

浮式钻井平台隔水管应急解脱分析

孙明远¹, 张明贺², 刘双莹¹, 黄芳飞^{*1}, 杨宇翔²

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075;

2. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249)

摘要:在深水油气勘探开发中,作业环境复杂多变,为了躲避台风等恶劣天气对海上钻井的危害,防喷器与隔水管的应急解脱成为避免海上钻井事故的关键环节。为探究隔水管应急解脱的反冲规律,分析了隔水管应急解脱的原因及反冲过程,利用OrcaFlex方法建立了应急解脱工况下隔水管系统轴向力学分析模型,利用该计算模型,以南海某1520 m深水井为例研究了张紧力、波浪运动、钻井液密度、平台漂移等因素对隔水管反冲的影响。结果表明,解脱时顶部张紧力越大,解脱后隔水管的反冲位移和伸缩节的冲程变化也越大;随着波浪高度的升高隔水管的反冲响应有加强趋势;波浪方向对隔水管的反冲响应没有影响;管内不同钻井液密度对隔水管反冲影响明显;随着平台漂移距离的增加,隔水管的反冲响应更加剧烈。研究结果对保障反冲时隔水管的安全有一定指导意义。

关键词:深水钻井;隔水管;应急解脱;反冲;OrcaFlex

中图分类号:TE951 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)10-0082-06

Emergency release analysis of the riser on semi-submersible drilling rig

SUN Mingyuan¹, ZHANG Minghe², LIU Shuangying¹, HUANG Fangfei^{*1}, YANG Yuxiang²

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China;

2. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: In deep water oil and gas exploration and development, the operation environment is complex and changeable. In order to avoid the damage of typhoon and other bad weather to offshore drilling, the emergency release of the blowout preventer and the riser has become the key to avoid offshore drilling accidents. In order to explore the recoil law of the riser in emergency release, the causes and recoil process of emergency release of the riser were analyzed. The axial mechanical analysis model was established for the riser system under emergency release condition by using OrcaFlex method. Taking a 1520m deep water well in the South China Sea as an example, the effects of tensioning force, wave movement, drilling fluid density and platform drift on riser recoil were studied. The results showed that the larger the top tensioning force was, the larger the recoil displacement of the riser and the change of the stroke of the expansion joint were. With the increase of wave height, the recoil response of the riser tended to strengthen. The wave direction had no effect on riser recoil response. Different drilling fluid densities in the pipe had obvious influence on riser recoil. With the increase of platform drift distance, the recoil response of the riser became more intense. The research results have certain guiding significance for the safety of the riser in recoiling.

Key words: deep water drilling; riser; emergency release; recoil; OrcaFlex

0 引言

深水 和超深水钻井作业中,由于作业环境复杂多变,在遭遇紧急情况导致平台需要撤离的情况下,必须对隔水管底部总成(LMRP)与防喷器组

收稿日期:2021-03-17; 修回日期:2021-07-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.10.011

作者简介:孙明远,男,汉族,1987年生,工程师,机械设计制造及其自动化专业,主要从事深水水下系统、井控设备及技术等方面的研究工作,广东省广州市环市东路477号,sunmygms@163.com。

通信作者:黄芳飞,男,汉族,1982年生,高级工程师,主要从事深水钻井装备、深水油气及天然气水合物钻采技术研究工作,广东省广州市环市东路477号,ghjhff820813@163.com。

引用格式:孙明远,张明贺,刘双莹,等.浮式钻井平台隔水管应急解脱分析[J].钻探工程,2021,48(10):82-87.

SUN Mingyuan, ZHANG Minghe, LIU Shuangying, et al. Emergency release analysis of the riser on semi-submersible drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):82-87.

(BOP)进行紧急解脱^[1]。解脱完成后,储存在隔水管柱中的巨大势能将被释放出来,隔水管将向上反冲。若向上反冲过大,可能导致伸缩节超出冲程,隔水管损毁或撞击张力器等事故;若向下回弹距离过大,隔水管底部总成有可能打到防喷器组,威胁水下井口的安全。应急解脱关系到深水钻井的安全,因此,建立隔水管解脱反冲分析模型,了解其关键影响因素,对于深水钻井的安全作业有着重要意义。

Young等^[2]描述了隔水管应急解脱的反冲响应原因,总结了隔水管反冲的危害,采用RISTEN程序模拟了6000 ft(1 ft=30.48 cm,下同)水深中隔水管紧急脱离后的反冲响应。张磊等^[3]概括了隔水管反冲响应的机理,利用ANSYS软件探索了张紧力随液压缸活塞冲程变化的规律。王腾等^[4]总结了张紧器的工作原理,建立了考虑钻井液流海情况下的下泄模型。上述研究从不同方面对深水钻井隔水管的应急解脱及反冲响应进行了分析,但忽略了波浪及平台运动等因素对反冲的影响。基于此,本文综合考虑顶部张紧力、波高、波浪方向、钻井液密度及平台漂移等因素对隔水管反冲的影响,建立了平台张紧器、隔水管力学特性、环境载荷及井口稳定性相结合的隔水管应急解脱反冲模型,并利用数值模拟方法对隔水管应急解脱进行仿真分析。OrcaFlex是一款专业的海洋工程有限元模拟分析软件,主要功能包括缆索动力分析、立管动力分析、浮体动力分析等。利用该计算模型,以南海某1520 m深水井为例,深入探究了不同因素下隔水管解脱后的反冲响应,研究结果可为现场安全作业提供一定参考。

1 隔水管应急解脱及反冲工况分析

海上钻井隔水管是从海上钻井平台下到海底浅层的套管。上接导流器,下连防喷器,其主要作用是引导钻具入井,隔绝海水,形成钻井液循环的回路。目前深水油气资源的勘探与开发大多使用动力定位,但在遭遇恶劣海况或者动力定位系统发生失效等情况下,很难使钻井平台一直保持在有效位置,平台易发生漂移或驱离,威胁海上作业安全。因此,需要启动应急解脱系统(EDS),对隔水管与防喷器进行紧急解脱,断开隔水管底部总成与防喷器组的连接,防止出现大的损失。如图1所示,正常解脱作业时,断开井口与防喷器组之间的井口连接器及各管线,将隔水管柱与防喷器组全部起出。应急解脱时,

之前处于待命状态的应急解脱系统激活启动,通过触发由压缩弹簧驱动的机械开关^[5],断开隔水管底部总成和防喷器组之间的隔水管连接器及各管线,隔水管底部总成中的上万能防喷器关闭,隔水管随平台移走,防喷器组留在海底。而储存在隔水管柱中的巨大弹性应变能在张紧力的作用下急速释放,隔水管系统将出现大的轴向位移及加速度,此即为隔水管反冲。

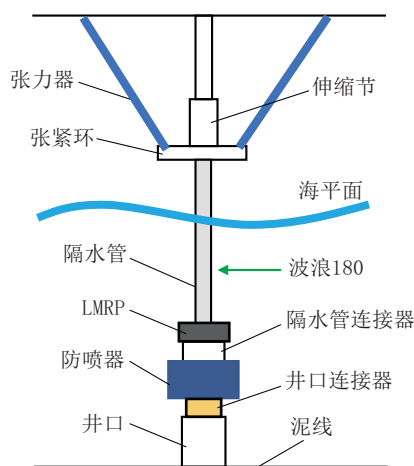


图1 深水作业系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the deepwater operation system

2 隔水管反冲分析模型

在深水钻井作业中,隔水管的受力十分复杂,且直径远小于其长度,故可将隔水管看作长细杆件结构进行分析,接头处的抗拉和抗弯强度高于管体,作如下假设:(1)忽略隔水管系统中的压井、节流等较细管线,假设隔水管为各向同性的线弹性均质圆管,接头处与管体特性相同。(2)隔水管内充满水基钻井液,且与海底泥线垂直。(3)由于隔水管解脱前处于两端铰支固定,计算主要考虑隔水管的轴向拉力,忽略隔水管与井口接头的横向位移。(4)忽略浮力块影响及海水温度变化。

2.1 隔水管受力分析

由于隔水管系统质量巨大,需要张紧器系统使其一直处于受拉状态,防止隔水管在自身重力作用下出现压溃现象,并控制其位移和应力。理论上要求张紧器提供的顶张力必须大于隔水管的浮重(包括管内钻井液),同时要对隔水管施加额外载荷以抵抗其弯曲应力。正常作业时,在张紧力 T 的作用下隔水管发生轴向拉伸,其应变 Δl 可表示为:

$$\Delta l = \frac{TL}{ES}$$

其弹性应变能 U 可表示为:

$$U = \frac{1}{2} T \Delta l = \frac{T^2 L}{2ES}$$

式中: L ——隔水管长度; E ——弹性模量; S ——隔水管横截面积。

当忽略热能消耗时,可认为变形功全部转变为弹性应变能。资料表明,当张紧器对 1828 m 长的隔水管柱进行张拉时,需要的张紧力就能拉伸隔水管柱达 1.524 m 之多^[6]。而在应急解脱时,弹性应变能全部释放,隔水管反冲响应发生。

2.2 参数设置

隔水管应急解脱及反冲仿真模型主要包括平台模型、张紧器模型、隔水管模型、BOP 模型及环境等。使用 VESSEL 单元模拟平台,长宽均为 90 m,吃水 24.38 m,平台质量 1 万 t,结合现场作业实例,作业水深 1520 m,其中 BOP 高度 20 m。海水密度 1.03 t/m³,运动学粘性系数为 1.35 × 10⁻⁶ m²/s,温度为 10 °C。

2.3 隔水管建模

隔水管模型采用 Line 模型建立,Line 模型在模拟立管、系泊线等细长结构时,准确度高且运算较快^[7],隔水管模型拖曳力系数为 1.2,附加质量系数为 1.0,其他参数见表 1。

表 1 隔水管参数
Table 1 Riser parameters

参数名称	参数值
密度	7.85 t/m ³
长度	1503 m
泊松比	0.3
弹性模量	212 GPa
外径	533.4 mm
内径	488.9 mm

2.4 张紧器建模

隔水管体与张紧器之间的夹角一般控制在 3° 以内^[8]。而张紧环是连接张紧器和隔水管的关键部件,张紧器的张力通过张紧环施加到隔水管上,故采用可连接不同结构并传递载荷的 6Dbuoy 单元建立。BOP 模型采用 Shape 模型中的 Elastic solid 模拟,Shape 单元可用作障碍物、月池等物体的模拟。

张紧器需要提供张紧力以支撑隔水管保持受拉

状态。因此张紧器的模拟至关重要。最方便的做法是集中力法模拟张紧器,即在隔水管顶端加恒定集中力内^[9],其弊端在于没有考虑平台运动引起张紧力的变化。因此,不少学者采用线性弹簧来模拟张紧器^[10-11],通过改变弹簧刚度达到改变张紧力的目的。而 OrcaFlex 中的 Link-Tethers 单元可连接任意两点,没有质量和水动力属性,对于线性模拟精度较高,故使用 4 个 Tethers 单元模拟张紧器。

Link-Tethers 单元提供的张紧力 T_{top} 计算方法为:

$$T_{top} = K(L_k - l)/l$$

式中: K ——弹簧刚度, kN/m; l ——弹簧未伸长长度, 设为 2 m; L_k ——弹簧伸长之后的长度, m。

张紧器的上端与平台上甲板相连,下端与张紧环相连,水平方向上距隔水管 1 m,并成 2.86° 夹角。OrcaFlex 在计算前有一个准备阶段,在此阶段,模型各项参数达到预设值。在准备阶段,LMRP 和 BOP 仍然处于连接状态,在动态模拟开始时,解除 LMRP 和 BOP 的连接,隔水管开始向上反冲。模型示意图见图 2。

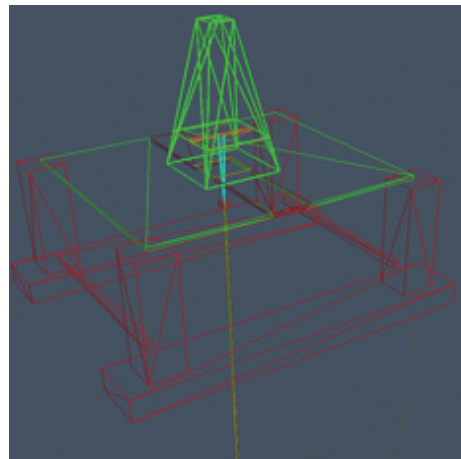


图 2 模型示意

Fig.2 Model diagram

3 实例计算

以我国南海某深水井为例进行模拟计算,水深 1520 m,伸缩节冲程为 20 m,管内钻井液密度为 1.5 t/m³,隔水管湿重为 705.4 t。

3.1 顶部张紧力对隔水管反冲的影响分析

张紧力的合理设置对于隔水管的安全解脱影响巨大。事实上,若解脱时张紧力过大,可能导致解脱

后隔水管超出伸缩节冲程,给隔水管安全带来风险;但解脱时张紧力过小,又可能导致解脱失败^[12]。张力比(简称TTR)指的是隔水管受到的张紧力与自身湿重(包含管内钻井液)的比值,取张力比分别为1.09、1.45、1.59,对应张紧力分别为7540 kN,研究了张紧力对隔水管反冲的影响,结果如图3、图4所示。

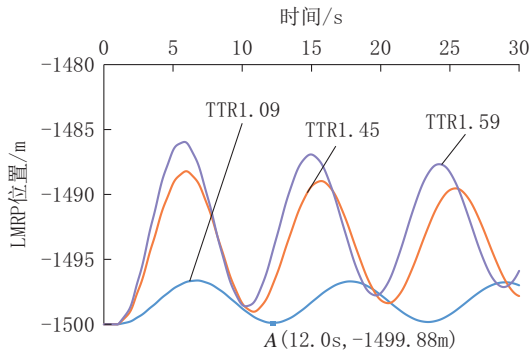


图3 不同张紧力LMRP垂向位置响应

Fig.3 LMRP vertical position response under various tensioning force

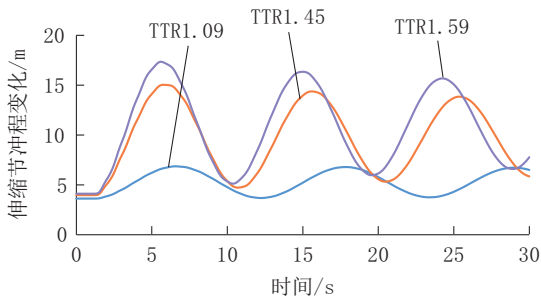


图4 不同张紧力伸缩节冲程变化曲线

Fig.4 Response curve of telescopic joint stroke under various tensioning force

如图3、图4可知,应急解脱之后,隔水管加速向上反冲,且隔水管受到的张紧力越大时,LMRP的反冲位移也就越大,伸缩节冲程变化也越大。此外,张紧力越大,解脱后第一次到达最高点的时间越短,若解脱时张紧力设置过大,有可能导致伸缩节超出冲程,损害隔水管。当张力比为1.09时,隔水管回弹到最低点的坐标为A(12.0 s, -1499.88 m),此时LMRP距离隔水管仅0.12 m,存在隔水管碰触到BOP的可能,触底风险陡增^[13]。可见,张紧力的合理设置对解脱后隔水管的反冲响应影响巨大。

3.2 波高对隔水管反冲的影响分析

半潜式平台作业环境复杂多变,波浪运动对应急解脱时隔水管的反冲响应不可忽略。选取周期为8 s的深水线性波模型,张力比1.59,在波高分别为0、3、5 m时,分析了波浪运动对于隔水管应急解脱的影响,模拟结果如图5所示。

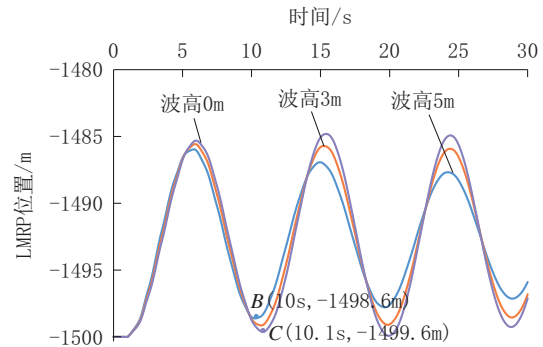


图5 不同波高LMRP垂向位置响应

Fig.5 LMRP vertical position response under various wave height

由图5可以看出,波高为0时,隔水管回弹到最低点的坐标为B(10 s, -1498.6 m),距防喷器有1.4 m;波高为5 m时,隔水管回弹到最低点的坐标为C(10.1 s, -1499.6 m),距防喷器仅有0.4 m。可见,隔水管的反冲响应受波高的影响较大。随着波高的增大,隔水管回弹时打到防喷器的风险也在增高。因此,选择波高较低时进行解脱作业更为安全。

3.3 波浪方向对隔水管反冲的影响分析

为研究波浪方向对隔水管反冲的影响,其他条件设置相同,选择波浪方向分别为0°、60°、120°情况下进行模拟分析,结果如图6所示。

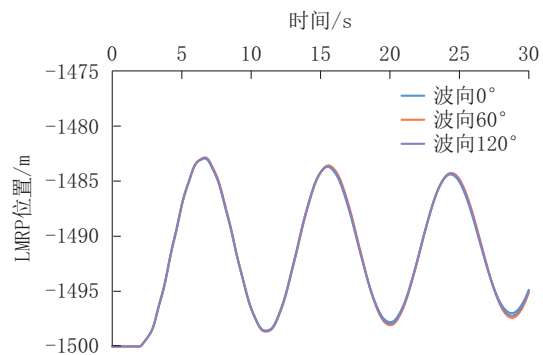


图6 不同波浪方向LMRP垂向位置响应

Fig.6 LMRP vertical position response under various wave direction

由图6可以看出,不同波浪方向下,相同条件下应急解脱后,LMRP的垂向位置响应是基本重合的,可见波浪方向对于隔水管的反冲响应并无影响。

3.4 钻井液密度对隔水管反冲的影响分析

合理的钻井液密度可以防止井喷,维持井壁稳定,保护储层。而在应急解脱时,一般没有足够的时间回收隔水管内的钻井液,可将钻井液内存在隔水管内^[14],或者下泄入海。为研究钻井液密度对于隔水管反冲响应的影响,选择钻井液密度分别为1.1、1.3、1.5 t/m³进行分析,其他条件设置相同下,模拟结果如图7、图8所示。

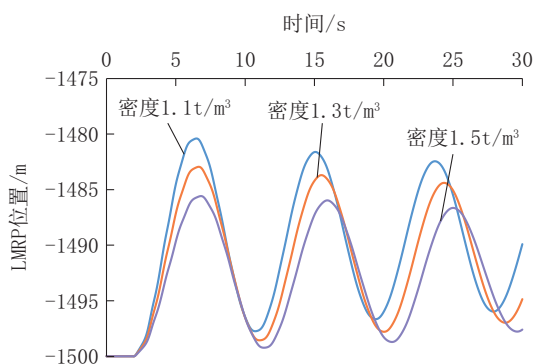


图7 不同钻井液密度 LMRP 垂向位置响应

Fig.7 LMRP vertical position response under various drilling fluid density

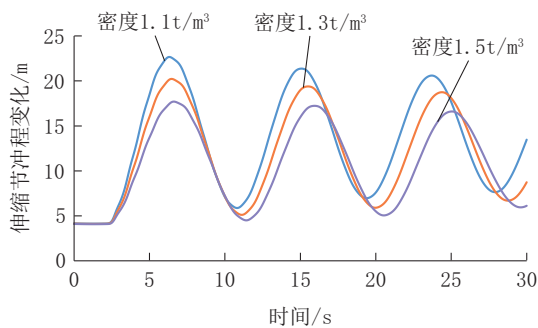


图8 不同钻井液密度伸缩节冲程变化曲线

Fig.8 Response curve of telescopic joint stroke under various drilling fluid density

从图7、图8可以看出,相同张紧力情况下,钻井液密度的不同对隔水管的反冲响应影响巨大。钻井液密度较低时,隔水管回弹到最低点时距BOP较远,LMRP打到BOP的风险较小,但伸缩节冲程变化较大,若钻井液密度过小,可能导致伸缩节超出冲程;而钻井液密度较高时,伸缩节冲程变化小,超出

冲程的风险也小,但隔水管回弹到最低点时距BOP较近,LMRP打到BOP的风险较大。而应急解脱时没有足够的时间调整张紧器张力,因此,在保证隔水管不被挤毁的情况下,可在解脱时选择释放一部分钻井液以调整隔水管湿重,进而保证隔水管反冲时的安全。

3.5 平台漂移对隔水管反冲的影响分析

深水半潜式钻井平台在外部载荷的持续作用下会发生漂移运动,一般水平漂移半径在水深的3.5%以内^[15],即可视为可接受的漂移偏离,平台可进行正常作业。为研究平台漂移对隔水管反冲的影响,选择相同设置下,漂移方向为 x 正方向,漂移距离分别为0、32、56 m情况下进行模拟分析,结果如图9所示。

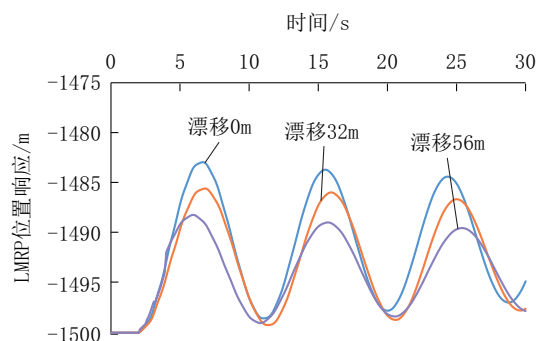


图9 不同平台漂移 LMRP 垂向位置响应

Fig.9 LMRP vertical position response under various platform drift

从图9可以看出,相同设置情况下,随着平台漂移距离的增大,应急解脱后 LMRP 的反冲位移也越大。这是因为用线性弹簧模拟张紧器单元时,随着平台漂移距离的增加,线性弹簧的伸长量也在增加,进而提供了更大的张紧力。由“2.1节”分析可知,在浮式平台实际作业中,随着漂移距离的增加,隔水管柱内储存的弹性应变能也在增加,应急解脱后隔水管的反冲响应也会更剧烈。

4 结论

(1) 隔水管的反冲响应受张紧力的影响巨大。张紧力过小,可能会导致解脱失败;张紧力过大,可能会导致伸缩节超出冲程,威胁隔水管安全。

(2) 隔水管紧急解脱后的反冲响应随着波浪高度的升高而增大。但波浪方向对隔水管的反冲响应

没有影响。

(3)隔水管的反冲响应随着管内钻井液密度的增大而减小。但钻井液密度过大时LMRP回弹打到BOP的风险增加,可在解脱时释放部分钻井液以降低此类风险。

(4)随着平台漂移距离的增加,隔水管柱内储存的弹性应变能增大,解脱后隔水管的反冲响应会更剧烈。

参考文献(References):

- [1] Arild Grønevik. Simulation of drilling riser disconnection—Recoil analysis[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [2] Young R D, Hock C J, Karlson G, et al. Analysis and design of anti-recoil system for emergency disconnect of a deepwater riser: Case study[C]//Proceedings of the 24th Annual Offshore Technology Conference. 1992:163-171.
- [3] 张磊,畅元江,刘秀全,等.深水钻井隔水管与防喷器紧急脱离后的反冲响应分析[J].石油钻探技术,2013,41(3):25-30.
ZHANG Lei, CHANG Yuanjiang, LIU Xiuquan, et al. Recoil analysis for deepwater drilling riser after emergency disconnection with blowout preventer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(3):25-30.
- [4] 王腾,王科.紧急解脱隔水管回弹响应分析[J].中国海上油气,2018,30(2):120-125.
WANG Teng, WANG Ke. Analysis of resilient response of emergently disentangled drilling risers[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018,30(2):120-125.
- [5] 李博,冯伟,郭江艳,等.深水防喷器组应急解脱系统模拟分析[J].海洋工程装备与技术,2015,2(4):234-239.
LI Bo, FENG Wei, GUO Jiangyan, et al. Simulation and analysis of deepwater BOP emergency disconnect system[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015,2(4):234-239.
- [6] W. K. Armagost, J. M. Shaughnessy, R. P. Herrmann, et al. Problems of ultra-deepwater drilling[C]//Society of Petroleum Engineering. Amsterdam, 1999:52782.
- [7] Hock C J, Young R D. A deepwater riser emergency disconnect anti-recoil system[R]. OTC23858,1993.
- [8] 赵建亭,薛颖,潘云,等.浮式钻井装置隔水管张紧系统研究[J].上海造船,2010(4):1-5.
ZHAO Jianting, XUE Ying, PAN Yun, et al. Research on riser tensioning system of floating drilling unit[J]. Shanghai Shipbuilding, 2010(4):1-5.
- [9] 张崎,黄一,赵炳星.深水TTR立管管中管结构非线性时域分析[J].船舶工程,2012,34(4):90-93,97.
ZHANG Qi, HUANG Yi, ZHAO Bingxing. Nonlinear time-domain analysis of deep-water TTR tube-in-tube structure[J]. Ship Engineering, 2012,34(4):90-93,97.
- [10] 杨洪彪.基于顶张紧式立管动力分析的关键参数研究[D].大连:大连理工大学,2010.
YANG Hongbiao. Study of several key parameters on the dynamic analysis of TTR[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [11] 肖志国.新型深吃水干树式半潜平台顶张紧立管(TTR)概念设计与分析[D].上海:上海交通大学,2014.
XIAO Zhiguo. Preliminary design and analysis of top tensioned riser for a new type of deep-draft dry-tree semi-submersible[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [12] Hock C J, Young R D. A deepwater riser emergency disconnect anti-recoil system[J]. Journal of Petroleum Technology, 1993,45(8):744-751.
- [13] 刘秀全,陈国明,畅元江,等.台风条件下深水钻井隔水管触底事故分析及对策[J].石油勘探与开发,2013,40(6):738-742.
LIU Xiuquan, CHEN Guoming, CHANG Yuanjiang, et al. Analyses and countermeasures of deepwater drilling riser grounding accidents under typhoon conditions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(6):738-742.
- [14] Lang D. W., Real J., Lane M. Recent developments in drilling riser disconnect and recoil analysis for deepwater applications[C]//Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hawaii, 2009:79427.
- [15] 沈雁松,赵立中.海洋动力定位钻井平台失控漂移的安全应急处置对策[J].钻采工艺,2013,36(1):118-120.
SHEN Yansong, ZHAO Lizhong. Safety emergency response measures for out of control drift of offshore dynamic positioning drilling platform[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(1):118-120.

(编辑 荐华)