

无隔水管深水钻井作业管柱的力学分析

高德利¹, 张辉^{1,2}

1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249
2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

摘要 无隔水管深水钻井作业是深水钻井的关键环节之一, 管柱的力学行为十分复杂。本文阐述了无隔水管深水钻井管柱的纵横弯曲变形力学模型、纵向振动力学模型及无隔水管深水钻井送入管柱设计与强度校核方法等, 分析了作业管柱变形及运动的主要影响因素和规律, 提出了解决这类复杂工程问题的简化思路。结果表明, 作业管柱的轴向拉力过大或过小、海水深度大、平台偏移或升沉振动幅度过大以及海流流速快等因素对管柱的强度安全具有显著影响。在无隔水管深水钻井作业管柱强度设计与校核时, 应充分考虑管柱的作业工况及环境载荷的影响。

关键词 深水钻井; 钻井隔水管; 管柱力学; 送入管柱设计

中图分类号 TE52

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.04.004

Mechanical Analysis of Tubes in Deepwater Drilling Operation Without Riser

GAO Deli¹, ZHANG Hui^{1,2}

1. Key Lab of Petroleum Engineering in the Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract The tubular mechanical behavior is very complicated during the deepwater drilling operation without riser, which is one of the key technological problems in the deepwater drilling engineering. Therefore, it is important to study the tubular mechanical behavior under loading conditions in the drilling operation, the deepwater environment and the vessel movements for safety of the deepwater drilling operation without riser. The transverse and longitudinal bending deformations, the longitudinal vibration of the drilling tubular string and the landing string design method for the deepwater drilling operation without riser are discussed in this paper. The variations of the tubular string deformation and the longitudinal vibration are analyzed by considering the relevant influencing factors. Based on the above analysis, the complicated engineering problems related to the tubular mechanics in the deepwater drilling operation without riser are simplified to be considered in the actual design and control. The results show that it is dangerous for the tubular string in the deepwater drilling operation without riser to work under the conditions of high or low axial tension force, deep water, severe vessel offset or heave and high speed current. The operation modes and the environment loads should be taken into account for the tubular string design and the strength check in the deepwater drilling operation without riser.

Keywords deepwater drilling; drilling riser; tubular mechanics; landing string design

0 引言

中国深水海域蕴藏着丰富的油气资源, 无论对其进行勘探还是开采, 都离不开深水钻井作业。深水钻井作业包括无隔水管深水钻井作业和有隔水管深水钻井作业两个阶段。其中无隔水管深水钻井作业是深水钻井工程的主要特征, 包括喷射安装导管、钻表层井眼及下入表层套管等工程作业。

深水钻井与陆地钻井的作业环境有很大不同, 涉及风、浪、流等复杂影响因素。同时, 海洋钻井平台也不像陆地钻井平台那样具有良好的稳定性, 尤其是深水钻井工程常用的浮式钻井平台, 在环境载荷作用下通常会发生偏移、振动、摇摆等不同形式的复杂运动。在无隔水管深水钻井作业过程中, 送入管柱直接暴露在海水里, 在环境载荷及钻井平台运动的

收稿日期: 2011-07-22; 修回日期: 2012-02-01

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05026-001)

作者简介: 高德利, 教授, 研究方向为油气井力学与控制工程, 电子信箱: gaodeli@cup.edu.cn

作用下发生复杂变形,从而对深水钻井工程作业的安全性产生较大影响。研究无隔水管深水钻井作业管柱的力学行为,分析其在环境载荷及钻井平台运动等作用下的受力和变形状态,对于保证无隔水管深水钻井作业的安全可靠性具有重要意义^[1-5]。本文重点讨论无隔水管深水钻井作业管柱的力学行为与设计控制的基础问题。

1 无隔水管深水钻井作业管柱力学研究现状

在无隔水管深水钻井作业过程中,管柱的载荷情况和作业工况较为特殊。例如:在喷射安装导管作业过程中,送入管柱受波浪、海流力的作用发生纵横弯曲变形并传递到导管上,在导管顶端产生横向载荷和弯矩,可能使导管倾斜,影响导管的垂直安装;送入管柱上端与钻井船连接处为固支边界,且送入管柱不像隔水管一样通过施加顶部张紧力来减小其弯曲变形,因而送入管柱发生弯曲变形时将产生较大的弯曲应力,对管柱的强度安全造成威胁;在无隔水管的情况下,自钻井平台至海底的送入管柱不受隔水管或井眼的径向约束,当送入管柱的轴向拉力较小或受压时,在横向载荷的扰动下容易发生屈曲,严重的屈曲变形将导致管柱失效;在作业过程中,当顶驱装置上的升沉补偿系统不能对钻井平台的升沉运动进行有效补偿时,作业管柱将在平台运动的作用下发生纵向振动,随着水深的增加,管柱的纵向振动固有频率增大,若管柱的纵向振动固有频率接近平台的升沉运动频率,则与平台发生共振,产生相当大的轴向振动载荷,对作业管柱的安全造成较大威胁。

无隔水管深水钻井作业送入管柱在载荷及作业工况等方面的特殊性引起了国内外学者的广泛关注。Adams等^[6]介绍了基于钻柱静拉力的深水送入管柱设计方法,重点强调了钻杆接头及工具接头的选择。Breihan等^[7]和Jellison等^[8]研究了深水送入管柱的设计、检测及操作工艺等。Cantrell等^[9]进行了送入管柱的设计制造。Sathuvalli等^[10]指出,深水送入管柱通常需要承受极大的轴向载荷,并认为卡瓦挤毁是制约深水送入管柱作业能力的重要因素,给出了卡瓦挤毁载荷的计算新方法。Bradford等^[11]讨论了5种不同类型的送入管柱操作工具对钻杆的挤毁实验结果。Simpson等^[12]及Brock等^[13-14]介绍了几种具有高抗拉强度的钻杆,在这些钻杆的设计制造过程中,通过对接头部位进行必要的改进,使其具备极大的抗拉能力,可用作深水送入管柱。DeWayne等^[15-16]对深水钻井下套管作业过程中送入管柱在平台升沉运动作用下的纵向振动载荷计算方法进行了研究。

上述研究都认识到深水送入管柱在作业过程中受到的轴向载荷非常大,并针对这一特点对送入管柱的设计、制造及操作工艺进行改进,使之能够承受更高的轴向载荷。同时,对无隔水管深水钻井作业管柱的力学行为进行了研究,并形成了一套基于常规静拉力分析的深水钻井作业送入管柱的强度设计方法。但并未充分考虑无隔水管深水钻井作业的特

点,尤其是没有对无隔水管深水钻井作业工况及环境载荷对于管柱力学行为的影响进行全面分析。本文重点分析深水作业管柱的力学行为,进而形成一套考虑无隔水管深水钻井作业特点的送入管柱设计与强度校核方法。

2 无隔水管深水钻井作业管柱纵横弯曲变形计算

2.1 管柱的纵横弯曲变形模型

无隔水管深水钻井作业过程中,管柱受到轴向载荷与横向载荷的共同作用,如图1所示。假设管柱整体处于弹性变形状态,管柱的挠度相对其长度来说非常小,可将管柱简化为小挠度纵横弯曲变形梁柱问题。同时,不考虑管柱接头的影响,假设管柱分段后每段管体的性质具有均匀性。

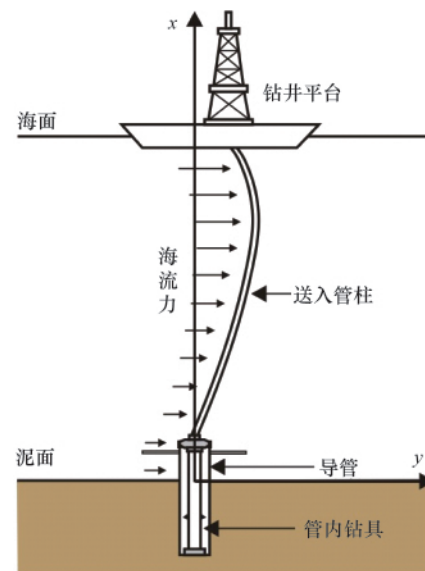


图1 无隔水管深水钻井作业管柱纵横弯曲变形示意图

Fig. 1 Transverse and longitudinal bending deformations of tubular strings under deepwater drilling conditions without riser

管柱受到的横向载荷仅考虑海流造成的海水拖拽力,在图1坐标系中取管柱上任意微元段 ds 进行分析,可得到管柱的纵横弯曲变形控制方程^[17]

$$[EI(x)y'']'' - [T(x)y']' = P(x) \quad (1)$$

其中, $EI(x)$ 为管段的截面抗弯刚度, $N \cdot m^2$; $T(x)$ 为管段的轴向载荷, N ; $P(x)$ 为管段受到的海水拖拽力, N 。

为保证纵横弯曲梁上的各单元在几何和物理性质上的连续性,其相邻两单元需满足位移 y 、转角 θ 、弯矩 M 和剪力 Q 的连续条件,即

$$\begin{cases} y_i(l_i) = y_{i+1}(0) \\ \theta_i(l_i) = \theta_{i+1}(0) \\ M_i(l_i) + \Delta M_i = M_{i+1}(0) \\ Q_i(l_i) + \Delta H_i = Q_{i+1}(0) - \Delta T_i y'_{i+1}(0) \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

另外,还需要满足管柱在不同工况下的边界条件。用加权残值法求解管柱的纵横弯曲变形控制方程,首先将管柱自下而上划分成 n 个单元,设单元试函数为 5 次多项式,即

$$y_i = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5$$

$$x \in [0, l_i] \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将单元试函数代入管柱的变形控制方程、连续条件及边界条件等关系式中,可得到模型求解的方程组。对方程组进行求解,即可求得各单元试函数的待定系数 $C_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4, 5)$,进而求出管柱任意位置的位移、转角、弯矩及剪力等。当单元长度取值足够小时,应用这种方法可以得到较高精确的计算结果。

2.2 管柱的纵横弯曲变形影响因素分析

以直径 127mm 钻杆(内径 108.6mm)作为送入管柱,对管柱的纵横弯曲变形影响因素进行分析研究。

2.2.1 海水深度的影响

假设送入管柱上下两端都为固支约束,分别选取送入管柱下端载荷为 0, 200, 400, 600, 800, 1000kN, 计算送入管柱在海流及平台偏移作用下的弯曲应力随海水深度(简称“水深”)的变化曲线。

(1) 海流的作用

如图 2 所示,在海流作用下,送入管柱下端的载荷越小,其顶端产生的弯曲应力越大。送入管柱顶端的弯曲应力随着水深的增大而增大,并且随着送入管柱下端载荷的增大,其顶端弯曲应力随水深的变化逐渐接近线性关系。

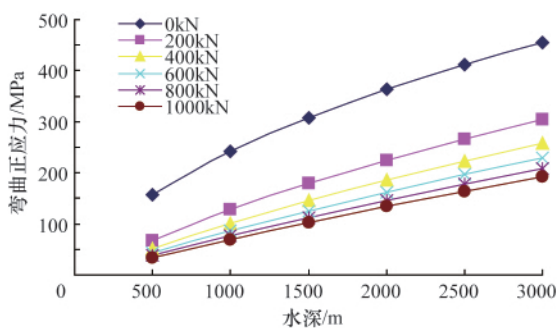


图 2 海流作用下送入管柱顶端弯曲应力随水深的变化关系

Fig. 2 Bending stress at the top of landing string vs water depth

(2) 平台偏移的作用

仅考虑平台偏移的作用时,假设海流为 0。在海洋作业中,通常用平台相对海底井口的偏移量与水深的百分比来描述平台的偏移情况。本文假设平台偏移量为水深的 1%,送入管柱顶端的弯曲应力随水深的变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可见,在水深和平台偏移量不变的情况下,送入管柱下端的轴向载荷越大,其顶端产生的弯曲应力越大。当平台偏移量与水深的比值为固定值时,送入管柱顶端的弯曲应力随着水深的增加而逐渐增大,并且随着管柱轴向载荷的

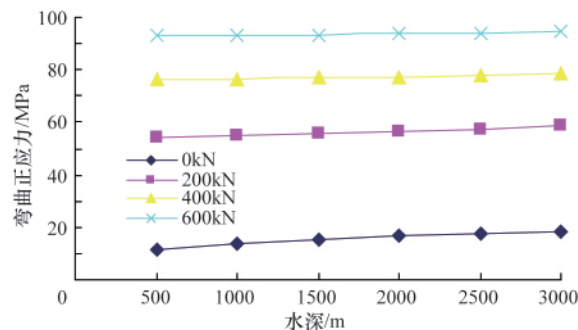


图 3 平台偏移作用下送入管柱顶端弯曲应力随水深的变化关系

Fig. 3 Bending stress at the top of landing string vs water depth

增大,水深对弯曲应力的影响逐渐减弱。

2.2.2 轴向载荷的影响

如图 4 和图 5 所示,管柱两端的弯曲应力随轴向载荷的增大而减小。当管柱下端的轴向载荷较小时,管柱在海流的作用下产生非常大的弯曲应力。因此,在导管喷射安装作业过程中,尤其是在作业后期地层摩阻力增大的情况下,下入

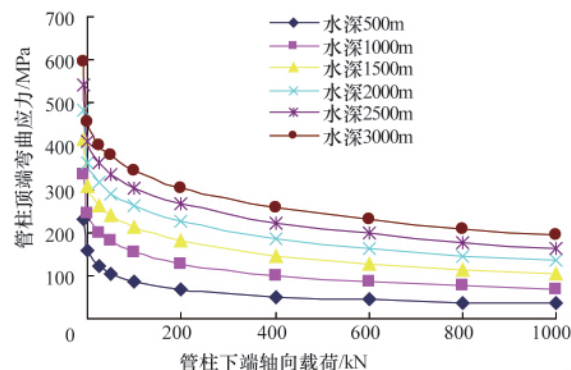


图 4 海流作用下送入管柱顶端弯曲应力随下端轴向载荷的变化关系

Fig. 4 Bending stress at the top of landing string vs axial load at the lower end

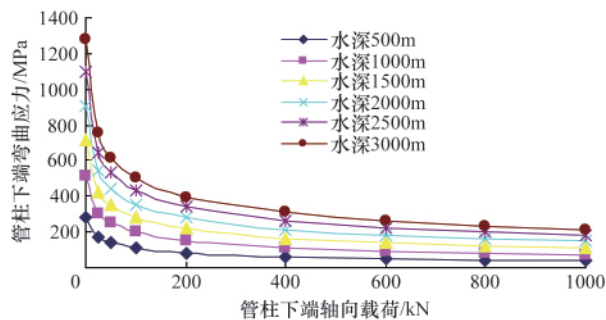


图 5 海流作用下送入管柱下端弯曲应力随下端轴向载荷的变化关系

Fig. 5 Bending stress at the bottom of landing string vs axial load at the lower end

导管所需的钻压也较大,这时必须严格控制钻压,使管柱下端保持一定的拉力,以避免管柱发生严重的纵横弯曲变形。

如图6和图7所示,若同时考虑管柱的轴向静载荷,则管柱两端截面上的总轴向应力(包括轴向静载荷造成的拉伸应力及弯矩造成的轴向应力)最大值随管柱下端轴向载荷的增大而先减小,后增大。原因是当轴向载荷较小时,管柱两端的轴向应力以弯曲载荷产生的截面正应力为主;随着轴向载荷的增大,作业管柱在海流作用下其两端产生的弯曲载荷逐渐减小而轴向静载荷逐渐增大,此时管柱两端的轴向应力也逐渐变为以轴向静载荷产生的拉伸应力为主。

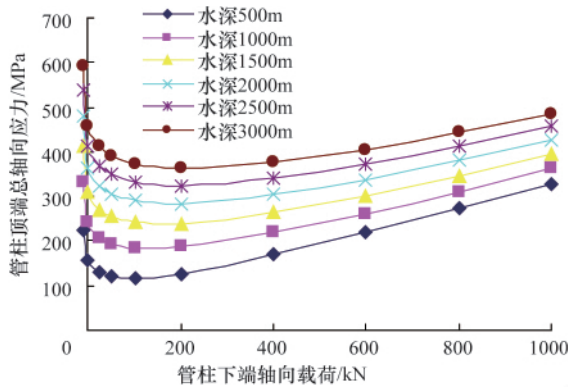


图6 海流作用下送入管柱顶端总轴向应力随下端轴向载荷的变化关系

Fig. 6 Total axial stress at the top of landing string vs axial load at the lower end

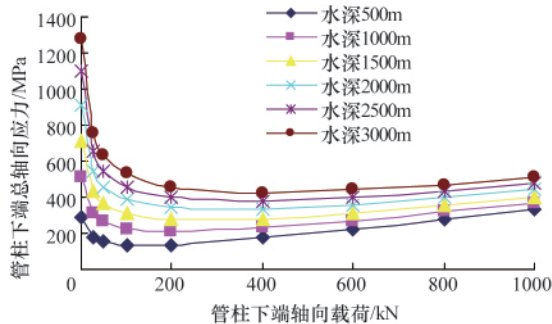


图7 海流作用下送入管柱下端总轴向应力随下端轴向载荷的变化关系

Fig. 7 Total axial stress at the bottom of landing string vs axial load at the lower end

3 无隔水管深水钻井作业管柱纵向振动计算

3.1 管柱的纵向振动力学模型

以深水导管喷射安装作业管柱为例,如图8所示。送入管柱上端与钻井船相连,当平台发生升沉运动时,管柱也将随平台而运动,同时还会发生纵向振动。

在管柱上截取任意微元段 ds ,利用微元段的受力平衡条件可得到管柱的纵向振动平衡微分方程^[7]。

$$q \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial s} (EA \frac{\partial w}{\partial s}) = 0 \quad (4)$$

其中, q 为管段的线重, N/m ; ε 为管柱的振动阻尼; A 为管段的截面积, m^2 ; E 为管材的弹性模量, N/m^2 。

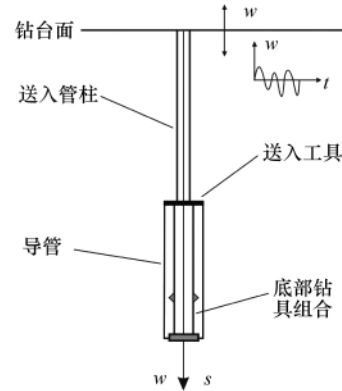


图8 导管喷射安装作业管柱纵向振动示意图
Fig. 8 Longitudinal vibration of tubular column in deepwater jetting operations

在作业管柱上任意点的位移为平台升沉运动引起的管柱位移与纵向振动位移之和,因而管柱上任意点的总位移为

$$w(s, t) = w_1(s, t) + w_2(s, t) \quad (5)$$

其中, w_1 为管柱纵向振动引起的管柱弹性位移, 需要满足减缩边界条件, m ; w_2 为平台升沉运动引起的管柱运动位移, 需要满足所有边界条件, m 。

将整个管串自上而下、由外而内划分为性质均匀的若干段,将导管基座、送入工具和井口头等作为集中质量。结合管柱振型函数的连续条件及边界条件,可求得管柱在不同边界条件下的无阻尼纵向自由振动特性,并使用模态叠加法求得管柱的纵向受迫振动位移。

平台升沉运动引起的管柱运动随管柱的边界条件变化而有所不同。当作业管柱下端为自由端时,平台的升沉运动使作业管柱产生平动,管柱上各点运动的位移和速度相同,这种平动运动不会对作业管柱产生轴向载荷;当作业管柱下端为固定端时,平台与海底的相对运动会作用于管柱,使管柱上各点的轴向位移及速度有所差别,从而产生轴向载荷。

3.2 管柱的纵向振动影响因素分析

为分析管柱的纵向振动影响因素,假设作业过程中管柱下端自由,平台的升沉振幅为 4m,振动周期为 8s,管柱的纵向振动阻尼比为 0.05。

3.2.1 送入管柱尺寸及水深的影响

图9为在水深 500—3000m 的情况下,分别使用直径 127mm(内径 108.6mm)、直径 139.7mm(内径 118.6mm)及直径 149.2mm(内径 128.1mm)等不同尺寸的钻杆作为送入管柱进行作业时,送入管柱的第1阶固有周期和轴向振动载荷随水深的变化曲线。

如图9所示,作业管柱的第1阶固有周期随水深和管柱

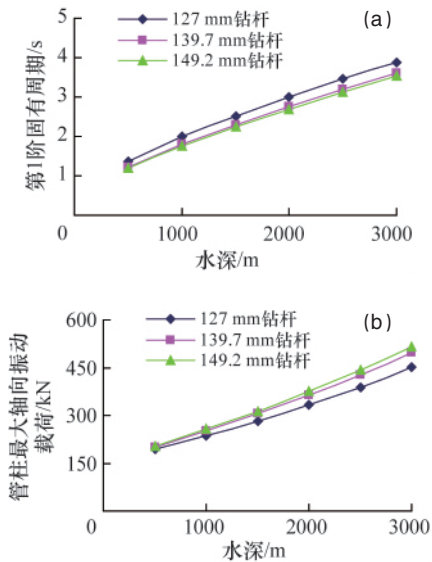


图9 管柱的第1阶固有周期(a)及最大轴向振动载荷(b)随水深的变化曲线
Fig. 9 First order natural period (a) and the maximum axial dynamic load (b) vs water depth

截面积的增大而增大。当钻井平台的振动周期远大于作业管柱的固有周期时,管柱上的最大振动载荷也随水深和管柱截面积的增大而增大。

在通常情况下,钻井平台的振动周期大于作业管柱的固有周期,因此使用横截面积较大的送入管柱不仅能够获得更大的抗拉强度,而且使作业管柱的固有周期远离平台的振动周期,降低振动载荷。

3.2.2 平台升沉振动周期的影响

图10为在不同水深情况下管柱顶端的轴向振动载荷随钻井平台升沉振动周期的变化。

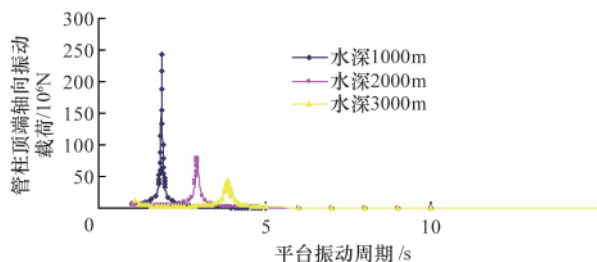


图10 管柱顶端轴向振动载荷随钻井平台升沉振动周期的变化曲线
Fig. 10 Dynamic axial load at the top of landing string vs vessel heave period

如图10所示,当平台的升沉振动周期接近作业管柱的固有周期时,作业管柱与钻井平台发生共振,产生非常大的轴向振动载荷,从而导致管柱破坏。

当钻井平台的升沉振幅相同并在作业管柱固有周期附近振动时,水深越大产生的振动载荷越小;当钻井平台在远

离作业管柱固有周期范围内振动时,则相反,水深越大产生的振动载荷越大。

3.2.3 作业管柱纵向振动阻尼的影响

图11为在不同的阻尼系数情况下,作业管柱顶端的轴向振动载荷随钻井平台振动周期的变化曲线。

如图11所示,管柱振动阻尼对于管柱在共振区域的振动载荷影响很大;而在共振区域以外,管柱振动阻尼对振动载荷的影响减弱。

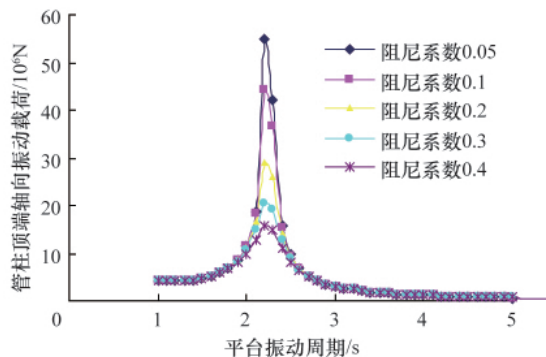


图11 管柱顶端轴向振动载荷随钻井平台升沉振动周期的变化曲线
Fig. 11 Dynamic axial load at the top of landing string vs vessel heave period

4 无隔水管深水钻井作业送入管柱设计与强度校核方法

4.1 无隔水管深水钻井作业送入管柱设计方法

与常规直井钻柱设计方法相类似,无隔水管深水钻井作业送入管柱设计也是基于钻柱的轴向载荷及抗拉强度。考虑到海洋深水作业及导管喷射安装作业的特点,在设计过程中需要注意以下3点。

(1) 无隔水管深水钻井作业过程中,管柱受到环境载荷的作用产生弯曲应力和振动载荷。因此,在满足常规送入管柱设计要求的基础上留出一定的环境载荷拉力余量。在确定拉力余量的大小时,应首先按照作业工况及环境情况对作业管柱进行力学分析,根据分析结果确定拉力余量的大小。

(2) 在深水导管喷射安装或下表层套管作业时,如果作业出现问题需要拔出导管时,在上提管柱的过程中导管将受到很大的地层摩擦阻力。因此,在设计送入管柱时,需要留出足够的拉力余量克服导管拔出时的地层摩擦阻力。

(3) 深水导管喷射安装到位后,通常不进行起下钻而使用同一套钻具组合继续钻进表层井眼。因此,在设计深水导管喷射安装送入管柱时,还需要考虑表层井眼钻进作业的要求。

4.2 无隔水管深水钻井作业送入管柱强度校核方法

根据对无隔水管深水钻井作业管柱的力学分析,在对送

入管柱进行强度校核时,应在常规校核的基础上考虑以下校核内容。

(1) 环境载荷作用下的强度校核。在无隔水管深水钻井作业过程中,管柱在从钻台面逐渐下放至泥面并钻入井眼的过程中,管柱逐渐增长,边界条件也逐渐改变。因此,在校核时应根据环境参数和钻井船运动参数,计算管柱在下入过程中各阶段的轴向静载荷、弯曲应力及轴向振动载荷,以保证送入管柱的轴向应力及弯曲应力的和不超过钻杆材料屈服强度的90%。

(2) 管柱的疲劳载荷校核。表层井眼钻进通常采用复合钻进,即钻柱在弯曲的同时发生旋转,因此截面正应力体现为交变应力。另外,钻柱在平台升沉作用下产生轴向振动载荷,该载荷在钻杆截面上产生的轴向应力也是交变应力。当钻柱上产生交变应力时,应对钻柱进行疲劳应力校核,防止钻柱发生疲劳破坏。

(3) 管柱的稳定性校核。无隔水管深水钻井作业过程中,管柱不受井眼的径向约束,其轴向载荷对管柱的稳定性有很大影响。在校核时需要确定作业过程中的最小轴向载荷,计算在该载荷作用下管柱是否会发生失稳变形。

5 结论

在无隔水管深水钻井作业过程中,管柱在作业载荷、环境载荷及钻井平台运动的综合作用下,其受力变形、多向运动及应力分布等情况都比较复杂。纵横弯曲变形及纵向振动是无隔水管深水钻井作业管柱最主要的变形和运动形式,由此产生的弯曲应力和轴向振动载荷也比较大。通过对作业管柱的纵横弯曲变形及纵向振动进行定量分析研究,得出了作业载荷、水深、海流、钻井平台的偏移和振动、管柱的运动阻尼等诸多因素的影响规律。另外,作业管柱的轴向拉力过大或过小、水深较大、平台偏移或升沉振动幅度过大以及海流流速大等作业及环境因素对管柱的强度安全具有显著影响。因此,在对无隔水管深水钻井送入管柱进行强度设计及校核时,应认真考虑到作业工况及管柱受力状态,以保证无隔水管深水作业的安全性。

实际上,无隔水管深水钻井作业管柱的纵横弯曲变形、多向运动及边界条件等问题都很复杂,如管柱的纵向振动和横向振动相互耦合,环境载荷仍难以准确预测等。因此,在实际工程中,为了对管柱进行优化设计与选择,可以在深水钻井作业管柱力学研究的基础上对工程问题进行合理简化。

参考文献 (References)

- [1] 张辉,高德利,唐海雄. 喷射安装导管作业中喷射管串力学分析[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2009, 31(6): 148-151.
Zhang Hui, Gao Deli, Tang Haixiong. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(6): 148-151.
- [2] 张辉,高德利,唐海雄. 深水导管喷射安装过程中管柱力学分析[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 516-520.

- Zhang Hui, Gao Deli, Tang Haixiong, *et al.* *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 516-520.
- [3] Zhang H, Gao D L, Tang H X. Landing string design and strength check in ultra-deepwater condition [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2(4): 178-182.
- [4] Zhang H, Gao D L, Tang H X. Choice of Landing string under ultra-deepwater drilling condition, SPE 131168[C]. CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, Beijing, China, June 8-10, 2010.
- [5] 张辉,高德利. 深水导管设计与安装力学行为研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
Zhang Hui, Gao Deli. Research on mechanical behavior of drillstring in jetting conductor operation under deepwater condition[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [6] Adams R J. Proven landing string design for ultra-deepwater application [J]. *World Oil*, 2001, 222(7): 73-79.
- [7] Breihan J W, Altermann III J A, Jellison M J. Landing tubulars design, manufacture, inspection and use issues, SPE 67723 [C]. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Holland, 27 February-1 March, 2001.
- [8] Jellison M J, Payne M L, Shepard J S, *et al.* Next generation drill pipe for extended reach, deepwater and ultra-deep drilling, OTC 15327[C]. Offshore Technology Conference, Houston, USA, May 5-8, 2003.
- [9] Cantrell A, Beiriger C, Everage D, *et al.* Design and qualification of critical landing string assemblies for deepwater, SPE 112787 [C]. IADC/SPE Drilling Conference, Orlando, USA, March 4-6, 2008.
- [10] Sathuvalli U B, Payne M, Suryanarayana P V, *et al.* Advanced slip-crushing considerations for deepwater drilling [J]. *SPE Drilling and Completion*, 2002, 17(4): 210-223.
- [11] Bradford D W, Payne M L, Schultz D E, *et al.* Defining the limits of tubular handling equipment at extreme tension loadings[J]. *SPE Drilling and Completion*, 2009, 24(1): 72-88.
- [12] Simpson B, Payne M L, Jellison M J, *et al.* 2,000,000-lbf landing string developments: Novel slipless technology extends the deepwater operating envelope[J]. *SPE Drilling and Completion*, 2005, 20(2): 109-122.
- [13] Brock J N, Chandler R B, Jellison M J, *et al.* 2 Million-lbf slip-based landing string system pushes the limit of deepwater casing running, OTC 18496 [C]. Offshore Technology Conference, Houston, USA, 30 April-3 May, 2007.
- [14] Brock J N, Chin D, Sanclemente L W. 2,500,000 pound landing string challenges: have we reached the limit of today's technology, OTC 20823 [C]. Offshore Technology Conference, Houston, USA, May 3-6, 2010.
- [15] DeWayne E S, Zheng N J, Ellis S E. Evaluation of heave-induced dynamic loading on deepwater landing strings [J]. *SPE Drilling and Completion*, 2005, 20(4): 230-237.
- [16] Zheng N J, Baker J M, DeWayne E S. Further consideration of heave-induced dynamic loading on deepwater landing strings, SPE 92309[C]. SPE/IADC Drilling Conference, Holland, Amsterdam, February 23-25, 2005.
- [17] 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.
Gao Deli. Down hole tubular mechanics and its applications [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006.

(责任编辑 安莹,刘志远)