

深海井口吸力锚安装分析与实践

韩泽龙¹, 宋刚¹, 牛庆磊¹, 邵玉涛¹, 崔淑英¹, 朱嵘华², 李博³, 陈根龙^{*1}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021;

3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 511458)

摘要: 第二轮海域天然气水合物试采在神狐海域首次应用了深海井口吸力锚技术, 为浅软地层水平井开采水合物提供了稳定的井口支撑。通过理论计算及有限元分析对吸力锚沉贯过程中的自重沉贯深度以及需求负压进行研究, 同时现场采用“步渐间歇式自重贯入、拖拽连续负压沉贯”施工工艺, 保障了国产首个深海井口吸力锚成功安装。现场实践结果表明, 理论计算结果与实际施工情况较为接近, 理论分析可指导井口吸力锚安装; 沉贯施工工艺快速、高效、安全, 井口吸力锚安装的各项指标满足使用需求, 对吸力锚技术在深海油气领域应用具有借鉴意义。

关键词: 深海井口吸力锚; 海域天然气水合物试采; 自重贯入; 负压沉贯

中图分类号: P634; TE52 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)05-0109-07

Analysis and practice of wellhead suction anchor installation in deep sea

HAN Zelong¹, SONG Gang¹, NIU Qinglei¹, SHAO Yutao¹,

CUI Shuying¹, ZHU Ronghua², LI Bo³, CHEN Genlong^{*1}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan Zhejiang 316021, China;

3. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 511458, China)

Abstract: During the second gas hydrate trial production test, the deep-sea wellhead suction anchor technology was firstly applied in the Shenhu sea area, which provides stable wellhead support for horizontal gas hydrate production wells in shallow soft formations. Through the theoretical calculation and finite element analysis, the self-weight penetration depth and negative pressure demand in the process of suction anchor penetration are studied. At the same time, the construction technology of “step-by-step intermittent self-weight penetration, dragging and continuous negative pressure sinking” was adopted in site, which ensured the successful installation of the first domestically produced deep-sea wellhead suction anchor. The field practice results show that the theoretical calculation results are close to the actual construction situation, and the theoretical analysis can guide the installation of suction anchors at the wellhead. In addition, the penetration construction technology is featured of fast, efficient and safe. The indicators of the wellhead suction anchor installation reached the usage demand. It has referential value for the application of suction anchor technology in the fields of deep-sea oil and gas.

Key words: deep-sea wellhead suction anchor; marine gas hydrate production test; self weight penetration; suction penetration

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-06-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.05.016

基金项目: 广东省科技厅项目“海域天然气水合物随钻测井和钻采井口稳定关键技术及装备研发”(编号: 2020B1111030003); 广东省重点领域研发计划项目“海上风电吸力筒导管架基础高效多体联动沉贯装备研制与产业化”(编号: 2021B0707030001); 中国地质调查局地质调查项目“神狐海域天然气水合物先导试验区试采实施”(编号: DD20190227)、“QDN海域天然气水合物先导”(编号: DD20211349)、“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20221721)

第一作者: 韩泽龙, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 长期从事海洋钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, 785674682@qq.com。

通信作者: 陈根龙, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事岩土钻掘相关技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, chengnlong@qq.com。

引用格式: 韩泽龙, 宋刚, 牛庆磊, 等. 深海井口吸力锚安装分析与实践[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 109-115.

HAN Zelong, SONG Gang, NIU Qinglei, et al. Analysis and practice of wellhead suction anchor installation in deep sea[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 109-115.

0 引言

近年来,随着海洋油气资源的开发逐步由浅海走向深海,需要面对的海洋环境变得愈加复杂,技术难度与开采成本也随着水深的增加而相应增加^[1-4]。一方面,由于深海钻井水深较大,为保障钻进过程中泥浆能够上返至施工平台,防止环境污染^[5],需要采用与浅海钻井相比更长的隔水管。而且深海油气资源大多处于高温高压条件的地层,需要采用体积和质量显著增大的水下防喷器组才能保障施工过程安全进行^[6-7]。较长的隔水管和较大的防喷器组导致海底井口上部需要承受更大的荷载^[8]。另一方面,海底浅部地层的土壤饱和疏松,土壤强度较低,导致地基承载能力相对于陆地更弱^[9]。这两方面的因素对深海井口承载能力提出巨大的挑战。

海洋油气钻探通常采用导管喷射工艺进行建井,导管的长度影响井口的承载能力^[10-11],导管过短,井口承载能力不足,影响深海油气井口的结构物安装,后期生产存在一定的隐患;导管过长,存在喷射不到位的风险。导管下入完成后,未采用水泥固井,需要静置一段时间等待地层恢复^[12],占用钻井平台的时间较长,导致海上作业时间长,施工成本高。使用井口吸力锚装置可有效的解决上述问题。

1 井口吸力锚及其安装过程

深海井口吸力锚结构如图1所示,为底部开口、顶部封闭的筒状结构。为了深海油气钻探的需要,采用双层管结构,内部含有心管,可在心管中安装导管。顶部含有排气阀、吸水口以及导管座,排气阀的作用是在井口吸力锚安装施工过程中,通过海洋飞溅区时快速排出吸力锚内气体以及自重沉贯过程中快速排出锚内海水;吸水口则是吸力锚在自重沉贯到位后,抽吸锚内海水,建立锚内外压差,实现井口吸力锚负压沉贯。

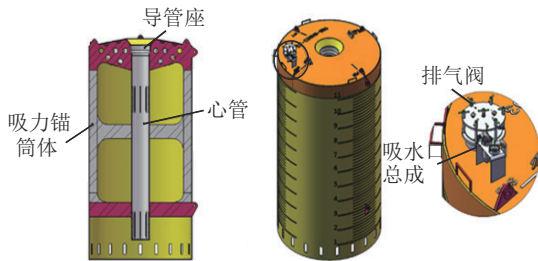


图1 深海井口吸力锚

Fig.1 Deep sea wellhead suction anchor

钻井施工时,井口吸力锚装置可以在海底浅部地层为深海井口提供更大的承载能力,减少深水钻井需要的导管长度,增大水下防喷器可安装的尺寸,节省钻井总体施工时间,提高钻井安全性能,综合降低钻井成本,同时承载能力的提高为后续安装水下生产设备提供更高稳定性的海底基础,增加了水下生产系统的安全可靠性^[13-19]。

本次深海井口吸力锚安装施工主要采用ROV(水下机器人)搭载吸力泵的技术方案^[20],该安装方法方便快捷,无需采用日费昂贵的钻井船或者钻井平台,使用普通工程船即可完成吸力锚安装。吸力锚安装施工流程主要分为4个步骤(见图2),分别是:(1)工程船采用克令吊将吸力锚吊装入水,吸力锚经海水飞溅区时通过排水阀排出气体;(2)吸力锚接触海底泥面入泥时通过排气阀排出内部水分并通过自重沉贯入泥;(3)采用搭载吸力泵的ROV抽出吸力锚内海水使吸力锚实现负压贯入,贯入到位后,进行下入效果检测;(4)解除钢丝绳,回收吊索具。

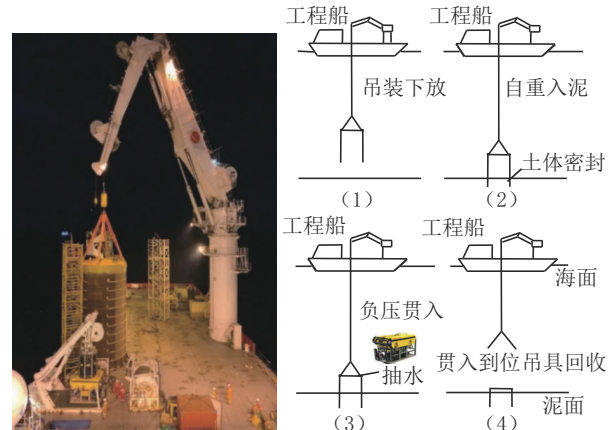


图2 吸力锚安装

Fig.2 Suction anchor installation

2 应用工程概况

泥质粉砂型天然气水合物被认为是储量最大、开采难度亦最大的水合物储层,第二轮海域天然气水合物试采选在南海北部珠江口盆地白云凹陷北坡神狐海域,区域地质背景复杂,新生代发育巨厚沉积,具有丰富的油气资源,到目前为止,在该区块已经发现一大批油气田^[21]。该区域水深1000~1500 m,在海洋油气钻井深度划分中属于深水,对钻井施工的要求高。第二轮天然气水合物试采全井段岩性

主要是泥质粉砂,矿物以泥质、砂质和钙质为主。

基于试采区储层特征,第二轮水合物试采中,中国地质调查局创造性的提出采用水平井开采天然气水合物的模式^[22],完井井身结构如图 3 所示。但是由于天然气水合物埋深浅,对造斜点的高度及造斜要求提出了较高的要求^[23],采用井口吸力锚技术^[24],在深海浅软地层中不仅有效提升了井口稳定的特性,同时提高造斜点高度、降低造斜要求,降低施工难度。试采自 2019 年 10 月 20 日开始海上施工,共经历吸力锚置入、生产井建井、监测井钻完井、储层改造、防砂作业、举升管柱下入、降压生产测试以及弃井等施工环节,其中井口吸力锚下入为施工的第一个环节,吸力锚下入质量以及施工效率对后续的试采成败具有十分重要的影响。

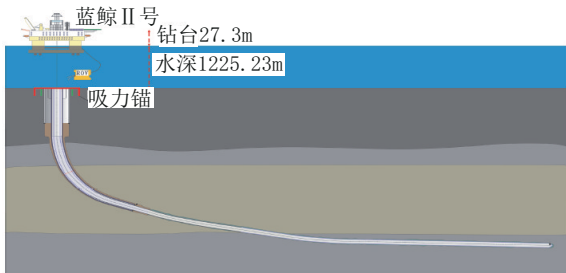


图 3 第二次试采水平井井身结构
Fig.3 Structure of the second production test horizontal well

3 沉贯受力分析及参数确定

3.1 安装受力分析

井口吸力锚受力如图 4 所示,在贯入过程中受井口吸力锚水下重力 W 、底面端阻力 Q_{tip} 、侧面侧阻力 Q_{side} 以及海底海水压力 P 作用。

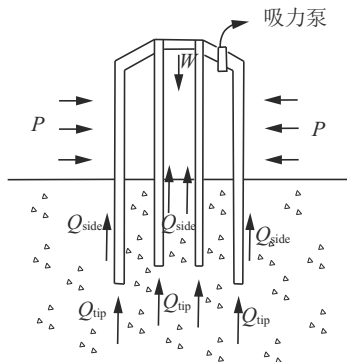


图 4 吸力锚受力分析
Fig.4 Stress analysis of suction anchor

对贯入深度起主要影响的因素为重力、端阻力以及侧阻力,对于没有肋板的吸力锚,其贯入阻力 Q_{tot} 为吸力锚侧壁摩阻力 Q_{side} 和端部承载力 Q_{tip} 之和^[25]:

$$Q_{tot} = Q_{side} + Q_{tip} \quad (1)$$

当贯入阻力 Q_{tot} 等于水下吸力锚重力 W 时,吸力锚自重贯入停止:

$$W = Q_{tot} \quad (2)$$

因井口吸力锚结构区别于常规吸力锚结构,考虑中心管对端阻以及侧阻力的影响^[25],计算公式如下:

$$Q_{side} = z\alpha S_{ua} \pi (D_o + D_i + D_{co} + D_{ci}) \quad (3)$$

$$Q_{tip} = (\gamma'_c z + S_{uip} N_c)(A_{tip} + A_{ctip}) \quad (4)$$

式中: z ——贯入深度, m; α ——强度弱化系数,无量纲; S_{ua} ——贯入深度内的平均不排水抗剪强度, MPa; D_o ——吸力锚外径, m; D_i ——吸力锚内径, m; D_{co} ——吸力锚心管外径, m; D_{ci} ——吸力锚心管内径, m; γ'_c ——粘土的有效容重, g/cm³; S_{uip} ——吸力锚端部处的不排水抗剪强度, MPa; N_c ——平面应变条件的承载力系数,无量纲; A_{tip} ——吸力锚外筒端部面积, m²; A_{ctip} ——吸力锚心管端部面积, m²。

参考 DNV-RP-E303 规范^[25], 贯入所需负压 u_n :

$$u_n = (Q_{tot} - W) / A_{in} \quad (5)$$

式中: W ——吸力锚的水下重力, N; A_{in} ——吸力锚内上盖截面积, m²。

3.2 有限元分析基本参数确定

第二轮试采过程中井口需要承载不低于 5250 kN 的竖向力以及 7118 kN·m 的水平弯矩力, 计算校核得出井口吸力锚筒体外径为 6.5m, 内部采用预制中心管作为导管喷射通道, 中心管外径为 0.92 m, 筒体长度为 12 m, 所选用材料壁厚为 30 mm, 初步估计井口吸力锚的质量为 100 t, 吸力锚水下重力 850 kN。安装区域土工参数由静力触探实验所得, 土体强度如下:

$$S_{\mu} = 3 + 2z \quad (0 < z < 1)$$

$$S_{\mu} = 5 - 1.25z \quad (1 < z < 2.6) \quad (6)$$

$$S_{\mu} = 3 + 1.15z \quad (2.6 < z)$$

式中: z ——水下地层深度, m; S_{μ} ——土体不排水抗剪强度, kPa。

采用有限元计算时, 通过对静力触探实验获得

的参数换算为土体建模最关键参数为内摩擦角以及粘聚力,查阅该地区地质调查的其他文献资料^[26],在该区域粘土内摩擦角约为 25° ,粘聚力约为7 kPa,依据实际测量获得的土工参数校核得出模型计算所需内摩擦角以及粘聚力,将参数代入有限元模型进行计算。

4 深海井口吸力锚沉贯分析

采用理论计算以及有限元对吸力锚沉贯过程进行分析,建立有限元模型时,为简化模型以及计算时间,建立符合吸力锚实际结构尺寸的1/4模型,该模型包括外筒体和心管,忽略内部加强筋等附属结构。为降低边界效应对吸力锚沉贯过程计算的影响,土体模型的半径选用为井口吸力锚模型筒体半径10倍。由于之前的理论计算得出吸力锚端阻力远小于侧阻力,在建模过程中忽略端部阻力对吸力锚沉贯作用的影响。提前设置出吸力锚完全沉贯完成后的路径,进行吸力锚沉贯分析。有限元计算计算过程共分为2步,第一步设置地应力并平衡地应力,使模型满足实际情况;第二步进行吸力锚侧阻力计算,给定吸力锚下入深度,计算获得吸力锚侧阻力,如图5所示,当侧阻力等于吸力锚水下重力时自重沉贯停止,当侧阻大于吸力锚重力时可根据吸力锚顶部面积反推出沉贯需求负压。

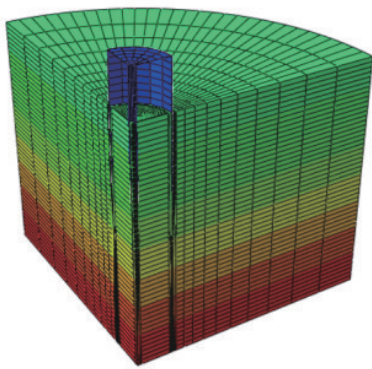


图5 吸力锚贯入计算模型

Fig.5 Calculation model of suction anchor penetration

4.1 自重沉贯分析

吸力锚沉贯过程中贯入阻力有限元计算及理论计算结果如图6所示,计算结果显示,随着深度的增加,吸力锚贯入阻力逐渐增加,由于下部地层的地应力大于上部地层,导致贯入阻力的增长速度也随着

深度的增加而加快,当贯入阻力增加到与吸力锚水下重力850 kN相等时,吸力锚停止下入,自重贯入过程完成,理论计算显示自重贯入深度为6.4 m,有限元计算显示贯入深度为6 m。

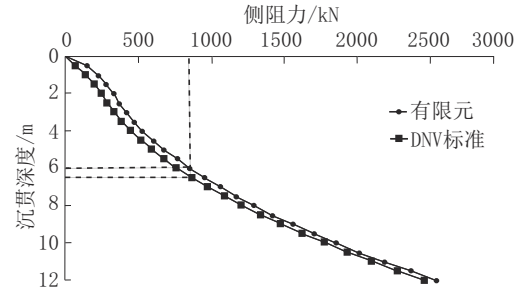


图6 吸力锚贯入阻力与深度关系

Fig.6 Relationship between penetration resistance and depth of suction anchor

4.2 需求负压分析

随着沉贯深度的增加,不排水抗剪强度增大,地应力也不断增大,同时随着吸力锚下入深度的增加,吸力锚侧壁与土体接触的面积不断增加,导致吸力锚所受到的阻力增加,使吸力锚贯入难度增大,计算结果如图7所示,根据设计深度,理论计算得吸力锚沉贯到位(11 m)所需负压为37.76 kPa,有限元计算得出所需负压为52.48 kPa。

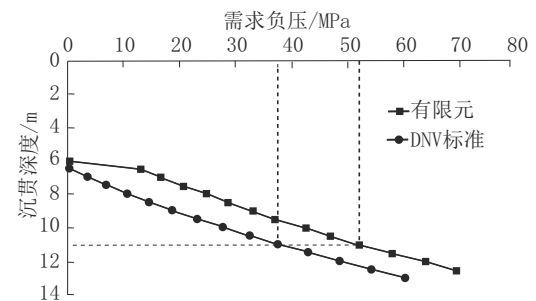


图7 吸力锚贯入所需负压与深度关系

Fig.7 Relation between negative pressure required for suction anchor penetration and depth

在井口吸力锚沉贯安装过程中,负压过大导致土体受到的扰动较大,易形成土塞等不良情况,影响吸力锚安装深度,理论计算需求负压的值是一个参考量,在安装过程中依据理论计算得出的结果,通过人为控制,选择最优沉贯负压,合理控制下入速度,才能使井口吸力锚高效、快速、高质量的下入到设计

深度,满足使用需求。

5 深海井口吸力锚安装实践

2019年10~11月,在广州海洋地质调查局协调组织下,在我国南海海域第二轮天然气水合物试采中开展了深海井口吸力锚安装实践,由中国地质科学院勘探技术研究所负责深海井口吸力锚设计以及安装技术指导,施工期间海况恶劣,在有限的窗口期开展了安装施工,并圆满完成了井口吸力锚的水下安装,具体施工过程如下:

(1)在到达确定井位后工程船开启船舶动力定位,然后以井口为圆心首先进行ROV调查,扫描海底地形地貌,在距离井口10 m处均匀摆放3个浮球,采用克令吊将吸力锚下放入水,此时排气阀处于开启状态,然后下放井口吸力锚通过飞溅区,直至下放至泥面以上1 m左右,记录此时井口吸力锚水中浮重,然后将移动船至浮球圈内,调整吸力锚艏向。

(2)自重贯入过程采用“步渐间歇式自贯”工艺,吸力锚顶部的排气阀仍然处于开启状态,当井口吸力锚底部接触泥面后开始自重贯入,此时逐渐减小钩载,每贯入一定深度后停顿若干分钟,使土层慢慢沉淀一定时间,同时始终保持吊带处于张紧状态,直至钩载悬重近似为零,此时井口吸力锚全部水下自重均用于自重贯入。

在贯入过程中,井口吸力锚在接触泥面初始阶段由于泥面非常软,贯入速度较快,随着贯入深度增加泥面逐渐密实,并且地层对井口吸力锚筒壁摩擦力增加,贯入速度逐渐降低,最终贯入7.3 m,自重贯入结束,如图8所示。

(3)自重贯入结束后,开始负压贯入过程,采用

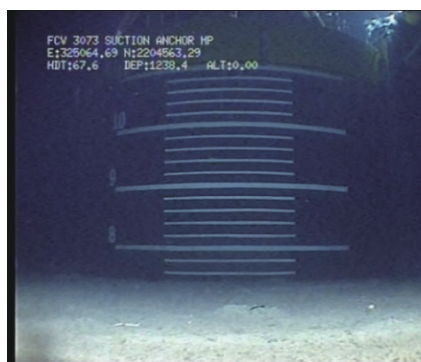


图8 自重贯入结束

Fig.8 End of self weight penetration

“拖曳连续式负压贯入”工艺。关闭吸力锚顶部排气阀,在吸水插座处插入吸水口,开启吸力泵抽吸吸力锚内部海水,使锚内压力低于锚外海洋水压,锚内外压差产生的巨大海水压力作用在锚顶,锚内外压差1 kPa,锚顶约承受31.5 kN的下压力。井口吸力锚开始负压贯入,控制克令吊悬重处于一个稳定的数值,通过人为控制吸力泵排量和克令吊下放速度,保证吸力锚贯入过程平稳,最终贯入深度达到11.3 m,接近设计值11.2 m,如图9所示。



图9 负压贯入到位

Fig.9 Negative pressure penetration in place

在负压沉贯到位后进行吸力锚垂直度测试,由于在吸力锚沉贯过程中一直进行垂直度检测,在开始负压沉贯后吸力锚垂直度始终保持 0.17° ,全程无变化,安装过程顺利。吸力锚安装到位后进行承重测试,采用吸力泵持续抽吸,使锚内外压力差达到了159 kPa(-23 PSI),井口吸力锚未发生下沉现象,计算得出此时承载力超过5000 kN,满足深海井口承载要求。

(4)根据DNV-RP-E303规范^[25],顶部封闭的吸力锚承载能力大于顶部开放的吸力锚,所以在井口吸力锚沉贯结束后,采用ROV拔出吸水插座上的吸水插头,并将盲堵安装在吸水插座上,封闭吸水口,使吸力锚顶部为封闭状态,并采用ROV解锁仪器包以及回收井口吸力锚四周吊索具,完成井口吸力锚安装施工。

6 结论与分析

(1)在井口吸力锚沉贯理论计算及有限元计算过程中,理论计算沉贯深度6.4 m、有限元软件计算深度6 m,与实际贯入深度7.3 m存在一定的误差,但误差处于可接受范围,证明沉贯分析结果真实可

靠,后期可根据多次试验,调整计算参数,优化计算结果,可有效指导吸力锚安装。

(2)吸力锚自重贯入过程中,始终保持吊带张紧,采用“步渐间歇式自贯”工艺进行自重贯入,可有效保障吸力锚贯入过程中的垂直度;负压贯入过程中,克令吊控制悬重,打开吸力泵采用“拖曳连续式负压贯入”工艺进行负压贯入,通过人为控制吸力泵排量和克令吊下放速度控制贯入速度,可提高贯入质量。

(3)第二轮海域天然气水合物试采中开展了采用ROV搭载吸力泵进行井口吸力锚安装应用实践,安装垂直度为 0.17° 和承载力达到5250 kN均达到了设计要求,对标国外同类产品,此次安装精度满足实际使用需求,验证了整套沉贯计算分析、施工工艺的可行性和正确性,为同类型吸力锚的水下安装提供了有效的安装经验。

参考文献(References):

- [1] 吴时国,袁圣强.世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J].天然气地球科学,2005,16(6):693-699.
WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6):693-699.
- [2] 邹才能,张光亚,陶士振,等.全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J].石油勘探与开发,2010,37(2):129-145.
ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration & Development, 2010, 37(2):129-145.
- [3] 张功成,米立军,吴时国,等.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报,2007,28(2):15-21.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2):15-21.
- [4] 李清平.我国海洋深水油气开发面临的挑战[J].中国海上油气,2006,18(2):130-133.
LI Qingping. The situation and challenges for deepwater oil and gas exploration and exploitation in China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(2):130-133.
- [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 Jin, CAO Shijing. Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deepwater [J]. Oil Drilling Production Technology, 2008, 30(2):10-13.
- [6] 褚道余.深水井控工艺技术探讨[J].石油钻探技术,2012,40(1):52-57.
CHU Daoyu. Well control technology in deepwater well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1):52-57.
- [7] 刘书杰,谢玉洪,杨进,等.海洋深水钻井隔水管系统动力特性分析[J].石油钻采工艺,2009,31(3):1-4.
LIU Shujie, XIE Yuhong, YANG Jin, et al. Drilling riser dynamic characteristics of marine deep water [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3):1-4.
- [8] 苏堪华,管志川,魏路,等.深水水上防喷器钻井系统水下井口稳定性分析[J].中国海上油气,2009,21(3):180-185.
SU Kanhua, GUAN Zhichuan, WEI Lu, et al. Analysis on sub-sea wellhead stability of surface BOP drilling system in deepwater operations [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(3):180-185.
- [9] 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[J].石油科学通报,2016(1):61-80.
GAO Deli, WANG Yanbin. Progress in tubular mechanics and design control techniques for deep-water drilling [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016(1):61-80.
- [10] 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,(5):76-82.
WANG Yanbing, GAO Deli, FANG Jun. Numerical analysis of bearing capacity of deep water conductor with consideration of different contact interface models between pile and soil [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, (5):76-82.
- [11] 苏堪华,管志川.深水钻井导管及表层套管竖向承载能力分析[J].重庆科技学院学报·自然科学版,2010,(2):22-24.
SU Kanhua, GUAN Zhichuan. Analysis on vertical bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2010, 12(2):22-24.
- [12] 周波,杨进,刘正礼,等.深水钻井表层导管静置时间窗口设计[J].石油勘探与开发,2014,41(2):234-238.
ZHOU Bo, YANG Jin, LIU Zhengli, et al. Design of structure casing soaking time in deepwater drilling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2):234-238.
- [13] LI Bo, KOU Beibei, LI Bin, et al. Application of wellhead suction anchor technology in the second production test of natural gas hydrates in the South China Sea [J]. China Geology, 2022, 5(2):293-299.
- [14] Wang M C, Nacci V A, Demars K R. Behavior of underwater suction anchor in soil [J]. Ocean Engineering, 1975, 3(1):47-50.
- [15] 刘红军,王荃迪,潘晨晨,等.海上风电伞式吸力锚基础承载性能研究[J].水利学报,2016,47(10):1339-1345.
LIU Hongjun, WANG Quandi, PAN Chenchen, et al. The research on bearing capacity of umbrella suction anchor foundation for offshore wind power [J]. Journal of Hydraulic Engineer-

- ing, 2016, 47(10):1339-1345.
- [16] 张其一,王美生,栾茂田. 深海吸力锚承载特性与稳定性研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(2):40-45.
ZHANG Qiyi, WANG Meisheng, LUAN Maotian. Study on bearing capacity and stability of suction anchor in deep sea[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(2):40-45.
- [17] 张其一,董胜,王青华. 深海吸力锚水平极限承载力研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2011, 41(5):114-119.
ZHANG Qiyi, DONG Sheng, WANG Qinghua. Study on horizontal ultimate bearing capacity of suction anchor in deep sea [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences Edition, 2011, 41(5):114-119.
- [18] 刘晶磊,王建华. 循环荷载频率对黏土中吸力锚承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, (12):3653-3658.
LIU Jinglei, WANG Jianhua. Experimental study of effect of cyclic loading frequency on bearing capacity of suction anchor in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 12:3653-3658.
- [19] 苗笛. 吸力锚的抗拔承载力分析[J]. 港工技术, 2009, 46(5):42-45.
MIAO Di. Analysis on pull-out capacity of suction anchor[J]. Port Engineering Technology, 2009, 46(5):42-45.
- [20] 马超. ROV搭载吸力泵安装大型吸力锚方案设计与实践[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5):161-165.
MA Chao. Schematic design and practice of large-size suction anchor installation by pump-equipped ROV[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5):161-165.
- [21] 柳保军,申俊,庞雄,等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积特征[J]. 石油学报, 2007(2):49-56, 61.
LIU Baojun, SHEN Jun, PANG Xiong, et al. Characteristics of continental delta deposits in Zhuhai Formation of Baiyun Depression in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2):49-56, 61.
- [22] 叶建良,秦绪文,谢文卫,等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. 中国地质, 2020, 47(3):557-568.
YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea [J]. Geology in China, 2020, 47(3):557-568.
- [23] 代恒军. 软土中吸力锚承载力分析[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
DAI Hengjun. Bearing capacity analysis of suction anchor in soft foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [24] 刘俊滨,李玉峰,刘金铎. 吸力锚技术的应用现状及前景[J]. 中国水利, 2007(22):37-38.
LIU Junbin, LI Yufeng, LIU Jinduo. Present condition and future respect for application of suction anchor technology [J]. China Water Resources, 2007, (22):37-38.
- [25] DNV-RP-E303, Geotechnical design and installation of suction anchors in clay[S].
- [26] 胡高伟,李彦龙,吴能友,等. 神狐海域W18/19站位天然气水合物上覆层不排水抗剪强度预测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5):151-158.
HU Gaowei, LI Yanlong, WU Nengyou, et al. Undrained shear strength estimation of the cover layer of hydrate at site W18/19 of Shenhu Area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5):151-158.

(编辑 王文)