

文章编号:1673-5005(2009)06-0052-05

考虑自重的斜井钻柱稳定性

唐波¹, 王敏生^{1,2}

(1. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017; 2. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 钻柱轴向力是井眼倾角、钻柱摩擦系数及钻柱浮重的函数, 将此函数代入斜井钻柱挠曲线方程, 并采用无穷级数法求解, 确定钻柱长度系数与临界屈曲压力系数之间的关系。结果表明: 当钻柱长度系数增加时, 临界屈曲压力系数趋于常数; 钻进过程中钻柱很容易发生屈曲, 在进行钻柱摩阻扭矩分析时, 考虑钻柱的屈曲很有必要。

关键词: 斜井; 钻柱; 屈曲; 临界载荷

中图分类号: TE 921 **文献标识码:** A

Stability of drilling string considering gravity in inclined well

TANG Bo¹, WANG Min-sheng^{1,2}

(1. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257017, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The axis load is function of angle of inclination, frictional coefficient and weight of drill string in drilling fluid. The function was applied to the flexure equations of drilling string and solved by infinite series method. And the relationship between the coefficient of string length and coefficient of critical buckling pressure was determined. The results show that the coefficient of critical buckling pressure will be a constant if the coefficient of string length increases. The buckling will easily occur while drilling, so it is necessary to calculate the buckling during calculating the torque and drag of string.

Key words: inclined well; drilling string; buckling; critical load

美国钻柱力学专家鲁宾斯基(Lubinski)用解析法对直井中钻柱的屈曲问题进行了二维平面分析^[1], 为钻柱力学研究奠定了基础, 此后他对钻柱及管柱的屈曲又做了大量的研究工作^[2,3]; Paslay等^[4,5]利用能量法分析了重力作用下斜井中管柱的稳定性; 崔孝秉等^[6]进行了以轴向载荷为轴向坐标函数的分析, 建立了直井管柱屈曲的挠曲线方程, 并采用贝塞尔函数对此方程进行求解; 署恒木^[7]用无穷级数法求解了直井中钻柱挠曲线方程。其他学者也就钻柱的稳定性做了大量研究工作^[8-10]。前人均在理论上对钻柱屈曲进行了探讨, 但存在以下问题: 轴向力要么假设成恒定值, 要么是仅与重力相关的轴向力函数, 没有考虑斜井中井壁施加给钻柱的轴向力。在实际钻井施工过程中分析钻柱屈曲主要是针对大位移井、大斜度井及水平井, 斜井与直井不同,

斜井中钻柱与井壁下侧相接触, 轴向力不仅受井斜变化的影响, 还由于当钻柱发生屈曲时, 钻柱有向下滑动的趋势, 因此还要受到摩擦力的影响。笔者将这些因素考虑到轴向力函数中, 代入钻柱的挠曲线方程, 并采用无穷级数法分析并讨论斜井中的钻柱稳定性问题。

1 力学模型

假设: ①钻柱与井壁下侧全接触; ②接触为刚性接触; ③不考虑钻柱动载影响; ④钻头处为固支, 井口允许轴向滑动。

建立 $oxys$ 坐标系, 其中井口为坐标原点 o , 以井眼向下方向为 s 方向, 在井斜平面内垂直井眼向上为 y 方向, 满足右手螺旋确定 x 方向, 受力状态如图 1 所示。

收稿日期: 2009-08-29

基金项目: 国家重大专项项目(2008ZX05022); 胜利油田博士后基金项目(GKB0702)

作者简介: 唐波(1973-), 男(汉族), 四川安岳人, 工程师, 博士, 从事钻井工艺、钻柱力学研究。

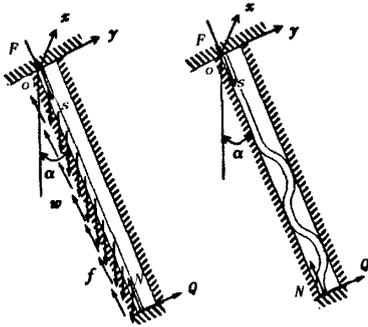


图1 斜井中钻柱屈曲

Fig.1 Buckling of drill string in inclined well

根据材料力学的挠曲线方程,并以轴向力为变量可以得到如下方程:

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 x}{ds^4} + F(s) \frac{d^2 x}{ds^2} + (w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha) \frac{dx}{ds} = 0, \\ EI \frac{d^4 y}{ds^4} + F(s) \frac{d^2 y}{ds^2} + (w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha) \frac{dy}{ds} = w \sin \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$F(s) = N - w(L - s) \cos \alpha + \mu w(L - s) \sin \alpha.$$

式中, E 为弹性模量, Pa; I 为转动惯量, kg/m^2 ; F 为轴向力, N; N 为井底支持力, N; w 为单位长度钻柱的浮重, N/m; L 为屈曲长度, m; s 为离井底高度, m; μ 为摩擦系数; α 为井斜角, ($^\circ$).

令

$$t = -\frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha} + L - s, \quad K = \frac{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}{EI},$$

则 $ds = -dt$, 式(1) 可以改写为

$$\begin{cases} \frac{d^4 x}{dt^4} - Kt \frac{d^2 x}{dt^2} - K \frac{dx}{dt} = 0, \\ \frac{d^4 y}{dt^4} - Kt \frac{d^2 y}{dt^2} - K \frac{dy}{dt} = \frac{w \sin \alpha}{EI}. \end{cases} \quad (2)$$

采用无穷级数解方程组(2), 令

$$P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n, \quad Q(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n t^n. \quad (3)$$

把式(3) 代入式(1), 同次项合并即有

$$\begin{cases} \sum_{n=5}^{\infty} n(n-1)(n-2)(n-3) a_n t^{n-4} + 24a_4 - \\ K \sum_{n=2}^{\infty} n^2 a_n t^{n-1} - Ka_1 = 0, \\ \sum_{n=5}^{\infty} n(n-1)(n-2)(n-3) b_n t^{n-4} + 24b_4 - \\ K \sum_{n=2}^{\infty} n^2 b_n t^{n-1} - Kb_1 = \frac{K \tan \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}. \end{cases}$$

根据同次项系数之和为零, 其系数间的关系为

$$\begin{cases} a_4 = \frac{K}{24} a_1, \\ a_{n+3} = \frac{Kn}{(n+1)(n+2)(n+3)} a_n, \\ 24b_4 - Kb_1 = \frac{K \tan \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}, \\ b_{n+3} = \frac{Kn}{(n+1)(n+2)(n+3)} b_n, \\ n = 2, 3, \dots, \infty. \end{cases}$$

改写成递推关系式有

$$\begin{cases} a_{3n+1} = \frac{K(3n-2)}{(3n-1)3n(3n+1)} a_{3n-2} = \\ a_1 K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)}, \\ a_{3n+2} = \frac{K(3n-1)}{3n(3n+1)(3n+2)} a_{3n-1} = \\ a_2 K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{3m(3m+1)(3m+2)}, \\ a_{3n+3} = \frac{3Kn}{(3n+1)(3n+2)(3n+3)} a_{3n} = \\ a_3 K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)}, \\ b_{3n+1} = \frac{K(3n-2)}{(3n-1)3n(3n+1)} b_{3n-2} = \\ \left(b_1 + \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)}, \\ b_{3n+2} = \frac{K(3n-1)}{3n(3n+1)(3n+2)} b_{3n-1} = \\ b_2 K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{3m(3m+1)(3m+2)}, \\ b_{3n+3} = \frac{3Kn}{(3n+1)(3n+2)(3n+3)} b_{3n} = \\ b_3 K^n \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)}, \\ n = 1, 2, \dots, \infty, \end{cases}$$

则位移函数为

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{n=1}^{\infty} a_{3n+1} t^{3n+1} + \\ \sum_{n=1}^{\infty} a_{3n+2} t^{3n+2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{3n+3} t^{3n+3}, \\ Y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{3n+1} t^{3n+1} + \\ \sum_{n=1}^{\infty} b_{3n+2} t^{3n+2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_{3n+3} t^{3n+3}. \end{cases}$$

假设:

$$\begin{cases} f_1(t) = t + \sum_{n=1}^{\infty} \left(K^n t^{3n+1} \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)} \right), \\ f_2(t) = t^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(K^n t^{3n+2} \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{3m(3m+1)(3m+2)} \right), \\ f_3(t) = t^3 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(K^n t^{3n+3} \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)} \right), \end{cases}$$

则其导数为

$$\begin{aligned} f'_1(t) &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+1)K^n t^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)} \right), \\ f'_2(t) &= 2t + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+2)K^n t^{3n+1} \times \right. \\ &\quad \left. \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{(3m)(3m+1)(3m+2)} \right), \\ f'_3(t) &= 3t^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+3)K^n t^{3n+2} \times \right. \end{aligned}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & f_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) & f_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) & f_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) \\ 0 & f'_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) & f'_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) & f'_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L\right) \\ 1 & f_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) & f_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) & f_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) \\ 0 & f'_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) & f'_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) & f'_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) \end{bmatrix}$$

$$a = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3]^T,$$

$$b = \left[b_0 \ b_1 + \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \ b_2 \ b_3 \right]^T.$$

由于 a, b 中的向量各自不能全为零, 则有

$$|P| = 0.$$

如果令

$$\begin{cases} f_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = -\eta K^{-1/3} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)} \right) \right), \\ f_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = \eta^2 K^{-2/3} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{3m(3m+1)(3m+2)} \right) \right), \\ f_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = -\eta^3 K^{-1} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)} \right) \right) \\ f'_1\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+1)(-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m-2}{(3m-1)3m(3m+1)} \right), \\ f'_2\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = -\eta K^{-1/3} \left(2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+2)(-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m-1}{3m(3m+1)(3m+2)} \right) \right), \\ f'_3\left(-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}\right) = \eta^2 K^{-2/3} \left(3 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n+3)(-\eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)} \right) \right). \end{cases}$$

$$\prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m+1)(3m+2)(3m+3)}).$$

于是有

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + a_3 f_3(t), \\ Y(t) = b_0 + \left(b_1 + \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) f_1(t) + \\ b_2 f_2(t) + b_3 f_3(t). \end{cases}$$

边界条件: 两端的转角和挠度都为零, 即

$$\begin{aligned} X(t) \Big|_{t=-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L} &= 0, \quad X(t) \Big|_{t=-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}} = 0, \\ Y(t) \Big|_{t=-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha} + L} &= 0, \quad Y(t) \Big|_{t=-\frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}} = 0. \end{aligned}$$

写成矩阵形式为

$$Pa = 0, \quad Pb = 0. \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} L = \xi \sqrt[3]{\frac{EI}{(w \cos \alpha - \mu \sin \alpha)}}, \\ N = \eta \sqrt[3]{EI(w \cos \alpha - \mu \sin \alpha)^2}, \end{cases} \tag{5}$$

$$\text{则 } \xi = K^{1/3} L, \eta = K^{1/3} \frac{N}{w \cos \alpha - \mu \sin \alpha}.$$

式(4)中的各项可以简化为

$$\begin{cases} f_1\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = (\xi - \eta) K^{-\frac{1}{3}} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m - 2}{(3m - 1)3m(3m + 1)}\right)\right), \\ f_2\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = (\xi - \eta)^2 K^{-\frac{2}{3}} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m - 1}{3m(3m + 1)(3m + 2)}\right)\right), \\ f_3\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = (\xi - \eta)^3 K^{-1} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m + 1)(3m + 2)(3m + 3)}\right)\right), \\ f'_1\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n + 1)(\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m - 2}{(3m - 1)3m(3m + 1)}\right), \\ f'_2\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = (\xi - \eta) K^{-\frac{1}{3}} \left(2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n + 2)(\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m - 1}{3m(3m + 1)(3m + 2)}\right)\right), \\ f'_3\left(L - \frac{N}{w \cos \alpha - \mu w \sin \alpha}\right) = (\xi - \eta)^2 K^{-\frac{2}{3}} \left(3 + \sum_{n=1}^{\infty} \left((3n + 3)(\xi - \eta)^{3n} \prod_{m=1}^n \frac{3m}{(3m + 1)(3m + 2)(3m + 3)}\right)\right). \end{cases}$$

式中, ξ 为长度系数; η 为压力系数。

对于方程 $|P| = 0$, 只能进行数值求解, 取不同的长度系数 ξ (钻柱不同长度时) 可求解出不同的压力系数 η , 而压力系数 η 解的个数取决于所取多项式的次数 n , 最小的实数解即为发生屈曲时的临界压力系数 η_{cr} , 并按式 (5) 可求出 N_{cr} 。临界钻压 R_{cr} 为

$$R_{cr} = \frac{N_{cr}}{\cos \alpha}.$$

如果钻压超过此临界钻压, 钻柱就会发生屈曲。同样可求出钻进时的临界钩载 T_{cr} (不计大钩等附件质量, 并以压为正) 为

$$T_{cr} = N_{cr} - wL(\cos \alpha - \mu \sin \alpha).$$

如果钩载小于此临界钩载, 钻柱就会发生屈曲。

在实际施工中采用试算法, 分别取不同的长度系数, 根据其钻具结构、井斜等参数进行试算, 得到与设计斜井段长度相近的长度系数, 再依此长度系数值确定临界压力系数、临界钻压、临界钩载等所需参数。

2 结果分析

如果取多项式的次数 n 为 30, 长度系数 ξ 与临界压力系数 η_{cr} 的关系曲线如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 在长度系数较小时, 临界压力系数急剧下降, 随着长度系数的增加, 临界压力系数下降幅度减小, 最后趋于恒定。

值得注意的是, 长度系数 ξ 不同时, 钻柱自重对临界压力系数 η_{cr} 的影响是不一样的 (见图 2 中长度系数从 1 到 10 局部放大部分)。

从局部放大图分析可知: 当长度系数很小 (1 ~ 2) 时, 如果钻柱要发生屈曲, 钻柱自重相对轴向力影响较小; 随着长度系数的增加, 钻柱自重对临界压力系数的影响会迅速增加, 当长度系数 ξ 为 3 ~ 4 时, 曲线斜率迅速增大, 但当长度系数进一步增加

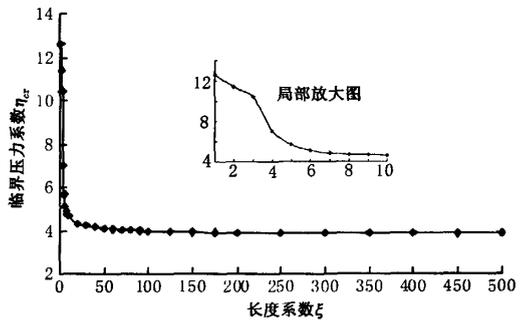


图 2 长度系数与临界压力系数的关系曲线
Fig. 2 Relation between length coefficient and critical pressure coefficient

时, 钻柱自重对临界压力系数 η_{cr} 的影响逐渐减小, 这是因为钻柱要发生屈曲, 首先是从底部开始, 在此部分之上钻柱的自身质量已转化为集中轴向力作用在将要发生屈曲的部分。

取如下参数: 钻柱外径 $D = 0.127$ m, 钻柱内径 $d = 0.10116$ m, 钻柱弹性模量 $E = 210$ GPa, 钻柱的浮重 $w = 0.250$ kN/m, 井斜角 $\alpha = 10^\circ$, 井壁与钻柱的摩擦系数 $\mu = 0.25$ 。计算出的临界压力系数、钻柱长度、临界屈曲力及临界钩载见表 1。

表 1 中数据说明, 当钻柱长度超过一定值时, 其屈曲载荷趋于一个定值, 此值在实际钻井工程中是很容易达到的工况, 即在钻进过程中极易发生屈曲, 在分析钻柱摩擦阻时, 考虑屈曲是必要的。

长度系数本身受井斜角、钻井流体密度、摩擦系数、钻柱的几何特性等因素影响, 但当长度系数一定时, 其临界压力系数是一定的, 因此这些参数都通过改变长度系数来影响临界压力系数。

并不是所有较长钻柱仅在自重的作用下都会发生屈曲, $\mu > \tan \alpha$ 是钻柱在没有附加轴向力条件下发生屈曲的必要条件。

表1 钻柱屈曲临界载荷

Table 1 Critical load of drill-string buckling

长度系数 ξ	临界压力系数 η_{cr}	钻柱长度 L/m	临界屈曲力 N_{cr}/kN	临界钩载 T_{cr}/kN
1	12.5922	18.952	56.167	51.706
2	11.3992	37.905	50.845	41.924
3	10.4292	56.857	46.519	33.137
4	7.0272	75.810	31.344	13.503
5	5.6762	94.762	25.318	03.016
6	5.1150	113.714	22.815	-03.947
7	4.8781	132.667	21.758	-09.465
8	4.7690	151.619	21.272	-14.412
9	4.7086	170.572	21.002	-19.141
10	4.6685	189.524	20.824	-23.781
20	4.3277	379.048	19.303	-69.905
30	4.2412	568.572	18.918	-114.895
40	4.1677	758.096	18.590	-159.827
50	4.1149	947.620	18.354	-204.667
60	4.0758	1137.144	18.180	-249.446
70	4.0459	1326.668	18.046	-294.184
80	4.0222	1516.192	17.941	-338.894
90	4.0031	1705.717	17.856	-383.583
100	3.9874	1895.241	17.786	-428.257
125	3.9579	2369.051	17.654	-539.900
150	3.9375	2842.861	17.563	-651.501
175	3.9225	3316.671	17.496	-763.079
200	3.9111	3790.481	17.445	-874.641
250	3.8947	4738.101	17.372	-1097.735
300	3.8836	5685.722	17.323	-1320.806
350	3.8755	6633.342	17.286	-1543.864
400	3.8694	7580.962	17.259	-1766.912
450	3.8646	8528.583	17.238	-1989.955
500	3.8608	9476.203	17.221	-2212.993

3 误差分析

由于该方法是采用级数无穷逼近实际的挠曲线方程,在实际计算分析中只能取有限的次数 n ,由此会引起误差,图3为 n 取不同值时的 $n_{cr} \sim \xi$ 关系曲线。图3表明,随着多项式所取次数的增加,对于同样长度系数 ξ ,临界压力系数 η_{cr} 增加,但误差逐渐减小。图4为多项式取不同次数时的相对误差。

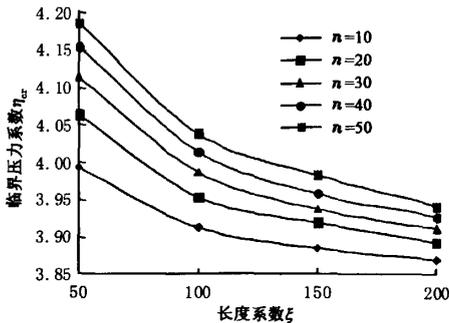


图3 多项式次数影响

Fig.3 Influence of polynomial order

由此可见,当取 $n = 30$ 时,按此法计算的相对误差小于1%。如果多项式的次数取得过高,在式(4)计算中的次数将很高,其中间计算值会超过

10^{307} ,这是常用数学软件数值上限,因此在计算时取 $n = 30$ 的精度已经足够。

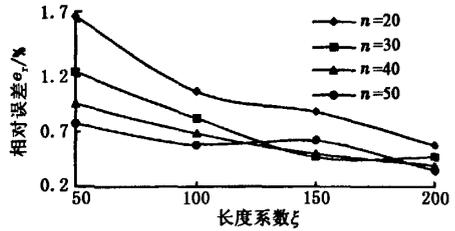


图4 不同次数多项式相对误差

Fig.4 Relative error of different order polynomial

4 结论

- (1) 钻柱在钻进过程中极易发生屈曲。
- (2) 当钻柱长度系数增大时,钻柱临界屈曲力系数趋于一个常数,此常数与钻柱的结构参数、井眼倾角、钻井流体密度、摩擦系数无关。
- (3) 本文中方法为钻柱摩擦、扭矩分析提供了理论依据和计算方法。

参考文献:

- [1] LUBINSKI A. A study of the buckling of rotary drilling strings[J]. Drilling and Production Practice, 1950:178-214.
- [2] LUBINSKI A. Influence of tension and compression on straightness and buckling of tubular goods in oil wells [R]. API Section IV(1951), 1951.
- [3] LUBINSKI A. Maximum permissible doglegs in rotary boreholes[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961,13(2):175-194.
- [4] PASLAY P R, BOGY D B. The stability of circular rod lateral constrained to be in contact with an inclined circular cylinder[J]. J Appl Mech, 1964,31(3):605-610.
- [5] DAWSON R, PASLAY P R. Drillpipe buckling in inclined holes [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984,36(10):1734-1738.
- [6] 崔孝秉,张宏,宋治.套管柱稳定性问题研究[J].石油学报,1998,19(1):114-118.
CUI Xiao-bing, ZHANG Hong, SONG Zhi. A research on casing string stability of oil well [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998,19(1):114-118.
- [7] 署恒木.自重作用下长管柱稳定性分析[J].青岛大学学报,2000,15(2):63-66.
SHU Heng-mu. Analysis of buckling for long pipe string under gravity [J]. Journal of Qingdao University Engineering & Technology, 2000,15(2):63-66.

(下转第60页)

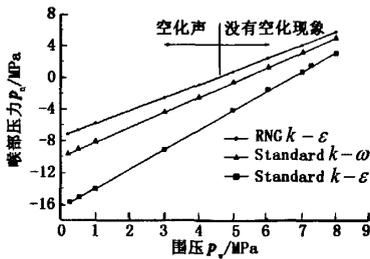


图7 不同模型下沿射流中心线的最小喉部压力
Fig.7 Minimum pressure in throat on jet central line by different models

4 缩放型喷嘴内部空化现象数值模拟

选用 RNG $k-\epsilon$ 模型对缩放型喷嘴内部射流场进行数值模拟。不同压力下的数值模拟结果表明,缩放型喷嘴喉部是一个低压区,随喉部压力的降低压差逐渐增大(图8)。由于压差的增加可以加快空泡的成长,增加空泡数^[10],所以缩放型喷嘴的几何结构提高了射流的空化效果。

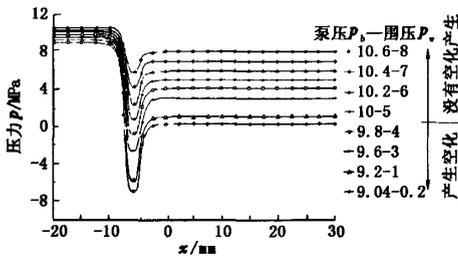


图8 不同压力差下沿射流中心线的压力分布
Fig.8 Pressure profiles on jet central line for different pressure difference

5 结论

- (1) RNG $k-\epsilon$ 模型适合用于数值计算缩放型喷嘴产生的空化射流场。
- (2) 缩放型喷嘴的扩展段能使喷嘴喉部产生一个低压区,加快空泡的成长,增加了空泡数,使其空化效果得到了较好的提高。

参考文献:

- [1] 卢义玉,李晓红,向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 8(26): 1233-1237.
LU Yi-yu, LI Xiao-hong, XIANG Wen-ying. Rock erosion mechanism of cavitating water jets [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 8(26): 1233-1237.
- [2] 蒋明虎,刘晓敏,王尊策,等. 静态水力旋流器压力场分布测试研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 104-107.
JIANG Ming-hu, LIU Xiao-min, WANG Zun-ce, et al. Test of pressure field distribution in static hydro-cyclones [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5): 104-107.
- [3] 李福田,倪浩清. 工程湍流模式的研究开发及其在应用[J]. 水利学报, 2001, 5(5): 22-23.
LI Fu-tian, NI Hao-qing. Application and development of turbulence model for engineering practice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 5(5): 22-23.
- [4] MANLAPAZ R L, CHURCHILL S W. Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch [J]. Chem Eng Commun, 1980, 177(7): 57-58.
- [5] 崔海清,刘希圣. 非牛顿流体偏心环形空间螺旋流的速度分布[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 76-83.
CUI Hai-qing, LIU Xi-sheng. Velocity distribution of helical flow of non-Newtonian fluid in eccentric annuli [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 76-83.
- [6] 郑丽丽,范维澄. 撞击射流流场计算 $k-\epsilon$ 和 ASM 湍流模型及 PLDS 和 QUICK 差分格式的比较[J]. 水动力学研究与进展, 1988, 13(14): 1-7.
ZHENG Li-li, FAN Wei-cheng. Calculation of a plane turbulence impinging jet [J]. Journal of Hydrodynamics, 1988, 13(14): 1-7.
- [7] 王福军. 计算流体动力学——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 63-108.
- [8] 朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998: 19-32.
- [9] 崔漠慎,孙家骏. 高压水射流技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993: 7-19.
- [10] HICKLING R, PLESSET M S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water [J]. Physics Fluids, 1964, 12(7): 7-14. (编辑 李志芬)

(上接第 56 页)

- [8] 于永南,韩志勇. 斜直井眼中钻柱屈曲的研究[J]. 力学与实践, 1997, 19(2): 17-19.
YU Yong-nan, HAN Zhi-yong. A study on the drillstring buckling in inclined wellbores [J]. Mechanics and Practice, 1997, 19(2): 17-19.
- [9] 高宝奎,高德利. 斜直井眼中钻柱屈曲的可能性[J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(5): 6-11.
GAO Bao-kui, GAO De-li. Probability of the drillstring-

- buckling in inclined wellbores [J]. Oil Drilling Technology, 1995, 17(5): 6-11.
- [10] 范慕辉,焦永树,蔡宗熙. 斜井中钻柱的稳定性研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 167-172.
FAN Mu-hui, JIAO Yong-shu, CAI Zong-xi. A study on the stability of tubular in inclined wellbores [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 167-172. (编辑 李志芬)