

# 深水吸力桩结构强度设计及海上安装实践

刘统亮<sup>1\*</sup>, 刘新宇<sup>1</sup>, 刘康<sup>1</sup>, 武永锋<sup>1</sup>, 尹丰<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570300;

2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:**吸力桩不仅可为深水油气建井提供足够的承载力,其作为水下结构物基础在水下生产系统中应用也愈发广泛。由于吸力桩结构跨度大、作业环境及安装工况恶劣,海上安装作业结构稳定性面临挑战。以应用于南海某气田、直径8 m、总高19.68 m的大型吸力桩为研究对象,构建1:1有限元模型,基于南海某气田作业环境,对吸力桩海上施工时拖航、吊装和安装三个工况下的典型安装过程进行研究,通过载荷计算分析得到各工况条件下的最恶劣情况。算例分析表明:拖航工况最大应力出现在横向负加速度+垂直向正加速度+纵向负加速度组合风载情形下,且高应力集中在吸力桩与驳船的固定处;吊装工况考虑吸力桩上的滞留水进行空气中和水下提升分析,高应力均出现在吊点焊接处,为现场作业重点关注区域;安装工况对吸力桩安装就位和管汇安装过程中的倾斜情况进行核算,均满足标准要求。结合以上计算和海上安装实践表明,吸力桩整体海上施工过程安全可靠,安装精度较高。相关研究成果可为深水吸力桩优化设计及海上安装提供参考。

**关键词:**船舶工程; 安装实践; 载荷计算; 吸力桩; 结构强度

中图分类号:U6-9

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.014

## Structural strength calculation and offshore installation practice of deep-water suction pile

Liu Tongliang<sup>1\*</sup>, Liu Xinyu<sup>1</sup>, Liu Kang<sup>1</sup>, Wu Yongfeng<sup>1</sup>, Yin Feng<sup>2</sup>

(1. CNOOC China Limited, Hainan Branch, Haikou 570300, China;

2. CNOOC Research Institute Ltd, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Suction pile can not only provide sufficient bearing capacity for deepwater oil and gas well construction, but also be used more and more widely in subsea production systems as the foundation of subsea structure. The stability of suction pile structure in offshore installation faces challenges due to its large span and harsh working environment and installation conditions. Taking a large suction pile with a diameter of 8 m and a total height of 19.68 m applied to a gas field in the South China Sea as the research object, a 1:1 finite element model was constructed. Based on the operating environment of the gas field in the South China Sea, the typical installation process of suction pile under transporting, lifting and installation during offshore construction is studied, and the worst conditions under each working condition are obtained through load calculation and analysis. The results show that the maximum stress under the transportation condition is negative transverse acceleration + vertical acceleration + Y negative wind load, and the high stress is concentrated at the fixed place between the suction pile and barge. In the lifting condition, the trapped water on the suction pile is considered for air and underwater lifting analysis. The high stress occurs at the welding point of the lifting point, which is the focus area of the field operation. The calculation of suction pile installation and inclination of manifold installation under the installation condition meets the standard requirements. Based on the above calculation, combined with the offshore

收稿日期:2025-03-18

**基金项目:**工业和信息化部高技术船舶与科研项目“深水半潜式生产储卸油平台工程开发”(MC-202030-H04);国家发展和改革委员会项目“陵水半潜式生产平台研究专项”(LSZX-2020-HN-05);国家发展和改革委员会科技攻关项目(CCL2020HNFN0183)资助

**作者简介:**刘统亮(1997—),男,工程师,研究方向为力学研究和海洋石油天然气开发技术。\*通信作者:liutl6@cnooc.com.cn

**引用格式:**刘统亮,刘新宇,刘康,等.深水吸力桩结构强度设计及海上安装实践[J].中国航海,2026,49(2):119-126.

Liu T L, Liu X Y, Liu K, et al. Structural strength calculation and offshore installation practice of deep-water suction pile[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 119-126. (in Chinese)

installation practice, the whole offshore construction process of suction pile is safe and reliable, and the final installation precision is very high. The relevant research results can provide reference for the optimal design and offshore installation of deep-water suction piles.

**Key words:** naval architecture; installation practice; load calculation ;suction pile; structural strength

水下生产系统是高效开发深水、边际油气田的一柄“利器”，此套系统由水下设备和水面控制设施组成，按功能可分为水下采油树、水下管汇、控制系统、脐带缆和连接系统<sup>[1-2]</sup>。在深海环境中，吸力桩（也称吸力锚）除了在水下采油树建井方面研究逐渐深入，也作为水下结构物的基础形式被广泛应用于水下管汇、管道终端和水下脐带缆分配单元中，被喻为深水油气田水下生产系统在海上安家的“定海神针”<sup>[3]</sup>。

目前，国内外众多学者对吸力桩开展了相关技术研究，Aizhan 等<sup>[4]</sup>针对土壤非饱和条件下吸力桩的承载特性进行研究。Hendriyawan 等<sup>[5]</sup>基于印度尼西亚 Java 项目海底土壤参数条件，分析了不同建模方式对吸力桩轴向承载能力的影响。黄凯文等<sup>[6]</sup>针对钻井船安装水下基盘出现的一系列问题，提出了运用吸力桩技术安装水下基盘，安装精度满足作业要求。柳晓科等<sup>[7]</sup>针对吸力桩承载能力开展相关研究，提出了一种新型底裙式吸力桩模型，并结合试验推导相关的沉贯阻力公式。刘书杰等<sup>[8]</sup>针对深水建井过程分析，开展吸力桩安装过程井口稳定性研究，为深水吸力桩建井结构优化计算提供参考。徐东升等<sup>[9]</sup>针对吸力桩高承载力、施工工序简单等特点，分析了吸力桩在不同性质土体中实时承载力的变化规律，同时开展了吸力桩安装到位后实时承载力及横向弯矩对吸力桩稳定性的影响研究。杨进等<sup>[10]</sup>通过对吸力桩建井工艺流程的介绍，结合南海深水井场参数，对吸力桩和井筒的设计方法进行了计算。马宝金等<sup>[11]</sup>对吸力桩基础方案进行比选，并介绍了吸力桩基础设计与建造安装关键技术。毛志豪等<sup>[12]</sup>对南海流花项目吸力桩海上安装所需主要设备和施工流程进行系统介绍，但未展开深入研究。张西伟等<sup>[13]</sup>以两腿吊装式吸力桩为研究对象，建模分析吸力桩吊装工况下的强度要求。综上所述，现有研究成果基本覆盖了吸力桩建井方面和结构强度及安装方面，但尚未有研究深入进行全安装周期的深水吸力桩结构强度计算及海上安装实践分析。本文以南海某深水气田水下管汇所使用的吸力桩为研究对象，介绍其结构特点及参数，对其深海安装过程中典型的三种工况进行理论计算和载荷分析，利用有限元软件完成吸力桩海上施工安装

全过程的模拟和结构强度分析，成功指导现场作业，安装精度完全满足作业要求。相关研究成果可为深海油气田水下基础选型计算和海上安装提供参考。

## 1 吸力桩概况及结构参数

吸力桩作为深水油气开发生产的一种重要基础形式，因其结构简单，海上施工方便，已逐渐成为水下生产系统结构物基础的主流。其顶部封闭、下端开口的钢筒结构，可利用对桩体内部抽水形成负压的原理，使桩体在水压的作用下贯入土壤，无需大型打桩锤，即可牢牢固定在深海海泥中<sup>[14]</sup>。同时，吸力桩适用于多种土质，尤其适合深水软性土质<sup>[15]</sup>。

本文所研究的吸力桩是我国南海某深水气田开发中管汇安装的基础，设计水深 1 000 m，水下管汇重约 130 余吨，安装海域土壤较软，对吸力桩承载能力要求高。吸力桩由上部顶盖和下部裙桩两部分组成，如图 1 所示，在吸力桩上部顶盖结构上分布有沿中心点对称的 2 个舱口盖和 4 个吊点、方便水下管汇就位的一高一低 2 根导向柱、测量安装精度的牛眼（Bullseye）以及若干用于防腐的阳极块。吸力桩整体结构采用碳钢，在空气中总重约 103 t，剪切模量为 80 GPa，杨氏模量为 200 GPa，泊松比为 0.25，密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>，下部裙桩外径 8 m，高 13 m，吸力桩结构参数如表 1 所示。

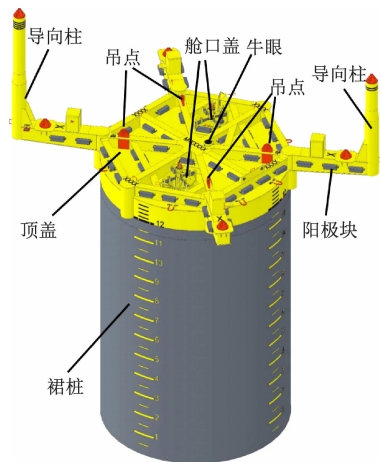


图 1 吸力桩结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of suction pile structure

## 2 计算工况及载荷选取

吸力桩在进行海上施工时，一般由驳船装运，然

表1 吸力桩结构参数  
Tab.1 Structural parameters of suction pile

结构参数	总高度/m	外径/m	导向柱高度/m	空气中质量/t	水中质量/t
数值	19.68	8	6.65/5.15	102.9	88.5

后运至指定海域,此过程称为拖航工况。到达指定海域后,由配有有动力定位(Dynamic Positioning, DP)和吊机的安装船进行起吊和下放作业,此过程为吊装工况<sup>[16]</sup>。在吸力桩下放至海底泥面后,通过安装于顶部舱口盖的吸力泵,使桩体内外出现压差,达到指定深度,后续水下管汇将坐落在此吸力桩上,完成安装,此为本文定义的安装工况。

## 2.1 拖航工况

对拖航过程中的吸力桩进行屈曲分析,引入基于线性屈曲模式的几何缺陷来识别最容易屈曲的位置,主要分为三步:静力结构分析+线性屈曲来确定屈曲模态,将基于线性屈曲分析的缺陷应用于非线性有限元模型和静力,非线性分析与材料和几何非线性(包括缺陷),以检查是否屈曲发生在给定的载荷。

采用静力结构线性求解器进行数值分析,在应用条件下采用线性材料模型进行线性屈曲分析。分析结果表明,当吸力桩在甲板上时,最可能发生屈曲(海上紧固未焊接)。对屈曲模态进行验证时,提取结构的局部屈曲模态进行分析,应用条件下的屈曲模态,形状与外加载荷一致,屈曲发生在吸力桩底部的不平整度支撑整体载荷处,即最大弯矩发生处,这种屈曲模态在非线性分析中用于施加几何缺陷。

根据 DNV-ST-N001 规范以及吸力桩在驳船上的极限位置情况下计算得到船舶运动时产生的特征加速度<sup>[17]</sup>,如表2所示。

表2 拖航工况下特征加速度

Tab.2 Characteristic acceleration under transporting conditions

	纵向/ (m/s <sup>2</sup> )	横向/ (m/s <sup>2</sup> )	垂直/ (m/s <sup>2</sup> )
正向横摇 & 正向垂荡	0	-0.658	0.303
正向横摇 & 负向垂荡	0	-0.521	-0.073
负向横摇 & 正向垂荡	0	0.658	-0.048
负向横摇 & 负向垂荡	0	0.521	-0.424
正向纵摇 & 正向垂荡	0.414	0	0.7
正向纵摇 & 负向垂荡	0.328	0	0.31
负向纵摇 & 正向垂荡	-0.414	0	-0.357
负向纵摇 & 负向垂荡	-0.328	0	-0.747

根据 API RP 2A 中拖航过程中对风速的定义,结合实际海洋环境以及该气田的开发工况,设计风速(取“1分钟平均风速,回归周期为10年”)为42.4 m/s。同时根据吸力桩X和Y方向的可视投影面积计算风载大小<sup>[18]</sup>,计算公式如下:

$$F = (\rho/2)\mu^2 C_s A \quad (1)$$

式中, $F$ 为总特征风力,kN; $\rho$ 为特定空气密度,为1.22 kN/m<sup>3</sup>; $\mu$ 为风速,为42.4 m/s; $C_s$ 为受风构件形状系数,对于裙桩和导向柱这类圆柱形,取值为0.5,对于上部顶盖的梁结构,取值为1.5; $A$ 为投影面积,m<sup>2</sup>。

将各数值代入式(1)计算得到总特征风力X方向为111 kN,Y方向为117 kN。最终,基于上述计算将风载、特征加速度及不平整度支撑整体载荷施加到吸力桩上,进行拖航工况分析。

## 2.2 吊装工况

考虑吊装工况几个情形中的最恶劣工况,即吸力桩水下回收过程中的水下吊装和空气中吊装,根据吸力桩设计要求,其定义的能够承受的载荷最大动态放大系数计算公式如下:

$$f_{DA} = \frac{F_{\text{静态}} + F_{\text{动态}}}{F_{\text{静态}}} \quad (2)$$

水下吊装时,水动力载荷由吸力桩湿重的动态放大系数2.3来建模,同时根据减少重力加速度来模拟相应的浮力大小,水密度为1 025 kg/m<sup>3</sup>,碳钢密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>;空气中吊装时,假设滞留水(trapper water)布满所有的封闭区域,吸力桩和自重的动态放大系数为1.25,其中,滞留水产生的力计算公式如下:

$$F_l = A_s \cdot W \cdot Q \cdot \rho_w \cdot g \quad (3)$$

式中, $F_l$ 为滞留水所产生的力,kN; $A_s$ 为结构物垂直方向的投影面积,m<sup>2</sup>; $W$ 为宽度,m; $Q$ 为结构物的数量; $\rho_w$ 为水的密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

将吸力桩上部结构各部件参数代入式(3)中计算得到相应的滞留水所产生的力,顶部滞留水所产生的力计算得知为237.9 kN,动态放大系数1.25,最终施加在顶部的力为297.4 kN。

## 2.3 安装工况

在水下管汇安装过程的就位阶段,由于此时管汇是倾斜在吸力桩导向柱上,大部分阻尼力通过一

个软着陆气缸传递,与之后的4个软着陆缸同时工作的平面阻尼相比,这会产生更大的载荷。因此,此工况为最恶劣工况,本文只考虑倾斜情况<sup>[19]</sup>。

以就位阶段的倾斜情况为例,其垂直和水平方向的力计算过程如下:

$$F_v = \max(F_{va}, F_{vb}, F_{vs}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{va} = 1.1F_{\text{静态}} + 1.0F_{\text{动态}} \\ F_{vb} = 1.1F_{\text{静态}} + 1.1F_{\text{动态}} \\ F_{vs} = 1.0F_{\text{静态}} + 1.0F_{\text{动态}} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{\text{静态}} = w_g \cdot \gamma_{\text{静态}} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\text{cog}} \quad (6)$$

$$F_{\text{动态}} = (M_{\text{land}} \cdot \gamma_{\text{cog}} + A_{p.z}) \cdot a_{\text{max}} \cdot \gamma_{\text{ce}} \quad (7)$$

式中,  $w_g$  为水下管汇在水中的总重, kN;  $\gamma_{\text{静态}}$  为该工况下静态载荷传递的百分比, 为 50%;  $\gamma_s$  为该静态载荷分布系数, 为 0.5;  $\gamma_{\text{cog}}$  为重心转换系数, 为 1.1;  $M_{\text{land}}$  为安装工况下的总重, kg;  $A_{p.z}$  为垂直方向增加的水质量, kg;  $a_{\text{max}}$  为气缸最大允许的减速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $\gamma_{\text{ce}}$  为该工况下载荷传递百分比, 为 49%

$$F_h = \max(F_{ha}, F_{hb}, F_{hs}) \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{ha} = F_{va} \cdot \sin(\gamma_t + \gamma_f) \\ F_{hb} = F_{vb} \cdot \sin(\gamma_t + \gamma_f) \\ F_{hs} = F_{vs} \cdot \sin(\gamma_t + \gamma_f) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\gamma_t$  为着陆过程中倾斜的角度,  $^\circ$ ;  $\gamma_f$  为吸力桩水平倾斜的角度,  $^\circ$ 。

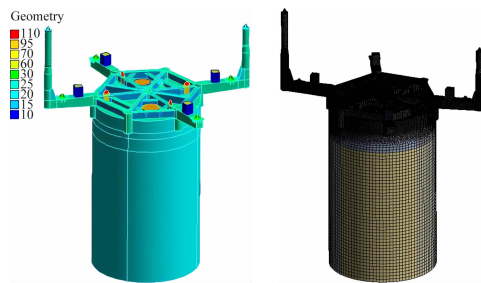
将各参数最终代入式(4)和式(8)进行计算, 得知垂直方向的力  $F_v = 873.6$  kN, 水平方向的力  $F_h = 60.9$  kN。

采用上述方法对最终管汇坐落在吸力桩上的倾斜工况进行载荷计算, 可得垂直方向的力 584.5 kN 和水平方向的力为 40.8 kN, 载荷作用大小同样验证了就位过程中倾斜工况为最大载荷工况。

### 3 有限元模型建立

#### 3.1 有限元及网格模型

基于上述结构和材料参数, 采用 ANSYS 对南海某气田实际使用的吸力桩进行仿真建模, 整体采用 shell 单元。对上部顶盖和下部裙桩分别进行 10 mm、40 mm、70 mm、100 mm 和 200 mm、250 mm、300 mm 的网格无关性验证, 可知上部顶盖和下部裙桩分别在 70 mm 和 250 mm 以下计算结果收敛, 为保证计算效率和精度, 最终选取上部顶盖结构网格尺寸为 40 ~ 70 mm, 下部裙桩网格尺寸为 250 mm, 有限元模型中单元厚度分布如图 2(a) 所示, 对关键连接处进行网格加密处理, 有限元及网格划分模型, 如图 2(b) 所示。



(a) 有限元模型

(b) 网格模型

图2 南海某气田吸力桩有限元及网格模型

Fig. 2 Finite element and mesh models of the suction pile in a gas field in the South China Sea

#### 3.2 拖航工况

海上施工作业时, 使用驳船装载吸力桩, 驶往目标海域进行安装。在拖航过程中, 吸力桩会受到船舶运动产生的加速度影响, 尤其需要验证吸力桩在船舶甲板上承受高压压缩载荷有限支撑的结构强度。为了海上运输加固, 在甲板和吸力桩的外表面建模 8 个三角形侧支架模拟吸力桩固定, 驳船甲板视为矩形板, 以模拟载荷传递。可通过几何非线性静力学分析进而开展屈曲分析评估吸力桩的稳定性, 对此工况下的吸力桩及其在驳船上固定处进行有限元建模如图 3 所示。

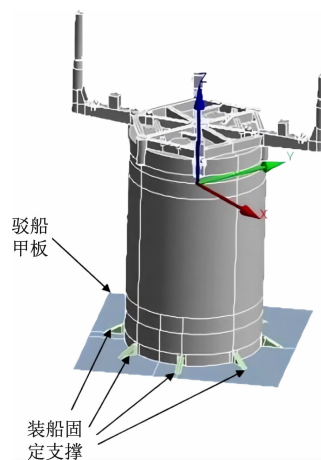


图3 拖航工况下吸力桩有限元模型

Fig. 3 Finite element model of suction pile under transporting condition

拖航分析中, 吸力桩与驳船甲板无摩擦接触, 为避免数值失稳, 摩擦系数设为 0.01, 可忽略不计。此外, 接触边缘被分成 4 部分, 其中 3 个固定在甲板上。根据拖航过程的裙座屈曲能力计算得到甲板不均匀支撑为 10 mm, 在有限元边界条件设置时通过应用 10 毫米垂直位移到 1/4 甲板, 迫使边缘向上。

#### 3.3 吊装工况

吸力桩吊装工况, 主要是建造过程空气中的吊装、海上施工时空气中的吊装、初始安装时通过飞溅

区(空气+水)时的吊装以及水下回收过程中的吊装。由于水下回收过程中吸力桩内部存在滞留水,同时动态放大系数此时最大,因此为上述几个情形中的最恶劣工况。在回收过程中需同时考虑空气吊装和水中吊装,在这两种情况下,吸力桩都是通过连接到一个钩子上的四个吊索来吊起的,该提升装置由与水平方向至少 60 度夹角的吊索具组成。

有限元建模时需考虑吊装作业中的动态放大系数、倾斜载荷效应和后果系数等特殊因素,参考水下生产系统-结构设计基础取值,仿真模型如图 4 所示,吊索具由 spring 单元建模,第一条对角线上的两条 spring 单元和第二条对角线上的两条 spring 单元刚度分别保持一致,同时需设置第一条对角线上的两条 spring 单元刚度大于第二条对角线上的两条 spring 单元刚度以实现 1.25 的倾斜载荷。

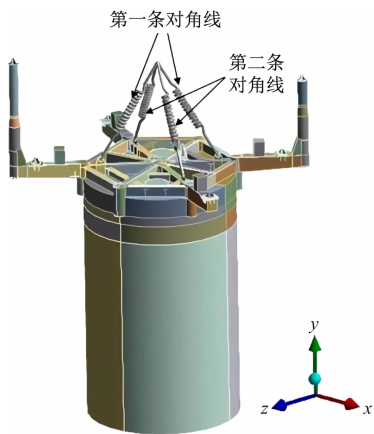


图 4 吊装工况下吸力桩有限元模型

Fig. 4 Finite element modeling of suction pile under lifting condition

吊装过程中吸力桩除了吊索具的 spring 单元设置为 Body-Ground 外,为了防止刚体运动,施加等于零的附加位移使模型稳定。

### 3.4 安装工况

为准确分析吸力桩海上安装的全过程,对水下安装工况下的吸力桩进行建模分析,与上述 2 种工况相比,其有限元模型除没有底甲板、三角形侧支架和吊索具外,其余都相同。水下安装工况分为吸力桩安装就位和管汇安装就位 2 个过程,在水下管汇安装就位过程中,又分为粗对中、就位和着陆三个阶段,建模得到几何体,如图 5 所示。

为准确模拟吸力桩安装就位所受的力以及顶部结构和下部裙桩的界面,在裙桩上部 2 m 处施加压力,根据地质调查分析,吸力桩贯入 13 m 深时最大安装压力为 73.7 kPa,此时吸力桩的水下质量等效在垂直向下的重力加速度上。在水下管汇安装就位

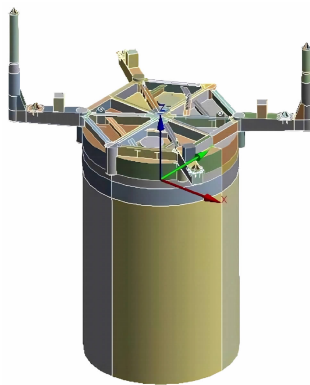


图 5 安装工况下吸力桩有限元模型

Fig. 5 Finite element modeling of suction pile under installation condition

过程中,重力加速度与裙桩的边界条件和吸力桩安装就位的边界条件一致,不同的是粗对中、就位和着陆三个阶段在吸力桩上所施加的载荷大小。根据水下安装程序,管汇先导入到吸力桩上较长的导向柱,然后操作水下机器人将另外一端与较短的导向柱进行对中,以达到粗对中的目的。随后水下管汇缓慢下降,此时较长的导向柱一侧会产生倾斜载荷,处于就位阶段。最后完全坐落在吸力桩基础上,上部结构均匀受力,完成着陆。

## 4 结构强度分析及海上安装实践

### 4.1 拖航工况

拖航工况下整体有限元分析表明,所有载荷工况都满足设计标准。最大等效应力出现的工况为横向负加速度+垂直向正加速度+纵向负加速度同向风载,为 145 MPa,小于许用应力 207 MPa,局部高应力出现在由锚固支座处,是由于产生的接触和刚度阶跃变化引起的,有限元仿真云图,如图 6(a)所示。当模型在外加荷载作用下收敛时,不会发生结构屈曲。

基于上述分析,为避免吸力桩锚固支座处产生的高应力,结合实际的驳船运输情况,将 H 型钢框架底座作为支撑,同时采取 8 处马板限位,在海上吊装无需切割,敲击掉木头楔子后直接起吊,节省作业时间,拖航工况下的吸力桩,如图 6(b)所示。根据环境参数,目标海域全年以 NE、ENE 向风、浪为主,海上施工作业时  $H_s < 1.0$  m,驳船装载吸力桩顺利到达目标海域。

### 4.2 吊装工况

吊装工况下空气和水中提升过程有限元计算结果分别如图 7(a)和图 7(b)所示,吸力桩整体应力较低,最大等效应力分别为 87 MPa 和 136 MPa,均

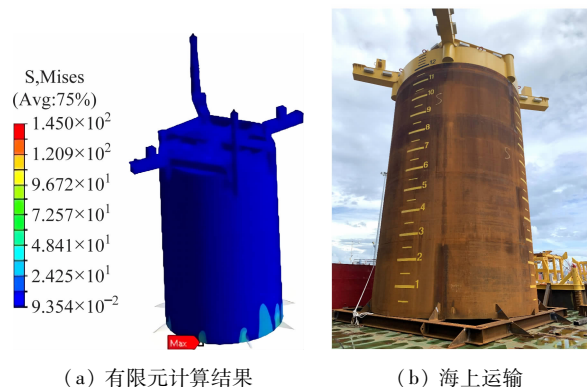


图6 拖航工况下吸力桩有限元计算结果及海上运输

Fig. 6 Finite element calculation results and offshore installation of suction pile under transporting conditions

低于许用应力 207 MPa, 满足相应的标准要求。高应力热点集中出现在吊耳的焊接区域, 为实际作业时重点关注区域, 也是后续设计需重点加强处, 因此焊缝采用全焊透工艺。

当驳船在目标海域靠泊安装船进行吊装作业时, 基于上述计算分析, 通过高空无人挂钩起吊吸力桩, 如图 7 所示。吸力桩最大静态载荷计算为 119.5 t, 最大动态载荷为 195.7 t; 作业船吊机能力静态载荷为 200 t, 动态载荷为 230 t, 起吊时实测质量为 101 t, 通过飞溅区时下放速度为 0.2 m/s, 此时实测质量为 77 t, 均满足作业要求, 海上作业安全可靠。

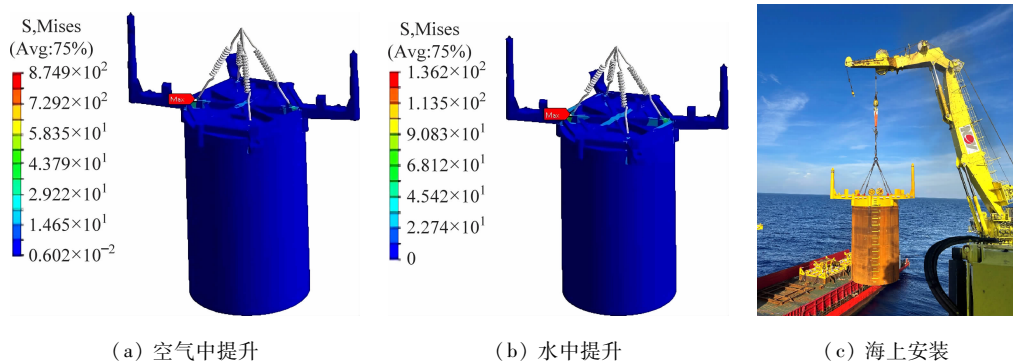


图7 吊装工况下吸力桩有限元计算结果及海上安装

Fig. 7 Finite element calculation results and offshore installation of suction pile under lifting conditions

### 4.3 安装工况

安装工况下吸力桩安装就位和管汇安装过程中倾斜最恶劣工况有限元计算结果如图 8(a) 和图 8(b) 所示, 所有载荷工况满足设计标准, 最大等效应力分别为 204 MPa 和 105 MPa, 均低于许用应力 207 MPa。

海上安装过程中, 当吸力桩下放通过飞溅区后, 持续以 0.5 m/s 的速度下放至海平面以下 880 m

处, 之后在距海底泥面 30 m 处减缓下放速度至 0.1 m/s, 调整吸力桩艏向为目标艏向, 准备就位。在吸力桩到达泥面时其自重贯穿至泥面以下 6.9 m, 通过吸力泵的内外压差, 使其持续贯入, 结合水下 ROV 观测泥线沉降均匀和艏向不偏离, 最终完成吸力桩的下放安装就位, 如图 8(c) 所示, 吸力桩安装参数如表 3 所示, 安装精度均在设计要求内。

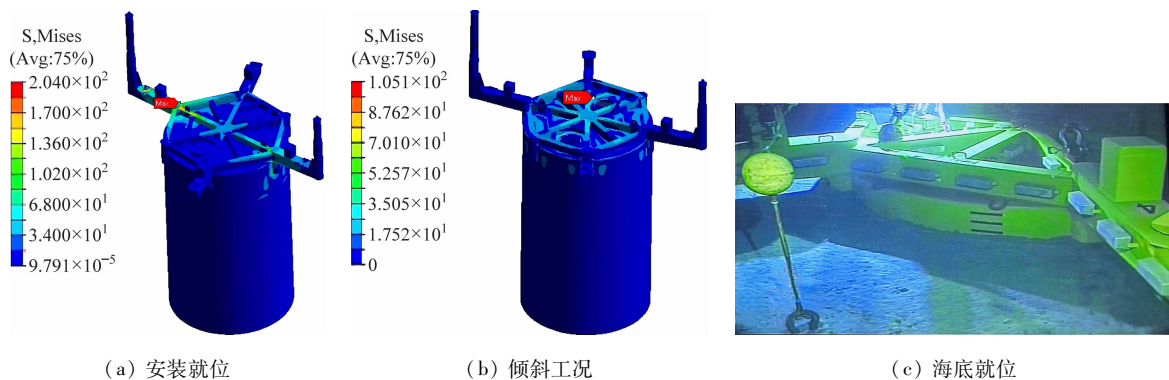


图8 安装工况下吸力桩有限元计算结果及海底就位

Fig. 8 Finite element calculation results and offshore installation of suction pile under installation conditions

表3 吸力桩安装精度

Tab.3 Installation accuracy of suction pile

	位置精度/ m	船向精度/ m	水平精度/ (°)	贯穿深度/ m
设计要求	±2	±2.4	±3	12.5~13
安装数据	1.14	0.03	0.63	12.6

## 5 结 论

1) 吸力桩被广泛应用于深水油气建井并充当水下结构物基础,我国南海深海海域多数土质与吸力桩安装特性相符,具有良好的应用前景。

2) 基于我国南海某气田作业环境,通过对全安装周期的深水吸力桩结构强度计算及海上安装实践进行分析,得到吸力桩在海上施工时拖航、吊装和安装三个典型安装工况下的计算参数,从而开展相关强度校核,以期为深水吸力桩优化设计及海上安装提供参考。

3) 海上施工时应避免在拖航时横向负加速度、垂直向正加速度、纵向负加速度同向风载叠加载荷出现,以避免吸力桩与驳船的固定处出现局部高应力,从而增加航行风险。结合海上吊装工况强度分析,设计时应重点关注吊点焊接处的优化。

4) 本文相关研究成果成功指导了1 000 m水深条件下的吸力桩海上安装,各工况作业条件下均满足标准要求,整个海上施工和 underwater 安装过程安全可靠,最终安装精度满足设计要求。

## 参 考 文 献

- [1] 李清平,孙钦,程兵,等. 陵水 17-2 气田深水水下生产系统工程设计关键技术[J]. 中国海上油气,2021,33(3):180-188.  
Li Q P, Sun Q, Cheng B, et al. Key technologies for engineering design of deepwater subsea production system in LS17-2 gas field[J]. China Offshore Oil and Gas,2021,33(3):180-188. (in Chinese)
- [2] 刘统亮,刘孔忠,杜宇成,等. 深海安装工况下水下采油树鹅脖连接器安全性能分析[J]. 中国海上油气,2022,34(4):242-252.  
Liu T L, Liu K Z, Du Y C, et al. Safety performance analysis of subsea Christmas tree gooseneck connectors under installation conditions in deepwater[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 242-252. (in Chinese)
- [3] Peng Y, Yin Z Y. Micromechanical analysis of suction pile-granular soil interaction under inclined pulling load;

effect of pulling angle[J]. Ocean Engineering, 2023, 270:113615.

- [4] Aizhan S, Alfredo S, Nurly G, et al. Influence of Suction on Capacity of Pile Foundation[J]. Applied Sciences,2023,13(6):3968.
- [5] Hendriyawan, Primananda A M, Puspita D A, et al. Simplification analysis of suction pile using two dimensions finite element modeling[J]. Geomechanics and Engineering,2019,17(4):317-322.
- [6] 黄凯文,段泽辉,顾纯巍. 吸力桩式水下钻井基盘安装技术研究[J]. 石油钻采工艺,2007(6):22-23.  
Huang K W, Duan Z H, Gu C W. Research on baseplate installation technology for suction pile type underwater drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology,2007(6):22-23. (in Chinese)
- [7] 柳晓科,鹿群,路士伟,等. 低裙式吸力桩真空沉贯及抗拔极限承载力[J]. 岩土力学,2018,39(6):2089-2098.  
Liu X K, Lu Q, Lu S W, et al. Vacuum penetration and ultimate pull-out capacity of low skirted suction caissons[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(6):2089-2098. (in Chinese)
- [8] 刘书杰,黄熠,张明贺,等. 深水吸力桩井口稳定性研究[J]. 中国海上油气,2022,34(5):132-140.  
Liu S J, Huang Y, Zhang M H, et al. Study on the subsea wellhead stability of suction bucket foundation[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 132-140. (in Chinese)
- [9] 徐东升,杨进,樊建春,等. 深水吸力桩承载力学特性及稳定性分析[J]. 石油机械,2023,51(6):57-65.  
Xu D S, Yang J, Fan J C, et al. Bearing Mechanical Characteristics and Stability Analysis of Deep-water Suction Pile[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(6):57-65. (in Chinese)
- [10] 杨进,朱国惊,李舒展,等. 深海资源钻探吸力桩建井模式研究[J]. 石油钻探技术,2023,51(4):134-139.  
Yang J, Zhu G J, Li S Z, et al. Research on well construction model of deep sea resource drilling with suction pile[J]. Petroleum Drilling Techniques,2023,51(4):134-139. (in Chinese)
- [11] 马宝金,魏士鹏,文江,等. 吸力桩基础设计与建造安装关键技术研究[J]. 石油工程建设,2021,47(2):82-86.  
Ma B J, Wei S P, Wen J, et al. Design fabrication and installation of suction pile foundation[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(2): 82-86. (in Chinese)
- [12] 毛志豪,胡绍峰,李龙祥,等. 深水吸力桩施工技术研究[J]. 机械工程师,2020,(12):103-104.

- Mao Z H, Hu S F, Li L X, et al. Research on construction technology of suction pile in deep water [J]. *Mechanical Engineer*, 2020, (12): 103-104. (in Chinese)
- [13] 张西伟, 陈晓东, 张亚雷, 等. 吸力桩海上吊装作业结构有限元分析[J]. *石化技术*, 2020, 27(4): 70-71.  
Zhang X W, Chen X D, Zhang Y L, et al. Finite element analysis of suction pile offshore hoisting structure[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(4): 70-71. (in Chinese)
- [14] Juhung L, Jinung D. Horizontal behavior and failure mechanism of group suction piles under monotonic loading varying with pile spacing [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265: 112611.
- [15] Heitor B C, José A J C D, Maurício S M, et al. Suction and reloading effects on pile behaviour in tropical soil [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 17(2): 177-189.
- [16] 叶永彪, 申辉, 张伟, 等. 深水管汇吸力桩基础的下放安装研究[J]. *中国造船*, 2021, 62(4): 219-229.  
Ye Y B, Shen H, Zhang W, et al. Research on Installation of Suction Anchor Foundation for Deepwater Manifold[J]. *Shipbuilding of China*, 2021, 62(4): 219-229. (in Chinese)
- [17] DNV GL. DNV-ST-N001 Marine operations and marine warranty[R]. Oslo: DNV GL, 2016.
- [18] API. API RP 2A-WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms: 21st edition [R]. Washington D. C.: American Petroleum Institute, 2007.
- [19] Juhung L, Jinung D. Effects of the installation method, loading condition, and failure mechanism on the behavior of suction piles under monotonic horizontal loading[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(12): 1333.