

# 注水管柱下放摩阻计算

李治森 董 峰<sup>1</sup> 刘巨保

(大庆石油学院,大庆,163318;大庆油田有限责任公司第二采油厂<sup>1</sup>,大庆 163414)

**摘要** 注水管柱能否靠自重下放到井底是一个十分重要的技术问题。考虑管柱与井壁的初始间隙和随机接触摩擦阻力,建立了注水管柱力分析模型,采用“多向接触摩擦间隙元”理论对该模型进行了接触非线性力学分析。经大庆油田3口井的计算分析表明,注水管柱最大累计摩阻为0.74 kN,靠管柱自重完全可以下放到井底。

**关键词** 注水管柱 有限元法 间隙元 摩阻

**中图法分类号** TE341; **文献标志码** A

注水管柱位于几千米深的井眼内,在不同工作过程都会有受力变形<sup>[1,2]</sup>,下井时与井壁产生大面积接触,在接触处不仅有接触反力,而且存在相应的摩擦阻力,如果这种摩擦阻力过大,将可能使注水管柱下不到井底,所以注水管柱的摩擦阻力分析与井口悬重计算是一个极为重要的问题。井眼曲线是一条任意变化的空间螺旋线,而管柱和井壁间大面积的随机接触属于接触非线性问题,准确计算注水管柱的摩擦阻力是突出的难点。采用整体管柱力学模型和多向接触摩擦间隙元<sup>[3,4]</sup>的方法,对注水管柱的摩阻和受力变形状态进行分析、计算,为解决上述问题提供理论依据。

## 1 整体管柱的力分析模型

取整体管柱为研究对象,把井眼轴线看作为一条任意曲率的空间螺旋线,其形状可由实际井斜和方位角加以确定,并假定:

- (1)井壁是刚性的,井径可随意变化;
- (2)注水管柱变形前的轴线与井眼轴线重合,

并与井壁存在初始间隙,变形后的注水管柱可能在某些部位与井壁接触;

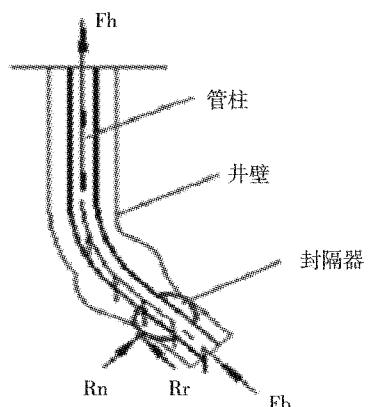


图1 整体管柱力学分析模型示图

(3)忽略一切动载荷作用。

综上所述,管柱力学模型是一个载荷简单、结构变化大、边界条件不定的非线性力学模型,拟采用有限元法对该模型进行数值求解,从而得到管柱任意截面处的内力和变形值、管柱与井壁的接触分布状态。

## 2 注水管柱力分析的间隙元理论

先采用一般的有限元法,将管柱沿轴线离散为若干空间梁单元,然后在每个节点上设置一个“多向

2009年12月1日收到 国家自然科学基金(10672037)资助  
第一作者简介:李治森(1976—),黑龙江省五常市人,讲师,硕士/博士研究生,研究方向:油气田管柱力学与井下工具研制。E-mail:lzm-dq@163.com。

接触间隙元”,通过这些间隙元把管柱与井壁联系起来。研究它们之间的初始间隙、接触状态、接触反力和摩擦阻力的大小及分布规律,就可以求出管柱的变形、内力和应力的大小、分布规律。

## 2.1 空间梁单元

图1为注水管柱力学分析模型图,根据虚功原理,任一梁单元的虚功方程可表示为:

$$\int_{V_e} \delta \varepsilon^T dV = \int_{V_e} \delta f^T P_v dV + \delta d_e^T P_e \quad (1)$$

式(1)中,  $\varepsilon$  为单元应变,  $\sigma$  为单元应力,  $f$  为单元位移,  $P_v$  为单元体力向量,  $P_e$  为单元结点力向量, 经推导可得梁单元平衡方程:

$$K^e d_e = F_e \quad (2)$$

经过所有单元组装,可得管柱的总体平衡方程

$$K_0 d = F \quad (3)$$

式(3)中,  $K_0$  为管柱总体刚度矩阵,  $d, F$  分别为管柱的结点位移向量和结点力向量。

式(3)对于一般的空间刚架结构能够进行求解,但对于管柱这类细长杆件还不能求解。这是因为公式推导没有考虑井壁约束作用,即几乎没有抗弯能力的细长管柱在各种外载荷作用下总体刚度矩阵可能成为奇异阵,致使方程(3)无法求解。另外,管柱与井壁的接触沿井深和井眼圆周方向呈随机分布状态,用混合法或直接迭代法求解都比较困难。为此,在管柱梁单元最大横向位移处设计和推导了“多向接触摩擦间隙元”,简称间隙元,该间隙元不仅能正确、方便地描述管柱与井壁的接触摩擦状态,还能使细长杆件总刚度矩阵的奇异性得到解决。

## 2.2 多向接触间隙元

多向接触摩擦间隙元是一种虚拟的由液体或气体组成的厚圆环单元,其外边界与井壁相接,内边界与管柱相接,见图2。间隙元的物理性质是当管柱未与井壁接触时,抗压刚度趋近于零,不影响管柱上下运动,也没有接触反力和摩擦阻力。当管柱与井壁接触时,其抗压刚度变得非常大,能阻止管柱与井壁的互相侵入,但允许管柱沿井壁上下滑动。因此,多向接触间隙元是一种可变刚度的非线性单元,能有效地模拟管柱与井壁的接触状态。

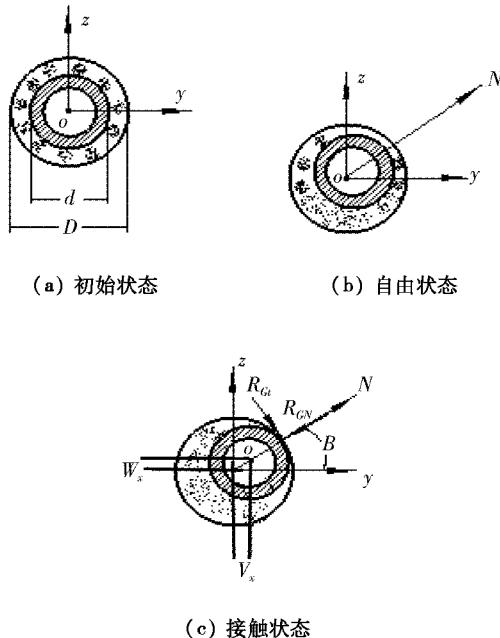


图2 间隙元位变图

间隙元的引入使钻柱梁单元与井壁连接成一个连续体,由虚功原理知,当注水管柱在任一平衡位置上产生一虚位移,各种单元内力在虚位移上做的功一定与外载荷在虚位移上做的功相等。式(1)已经描述了梁单元的虚功方程,同样也可以建立间隙元的虚功方程,推导其平衡方程,并与梁单元平衡方程合并,得到注水管柱双重非线性力学分析的平衡方程式。当注水管柱梁单元结点产生任一虚位移  $\delta d_e$  时,间隙元的虚功方程为

$$\delta f_G^T R_{GN} = \delta d_e^T R_G^e \quad (4)$$

可得梁单元与间隙元组合后的单元平衡方程

$$(K^e + K_G^e) d_e = F_e + R_G^e \quad (5)$$

经过所有梁单元和间隙元的坐标转换和拼装,可得注水管柱接触非线性静力分析的总体平衡方程式

$$(K_0 + K_G) d = F + R_G \quad (6)$$

在对非线性方程组(6)求解时,在同一迭代步内,不仅要完成间隙元的定解式判别和修改,还要完成注水管柱轴向载荷的判别和修改,直到这些条件全部满足,可由此解出管柱的广义位移,进而求出接触反力及相应的摩擦阻力。

### 2.3 间隙元的接触判别条件及定解方程

① 自由状态

$$\varepsilon_{GN} < 1.0 ; S_{G1} \in S.$$

② 刚性接触

$$\varepsilon_{GN} = 1.0 ; S_{G2} \in S.$$

③ 弹性接触

$$\varepsilon_{GN} \geq 1.0 ; S_{G3} \in S.$$

其中  $S_{G1}, S_{G2}, S_{G3}$  表示间隙元所在区域,  $S$  表示接触区域, 间隙元抗压刚度  $G_k$  与应变关系见图 3, 可见间隙元实际上是一个具有变化刚度的非线性单元。由式(6)求得的解一定要满足接触状态判别条件和定解方程。若不满足时要修正间隙元刚度和节点附加力重新求解, 直到得到正确解为止。

### 3 算例

根据上述理论编制了管柱受力变形及摩擦阻力的分析计算程序, 对大庆油田 3 口直井的管柱分别

在实钻井眼轨道内进行了分析计算, 由管柱摩阻力和强度分析计算结果进行了管柱通过能力评价。综合管柱通过能力评价结果, 为管柱设计和施工中部分工艺参数的确定提供了理论依据, 确保顺利施工。

表 1 列出了 3 口直井在实钻井深处的主要计算结果, 从表 1 中数据可见: 在管柱摩阻力分析中, 由于这 3 口井都是直井, 因此管柱上提摩阻力和下放摩阻力都比较小, 累计摩阻力最大值为 0.74 KN, 这些摩阻力都能够由管柱自重克服, 不会影响正常井下作业, 井下作业风险低; 在管柱强度计算中, 各种工作条件下管柱的本体最大应力为 81.45 MPa、最小安全系数为 4.65, 这些数据表明本井内的管柱具有足够的强度储备, 在正常条件下不会发生管柱失效事故, 综合管柱摩阻力和强度分析结果, 所设计钻具具有良好的通过能力, 在井下能够安全可靠作业。为此, 计算的结果基本上可以应用到施工中, 但应关注管柱摩阻力的变化, 也可以根据管柱摩阻力的变化来判断井下存在的风险和局部井眼轨道不光滑等

表 1 3 口直井管柱通过能力评价表

		计算参数	计算井名		
			X13-D2-32	X13-11-36	X13-22-P36
摩 阻 力	摩 上 提	计算摩阻力/N	-9.58	-13.80	-13.03
		累计摩阻/kN	-0.71	-0.74	-0.72
	摩 下 放	计算钩载/kN	93.50	91.86	89.74
		计算摩阻力/N	9.52	13.67	12.75
	强 度 分 析	累计摩阻/kN	0.70	0.73	0.71
		计算钩载/kN	91.86	90.29	88.51
强 度 分 析	强 上 提	本体(最大拉压应力/MPa)/(井深/m)	79.91/0	78.58/0	76.49/0
		本体(最大弯曲应力/MPa)/(井深/m)	2.41/291.05	3.29/288.90	3.33/303.74
	强 下 放	本体(最大初弯曲应力/MPa)/(井深/m)	1.21/426.05	1.75/270.90	1.72/267.74
		本体(最大当量应力/MPa)/(井深/m)	81.45/0	78.67/0	76.68/0
	分 析	本体最小安全系数/井深	4.65/0	4.82/0	4.94/0
		本体(最大拉压应力/MPa)/(井深/m)	78.51/0	77.23/0	75.43/0
	分 析	本体(最大弯曲应力/MPa)/(井深/m)	2.37/291.05	3.36/288.9	3.23/303.74
		本体(最大初弯曲应力/MPa)/(井深/m)	1.21/426.05	1.75/270.9	1.72/267.74
	分 析	本体(最大当量应力/MPa)/(井深/m)	80.01/0	77.32/0	76.68/0
		本体最小安全系数/井深	4.65/0	4.9/0	4.94/0

现象。此外,从表1可以看到3口井的计算结果规律基本一致,只是数值上有所不同,其管柱摩阻力、强度和通过能力都基本一致,都能满足施工要求,使井下作业风险降到最低。

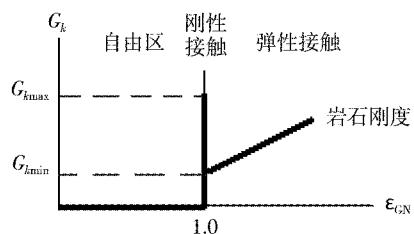


图3 间隙元应变和刚度关系

## 4 结论

1) 建立的注水管柱力分析模型和多向接触间隙元理论能够较准确地计算出注水管柱的随机接触

摩擦阻力和当量应力,为注水管柱的设计与施工提供了重要的理论依据和技术手段。

2) 根据注水管柱强度和摩阻力计算结果进行通过能力评价是可靠的,能够确保管柱具有足够的自重下放到井底,也能够确保管柱在井下储备足够的强度,不会发生管柱失效事故。

3) 该理论方法也可供其它水平井、大斜度定向井注水管柱设计和力学分析时使用。

## 参 考 文 献

- 1 马学勇,李军亮. 注水管柱不同过程受力分析. 石油天然气学报,2006;28(4):373—375
- 2 孙爱军,徐英娜,李洪冽,等. 注水管柱的受力分析及理论计算. 钻采工艺,2003;28(4):55—57
- 3 刘巨保. 间隙元法在钻柱接触非线性力学分析中的应用. 力学与实践,2003;4(25):45—47
- 4 刘巨保. 石油设备有限元分析. 北京:石油工业出版社,1996

## Friction Force Calculation of Water Injection String

LI Zhi-miao, DONG Feng<sup>1</sup>, LIU Ju-bao

(Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China;

No. 2 Production Company of Daqing Oilfield Engineering Co. Ltd<sup>1</sup>, Daqing 163414, P. R. China)

**[Abstract]** It is a very important technical question whether water injection string can rely on string weight to go through the well hole or not. Considering the gap and random contact between the string and the well wall, the mechanics analysis model of water injection string is established and nonlinear mechanics analysis is done by using “gap element of multi - direction contact and friction” theory. The analyzed result of three wells in Daqing Oil Field shows that the maximum cumulative friction of is 0.74 kN. It means that water injection string can put under the bottom of well relying on string weight.

**[Key words]** water injection string    finite element method    gap element    friction force