

深水气井测试封隔器全过程力学行为评估

任冠龙¹, 孟文波¹, 张崇¹, 何玉发², 张锐³

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057

2. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100029

3. 中国石油大学(华东) 山东青岛 266580

通讯作者: Email: rengl4@cnooc.com.cn

项目支持: 中国海洋石油集团公司十三五重大专项“深水测试关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 05 LTD ZJ 02), “南海西部油田上产 2000 万方钻完井关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 LTD ZJ 05)

引用: 任冠龙, 孟文波, 张崇, 等. 深水气井测试封隔器全过程力学行为评估[J]. 油气井测试, 2024, 33(5): 8-14.

Cite: REN Guanlong, MENG Wenbo, ZHANG Chong, et al. Mechanical behavior evaluation of packer during entire process of deepwater gas well testing [J]. Well Testing, 2024, 33(5): 8-14.

摘要 深水气井测试过程中管柱受力影响复杂, 封隔器失封风险高, 封隔器失效会直接影响测试作业安全。基于测试管柱及封隔器受力研究现状, 以南海某深水气井为例, 建立了深水气井测试封隔器全过程力学行为评估方法, 评估了封隔器在管柱下入、坐封、测试以及管柱解封过程中的受力状态及影响规律, 并提出了封隔器安全控制措施。研究表明, 对封隔器轴向受力影响程度从高到低依次是深水气井测试制度、测试液体系、测试过程中对管柱施加的预提力、产量。通过 BD21-X 井现场应用, 经过封隔器全过程受力计算和控制措施分析, 有效保障了现场测试管柱封隔器密封有效, 测试作业安全顺利, 可为深水气井测试设计及应用提供技术支撑。

关键词 深水气井; 测试管柱; 封隔器; 载荷; 力学评估; 应力分析

中图分类号: TE27

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.05.002

Mechanical behavior evaluation of packer during entire process of deepwater gas well testing

REN Guanlong¹, MENG Wenbo¹, ZHANG Chong¹, HE Yufa², ZHANG Rui³

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

2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100029, China

3. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract: The mechanical forces acting on the test string during deepwater gas well testing are complex, leading to a high risk of packer failure, which can directly affect the safety of the testing operation. Based on the current research on the forces experienced by the test string and packer, by using a deepwater gas well in the South China Sea as an example, a method for evaluating the mechanical behavior of the packer throughout the entire testing process was established. Then, the stress states and influence patterns of the packer during the stages of running the test string, setting the packer, testing, and unsetting the test string were evaluated. Furthermore, safety control measures for the packer were proposed. The research shows that the factors influencing the axial force on the packer, in order of decreasing impact, are the deepwater gas well testing regime, the test fluid system, the applied pre-tension on the string during testing, and production rate. The method was successfully applied in well BD21-X, where force calculations and control measures throughout the process ensured the effectiveness of the packer's seal and the smooth and safe execution of the test operation, which can provide technical support for the design and implementation of deepwater gas well testing.

Keywords: deepwater gas well; test string; packer; load; mechanical evaluation; stress analysis

中国南海深水油气资源丰富, 随着“深海一号”气田的开发, 油气开发逐步由常规深水向超深水、深水高温高压领域迈进, 气田开发再次面临深水、高温、高压、高产等难题^[1-3]。

深水气井测试期间井筒温度场和压力场变化大, 开井后测试管柱受到松弛力、活塞效应、螺旋弯曲效应、鼓胀效应和温度效应等影响, 同时受到海流激发隔水管振动进而引起测试管柱振动等深水

环境载荷的耦合作用,测试管柱受拉伸、弯曲、膨胀等力学行为复杂^[4-5]。封隔器作为井下测试管柱工具之一,其作用是将所在预定深度位置的油套环空分隔,保障地层高温油气按照预设通道进入测试管柱,若测试管柱受力情况复杂引发管柱轴向变形过大,则会使管柱管柱产生塑性破坏,或者引发管柱轴向移动而使封隔器移位或失效而造成泄漏,从而影响测试作业安全。

目前国内外对封隔器胶筒和卡瓦力学特性、封隔器密封失效等研究较多,主要集中在运用材料力学、管柱力学等理论对封隔器系统及各部件进行理论研究,侧重于封隔器零部件和封隔器管柱在工作过程中的力学分析,或针对某特定封隔器的仿真软件进行自主设计或试验设备进行研制和性能测试。在管柱力学分析研究方面,刘洪涛等^[6]分析计算了高温高压气井压裂施工过程中多封隔器管柱的力学行为,并建立了管柱及封隔器完整性评价综合分析方法,张智等^[7]研究分析了高压气井多封隔器复合管柱的力学行为,为封隔器的设计和选择提供参考,张宏伟^[8]分析了深斜井分层注水管柱上封隔器坐封及解封过程中对管柱的轴向力及变形情况,可为油气井生产及测试过程中的封隔器全过程力学性能评估提供一定参考。管志川等^[9]基于多种效应对测试管柱的影响,建立了管柱固定型封隔器失封判断方法,并研究了相关因素的影响规律。在封隔器关键零部件研究方面,华琴^[10]对高温高压深井试油过程中封隔器卡瓦力学行为进行了数值模拟,为封隔器坐封时的综合受力情况提供了理论参考,刘曼^[11]采用数值仿真与试验相结合的方法,对封隔器的安全性和可靠性进行了研究,得到了不同载荷作用下封隔器关键零部件的应力分布规律,杨帅^[12]采用 ANSYS Workbench 静力学有限元仿真对封隔器胶筒进行仿真模拟,对影响胶筒密封性能的因素进行了分析,得出了胶筒与套管间的接触应力分布规律,杨佰阳^[13]研制了封隔器胶筒试验装置,可以实现胶筒的密封性能检验。

综合分析现有文献对封隔器入井至出井的全过程力学行为研究较少,且尚未针对深水气井测试期间的封隔器受力情况进行过研究。以南海某深水气井测试为研究背景,在准确掌握深水气井测试井筒温度场分布的基础上,对测试管柱封隔器下放、坐封、测试以及解封全过程工况进行模拟分析,

计算不同作业工况下可控因素的敏感性,得出封隔器全过程力学行为规律,并结合可行性对控制措施进行研究,从而对实际作业提供理论指导,保障深水气井测试作业安全顺利。

1 深水气井测试管柱基本结构

深水气井测试管柱结构主要由 Landing Strings、油管悬挂器、送入油管以及井下工具串等组成,其中,井下测试工具串从上至下由测试阀+压力计托筒+取样器托筒+封隔器+减震器+射孔枪+打孔油管或防砂筛管等组成。深水气井测试所使用的封隔器处于测试管柱下部,起到封闭、隔离油管与套管之间环空间隙的作用,保障地层的高温高压油气按照设计通道顺利进入油管柱进行放喷测试。典型深水气井测试管柱图如图 1 所示,取南海深水某测试井为例,该井为直井,水深 1 538 m,井深 2 930 m,设计该井封隔器下入深度为 2 300 m,封隔器以上测试管柱为外径 114.3 mm 油管,封隔器以下测试管柱为外径 73 mm 油管。

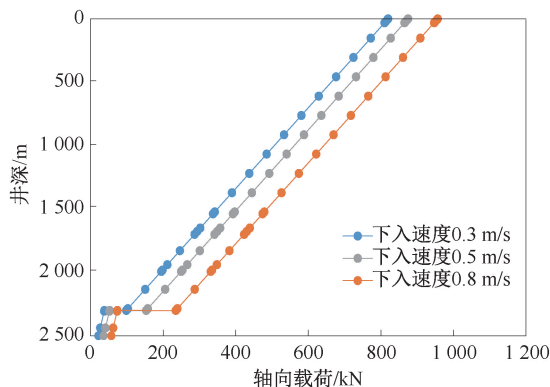


图1 测试管柱入井过程中所受的轴向载荷
Fig.1 Axial load on the test string during the process of entering the well

2 封隔器全过程力学行为评估

深水气井测试过程中涉及到封隔器的工况主要有随测试管柱下入、坐封、测试承压以及解封回收等,这些过程中封隔器受到重力、液压以及摩擦等多种因素影响,产生轴向载荷或受力变形。以南海某深水气井测试管柱结构图为例,分别计算分析了不同工况下封隔器的力学行为状态。

2.1 封隔器下入过程力学判断方法及受力分析

封隔器随测试管柱入井过程中可认为管柱下端为自由端,不受约束,管柱以一定速度逐渐由井口下入至设计深度的过程中主要受到管柱自重、

液体粘滞摩擦阻力、液体压力、管柱与井壁的摩擦力,以及井内温度效应等综合作用。在通用力学分析基础上本文增加管柱弯曲拟载荷和瞬时冲击载荷计算,建立测试管柱下入力学行为判断方法。其中管柱弯曲载荷计算公式表示如下:

$$F_1 = \frac{1}{2} E \times D \times k \times A_s \tag{1}$$

式中: F_1 为管柱弯曲拟载荷,kN; E 为杨氏模量,Pa; D 为管柱内径,m; k 为全角变化率,°/30 m; A_s 为管柱横截面积,m²。

瞬时冲击载荷计算公式表示如下:

$$F_2 = 1.5 \times V_{avg} \times A_s (E \times \rho_s) \tag{2}$$

式中: F_2 为瞬时冲击载荷,kN; V_{avg} 为平均下入速度,m/s; ρ_s 为管材密度,g/cm³。

通过计算得出封隔器随测试管柱下入过程中的轴向载荷与不同下入深度之间的关系如图 1 所示。从图 1 可以看出,在直井中下入测试管柱所受的轴向力均为拉力,且随着井深增加而逐渐增大,在井口处达到最大值,井底位置(封隔器)轴向载荷最小。

2.2 封隔器坐封过程受力状态分析

封隔器的坐封方式主要有液压坐封、机械坐封、自膨胀坐封等方式,通常封隔器在坐封和验封过程中的不同阶段会伴随着管柱下放、旋转、上提等机械运动,其最终状态是使封隔器胶筒外壁与套管内壁完全接触,达到一定接触力后密封胶筒上下的环空。封隔器胶筒的坐封过程可分为弹性变形阶段、约束变形阶段以及稳定变形阶段,本文选择 Mooney-Rivlin 模型对封隔器胶筒坐封过程中的力学行为进行研究,其应变能函数模型为:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (I_3^2 - 1)^{2k} \tag{3}$$

式中: W 为应变能密度,J/m³; N 为函数的阶级; C_{ij} 为材料常数,通常由实验测试得到; I_1 、 I_2 和 I_3 分别为 1 阶、2 阶和 3 阶应变不变量; d 为材料常数,与材料的压缩性相关。(根据经验公式及参考文献中的橡胶材料试验数据拟合结果,确定胶筒与中心管、隔环、套管之间的摩擦系数为 0.3,中心管与隔环、套管之间的摩擦较小,摩擦系数忽略不计,然后对三胶筒封隔器进行建模计算封隔器坐封受力情况。本井选用的封隔器胶筒参数如表 1 所示。)

表 1 封隔器胶筒几何参数

Table 1 Geometric parameters of packer rubber cylinder

	内径/mm	外径/mm	高度/mm	弹性模量/MPa	泊松比
中心管	75.9	88.9	—	2.06e5	0.3
套管	121.4	139.7	—	2.06e5	0.3
隔环	88.9	114.0	12	2.06e5	0.3
胶筒	88.9	114.0	75	—	—

为了保证足够计算精度,对胶筒结构进行了网格细化,采用 Solid168 单元体对模型进行网格划分,共划分节点 18 168 个,网格单元 5 717 个。封隔器载荷与边界条件设定为限制中心管和套管的上下两端 Y 方向自由度,套管外侧有水泥固结,限制套管外侧的 X 方向自由度,限制下隔环下端的 Y 方向自由度,在上隔环上端施加 Y 方向的坐封载荷。模拟对封隔器胶筒分别施加 10 kN~140 kN 的坐封载荷进行有限元计算,分析了封隔器胶筒压缩距的大小及规律,得到不同坐封载荷下封隔器胶筒的压缩距如图 2 所示。又计算分析了 140 kN 坐封载荷下三胶筒与套管间的接触应力,如图 3 所示。

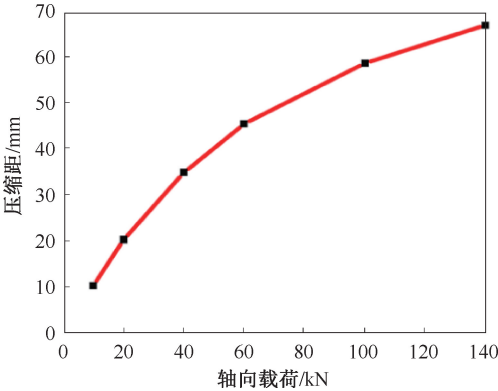


图 2 不同坐封载荷与压缩距关系曲线
Fig. 2 Relationship curve between different distance

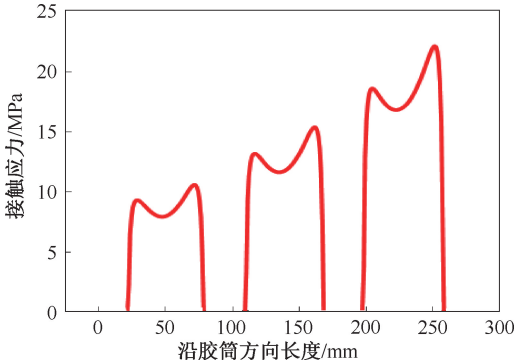


图 3 140 kN 坐封载荷下三胶筒与套管接触应力
Fig. 3 Contact stress between three rubber sealing loads and compression cylinders and casing under 140 kN sealing load

从图 2 中可以看出,随着管柱轴线载荷的增加,胶筒的压缩距逐渐增大,当载荷增大到 40 kN 左右

后,压缩距增大的趋势开始变缓。从图3中可以看出,每个胶筒的中间部位接触应力最小,从上到下三个胶筒的接触应力依次减小,由此可见,坐封载荷增加是接触应力增加的主要原因,起密封作用的主要是上胶筒。

2.3 封隔器测试过程受力状态分析

深水气井测试过程中的温压场分布计算方法详见第2部分,本节以该深水井测试产量 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例,结合如下判定方法对该井在测试放喷过程中测试管柱受到的管柱预提力、温度效应、鼓胀效应和弯曲效应等作用进行计算分析。

2.3.1 影响因素判定方法

(1) 预提力影响

封隔器坐封后测试管柱的一部分重力会施加在封隔器上,由于管柱受浮力作用且测试期间井口一般会施加一定的轴向拉力,使管柱呈受拉状态,由2.1可知测试管柱在井口所受拉力最大,在末端处最小,因此测试期间管柱轴向受力并非整个测试管柱的重力,将该力称为预提力 F_y ,其计算公式表示如下:

$$F_y = F_z - F_f - F_l \quad (4)$$

式中: F_y 为管柱预提力, N; F_z 为油管重力, N; F_f 为油管所受浮力, N; F_l 为管柱受到的拉力,取作用点在油管中部的受力, N。

(2) 温度效应

温度效应带来的管柱热膨胀力会对封隔器受力状态产生一定影响,根据井筒温度场变化情况及工程现场经验公式计算热膨胀力如下:

$$F_t = 20\,700 \times 3.83 A_s \Delta t \quad (5)$$

式中: F_t 为管柱封隔器处因温度效应产生的力, N; A_s 为封隔器受力处横截面积, m^2 ; Δt 为封隔器平均温度变化值, $^\circ\text{C}$ 。

(3) 鼓胀效应

鼓胀效应是在温度场变化下油管内压力增加使油管鼓胀或变成球形状态,该效应产生的轴向力计算如下:

$$F_g = -0.6 \times (\Delta p_{ia} A_i - \Delta p_{oa} A_o) \quad (6)$$

式中: F_g 为鼓胀效应产生的力, N; Δp_{ia} 为油管平均压力的变化, Pa; A_i 为油管内径面积, m^2 ; Δp_{oa} 为环空平均压力的变化, Pa; A_o 为油管内径面积, m^2 。

(4) 弯曲效应

测试产量变化引起测试管柱内压力变化大于环空压力,则会形成压力弯曲效应,该效应使油管

缩短从而产生轴向力,缩短量计算公式如下,根据管柱长度变化值,应用弹性力学原理,参考弯曲效应轴向力计算方法可得出结果。

$$\Delta L = \frac{-r^2 A_p^2 (\Delta p_i - \Delta p_o)^2}{8EI(W_s + W_i - W_o)} \quad (7)$$

式中: ΔL 为压力弯曲使油管的缩短量, m; r 为油管外径与套管内径的间隙, m; A_p 为封隔器内径面积, m^2 ; Δp_i 为封隔器处油管压力的变化值, Pa; Δp_o 为封隔器处环空压力的变化值, Pa; E 为弹性模量, Pa; I 为油管惯性矩, m^4 ; W_s 为油管重量, N/m; W_i 为油管内液体重量, N/m; W_o 为环空液体重量, N/m。

2.3.2 影响因素敏感性分析

(1) 产量的影响

当测试产量从 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,封隔器处的温度逐渐升高,封隔器所受的轴向载荷逐渐降低,如图4所示。产生该现象是因为随着测试产量的增大,井筒传热加快,一方面环空压力升高,封隔器上下承受压差增大,另一方面弯曲效应和鼓胀效应逐渐减小,轴向载荷逐渐趋于稳定。

(2) 测试制度的影响

常规气井测试一般采用二开二关的测试程序,初开井主要是为了清喷液垫,求取地层原始压力,二开井主要是求产和测试储层压力恢复等情况。深水气井测试制度除了满足地质需求外,还要预防测试过程中管柱内水合物的生成及堵塞、封隔器失封等风险,以保障测试工程作业安全顺利^[14]。目前深水测试也创新形成了一开一关测试程序,在缩短测试时间的同时实现了二开二关功能,降低了测试风险,从图4中可以看出,一开一关测试制度对封隔器产生的载荷相对于二开二关制度较小,也验证了一开一关测试程序的安全性。

(3) 环空流体类型的影响

深水测试通常根据地层压力情况选用适当密度的盐水作为环空测试液体系,测试液体系的热传导及流变性能对测试期间的温压场影响较大,由图5可知,同一测试液体系在不同测试产量下产生的封隔器载荷变化不大,但不同密度的测试液体系在相同测试产量下承受载荷差异较大,测试液密度提高,载荷增大;相同密度的测试液体系,使用钻井液产生的载荷比盐水大。

(4) 预提力的影响

选择测试产量 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工况下,分析对测试管柱施加一定的预提力影响结果(负值表示深

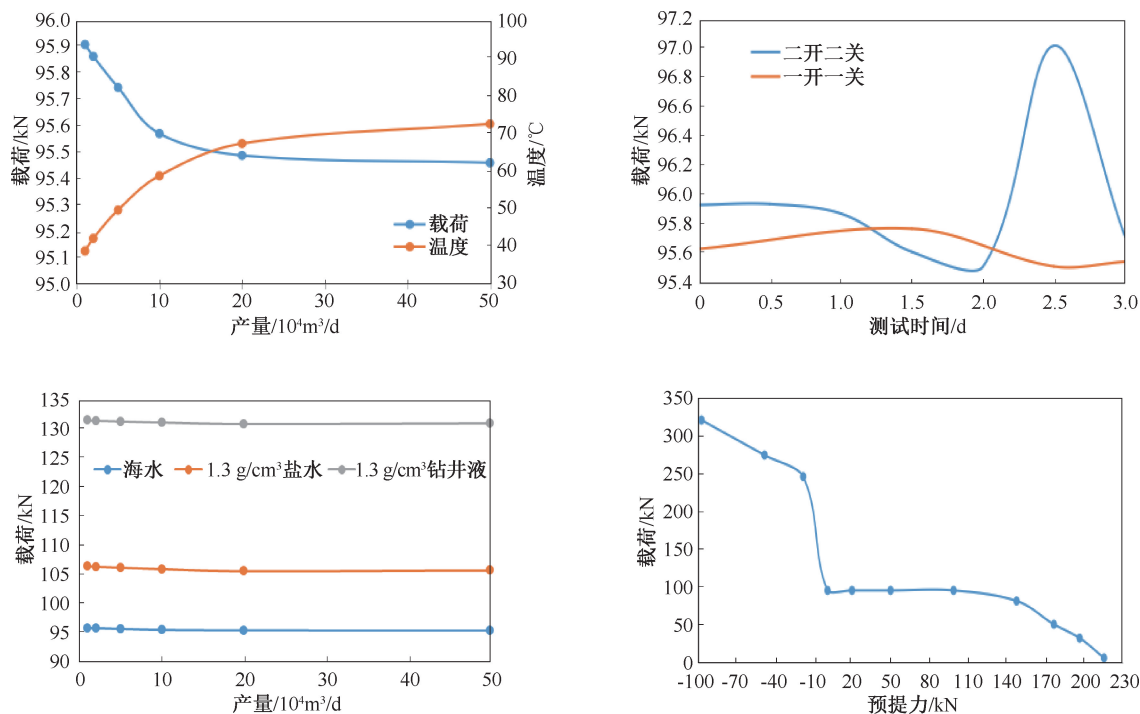


图 4 封隔器载荷影响因素敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of factors affecting the packer load

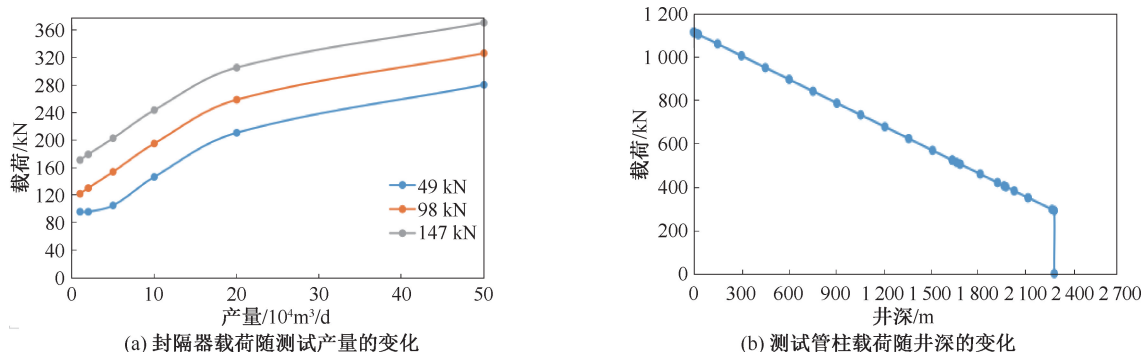


图 5 封隔器解封过程载荷分析

Fig. 5 Load analysis of the unpacking process of the packer

水测试期间半潜式平台升沉可能引起施加的作用力方向朝下)。从图 5 可知,当封隔器所受负方向预提力时,即管柱受压时承受的载荷较大,随着负方向预提力的减小轴向载荷逐渐减小;当封隔器所受预提力在 0~100 kN 时轴向载荷保持稳定,当预提力超过 100 kN 时,随着预提力的逐渐增大封隔器轴向载荷逐渐减小,直至受力呈中和状态。

2.3.3 封隔器控制措施分析

通过以上分析可知,深水气井测试制度、测试液体系以及测试过程中对管柱施加的预提力对封隔器轴向受力影响较大。

(1)测试工作制度是根据地质勘探要求而综合制定的,为达到深水勘探和产量落实的目的,工程

实际中既要满足工程施工要求,也要考虑深水勘探开发的高风险和高成本综合制定。

(2)测试液体系的热传导性对调控环空液体的压缩膨胀具有重要作用,从而影响管柱及封隔器受力状态,深水气井测试一般使用导热系数较好高密度盐水作为测试液,而对于超深水气井测试也可以选择具有保温性能的测试液体系,通过调节环空测试液体系的热传导性能可以对环空流体进行提前优选。

(3)测试过程中对管柱施加预提力对封隔器受力有一定影响,测试期间为保持管柱受力状态平稳,可根据作业海况采用浮式钻井平台的升沉补偿装置进行动态调节。

2.4 封隔器解封过程受力状态分析

常规封隔器的解封方式有上提管柱解封和旋转解封等方式,深水气井测试所用封隔器通常为上提解封方式。解封过程中封隔器需要克服油管自重、液体压力、封隔器胶筒以及其他工具的摩擦力,以及由弯矩引起的附加轴向力和封隔器引起的压缩力等综合轴向力作用,解封力表现为井口指重表读数与正常悬重相比首先上升,然后下降至管柱整体重量,说明封隔器已解封。

图 5(a)为不同测试制度完成关井后对封隔器解封,不同上提力工况下封隔器的载荷情况,从图中可以看出,在不同测试产量后,对封隔器施加的上提力越大则封隔器受到的载荷越大,且随着产量的逐渐增大,封隔器所受到的载荷逐渐增大,即表明产量越高,测试气体对封隔器产生的上顶力越大,对封隔器的解封起促进作用。图 5(b)为封隔器解封时测试管柱的整体载荷情况,从图中可以看出,设定该封隔器的解封力为 30 t,即在上提解封封隔器的过程中,当封隔器坐封位置的上提力达到解封力时该封隔器解封,此时井口处管柱受力最大。

图 6 为根据封隔器参数所绘制的性能信封曲线,横坐标表示封隔器在工作中所承受的上下压差值,纵坐标表示轴向拉力或压力值,根据本井测试工况进行模拟验算,得出不同测试作业情况下封隔器与管柱之间的受力状态均位于包络线以内,测试工况满足作业要求。

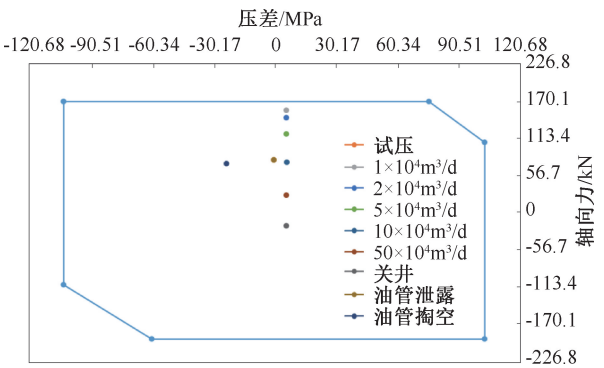


图 6 封隔器性能信封曲线
Fig. 6 Performance envelope curve of the packer

3 现场应用情况

BD21-X 井为南海琼东南盆地某深水探井,该井水深 1 448 m,井深 5 512 m,预测井底温度约为 170 ℃,属于深水高温井。该井测试选用甲酸钾盐水作为测试液,柴油作为测试液垫,测试管柱为外径 114.3 mm 的 T95 油管,选用 Quantum Max 插入式封隔器进行测试,插入密封设计插入长度为 2~3 m,封隔器上下入两个压力计托筒,监测井下压力。现场测试期间在射孔、放喷、关井等不同工况下测试管柱会产生相应的伸缩量,为保证封隔器插入密封位于封隔器胶筒内,根据封隔器全过程受力分析计算不同工况下现场下压测试管柱的重量如表 2 所示。现场应用期间保障了封隔器插入密封动态位于密封筒内,补偿了管柱伸缩引起的管柱位置变化,最终该井测试管柱密封有效,保障了测试作业的安全顺利。

表 2 不同生产方案下现场下压测试管柱重量

Table 2 Weight of on-site downforce under different production schemes

管柱伸缩量/生产方案	射孔 36.54 MPa	25 (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	35 (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	50 (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	关井井口保留 压力 10.34 MPa	关井井口保留 压力 3.45 MPa
共同作用/m	-0.465	0.507	0.557	0.658	-0.952	-0.955
现场下压管柱重量/t	14.51	10.89	12.25	14.97	26.76	27.22

4 结论

(1)通过分析深水测试管柱结构及深水测试作业特点,考虑测试管柱载荷及封隔器在坐封、测试生产及解封过程中的多种影响因素,建立了测试管柱下入力学行为判断方法,评估了封隔器坐封过程受力状态,分析了预提力、温度效应、鼓胀效应和弯曲效应对测试管柱影响,形成了封隔器测试过程以及解封过程受力状态评估方法。

(2)结合深水测试管柱受力影响因素敏感性分

析,得出对封隔器轴向受力影响程度从高到低依次是深水气井测试制度、测试液体系、测试过程中对管柱施加的预提力、产量。

(3)现场应用中通过深水测试封隔器全过程受力计算和控制措施分析,保障了 BD21-X 井封隔器插入密封动态位于密封筒内,补偿了管柱伸缩引起的管柱位置变化,最终该井测试管柱密封有效,测试作业安全顺利。

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] 孙宝江,张振楠.南海深水钻井完井主要挑战与对策[J].石油钻探技术,2015,43(4):1-7.
SUN Baojiang, ZHANG Zhennan. Challenges and counter-measures for the drilling and completion of deepwater wells in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(4):1-7.
- [2] 任冠龙,孟文波,余意,等.深水气井测试井筒温度场调控技术[J].化学工程与装备,2023,(4):111-113.
REN Guanlong, MENG Wenbo, YU Yi, et al. Wellbore temperature field control technology in deepwater gas well[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023, (4): 111-113.
- [3] 彭作如,张俊斌,程仲,等.南海M深水气田完井关键技术分析[J].石油钻采工艺,2015,37(1):124-128.
PENG Zuoru, ZHANG Junbin, CHENG Zhong, et al. Key well completion technology of deepwater gasfield in M block of the South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 124-128.
- [4] 杨立龙,吴轩.深水完井测试管柱结构设计分析[J].石化技术,2021,28(12):47-48.
YANG Lilong, WU Xuan. Structural design and analysis of deepwater completion testing string [J]. Petrochemical Industry Technology, 2021,28(12):47-48.
- [5] 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 deep-water [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):138-143.
- [6] 刘洪涛,沈新普,刘爽,等.高温高压气井多封隔器管柱完整性分析方法及应用实例[J].天然气工业,2020,40(7):83-89.
LIU Hongtao, SHEN Xinpu, LIU Shuang, et al. Integrity analysis method of multi-packer string in HTHP gas wells and its application cases[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7):83-89.
- [7] 张智,王波,李中,等.高压气井多封隔器完井管柱力学研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(6):172-178.
ZHANG Zhi, WANG Bo, LI Zhong, et al. Mechanical study of completion string with multi-packer for high pressure gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016,38(6): 172-178.
- [8] 张宏伟.深斜井封隔器坐封解封过程管柱力学分析[D].成都:西南石油大学,2020:21-27.
ZHANG Hongwei. Mechanical analysis of string during setting and unsealing of packer in deep inclined well[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020:21-27.
- [9] 管志川,李成,许玉强,等.深水高温高压井管柱固定型封隔器失封及控制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):65-72.
GUAN Zhichuan, LI Cheng, XU Yuqiang, et al. Failure and control of fixed down-hole packer in deep water HPHT wells[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(3):65-72.
- [10] 华琴.高温高压深井试油与完井封隔器卡瓦力学行为模拟[J].石油和化工设备,2020,23(1):5-9.
HUA Qin. Simulation of mechanical behavior of packer slip in high temperature and high pressure deep well testing and completion[J]. Petro & Chemical Equipment, 2020, 23(1):5-9.
- [11] 刘曼.试油完井封隔器力学行为仿真及性能试验研究[D].西安:西安石油大学,2019:11-13.
LIU Man. Study on mechanical behavior simulation and performance experiment of packer for testing and completion [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019:11-13.
- [12] 杨帅.高压油气井完井封隔器系统力学特性分析[D].西安:西安石油大学,2021:21-24.
YANG Shuai. Mechanical characteristic analysis and working behavior simulation of completion packer system in high pressure oil and gas wells. [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021:21-24.
- [13] 杨佰阳.封隔器胶筒试验装置的研制及应用[J].化学工程与装备,2021(8):216-217.
YANG Baiyang. Development and application of a testing device for packer rubber cylinder[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2021(8):216-217.
- [14] 吴木旺,梁豪,姜洪丰.琼东南盆地深水区高渗气井测试设计关键技术[J].中国海上油气,2015,27(6):31-36.
WU Muwang, LIANG Hao, JIANG Hongfeng. Key technology of testing design for high-permeability gas well in deep water area of the Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015,27(6):31-36.

编辑 吴志力

第一作者简介:任冠龙,男,1988年出生,高级工程师,2014年毕业于中国石油大学(华东)获硕士学位,现主要从事海洋石油钻完井与测试研究工作。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。