

# 大洋钻探井口吸入模块设计与模态分析

王嘉瑞<sup>1</sup>, 秦如雷<sup>\*1</sup>, 冯起赠<sup>1</sup>, 陈浩文<sup>1</sup>, 许本冲<sup>1</sup>, 卢秋平<sup>2</sup>, 刘晓林<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

**摘要:**井口吸入模块是无隔水管泥浆闭式循环钻井技术(RMR)系统的关键组成部分,其在海底的工作状态对钻井工作有着一定程度的影响。本文设计了一种开放式井口吸入模块,建立了三维模型,通过莫里森方程计算内波流载荷,采用 $P$ - $y$ 曲线法对土壤条件进行弹簧等效模拟,对井口吸入模块进行了静力学分析和模态分析。研究表明,采用无隔水管泥浆闭式循环钻井技术时,井口装置的相对位移较正常深水钻井可大幅减小,吸入模块及其连接部位应力应变小,由井口吸入模块的模态分析得出了固有频率,为井口吸入模块的尺寸优化及无隔水管泥浆闭式循环钻井技术的应用提供参考,为大洋钻探向深海发展提供技术支撑。

**关键词:**无隔水管泥浆闭式循环钻井;吸入模块;深水钻井;结构设计;模态分析;大洋钻探

**中图分类号:**P634.3;TE52;TE921+.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)06-0045-11

## Design and modal analysis of wellhead suction module for ocean drilling

WANG Jiarui<sup>1</sup>, QIN Rulei<sup>\*1</sup>, FENG Qizeng<sup>1</sup>, CHEN Haowen<sup>1</sup>, XU Benchong<sup>1</sup>, LU Qiuping<sup>2</sup>, LIU Xiaolin<sup>1</sup>

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

2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510075, China)

**Abstract:** The wellhead suction module is one of the key equipment of riserless mud recovery drilling (RMR) system, and the status when working on the seabed has a certain impact on the drilling work. In this paper, an open wellhead suction module is designed, a three-dimensional model is established, morison equation is used to calculate the internal wave current load, the  $P$ - $y$  curve method is used to simulate the spring equivalent of the soil conditions, and the wellhead suction module is analyzed statically and modally. The research shows that the displacement of wellhead equipment is greatly reduced compared with that of the normal deep-water drilling, and the stress and strain of suction module and its connecting parts are smaller when using RMR drilling technology. The intrinsic frequency of wellhead suction module is obtained from the modal analysis of wellhead suction module, which provides referential value for the size optimization of wellhead suction module and the application of the RMR technology, and provides technical support for drilling to deep ocean.

**Key words:** riserless mud recovery drilling; suction module; deep-water drilling; structure design; modal analysis; ocean drilling

## 0 引言

大洋钻探始于1988年,在验证地球深部岩石循环和板块构造、提高古气候重建准确性、发现深部

生物圈和油气矿产资源、防灾减灾等方面发挥重大作用,而海洋水深超过2000 m的深海占地球表面的2/5,随着大洋钻探逐渐向深海发展,也遇到了诸多

收稿日期:2023-07-18; 修回日期:2023-09-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.06.006

**基金项目:**国家重点研发计划项目“深海无隔水管泥浆回收循环钻井技术装备研发”(编号:2021YFC2800802/2021YFC2800803);工业和信息化部高技术船舶项目“天然气水合物钻采船(大洋钻探船)总装建造关键技术研究”(编号:CJ05N20);广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“天然气水合物储层改造增产与测试技术支撑”(编号:GDNRC[2022]44)

**第一作者:**王嘉瑞,女,汉族,1992年生,工程师,机械工程专业,主要从事智能地质装备研发工作,河北省廊坊市金光道77号,wjiaui@mail.cgs.gov.cn。

**通信作者:**秦如雷,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质工程专业,主要从事海洋钻探装备与钻井工艺研究,河北省廊坊市金光道77号,qrulei@mail.cgs.gov.cn。

**引用格式:**王嘉瑞,秦如雷,冯起赠,等.大洋钻探井口吸入模块设计与模态分析[J].钻探工程,2023,50(6):45-55.

WANG Jiarui, QIN Rulei, FENG Qizeng, et al. Design and modal analysis of wellhead suction module for ocean drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(6):45-55.

难题<sup>[1-6]</sup>。双梯度钻井(Dual Gradient Drilling, 简称DGD)技术可解决部分深海钻探难题,技术核心可以理解为释放单一梯度钻井中隔水管内泥浆(密度大于海水)引起的井底压力过大,有效匹配地层孔隙压力和破裂压力间隙<sup>[7-11]</sup>。无隔水管泥浆闭式循环钻井(Riserless Mud Recovery Drilling, 简称RMR)是双梯度钻井方法的其中一种,该方法不采用隔水管,通过井口吸入模块(Suction Module, 简称SMO)将返回的岩屑和钻井液分流出来,经过海底泥浆举升泵(SPM)和回流管线(MRL)从海底返回至钻井平台,从而实现钻井液循环<sup>[12-16]</sup>,结构示意图如图1所示,无隔水管泥浆闭式循环钻井与常规隔水管钻井的压力梯度对比如图2所示。

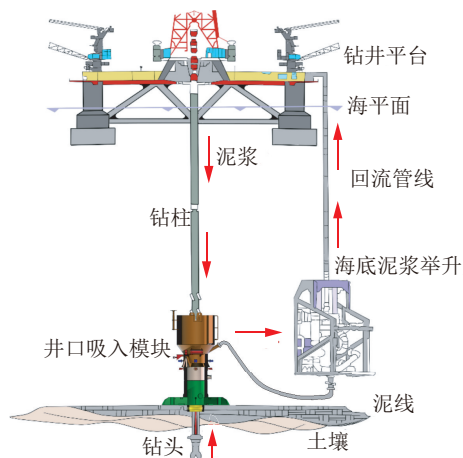


图1 无隔水管泥浆闭式循环钻井系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the RMR system

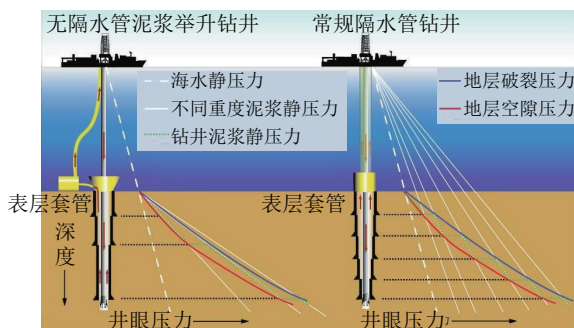


图2 无隔水管泥浆闭式循环钻井与常规隔水管钻井的压力梯度对比<sup>[17-18]</sup>

Fig.2 Comparison of pressure gradient between RMR and conventional riser drilling

井口吸入模块(SMO)是无隔水管泥浆返回钻井系统中的关键组成部件,其主要功能是扶正下入

钻具、为钻井液返回管线提供接口以及隔离环空顶部和周围海水环境。国外井口吸入模块的研究起步较早,2006年,在库页岛大陆架上使用RMR技术时,SMO上端采用开放式,装有压力传感器和摄像机用于监测泥浆液位,调节泥浆举升泵转速控制泥浆液位<sup>[19-20]</sup>。2006—2009年,为了使RMR与套管钻井结合,对SMO进行设计修改,在SMO底部安装可打开的井口适配器形成更大的内径,使高压井口顺利通过,并在澳大利亚近海的Dampier次盆地成功应用<sup>[21]</sup>。2008年,在马来西亚沙巴洲近海进行深水钻井试验,通过遥控无人潜水器(Remote Operated Vehicle, 简称ROV)将SMO安装在低压井口,摄像机、压力传感器和电子舱等电子设备与本体分开下放,本次实验验证了1419m深水的可行性<sup>[22]</sup>。2009年在墨西哥湾使用RMR技术时,下放SMO到大口径低压井口,SMO和钻杆尾部采用了专用的J形槽进行连接,可配备内部低压井口适配器或外部适配器<sup>[23]</sup>。2011年,在巴西近海钻井时使用了一种新设计的SMO,SMO与贯入桩同时下入海底,海底泵模块通过导丝下入并安装在SMO顶部,可进行开放水域下套管,导管柱与海底泵之间通过软管连接,改进后的RMR系统可以提高钻井效率<sup>[24]</sup>。2018年,在巴伦支海应用RMR技术,并对SMO进行了相关改造,为了在固井作业中建立循环系统,SMO适配器上安装了管线、阀门和密封件,以密封井口上的水泥端口,从而在高压井口降落到低压井口后形成闭环循环系统<sup>[25]</sup>。

国外井口吸入模块通过反复应用进行了多项改进与迭代升级,国内的井口吸入模块大多停留在理论研究和初期研发阶段。2010年,中国石油大学(华东)陈国明教授团队的刘杰<sup>[26]</sup>、徐群<sup>[27]</sup>对SMO进行初期设计,并参考AGR公司的三代SMO开发出了数字样机,为SMO的国产化设计和应用提供参考。2013年,刘玉亮<sup>[28]</sup>对SMO关键部件进行耐久性分析和设计,对密封胶芯进行ABAQUS分析,提高了SMO的工作性能和适用性。2019年,王志伟<sup>[29]</sup>设计了一种井口吸入模块旋转密封总成下放回收装置和液压锁紧装置,并对其进行了强度评估,陈国明教授团队基于海底泥浆举升技术,形成了吸入模块样机、圆盘泵组及返回管线的室内试验系统,并进行了相关控制系统的设计。本文根据井口吸入模块的使用条件进行设计,建立三维模型,对结构进

行了静力学分析和模态分析,为后续井口吸入模块研发提供参考,为大洋钻探向深海发展提供技术支撑。

### 1 井口吸入模块设计

#### 1.1 条件方案

针对中国南海特有的强热带风暴、内波流等复杂的气候条件,给出本次井口吸入模块设计的条件参数,详见表 1。

表 1 井口吸入模块条件参数  
Table 1 Condition parameters of wellhead suction module

| 项 目                        | 数 值         |
|----------------------------|-------------|
| 设计水深/m                     | 1000        |
| 工作温度/℃                     | 3~5         |
| 海水密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 1024        |
| 导管尺寸/in                    | 36          |
| 返回管线内径/mm                  | 150         |
| 液压系统压力/MPa                 | 20(相对压力)    |
| 井口模块材料                     | Q235        |
| 连接油缸材料                     | 316L 不锈钢    |
| C 形环材料                     | 65 Mn       |
| 防腐方式                       | 海洋防腐涂料、牺牲阳极 |

钻井作业时,先将 C 形环装入连接短节卡槽内,连接短节与低压井口和 36 in(Ø814.4 mm)导管焊接,焊接后慢速下放导管组焊件使其与泥垫通过 C 形环卡住,球阀穿过井口模块圆孔与低压井口头连接,即可按照常规导管下放程序布放井口模块,施工完毕后,将井口模块专用 J 形打捞工具通过钻杆下入至井口模块指定处,通过井口模块自带摄像头与 ROV 观察连接情况,将 ROV 上的 Hotstab 公头与井口模块上的母头连接,使用 ROV 的液压供液功能驱动连接油缸回收,提起打捞工具完成井口模块上下分离并进行回收,结构示意图如图 3 所示。

井口吸入模块上端可采用开放式,也可采用旋转密封式,当发生浅层气溢出情况时,开放式井口吸入模块中的泥浆与海水相通,溢出的气体可直接进入海水,旋转密封式井口吸入模块则会使气体通过泥浆循环系统涌入钻井平台,存在安全隐患。开放式顶部摄像头可实时观察井口情况,通过调整海底泵组转速控制泥浆线位置,维持井内压力稳定,不必担心泥浆溢出情况,试验中摄像观察到泥浆与海水

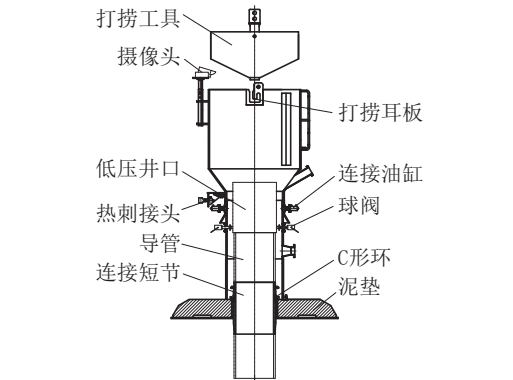


图 3 井口吸入模块结构示意图  
Fig.3 Structure diagram of wellhead suction module

可保持界限分明<sup>[17,20]</sup>。

#### 1.2 结构设计

根据条件方案,结合 1000 m 左右水深的钻井作业环境和海洋钻井工作流程,研究功能需求,本着“简单、经济、够用”原则设计井口吸入模块,三维模型如图 4 所示。

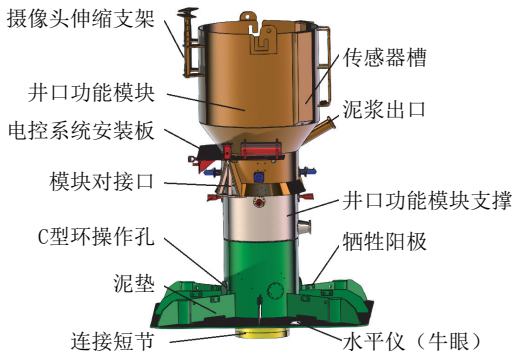


图 4 井口吸入模块三维建模  
Fig.4 3D modeling of wellhead suction module

### 2 井口吸入模块静力学分析

井口吸入装置在海底的受力情况如图 5 所示。在泥线以下的导管受到泥土对导管的反作用力,该力在进行分析时采用弹簧阻尼器来等效,根据不同深度的泥土采用不同刚度的弹簧进行模拟。泥线以上的部分即为井口吸入装置,该部分主要受到海底波流力,根据受力情况对该模块进行整体静力学分析以及模态分析<sup>[30-32]</sup>。采用 ABAQUS 仿真软件对井口吸入模块整体结构进行静力学分析。海洋的波流力由莫里森公式计算得出,而后加载在井口吸入装置的外圆柱面上,以此来等效。

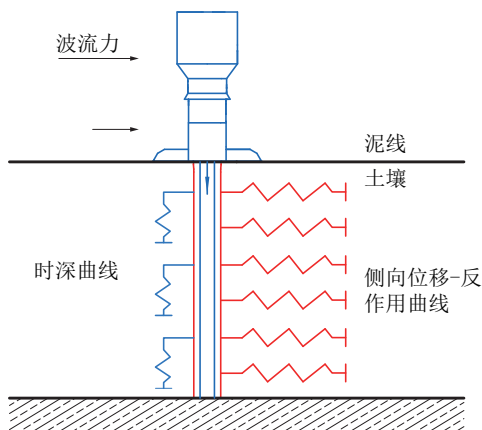


图5 井口吸入模块受力情况示意

Fig.5 Diagram of force condition on wellhead suction module

### 2.1 莫里森方程

对小构件,即构件直径与入射波的波长相比尺度较小的结构物,常采用莫里森等提出的方法计算波流力<sup>[33]</sup>。莫里森方程以波流质点速度、加速度和柱体直径为参数计算各水深处波流力,然后沿柱长积分得到桩柱波流力<sup>[34]</sup>。

莫里森等认为作用于柱体任意高度 $z$ 处的水平波流力 $f$ 包括2个分量:

(1)水平拖曳力 $f_D$ ——波流水质点的水平速度 $u_x$ 引起的对柱体的作用力:

$$f_D = (1/2)C_D \rho A u_x |u_x| \quad (1)$$

式中: $f_D$ ——水平拖曳力,N; $C_D$ ——拖曳力系数; $\rho$ ——海水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $A$ ——单位柱高垂直于波向的投影面积, $\text{m}^2$ ; $u_x$ ——波流水质点的水平速度, $\text{m}/\text{s}$ 。

(2)水平惯性力 $f_I$ ——水质点运动的水平加速度 $u_x$ 引起的对柱体的作用力:

$$f_I = C_M \rho V_0 du_x/dt \quad (2)$$

式中: $f_I$ ——水平惯性力,N; $C_M$ ——惯性力系数; $\rho$ ——海水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $V_0$ ——单位柱高柱体体积, $\text{m}^3$ ; $u_x$ ——波流水质点的水平速度, $\text{m}/\text{s}$ 。

对于本次对井口吸入装置的分析,根据表2,由于井口吸入装置处于1000 m的海底,故拖曳力系数 $C_D$ 取0.7;海水密度 $\rho$ 取 $1024 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;取某工区深度为1000 m以及海洋流速为 $0.49 \text{ m}/\text{s}$ ,故波流水质点的水平速度 $u_x$ 取为 $0.49 \text{ m}/\text{s}$ 。根据井口吸入模块的设计尺寸及投影面积可求得:最上部圆柱面所受水

平拖曳力约为 $255.79 \text{ N}$ ,中间圆锥所受水平拖曳力约为 $72.41 \text{ N}$ ,下部圆柱面所受水平拖曳力约为 $306 \text{ N}$ 。由于分析所取流速为均匀流速,故井口吸入装置不受洋流的水平惯性力。

表2 水动力参数<sup>[35]</sup>

Table 2 Hydrodynamic parameters

| 名称    | 符号    | 参数值                                   |
|-------|-------|---------------------------------------|
| 拖曳力系数 | $C_D$ | 1.2(海平面下0~150 m)<br>0.7(海平面下150 m至海底) |
| 惯性力系数 | $C_M$ | 2.0                                   |

### 2.2 仿真分析前处理设置

井口吸入装置和导管的材料都采用Q235,该材料的密度为 $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,杨氏模量为 $210 \text{ GPa}$ ,泊松比为0.3,将以上材料属性赋予分析模型。本次分析是对井口吸入模块整体结构的静力学分析,故分析类型选择静态、通用。对于该井口吸入模块,选择划分网格的单元形状为四面体,划分技术采用自由划分,网格划分算法采用默认算法,由于该模块存在小部件,故对于小部件还应采用局部划分,设置更精细的局部网格以保证完全划分,划分结果如图6所示。

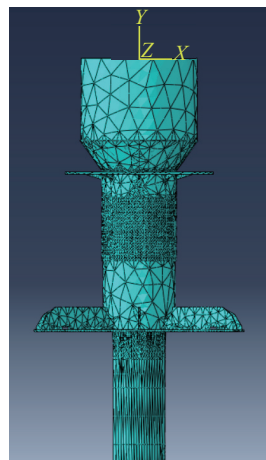


图6 网格划分

Fig.6 Mesh division

根据莫里森公式算出的水平拖曳力,将该力分别加载到圆柱和圆锥面上。在实际应用中导管深入泥土90 m,导管最底部可视为固定约束,故可对导管最底部设置完全固定约束。由于泥线以下的导管受到泥土对导管的反作用力,在ABAQUS中该力

可在相互作用模块中采用将导管连接弹簧的方式等效处理。故对该模块进行分析时还需对导管设置相互作用,根据不同深度的泥土所绘制出的 $P$ - $y$ 曲线来得到不同深度的泥土的等效弹簧刚度。将这些不同刚度的弹簧施加在相对应深度的导管上。

$P$ - $y$ 曲线法是指在水平力 $F$ 的作用下,土下深度 $x$ 处土反力 $P$ 与该深度结构物侧向变形 $y$ 之间的关系曲线。它综合反映了桩周土的非线性、桩的刚度和外荷作用的性质等特点,是一种弹塑性分析方法。 $P$ - $y$ 曲线法不仅适用于静载荷和循环载荷,而且也适用于结构物的大位移和小位移,避免了单一参数法的缺点,已经广泛应用于石油海洋工程中。所涉及到的粘土的主要物理力学性能指标有土的不排水抗剪强度、重度和主应力差<sup>[36-37]</sup>。

### 2.2.1 软粘土中的 $P$ - $y$ 曲线

对于不排水抗剪强度 $C_u \leq 96$  kPa的软粘土,泥线 $x$ 深度下单位桩长的极限土阻力 $P_u$ 由式(3)确定:

$$\begin{cases} P_u = 3C_u + \gamma_c x + \xi C_u x/D & x < x_r \\ P_u = 9C_u & x \geq x_r \end{cases} \quad (3)$$

$$x_r = 6C_u D / (\gamma_c D + \xi C_u)$$

式中: $\gamma_c$ ——泥线下深度 $x$ 处土的单位有效重度, kN/m<sup>3</sup>;  $C_u$ ——土的不排水抗剪强度, kPa;  $x$ ——深度, m;  $D$ ——结构物的直径, m;  $\xi$ ——无因次经验常数,其值在0.25~0.5之间,土硬取小值;  $x_r$ ——极限水平承载力的转折点深度, m, 通常认为 $x_r$ 范围以内的为浅层土,  $x_r$ 以下为深层土。

(1) 软粘土在静载荷下的 $P$ - $y$ 曲线可由式(4)确定:

$$\begin{cases} P/P_u = 0.5(y/y_{50})^{1/3} & y/y_{50} < 8 \\ P = P_u & y/y_{50} > 8 \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{50} = 2.5\epsilon_{50} D$$

式中: $P$ ——泥线下深度 $x$ 处结构物发生横向位移 $y$ 时,结构物横向极限土阻力, kPa;  $y$ ——泥线下深度 $x$ 处结构物发生横向位移, m;  $y_{50}$ ——横向土阻力为极限横向土阻力一半时,结构物的横向位移, m;  $\epsilon_{50}$ ——原状土不排水试验中1/2最大应力处发生的应变,可由表3确定。

(2) 软粘土在循环载荷下的 $P$ - $y$ 曲线:

当 $x < x_r$ 时,侧向极限土阻力可由式(5)确定:

表3 软粘土 $\xi_{50}$ 值<sup>[38]</sup>

Table 3  $\xi_{50}$  value of soft clay

| $C_u$ /kPa | 12~24 | 24~48 | 48~96 |
|------------|-------|-------|-------|
| $\xi_{50}$ | 0.02  | 0.01  | 0.007 |

$$\begin{cases} P/P_u = 0.5(y/y_{50})^{1/3} & 0 < (y/y_{50}) < 3 \\ P/P_u = 0.72 & (y/y_{50}) \geq 3 \end{cases} \quad (5)$$

当 $x > x_r$ 时,侧向极限土阻力可由式(6)确定:

$$\begin{aligned} P/P_u &= 0.5(y/y_{50})^{1/3} & 0 < (y/y_{50}) < 3 \\ P/P_u &= 0.06(x_r - x)/x_r(15 - y/y_{50}) + \\ &0.72x/x_r & 3 \leq (y/y_{50}) \leq 15 \\ P/P_u &= 0.72x/x_r & (y/y_{50}) \geq 15 \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2.2 硬粘土中的 $P$ - $y$ 曲线

对于不排水抗剪强度 $C_u > 96$  kPa的硬粘土,用式(3)分别计算,取小值作为单位结构件上极限土阻力 $P_u$ 。

横向土阻力为极限横向土阻力一半时结构物的横向位移由式(7)确定:

$$y_{50} = b\epsilon_{50} \quad (7)$$

其中 $\epsilon_{50}$ 的值通过现场试验确定,若条件不够则通过表4确定。

表4 硬粘土 $\xi_{50}$ 值<sup>[38]</sup>

Table 4  $\xi_{50}$  values of hard clay

| $C_u$ /kPa | 54~107 | 107~215 | 215~430 |
|------------|--------|---------|---------|
| $\xi_{50}$ | 0.007  | 0.005   | 0.004   |

(1) 硬粘土在静载荷下的 $P$ - $y$ 曲线可由式(8)确定:

$$\begin{cases} P/P_u = 0.5(y/y_{50})^{1/4} & 0 < y/y_{50} < 16 \\ P/P_u = P_u & y/y_{50} \geq 16 \end{cases} \quad (8)$$

(2) 硬粘土在循环载荷下的 $P$ - $y$ 曲线可由式(9)确定:

$$\begin{cases} C = 9.6(p/p_u)^4 \\ y_c = y_s + y_{50} C \lg N \end{cases} \quad (9)$$

式中: $N$ ——循环载荷施加次数;  $y_c$ —— $N$ 次循环加载后的位移, m;  $y_s$ ——短期静载荷下的位移, m;  $y_{50}$ ——相应于极限土阻力一半时的短期静载位移, m。

对每一处深度下硬粘土,可通过上式求得对应

$P$ - $y_c$  曲线。某工区海底深度 37 m 内是软泥土, 37~90 m 是硬质粘土, 土壤基本数据见表 5, 根据土壤实测数据可得出各离散层处土壤的  $P$ - $y$  关系, 进而得出不同深度的泥土的等效弹簧刚度。

表 5 某工区土壤基本数据

Table 5 Soil basic data

| 层号 | 土质描述  | 深度/m  | 有效重度/<br>( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 设计抗剪强度/<br>度/kPa |
|----|-------|-------|--------------------------------------------|------------------|
| 1  | 软泥土   | 0     | 13                                         | 2                |
|    |       | 0.5   | 13.5                                       | 4                |
|    |       | 16.68 | 13.9                                       | 23               |
| 2  | 硬质粘土  | 36.6  | 15.1                                       | 40               |
|    |       | 60.8  | 15.2                                       | 71               |
|    |       | 80.5  | 16.6                                       | 98               |
| 3  | 坚硬粘性土 | 100.5 | 17.5                                       | 116              |

### 2.3 井口吸入模块整体结构力学特性分析

根据波流力和泥土对井口吸入模块连接导管的反作用力, 可得出井口吸入模块应力云图如图 7 所示, 井口吸入装置最大应力发生在底部筋板与圆柱结合处, 其值约为 7 MPa, 由于材料 Q235 屈服强度为 235 MPa, 故该井口吸入模块满足强度要求, 安全系数可达到 33。井口吸入模块应变云图如图 8 所示, 井口吸入装置最大应变发生在底部筋板与圆柱结合处, 其值约为  $2.8 \times 10^{-5}$  mm, 该值较小, 井口吸入装置能满足正常工作。井口吸入模块位移云图如图 9 所示, 井口吸入装置最大位移发生在最顶部, 其值约为 0.17 mm, 该值较小, 井口吸入装置能满足正常工作。

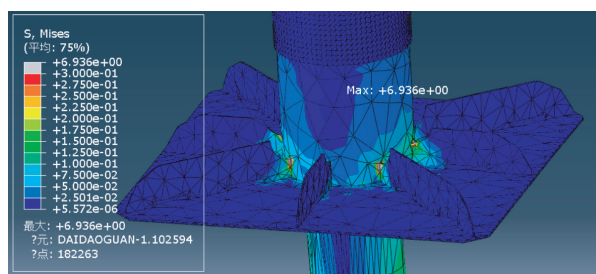


图 7 井口吸入装置应力云图

Fig.7 Stress nephogram of wellhead suction unit

### 2.4 井口吸入模块连接部位的应力应变状态分析

井口吸入模块连接部位应力云图如图 10 所示, 连接部分最大应力发生在小孔处, 其值约为

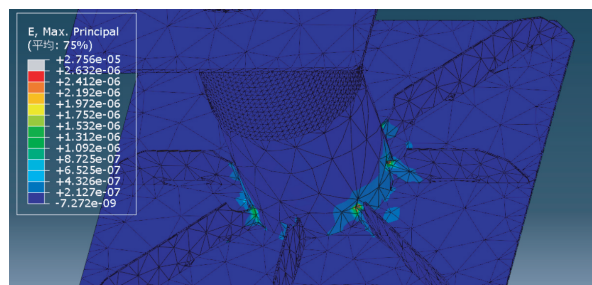


图 8 井口吸入装置应变云图

Fig.8 Strain nephogram of wellhead suction unit

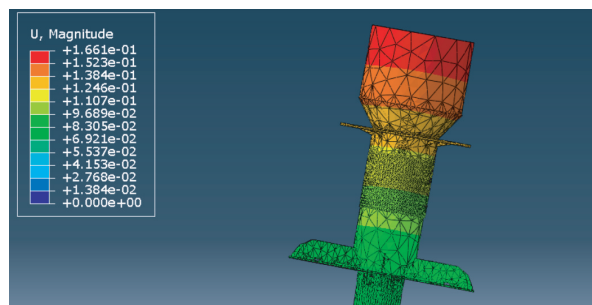


图 9 井口吸入装置位移云图

Fig.9 Displacement nephogram of wellhead suction unit

43.31 MPa, 连接部分所采用的材料为 Q235, 其屈服强度为 235 MPa, 远大于连接部分的最大应力, 故该连接部分连接可靠。井口吸入模块连接部位应变云图如图 11 所示, 最大应变同样发生在小孔处, 其值约为  $2.1 \times 10^{-7}$  mm, 该值极小, 可忽略不计, 故该连接部分连接可靠。

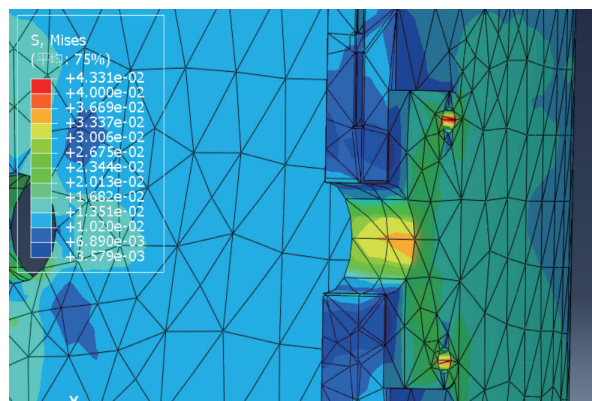


图 10 连接部位应力云图

Fig.10 Stress nephogram at the connection part

## 3 井口吸入模块模态分析

### 3.1 模态分析前处理设置

对于模态分析, 其前处理设置与静力学分析基

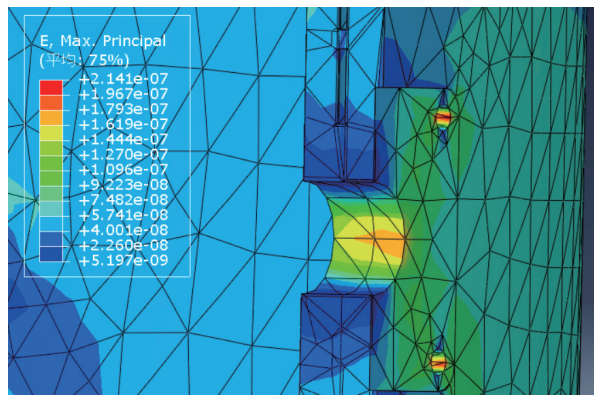


图 11 连接部位应变云图

Fig.11 Strain nephogram at the connection part

本相同,不同处有以下 2 点:模态分析的分析步类型

采用的是线性摄动中的频率分析,而静力学分析的分析步类型采用的是通用中的静力分析;模态分析不需要施加载荷,而静力学分析需要对模型施加载荷<sup>[39]</sup>。

### 3.2 模态结果可靠性分析

在使用振型叠加法分析动态问题时,要保证在频率提取分析过程中提取了足够数量的模态,其判断标准是在主要运动方向上的总有效质量要超过模型中可运动质量的 90%。对于本次分析,整体模型的主要运动方向为 Z 轴,从表 6 的数据可以看到在 Z 方向上总的有效质量为 84.101 t,而模型的总质量为 86.79435 t,所占比例为 97%,因此取 20 阶振型是足够的,所得结果可靠。

表 6 有效质量

Table 6 Effective mass

t

| 模态 | X 分量                    | Y 分量                   | Z 分量                   | 绕 X 轴旋转                | 绕 Y 轴旋转                | 绕 Z 轴旋转                |
|----|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1  | $6.490 \times 10^{-13}$ | $1.693 \times 10^{-8}$ | $5.459 \times 10^1$    | $2.408 \times 10^{10}$ | $4.466 \times 10^1$    | $1.664 \times 10^{-4}$ |
| 2  | $1.146 \times 10^{-9}$  | $2.392 \times 10^{-7}$ | $1.598 \times 10^1$    | $8.728 \times 10^{10}$ | $3.400 \times 10^{-1}$ | $1.078 \times 10^{-2}$ |
| 3  | $6.952 \times 10^{-8}$  | $6.016 \times 10^{-7}$ | 5.452                  | $3.696 \times 10^{10}$ | $9.350 \times 10^{-1}$ | $4.691 \times 10^{-2}$ |
| 4  | $2.929 \times 10^{-6}$  | $1.837 \times 10^{-6}$ | 2.740                  | $2.026 \times 10^{10}$ | $3.830 \times 10^{-1}$ | $1.397 \times 10^1$    |
| 5  | $1.280 \times 10^1$     | $1.347 \times 10^{-8}$ | $9.271 \times 10^{-6}$ | $7.103 \times 10^4$    | $1.349 \times 10^7$    | $8.710 \times 10^7$    |
| 6  | $7.400 \times 10^{-5}$  | $6.597 \times 10^{-6}$ | 1.621                  | $1.255 \times 10^{10}$ | $1.724 \times 10^1$    | $6.832 \times 10^2$    |
| 7  | $1.985 \times 10^{-5}$  | $3.014 \times 10^{-5}$ | 1.068                  | $8.510 \times 10^9$    | 1.528                  | $3.848 \times 10^2$    |
| 8  | $1.497 \times 10^{-3}$  | $9.022 \times 10^{-7}$ | $1.410 \times 10^{-3}$ | $1.144 \times 10^7$    | $1.741 \times 10^7$    | $6.182 \times 10^5$    |
| 9  | $9.201 \times 10^{-4}$  | $7.552 \times 10^{-4}$ | $7.480 \times 10^{-1}$ | $6.068 \times 10^9$    | $3.463 \times 10^4$    | 5.245                  |
| 10 | $2.933 \times 10^{-7}$  | $6.987 \times 10^1$    | $1.498 \times 10^{-5}$ | $7.953 \times 10^7$    | $2.080 \times 10^{-1}$ | $1.229 \times 10^2$    |
| 11 | $1.616 \times 10^{-4}$  | $4.951 \times 10^{-4}$ | $5.500 \times 10^{-1}$ | $4.519 \times 10^9$    | $2.045 \times 10^2$    | $9.124 \times 10^3$    |
| 12 | $5.485 \times 10^{-3}$  | $1.360 \times 10^{-4}$ | $4.330 \times 10^{-1}$ | $3.604 \times 10^9$    | $5.435 \times 10^3$    | $4.258 \times 10^5$    |
| 13 | 4.523                   | $3.405 \times 10^{-5}$ | $6.636 \times 10^{-4}$ | $5.499 \times 10^6$    | $4.882 \times 10^6$    | $3.824 \times 10^8$    |
| 14 | $8.667 \times 10^{-4}$  | $1.139 \times 10^{-4}$ | $3.620 \times 10^{-1}$ | $3.035 \times 10^9$    | $7.969 \times 10^2$    | $9.516 \times 10^4$    |
| 15 | $5.518 \times 10^{-4}$  | $3.247 \times 10^{-4}$ | $3.050 \times 10^{-1}$ | $2.579 \times 10^9$    | $5.114 \times 10^2$    | $9.604 \times 10^4$    |
| 16 | 9.376                   | $1.678 \times 10^{-4}$ | $1.617 \times 10^{-5}$ | $1.273 \times 10^5$    | $9.930 \times 10^6$    | $2.339 \times 10^9$    |
| 17 | $5.270 \times 10^{-5}$  | $8.269 \times 10^{-3}$ | $1.480 \times 10^{-1}$ | $1.249 \times 10^9$    | $7.479 \times 10^1$    | $1.808 \times 10^4$    |
| 18 | $7.157 \times 10^{-5}$  | $6.209 \times 10^{-2}$ | $1.010 \times 10^{-1}$ | $8.387 \times 10^8$    | $5.552 \times 10^1$    | $2.890 \times 10^4$    |
| 19 | $3.248 \times 10^{-4}$  | 5.313                  | $3.343 \times 10^{-3}$ | $5.916 \times 10^7$    | $3.566 \times 10^2$    | $1.274 \times 10^5$    |
| 20 | $5.560 \times 10^{-1}$  | $1.598 \times 10^{-5}$ | $5.453 \times 10^{-5}$ | $4.700 \times 10^5$    | $5.651 \times 10^5$    | $3.681 \times 10^8$    |
| 总计 | $2.727 \times 10^1$     | $7.526 \times 10^1$    | $8.410 \times 10^1$    | $2.117 \times 10^{11}$ | $4.632 \times 10^7$    | $3.178 \times 10^9$    |

### 3.3 模态分析结果

由于海洋波流频率很小,其频率大多数情况下  $\geq 2$  Hz,故只需分析固有频率在 2 Hz 内的振型,由表 7 可知,频率在 2 Hz 以内的阶次为 1~3 阶。从表

8 所示的参与系数可知,在 1~3 阶振型中,Z 方向的位移起主导作用,故 1~3 阶振型中,模型的主要变形为 Z 方向的位移,这从 1~3 阶振型图(图 12~14)也可看出,因此,若在 Z 方向上有一个接近 1~3 阶

频率中任意一个频率的激励,可以认为这个结构有发生共振破坏的可能。

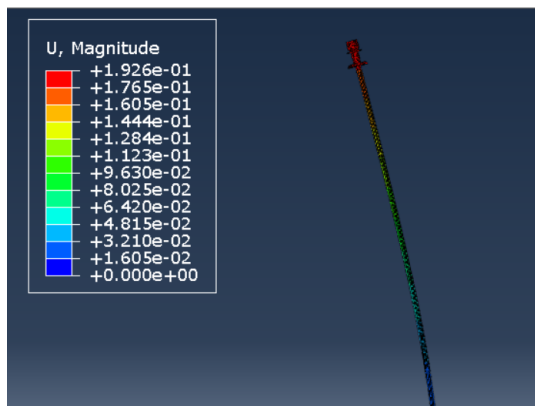


图 12 1阶振型

Fig.12 1-order mode diagram

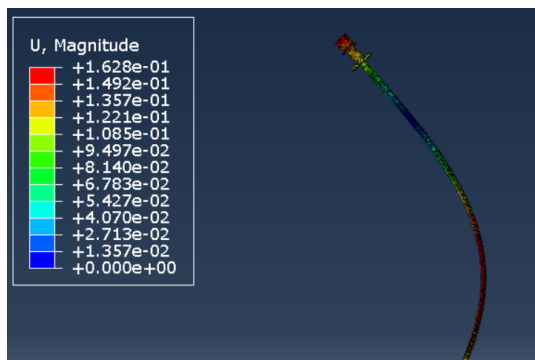


图 13 2阶振型

Fig.13 2-order mode diagram

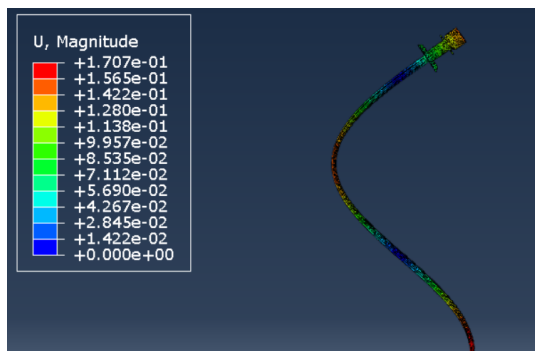


图 14 3阶振型

Fig.14 3-order mode diagram

#### 4 结论

(1)井口吸入模块受到海底波流力时最大应力和应变集中在底部筋板与圆柱连接处,分别为 7 MPa 和  $2.8 \times 10^{-5}$  mm,最大应力值及应变值都不

表 7 特征值输出

Table 7 Eigenvalues output

| 模态 | 阶次特征值   | 固有频率/Hz | 广义质量 | 复合模态阻尼 |
|----|---------|---------|------|--------|
| 1  | 0.28048 | 0.0842  | 1    | 0      |
| 2  | 12.559  | 0.56402 | 1    | 0      |
| 3  | 104.69  | 1.6284  | 1    | 0      |
| 4  | 415.57  | 3.2445  | 1    | 0      |
| 5  | 868.10  | 4.6893  | 1    | 0      |
| 6  | 1151.4  | 5.4005  | 1    | 0      |
| 7  | 2561.2  | 8.0545  | 1    | 0      |
| 8  | 4855.6  | 11.090  | 1    | 0      |
| 9  | 4888.6  | 11.128  | 1    | 0      |
| 10 | 5934.1  | 12.260  | 1    | 0      |
| 11 | 8372.8  | 14.563  | 1    | 0      |
| 12 | 13295   | 18.351  | 1    | 0      |
| 13 | 14795   | 19.359  | 1    | 0      |
| 14 | 20149   | 22.591  | 1    | 0      |
| 15 | 29577   | 27.371  | 1    | 0      |
| 16 | 35924   | 30.166  | 1    | 0      |
| 17 | 41822   | 32.548  | 1    | 0      |
| 18 | 42292   | 32.730  | 1    | 0      |
| 19 | 44068   | 33.410  | 1    | 0      |
| 20 | 52742   | 36.551  | 1    | 0      |

大,对井口吸入模块正常工作影响很小。井口吸入模块受到海底波流力时最大位移在最顶部,为 0.17 mm,相对于整体装置 $>90$  m 的长度,该位移对井口吸入模块正常工作影响不大。井口吸入模块连接部位的应力应变分别为 43310 Pa 和  $2.1 \times 10^{-7}$  mm,两者都很小,连接部位连接可靠。

(2)与海底波流力频率相接近的频率为 1~3 阶模态分析的频率,分别为 0.084、0.56 和 1.63 Hz,若实际情况下的内波流频率与 1~3 阶频率中任意一个频率很接近,可改变井口吸入模块的材料或者尺寸,从而改变井口吸入模块的固有频率,使固有频率与实际情况下的内波流频率相差较大,即可避免共振的发生。

(3)本文研究的无隔水管泥浆闭式循环钻井中井口偏移量为 0.17 mm,而相关文献<sup>[40]</sup>中分析正常深水钻井的井口偏移量最小为 9 mm,由此可体现出在井口装置的稳定性上,无隔水管泥浆闭式循环钻井相较于正常深水钻井具有明显优势。

表8 参与系数

Table 8 Participation factors

| 模态 | X分量                     | Y分量                     | Z分量                     | 绕X轴旋转                | 绕Y轴旋转                   | 绕Z轴旋转                   |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1  | $8.056 \times 10^{-7}$  | $-1.301 \times 10^{-4}$ | -7.388                  | $1.552 \times 10^5$  | 6.683                   | $-1.290 \times 10^{-2}$ |
| 2  | $3.385 \times 10^{-5}$  | $-4.891 \times 10^{-4}$ | 3.998                   | $-2.954 \times 10^5$ | $-5.830 \times 10^{-1}$ | $1.040 \times 10^{-1}$  |
| 3  | $-2.637 \times 10^{-4}$ | $7.756 \times 10^{-4}$  | 2.335                   | $-1.923 \times 10^5$ | $-9.670 \times 10^{-1}$ | $-2.170 \times 10^{-1}$ |
| 4  | $1.711 \times 10^{-3}$  | $-1.356 \times 10^{-3}$ | 1.655                   | $-1.423 \times 10^5$ | $6.190 \times 10^{-1}$  | 3.738                   |
| 5  | 3.578                   | $1.161 \times 10^{-4}$  | $-3.045 \times 10^{-3}$ | $2.665 \times 10^2$  | $-3.673 \times 10^3$    | $9.333 \times 10^3$     |
| 6  | $8.602 \times 10^{-3}$  | $2.568 \times 10^{-3}$  | 1.273                   | $-1.120 \times 10^5$ | -4.152                  | $2.614 \times 10^{-1}$  |
| 7  | $-4.455 \times 10^{-3}$ | $-5.490 \times 10^{-3}$ | 1.034                   | $-9.225 \times 10^4$ | 1.236                   | $-1.962 \times 10^1$    |
| 8  | $-3.870 \times 10^{-2}$ | $-9.498 \times 10^{-4}$ | $-3.756 \times 10^{-2}$ | $3.382 \times 10^3$  | $-4.172 \times 10^3$    | $-7.863 \times 10^2$    |
| 9  | $4.478 \times 10^{-3}$  | $2.748 \times 10^{-2}$  | $8.650 \times 10^{-1}$  | $-7.790 \times 10^4$ | $-1.861 \times 10^2$    | 2.290                   |
| 10 | $-5.416 \times 10^{-4}$ | -8.359                  | $3.870 \times 10^{-3}$  | $-8.918 \times 10^3$ | $4.560 \times 10^{-1}$  | $-1.108 \times 10^1$    |
| 11 | $-1.271 \times 10^{-2}$ | $2.225 \times 10^{-2}$  | $7.410 \times 10^{-1}$  | $-6.722 \times 10^4$ | $1.430 \times 10^1$     | $-9.552 \times 10^1$    |
| 12 | $7.406 \times 10^{-2}$  | $-1.166 \times 10^{-2}$ | $6.580 \times 10^{-1}$  | $-6.003 \times 10^4$ | $-7.372 \times 10^1$    | $6.526 \times 10^2$     |
| 13 | -2.127                  | $5.835 \times 10^{-3}$  | $2.576 \times 10^{-2}$  | $-2.345 \times 10^3$ | $2.210 \times 10^3$     | $-1.956 \times 10^4$    |
| 14 | $2.944 \times 10^{-2}$  | $1.067 \times 10^{-2}$  | $6.020 \times 10^{-1}$  | $-5.509 \times 10^4$ | $-2.823 \times 10^1$    | $3.085 \times 10^2$     |
| 15 | $-2.349 \times 10^{-2}$ | $-1.802 \times 10^{-2}$ | $5.530 \times 10^{-1}$  | $-5.079 \times 10^4$ | $2.262 \times 10^1$     | $-3.099 \times 10^2$    |
| 16 | -3.062                  | $-1.296 \times 10^{-2}$ | $-4.022 \times 10^{-3}$ | $3.568 \times 10^2$  | $3.151 \times 10^3$     | $-4.836 \times 10^4$    |
| 17 | $7.260 \times 10^{-3}$  | $-9.093 \times 10^{-2}$ | $-3.850 \times 10^{-1}$ | $3.534 \times 10^4$  | -8.648                  | $1.345 \times 10^2$     |
| 18 | $8.460 \times 10^{-3}$  | $-2.49 \times 10^{-1}$  | $-3.170 \times 10^{-1}$ | $2.896 \times 10^4$  | -7.451                  | $1.700 \times 10^2$     |
| 19 | $1.802 \times 10^{-2}$  | -2.305                  | $5.782 \times 10^{-2}$  | $-7.692 \times 10^3$ | $-1.888 \times 10^1$    | $3.569 \times 10^2$     |
| 20 | $7.460 \times 10^{-1}$  | $3.998 \times 10^{-3}$  | $-7.384 \times 10^{-3}$ | $6.856 \times 10^2$  | $-7.517 \times 10^2$    | $1.919 \times 10^4$     |

## 参考文献(References):

- [1] 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 71-79.  
WANG Pinxian. Developing deep-sea science and technology: Perspectives and pitfalls [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 71-79.
- [2] 钟广法, 张迪, 赵奋啸. 大洋钻探天然气水合物储层测井评价研究进展[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 25-44.  
ZHONG Guangfa, ZHANG Di, ZHAO Luanxiao. Current states of well-logging evaluation of deep-sea gas hydrate-bearing sediments by international scientific ocean drilling (DSDP/ODP/IODP) programs[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 25-44.
- [3] 拓守廷, 王文涛. 国际大洋钻探 2050 科学框架及其对未来大洋钻探发展的启示[J]. 地球科学进展, 2022, 37(10): 1049-1053.  
TUO Shouting, WANG Wentao. International scientific ocean drilling 2050 science framework and its implications for future scientific ocean drilling development [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(10): 1049-1053.
- [4] 朱芝同, 刘晓林, 田烈余, 等. 大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 8-15.  
ZHU Zhitong, LIU Xiaolin, TIAN Lieyu, et al. Development and application of the reentry drilling technology and system in ocean drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 8-15.
- [5] 王诗竣, 宋刚, 王瑜, 等. 中国主导的 IODP 航次取心所遇问题分析及探讨[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 10-17.  
WANG Shijun, SONG Gang, WANG Yu, et al. Analysis and discussion of the coring problem for China-led IODP voyages [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 10-17.
- [6] 刘协鲁, 陈云龙, 阮海龙, 等. 海底硬岩钻探的现状与前景分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 72-78.  
LIU Xielu, CHEN Yunlong, RUAN Hailong, et al. Status and prospect of subsea hard rock drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 72-78.
- [7] 陈国明, 殷志明, 许亮斌, 等. 深水双梯度钻井技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2007, (2): 246-251.  
CHEN Guoming, YIN Zhiming, XU Liangbin, et al. Review of deepwater dual gradient drilling technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, (2): 246-251.
- [8] 殷志明. 新型深水双梯度钻井系统原理、方法及应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.  
YIN Zhiming. New dual-gradient deepwater drilling systems: Principle, method and application [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [9] Smith K L, Gault A D, Witt D E, et al. Subsea mudlift drilling joint industry project: Delivering dual gradient drilling technology

- gy to industry[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: SPE, 2001:1-13.
- [10] Schumacher J P, Dowell J D, Ribbeck L R, et al. Subsea mudlift drilling planning and preparation for the first subsea field test of a full-scale dual gradient drilling system at green canyon 136, Gulf of Mexico[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: SPE, 2001:1-11.
- [11] Eggemeyer J C, Akins M E, Brainard R R, et al. Subsea mudlift drilling: Design and implementation of a dual gradient drilling system[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: SPE, 2001:1-14.
- [12] 徐群,陈国明,王国栋,等.无隔水管海洋钻井技术[J].钻采工艺,2011,34(1):11-13.  
XU Qun, CHEN Guoming, WANG Guodong, et al. Riserless marine drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2011,34(1):11-13.
- [13] 高本金,陈国明,殷志明等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.  
GAO Benjin, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Deepwater riserless mud recovery drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009,31(2):44-47.
- [14] 王偲,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].钻探工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.  
WANG Cai, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Adaptability of RMR for marine gas hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):17-23.
- [15] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.  
CHEN Haowen, YU Yanjiang, WANG Yanli, et al. Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep-sea riserless mud recovery drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):9-15.
- [16] Hinton A J, Nolan T, Tilley V, et al. Taming the grebe sand-tophole drilling success in the Ichthys field[C]. Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition. Jakarta, Indonesia: SPE, 2009:1-6.
- [17] Greg Myers. Ultra-deepwater riserless mud circulation with dual gradient drilling[J]. Scientific Drilling, 2008,6(6):48-51.
- [18] 张云腾.水合物SMD钻井系统海底泵模块设计与配置研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.  
ZHANG Yunteng. Design and equipment configuration research on subsea pump module of SMD for marine gas hydrate exploration [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [19] Brown J D, Urvant V V, Thorogood J L, et al. Deployment of a riserless mud recovery system in offshore Sakhalin Island [C]//SPE/IADC 105212, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 2007:20-22.
- [20] Rezk R. Safe and clean marine drilling with implementation of riserless mud recovery technology-RMR[C]//SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia: SPE, 2013:1-7.
- [21] Peyton J, McPhee A, Eikemo B, et al. World first: Drilling with casing and riserless mud recovery [C]//International Petroleum Technology Conference. 2013.
- [22] Smith D, Winters W, Tarr B, et al. Deepwater riserless mud return system for dual gradient tophole drilling [C]//SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. Kuala Lumpur, Malaysia: SPE/IADC, 2010:1-22.
- [23] Cohen J H, Kleppe J, Grønås T, et al. Gulf of Mexico's first application of riserless mud recovery for top-hole drilling: A case study [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA: OTC, 2010:1-13.
- [24] Scanlon T. Environmentally-improved method of drilling top-hole sections offshore brasil using dual-gradient drilling techniques for the first time in Brasil[C]//OTC Brasil. Rio de Janeiro, Brazil: OTC, 2011:1-18.
- [25] Claudey E, Fossli B, Elahifar B, et al. Experience using managed pressure cementing techniques with riserless mud recovery and controlled mud level in the barents sea[C]//SPE Norway One Day Seminar. Bergen, Norway: SPE, 2018:1-18.
- [26] 刘杰.无隔水管泥浆返回钻井系统水力学计算及吸入模块设计[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.  
LIU Jie. Hydraulics Calculation and suction module design for riserless mud recovery drilling system [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [27] 徐群.海底泥浆举升钻井系统吸入模块样机研究与开发[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.  
XU Qun. Prototype research and development of the subsea mud suction module[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [28] 刘玉亮.海底泥浆举升钻井吸入模块耐久性研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013.  
LIU Yuliang. Study on durability of the suction module for subsea mudlift drilling system [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [29] 王志伟.大洋勘探船无隔水管泥浆闭式循环钻井系统设计研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.  
WANG Zhiwei. Design and Study on the riserless mud recovery drilling system for the ocean exploration ship [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [30] 秦如雷,冯起赠,陈浩文,等.内波流对井口吸入模块稳定性的影响研究[J].石油机械,2023,51(6):43-49.  
QIN Rulei, FENG Qizeng, CHEN Haowen, et al. Influences of internal wave current on stability of wellhead suction module

- [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(6):43-49.
- [31] 王荣耀, 陈国明, 刘伟, 等. 内波环境下中间仓单体收放过程中的管柱力学分析[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10):2836-2847.
- WANG Rongyao, CHEN Guoming, LIU Wei, et al. Mechanical analysis of buffer retrieve/deployment operations considering internal solitary waves[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10):2836-2847.
- [32] 王杰. 海洋无隔水管钻井钻柱动力学分析[D]. 荆州: 长江大学, 2017.
- WANG Jie. Analysis on the dynamic of drill string of offshore Riserless Drilling [D]. Jingzhou: School of Mechanical Engineering Yangtze University, 2017.
- [33] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- ZHU Yanrong. Wave Mechanics for Ocean Engineering [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.
- [34] 戴澍, 解德. 基于ABAQUS的小尺度桩柱波浪力计算方法[J]. 固体力学学报, 2011, 32(S1):288-295.
- DAI Shu, XIE De. An approach for computation of wave load on small dimension pile foundation based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(S1):288-295.
- [35] 马良. 对莫里森方程中曳力系数  $C_D$  浅析[J]. 中国海洋平台, 1998, 13(3):16-18.
- MA Liang. Analysis of drag coefficient  $C_D$  in Morison equation [J]. China Offshore Platform, 1998, 13(3):16-18.
- [36] 畅元江, 马海艇, 王仕超, 等. 一种适用于水下井口力学分析的新型砂土  $p$ - $y$  模型[J]. 天然气工业, 2022, 42(11):88-97.
- CHANG Yuanjiang, MA Haiting, WANG Shichao, et al. A new sand  $p$ - $y$  model for underwater wellhead mechanical analysis[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11):88-97.
- [37] 苏静波, 邵国建, 刘宁. 基于  $P$ - $Y$  曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2006(10):1781-1785.
- SU Jingbo, SHAO Guojian, LIU Ning. Nonlinear finite element analysis of piles under lateral load based on  $P$ - $Y$  curves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(10):1781-1785.
- [38] 胡胜刚. 基于  $P$ - $Y$  曲线模型的桩基非线性性状分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- HU Shenggang. Study on the non-linear properties of pile based on  $P$ - $Y$  curve model[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [39] Qin Rulei, Xu Benchong, Chen Haowen, et al. Qualitative and quantitative analysis of the stability of conductors in riserless mud recovery system[J]. Energies, 2022(15):7657.
- [40] 关德, 闫伟. 深水钻井水下井口稳定性分析[J]. 石油机械, 2012, 40(8):85-89.
- GUAN De, YAN Wei. Stability analysis of underwater wellhead in deepwater drilling [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(8):85-89.

(编辑 王文)