

# 超深水浅层气藏无隔水管测试管柱力学性能分析

任冠龙<sup>1</sup>, 刘贤玉<sup>1</sup>, 孟文波<sup>1</sup>, 彭巍<sup>1</sup>, 孙巧雷<sup>2</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057

2. 长江大学机械工程学院 湖北荆州 434023

通讯作者: Email: rengl4@cnooc.com.cn

项目支持: 国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项: “海洋天然气水合物、浅层气、深部气目标评价及合采技术”(2021YFC2800900)

引用: 任冠龙, 刘贤玉, 孟文波, 等. 超深水浅层气藏无隔水管测试管柱力学性能分析[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 15-20.

Cite: REN Guanlong, LIU Xianyu, MENG Wenbo, et al. Mechanical performance analysis of test string in ultra deep water shallow gas reservoirs with riserless system [J]. Well Testing, 2025, 34(1): 15-20.

**摘要** 超深水浅层气藏无隔水管测试作业存在着流固耦合、一体化测试干扰、井筒流动安全保障困难等问题。通过优化测试管柱海水段传热特性, 基于管柱微元受力模型, 建立了无隔水管海水段测试管柱力学模型, 分析了不同测试管柱组合在作业海域海洋环境参数及平台偏移工况下的应力弯矩等性能。优选了超深水浅层气藏无隔水管系统下测试管柱组合和套管井口组合, 并通过测试管柱疲劳和泄漏风险分析, 得出在短周期内不存在疲劳风险, 当泄漏气液混合体充斥于作业平台四分之一处时, 在设计工况风速下, 平台因平衡状态横摇角度幅值小于 $17^\circ$ 时可满足作业标准要求。研究成果可为超深水浅层气藏无隔水管安全测试设计及工程应用提供技术支持, 实现了对超深水浅层气藏的低成本快速安全评价。

**关键词** 超深水; 浅层气藏; 地层测试; 无隔水管系统; 管柱力学; 疲劳分析; 泄漏风险

中图分类号: TE27 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.003

## Mechanical performance analysis of test string in ultra deep water shallow gas reservoirs with riserless system

REN Guanlong<sup>1</sup>, LIU Xianyu<sup>1</sup>, MENG Wenbo<sup>1</sup>, PENG Wei<sup>1</sup>, SUN Qiaolei<sup>2</sup>

1. CNOOC Zhanjiang Branch Company, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

**Abstract:** There are problems such as fluid-solid coupling, integrated testing interference, and difficulty in ensuring wellbore flow safety during the testing operation of ultra deep and shallow gas reservoirs without a riser. By optimizing the heat transfer characteristics of the seawater section of the test strings and based on the micro element stress model of the strings, a mechanical model of the test strings in the seawater section without a riser was established. The stress and bending moment performance of different combinations of test strings under marine environmental parameters and platform offset conditions in the operating area were analyzed. The optimized test strings and casing wellhead combination for the ultra deep water and shallow gas reservoir without a riser system were recommended. Through fatigue and leakage risk analysis of the test strings, it was found that there is no fatigue risk in the short cycle of the test strings. At the design wind speed, when the platform's roll angle amplitude is less than  $17^\circ$  due to the equilibrium state, it can meet the operating standards. The research results can provide technical support for the design and engineering application of safety testing without a riser and can achieve low-cost and rapid safety evaluation of the ultra deep water and shallow gas reservoirs.

**Keywords:** ultra deep water; shallow gas reservoirs; formation test; riserless system; pipe string mechanics; fatigue analysis; leakage risk

随着我国首个自营超深水大气田“深海一号”的成功开发, 南海深水油气资源逐步向超深水、深水高温高压等领域迈进, 而深水油气的开发对工程技术、装备能力、关键设计指标等要求都显著提

高<sup>[1]</sup>。南海北部陆坡深水区的浅层天然气藏是一种伴随天然气水合物的新型油气藏, 埋藏深度一般小于300 m, 目的层脆弱疏松, 易出现井漏、井眼扩径等情况, 工程难度极大。由于深水浅层天然气藏

埋藏浅,地层尚未成岩,封盖完全依靠固态水合物构成密封层,对其进行测试作业以落实储量资源过程中存在着流固耦合、一体化测试干扰、井筒流动安全保障等系列挑战<sup>[2-3]</sup>。因此,为实现超深水浅层气藏的低成本快速安全评价,结合超浅层分支井钻完井工艺、井筒稳定和细粉砂防砂优化等高效合采工艺及安全评价技术逐步开展了研究。

常规深水测试采用有隔水管系统进行作业,隔水管系统是连接深水浮式平台与水下井口系统的关键装备,结构组成复杂,需要承担风浪流海洋环境、浮式平台偏移以及作业工况等复合条件作用下的复杂力学载荷<sup>[4]</sup>。而无隔水管系统是深水浮式平台不使用常规隔水管,钻杆直接暴露在海水中进行作业,在钻井过程中钻井液和岩屑经一条回流管线返回钻井平台,测试过程中不需要进行钻井液循环,油气直接流经钻杆返至钻井平台。基于无隔水管钻进技术的特点,其成为有效评价和控制深水浅部地层钻井的关键技术之一,具有成本低、钻井液用量少、作业水深无限制等优势,但由于钻杆直接处于海水中,在油气测试过程中,由于深水温压场的综合作用,其井筒流动特点和管柱受力与有隔水管系统存在较大差异<sup>[5-6]</sup>。目前,关于深水无隔水管钻井作业过程中的管柱力学研究较多,主要包括管柱的纵横弯曲变形力学、送入管柱设计与强度校核方法、钻柱三维振动响应特性等<sup>[7-9]</sup>。刘红兵等<sup>[10]</sup>针对深水测试管柱与隔水管之间的耦合涡激疲劳进行了分析,建立了相应的振动模型和分析方法。何玉发等<sup>[11]</sup>建立了深水隔水管与测试管系统非线性振动模型,提出了管柱系统非线性接触载荷计算方法。孙巧雷等<sup>[12]</sup>开展了不同顶张力、悬挂力、海流流速及平台漂移下的“管中管”结构体系横向承载特性分析,但未见无隔水管系统下测试管柱状态与力学性能相关研究。因此,本文从深水无隔水管系统测试管柱方面对浅层气藏的测试工艺进行分析,开展了测试管柱力学性能与井口稳定性等研究,可为浅层气藏的无隔水管安全测试设计及工程应用提供技术基础。

## 1 无隔水管测试作业工况

南海某超深水井 CS-1X 井,其井点水深为 1 510 m,设计井深为 1 960 m,目的层垂深为 1 670~1 930 m,为典型的超深水浅层气藏。本井计划采用无隔水管系统进行钻井及测试作业,测试管柱计划采用

钻杆+大通径伸缩节+加重钻杆+下部防砂管柱组合,井口处增加液控管线保护接头,井筒内设置扶正器进行管柱保护与扶正,该管柱组合及测试工艺可实现深水浅层气藏的快速评价。超深水无隔水管测试管柱示意图如图 1 所示。

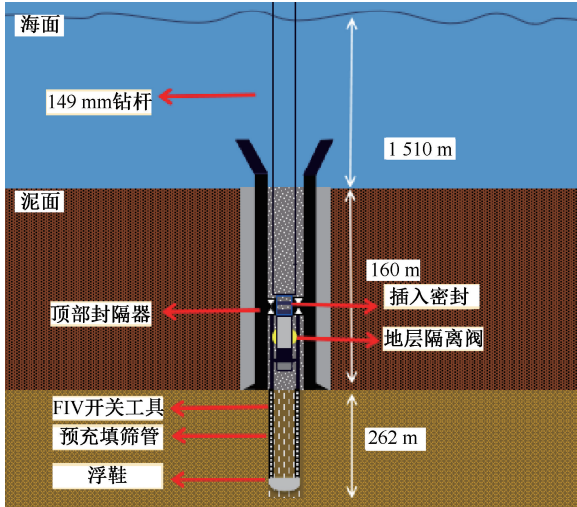


图 1 超深水无隔水管测试管柱示意图  
Fig.1 Schematic diagram of testing string for ultra deep water without riser

测试作业期间,环境参数选南海一年一遇非台风期条件下波流载荷,安全系数取为 1.50,详细取值参数见表 1。

表 1 海洋环境参数及安全系数选取  
Table 1 Selection of marine environmental parameters and safety factors

作业工况	波浪高/ m	波浪周 期/s	海面/中部/底部 流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	安全 系数
钻井测试工况	4.8	10.5	0.99/0.45/0.30	19.1	1.50

## 2 无隔水管测试管柱力学模型构建

无隔水管测试管柱在作业过程中受海水段风浪流等环境载荷、封隔器下部高压环境以及管柱内部测试流体等综合影响下,测试管柱受到重力、液压、摩擦以及超深水独特温度场等多种因素影响,产生轴向载荷或受力变形。同时,在波浪力和海流力的作用下,测试管柱受到径向载荷作用产生横向偏移,并且在正常测试作业过程中,测试管柱在地层油气温压场的作用下,也会对管柱的力学行为产生一定影响。

### 2.1 测试管柱轴向变形计算模型

深水测试过程中,泥线上下处的管柱均受到内外流体压力作用、内外摩擦作用、轴力效应、截面效应、弯曲效应等,测试管柱需考虑管柱的内外压差



产生的虚构力、瞬时悬挂力、管柱内外摩擦阻力、横向弯曲产生的附加轴向力、截面效应等综合影响。同时,在海洋环境载荷的作用下,钻井平台会产生一定的浮沉运动,测试管柱轴向上易产生较大的周期性律动。

测试作业时,假设测试管柱内部流体充满管内,忽略测试管柱轴向与横向方向的夹角,则测试管柱的有效轴向力为

$$T_z(z,t)=T_0(t)-\int_0^z[W_e(z,t)-(\rho_wA_o-\rho_fA_i)g-F_f(z,t)]dz+\frac{EA_p}{2L}\int_0^z\left(\frac{dy}{dz}\right)^2dz\tag{1}$$

式中: $z$  为始自测试管柱上端接头的长度(深度), $m$ ;  $T_z(z,t)$  为深度  $z$  处  $t$  时刻的测试管柱有效轴向力, $N$ ;  $T_0(t)$  为  $t$  时刻的测试管柱顶部瞬时张紧力, $N$ ;  $W_e(z,t)$  为深度  $z$  处  $t$  时刻的测试管柱有效重量, $N$ ;  $(\rho_wA_o-\rho_fA_i)g$  为单位长度管体所受内外流体压差产生的虚构拉力, $N$ ;  $F_f(z,t)$  为单位长度管体所受的管内外流体沿管体轴向流动产生的摩擦阻力(取向上为正值;管外的轴向摩阻力由管体轴向运动或者海水的纵向流动速度产生,一般忽略不计), $N$ ;  $E$  为测试管柱的弹性模量, $Pa$ ;  $L$  为水深, $m$ ;  $\rho_w$  和  $\rho_f$  分别为管外环空测试液(取海水)和管内流体的密度, $kg/m^3$ ;  $A_o$  和  $A_i$  分别测试管柱的外截面积(采用水力外径)和内截面积, $m^2$ ;  $A_p$  表示管柱有效截面积, $m^2$ ;  $g$  为重力加速度, $9.81\text{ m/s}^2$ 。

## 2.2 海流对测试管柱的作用力计算模型

波浪力和海流力的载荷计算可应用莫里森方程为

$$F_x=\frac{1}{2}\rho_{sea}C_dD_e(v_c+v_w)|v_c+v_w|+\rho_{sea}C_mD_e^2\frac{\partial v_c}{\partial t}\tag{2}$$

式中: $\rho_{sea}$  表示海水密度, $kg/m^3$ ;  $C_d$  表示拖拽力系数,取值范围介于  $0.6\sim1.2$ ;  $D_e$  表示隔水管外径, $m$ ;  $v_c$  表示海流引起的水质点横向速度, $m/s$ ;  $v_w$  表示波浪引起的水质点横向速度, $m/s$ ;  $\frac{\partial v_c}{\partial t}$  表示波浪引起的水质点横向加速度, $m^2/s$ ;  $C_m$  表示惯性力系数,取值范围介于  $1.5\sim2.0$ 。

## 2.3 测试管柱温度场模拟计算模型

常规深水井测试采用有隔水管系统进行作业,测试期间的井筒温压场计算时包含了深水海水井段中隔水管内外流体相互作用与热量传导的特殊

性<sup>[13]</sup>。本文在此基础上,对无隔水管测试管柱温度场进行了模型简化,综合考虑质量、能量守恒原理和传热学原理,在前期研究基础上建立管柱温度场方程为

$$\frac{\partial(\rho cT_p)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho c v_pT_p)}{\partial z}=q_{ap}+q_p\tag{3}$$

式中: $\rho$  为管柱内流体密度, $g/cm^3$ ;  $c$  为定压比热; $t$  为时间, $s$ ;  $z$  为轴向坐标; $T_p$  为管柱内和温度, $^{\circ}C$ ;  $v_p$  为管柱内流体流速, $m/s$ ;  $q_{ap}$  为管柱与海水内外换热量, $J$ ;  $q_p=A_p v_p p_{fp}$  为管柱内摩擦生热, $J$ ;  $A_p$  为管柱流道面积, $m^2$ ;  $p_{fp}$  为管柱内流体轴向流动摩阻梯度,与流体速度、密度、流变性能、流态等有关,随温度和压力变化而变化。

## 3 无隔水管测试管柱力学性能分析

南海某超深水井 CS-1X 井测试管柱计划采用钻杆+大通径伸缩节+加重钻杆+下部防砂管柱组合,模拟计算分别考虑了采用外径  $101.6\text{ mm}$  钻杆、 $101.6\text{ mm}$  加重钻杆、 $114.3\text{ mm}$  油管、 $127\text{ mm}$  钻杆、 $127\text{ mm}$  加重钻杆、 $149\text{ mm}$  钻杆和  $168\text{ mm}$  钻杆等不同管柱组合的应力分析。具体管柱模型以井口测试树底部为起点,测试树下部为钻杆,与泥线井口处接触部分为外径  $177.8\text{ mm}$  的伸缩节,其下部为钻杆及测试防砂管柱,模型中考虑封隔器位置,将封隔器处设为固定端。

### 3.1 测试管柱应力分析

以外径  $168\text{ mm}$  钻杆测试管柱结构为例,设计测试管柱上部为变扣连接的  $168\text{ mm}$  钻杆,一共为  $1\,538\text{ m}$ ,中间井口接触部位为外径  $177.8\text{ mm}$  液控管线保护接头  $10\text{ m}$ ,下部为外径  $149\text{ mm}$  钻杆及油气测试模块。按照作业海域海洋环境参数及  $1.5$  倍的安全系数,模拟计算钻井平台不同偏移量工况下管柱的整体位移、应力和弯矩情况。图 2 为钻井平台分别偏移  $3\%$  和  $5\%$  工况下测试管柱的应力云图。

根据 S135 等级的外径  $168\text{ mm}$  钻杆进行模拟计算得出,在平台偏移  $3\%$  时,测试管柱最大等效应力为  $296.09\text{ MPa}$ ,最小安全系数为  $3.14$ ,在平台偏移  $5\%$  时,测试管柱最大等效应力为  $427.20\text{ MPa}$ ,最小安全系数为  $2.18$ ,均满足管柱强度要求。经计算,不同偏移量下管柱最大应力位置均在水下井口处,以平台偏移  $5\%$  时为例,此时水下井口处最大弯矩为  $115.82\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,满足作业要求。

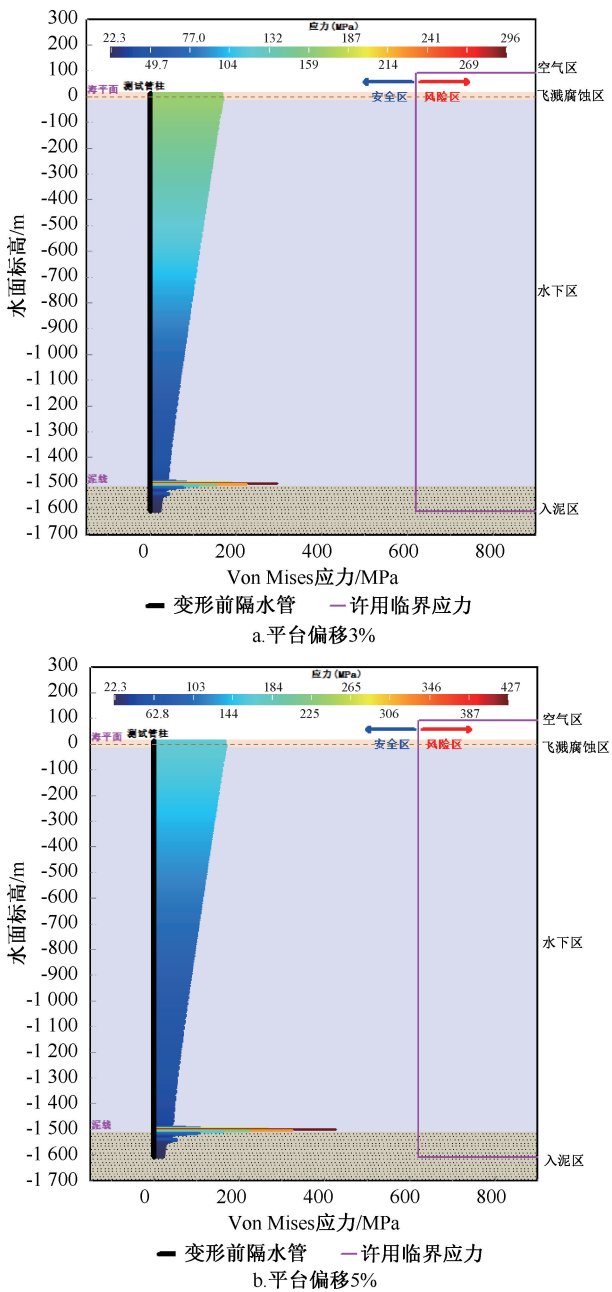


图 2 测试管柱应力云图

Fig. 2 Stress cloud map of the test string

由于测试过程中管柱上部处于受拉状态,管柱底部处于受压状态,测试管柱的中和点位置会出现抗拉和抗压的循环变化,瞬时的交变应力变化可能会带来管柱泄漏的风险。经进一步模拟分析,计算出在  $20\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $40\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $50\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$  不同测试产量下本井测试管柱的中和点位置分别处于 1 645 m、1 640 m、1 638 m,该位置处的三轴安全系数为最小为 7.08。因此,综合测试管柱最大等效应力、最大弯矩以及中和点安全系数可知,当管柱等级尺寸大于 127 mm 时测试管柱均满足作业要

求,即推荐采用 127 mm 加重钻杆+177.8 mm 保护接头+127 mm 加重钻杆作为该井无隔水管测试管柱组合。

3.2 测试管柱疲劳分析

根据 API 规范,对测试管柱的疲劳效应进行了分析,以外径 127 mm 加重钻杆作为测试管柱,平台最大偏移 5% 时的疲劳应力幅和应力循环次数进行计算,其中 S-N 曲线服从乘幂关系方程为

$$S^m N = K \tag{4}$$

式中:S 为疲劳应力幅;N 为应力循环次数;K、m 为 S-N 曲线系数。依据美国船级社 (ABS) 标准《FATIGUE ASSESSMENT OF OFFSHORE STRUTURES》选用 E 曲线选取 m 为 3,K 为  $4.16\times10^{11}$ 。

另外,疲劳损伤复合累积疲劳损伤理论,方程为

$$D = \sum_{i,j} \frac{n_{ij}}{N_{ij}} = \sum_{i,j} \frac{n_{ij} S_{ij}^m}{K} \tag{5}$$

式中:i=1 时为波激疲劳,i=2 时为涡激疲劳,i=3 时为流激疲劳,i=4 时为热激疲劳。 $S_{ij}$ 、 $n_{ij}$  分别对应工况下的疲劳应力幅和疲劳应力循环次数。

当疲劳损伤达到临界值时,管柱单根发生疲劳破坏,即

$$D \geq \Delta \tag{6}$$

式中:Δ 为临界疲劳损伤,在 API 规范中疲劳损伤临界值一般为 1,对于重要构件可以取 0.5。本计算取临界损伤评价标准为 0.5,经计算,测试管柱在短周期内不存在疲劳风险,见表 2。

表 2 测试管柱疲劳损伤值计算结果  
Table 2 Calculation results of fatigue damage values for test pipe columns

1 年损伤值	60 天损伤值	API 规范
$7.69\times10^{-3}$	$1.28\times10^{-3}$	满足要求

3.3 套管应力分析

以外径 127 mm 加重钻杆作为测试管柱,平台最大偏移 5% 为例,计算了测试管柱对套管的横向作用力。经计算,当井口偏斜为 2°,在一年一遇海况下,采用 P110 套管井口最大允许横向力为 3.5 t,最大应力出现位置为泥线以下 8 m 附近。而采用 168 mm 钻杆、149 mm 钻杆经反算在保证井口稳定性要求下,平台临界偏移量分别为 3.1% 和 4.3%,不满足平台偏移 5% 下井口稳定性要求。图 3 为外径 244 mm P110 套管井口横向载荷下应力及弯矩分布图。

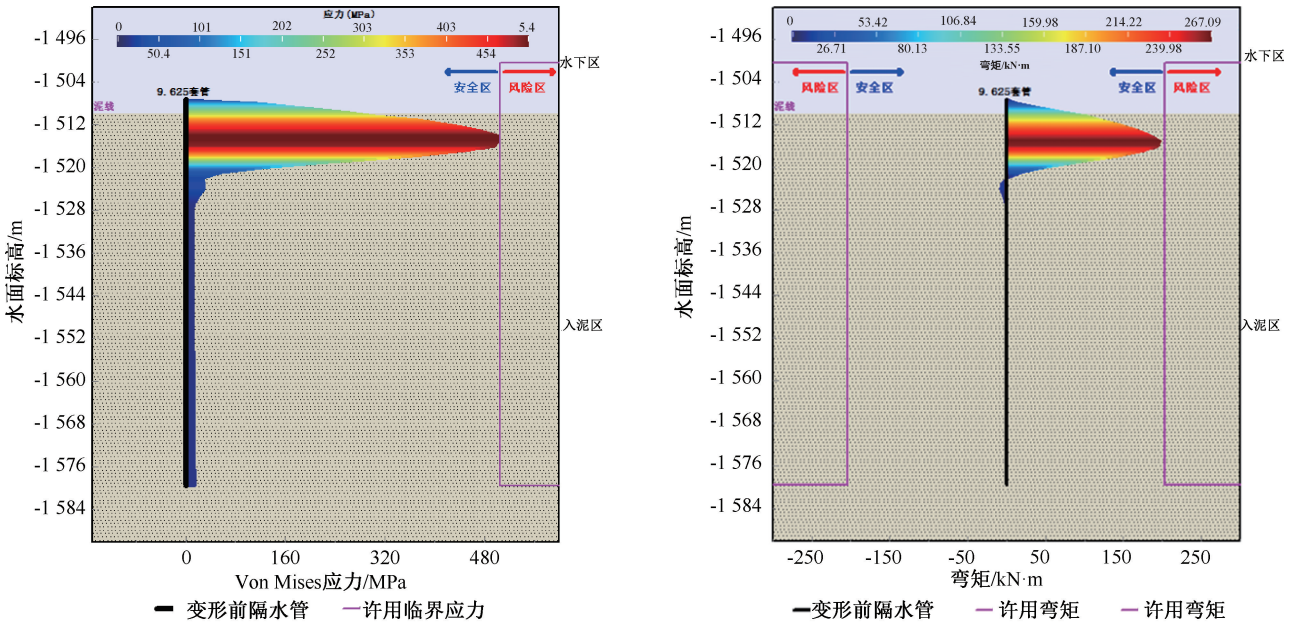


图 3 P110 套管井口横向载荷下应力及弯矩分布图  
Fig. 3 Stress and bending distribution diagram of P110 casing

3.4 测试管柱泄漏分析

无隔水管系统由于作业时不使用深水隔水管,测试管柱完全暴露于海水中,一旦测试管柱某部位发生水下泄漏,不但会造成一定的油气泄漏,也会对上部作业平台的安全性产生威胁,从而影响平台总体稳性。通过采用 Fluent VOF,以海水为连续相、分解气体为离散相,采用欧拉-拉格朗日耦合方式,建立气体水下扩散数值模型,分别计算了测试管柱在水下 100 m、500 m 和 1 000 m 不同位置处泄漏工况下对上部平台的稳性影响,气体泄漏量分别取  $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  和  $100\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

经计算,当水下气体扩散升至水面时形成气液

混合物,对平台浮体密度的影响很大,最危险工况时混合物密度达到  $510.3\text{ kg/m}^3$ 。当气液混合物均布充实于整个浮体周围时,平台整体吃水下降很大,当充斥密度为 100%时,吃水上升 17 m,当充斥密度为 20%时,吃水上升 12 m。根据 IMO《海上移动式钻井平台构造和设备规则》(MODU CODE 2009),当平台稳性因平衡状态横摇角度幅值大于  $17^\circ$ 时不满足规范标准,当气液混合物充斥于单浮体四分之一处时,此时平台横倾明显减小,计算结果见表 3。由计算结果可知,在设计工况风速下,当气泡充斥密度为 60%时,横摇角度幅值为  $15.71^\circ$ ,虽满足标准要求,但为危险的临界阈值,因此选取气泡充斥密度为 20%时安全作业校核标准。

表 3 平台稳性计算校核结果  
Table 3 Calculation results of platform stability

	泄漏前		泄漏后		
气泡分布程度	0.00	1.00	0.80	0.60	0.20
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1 025.00	510.30	510.30	510.30	510.30
吃水/m	17.50	34.50	32.52	32.00	29.50
横倾力矩/ $\text{MN}\cdot\text{m}$	0.00	2 810.00	2 248.00	1 798.40	1 438.72
横倾角/ $^\circ$	0.00	12.38	9.90	7.92	6.34
风载荷平衡角度/ $^\circ$	7.79	7.79	7.79	7.79	7.79
作业工况有义波高/m	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
校核结果	满足	不满足	不满足	满足(危险)	满足

4 结论

(1)通过分析超深水浅层气藏无隔水管系统下测试作业工况,优化测试管柱海水段传热特性,基

于管柱微元受力模型,考虑内外流体流动下的惯性力、摩阻力、管柱结构惯性力、弯曲效应、平台浮沉等建立了海水段测试管柱的管柱力学模型。

(2)基于建立的理论模型,分析了不同测试管



柱组合在作业海域海洋环境参数及平台偏移工况下的应力弯矩等性能分析,推荐了超深水浅层气藏无隔水管系统下最优测试管柱组合和套管井口组合,并通过测试管柱疲劳分析,测试管柱在短周期内不存在疲劳风险。

(3)基于无隔水管系统作业时存在的测试管柱水下泄漏风险,分别计算了测试管柱不同泄漏条件下对上部平台的稳性影响,计算得出当泄漏气液混合体充斥于单浮体四分之一处时,在设计工况风速下,平台因平衡状态横摇角度幅值小于 $17^{\circ}$ 时可满足规范标准。

**致谢:**感谢中海油湛江分公司工程技术作业中心为本论文提供的项目支持和技术指导。

#### 参考文献

- [1] 杨进,李磊,宋宇,等.中国海洋油气钻井技术发展现状及展望[J].石油学报,2023,44(12):2308-2318.  
YANG Jin, LI Lei, SONG Yu, et al. Current status and prospects of offshore oil and gas drilling technology development in China. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12):2308-2318.
- [2] 钟广见,张如伟,易海,等.南海北部陆坡深水区浅层天然气藏特征[J].热带海洋学报,2018,37(3):80-85.  
ZHONG Guangjian, ZHANG Ruwei, YI Hai, et al. The characteristics of shallow gas reservoir developed in the northern continental slope of south China sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(3):80-85.
- [3] 陈子归,姜涛,匡增桂,等.琼东南盆地天然气水合物与浅层气共生体系成藏特征[J].地球科学,2022,47(5):1619-1634.  
CHEN Zigui, JIANG Tao, KUANG Zenggui, et al. Accumulation characteristics of gas hydrate-shallow gas symbiotic system in Qiongdongnan basin [J]. Earth Science, 2022, 47(5):1619-1634.
- [4] 田瑞瑞.海上钻井隔水管系统组成及设计关键技术研究[J].河南科技,2022,41(11):71-74.  
TIAN Ruirui. Research on composition and key design technology for offshore drilling riser system [J]. Henan Science and Technology, 2022, 41(11):71-74.
- [5] 幸雪松,张会增,韩龙飞,等.深水无隔水管钻井气侵特性动态仿真[J].计算机仿真,2022,39(10):130-137.  
XING Xuesong, ZHANG Huizeng, HAN Longfei, et al. Dynamic simulation of gas invasion characteristics in deep water riserless drilling [J]. Computer Simulation, 2022, 39(10):130-137.
- [6] 马宝金,王鄂川,张贺恩,等.深水无隔水管钻井钻具稳定性计算分析[J].石油工程建设,2020,46(增刊1):

177-184.

- MA Baojin, WANG Echuan, ZHANG Heen, et al. Analysis and calculation of drill tool stability in deepwater riserless drilling [J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(Suppl. 1):177-184.
- [7] 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 Deli, ZHANG Hui. Mechanical analysis of tubes in deepwater drilling operation without riser [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(4):37-42.
  - [8] ADAMS R J. Proven landing string design for ultra-deepwater application[J]. World Oil, 2001, 222(7):73-79.
  - [9] 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 and Completion, 2009, 24(1):72-88.
  - [10] 刘红兵,陈国明,刘康,等.深水测试管柱-隔水管耦合涡激疲劳分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):138-143.  
LIU Hongbing, CHEN Guoming, LIU Kang, et al. Analysis of VIV-induced fatigue of string-riser coupled system in deepwater [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1):138-143.
  - [11] 何玉发,郭晓强,刘清友,等.深水隔水管-测试管系统非线性动力学模型研究[J].振动与冲击,2022,41(11):104-113.  
HE Yufa, GUO Xiaoqiang, LIU Qingyou, et al. Nonlinear dynamic model of deep-water RTS [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(11):104-113.
  - [12] 孙巧雷,李中,王尔钧,等.深水测试管柱与隔水管的横向承载特性[J].天然气工业,2020,40(12):106-115.  
SUN Qiaolei, LI Zhong, WANG Erjun, et al. Transverse bearing behaviors of strings and risers in deepwater tests [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12):106-115.
  - [13] 任冠龙,孟文波,何玉发,等.深水浅层钻井液水合物抑制性能优化[J].钻井液与完井液,2022,39(5):529-537.  
REN Guanlong, MENG Wenbo, HE Yufa, et al. Optimization of hydrate inhibition performance of deep water shallow drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(5):529-537.

编辑 邵振鹏

**第一作者简介:**任冠龙,男,1988年出生,高级工程师,硕士,2014年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业,现主要从事海洋石油钻井井与测试研究工作。电话:0759-3912705,Email:rengl4@cnooc.com.cn。通信地址:广东省湛江市坡头区南油一区,邮政编码:524057。