

## “FPSO+CTV+VLCC” 深海原油转驳系统的旋转接头密封仿真分析

高军翔<sup>1\*</sup> 李金福<sup>2</sup> 谭桂斌<sup>2</sup>

1 广州机械科学研究院有限公司, 广东 广州 510535

2 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

**[摘要]**以“FPSO+CTV+VLCC”三浮体外输原油作业的管道旋转接头高参数密封系统为研究对象,针对泛塞封蓄能密封装置这一典型结构,建立综合考虑密封装置静摩擦时微间隙介质流体力学行为、密封件及管端宏观固体力学行为、表面微凸体瞬态接触力学行为等多物理过程耦合的非线性密封数值仿真模型,以泄漏量、接触压力、接触区域宽度等作为目标参数,通过有限元仿真和数值计算方法,研究分析在静密封条件下三种不同结构的泛塞封在不同介质压力和不同介质下的密封性能,并选出了其中的较优结构。

**[关键词]**深海原油;管道;静密封;流体;密封性能

DOI: 10.33142/ec.v5i7.6349

中图分类号: U674.38

文献标识码: A

## Simulation Analysis of Elastic Energy Storage Seal of "FPSO+CTV+VLCC" Rotary Pipeline Joint at Deepwater

GAO Junxiang<sup>1\*</sup>, LI Jinfu<sup>2</sup>, TAN Guibin<sup>2</sup>

1 Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong, 510535, China

2 School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangdong, Guangzhou, 510006, China

**Abstract:** Taking the "FPSO+CTV+VLCC" three-floating high-parameter sealing system for crude oil transportation externally as the research object, aiming at the typical sealing structure of the pan-plug seal, the hydrodynamic behavior of the micro-gap medium and the sealing parts were established considering the static friction of the sealing device. Nonlinear sealing numerical simulation model coupled with multiple physical processes such as the macroscopic solid mechanical behavior of the pipe end, the transient contact mechanical behavior of the surface asperity, etc. The sealing performance of three different structures of plugging seals under different media pressures and media under static sealing conditions is studied and analyzed, and the optimal structure is selected.

**Keywords:** offshore oil field; pipelines; static seal; fluid; sealing performance

中国南海油气资源极为丰富,整个南海盆地群石油资源量约230-300亿吨。海洋极端环境以及我国原油大多有“三高”特点(高凝点、高含蜡、高粘度),使得我国深海原油输送面临了考验,高风险、高投资也是全球海洋油气开采的瓶颈难题。“FPSO+CTV+VLCC”是一种三浮体外输原油作业模式,其工作原理是CTV利用其DP装置的推进功能实现FPSO的系泊定位,再由大口径的输油软管将FPSO原油转驳至VLCC等常规油轮,实现离岸深水FPSO的原油外输<sup>[1]</sup>,其中,系泊设备旋转接头是一种具有旋转、高压、防泄漏等多种功能的装置<sup>[2]</sup>,其结构简图如图1所示。

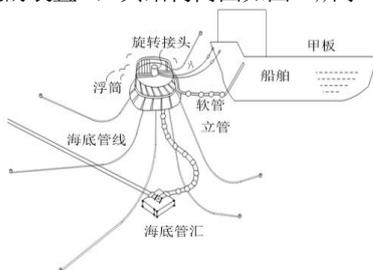


图1 深海油田旋转管输接头的简图

目前,管道输送的作用相当于深海油气田生产的命脉,且有利于保护海洋生态及维护国家海洋权益<sup>[3]</sup>。而“FPSO+CTV+VLCC”三浮体柔性链接系统的密封磨损、变形、传热、摩擦分布、多相介质等都会极大缩短密封圈的寿命和安全性,泄漏风险剧增。其中,“FPSO+CTV+VLCC”三浮体系统属于旋转密封类型;由于复杂的介质环境,旋转接头通常采用弹性蓄能密封圈(又称泛塞封)作为密封元件,密封主体材料为改性PTFE,PTFE材料耐介质性能优异,摩擦系数小,使用寿命长等优点<sup>[3]</sup>,弹性补偿元件的材料为高弹性不锈钢。目前,针对泛塞封仿真分析公开文献较多,贾晓红等<sup>[4-5]</sup>建立了弹性蓄能密封圈的二维轴对称模型,大幅度提高了仿真分析的效率,研究了泛塞封的密封特性,并验证了该模型的正确性。李晓芬<sup>[6]</sup>、王帅对超低温弹簧蓄能密封圈密封特性进行了研究;高涵宇<sup>[7]</sup>等对液滑环弹簧蓄能密封圈性能进行了研究。

本文基于二维轴对称的弹泛塞封有限元仿真模型,分析了三种不同结构形式的泛塞封在静密封条件下所产生的接触压力、接触区域宽度等,并基于流固耦合的原理分

析管道旋转接头的泄漏规律,对比这三种结构分析得到较优的结构,为深海原油输送以及旋转接头结构系统的设计制造提供参考。

## 1 泛塞封仿真分析模型

### 1.1 有限元仿真模型

#### 1.1.1 几何模型

本文构建了三种不同结构形式的泛塞封的有限元模型,其二维截面图如图2所示,因为泛塞封的形状和受力具有圆周对称的特点,所以可以通过建立二维轴对称模型进行分析,以节省计算资源提高计算速度。该模型由动环、静环、PTFE 夹套和蓄能弹簧组成,动环的尺寸为  $\phi 1325 \times \phi 1283 \times 15.3$ ,以此尺寸作为参考对三种不同结构的泛塞封进行仿真分析,为方便下文分析描述,本文将三种不同的泛塞封结构分别命名为结构 a、结构 b、结构 c。

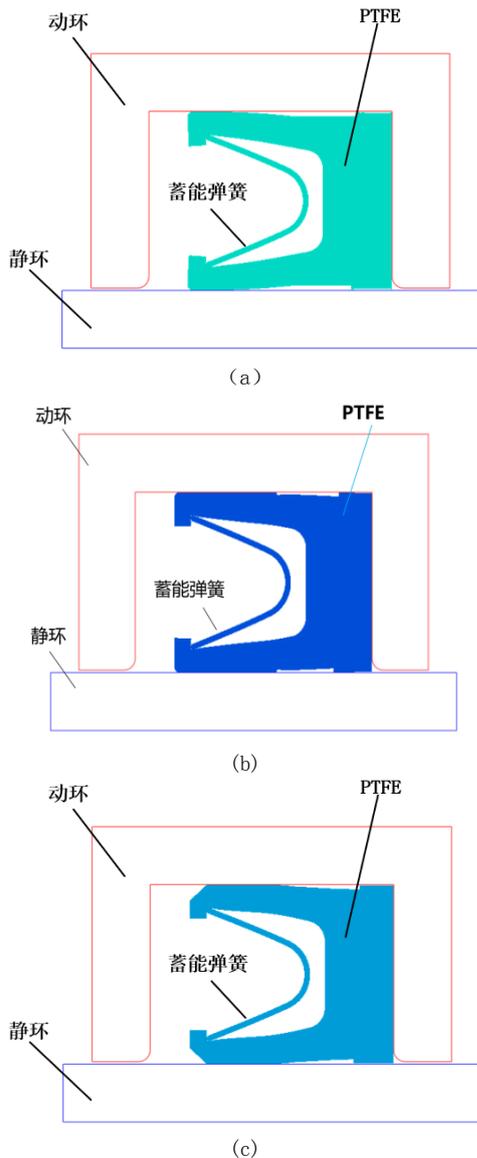


图2 三种结构泛塞封二维轴对称模型

#### 1.1.2 材料属性

旋转密封管输接头的动环和静环刚性远超 PTFE 材料的刚性,故等效成解析刚体进行仿真分析,泛塞封由不锈钢材料的蓄能弹簧和 PTFE 材料的密封主体组成,分析所用的密封件材料属性如表1所示。在仿真计算过程中,忽略温度对密封件的影响,令蓄能弹簧等效成二为轴对称模型,PTFE 材料和蓄能弹簧材料仅设置弹性和塑形,忽略其他属性的影响。

表1 泛塞封材料属性

材料	弹性模量 MPa	泊松比	屈服强度 MPa
不锈钢	199900	0.3	550
PTFE	405	0.45	6.6

#### 1.1.3 相互作用与边界条件

文中 PTFE 夹套与动环和静环之间的接触、PTFE 与蓄能弹簧的接触均采用具备切向行为的罚函数计算,摩擦系数分别取 0.1 和 0.16;另外 PTFE 与蓄能弹簧的接触之间设置硬接触,避免两面之间发生穿透,在设置接触过程中,选择刚度较大的动环、静环、弹簧等作为主面,PTFE 夹套作为从面计算。为等效模拟泛塞封的真实安装情景,加入边界条件时,先加力把 PTFE 夹套撑开,再把所加的力再下一分析步取消激活,让 PTFE 夹套释放与蓄能弹簧接触,实现等效装配。在设置相互作用时,上下两唇口边界处采用压力渗透的方式进行加压,此种加压方式能模拟原油等介质在工作时的真实加压过程,能后精确的找到密封唇与动、静两环的分离与接触临界点<sup>[8]</sup>。

## 1.2 数值分析模型

### 1.2.1 接触力学模型

Greenwood-Williamson 模型是一个统计学模型<sup>[9]</sup>,其将两个粗糙表面的接触简化为了一个绝对光滑的刚性表面与另一个粗糙面的纯弹性接触,并且将粗糙面的粗糙峰认为是规则的半球形。利用 GW 粗糙峰微观接触模型,可进行粗糙峰接触力学分析,进而对接触压力进行求解。在接触力学分析中,假设:密封接触微凸体的高度服从高斯分布且具有相同的曲率半径,并忽略各微凸体间的相互作用。在 PTFE 夹套与动环和静环接触时,动环和静环可视为刚体,弹性模量可用等效刚度代替,则单个微凸体产生的微观接触压力可表示为:

$$w = \frac{4}{3} E' R^{1/2} (z - d)^{3/2} \quad (1)$$

其中,  $E'$  代表两个接触面的等效刚度。

PTFE 夹套与动环、静环产生的微观接触压力力可表示为:

$$E' = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \quad (2)$$

$$p_{con} = \frac{4}{3} \eta E' R^{1/2} \int_d^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-z^2/2\sigma^2} (z-d)^{3/2} dz \quad (3)$$

其中,  $\rho$  为微凸体密度;  $E'$  为 PTFE 弹性模量;  $\eta$  为 PTFE 泊松比;  $R$  为微凸体曲率半径;  $\sigma$  为波峰标准差;  $d$  为微凸体高度;  $z$  为微凸体平均高度与刚性表面之间的分离距离。

### 1.2.2 数值计算流程

数值计算时应考虑用流固耦合的方法进行分析,流固耦合的目的就是将流体力学分析、宏观固体力学分析、微观粗糙峰接触力学分析等多物理过程进行有机耦合,通过迭代算法,使最终达到三力平衡的状态。首先通过有限元模型的固体力学分析获得密封圈工作时宏观静态接触压力大小,既获得 PTFE 夹套和动、静环的接触压力的分布;再根据粗糙峰接触力学分析获得微观接触压力的大小,即获得 PTFE 夹套表面微凸体的压力分布;通过流体力学分析可以获得介质压力的分布。根据三力平衡,介质压力分布会影响微凸体接触压力分布,微凸体接触压力分布会影响密封泄漏通道平均高度分布,最终,泄漏通道平均高度影响介质压力分布<sup>[10]</sup>。综上所述,使微凸体接触压力等于宏观静态接触压力与介质压力之差,用数值计算方法反复迭代直至求解的介质压力分布收敛,从而计算出旋转管接头的静密封泄漏量等数据,其数值计算流程如图 3 所示。

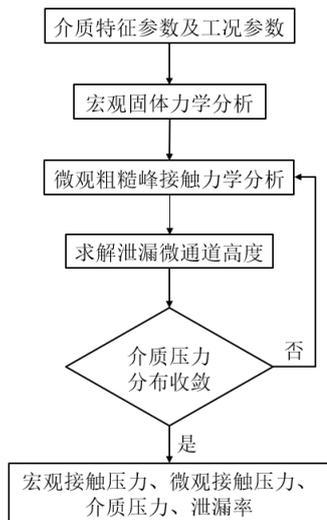


图 3 数值计算流程

## 2 数值仿真结果分析

文章主要以泛塞封下唇口为研究对象,通过上述数值仿真方法对三种不同结构的泛塞封进行分析,以接触压力、接触区域宽度、泄漏量等作为目标参数,研究不同介质和不同介质压力对泛塞封密封性能的影响。

### 2.1 介质压力的影响

本文考虑了不同介质压力对三种不同结构泛塞封密封性能的影响,在有限元仿真分析中,在泛塞封受介质压力侧,分别设置的介质压力为 0.5、2、3、5MPa,研究这四组不同介质压力下,泛塞封密封区域的最大接触压力、

接触区域宽度等参数随介质压力的变化规律。

#### 2.1.1 介质压力对结构 a 的影响

结构 a 的有限元仿真计算结果及密封区域的接触压力分布曲线如表 2、图 4 所示。由计算结果可知,在介质压力较小时,由于蓄能弹簧的补偿作用,密封接触区域的最大接触压力较大;最大接触压力随介质压力的增大呈现先减小后增大的趋势,接触区域宽度随介质压力增大而增大;由接触区域压力分布曲线可看出,在蓄能弹簧补偿区域的接触压力出现峰值,随后逐渐减小;在接触区域宽度 5mm 左右处的密封圈腰部区域会出现局部的应力集中,接触压力会出现先增大后减小趋势,而总体的接触压力会随介质压力的增大而增大。

表 2 结构 a 计算结果

介质压力 MPa	最大接触应力 MPa	接触区域宽度 mm
0.5	20.84	1.89
2	18.91	4.62
3	19.90	5.55
5	22.55	6.76

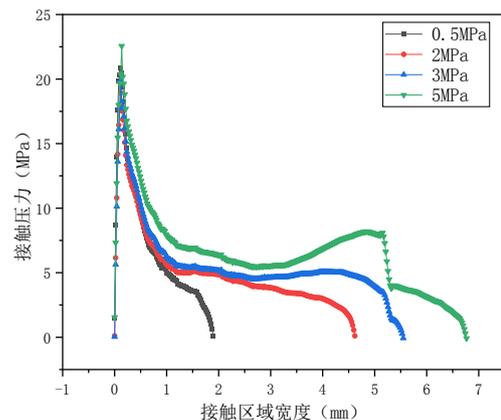


图 4 结构 a 接触压力分布曲线

#### 2.1.2 介质压力对结构 b 的影响

结构 b 的有限元仿真计算结果及密封区域的接触压力分布曲线如表 3、图 5 所示;可发现密封接触区域的最大接触压力波动较小,说明蓄能弹簧对结构 b 具备良好的补偿作用;由接触压力分布曲线可以看出,应力在密封唇左右两端出现应力集中现象,所以中间段的接触压力较小;在低压 0.5MPa 时,中间段被左右两端的应力抬起,出现了不接触现象,所以此段的接触压力为零。

表 3 结构 b 计算结果

介质压力 MPa	最大接触应力 MPa	接触区域宽度 mm
0.5	21.91	4.74
2	20.40	8.58
3	20.76	8.60
5	21.30	8.60

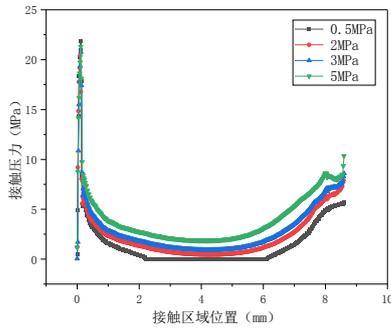


图5 结构b接触压力分布曲线

### 2.1.3 介质压力对结构c的影响

结构c的有限元仿真计算结果及密封区域的接触压力分布曲线如表4、图6所示。可以看出，最大接触压力随介质压力的增大而减小，说明蓄能弹簧的补偿作用随着介质压力的增大而减小；计算结果的规律与结构a的计算结果相似，接触区域宽度随介质压力增大而增大；在接触区域中后段会出现局部先增大后减小现象，原因也是该段的出现局部的应力集中现象。

表4 结构c计算结果

介质压力 MPa	最大接触应力 MPa	接触区域宽度 mm
0.5	34.10	0.76
2	21.50	3.15
3	16.74	4.30
5	15.95	5.59

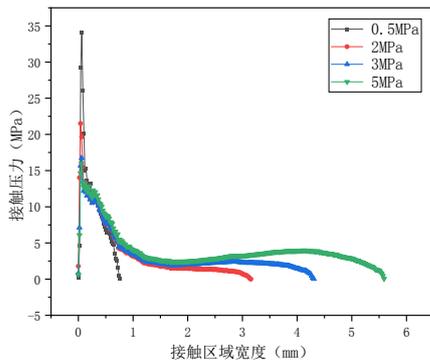


图6 结构c接触压力分布曲线

### 2.2 介质的影响

通过以上固体力学分析，得到了泛塞封的宏观接触压力分布，本文通过上述数值计算方法，研究原油、柴油、润滑油等不同粘度介质对三种结构泛塞封的泄漏规律。文中计算时原油、柴油、润滑油的动力粘度分别为0.404、0.251、0.074。

图7、图8、图9为不同结构泛塞封的静密封泄漏规律曲线，由图可看出，当介质粘度减小时，泛塞封的泄漏量会逐渐增大；随着介质压力的增大，泛塞封的泄漏量也会逐渐增大。对比三种介质在结构a、b、c中的泄漏量，

以中最大静压为5MPa时为例，可以看出，三种介质在结构b中的泄漏量均为最大，所以结构b的密封性能比结构a、c的密封性能差。

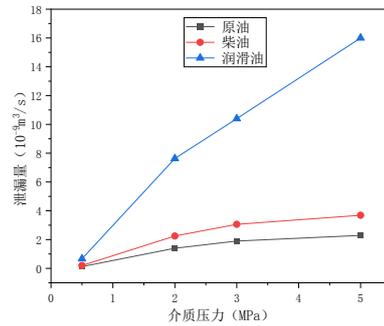


图7 密封结构a泄漏规律曲线

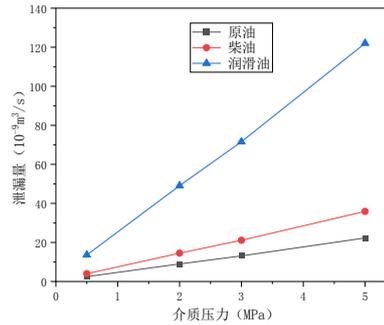


图8 密封结构b泄漏规律曲线

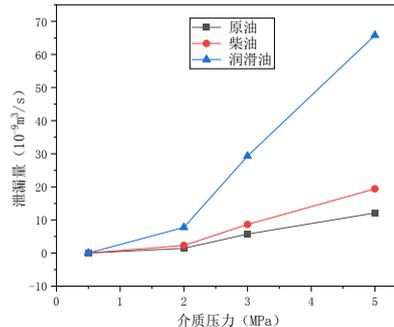


图9 密封结构c泄漏规律曲线

### 2.3 结构优选

在深海原油输送用旋转接头的设计工作压力为2MPa，本文以设计工作压力的1.5倍（3MPa）研究了三种结构泛塞封的接触压力曲线和接触宽度，并以高凝高粘原油作为介质，对比原油在三种结构中的泄漏量，对比和优选了较优密封结构<sup>[11]</sup>。

图10为最大静压为3MPa时的接触压力分布曲线，可以看出结构b的接触区域宽度最大，结构c的接触区域宽度最小，由上述分析已知结构b的密封性能劣于结构a、c，如图11所示，原油在0.5MPa和2MPa时，结构a和结构c的密封性能几乎一致，但随着最大静压的增大，结构a的密封性能会较优于结构b，综上所述，结构a是三种结构中的较优结构。

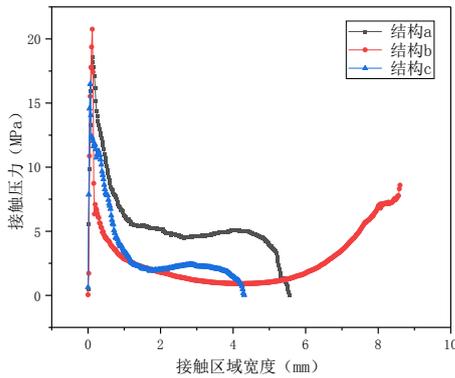


图 10 介质压力 3MPa 时三种结构的接触压力分布曲线

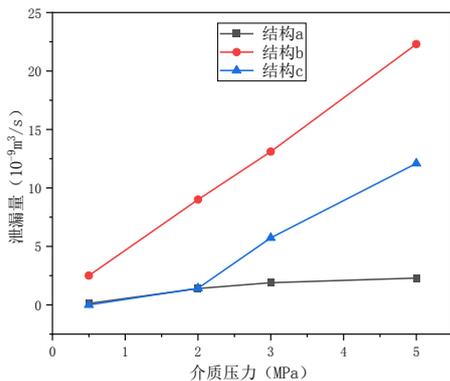


图 11 原油在三种不同密封结构中的泄漏规律

### 3 结论

本文通过有限元仿真和数值计算，针对“FPSO+CTV+VLCC”三浮体原油转驳系统的旋转接头三种密封结构进行仿真分析，得到以下结论：

(1) 在介质压力的影响方面，接触区域宽度、泄漏量于介质压力成正比；泛塞封在密封接触区域的最大接触压力和结构有关，介质压力对结构 a、b 的最大接触压力影响不大，对结构 c 的影响较大。

(2) 在介质的影响方面，泄漏量和介质的动力粘度成反比；在同类液体介质的情况下，由泄漏量的仿真和计算结果，表明了结构 a 的密封性能优于其余两种结构。

### [参考文献]

- [1] 廖江潇. "FPSO+CTV+普通油轮"原油转运模式探讨[J]. 现代制造技术与装备, 2017(9): 2.
  - [2] 郑继平, 熊大柱, 覃刚, 等. 单点系泊原油输送装置旋转接头的静力学分析及密封性能评估[J]. 船海工程, 2017, 46(6): 173-177.
  - [3] Rae P J, DATTELBAUM D M. The properties of poly (tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression[J]. Polymer, 2004, 45(22): 7615-7625.
  - [4] 贾晓红, 李坤. 弹簧蓄能密封圈轴对称仿真模型建模方法研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(11): 1-5.
  - [5] 贾晓红, 李坤. 弹簧蓄能密封圈密封系统的密封特性研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(12): 116-120.
  - [6] 李小芬, 叶小强. 超低温弹簧蓄能密封圈密封性能及试验研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(11): 136-142.
  - [7] 高涵宇, 李佳君, 杜彬, 等. 单点系泊系统液滑环弹簧蓄能密封圈密封性能研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(12): 75-80.
  - [8] 陈晨, 钱国庆, 许兴彦, 等. 基于 ABAQUS 的流体压力渗透 O 形圈密封性能仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(2): 86-90.
  - [9] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences, 1966, 295(1442): 300-319.
  - [10] 吴凡, 郭飞, 高燕, 等. 基于流固耦合的橡胶 O 形圈密封泄漏计算方法[J]. 润滑与密封, 2022, 47(1): 23-29.
  - [11] 怀利敏, 李成龙. 单点系泊输油旋转接头结构设计与分析[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 91-95.
- 作者简介: 高军翔(1987.3-)男, 2012年华南师范大学获硕士学位, 工程师, 研究方向为复杂机电装备与密封可靠性技术, 目前就职于广州机械科学研究院有限公司, 任密封研究所科研部副部长一职。