所造成的钻柱与井壁间的接触力必须使用非线性有限元方法。

(3) 在正常的生产过程中,由于上部压力的作用,除了中性点附近的一段钻柱外,其余部分将紧贴于井壁的一侧,可以用理论方法计算钻柱与井壁间

的接触力。

(4) 与理论分析相比,非线性有限元分析方法可以用来对实际井眼中的钻柱进行受力与变形分析,计算钻柱与井壁间的接触力。

参考文献:

- [1] 于永南,韩志勇,路永明. 弯曲井眼中柔性钻柱的屈曲问题[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1997, 21(6): 32-34.
 YU Yong-nan, HAN Zhi-yong, LU Yong-ming. Buckling of flex-stem in curved well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(6): 32-34.

(下转第 113 页)

- ty-improving polypropylene fiber concrete and its application [J]. Jilin Water Conservancy, 2000, 9:7-10.
- [15] WANG Yan-hui. Flow of fiber-reinforced cement slurries at elevated temperatures[D]. Columbia: Columbia University, 2001.
- [16] 步玉环,李玉海,王瑞和. 碳纤维水泥配伍性试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(6): 41-48.
- BU Yu-huan, LI Yu-hai, WANG Rui-he. Experimental study of compatibility between carbon fiber and cement [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 41-48.
- [17] 易志坚,杨庆国,李祖伟,等. 基于断裂力学原理的纤维砼阻裂机理分析[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(6): 43-45.
- YI Zhi-jian, YANG Qing-guo, LI Zu-wei, et al. Use of fracture mechanics concept to interpret crack resistance behavior of fiber reinforced concrete [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(6): 43-45.

(编辑 修荣荣)

(上接第94页)

- [2] 陈浩,刘承杰,刘清友,等. 套管柱与钻柱间侧向力的分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 63-65.
- CHEN Hao, LIU Cheng-jie, LIU Qing-you, et al. An analysis of the lateral force between casing string and drill stem[J]. Nature Gas Industry, 2001, 21(4): 63-65.
- [3] 赵国珍,龚伟安. 钻柱力学基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- [4] ROBERT F, MITCHELL, LANDMARK. A buckling criterion for constant-curvature wellbores[R]. SPE 57896, 1999.
- [5] WEI Yong-qiu. Effect of drill pipe/coiled tubing initial configuration on contact force[R]. SPE 52189, 1999.
- [6] 陈浩,刘承杰. 大位移井套管柱磨损的探讨[J]. 石油矿场机械, 2002, 31(1): 7-9.
- CHEN Hao, LIU Cheng-jie. A discussion on the casing wear in extended reach well [J]. Oil Field Equipment, 2002, 31(1): 7-9.
- [7] 苏义脑. 水平井眼轨道控制[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [8] 凌道盛,徐兴. 非线性有限元及程序[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2000.

(编辑 沈玉英)

中国石油大学(华东)石油工程学院 19 项科研成果通过鉴定

山东省科技厅分别组织油气田开发学科和油气井工程学科鉴定委员会对中国石油大学(华东)石油工程学院科研项目进行鉴定。其中,油气田开发学科鉴定委员会以中国科学院院士郭尚平为主任委员,油气井工程学科鉴定委员会以中国工程院院士苏义脑为主任委员。在通过鉴定的 19 项科研项目当中,有 3 项达到国际领先水平,13 项达到国际先进水平,3 项达到国内领先水平。

在通过鉴定的 19 项科研成果中,姚军主持完成的“碳酸盐岩缝洞型介质流动机理研究及其应用”等 3 项科研成果达到国际领先水平;徐依吉主持完成的“胶乳防气窜水泥浆体系的研究”等 13 项科研成果达到国际先进水平;步玉环主持完成的“提高易渗漏小间隙井固井质量技术”等 3 项科研成果达到国内领先水平。以上科技成果标志着中国石油大学(华东)石油工程学院的科研水平又迈上了一个新台阶,部分领域已处于国际前沿水平。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)