

文章编号: 0253-2697(2009)02-0285-06

深水钻井导管和表层套管横向承载能力分析

管志川¹ 苏堪华¹ 苏义脑²

(1 中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061; 2 中国石油集团公司钻井工程技术研究院 北京 100097)

摘要: 根据桩基和材料力学理论,建立了适于深水钻井的导管和表层套管横向承载能力分析模型。模型中考虑了深水钻井中横向和竖向载荷的共同作用、可变的管柱抗弯刚度以及管柱与地基间的非线性响应等特征。通过对模型进行数值求解,对不同影响因素下沿管柱的横向位移、转角、弯矩、剪力和地基反力进行了分析,结果表明:载荷对管柱的作用集中在管柱上部较短的一段区域;竖向载荷对管柱横向承载力影响不大;套管下入深度超过一定值后,较大的下入深度对其横向承载能力几乎没有影响;海底浅部地层地基类型对管柱的横向承载能力有一定影响;有必要通过现场取样获得浅部地层的地质资料,对深水钻井井口力学稳定性进行分析。

关键词: 深水钻井; 导管; 表层套管; 横向承载力; 竖向载荷; 分析模型

中图分类号: TE245

文献标识码: A

Analysis on lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling

GUAN Zhichuan¹ SU Kanhua¹ SU Yiniao²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. PetroChina Drilling Engineering Technology Research Institute, Beijing 100097, China)

Abstract: An analytical model for the lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing in deepwater drilling was established on the basis of the pile foundation theories and material mechanics. The axial and lateral loads, variable stiffness of casing string and the nonlinear response between casing string and soil were considered in deepwater drilling. A numerical method was adopted to solve this model. The analyses on lateral displacement, angular distortion, bending moment, shear force and soil force acted on casing string show that the affection of lateral load is focus on the upper section of casing string, and the vertical load has little effect on the lateral loading capacity of casing string. When the casing string reaches a certain depth, its lateral loading capacity has little change with the depth, but the type of soil has a certain effect on lateral loading capacity of casing string. It is necessary for deepwater drilling to analyse the geological data in shallow formation and mechanical stability of wellhead.

Key words: deepwater drilling; conductor; surface casing; lateral load-bearing capacity; vertical load; analytical model

海洋深水环境恶劣,钻井隔水管长度显著增加,防喷器组体积和重量明显增大,导管一般喷射下入而不进行固井,泥线以下浅部地层强度较低,造成深水钻井导管和表层套管的承载能力与浅水有很大差异^[1-4]。由于导管和表层套管共同承担隔水管底部接头传递到井口的作用力和防喷器组及各层套管柱的自身重量,竖向承载能力是导管下入深度确定及防止井口下陷的重要依据^[5-7],而横向承载能力对套管柱及井口稳定性的影响未见公开文献分析。笔者根据桩基和材料力学理论建立了适于深水钻井的导管和表层套管横向承载

能力分析模型,为深水钻井井口稳定性分析与导管及表层套管工艺设计提供一定的理论依据。

1 横向承载力分析模型

1.1 受力分析

套管柱通过水下井口与其上部的防喷器组和隔水管线相连,来自海洋环境的作用力通过隔水管传递到水下井口处,使其承受一定的横向弯矩及竖向作用力,这些作用力的确定比较复杂。设作用于管柱顶部(井口)的横向弯矩 M_c 和竖向力 N_c 已知,则在泥线以下

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA09A106)资助。

作者简介: 管志川,男,1959年3月生,1995年获石油大学(北京)工学博士学位,现为石油大学(华东)教授,博士生导师,主要从事油气井力学、井下测控技术、深井超深井钻井和深水钻井等方面的教学和研究工作。E-mail: guanzhch@hpu.edu.cn

支撑管柱的地基中产生连续分布的反力 \bar{p} , 深水钻井导管和表层套管管柱受力如图 1 所示。

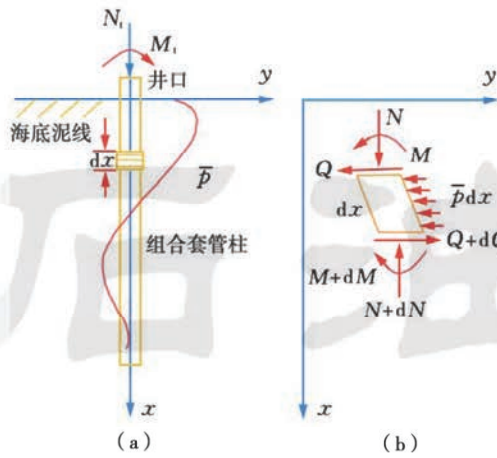


图 1 深水钻井导管和表层套管受力示意图

Fig. 1 Mechanical analysis on conductor and surface casing in deepwater drilling

图 1 显示, 在管柱上取微元段 dx , 内力符号 Q 、 M 分别为管柱的剪力和弯矩。通过力学平衡关系得到管柱在横向弯矩和竖向力共同作用下的挠曲微分方程为

$$\frac{d}{dx} \left[EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} \right] + \frac{d}{dx} \left[N(x) \frac{dy}{dx} \right] + D(x)p(x, y) = 0 \quad (1)$$

式中: $EI(x)$ 为沿 x 方向变化的抗弯刚度, $kN \cdot m^2$; $N(x)$ 为沿 x 方向变化的轴向力, kN ; $D(x)$ 为可变化的管柱外径, m ; $p(x, y)$ 为单位面积上的地基反力, $p(x, y) = \bar{p}(x, y) / D(x)$, kPa 。对于泥线以上的管柱不受地基反力的作用, 即 $p(x, y) = 0$ 。

1.2 地基反力

根据不同的假定条件, 地基反力 p 的计算方法分为 3 类^[8]: ①极限地基反力法。不考虑地基本身的变形, p 仅是深度的函数, 即 $p = p(x)$; ②弹性地基反力法。假定 p 与管柱挠度 y 的 n 次方成比例, 即: $p = kx^m y^n$, k 为地基性质所决定的系数, 与指数 m 、 n ($0 < n \leq 1, m \geq 0$) 的取法有关; ③弹塑性地基反力法(复合地基反力法)。即对塑性区采用极限地基反力法, 对弹性区采用弹性地基反力法, 然后根据弹性区与塑性区边界上的连续条件求解横向反力。由于它可以描述管柱和地基之间的非线性特征, 较其他方法而言能更为准确地分析管柱大位移横向承载能力, 故而被 API RP 2A 标准采用, 也称为 $p-y$ 曲线法^[9]。在没有试验资料的情况下, 可以参考该规范提供的理论公式计算黏土、砂土的 $p-y$ 曲线。

根据 $p-y$ 曲线可以确定深度 x 处地基反力的割线模量 $E_s = p/y$, 由此得到不同 y 值对应的 $p = E_s y$,

则式(1)可表示为

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} \right] + \frac{d}{dx} \left[N(x) \frac{dy}{dx} \right] + D(x)E_s y = 0 \quad (2)$$

1.3 作用力

深水环境下隔水管的受力非常复杂^[10-11], 其底部张力的横向分力、防喷器重力及作用于其上的海流力将使井口受到横向弯矩 M_i 作用, 隔水管底部张力的竖向分力、防喷器重力的合力即为井口受到的竖向力 N_i 。

作用于管柱上的轴向力 $N(x)$ 表示为

$$N(x) = \begin{cases} N_i + W(x) \cdot x & (x \leq x_{m1}) \\ N_i + W(x) \cdot x - F_t(x) \cdot (x - x_{m1}) & (x > x_{m1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_{m1} 为泥线以上管柱高度, m ; $W(x)$ 为管柱单位长度重量, kN ; $F_t(x)$ 为管柱外壁单位长度土壤摩擦力, kN 。

1.4 抗弯刚度

组合管柱上部固井段为内有固结水泥环的双层套管结构, 其等效抗弯刚度 K_1 为^[12]

$$K_1 = E_{su}(I_{so} + I_{si}) + 0.6E_c I_c \quad (4)$$

式中: E_{su} 为管柱钢材的弹性模量, kPa ; I_{so} 为导管的截面惯性矩, m^4 ; I_{si} 为表层套管的截面惯性矩, m^4 ; E_c 为水泥环的弹性模量, kPa ; I_c 为水泥环的截面惯性矩, m^4 。

组合管柱上部没有固井的双层套管结构段, 其等效抗弯刚度 K_2 表示为

$$K_2 = E_{st}(I_{so} + I_{si}) \quad (5)$$

组合管柱下部没有导管, 为固井水泥环和表层套管的组合结构, 其等效抗弯刚度 K_3 表示为^[13]

$$K_3 = E_{st} I_{si} + 0.8E_c I_c \quad (6)$$

2 横向承载力分析模型数值求解

由于管柱与地基相互作用的复杂性, 可采用有限差分法将管柱全长 L 分为 n 等分, 分段长为 h , 管柱顶节点设为 0, 管柱底节点为 n , 延长两端并设虚拟节点 -1 、 -2 和 $n+1$ 、 $n+2$, 如图 2 所示。

利用差分格式近似代替式(2)中的导数格式, 则将式(2)化为 $n+1$ 个差分方程为

$$\begin{cases} a_i y_{i+2} + b_i y_{i+1} + c_i y_i + d_i y_{i-1} + e_i y_{i-2} = 0 \\ a_i = (EI)_{i+1} \\ b_i = -2(EI)_{i+1} - 2(EI)_i + N_i h^2 \\ c_i = (EI)_{i+1} + 4(EI)_i + (EI)_{i-1} - 2N_i h^2 + D_i (E_s) h^4 \\ d_i = -2(EI)_i - 2(EI)_{i-1} + N_i h^2 \\ e_i = (EI)_{i-1} \end{cases} \quad (7)$$

边界条件: 管柱顶节点 0 处作用有弯矩 M_0 时, 管柱内力大小与之相等, 方向相反, 即 $M_0 = -M_1$, $Q_0 = 0$; 对于入土较长的管柱, 其下部底节点处可视为自由端, 则 $M_n = 0$, $Q_n = 0$ 。

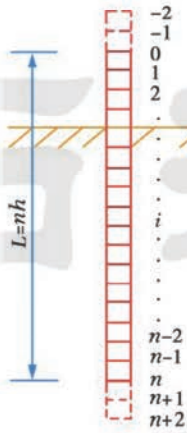


图 2 管柱数值化分段示意图

Fig.2 Numerical grid of casing string

将边界条件进行差分, 可以得到 4 个方程, 与式 (7) 组成 $n+5$ 个方程组, 就可以求解 $n+5$ 个节点的变量。由于矩阵方法在消去运算时精度较差, 一般采用 Glessner 法^[8], 通过变换整理可以得到 y_i ($i = -2, -1, \dots, n+2$) 的表达式。由于 $(E_s)_i$ 是非线性变化的量, 因此计算过程须要迭代进行, 即首先假设一组 $(E_s)_i^0$, 泥线以上管柱没有地基反力作用, $E_s = 0$ 。求解一次得到一组 y_i^0 , 把 y_i^0 代入 $p-y$ 曲线, 得到一组 p_i^0 , 则可由 $E_s = p/y$ 得到一组新的 $(E_s)_i^1$, 将新值赋给假设值, 重复迭代计算直到 $|(E_s)_i^0 - (E_s)_i^1| < \xi \epsilon$ 为容许精度条件。就得到管柱上各节点的挠度(横向位移), 从而得到各节点的转角 θ_i 、弯矩 M_i 、剪力 Q_i 、地基反力 p_i , 即

$$\begin{cases} \theta_i = -\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \\ M_i = -\frac{(EI)_i(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{h^2} \\ Q_i = -\frac{(EI)_{i+1}y_{i+2} - [2(EI)_{i+1} - Nih^2]y_{i+1} + [(EI)_{i+1} - (EI)_{i-1}]y_i + [2(EI)_{i-1} - Nih^2]y_{i-1}}{2h^3} + \frac{(EI)_{i-1}y_{i-2}}{2h^3} \\ p_i = (E_s)_i y_i \end{cases} \quad (8)$$

3 算例及影响因素分析

某海区深水井的导管长度为 85 m, 外径为 914.4

mm, 壁厚为 25.4 mm, 单位长度重量为 7.8 kN/m, 表层套管长度为 650 m, 外径为 508 mm, 壁厚为 12.7 mm, 单位长度重量为 2.1 kN/m, 套管的弹性模量为 210 GPa。两层套管之间为固结的水泥环, 其弹性模量为 18 GPa, 单位长度重量为 45 kN/m, 泥线以上管柱高度为 3 m。设在海洋环境极端恶劣的情况下传递到井口的最大横向弯矩为 3 MN·m, 竖向力为 1 MN。为简化计算, 假设海底泥线以下 0~100 m 深度全部为黏土层, 其水下容重为 7.0 kN/m³, 抗剪强度为 20 kPa。

3.1 井口作用力的影响

对不同的横向弯矩和竖向力共同作用下的组合管柱横向承载能力进行分析, 如图 3 所示。

结果表明, 横向位移、转角、弯矩、剪力和地基反力在一定深度以下基本都为零, 即井口受到的作用力对导管和表层套管的作用集中在管柱上部较短的一段区域, 对此区域以下的管柱几乎没有影响。

对不同大小的作用力影响进行比较, 结果表明, 随着横向弯矩的增大, 管柱顶部横向位移增大比较明显, 同时管柱的弯矩、剪力等也逐渐增加。管柱顶部竖向力越大, 其横向位移和对应弯矩等越大, 但是相对横向弯矩的影响而言, 竖向力的影响并不明显。井口受到的作用力来自于其上部防喷器组、隔水管、钻井平台的共同作用, 所以合理控制平台或钻井船漂移、隔水管顶部张紧力对井口和套管柱的稳定性而言非常重要。

3.2 导管直径及壁厚的影响

对不同导管外径和不同管壁壁厚的管柱横向承载能力进行分析, 如图 4 所示。

结果表明: 随着管径增大, 管柱横向位移逐渐减小; 随着壁厚增加, 管柱抗弯能力增强。但是在作用载荷一定的情况下, 由于横向位移较小, 因此管径及壁厚对管柱的弯矩影响不大。

3.3 井口距泥线高度、固井返高及地基类型的影响

对井口距泥线的不同高度、表层套管固井水泥环不同返高、不同地基类型(黏性土、砂性土)的情况下管柱横向承载能力进行分析, 如图 5 所示。其中砂性土地基的假设条件: 深度为泥线以下 0~100 m; 水下容重为 10.0 kN/m³; 内摩擦角为 30°; 初始模量为 14.7 MN/m³。

结果表明, 井口距泥线距离越高, 管柱的横向位移及弯矩越大, 所以海底泥线处的冲刷对套管的横向承载力有很大影响。由于固井水泥环对组合管柱抗弯刚度的贡献相对较小, 因此表层套管固井水泥环返高对管柱横向位移和弯矩影响并不是很大。砂性土地基的情况下, 管柱横向位移和弯矩比在黏性土中小, 同时管

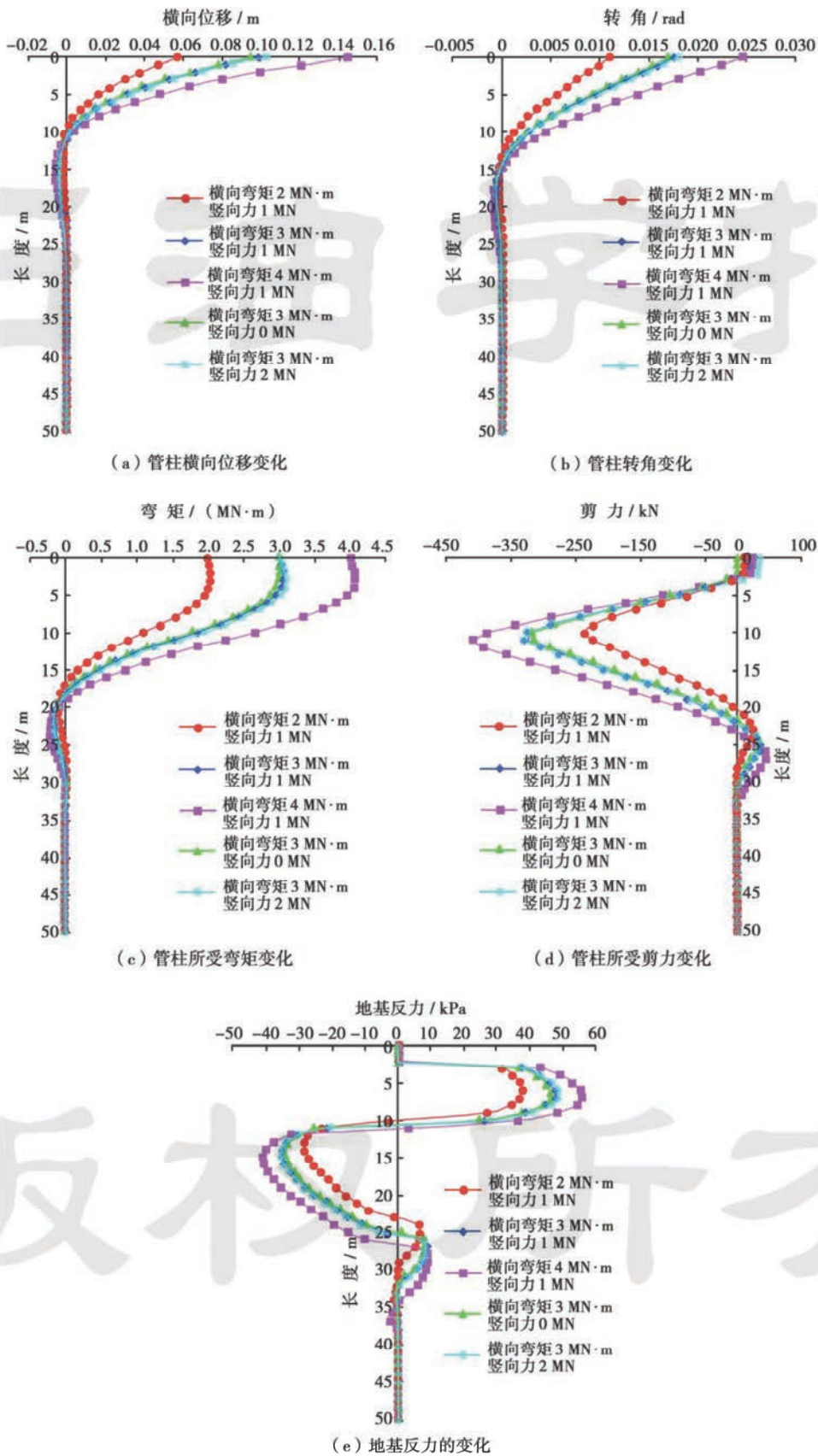


图3 井口作用力对管柱横向承载能力的影响

Fig. 3 Effect of wellhead acting force on lateral loading capacity of casing string

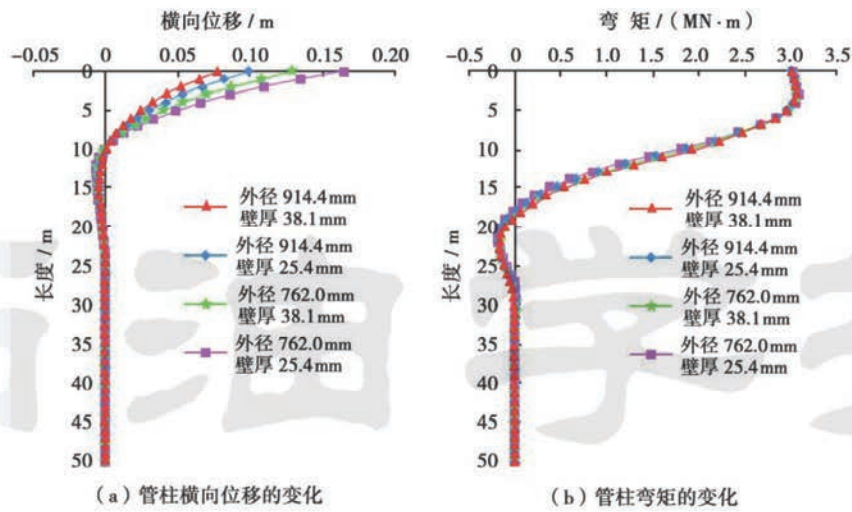


图 4 导管直径及壁厚对管柱横向位移和弯矩的影响

Fig. 4 Displacement and bending moment of casing string for variable diameters and wall thickness of conductor

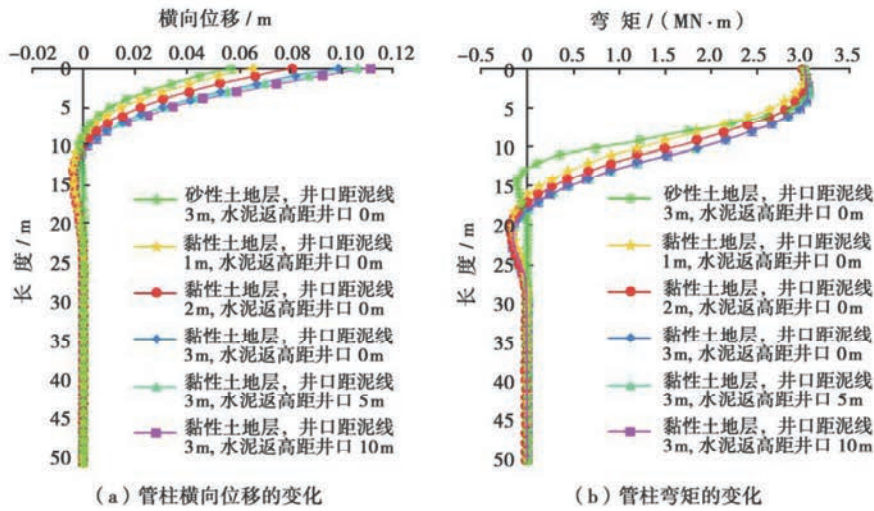


图 5 井口距泥线高度、固井返高及地基类型对管柱横向位移和弯矩的影响

Fig. 5 Displacement and bending moment of casing string for variable heights of wellhead, cement levels and types of soil

柱受影响的长度比在黏性土中短。

4 结论

(1) 依据桩基和材料力学理论建立了适于深水钻井的导管和表层套管横向承载能力分析模型, 模型考虑了深水钻井工况、横向和竖向力的共同作用、可变的管柱抗弯刚度、管柱与地基间的非线性响应等特征。

(2) 通过对模型进行数值化处理, 利用软件编程实现对理论模型的求解, 并对沿管柱的横向位移、转角、弯矩、剪力和地基反力进行了分析, 发现横向作用力对管柱的作用集中在管柱上部较短的一段区域内。

(3) 深水钻井导管和表层套管顶部受到的横向作

用力越大, 其上部横向位移和管柱弯矩越大, 竖向力的影响并不明显; 可增加管柱上部的外径及壁厚, 提高管柱的横向承载能力; 井口距泥线距离对管柱的横向承载能力影响较大; 表层套管固井水泥环返高程度对管柱横向位移和弯矩影响不大; 地基类型对管柱的横向承载能力有一定影响。

(4) 深水钻井中水下井口受到的作用力来自于海洋环境条件下井口上部防喷器组、隔水管、钻井平台的共同作用, 合理控制平台或钻井船漂移以及隔水管顶部张紧力, 对保证井口及套管柱的稳定性非常重要。有必要通过现场取样获得浅部地层的地质资料, 进行井口力学稳定性分析。

参 考 文 献

- [1] Shaughnessy J, Daugherty W, Graff R, et al. More ultradeepwater drilling problems[R]. SPE 105792, 2007.
- [2] Rocha L A S, Junqueira P, Roque J L. Overcoming deep and ultra deepwater drilling challenges[R]. OTC 15233, 2003.
- [3] 谢彬, 张爱霞, 段梦兰. 中国南海深水油气田开发工程模式及平台选型[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 115-118.
Xie Bin, Zhang Aixia, Duan Menglan. Engineering mode and platform selection for deepwater oilfield development in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 115-118.
- [4] 王志远, 孙宝江, 高永海, 等. 深水司钻法压井模拟计算[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 786-790.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Gao Yonghai, et al. Simulation computation of well killing with deepwater driller's method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 786-790.
- [5] Faul G L, Audibert J M E, Hamilton T K. Using suction technology for deep installation of structural pipe in deepwater[R]. SPE 39336, 1998.
- [6] Akers T J. Jetting of structural casing in deepwater environments: Job design and operational practices[R]. SPE 102378, 2006.
- [7] 苏堪华, 管志川, 苏义脑, 深水钻井导管喷射下入深度确定方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 47-50.
Su Kanhua, Guan Zhichuan, Su Yinao. Determination method of conductor setting depth using jetting drilling in deepwater[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(4): 47-50.
- [8] 卢世深, 林亚超. 桩基础的计算和分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987: 104-110.
Lu Shishen, Lin Yachao. Computation and analysis of pile foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 1987: 104-110.
- [9] American Petroleum Institute. API RP 2A-WSD-2000: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. Washington, D C: American Petroleum Institute, 2000.
- [10] American Petroleum Institute. API RP 16Q-2001: Recommended practice for design selection operation and maintenance of marine drilling riser system[S]. Washington, D C: American Petroleum Institute, 2001.
- [11] 苏堪华, 管志川, 苏义脑, 深水钻井水下井口力学稳定性分析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 1-4.
Su Kanhua, Guan Zhichuan, Su Yinao. Mechanical stability analysis of subsea wellhead for deepwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6): 1-4.
- [12] 陶忠, 韩林海, 郑永乾, 等. 方中空夹层钢管混凝土纯弯力学性能研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 6-10.
Tao Zhong, Han Linhai, Zheng Yongqian, et al. Flexural behaviors of concrete-filled double-skin (CHS inner and SHS outer) steel tubes[J]. Industrial Construction, 2004, 34(1): 6-10.
- [13] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 70-71.
Han Linhai, Yang Youfu. Concrete-filled steel tubular structures technique[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 70-71.

(收稿日期 2008-04-02 改回日期 2008-08-16 编辑 仇学艳)

关于《石油学报》网上投稿的特别声明

《石油学报》自 2008 年 1 月开始实行网上投稿以来,得到了广大作者的大力支持和配合,在此本刊编辑部表示衷心的感谢!同时再次重申,如果没有特殊情况,本刊不再受理邮寄稿件。作者投稿和进行稿件查询请登陆下列网站:

www.syxbcps.com.cn(外网); syxb.cnpc.com.cn(内网)

特别强调,上述网站是《石油学报》的唯一网站。近日发现某些网站假冒《石油学报》的名义,进行在线投稿及征订广告。该行为属于非法行为,敬请广大作者、读者提高警惕,以免耽误您的稿件处理,并造成不必要的损失。

作者在投稿过程中如果遇到问题,可随时打电话与本刊编辑部联系。

联系电话: 010-62095617; 010-62094406

(本刊编辑部)