

深水钻井管柱力学与设计控制技术研究新进展

高德利*, 王宴滨*

中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, gaodeli@cast.org.cn, wyb576219861@126.com

收稿日期: 2016-02-24

国家自然科学基金创新研究群体项目和重点项目(项目批准号: 51521063 和 U1262201)

摘要 深水钻井作业主要包括导管喷射安装、表层套管井段钻井、水下防喷器组和深水钻井隔水管安装及后续钻井等4个主要作业环节, 涉及导管、钻井隔水管、送入管柱等3类管柱系统。与陆地及浅水近海钻井不同, 由于深水钻井工况的独特性, 管柱在作业过程中产生复杂的力学行为, 严重影响深水钻井的安全高效作业。因此, 开展深水钻井管柱力学与设计控制技术研究, 对于推动深水钻井科技进步具有重要意义。

深水导管喷射安装技术是适应深水钻井的特殊要求而发展起来的一种浅层作业技术, 也是深水钻井作业程序的第一步。作业过程涉及导管和送入管柱2类管柱系统, 主要目的在于建立安全稳定的水下井口, 为后续的钻井作业奠定基础。例如送入管柱的力学行为分析与优化设计研究、水下井口的管土相互作用与导管承载能力研究等, 对实现水下井口安全稳定的目标具有重要意义。本文从工程应用与技术研发2个方面, 对涉及其中的送入管柱强度设计与校核、导管喷射安装工艺和导管承载能力等3个方面的研究进展进行了综述与展望。认为深水导管喷射安装的未来研究将侧重于极限工况下导管的入泥深度与承载力计算、喷射钻进参数优化、导管喷射安装风险评估与可靠性预测, 以及深水导管喷射安装模拟实验等内容。

深水钻井隔水管是连接浮式钻井平台与水下井口的重要设备, 可提供钻井液循环通道、支持辅助管线、引导钻具、下放与回收防喷器组等。深水钻井隔水管在整个钻井作业过程中涉及安装、正常钻进、回收与紧急撤离等作业过程。由于波流联合作用力的动态效应, 深水钻井隔水管在服役期间会产生轴向拉伸、横向弯曲、耦合振动等一系列复杂力学行为, 给深水钻井安全作业带来巨大挑战。因此, 对深水钻井隔水管力学行为进行研究, 确保其安全可靠, 是深水钻井研究的关键问题之一。本文着眼于深水钻井隔水管的顶张力控制、纵横弯曲变形、横向振动特性、纵向振动特性、耦合振动特性及涡激振动特性等主要力学问题, 从载荷计算、控制方程、边界条件及求解方法等方面入手, 总结了深水钻井隔水管系统在力学与设计控制技术方面取得的新进展, 对目前研究中仍然存在的问题进行了剖析和探讨。研究认为在以后的工作中, 应在深水钻井隔水管安装作业窗口分析预测、隔水管涡激振动响应与抑制、隔水管疲劳寿命计算与评估, 以及隔水管力学行为模拟实验等方面加强研究。

在深水井筒整个寿命期间, 最大限度地使井筒中地层流体处于有效控制的安全运行状态, 防止浅层气和浅水流入, 提高固井质量, 避免水下套管柱变形甚至挤毁等, 对于提高深水油气井筒的完整性具有重要的实际意义。本文以深水井筒的温度分布规律、套管环空压力变化及套管应力分布等研究为主, 对深水井筒完整性预测和预防研究进行了综述, 主要内容包括地层非稳态传热、套管环空循环温度分布、密闭环空内流体升温膨胀引起的附加载荷和预防措施、多层套管柱环空压力计算、套管—水泥环—地层系统热力耦合响应等。分析认为充分考虑深水钻井特殊工艺与环境约束条件、建立适用于深水井身结构与套管柱优化设计方法、开展深水井筒完整性风险评估与设计控制技术研发将是未来关注的重点。

开展深水钻井管柱力学模拟实验研究, 获取相关的有效数据, 对于提高深水管柱力学与设计控制研究水平

引用格式: 高德利, 王宴滨. 深水钻井管柱力学与设计控制技术研究新进展. 石油科学通报, 2016, 01: 61-80

GAO Deli, WANG Yanbin. Progress in tubular mechanics and design control techniques for deep-water drilling. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 61-80. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.005

具有必要性。本文建立了“深水管柱力学模拟实验系统”，并对其结构组成、操作方法、技术参数及主要功能等进行了详细说明，介绍了深水钻井隔水管力学行为模拟实验与疲劳寿命测试方面取得的新进展。

本文对深水导管喷射安装技术、深水钻井隔水管系统力学与设计控制技术以及深水井筒完整性预测和预防研究等方面的新进展进行了综述和展望，对指导今后的深水钻井管柱力学与设计控制技术研究具有参考价值。

关键词 深水钻井；管柱力学；设计控制技术；深水导管；海洋钻井隔水管

0 引言

深水钻井工程是深水条件下海洋油气工程作业的关键环节之一。与近海浅水钻井不同，深水钻井必须面对更为复杂的海洋深水环境和地层条件，面临“入地、下海”的双重挑战，需要采用浮式钻井作业平台，建立安全稳定的水下井口与钻井系统，使用特殊的深水管柱(包括导管、钻井隔水管、套管柱及送入管柱等)、水下智能控制系统等，是一项复杂的系统工程，具有高科技、高投入及高风险等基本特征。

随着世界能源需求的增长及海洋油气勘探开发技术的不断进步，人们越来越重视海洋油气资源的勘探开发^[1-3]。深水钻井管柱是实施深水钻井不可或缺的基本工具，各种管柱系统在服役过程受到海洋环境载荷的作用，表现出复杂的力学行为，并且其服役条件随着水深的增加而更加恶劣^[4-8]。对深水管柱系统进行力

学预测分析并形成相应的控制方法，对确保深水钻井安全高效作业具有重要的实际意义。

本文介绍包括深水导管、送入管柱、钻井隔水管、水下井口在内的主要深水钻井管柱的力学研究进展及其存在的问题，以及今后的发展方向，以期为深水钻井管柱力学深入研究与深水钻井技术发展提供有益参考。

1 深水钻井特点与关键问题

由于深水钻井环境、装备及部分钻井技术与陆地及浅水近海有很大不同，因而在深水钻井作业流程及其所需技术装备上具有特殊性。一般情况下，深水钻井平台(船)拖航到位并完成定位后，浅层钻井的工程作业过程如图1所示。

深水钻井作业主要包括导管喷射安装、表层套管

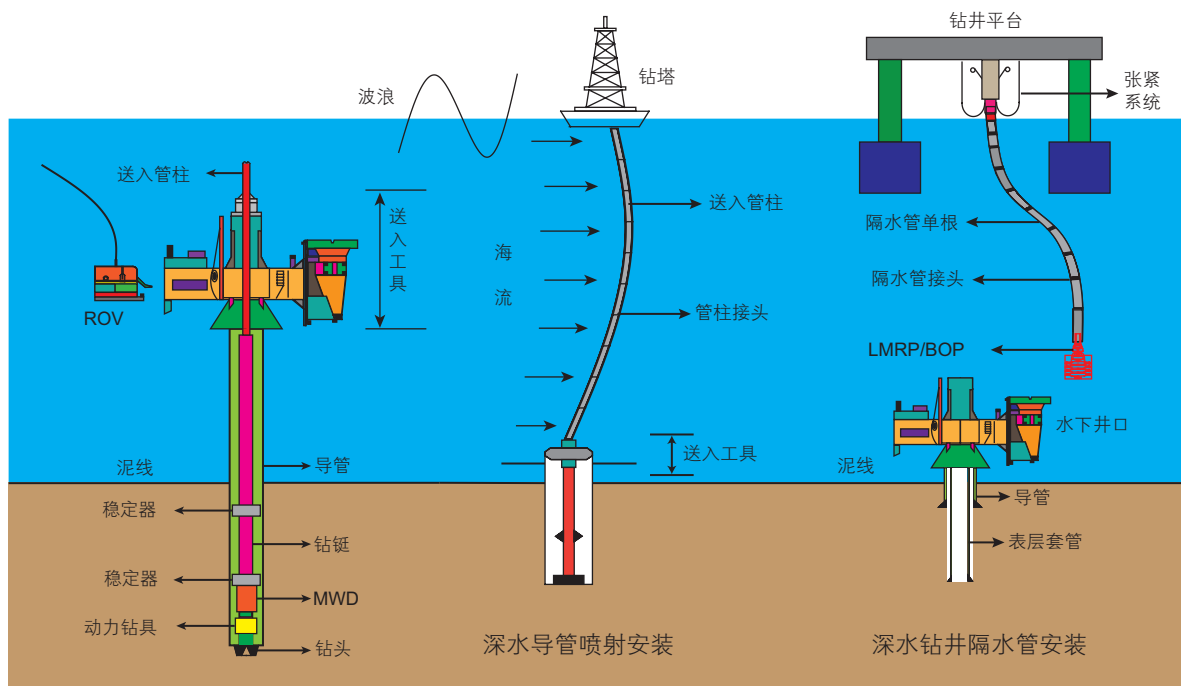


图1 深水钻井作业流程

Fig. 1 Deep-water drilling operation process

井段钻井、水下防喷器组和深水隔水管安装及后续钻井等 4 个主要作业环节^[9-12]。

深水导管喷射安装是适应深水钻井的特殊要求而发展起来的一种浅层作业技术^[13-14]。在喷射安装过程中,送入管柱通过导管送入工具连接喷射管柱,喷射管柱主要有两部分组成:一部分为喷射导管本身,另一部分由钻头(一般为牙轮钻头)、动力马达、稳定器、钻铤及低压井口头等组成^[15-17]。导管喷射安装的主要目的在于使导管与周围土层形成足够支撑水下井口的承载力,作业过程涉及到的管柱系统包括送入管柱与导管,其中送入管柱的合理设计对导管喷射安装具有决定性的作用^[18-20]。由于深水钻井导管喷射安装技术在钻井时间与经济成本方面具有较大优势,因而被广泛应用于深水及超深水钻井工程中。在深水喷射安装过程中,需要对钻压、排量、送入管柱受力变形等多个参数进行严格控制,以防止扩孔、卡套管、导管下沉等工程事故的发生^[21-22]。

当表层套管固井后,接着就要进行隔水管和防喷器组安装作业^[23-24]。由于深水钻井隔水管系统是连接海底井口与水面钻井装置的重要设备,因此隔水管安装作业的主要目的是实现水下井口与LMRP/BOP(Lower Marine Riser Package/Blowout Preventer)的

精确连接,为后续的钻完井作业提供循环钻井液通道及必要的控制设施,其合理的安装操作亦将直接关系到深水钻井作业的顺利进行^[25-27]。根据深水钻井作业规范,无论是隔水管各组件的强度和性能,还是安装作业程序,都必须符合相关标准^[28-32],同时在安装过程中应对隔水管的力学行为进行详细分析及预测和控制,以便保证安装作业的安全可靠性。

与陆地及浅水近海钻井不同,在深水钻井过程中,管柱力学行为具有独特性和复杂性,如图 2 所示。深水钻井作业的特点主要体现在深水钻井导管喷射安装和深水钻井隔水管安装 2 大作业过程,涉及导管、隔水管及送入管柱等 3 类管柱,其中深水导管喷射安装过程涉及送入管柱和导管,其主要目的在于建立安全稳定的水下井口,为后续的钻井作业提供基础。深水钻井导管承载能力是导管喷射安装过程的研究重点,但深水导管需要通过送入管柱下放到海底,送入管柱的设计合理与否亦直接影响深水导管喷射安装作业的成败。因此需要以深水导管喷射安装为目标对送入管柱进行优化设计,并对导管承载能力及工艺过程进行控制,以达到建立安全稳定水下井口的目的。与深水导管喷射安装过程中送入管柱所受载荷类似,深水钻井隔水管在安装过程中也受到恶劣的环境载荷影响,

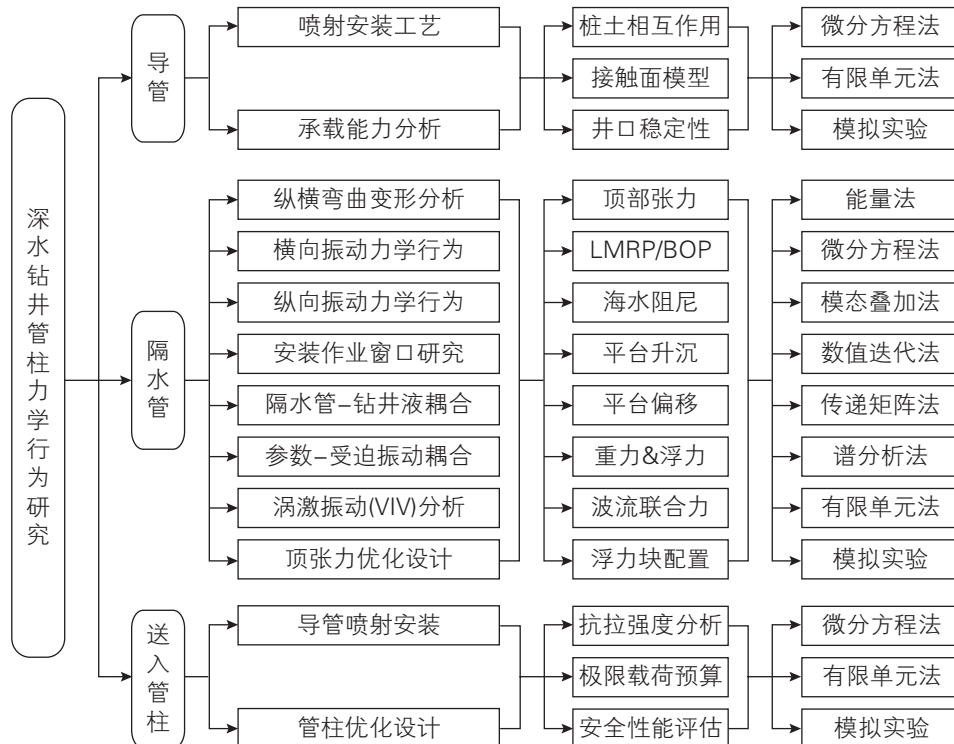


图 2 深水钻井管柱系统力学问题

Fig. 2 Mechanical problems of deep-water drilling string

二者均会表现出复杂的力学行为,其复杂性主要来源于不规则的波浪与海流联合作用力^[33-35],给深水钻井送入管柱与隔水管的力学行为分析(特别是动态分析)带来挑战。

2 深水导管喷射安装技术与实践

对深水导管喷射安装作业的研究,目前主要集中在送入管柱的强度设计与校核、导管喷射安装工艺及导管承载能力研究3个方面,基本涵盖了深水导管喷射安装过程的关键环节。

2.1 工程应用

墨西哥湾是全球深水钻井活动最频繁的海域之一,也是最早使用深水导管喷射安装技术的海域。在20世纪60年代,SHELL在没有使用喷射钻头与动力马达的情况下,只借助一个喷射接头,将外径29.5 in、壁厚1.0 in的导管安装在泥线以下100 ft深度,由于作业过程中底部钻具组合配置不合理,导致钻井液从导管外排除,对地层形成了较大的冲刷作用,使得导管承载力遭到较大破坏^[36],其工艺过程原理如图3(a)所示。从20世纪70年代开始,随着钻井技术的不断进步,井下动力钻具性能的提高与各种新型导管送入工具的使用,使得导管喷射安装技术得以较大改进^[37-38]。

井下动力钻具可以直接驱动牙轮钻头旋转,喷射出的钻井液可以从底部钻具组合与导管的环空返到海底,极大地降低了对地层土壤的干扰。到20世纪90年代,深水导管喷射安装技术已经成为全球深水及超深水钻井的首选^[39-41],其工艺过程原理如图3(b)示。1994年,HALLIBURTON公司首次将深水导管喷射安装技术引入中国南海,采用深水作业模式开发了流花11-1油田^[42-44],喷射安装的深水导管为外径762.0 mm,壁厚25.4 mm,这是深水导管喷射安装技术在我国首次成功使用,作业时效比常规安装导管方法提高了3倍多。近几年来,随着国内海上油气勘探开发活动的逐渐增多,深水导管喷射安装技术在我国深水及超深水区域得到了广泛的应用。LH29-2-A井、LW6-1-B井、BY13-2-C井及LW21-1-D是我国首批自营深水井^[45],也是国内自主设计建造的第6代深水半潜式平台HYSY981承钻的第一批井,这4口井的导管($\phi 114.4$ mm)全部采用喷射安装工艺,并且取得了良好效果,后期作业无井口下沉现象,为我国后续深水导管喷射安装作业积累了宝贵的经验。

2.2 技术研究

送入管柱的强度设计与校核、喷射导管串的工艺参数设计及深水钻井导管承载力,是深水钻井导管喷射安装最为重要的3个方面,直接关系到喷射安装作业的成败。

2.2.1 送入管柱的强度设计与校核

国外学者首先在送入管柱的强度设计与校核方面进行了相关研究,早期的研究主要集中在以钻柱的抗静拉力设计为基础的送入管柱设计^[46-49]。但此方法与常规的钻柱设计方法类似,未涉及送入管柱的强度设计,也没有很好地体现送入管柱的作业特点。到目前为止,送入管柱的设计方法主要包含安全系数法、抗卡瓦挤毁系数法及拉力余量法^[50-52]。安全系数法主要考虑起下钻过程中的井壁摩擦阻力、流体粘滞阻力以及加速度产生的动载荷;拉力余量法主要考虑管柱遇卡、解卡的情况。由于送入管柱需要同时满足导管喷射安装和表层井眼钻进的作业要求,上述设计方法中,卡瓦挤毁是制约送入管柱作业能力的主要因素,计算方法主要是将送入管柱所受外载等效为轴向载荷^[53]。同时,使用高强度钻杆^[54-55]是提高送入管柱作业能力的另一种方式,为钻杆配备新型接头、在送入管柱接头区域进行加厚处理^[56-57]均可减少管柱所受卡瓦外挤力,从而提高送入管柱的抗拉强度。实际设计过程中分别采用以上3种方法计算各段钻杆的最大允许使用

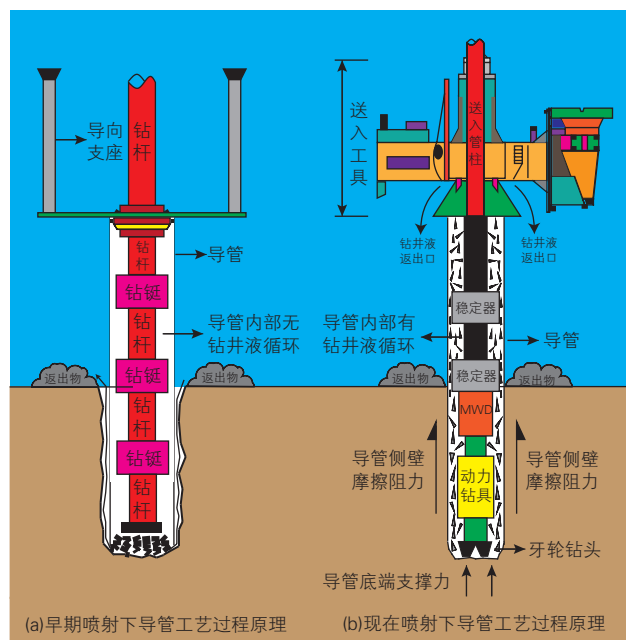


图3 深水导管喷射安装技术开发

Fig. 3 Technology development of deep-water conductor jetting process

长度,并选取其中的最小值作为设计结果。此外,送入管柱在作业过程中会受到来自海洋环境的恶劣载荷,在横向波流联合作用力及平台纵向升沉运动影响下,送入管柱会发生横向振动与轴向振动,产生较大弯曲变形,严重影响导管喷射安装的控制精度。为确保导管喷射安装的顺利进行,需要对其复杂力学行为进行准确的预测与控制。目前对于送入管柱的力学行为研究大多集中在轴向振动对其载荷的影响^[58],而对涉及纵横耦合振动的研究则较少。国内相关学者^[59-63]根据深水钻井导管喷射安装作业特点,详细阐述了送入管柱在操作过程中受到的载荷,系统研究了各种环境载荷、送入管柱结构及浮式平台偏移等对钻柱轴向力的影响,并据此建立了管柱的静力学分析模型与控制方程,并用加权残值法对控制方程进行了求解,对送入管柱的设计安装提供了理论指导。

2.2.2 喷射导管串的工艺参数设计

喷射导管串的设计合理与否直接关系到导管喷射安装的成败,文献[64-65]讨论了导管喷射安装方法,指出了喷射安装导管的可行性,并着重对导管进行了受力分析,阐述了导管喷射安装过程中需要注意的问题,为导管喷射安装技术的发展奠定了基础。国内从本世纪初开始导管喷射安装工艺方面的研究,主要包括导管喷射安装在深水及超深水钻井中的有效性及实用性探讨,喷射导管尺寸的选择、入泥深度及导管强度与稳定性的优化分析^[66]。导管喷射安装过程需要严格控制包括钻压^[67]、机械钻速^[68]、钻井液排量^[69-70]及钻头伸出量^[71]在内的关键参数,需要综合采用理论分

析、数值模拟及物理模拟等方法对喷射导管串的工艺参数进行优化设计。

2.2.3 深水钻井导管承载力

足够的承载力是深水导管喷射安装的首要目标,对导管承载能力进行研究可为防止井口失稳、下沉等复杂事故的发生提供科学依据。深水钻井导管的承载力属于桩土相互作用研究范畴,导管的承载能力分析模型如图4所示。

从20世纪90年代初开始,国外相关公司针对喷射安装导管的工程实践,详细讨论了根据地层土壤剪切强度计算导管承载力的方法,为后续导管设计及承载力计算奠定了基础^[9]。在通常情况下,导管的承载力以API RP-2A给出的 P - Y 曲线为计算依据^[72],计算时需要考虑导管的瞬时承载力^[73]及不同海底土层性质对承载力的影响^[74]。另外,不同的作业工况、导管承受的外载荷不同、准确计算不同工况下导管的承载能力及各种作业载荷和环境载荷对承载能力的影响,对保证水下井口安全稳定性具有重要意义。本世纪初国内相关学者开始了喷射安装导管承载力方面的研究,在这方面比较典型的研究有:文献[75-76]给出了基于地层破裂压力与岩土力学的深水导管极限承载力计算方法;文献[77-79]介绍了土力学和桩基理论在深水导管喷射安装中的应用,着重讨论了导管下入深度计算方法及时间效应对导管承载力的影响;文献应用ABAQUS有限元软件,通过编写相应的本构模型有限元程序,对不同桩土接触面模型下导管的承载能力进行了数值模拟。深水导管喷射安装的未来研究,将侧

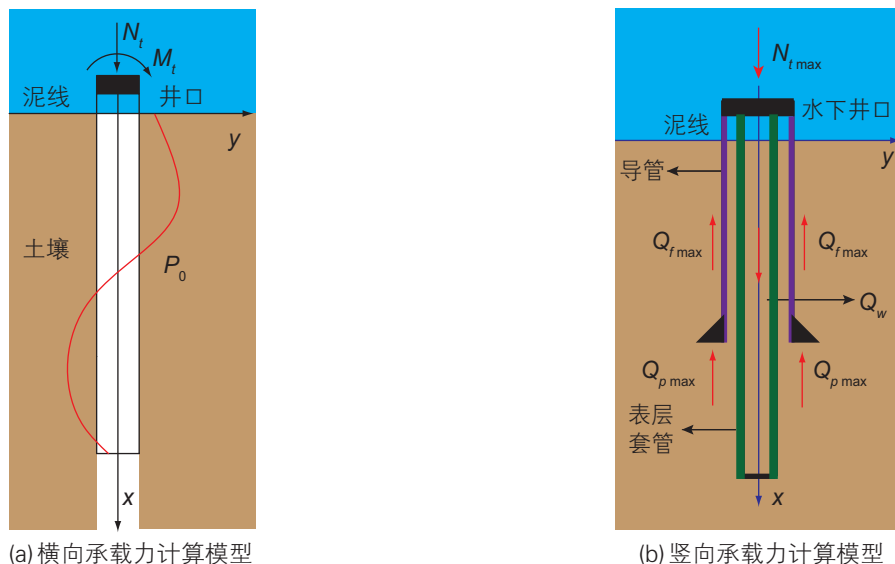


图4 深水钻井导管承载能力分析模型

Fig. 4 Analysis model of deep-water conductor bearing capacity

重于极限工况下导管的人泥深度与承载力计算、喷射钻进参数优化、导管喷射安装风险评估与可靠性预测,以及深水导管喷射安装模拟实验等方面。

3 深水钻井隔水管力学行为研究

深水钻井隔水管是水下井口与浮式钻井设备之间最重要也是最脆弱的连接设备,起到提供钻井液循环通道、支持辅助管线、引导钻具、下放与回收防喷器组等重要作用。深水钻井隔水管在整个深水钻井作业过程中涉及安装、正常钻进、回收与紧急撤离等作业过程。在整个作业过程中,隔水管要受到来自重力、顶张力、海流力及波浪力等复杂载荷的联合作用,还要承受来自不同作业工况载荷,产生拉伸、弯曲、振动等复杂力学行为,会出现挤毁、屈曲、疲劳损伤甚至断裂等失效情况,严重威胁深水钻井安全;因此,对深水钻井隔水管力学行为进行研究,确保其安全可靠,是深水钻井工程必须考虑的重要问题之一。

3.1 深水钻井隔水管顶张力分析

深水钻井隔水管在安装过程中底部连接防喷器组和隔水管底部组合,顶部通过张紧系统与浮式钻井设备相连,隔水管底部受到LMRP/BOP重力作用产生的拉力,顶部受到张紧器产生的近似恒定拉力,隔水管

在两端拉力作用下产生轴向拉伸变形。顶张力对隔水管力学行为的控制体现在2个方面:一是控制隔水管的横向弯曲变形,顶张力越大,隔水管横向弯曲变形越小,但作用在隔水管上的 Von Mises 应力越大;另一方面顶部的超张力使隔水管底部受拉,防止底部管柱屈曲失稳。目前由于对顶张力的认识不统一,从而产生了不同的计算方法:API算法和底部残余张力算法。2种计算方法均基于有效张力理论^[81-82],其中:API算法规定,顶张力的配置应保证隔水管各部分的有效张力大于零,即应保证隔水管在水中的稳定性;底部残余张力算法认为隔水管底部的残余张力要满足对LMRP的过提要求,以真实轴向力计算隔水管的底部残余张力。

3.2 深水钻井隔水管纵横弯曲变形分析

深水钻井隔水管在轴向拉力与横向波流力联合作用下产生纵横弯曲变形,如果把横向波流作用力视为静态力,那么隔水管受力变形即为静力学问题,通常在隔水管静力分析时假设波流的传播方向一致,取最危险的工况进行分析,其力学分析模型如图5所示。

对于隔水管系统的受力变形及强度问题,国外学者进行了大量研究,早期采用二维静力学分析方法,用弹性力学计算隔水管的变形,并进行强度分析,其变形控制方程^[83]如下:

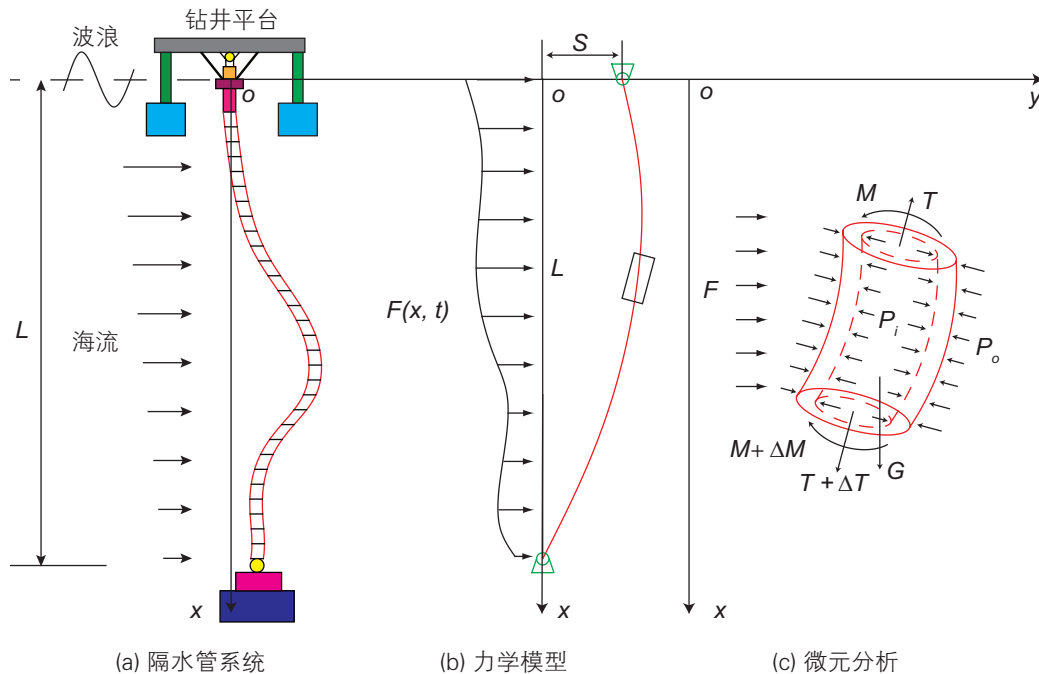


图5 深水钻井隔水管力学分析模型

Fig. 5 Analysis model of deep-water drilling riser

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - T(x) \frac{d^2 y}{dx^2} - w \frac{dy}{dx} = F(x) \quad (1)$$

式中, EI 为隔水管柱截面抗弯模量, $N \cdot m^2$; $T(x)$ 为隔水管轴向力沿水深分布, N ; w 为单位长度隔水管柱的重量, N/m ; $F(x)$ 为横向波流作用力沿水深的分布, N/m 。

对于正常钻进过程而言, 隔水管上下两端为球铰固定, 并且具有旋转刚度, 此时式(1)的边界条件为:

$$\begin{aligned} y|_{x=0} = S, \quad EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=0} &= k_r \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0}; \\ y|_{x=L} = 0, \quad EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=L} &= k_b \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中, S 为隔水管顶部偏移位移, m ; k_r , k_b 分别为隔水管上下两球铰的旋转刚度, $N \cdot m/rad$ 。

对于安装及回收与紧急撤离过程而言, 隔水管上端为固定端, 下端为自由端, 此时式(1)的边界条件为:

$$\begin{aligned} y|_{x=0} = 0, \quad EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=0} &= 0; \\ EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = 0, \quad EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \Big|_{x=L} &= F(x)|_{x=L}. \end{aligned} \quad (3)$$

基于上述变形控制方程和边界条件, 可求得隔水管在不同作业模式下的变形状态, 然后根据材料力学物理关系可对隔水管的内力与强度进行计算和分析。式(1)的求解, 通常采用有限差分法^[84]、加权残值法^[85]等数值解法。

3.3 深水钻井隔水管横向振动分析

深水隔水管静力分析方法对于浅水隔水管具有一定的适用性, 但随着水深增加, 动态因素对隔水管的影响越来越显著。在前期的研究中考虑水质点的速度是由周期的稳态正弦波产生, 即用一个正弦稳态解法来求与此同周期的隔水管横向振动位移, 通过调和函数变换将力学模型简化; 但由于模型简化和求解过程繁琐, 这种解析法并不实用。后来在文献[86]中给出了一种分析隔水管动态受力的数值求解方法, 其数学模型如下:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(T(x) \frac{\partial y}{\partial x} \right) - w \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (4)$$

动态分析与静态分析的最大区别在于前者将横向波流作用力视为动态, 但精确计算波流联合作用力也是隔水管动态分析的最大难点。考虑到深水隔水管本身运动的影响, 横向动态波流联合作用力可用修正的莫里森方程计算^[35], 即:

$$\begin{aligned} F(x, t) = \frac{\pi}{4} C_m \rho_w D^2 a_r - \frac{\pi}{4} (C_m - 1) \rho_w D^2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \\ \frac{1}{2} C_D \rho_w D \left(v_r + v_c - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \left| v_r + v_c - \frac{\partial y}{\partial t} \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C_m 为附连水质量系数, 一般在0.93~2.30之间取值, 对于隔水管等圆形横截面的构件一般取2.00; C_D 为阻力系数, 一般在0.4~1.6取值, 其值与雷诺数相关; ρ_w 为海水密度, kg/m^3 ; D 为隔水管外径, m ; v_r 为波浪水质点水平速度, m/s ; v_c 为海流速度, m/s ; a_r 为波浪水质点水平加速度, m/s^2 。

同样, 对于正常的钻进条件下的隔水管而言, 其上下两端仍可看作球铰固定, 并且具有旋转刚度; 对于安装过程及回收与紧急撤离过程而言, 隔水管上端为固定端, 下端为自由端。将对应的边界条件方程与式(4)联立求解, 其求解方法一般包括模态叠加法^[87]、泛函分析法^[88]、有限差分法^[89]和有限单元法^[90]等。

随着研究的不断深入, 隔水管的三维动力分析研究越来越多, 通过综合运用流体力学理论、波动理论等, 考虑海流、波浪等海洋环境载荷的动态作用^[91], 以及在外载作用下的小应变大变形和轴向力对隔水管动力学行为的影响^[92], 同时引入非线性理论^[93], 对隔水管的三维变形、弯曲载荷、振型和频率、动态位移和应力等进行研究, 使计算结果更加符合实际情况。同时, 有关学者根据随机振动理论计算了随机波浪和规则波浪下船体运动对隔水管非线性动力响应的影响, 并对船体平均偏移及波频响应和低频响应的周期和幅值对隔水管动力响应的影响进行了研究^[94], 采用模态分析的离散化方法, 分析了隔水管在随机载荷波浪力作用下的横向随机振动问题, 给出了隔水管横向随机振动位移相关函数和均方位移的计算公式, 为深水隔水管的随机响应计算和工程设计提供了一定的理论基础。

3.4 深水钻井隔水管纵向振动分析

动态的波浪载荷一方面使隔水管产生横向振动, 另一方面通过钻井平台的升沉运动作用在隔水管顶部引起隔水管纵向振动, 对隔水管的轴向力及横向振动特性产生影响。随着水深增加, 隔水管纵向振动固有频率增大, 若平台升沉振动频率接近隔水管纵向振动的固有频率就会引发共振, 产生极大的振动载荷, 甚至使隔水管发生破坏。即使轴向振动载荷不超过隔水管的应力屈服极限, 隔水管在轴向交变载荷的作用下也可能发生疲劳破坏。在对隔水管进行纵向振动分析时, 通常将其看成具有无限多自由度的连续系统^[95],

考虑海水阻尼力作用下的纵向振动变形微分控制方程如下:

$$EA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - H \frac{\partial y}{\partial t} = w \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6)$$

式中, A 为隔水管的横截面积, m^2 ; H 为微元段单位长度的线性阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

目前, 隔水管纵向振动研究主要侧重于隔水管安装及紧急回收与撤离两个阶段, 分别对应2种悬挂方式: 软悬挂与硬悬挂。“软悬挂”是指隔水管顶部连接在钻井平台升降补偿器上^[96], “硬悬挂”是指隔水管顶端直接坐在钻井平台卡瓦上^[97], 2种悬挂方式如图6所示。

“紧急避台”是隔水管设计中的重要环节, 相关学者通过采用理论分析、数值模拟等综合方法对两种悬挂模式下的隔水管纵向振动力学行为进行了大量研究, 主要包括悬挂条件下隔水管轴向动力放大系数^[98]、轴向振动位移与应力^[98]、固有频率^[99]、隔水管避台撤离管理策略^[100]、安装作业窗口^[101]、浮力块配置的影响^[102]、隔水管寿命管理^[103]等内容。通过研究发现, 2种悬挂模式下隔水管的纵向振动力学特性有较大差别, 具体来讲, 软悬挂操作主要受上球铰转角与伸缩节冲程的限制, 硬悬挂操作主要受隔水管过度张力波动的限制, 相对于硬悬挂模式, 软悬挂模式比较安全可靠。推荐采用隔水管软悬挂模式实施避台风撤离。如果不具备软悬挂条件, 则可部分回收隔水管, 而将剩余的部分隔水管采用硬悬挂模式实施避台风撤离, 也是一种经济可行的技术方案。

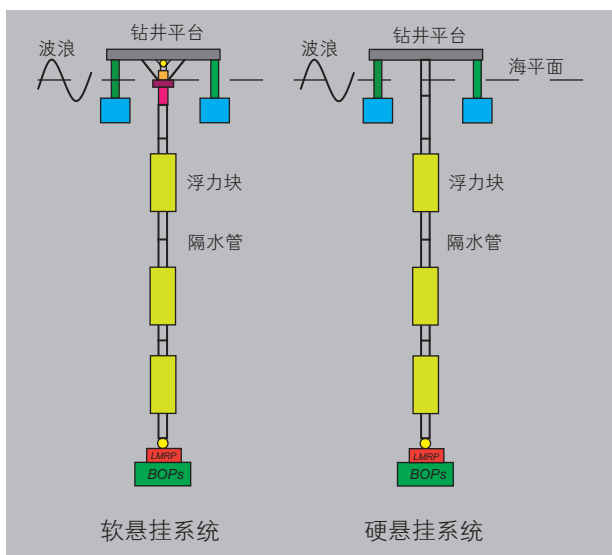


图6 深水钻井隔水管两种悬挂方式

Fig. 6 Twosuspension models of deep-water drilling riser

3.5 深水钻井隔水管耦合振动分析

深水钻井隔水管的耦合振动主要包括2种: 第1种是隔水管与钻井液的耦合振动, 第2种是隔水管参数激励与强迫激励的耦合振动。前者是指在深水钻井作业过程中, 位于隔水管与钻柱环空之间的钻井液自下而上由水下井口返至钻井平台, 上返的钻井液与横向振动的隔水管二者产生耦合振动^[104]; 所谓“强迫激励”是指隔水管在动态波流联合作用下的受迫振动, 所谓“参数激励”是指由于波浪动态作用导致钻井平台升降运动, 从而对隔水管顶部施加位移时程激励, 在这2种激励共同作用下发生上述第2种隔水管耦合振动^[105]。

与隔水管的横向振动相比较, 第1种耦合振动方程中增加了因隔水管内流体向上流动产生的水平牵连惯性力、相对惯性力和科氏惯性力的影响因素, 其控制方程^[104]如下:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (m_d v^2 - T) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + (m_c + m_d) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2m_d v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} = F(x, t) \quad (7)$$

式中, m_d 为单位长度隔水管内钻井液的质量, kg ; v 为钻井液上返流速, m/s ; $m_d v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ 为水平牵连惯性力, N ; $m_d \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ 为相对惯性力的水平分量, N ; $2m_d v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t}$ 为科氏惯性力, N 。

由于钻井液的影响, 隔水管横向振动的最大位移与波高呈正相关, 与顶张力、环空钻井液排量呈负相关。当由隔水管壁厚变化引起的隔水管横向振动固有频率与波浪横向振动频率相接近时, 横向振动位移急剧增大。耦合振动条件下隔水管的振动特性不仅取决于隔水管本身的力学与几何特性, 而且与隔水管所处的外部环境因素密切相关^[106]; 因此, 在隔水管的设计与管理过程中, 全面掌握外部因素对于正确评估隔水管疲劳寿命、防止隔水管共振、延长隔水管服役期限等具有重要的实际意义。

第2种隔水管耦合振动控制方程如下:

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - [T(x) + S \cos \Omega t] \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + c \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = F_y(x, t) \quad (8)$$

式中, $T(x)$ 为隔水管沿水深变化的轴向力, N ; S 为隔水管动态张力振动幅值, N ; Ω 为隔水管顶端激振力频率, rad/s 。这时, 垂直于水流方向的波流联合作用

力可分为 2 部分：一是由于涡街泄放过程产生的涡激升力 $F_L(x, t)$ ，二是由于隔水管 y 向运动而产生的流体阻尼力 $F_r(x, t)$ ，即：

$$F_y(x, t) = F_L(x, t) - F_r(x, t). \quad (9)$$

式(8)可采用龙格—库塔法^[105,107]求解，通过采用摄动法可将控制方程转化为马蒂厄方程，并据此分析隔水管参数激励的不稳定区，进而得到隔水管发生参激共振的顶部激励频率。以此频率为基础可对隔水管参激振动最危险的工况(参激共振)进行分析，讨论振动的模态响应历程，以及弯矩和剪力的变化。需要说明的是，虽然简支隔水管模型是多自由度系统，但由于各自由度之间不耦合，因此可用单自由度系统方法来分析^[105]。波流联合作用下隔水管耦合振动响应的非线性特征更为显著，相应的幅值变化及相位和振动响应频率的变化更为复杂，海流单独作用下隔水管总剪力主要由第 1 阶模态谐振引起，波流联合作用下各阶振动模态对总剪力均有影响，在计算波流联合作用下隔水管剪力时宜多考虑前几阶振型。

3.6 深水钻井隔水管涡激振动分析

从流体力学角度上来说，在一定的恒定流速作用下的任何非流线型物体，其两侧均会交替地产生脱离结构物表面的旋涡。对于海洋工程上普遍采用的圆柱形断面结构物，这种交替发放的旋涡又会在柱体上生成周期性变化的顺流向和横流向脉动压力。对于深水钻井中的送入管柱及隔水管而言，脉动流体力将引发管柱的周期性振动，这种规律性的柱状体振动反过来又会改变其尾流的旋涡发放形态，这种流体—结构物相互作用的问题被称作涡激振动^[35](Vortex-Induced Vibration, 简称“VIV”)。目前对隔水管涡激振动方面的研究主要集中在涡激动力响应计算、数值模拟分析、涡激抑制和涡激疲劳损伤预测等方面。

由于深水海域的海流速度通常比浅水海域要高，隔水管长度的增加降低了隔水管本身的固有频率，从而降低了激励 VIV 的流速阈值，因此深水条件下隔水管的涡激振动问题更加严重。目前隔水管的 VIV 研究主要以尾流振子模型^[108-110]为基础，通过建立隔水管涡激振动问题的数学与力学模型来阐述隔水管的涡激振动机理，主要考虑旋涡形成^[111]、泄放规律^[112]、尾流结构特征^[113]、升曳力系数^[114]等影响因素。在 VIV 数值模拟方面通过借助 CFD 软件模拟旋涡发放过程，对隔水管在海流流场、海浪流场以及海流与海浪的混合流场中进行流—固耦合分析，将所得结果与理论分析及实验数据进行对比，进一步加深对涡激振动发生时隔水管受力、

振幅及旋涡脱落等方面的认识。目前常用的流固耦合模拟软件包括 Ansys+CFX、Fluent+Abaqus、Adina、COMSOL Multiphysics、SHEAR 7 等，但目前在流固耦合作用机理、结构动态模型、获取全尺寸实验数据、实验数据解释及预测技术等方面仍存在较大困难^[115]。

涡激振动会导致隔水管产生疲劳损伤，影响其使用寿命，因此相关学者将疲劳可靠性理论应用在海洋工程中，以计算构件和系统的可靠度。疲劳分析、断裂力学、随机载荷响应分析和以概率为基础的设计和分析方法的发展，为分析预测隔水管疲劳寿命奠定了良好的理论基础^[116]。在深水钻井过程中，波流、风载、现场作业载荷等对隔水管的力学行为影响非常复杂，尤其是隔水管柱连接点及焊接部位的疲劳寿命预测精度，受到环境载荷、隔水管整体响应、疲劳强度及损伤积累等不确定性因素的严重制约。因此，关于隔水管疲劳寿命计算方法提出了雨流计数法、S-N 曲线法和 Miner 线性累积损伤法^[115]等多种方法，不同方法侧重点不同。例如，断裂力学方法与传统的 S-N 曲线相比较，前者通过考虑裂纹扩展模拟及裂纹非稳定性来确定构件裂纹的临界尺寸，而后者表征的是在一定的循环特征条件下标准试件的疲劳强度与疲劳寿命之间的关系曲线。可见不同的评价方法对应不同的要求，对深水钻井隔水管系统的疲劳评估，应根据具体的结构和环境情况，选取适当的评估方法^[117]。在实际工程中，可通过安装 VIV 抑制装置^[118]来抑制隔水管的涡激振动，以提高其疲劳使用寿命。

4 深水井筒完整性研究

“油气井完整性”指在井眼整个寿命期间，应用技术、操作和组织措施最大限度地减少地层流体不可控流动的风险，以确保油气井始终处于安全可靠的状态^[119]。在深水钻井过程中，浅层气与浅水流侵入井筒、深水固井失败及井筒环空圈闭压力升高等均会引发严重的井筒完整性问题。挪威石油安全管理局(PSA)对海上 106 口不同开发年限和生产类别的井进行井筒完整性调查发现，18%存在井筒完整性问题，其中 7%因井筒不完整而被迫关井，对环境和经济造成了重大损失^[120-121]。技术套管固井后，水下井筒会受到诸如软泥页岩膨胀、地层蠕动及非均匀地应力等复杂海洋地质环境的影响，套管柱载荷分析面临较大挑战^[122]。同时，在生产及测试过程中，由于温度升高使各层套管环空之间的流体膨胀，导致环空压力升高及井口抬升^[123-124]，对深水井筒完整性构成较大威

胁。因此,深入探讨深水钻井套管载荷分布特征,分析掌握诸多因素对套管强度及井身结构设计的影响规律^[125-126],对于提高深水钻井作业和水下井筒完整性具有重要的理论和工程意义。目前关于深水井筒完整性方面的研究,主要侧重于井筒温度分布规律预测,多层套管柱环空压力计算,环空圈闭压力增加导致套管破坏等。

4.1 井筒温度分布规律研究

井筒温度分布规律是深水钻井套管设计的重要组成部分,对于分析深水钻井工况下套管的内外压力和轴向力分布特征并进行强度设计具有重要的实际意义。

准确分析地层的非稳态传热是计算井筒温度分布规律的基础。国外学者首先把井筒内的流体传热与地层瞬态导热相结合,先后提出了井筒温度预测方法、综合传热系数及总传热系数的计算公式^[127-129]。后续井筒与地层间传热规律的研究主要集中在提高公式计算精度与适用范围方面^[130-132],但由于地层非稳态传热的复杂性,目前仍需要在公式计算精度方面进行深入研究。早期的井筒循环温度分布计算主要依靠API简易估算法^[133],后来相关学者对固井过程中的井筒温度进行了数值模拟,并提出了瞬态和拟稳态条件下预测井筒循环温度的方法及拟稳态条件下的解析解^[134]。由于井筒循环温度受到井深、套管、井眼尺寸、泵速、时间、钻井液参数、储层物理参数等诸多因素的综合影响,通常将温度预测模型中地层的影响转化成热量随时间变化的边界进行分析,并且忽略井筒内钻井液的轴向热传导,基于上述研究方法,先后得到了井壁温度预测方法^[135]、地层传热拟合公式^[136]和不同循环情况下钻井液循环温度的解析解^[137]。国内相关学者通过建立循环和静止过程中井内温度分布的预测模型,对影响井筒温度的因素进行了敏感性分析,并利用矩阵变换将二维传热问题简化为一维传热问题,从而提高了求解速度^[135-136]。但总体来讲,目前我国关于深水钻井循环温度预测的研究还未能充分考虑深水井筒的特点,也不能准确预测套管环空的循环温度分布,一些理论和技术问题仍需进一步探索研究。

4.2 深水井筒套管环空压力分析

水下防喷器安装完成后,由于井口没有泄压阀,在深水井测试和采油期间由于温度变化引起的密闭环空内流体升温膨胀会使套管环空产生附加载荷^[138],严重威胁深水管柱的安全服役寿命与井筒完整性。

国内外对陆地和浅水高温高压井因温度升高引起

的附加载荷进行了研究。文献[139]首先给出了多层套管柱附加载荷计算模型,并通过与单层套管计算结果进行对比分析,发现由于温度变化产生的多层自由段套管环空压力会产生较大的套管附加载荷,在套管设计时应予以考虑。一般情况下,套管环空压力受流体温度、压力、热膨胀系数和压缩系数的影响,工程应用中通常根据经验来选取模型的某些参数值,严重降低了模型的计算精度。目前计算自由套管段附加载荷的模型基本上是沿用Helal和Admas给出的方法;但Oudemans通过现场试验发现现有的套管环空压力计算模型高估了套管环空压力值,并认为环空流体参数取值是影响模型精度的原因^[140]。除了研究理论计算以外,Leach和Adams总结了5种预防自由套管段附加载荷的方法,包括改变水泥返高、设计井口卸压通道、提高套管强度、填充可破裂泡沫球和注入压缩流体^[141]。同时,该文献也详细讨论了填充可破裂泡沫球的控制方法,还讨论了填充可压缩低密度流体的预防方法。这2种方法操作简单、成本低,在室内和现场试验中得到了良好效果。国内针对深水钻井作业特点,考虑隔水管段井筒传热、钻井液增注、套管及其环空等因素的影响,建立了套管环空循环温度预测模型^[142]。通过计算分析发现:隔水管增注对海水段井筒温度影响较大,对于地层段井筒温度影响较小,其影响程度随增注量的增大而增加;套管及其环空流体对地层段井筒内流体起保温作用,与生产过程相比,钻井过程中井筒环空流体温度更低,与套管环空流体的温度差更大。同时,考虑管柱与环空流体的相互作用,建立了多层套管柱环空压力计算模型,从理论上解释了深水套管环空圈闭压力产生附加载荷的机理。今后仍需要进一步针对不同深水钻完井作业工况,考虑温度、力学、流体热膨胀与压缩等诸多效应,建立深水井筒温差产生附加载荷的计算模型,并形成相应的设计控制新技术,指导工程实践。

4.3 深水井筒套管应力分布研究

深水井筒产出的高温流体不仅会引起套管环空附加压力,还会引起套管与地层之间的附加载荷,而套管的热膨胀还会加剧套管环空附加压力,因而有必要研究套管—水泥环—地层系统热膨胀产生的载荷与位移。国外早期研究了温度对套管强度的影响^[143],随着研究的深入,人们意识到当近井地带井筒温度升值较大时,套管—水泥环—地层系统同时膨胀形成的附加应力会造成严重的井筒完整性破坏。国外学者Rahman在热弹性力学的轴对称理论基础上,基于前人在温度

场方面的研究成果,推导了多层介质的应力分布计算模型,为后来的研究打下了基础^[144]。目前温度载荷下套管的受力问题在国内的研究也比较活跃,一些学者在热弹性力学理论的基础上建立了套管与弹性地层的相互作用模型,并根据拟合的温度函数推导了套管与地层耦合系统的热应力和热位移计算公式^[145-146]。其中:文献[147]分析了系统的热应力和热位移径向分布规律,以及套管温升、弹性模量、热膨胀系数、壁厚、水泥环和地层的弹性模量和泊松比等参数对套管热应力和热位移的影响;文献[148]将岩层系统分成冷区和热区,并讨论了冷热地层刚度对套管载荷的影响;但求解过程中温度分布函数是假设的,没有利用井筒传热方面的研究成果。还有部分学者通过数值方法研究了套管在高温井及热采井中的破坏机理与预防方法^[149-151]。总体上讲,目前主要通过数值方法来模拟和求解套管应力;但现有的理论计算公式难以充分借鉴井筒温度分布的研究成果,且忽略了套管内压的影响,今后仍需在此方面进行深入探索。

5 深水管柱力学模拟实验方法研究

深水钻井管柱在服役状态下所受的外载荷包括平台偏移、横向波流力、轴向拉压、内压外挤等,会产生磨损、断裂、挤毁等不同形式的失效形式。除了理论分析以外,通过试验方法模拟分析深水管柱力学行为,对于提高深水管柱力学的综合研究水平具有必要性。然而,外压施加一直是深水钻井隔水管模拟实验过程中的难点,外压加载一方面要求设备具有足够的空间以安装模拟试件,另一方面又要求实验装备具有较大的承压能力。经调研,巴西里约热内卢大学装备有1套海洋深水模拟实验装置,可提供10 MPa的水压,最大模拟水深仅为1 000 m,而目前第5代和第6代钻井平台(船)的钻井水深为3 000 m(最大水压为30 MPa)。为此,中国石油大学(北京)相关学科组研制出“深水管柱力学模拟实验装置”,可以提供30 MPa

的额定工作压力,能够有效模拟3 000 m的钻井作业水深,并且能够对试验管柱试件施加内外压力、轴向力及横向力^[152],该模拟实验系统的主体如图7所示。

该实验装置主要由承压主缸筒、液压作用器、液压伺服控制系统、数据采集系统及相应的管路与控制线等组成。承压主缸筒主要由主缸筒、轴向活塞、活塞杆、端部卡箍及相应的密封元件等组成,是系统承压的主体组成部分;液压作用器主要由水—油伺服增压作用缸及伺服控制阀组成,可以输出试验要求所需要的压力和流量;液压伺服控制系统主要由伺服系统控制柜及相应的软件组成,向液压伺服阀发出指令,控制伺服阀的动作及幅度;数据采集系统主要由压力、应变、位移等数据采集仪器组成,将采集得到的信号存入电脑以备后续处理。模拟实验试件通过两端的连接头及连接销与活塞杆相连,实现轴向加载,为了配合不同试验的需要,系统配备了一套液压比例控制系统和一套液压伺服控制系统、一套静态数据采集仪器及一套动态数据采集仪器。另外,系统配备了电控可移动的拆装小车与拆装吊车,可以方便地对实验装置和模拟试件进行拆装,其主要技术参数如表1和表2所示。

采用水下应变测试技术^[153],该实验系统可以完成深水管柱的抗外挤、抗内压、轴向拉压、横向弯曲、组合实验、内外压下的旋转弯曲及弯曲疲劳、管材S-N曲线测定及深水设备的密封性能测试等系列实验。

另外,文献[154]推导了光纤光栅的中心波长与隔水管最大应力和弯矩之间的关系,通过将光纤光栅传感器沿隔水管周向布置,可以实现对隔水管应力的实时监测,该种类型传感器的最大优点是可免受海水腐蚀;文献[155]介绍了基于钻井和海洋工况耦合作用下的深水钻井隔水管力学性能实验,通过利用光纤光栅传感器对隔水管的力学特性进行测量,发现了剪切流作用下深水钻井隔水管的“三分之一效应”;文献[156]介绍了一种可以对深水钻井工况下隔水管进行振动特性模拟的实验装置及实验方法,利用该实验装置可以考察不同长度隔水管在不同顶张力、钻井液

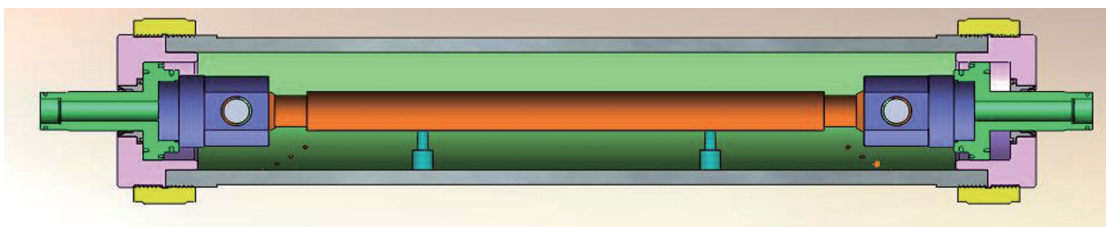


图7 深水管柱力学模拟实验系统

Fig. 7 Experimental system for simulation of deep-water tubular mechanics

表1 模拟实验系统的主要结构参数

Table 1 Main structure parameters of the experimental system

主缸筒				端部活塞		
外径/mm	内径/mm	长度/mm	耐压值/MPa	直径/mm	活塞杆直径/mm	行程/mm
1500	1200	8000	30	1000	400	220

表2 液压控制系统的主要参数

Table 2 Main parameters of the hydraulic control system

	油缸内径/ mm	活塞杆径/ mm	测控行程/ mm	最大速度/ m/s	油水增压比	输出最高水压/ MPa	限定工作压力/ MPa	阀压力等级/ MPa
比例增压泵	180	120	700	0.5	2.25	56	30	31.5
伺服增压缸	180	120	700	1.0	1.65	46	30	28
横向增压缸	140	80	100	-	-	25	25	28

密度、排量及转速下的隔水管振动特性的影响；文献[157]针对海洋深水钻井隔水管在疲劳实验过程中的加载问题，提出了一种疲劳实验载荷的计算方法，并用该方法计算了试样在各种应力幅下进行疲劳实验时的内压数据，可作为深水钻井隔水管疲劳实验外载荷的计算依据；文献[158]针对海洋隔水管疲劳实验问题，特别对轴向拉伸疲劳实验和共振弯曲疲劳实验，阐述了不同试验方法的试验原理、试验机模型、优缺点及使用情况，最后确定了隔水管材料和结构疲劳实验方法，以及相应的实验参数，可为我国隔水管疲劳实验机设计与疲劳实验研究提供参考。

6 结束语

(1)深水钻井管柱力学研究涉及内容较多，研究方法也比较先进，并取得了重要研究进展，对深水钻井理论创新与技术进步产生了重要的推动作用。

(2)水下井口是深水油气工程关键建设内容之一。为提高水下井口的稳定性和安全可靠，需要准确获取海底岩土层的力学参数，进而对深水导管入泥深度、

喷射安装工艺及桩土相互作用规律等进行详细的系统研究，不断提高相应的设计控制技术水平。

(3)深水钻井隔水管安装是深水钻井作业的关键环节之一。为确定更为合理的深水隔水管安装作业窗口，需要考虑环境载荷与作业因素的综合影响，对深水钻井隔水管安装过程中的力学行为进行理论分析及数值和物理模拟。

(4)深水钻井隔水管的涡激振动和疲劳寿命评估，事关隔水管的安全服役寿命，在流固耦合机理、结构动态模型、全尺寸模拟实验及预测模型等方面仍需开展深入研究，并根据具体的结构和环境情况，选取相适应的计算方法对其疲劳寿命进行综合评估。

(5)深水井筒完整性科学评价与设计控制问题十分复杂，在井筒温度、环空压力及套管应力等方面仍需进行深入研究。

(6)模拟实验是进行深水管柱力学研究的必要手段之一，需要根据不同要求进行管柱力学模拟实验设计，获取有效的模拟实验数据，以期对相关理论模型进行验证或修正。

参考文献

- [1] WATSON P A, IYOHO A W, MEIZE R A, et al. Management issues and technical experience in deep-water and ultra-deep-water drilling[C]. Offshore Technology Conference, 2-5 May, Houston, Texas, OTC 17119, 2005.
- [2] SHAUGHNESSY J, DAUGHERTY W, GRAFF T, et al. More ultra-deep-water drilling problems[C]. SPE/IADC Drilling Conference, 20-22 February, Amsterdam, Netherlands, SPE 105792, 2007.
- [3] CHARLEZ P A, SIMONDIN A. A collection of innovative answers to solve the main problematic encountered when drilling deep water prospects[C]. Offshore Technology Conference, 5-8 May, Houston, Texas, OTC 15234, 2003.
- [4] CUNHA J C. Innovative design for deep-water exploratory well[C]. IADC/SPE Drilling Conference, 2-4 March, Dallas, Texas, SPE 87154, 2004.

- [5] 杨进, 曹式敬. 深水石油钻井技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 10-13. [YANG J, CAO S J. Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deep-water[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 10-13.]
- [6] 张晓东, 王海娟. 深水钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2010, 30(9): 46-48. [ZHANG X D, WANG H J. Progress and outlook of deep-water drilling technologies[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(9):46-48.]
- [7] 王友华, 王文海, 蒋兴迅. 南海深水钻井作业面临的挑战和对策[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 50-55. [WANG Y H, WANG W H, JIANG X X. South China Sea deep-water drilling challenges and solutions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 50-55.]
- [8] 杨金华. 全球深水钻井现状与前景[J]. 石油科技论坛, 2014, 1: 46-50. [YANG J H. Overview of global deep-water drilling business[J]. Oil Forum, 2014,1: 46-50.]
- [9] BECK R D, JACKSON C W, HAMILTON T K. Reliable deep-water structural casing installation using controlled jetting[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October, Dallas, Texas, SPE 22542, 1991.
- [10] KING G W, SOLOMON I J. The instrumentation of the conductor of a subsea well in the north sea to measure the installed conditions and behavior under load[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(4): 265-270.
- [11] SPARREVIK P. Suction pile technology and installation in deep waters[C]. Offshore Technology Conference, 6-9 May, Houston, Texas, OTC14241, 2002.
- [12] CHOE J, WOLD H C J. Unconventional method of conductor installation to solve shallow water flow problems[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 5-8 October, San Antonio, Texas, SPE 38625, 1997.
- [13] NOORT R V, MURRAY R, WISE J, et al. Conductor pre-installation, deep-water Brazil[C]. Offshore Technology Conference, 4-7 May, Houston, Texas, OTC 20005, 2009.
- [14] MACKENZIE B, FRANCIS M, GARRETT I, et al. Conductor jetting experiences in deep-water offshore ghana-an investigation into geotechnical and operational influences on success and establishment of future best practice[C]. Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Presentand Future, 12-14 September, London, UK, SUT-OSIG-12-13, 2012.
- [15] 黄小龙, 刘正礼, 陈建兵. 深水结构导管喷射钻井技术研究[J]. 科技创新导报, 2003, 1: 88. [HUANG X L, LIU Z L, CHEN J B. Conductor jetting technology research in deep-water drilling[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2003, 1: 88.]
- [16] 陈彬, 刘正礼, 罗俊丰, 等. 南海深水钻井表层导管喷射作业实践[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(9): 109-111. [CHEN B, LIU Z L, LUO J F, et al. Deep-water drilling conductor jetting practices in south china sea[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(9): 109-111.]
- [17] ADAMS R J. Proven landing string design for ultra-deep-water application[J]. World Oil, 2001, 222(7): 73-79.
- [18] BREIHAN J W, ALTERMANN J A, JELLISON M J. Landing tubulars design, manufacture, inspection and use issues[C]. SPE/IADC Drilling Conference, 27 February-1 March, Amsterdam, Netherlands, SPE 67723, 2001.
- [19] CANTRELL A, BEIRIGER C, EVERAGE D, et al. Design and qualification of critical landing string assemblies for deep-water[C]. IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March, Orlando, Florida, USA, SPE 112787, 2008.
- [20] SIMPSON B, PAYNE M L, JELLISON M J, et al. 2,000,000-lbf landing string developments: Novel slipless technology extends the deep-water operating envelope[J]. SPE Drilling and Completion, 2005, 20(2): 109-122.
- [21] 路宝平. 深水钻井关键技术与装备[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014. [LU B P. Key technology and equipment in deep-water drilling[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014.]
- [22] 陈建兵. 深水探井钻井工程设计方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014. [CHEN J B. Exploratory well design method in deep-water drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.]
- [23] EGELAND O, WIJK T, NATVIG B J, et al. Dynamic analysis of marine risers[C]. Offshore South East Asia Show, 9-12 February, Singapore, SPE10420,1982.
- [24] KHANA R A, KAURB A, SINGHC S P, et al. Nonlinear dynamic analysis of marine risers under random loads for deep-water fields in indian offshore[J]. Procedia Engineering, 2006, 14: 1334-1342.
- [25] 畅元江, 陈国明, 许宏斌, 等. 深水顶部张紧钻井隔水管非线性静力分析[J]. 中国海上油气, 2007, 19(3): 203-207. [CHANG Y J, CHEN G M, XU L B, et al. Nonlinear static analysis of top tensioned drilling riser in deep-water[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(3): 203-207.]
- [26] 张炜, 高德利, 范春英. 钻井隔水管挤毁分析[J]. 钻采工艺, 2010, 33(04): 74-76. [ZHANG W, GAO D L, FAN C Y. Hydrostatic collapse analysis of marine drilling riser[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 74-76.]
- [27] 鞠少栋, 畅元江, 陈国明, 等. 超深水钻井作业隔水管顶张力确定方法[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 100-104. [JU S D, CHANG Y J, CHEN G M, et al. Determination methods for the top tension of ultra-deep-water drilling risers[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(1): 100-104.]
- [28] 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, 2000.
- [29] American Petroleum Institute. API RP 2A-LRFD-1993: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore

- platforms-load and resistance factor design[S], Washington D.C, 1993.
- [30] American Petroleum Institute API BULL 5C3. Bulletin on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe and line pipe properties[S]. Washington, D.C, 1994.
- [31] DET NORSKE VERITAS. Offshore standard DNV-OS-F101 submarine pipeline system[S]. DNV, 2000.
- [32] American Petroleum Institute. API RP 16Q 93: Recommended practice for design, selection, operation and maintenance of marine drilling riser systems[S]. Washington, D.C, 1993.
- [33] 朱艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991. [ZHU Y R. Ocean engineering wave mechanics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.]
- [34] 方华灿. 海洋石油钻采设备理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. [FANG H C. Theoretical basis for offshore oil drilling equipment[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.]
- [35] 吕苗荣. 石油工程管柱力学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012. [LV M R. String mechanics in petroleum engineering[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.]
- [36] AKERS T J. Jetting of structural casing in deep-water environments: Job design and operational practice[J]. SPE Drilling & Completion, 2008, 23(1): 29-40.
- [37] YANG J, LIU S J, Zhou J L, et al. Research of conductor setting depth using jetting in the surface of deep-water[C]. International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10 June, Beijing, China, SPE 130523, 2010.
- [38] PEREIRA M F, SILVIO A D, RUIZ J C. Deep-water conductor pre-installation for first TLWP in Brazil[C]. OTC Brazil, 29-31 October, Rio de Janeiro, Brazil, OTC 24291, 2013.
- [39] 叶庆志, 王建华. 喷射导管安装后实时承载力分析[J]. 低温建筑技术, 2014, 1: 112-114. [YE Q Z, WANG J H. Research on bearing capacity of conductor for deep-water drilling after installation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 1: 112-114.]
- [40] 袁光宇. 我国海上钻井隔水导管使用现状及发展趋势[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(7): 102-103, 123. [YUAN G Y. China's offshore drilling riser use present situation and development trend[J]. Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit), 2012, 9(7): 102-103, 123.]
- [41] 易先忠, 钟守炎, 水运震. 井下动力钻具的现状与发展[J]. 石油机械, 1995, 23(11): 53-57. [YI X Z, ZHONG S Y, SHUI Y Z. The status and development of downhole drilling tools[J]. Petroleum Machinery, 1995, 23(11): 53-57.]
- [42] HUGHES J D, COLEMAN R A, HERRMANN R P, et al. Batch drilling and positioning of subsea wells in the South China Sea[C]. International Meeting on Petroleum Engineering, 14-17 November, Beijing, China, SPE 29909, 1995.
- [43] HERRMANN R P, COLEMAN R A, HUGHES J D, et al. Lihua 11-1 development-subsea conductor installation in the South China Sea[C]. Offshore Technology Conference, 6-9 May, Houston, Texas, OTC 8174, 1996.
- [44] 林广辉. 随钻下套管技术在我国南海油田的首次应用[J]. 中国海上油气(工程), 1996, 8(1): 53-58. [LIN G H. Casing while drilling technique first application in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1996, 8(1): 53-58.]
- [45] 周建良, 杨进, 严德, 等. 深水表层导管下入方式适应性分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(2): 66-69. [ZHOU J L, YANG J, YAN D, et al. Research of installation technique for surface conductor in deep-water drilling[J]. Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit), 2013, 10(2): 66-69.]
- [46] DICK A J, CASSELLS R. Developing HP/HT landing string technologies[C]. Offshore Technology Conference, 3-6 May, Houston, Texas, OTC 16208, 2004.
- [47] AMEZAGA F, RIALS J R, HEIDECHE K. Landing string slip system: State-of-the-art design to minimise pipe crushing problems[C]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 14-16 October, Adelaide, Australia, SPE 171408, 2014.
- [48] JELLISON M J, PAYNE M L, SHEPARD J S, et al. Next generation drill pipe for extended reach, deep-water and ultra-deep drilling[C]. Offshore Technology Conference, 5-8 May, Houston, Texas, OTC 15327, 2003.
- [49] CANTRELL A, BEIRIGER C, EVERAGE D, et al. Design and qualification of critical landing string assemblies for deep-water[C]. IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March, Orlando, Florida, USA, SPE 112787, 2008.
- [50] 钻井手册(甲方)编写组. 钻井手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. [Drilling manual[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.]
- [51] 董星亮, 曹式敬, 唐海雄, 等. 海洋钻井手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. [DONG X L, CAO S J, TANG H X, et al. Offshore drilling manual[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [52] American petroleum institute. API RP 7G: Recommended practice for drill stem design and operating limits[S]. American Petroleum Institute, Washington D. C., 1998.
- [53] SATHUVALLI U B, PAYNE M L, SURYANARANANA P V, SHEPARD J. Advanced slip-crushing considerations for deep-water drilling[J]. SPE Drilling and Completion, 2002, 17(4): 210-223.
- [54] BROCK J, CHIN D, SANCLEMENTE L. 2,500,000 pound landing string challenges: Have we reached the limit of today's technology[C]. Offshore Technology Conference, 3-6 May, Houston, Texas, USA, OTC 20823, 2010.
- [55] BROCK J N, CHANDLER R B, JELLISON M J, et al. 2 million-lbf slip-based landing string system pushes the limit of deep-water

- casing running[C]. Offshore Technology Conference, 30 April-3 May, Houston, Texas, U.S.A, OTC 18496, 2007.
- [56] 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 & Completion, 2009, 24(1): 71-88.
- [57] EVERAGE S D, ZHENG N J, ELLIS S E. Evaluation of heave-induced dynamic loading on deep-water landing strings[J]. SPE Drilling & Completion, 2005, 20(4): 230-238.
- [58] ZHENG N J, BAKER J M, EVERAGE S D. Further consideration of heave-induced dynamic loading on deep-water landing strings[C]. SPE/IADC Drilling Conference, 23-25 February, Amsterdam, Netherlands, SPE 92309, 2005.
- [59] 高德利, 张辉. 无隔水管深水钻井作业管柱的力学分析[J]. 科技导报, 2012, 30(4): 37-42. [GAO D L, ZHANG H. Mechanical analysis of tubes in deep-water drilling operation without riser[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(4): 37-42.]
- [60] ZHANG H, GAO D L, TANG H X. Landing string design and strength check in ultra-deep-water condition[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, 2(4): 178-182.
- [61] 张辉. 深水导管设计与安装力学行为研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2010. [ZHANG H. Research on mechanical behavior of drill string in jetting conductor operation under deep-water condition[D]. Beijing: China University of Petroleum- Beijing, 2010.]
- [62] 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 H, GAO D L, TANG H X. Mechanics analysis of jetting string during operation of conductor[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(6): 148-151.]
- [63] 张辉, 高德利, 唐海雄, 等. 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 H, GAO D L, TANG H X, et al. Tubular mechanics in jetting operation of conductor under deep-water condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 516-520.]
- [64] ZHOU B, YANG J, XU Y J, et al. Experimental research on structural casing soaking time in deep-water drilling[C]. SPE Deep-water Drilling and Completions Conference, 10-11 September, Galveston, Texas, USA, SPE 170317, 2014.
- [65] JEANJEAN P. Innovative design method for deep-water surface casing[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 29 September-2 October, San Antonio, Texas, SPE 77357, 2002.
- [66] 刘正礼, 唐海雄, 王跃曾, 等. 深水喷射导管实用设计方法[J]. 长江大学学报, 2010, 7(1): 189-191. [LIU Z L, TANG H X, WANG Y Z, et al. Deep water injection catheter and practical design method[J]. Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit.), 2010, 7(1): 189-191.]
- [67] 付英军, 姜伟, 朱荣东. 深水表层导管安装方法及风险控制技术研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(06): 153-157. [FU Y J, JIANG W, ZHU R D. Installation method and risk control technology of surface conductors[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 153-157.]
- [68] 刘书杰, 杨进, 周建良, 等. 深水海底浅层喷射钻进过程中钻压与钻速关系[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(01): 12-15. [LIU S J, YANG J, ZHOU J L, et al. Research on relationship between weight-on-bit and drilling rate during jetting drilling in sub-bottom deep-water[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(01): 12-15.]
- [69] 汪顺文, 杨进, 刘正礼, 等. 深水表层导管喷射钻进机理研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(8): 157-160. [WANG S W, YANG J, LIU Z L, et al. Research of jetting drilling mechanism of surface conductor in deep-water[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(8): 157-160.]
- [70] 周建良. 深水表层导管喷射钻进过程中钻井液排量优化研究[J]. 中国海上油气, 2012, 24(04): 50-52. [ZHOU J L. Research on during jetting the optimization drilling of surface of delivery capacity conduct in deep-water[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(4): 50-52.]
- [71] 杨进, 周波, 刘书杰, 等. 深水喷射下表层导管合理钻头伸出量计算[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 367-370. [YANG J, ZHOU B, LIU S J, et al. Bit stick-out calculation for the deep-water conductor jetting technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 367-370.]
- [72] JEANJEAN P. Re-assessment of P-Y curves for soft clays from centrifuge testing and finite element modeling[C]. Offshore Technology Conference, 4-7 May, Houston, Texas, OTC 20158, 2009.
- [73] KING G W, SOLOMON I J. The instrumentation of the conductor of a subsea well in the North Sea to measure the installed conditions and behavior under load[C]. Offshore Technology Conference, 3-6 May, Houston, Texas, OTC 7232, 1993.
- [74] EVANS T G, FEYEREISEN S, RHEAUME G. Axial capacities of jetted well conductors in Angola[C]. Offshore Site Investigation and Geotechnics 'Diversity and Sustainability': Proceedings of an International Conference, 26-28 November, London, UK, OSIG-02-325, 2002.
- [75] 杨进, 彭苏萍, 周建, 等. 海上钻井隔水导管最小入泥深度研究[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(2): 79-81. [YANG J, PENG S P, ZHOU J, et al. Study on the minimum driving depth of offshore drilling riser[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(2): 79-81.]
- [76] 杨进. 海上钻井隔水导管极限承载力计算[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 28-30. [YANG J. Calculation of ultimate load-bearing capacity of offshore riser pipe[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 28-30.]

- [77] 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(04): 47-50. [SU K H, GUAN Z C, SU Y N. Determination method of conductor setting depth using jetting drilling in deep-water[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(04): 47-50.]
- [78] 唐海雄, 罗俊丰, 叶吉华, 等. 南海超深水喷射钻井导管入泥深度设计方法[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(3): 147-151. [TANG H X, LUO J F, YE J H, et al. Method of design of conductor setting depth for ultra-deep-water jetting drilling in South China Sea[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 33(3): 147-151.]
- [79] 管志川, 苏堪华, 苏义脑. 深水钻井导管和表层套管横向承载能力分析[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 285-290. [GUAN Z C, SU K H, SU Y N. Analysis on lateral load bearing capacity of conductor and surface casing for deep-water drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 285-290.]
- [80] 王宴滨, 高德利, 房军. 考虑不同桩土接触模型的深水钻井导管承载能力数值分析[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 76-81. [WANG Y B, GAO D L, FANG J. Numerical analysis of bearing capacity of deep-water conductor with consideration of different contract interface models between pile and soil[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 76-81.]
- [81] SPARKS C P. The influence of tension, pressure and weight on pipe and riser deformations[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1984, 106(1): 46-54.
- [82] THOROGOOD J L, TRAIN A S, ADAMS A J. Deep water riser system design and management[C]. IADC/SPE Drilling Conference, 3-6 March, Dallas, Texas, IADC/SPE 39295, 1998.
- [83] WANG Y B, GAO D L, FANG J. Static analysis of deep-water marine riser subjected to both axial and lateral forces in its installation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 19: 84-90.
- [84] 李妍, 吴艳新, 高德利. 深水钻井隔水管纵横弯曲变形解析[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(7): 21-24. [LI Y, WU Y X, GAO D L. Analytic solution of flexural deformation of deep-water drilling riser[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(7): 21-24.]
- [85] ERTAS A, KOZIK T J. Numeric solution techniques for dynamic analysis of marine riser[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1987, 109(1): 1-5.]
- [86] 贾星兰, 方华灿. 海洋钻井隔水管的动力响应[J]. 石油机械, 1995, 23(8): 18-22, 28. [JIA X L, FANG H C. Dynamic response of riser system in marine drilling[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(8): 18-22, 28.]
- [87] WANG Y B, GAO D L, FANG J. Study on lateral vibration analysis of marine riser in installation via vibrational approach[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 523-529.
- [88] 畅元江. 深水钻井隔水管设计方法及其应用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008. [CHANG Y J. Design approach and its application for deep-water drilling risers[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008.]
- [89] 石晓兵, 陈平. 三维载荷对海洋深水钻井隔水管强度的影响分析[J]. 天然气工业, 2004(12): 86-88. [SHI X B, CHEN P. Influence of 3-D loads on strength of marine riser for offshore deep drilling[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12): 86-88.]
- [90] 石晓兵, 郭昭学, 聂荣国, 等. 海洋深水钻井隔水管动力分析[J]. 天然气工业, 2003, (S1): 81-83. [SHI X B, GUO Z X, NIE R G, et al. Dynamic analysis of marine riser for offshore deep drilling[J]. Natural Gas Industry, 2003 (S1): 81-83.]
- [91] 周俊昌. 海洋深水钻井隔水管系统分析[D]. 成都: 西南石油学院, 2001. [ZHOU J C. The research on drilling riser system of offshore deep water[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2001.]
- [92] 王林, 石晓兵, 聂荣国, 等. 轴向载荷对海洋深水钻井隔水管力学特性的影响分析[J]. 石油矿场机械, 2004, 33(01): 30-32. [WANG L, SHI X B, NIE R G, et al. Analysis of axial load influence on mechanics characteristic of ocean deep-water drilling riser[J]. Oil Field Equipment, 2004, 33(01): 30-32.]
- [93] 王腾, 张修占, 朱为全. 平台运动下深水钻井隔水管非线性动力响应研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(3): 21-26. [WANG T, ZHANG X Z, ZHU W Q. Study on nonlinear dynamic response of deep-water drilling riser with vessel motions[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(3): 21-26.]
- [94] 李军强, 方同. 海洋钻井隔水管随机振动的理论分析[J]. 石油机械, 2000, 28(8): 47-49. [LI J Q, FANG T. Theoretic analysis for random vibration of riser system in marine drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2000, 28(8): 47-49.]
- [95] WANG Y B, GAO D L, FANG J. Axial dynamic analysis of marine riser in installation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 112-117.
- [96] AMBROSE B D, GREALISH F, WHOOLEY K. Soft hangoff method for drilling risers in ultra deep-water[C]. Offshore Technology Conference, 30 April-3 May, Houston, Texas, OTC 13186, 2001.
- [97] 张炜, 高德利. 深水钻井隔水管脱开模式下纵向动态行为研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 7-9. [ZHANG W, GAO D L. Research on the dynamic behavior of riser in deep-water drilling under the condition of disconnection mode[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 7-9.]
- [98] 孙友义, 陈国明, 畅元江. 下放或回收作业状态下超深水钻井隔水管轴向动力分析[J]. 中国海上油气, 2009, 21(2): 116-119. [SUN Y Y, CHEN G M, CHANG Y J. Axial direction dynamic analysis on ultro-deep-water drilling riser under setting down and recovery operations[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(2): 116-119.]

- [99] 高洋, 高玉平, 张啸斐, 等. 海洋钻井隔水管悬挂状态下轴向动力特性比对研究[J]. 中国造船, 2014, 55(2): 114-121. [GAO F, GAO Y P, ZHANG X F, et al. Comparison of axial dynamic characteristics between hang-off modes of marine drilling riser[J]. Ship Building of China, 2014, 55(2): 114-121.]
- [100] 孙友义, 陈国明, 畅元江, 等. 超深水隔水管悬挂动力分析与避台风策略探讨[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(2): 29-32. [SUN Y Y, CHEN G M, CHANG Y L, et al. Hangoff dynamic analysis and the discussion of typhoon-avoidance strategy for ultra-deep-water drilling riser[J]. China Offshore Platform, 2009, 24(2): 29-32.]
- [101] WANG Y B, GAO D L, FANG J. Mechanical behavior analysis for the determination of riser installation window in deep-water drilling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 317-323.
- [102] 王宴滨, 高德利, 房军. 浮力块对深水钻井隔水管安装过程性能的影响[J]. 石油机械, 2015, 43(7): 47-50. [WANG Y B, GAO D L, FANG J. Influence of buoyancy modules on mechanical property of deep-water drilling riser installation[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(7): 47-50.]
- [103] 彭朋. 深水钻井隔水管寿命管理技术研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009. [PENG P. Life management technique for deep-water drilling risers[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009.]
- [104] 王宴滨, 高德利, 房军. 海洋钻井隔水管—钻井液横向耦合振动特性[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 25-29. [WANG Y B, GAO D L, FANG J. Characteristic analysis on transverse coupling vibration of offshore drilling riser-drilling fluid[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 25-29.]
- [105] WANG Y B, GAO D L, FANG J. Coupled dynamic analysis of deep-water drilling riser under combined forcing and parametric excitation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 1739-1747.
- [106] 刘清友, 周守为, 姜伟, 等. 基于钻井工况和海洋环境耦合作用下的隔水管动力学模型[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 6-12. [LIU Q Y, ZHOU S W, JIANG W, et al. A dynamic model of marine risers/pipes under the drilling operation condition and sea environment[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 6-12.]
- [107] PARK H, JUNG D, PIAO C. 3-D numerical analysis of a long slender marine structure under combined axial and lateral excitation[C]. The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, 30 May-4 June, Brest, France, ISOPE-I-99-159, 1999.
- [108] BEATTIE J F, BROWN L P, WEBB B F. Lift and drag forces on a submerged circular cylinder[C]. Offshore Technology Conference, 19-21 April, Houston, Texas, OTC 1358, 1971.
- [109] SARPKEYA T. Hydrodynamic lift and drag on rough circular cylinders[C]. Offshore Technology Conference, 6-9 May, Houston, Texas, OTC 6518, 1991.
- [110] 盛磊祥. 海洋管状结构涡激振动流体动力学分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009. [SHENG L X. Computational fluid dynamics analysis on vortex-induced vibrations of offshore tubular structures[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009.]
- [111] 林海花. 隔水管涡激动力响应及疲劳损伤可靠性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. [LIN H H. Analysis of VIV dynamic response and fatigue damage reliability for marine riser[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.]
- [112] 赵鹏良. 隔水管及附属整流罩涡激振动的流固耦合模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. [ZHAO P L. Numerical simulation of fluid-structural interaction for vortex-induced vibration of marine risers and attached fairings[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.]
- [113] 赵卓茂, 王嘉松, 谷斐. 附属管对钻井隔水管涡激振动流动控制的研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2012, 27(4): 401-408. [ZHAO Z M, WANG J S, GU F. The flow control of vortex-induced vibration for drilling riser by affiliated pipelines[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (A), 2012, 27(4): 401-408.]
- [114] VANDIVER J K. Research challenges in the vortex-induced vibration prediction of marine risers[C]. Offshore Technology Conference, 4-7 May, Houston, Texas, OTC 8698, 1998.
- [115] 时米波. 深水钻井隔水管系统疲劳可靠性分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008. [SHI M B. Fatigue reliability analysis for deep-water drilling riser system[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008.]
- [116] 谢彬, 段梦兰, 秦太验, 等. 海洋深水立管的疲劳断裂与可靠性评估研究进展[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 95-99. [XIE B, DUAN M L, QIN T Y, et al. Advance of research on fatigue fracture and reliability assessment of deep-water risers[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 95-99.]
- [117] LUBBAD R K, LØSET S, GUDMESTAD O T, TØRUM A, MOE G. Vortex induced vibrations of slender marine risers-effects of round-sectioned helical strakes[C]. The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1-6 July, Lisbon, Portugal, ISOPE-I-07-037, 2007.
- [118] 左金菊. 深水钻井隔水管涡激振动机理及其抑制研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [ZUO J J. Research on deep-water drilling riser vortex-induced vibration mechanism and its inhibition[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.]
- [119] Norsok stanard. D-010: Well integrity in drilling and well operations, Rev. 3[S]. August, 2004.
- [120] VIGNES B, AADNOY B S. Well-integrity issues offshore norway[C]. IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March, Orlando, Florida,

- USA, SPE 112535, 2008.
- [121] VIGNES B, TONNING S A, AADNOY B. Integrity issues in norwegian injection wells[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 3-6 November, Abu Dhabi, UAE, SPE 118101, 2008.
- [122] 钱锋. 深水套管柱载荷分析与设计方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012. [QIAN F. Load analysis and strength design of casing in deep-water wells[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2012.]
- [123] QIAN F, GAO D L. A mechanical model for predicting casing creep load in high temperature wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2011, 7(3): 530-535.
- [124] GAO D L, QIAN F, ZHENG H K. On a method of prediction of the annular pressure buildup in deep-water wells for oil & gas[J]. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2012, 89(1): 1-16.
- [125] 钱锋, 高德利. 厚壁套管等效外挤载荷计算[J]. *石油机械*, 2011, 39(12): 38-40, 44. [QIAN F, GAO D L. The calculation of the equivalent external collapse load of thick-wall casing[J]. *China Petroleum Machinery*, 2011, 39(12): 38-40, 44.]
- [126] 钱锋, 高德利, 蒋世全. 深水工况下套管柱载荷分析[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 39(2): 56-59. [QIAN F, GAO D L, JIANG S Q. Casing load analysis for deep-water drilling[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 39(2): 56-59.]
- [127] WILLHITE G P. Over-all heat transfer coefficients in steam and hot water injection wells[J]. *SPE Journal of Petroleum Technology*, 1967, 19(5): 607-615.
- [128] WU Y S, PRUESS K, LABORATORY L B. An analytical solution for wellbore heat transmission in layered formations[J]. *SPE Reservoir Engineering*, 1990, 5(4): 531-538.
- [129] HAGOORT J. Ramey's wellbore heat transmission revisited[J]. *SPE Journal*, 2004, 9(4): 465-474.
- [130] FARRIS R F. A practical evaluation of cements for oil wells[C]. *Drilling and Production Practice*, 1 January, New York, New York, 1941.
- [131] TRAGESSER A F, CRAWFORD P B, CRAWFORD H R. A method for calculating circulating temperatures[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, 19(11): 1507-1512.
- [132] HASAN A R, KABIR S C, AMEEN M M. A fluid circulating temperature model for workover operations[J]. *SPE Journal*, 1996, 1(2): 133-144.
- [133] HASAN A R, KABIR S C. A simple model for annular two-phase flow in wellbores[J]. *SPE Production & Operations*, 2007, 22(2): 168-175.
- [134] HASAN A R, KABIR S C. Modeling two-phase fluid and heat flows in geothermal wells[C]. *SPE Western Regional Meeting*, 24-26 March, San Jose, California, SPE 121351, 2009.
- [135] 李嗣贵. 高温高压井井壁稳定性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2004. [LI S G. Borehole wall stability study in high temperature and high pressure well[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2004.]
- [136] 高永海, 孙宝江, 王志远, 等. 深水钻探井筒温度场的计算与分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(2): 58-62. [GAO Y H, SUN B J, WANG Z Y, et al. Calculation and analysis of wellbore temperature field in deep-water drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(2): 58-62.]
- [137] HALAL A S, MITCHELL R F. Casing design for trapped annulus pressure buildup[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1994, 9(2): 107-114.
- [138] SAMUEL G R, GONZALES A. Optimization of multistring casing design with wellhead growth[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 3-6 October, Houston, Texas, SPE 5676, 1999.
- [139] HALAL A S, MITCHELL R F, WAGNER R R. Multi-string casing design with wellhead movement[C]. *SPE Production Operations Symposium*, 9-11 March, Oklahoma City, Oklahoma, SPE 37443, 1997.
- [140] K BYBEE. Transient behavior of annular pressure buildup in HP/HT wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2015, 57(3): 58-60.
- [141] LEACH C P, ADAMS A J. A new method for the relief of annular heat-up pressures[C]. *SPE Production Operations Symposium*, 21-23 March, Oklahoma City, Oklahoma, SPE 25497, 1993.
- [142] GAO D L, QIAN F, ZHENG H K. On a method of prediction of the annular pressure buildup in deep-water wells for oil & gas[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2012, 89(1): 1-16.
- [143] MARUYAMA K, TSURU E, OGASAWARA M. An experimental study of casing performance under thermal cycling conditions[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1990, 5(2): 156-164.
- [144] RAHMAN S S, CHILINGARIAN G V. *Casing design theory and practice*[M]. Elsevier, 1995.
- [145] 李志明, 殷有泉. 油水井套管外挤力计算及其力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. [LI Z M, YIN Y Q. Mechanical foundation for casing collapse loads[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.]
- [146] 张永贵. 注蒸汽热采井套管强度理论与试验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2008. [ZHANG Y G. Casing strength theoretical and experimental study of thermal recovery steam injection wells[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2008.]
- [147] 李静, 林承焰, 杨少春, 等. 套管-水泥环-地层耦合系统热应力理论解[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(2): 63-69. [LI J, LIN C Y, YANG S C, et al. Theoretical solution of thermal stress for casing-cement-formation coupling system[J]. *Journal of*

- China University of Petroleum, 2009, 33(2): 63-69.]
- [148] 高学仕, 张立新, 何牛仔. 热采井筒应力的数值模拟分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 65-69. [GAO X S, ZHANG L X, HE N Z. Numerical simulation of stress field in steam injection wells[J]. Journal of China University of Petroleum, 2001, 25(2): 65-69.]
- [149] 高亮. 稠油热采井套管应力分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009. [GAO L. Casing stress analysis of heavy oil thermal production well[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009.]
- [150] PLACIDO J C R, PASQUALINO I P, FONSECA C E. Strength analyses of liners for horizontal wells[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 9-12 October, Dallas, Texas, SPE 96870, 2005.
- [151] 陈勇, 练章华, 乐彬, 等. 考虑地应力耦合的热采井套管损坏分析[J]. 钻采工艺, 2007, 30(5): 13-16. [CHEN Y, LIAN Z H, LE B, et al. Analysis of casing failure in thermal production well when earth stress considered[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(5): 13-16.]
- [152] 王宴滨, 高德利, 房军. 深水钻采管柱力学行为模拟试验系统研制[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(4): 26-29. [WANG Y B, GAO D L, FANG J. Development of mechanics behavior simulation experimental system for deep-water drilling and production string[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(4): 26-29.]
- [153] 房军, 王宴滨, 高德利. 深水隔水管受力变形模拟试验方法研究[J]. 石油机械, 2013, 41(12): 53-57. [FANG J, WANG Y B, GAO D L. Test method for the force deformation of deep-water riser[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(12): 53-57.]
- [154] 杨德兴, 姜亚军, 廖威, 等. 基于光纤布拉格光栅的深水钻井隔水管应变监测[C]. 中国光学学会 2011 年学术大会摘要集, 深圳, 2011. [YANG D X, JIANG Y J, LIAO W, et al. Strain monitoring of deep-water drilling riser based on fiber bragg grating[C]. Academic Conference of Chinese optical society, Shenzhen, China, 2011.]
- [155] 周守为, 刘清友, 姜伟等. 深水钻井隔水管“三分之一效应”的发现: 基于海流作用下深水钻井隔水管变形特性理论及实验的研究[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 1-6. [ZHOU S W, LIU Q Y, JIANG W, et al. The discovery of “one third effect” for deep-water drilling riser: Based on the theoretical and experimental study of deformation characteristics of deep-water drilling riser by ocean currents[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 1-6.]
- [156] 刘清友, 毛良杰, 周守为, 等. 一种深水钻井工况下隔水管振动特性模拟试验装置及试验方法: 201310169000X [P]. 2015-05-13. [LIU Q Y, MAO L J, ZHOU S W, et al. A simulation test device and test method for deep-water drilling riser vibration: 201310169000X [P]. 2015-05-13.]
- [157] 赵焕宝, 侯晓东, 雷广进, 等. 深水钻井隔水管疲劳试验载荷分析[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(2): 32-35. [ZHAO H B, HOU X D, LEI G J, et al. Analysis of fatigue testing loads of deep-water riser[J]. Oil Field Equipment, 2013, 42(2): 32-35.]
- [158] 刘秀全, 陈国明, 畅元江, 等. 海洋油气立管疲劳试验方法[C]. 第十三届中国科协年会第 13 分会场-海洋工程装备发展论坛论文集, 天津, 2011. [LIU X Q, CHEN G M, CHANG Y J, et al. Fatigue test method for marine drilling riser[C]. The 13th Annual Meeting of China Association for Science and Technology at the Venue-Marine Engineering Equipment Development, Tianjin, 2011.]

Progress in tubular mechanics and design control techniques for deep-water drilling

GAO Deli, WANG Yanbin

Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Generally, deep-water drilling procedures include four main steps: jetting installation operations for the deep-water conductor, drilling operations for surface casings under the mudline, installation operations of marine drilling risers and blowout preventers (BOP), and subsequent drilling operations. These involve three kinds of tubular strings; deep-water conductor, marine drilling riser and landing string. The tubular mechanics in deep-water drilling are complex and different from those in onshore and shallow offshore drilling and they have a strong impact on the safety and efficiency of drilling operations. Therefore, it is of great significance to study tubular mechanics and design control techniques to improve deep-water drilling performance and efficiency.

The conductor jetting operations are used to meet the special requirements of deep-water drilling. It is the first step of well construction in deep-water drilling aimed to establish a stable subsea wellhead for the subsequent drilling operations. The deep-water conductor and landing string are indispensable during conductor jetting operations. In order to maintain the subsea

wellhead stability, it is necessary to study the landing string mechanics and the bearing capacity of deep-water conductors by analyzing the subsea soil-pipe interaction. This can help realize the engineering goals of the conductor jetting operation. In this paper, progress in the design strength and checking of the landing string, the jetting operation process and the bearing capacity of deep-water conductors are reviewed and predicted from two aspects: technical research & development and engineering applications. Further studies of conductor jetting operations should be focused on the driving depth and the bearing capacity of deep-water conductors under some extreme working conditions, parameter optimization, risk assessment and reliability prediction, and simulation experiments.

The marine drilling riser is the important connection between the subsea wellhead and the floating drilling platform. It plays an irreplaceable role in providing the channel for the drilling fluid, supporting auxiliary pipelines, guiding the drilling tools, installing and retrieving the BOP stack, etc. The drilling riser is involved in three main operation processes during deep-water drilling: installation, normal drilling and emergency disconnection and evacuation. Due to the dynamic effects of wave and current forces, the riser shows complex mechanical behavior, such as axial tension, lateral bending and coupled vibrations, which bring huge challenges for safe operations. Thus, riser mechanics is one of the key issues considered in deep-water drilling. Some mechanical characteristics to drilling risers, such as top tension control, lateral deformation and dynamic characteristics, longitudinal dynamic characteristics, coupled dynamic characteristics and vortex-induced vibration (VIV) are illustrated in this paper. Some problems still exist in loading calculations, control equations and boundary conditions. Methods for deriving solutions are also presented. In the future, research into the analysis and prediction of marine drilling riser installation windows, VIV response and prevention measures, fatigue life evaluation and simulation experiments should be undertaken to improve marine riser design.

To ensure oil and gas well integrity in deep-water conditions, it is necessary to do more research to prevent shallow flow invasion and casing failure, to improve the cementing quality. In this paper, research progress in the prediction and prevention of damage to deep-water wells is reviewed from the following aspects: temperature distribution, annular pressure and stress distribution. Issues include unsteady heat transfer from the formation, circulating temperature distribution of the well annulus, additional load caused by heating expansion of fluids in the sealed annulus and its precautionary approaches, annulus pressures in multilayer casing strings and thermal-mechanical coupled response of the casing-cement-formation. Future research should be focused on the corresponding design optimization methods for well structures and casing strings, well integrity risk assessment and control techniques with consideration of the special processes and working conditions in deep-water drilling.

It is necessary to carry out tubular mechanics simulation experiments to obtain valid data for improving research into tubular mechanics and design control techniques in deep-water drilling. A deep-water tubular mechanics experimental facility has been built by China University of Petroleum, Beijing. It is introduced in detail by describing the structural compositions, operating methods, technical parameters and main functions, etc. Simultaneously, some marine drilling riser mechanics experiments and fatigue life testing are presented in this paper.

This review is intended to guide future research on tubular mechanics and design control techniques for deep-water drilling.

Keywords deep-water drilling; tubular mechanics; design control techniques; deep-water conductor; marine drilling riser

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.005

(编辑 马桂霞)