

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2013.04.008

## 隔水管伸缩接头密封性能分析\*

温纪宏 陈国明 畅元江 刘秀全 刘玉亮

(中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心 山东青岛266580)

**摘要:** 介绍深水钻井隔水管伸缩接头的密封结构及其密封机制, 确定伸缩接头密封圈密封失效模式和失效判据; 以隔水管伸缩接头密封环为研究对象, 利用 ABAQUS 软件建立其有限元分析模型, 分析密封环在不同驱动压力和不同摩擦率下的密封性能。结果表明, 驱动压力、摩擦因数均对伸缩接头密封圈最大接触应力有一定的影响, 正常使用范围内, 能够保证其正常密封性能; 驱动压力一定, 剪切应力随着摩擦因数的增加先缓慢减小后显著增大。

**关键词:** 伸缩接头; 密封性能; 驱动压力; 密封环

**中图分类号:** TE58; TB42 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2013)4-036-4

## Sealing Performance Analysis of Riser Slip Joint

Wen Jihong Chen Guoming Chang Yuanjiang Liu Xiuquan Liu Yuliang

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

**Abstract:** The sealing structure and sealing mechanism of riser slip joint used for deepwater drilling were introduced, the failure mode and criteria of slip joint seal were established. The finite element model of slip joint seal was established by the software of ABAQUS, and the seal performances of slip joint seal under different drive pressure and friction coefficient were analyzed. Results show that under certain compressing rate, Von Mises stress is increased with the increase of drive pressure. The drive pressure and friction coefficient have some influence on contact pressure. Under certain drive pressure, shear stress is firstly decreased slowly and then increased obviously with the increase of friction coefficient.

**Keywords:** slip joint; sealing performance; drive pressure; seal ring

隔水管伸缩接头安装于海洋隔水管系统的顶部, 上部挠性接头与隔水管短节之间, 用于补偿钻井船的升沉运动, 提供分流器与隔水管的连接方式, 同时为隔水管辅助管线至钻井船柔性软管提供终端<sup>[1]</sup>。在海洋石油钻井中, 钻井液通过伸缩接头时, 伸缩接头密封环失效或驱动压力系统失效导致大量钻井液泄漏事故发生<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者对隔水管连接单元的密封有了一定的研究。国外 Upton<sup>[2]</sup>对隔水管伸缩接头密封装置失效进行了调研, 并从安装、操作、维修、监测及后台控制系统等角度提出了可提高伸缩接头密封系统可

靠性的做法; Montgomery<sup>[3]</sup>对隔水管接头节流压井管线密封及失效形式展开了研究; Cary<sup>[4]</sup>提出了隔水管接头密封失效的修复方案。国内张怡等人<sup>[5]</sup>对隔水管 Y 型密封圈及副主管线双弹性体密封圈进行了有限元分析。然而针对隔水管伸缩接头密封性能的研究却很少。

本文作者采用 ABAQUS 软件<sup>[6]</sup>, 对隔水管伸缩接头密封环进行有限元分析, 确定伸缩接头密封环的失效模式与失效判据, 探讨驱动压力和摩擦因数对伸缩接头密封环密封性能的影响, 为伸缩接头密封结构的参数设计提供参考。

### 1 隔水管伸缩接头密封结构及其密封机制

目前, 在常规的石油机械产品中常用的密封形式多为 O 形密封圈、密封圈加挡圈及由 O 形圈发展的矩形圈、星形圈等形式, 这些密封方式能够满足一般用途的密封需要。但对于海洋作业环境中的隔水管系统重要连接单元——伸缩接头而言, 自身质量大, 内、外筒伸缩运动频繁, 磨损快, 海水腐蚀等现象使得常规的密封方式无法保证良好的密封性能, 且不便

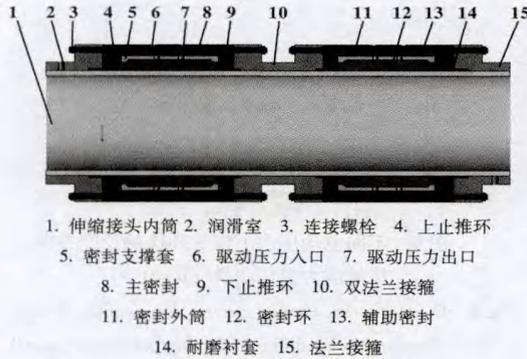
\* 基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05026-001-05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (11CX05009A)。

收稿日期: 2012-10-26

作者简介: 温纪宏 (1987—), 男, 硕士研究生, 从事深水钻井技术与装备方面的研究. E-mail: wenjihong2006@163.com.

通讯作者: 陈国明 (1962—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋油气开采安全保障技术、石油装备安全可靠性工程等方面的研究. E-mail: offshore@126.com.

于更换。为了保证隔水管伸缩接头正常的密封性能,且不影响钻井效率,采用半剖式气压或液压驱动橡胶密封环密封结构,由主密封总成和副密封总成构成的双密封系统,如图1所示。



1. 伸缩接头内筒 2. 润滑室 3. 连接螺栓 4. 上止推环  
5. 密封支撑套 6. 驱动压力入口 7. 驱动压力出口  
8. 主密封 9. 下止推环 10. 双法兰接箱  
11. 密封外筒 12. 密封环 13. 辅助密封  
14. 耐磨衬套 15. 法兰接箱

图1 隔水管伸缩接头密封结构

Fig 1 Sealing structure of riser slip joint

主密封总成工作时使用,副密封总成备用或在主密封密封环失效对其进行更换时使用。主、副密封总成的密封环均采用半剖式结构,更换方便。工作时,通过主密封总成密封环的压缩变形实现内、外筒密封,当需要密封较高压力时,通过密封外筒上的驱动压力入口向内加压,通过密封支撑套驱动密封环,可以实现高压密封;当需要密封较低压力时,过多的压力通过密封外筒上的驱动压力出口排出,实现低压密封。该密封结构可以满足伸缩接头在补偿升沉运动时,内、外筒环空的动密封需求,同时还可承受较大的隔水管载荷。

## 2 隔水管伸缩接头密封环有限元分析模型

橡胶结构的有限元分析属于非线性有限元范畴,其非线性<sup>[7]</sup>突出地表现在以下3个方面:(1)材料非线性,橡胶材料的应力应变关系是一个复杂的非线性函数,用应变能函数表示;(2)几何非线性,橡胶在力的作用下,一般伴随着大位移、大应变,其应变位移关系也是非线性函数;(3)边界非线性,密封计算的边界条件复杂,必须包含接触面的受力计算,呈非线性关系。ABAQUS 是进行有限元分析的有效工具,可对结构、载荷与边界条件进行模拟分析,同时考虑大变形、非线性等相应特点。因此,采用ABAQUS对伸缩接头密封环进行建模分析。

### 2.1 几何模型

对密封环进行有限元分析,鉴于其边界条件的复杂性,将密封环、上下止推环、内筒及密封支撑套作

为整体进行分析。根据密封结构的几何形状、材料和边界条件的特点,建立伸缩接头密封的二维轴对称模型。

### 2.2 材料模型

对于橡胶类物理非线性材料,一般采用 Mooney-Rivlin 模型来描述。其函数表达式为:

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (1)$$

式中:  $W$  为应变能密度;  $C_1$ 、 $C_2$  为材料 Mooney-Rivlin 系数;  $I_1$ 、 $I_2$  为第一、第二应变张量不变量。本文密封环采用橡胶材料系数为  $C_1 = 1.514$ ,  $C_2 = 0.473$ 。

### 2.3 载荷条件

伸缩接头密封分析载荷条件包括2个方面,首先驱动压力施加过程,即上下止推环、内筒位置固定不变,密封支撑套平移对密封环进行压缩;其次由于隔水管伸缩接头内部设有轴承,内外筒之间可以实现相互转动,以此实现对平台转动的抵消,相对于内外筒之间伸缩运动的频繁,旋转运动可以忽略,因此只对内筒设置纵向位移来模拟内筒相对外筒伸缩运动的摩擦力。

综上所述,所建立的伸缩接头密封有限元分析模型如图2所示。



图2 隔水管伸缩接头密封有限元分析模型

Fig 2 The sealing FEM of riser slip joint

## 3 隔水管伸缩接头密封失效模式与失效判据

伸缩接头长期处于内筒相对外筒做伸缩运动的状态,通常情况下认为伸缩接头密封失效是因为内筒外表面腐蚀导致表面不光滑所致,但即使内筒外表面光滑,也会发生伸缩接头密封环失效现象发生,如图3所示<sup>[2]</sup>。2007年3月12日,Shell海洋公司T O Deepwater Nautilus平台伸缩接头上空气供应管线断开,9桶成基泥浆泄漏进入海里<sup>[8]</sup>,事故原因为经受三次风暴的钻井隔水管张紧器软管破裂导致连接到伸缩接头上的空气供应管线缠绕和失效,伸缩接头中的空气压力降低使泥浆泄漏进入海里<sup>[9]</sup>。因此,关于伸缩接头密封失效判据,需要从接触应力、剪切应力2个方面进行考虑。



图 3 隔水管伸缩接头密封失效  
Fig 3 Riser slip joint sealing failure

### 3.1 最大接触应力

密封环在密封支撑套的挤压安装下,受到一种初始挤压或压缩作用,这种压缩作用提供了初始密封压力。后来通过外加空气压力使其进一步变形,与内筒外表面保持接触,这种压力传递到被密封表面上去。因此,密封环的接触应力由与初始压缩量有关的预压缩应力 $\sigma_0$ 和工作压力 $p$ 组成<sup>[10]</sup>,可以表示成:

$$\sigma_{x \max} = \sigma_0 + kp \quad (2)$$

式中: $\sigma_{x \max}$ 表示橡胶体在工况下所受最大接触应力; $\sigma_0$ 表示预压缩应力,一般与初始压缩率、密封圈与密封端面之间的摩擦系数有关; $p$ 表示工作压力; $k$ 表示工作应力和接触应力的线性比例,取决于泊松比 $\gamma$ ,其中 $0 < k \leq 1$ 。

为了保证密封环的密封性能,密封环最大接触应力需满足:

$$\sigma_{x \max} > p$$

### 3.2 剪应力

有限元计算得到密封环最大应力为 MPa 数量级,如果该应力超过密封环材料的剪切强度时,则密封环在此位置被撕裂,甚至可能会被剪断,造成密封失效,所以对于剪切应力引起的密封失效也要着重考虑保证密封下的剪切应力满足:

$$\sigma_{xy} < \tau_b \quad (3)$$

式中: $\sigma_{xy}$ 为密封环在驱动压力下所受最大的剪应力; $\tau_b$ 为密封环材料抗剪强度。

## 4 隔水管伸缩接头密封性能分析

### 4.1 伸缩接头密封环接触应力分析

#### 4.1.1 不同驱动压力下密封环接触应力分析

当伸缩接头内筒与密封环之间的摩擦因数 $\mu = 0.3$ 时,通过分析驱动压力分别为 1.0, 2.0 和 3.0 MPa 下伸缩接头密封环的接触应力,得出不同驱动压

力下接触长度方向的接触应力变化曲线如图 4 所示。

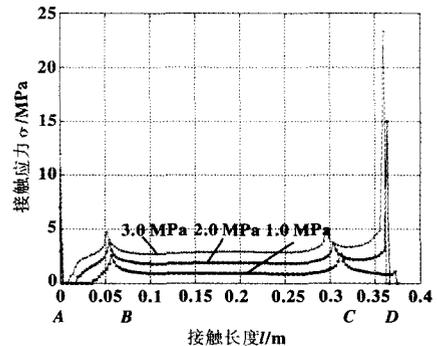


图 4 不同驱动压力下密封环接触长度方向接触应力变化曲线 ( $\mu = 0.3$ )

Fig 4 Contact stress change curves along contact length direction under different driving pressures ( $\mu = 0.3$ )

可知,不同的驱动压力下,密封环最大接触应力始终大于驱动压力,满足密封条件。此外,随着驱动压力的增加,橡胶体部分会被挤入内筒与止推环之间的空隙,因此,在间隙处,橡胶体最大接触应力会有一突变。

#### 4.1.2 不同摩擦因数下密封环接触应力分析

通过分析驱动压力 $p = 1$  MPa,伸缩接头内筒与密封环之间摩擦因数分别为 0.1、0.2 和 0.3 时密封环的接触应力,得出不同摩擦因数下密封环接触长度方向的接触应力变化曲线如图 5 所示。

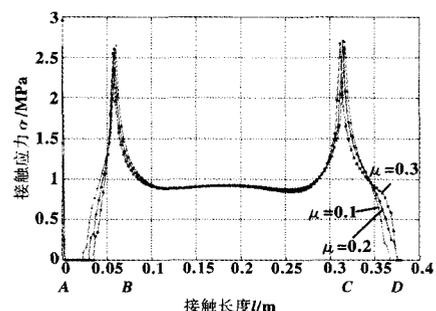


图 5 不同摩擦因数下密封环接触长度方向接触应力变化曲线 ( $p = 1$  MPa)

Fig 5 Contact stress change curves along contact length direction under different friction coefficient ( $p = 1$  MPa)

可知,不同摩擦因数下,密封环最大接触应力始终大于驱动压力,保证了伸缩接头密封环的正常密封性能。此外,随着摩擦因数增加,A-B段、B-C段与C-D段接触应力均为先减小后增大。

#### 4.2 伸缩接头密封环剪切应力分析

隔水管伸缩接头密封环在承压情况下,会发生大的变形,若剪应力超过橡胶材料的剪切强度时,则密封环在此位置被撕裂,甚至可能会被剪断。针对不同的驱动压力,通过分析不同摩擦因数下密封环的最大剪应力,得到剪应力随摩擦因数变化曲线如图6所示。

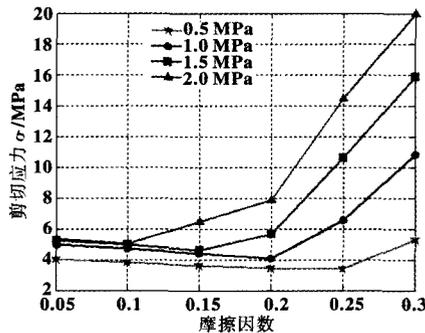


图6 不同驱动压力下剪应力随摩擦因数变化曲线

Fig 6 Variation of shear stress with friction coefficient under different driving pressures

可知,当伸缩接头内筒与密封环之间摩擦因数小于或等于0.3时,一定驱动压力条件下,随着摩擦因数的增加,密封环最大剪应力缓慢减小后急速增大,不同空气压力下的转折点不同,这是因为剪应力是由摩擦因数与空气压力决定的,空气压力越大,转折点出现在摩擦因数较小点。

#### 5 结论

(1) 结合隔水管伸缩接头失效案例确定了其失效模式,并从接触应力和剪应力2个方面确定了伸缩接头密封系统密封失效准则并得到相应的失效判据。

(2) 隔水管伸缩接头密封环在不同的驱动压力下,最大接触应力始终大于驱动压力,能保证良好的密封性能。为了满足不同压力下的密封,不同驱动压力下密封环的最大接触应力结果为驱动压力的选取提供了理论依据。

(3) 隔水管伸缩接头密封环在一定驱动压力及不同摩擦因数下,最大接触应力始终大于驱动压力,保证了橡胶体的正常密封性能。

(4) 由于驱动压力及摩擦力的相互作用,在一定驱动压力下,随着摩擦因数的增加,隔水管伸缩接头密封环剪切应力先缓慢减小后急速增大,且不同空气压力下的转折点不同,这为内筒润滑及驱动压力的合

理搭配提供了参考。

#### 参考文献

- [1] 畅元江,陈国明,鞠少栋. 国外深水钻井隔水管系统产品技术现状与进展[J]. 石油机械,2008,36(9):205-209.  
Chang Yuanjiang, Chen Guoming, Ju Shaodong. The technical status and progress of foreign deepwater drilling riser system [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9): 205-209.
- [2] Upton T L. Improving the reliability of slip joint packer systems [C]// SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 17-19 March 2009, Amsterdam, The Netherlands. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [3] Montgomery M E. Choke and kill lines-safety and down time [C]// IADC Deepwater Conference, August 1998, Houston. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1998.
- [4] Cary D N. Drilling riser alternative repair methods for leaking joint seals utilizing pressure activated sealant technology [C]// IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 13-15 November 2006, Bangkok, Thailand. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [5] 张怡,王荣耀,陈国明,等. 隔水管接头密封圈有限元分析[J]. 石油机械,2011,39(5):83-87.  
Zhang Yi, Wang Rongyao, Chen Guoming, et al. A finite element analysis of the sealing ring of riser joint [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(5): 83-87.
- [6] 关文锦,杜群贵,刘丕群. 橡胶O形圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封,2012,37(6):60-64.  
Guan Wenjin, Du Qungui, Liu Piqun. Finite element analysis of the sealing performance of rubber O-ring [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(6): 60-64.
- [7] 周志鸿,张康雷,李静,等. O形橡胶密封圈应力与接触应力的有限元分析[J]. 润滑与密封,2006,31(4):86-89.  
Zhou Zhihong, Zhang Kanglei, Li Jing, et al. Finite element analysis of stress and contact pressure on the rubber sealing O-ring [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(4): 86-89.
- [8] Freeman J, McCarroll J. Accident investigation report [R]. Washington DC: U. S. Minerals Management Service (MMS), 2007.
- [9] 鞠少栋,陈国明,宋林松,等. 深水钻井隔水管事故类型及对策分析[J]. 石油机械,2011,39(11):13-16.  
Ju Shaodong, Chen Guoming, Song Linsong, et al. Accidents investigation and precautionary measure for deepwater drilling riser [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(11): 13-16.
- [10] 胡殿印,王荣桥. 橡胶O形圈密封结构的有限元分析[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):255-260.  
Hu Dianyin, Wang Rongqiao. Finite element analysis of O-ring seal structure [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(2): 255-260.