

深海高压环境下组合密封结构性能分析

易攀, 金永平*, 彭佑多, 万步炎

(湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以深海高压环境下的组合密封结构为对象, 基于 ABAQUS 有限元分析软件建立组合密封结构非线性轴对称有限元模型, 分析深海高压环境对组合密封结构密封性能的影响, 探明组合密封结构在深海高压环境下几何变形情况以及密封界面上接触应力的分布规律. 结果表明: 对于滑环槽型为矩形截面的组合密封结构, 所受的最大应力主要集中在滑环的右上端部和左下端部, 且接触压力分布较为均匀, 有利于提高组合密封结构的密封性能. 同时, 组合密封结构中 O 形橡胶密封圈和滑环所受的最大 Von Mises 应力随着海水深度的增大而逐渐增大, 研究结果为深海高压环境下组合密封结构几何参数的选择与优化设计提供理论指导与技术支撑.

关键词:深海高压环境; 组合密封; 性能分析

中图分类号: P742

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2018)02-0034-06

Performance Analysis of Combined Seal Structure in Deep Sea High Pressure Environment

Yi Pan, Jin Yongping, Peng Youduo, Wan Buyan

(National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The combined seal structure under the deep sea high pressure environment was taken as an object to research, the nonlinear axisymmetric finite element model of the combined seal structure was established based on the ABAQUS finite element analysis software. The influence of the deep sea high pressure environment on the sealing performance of the composite sealing structure was analyzed. The combined seal structure geometrical deformation and the distribution of contact stress on sealing interface under the high pressure environment was revealed. The results showed that for the combined seal structure of rectangular sections, the maximum stress is mainly concentrated in the upper right and lower left end of the slip ring, and the contact pressure distribution is more uniform, which is helpful to improve the combined seal structure performance. At the same time, the maximum Von Mises stress of the O-ring and the slip ring in the combined seal structure increase with the depth of the seawater, and the result provide theoretical guidance and technical support for the geometrical parameters selection and optimization of the combined seal structure under the deep sea high pressure environment.

Keywords: deep sea high pressure environment; combined seal; performance analysis

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705145; 51779092); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0300502; 2017YFC0307501)

*通信作者, E-mail: jinyongping12@163.com

O形橡胶密封圈是一种十分常见的密封结构件,因其具有结构简单、体积小、密封可靠、价格便宜等特点,广泛应用于液压机械、汽车等工程领域.但是在滑动密封等结构中单独使用O形橡胶密封圈进行密封,其密封性能将受到较大影响,特别是在高压环境下的影响尤为显著.为此,相关学者和技术人员在高压密封中引入了组合式密封结构,组合密封结构中的O形橡胶密封圈与对应滑环的配合使用,可显著提高组合密封结构的抗高压性能.陈国定等^[1]对材料为丁睛二烯橡胶的O形密封圈进行了有限元力学分析,研究在3 MPa油压作用下O形橡胶密封圈的变形情况,以及轴和密封接触面间的接触压力和剪应力分布情况.周志鸿等^[2]通过对O形橡胶密封圈进行有限元分析,得出O形橡胶密封圈与轴之间的最大接触压力随着密封圈压缩率、工作油压的增加而增大.徐同江等^[3]通过有限元软件ANSYS分析了O形橡胶密封圈在不同油压、不同压缩率状态下,接触压力的大小及分布情况、Von Mises应力以及剪切应力分布情况,并对各组数据进行了对比分析,得出O形橡胶密封圈的最易失效的位置.G.K Nikas^[4]运用弹流润滑理论并结合非线性有限元方法,分析不同工况下矩形密封圈的应力分布、油膜厚度以及泄漏情况.A.Abouel-Kasem^[5]利用有限元方法对6种不同弹性材料的应力、应变场进行了研究,分析不同弹性密封材料的泄漏率,并在一定压力和温度范围内,推导出弹性密封材料泄漏率的表达式.然而,上述研究文献中,主要是针对3~35 MPa的常规压力环境下的组合密封结构性能分析,而对于在深海110 MPa高压环境下,组合密封结构密封性能的研究鲜见文献报道,为此,本文结合国家重点研发计划课题“全海深沉积物气密取样器研制”的任务需求,利用有限元分析软件ABAQUS开展深海高压环境下的组合密封结构性能分析,探明组合密封结构在深海高压环境下几何变形情况以及密封界面上接触应力的分布规律,从而为全海深沉积物气密取样器研制提供技术支持,同时也进一步丰富了高压环境下的密封性能分析方法.

1 组合密封结构有限元模型构建

根据组合密封结构的实际断面尺寸及相应的沟槽尺寸,在ABAQUS有限元分析软件中建立非线性轴对称有限元模型,本文所建立的组合密封结构有限元模型主要包括轴、组合密封件、沟槽,其对应的几何参数:密封槽宽度7 mm,深度6.45 mm;滑环截面高度6.2 mm,厚度1.8 mm,材料为聚四氟乙烯;O形圈直径为5.3 mm,材料为全氟橡胶,组合密封结构如图1所示.鉴于组合密封结构具有轴对称的特点,为简化所建立的有限元模型,采用二维结构模型来进行组合密封结构性能分析,组合密封结构的网格划分如图2所示.

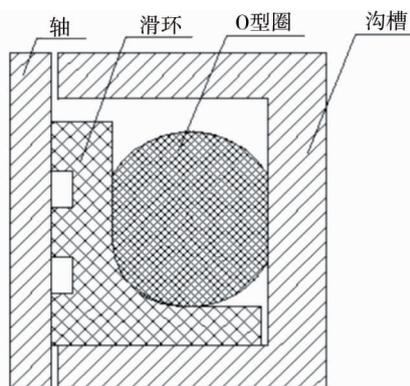


图1 组合密封结构

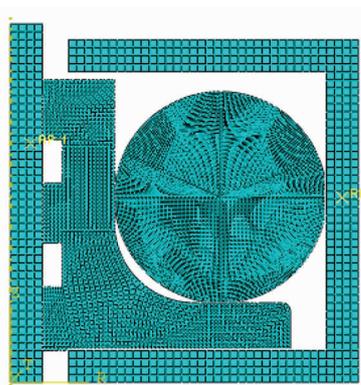


图2 组合密封结构网格划分

2 密封材料选型

根据相关参考文献资料,对于如橡胶类物理非线性材料,在ABAQUS有限元分析软件中可用Mooney-

Rivlin 模型进行橡胶材料建模,该模型能够较好地描述橡胶材料的大变形和非线性特性,完全满足橡胶材料在工程实际应用中对其性能计算的要求.Mooney 理论基于下列假设^[6-7]:(1)橡胶是不可压缩的,并且在变形前各向同性;(2)材料具有确定的弹性模量和泊松比;(3)密封圈受到的纵向压缩视为由约束边界的指定位移引起;(4)忽略温度对橡胶材料性能的影响;(5)简单剪切包括先受简单拉伸再在平面截面上叠加简单剪切均服从胡克定律.Rivlin 采用材料不可压缩及无变形状态的各向同性假设,应变能密度函数 W 对应的 3 个主伸长率分别为 λ_1, λ_2 和 λ_3 ,同时,用来表示长度、面积以及体积的 3 个基本应变函数 I_1, I_2 和 I_3 的表达式分别为

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \quad (1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2; \quad (2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2. \quad (3)$$

应变能密度函数 W 与 3 个基本应变函数 I_1, I_2 和 I_3 之间的关系为

$$W = f(I_1, I_2, I_3). \quad (4)$$

在上述假设中,已经定义橡胶材料是不可压缩的,则对应的体积保持不变,即 $I_3 = 1$,从而简化了应变能密度函数.在此假设基础上的模型被广泛使用,它常被用于模拟橡胶材料 100%~200%应变,简化后的应变能密度函数的表达式为

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3). \quad (5)$$

式中: C_1, C_2 均为材料模型的正定常数,其取值可根据文献[8]得出.

全氟橡胶具有物理性能稳定、耐高温、耐腐蚀、耐磨性好等优点,广泛应用于工业生产中.本文采用全氟橡胶作为 O 形圈材料,用 Mooney-Rivlin 模型的 2 个材料参数来描述橡胶材料的特性,分别是 C_{10}, C_{01} .通常情况下橡胶的硬度值是可以选择的,常用的硬度值 HS=60,65,70,75,80,85,90,一般而言,随着外部压力的增大,所选择橡胶的硬度值也越高.本文所用的组合密封结构所处的深海高压在 80~120 MPa 之间,属于高压环境,因此选用全氟橡胶材料的硬度 HS=85,将其代入弹性模量 E_0 与橡胶硬度 HS 的函数拟合关系式^[9]:

$$E_0 = \frac{15.75 + 2.15HS}{100 - HS}; \quad (6)$$

$$C_{10} = \frac{E_0}{6 \times 1.25}; \quad (7)$$

$$C_{01} = 0.25C_{10}. \quad (8)$$

通过求解可得材料参数 $C_{10} = 1.78 \text{ MPa}, C_{01} = 0.45 \text{ MPa}$.

3 有限元边界处理

在组合密封结构有限元模型中利用直接约束法来求解组合密封结构中的接触问题,在 ABAQUS 有限元分析软件中可分别定义点与面之间以及面与面之间的接触对,本文所建立的接触对主要包括:沟槽与 O 形橡胶圈、轴与组合密封件滑环、沟槽与滑环、O 形橡胶圈与滑环共 4 组接触对.在建立接触对的过程中,需要明确指定相互接触主表面与从表面,原则是优选刚性大的表面选为主表面,如沟槽、轴在接触对的建立中都选为主表面;当滑环与 O 形橡胶圈组成的接触对时,选择刚性较大的滑环为主表面.同时,接触部分都采用网格自适应功能.若不采用网格重划分功能,极易出现 O 形橡胶密封圈截面单位渗透出沟槽、O 形橡胶密封圈与滑环由于相互作用导致计算结果不收敛,因此为了更好地分析 O 形橡胶密封圈与滑环密封的过程,接触部分采用了网格重划分技术,摩擦模型采用罚函数摩擦模型^[10-13].

为研究 O 形橡胶密封圈安装过程中,与其相应沟槽的接触变形情况,首先,将刚体移出一定距离,使

与之 O 形密封圈分离,并设置轴在 X, Y, Z 方向的位移均为 0;然后,指定沟槽向 X 轴负方向缓慢位移至安装位置,最后,在 O 形橡胶密封圈的一侧逐步施加一定压力(80~120 MPa),使之达到最终接触变形状态。

4 有限元仿真与数据分析

在不同水深压力环境下,组合密封结构 O 形橡胶密封圈 Von Mises 应力云图如图 3 所示。一般而言,O 形橡胶密封圈 Von Mises 应力值越大的区域,密封材料越容易出现裂纹,进而引起 O 形橡胶密封圈发生撕裂破坏。此外,O 形橡胶密封圈 Von Mises 应力越大,也将进一步加速 O 形橡胶密封圈材料的松弛。在 O 形橡胶密封圈安装完成后,O 形橡胶密封圈有少量被挤入滑环与沟槽之间的间隙内。随着压力的不断增大,O 形橡胶密封圈的应力分布将沿着与滑环接触面的上下两侧间分散,所受的应力值也将逐渐增大。

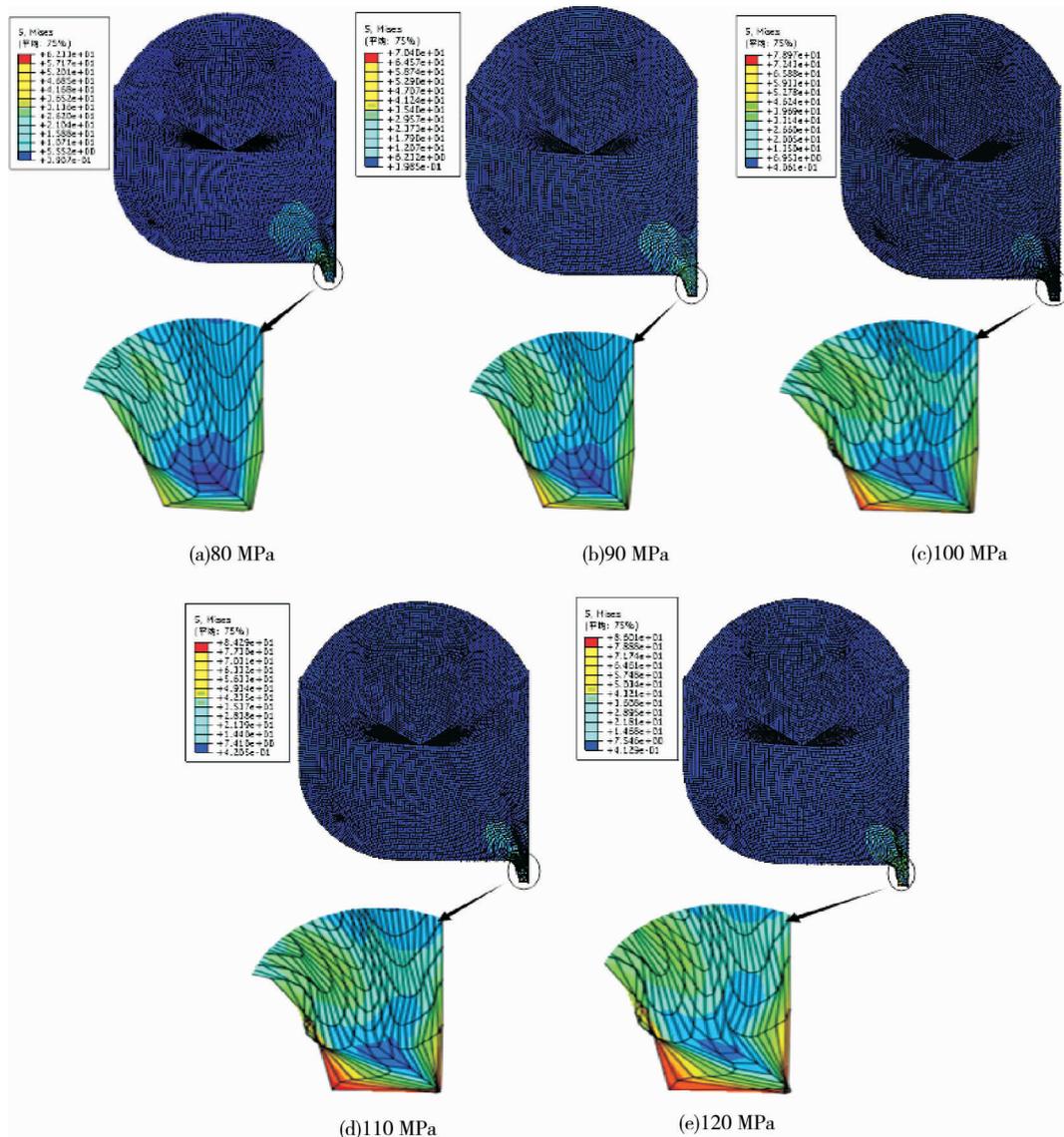


图 3 O 形橡胶密封圈 Von Mises 应力

在不同水深压力环境下,组合密封结构滑环密封唇口接触压力云图如图 4 所示。由图 4 可知:随着压力的不断增大,滑环密封唇口所受的接触压力将由初始安装状态时集中于中部位置附近开始沿滑环左上侧与左下侧集中,最后集中于滑环左下侧及右上侧,并且接触压力值也将随着压力的增大而不断增大。

不同海水深度下,滑环密封唇口接触压力分布变化曲线如图 5 所示.其中横坐标表示各密封唇口与往复轴的接触宽度,从下往上依次为滑环的第 1 密封唇口、第 2 密封唇口和第 3 密封唇口,纵坐标表示各密封唇口与往复轴的接触压力.由图 5 中可以看出:最大接触压力主要位于第 2 密封唇口位置,且对应不同海水深度,密封唇口最大接触压力的变化范围分别为 113~127 MPa,127~143 MPa,141~158 MPa,154~173 MPa,168~187 MPa;不同压力下密封面上的接触压力在高压侧上升的斜率大于低压侧下降的斜率,且当接触宽度达到 5.6 mm 即第 3 个密封唇口的位置时,其接触压力与接触宽度的关系比较平缓.本文分析结果与 Muller 教授^[14]在研究往复式动密封时得到的结论一致(即为了保证组合密封的密封性能,在滑环与轴之间的密封面的接触处需要出现适当的三角形接触压力分布,同时,密封面上的接触压力在高压侧上升的斜率必须大于低压侧下降的斜率才能保证把油膜完全带回,从而有效减少密封介质泄漏),从而证明了所建立的组合密封结构有限元模型以及所采用的有限元分析方法的正确性.

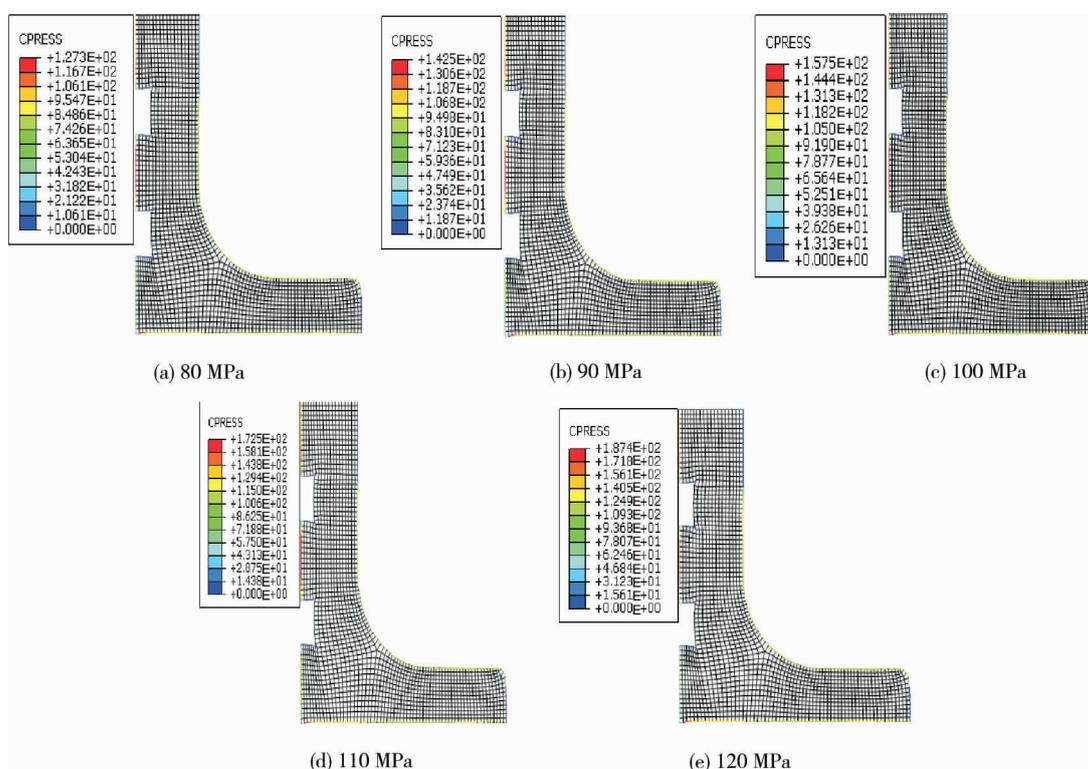


图 4 滑环密封唇口接触压力

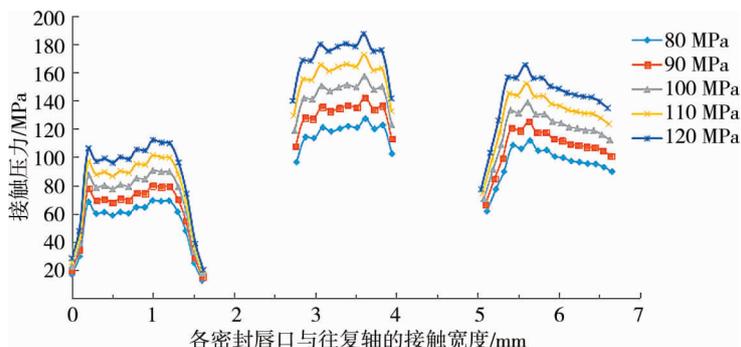


图 5 滑环密封唇口接触压力分布变化曲线

5 结论

1) 在不同的海水深度条件下,O形橡胶密封圈的接触应力大于所需的密封压力,组合密封结构实现可靠密封.

2) O形橡胶密封圈和滑环所受的最大 Von Mises 应力随海水深度的逐渐增大而增大.

3) 对于滑环槽型为矩形截面的组合密封结构,所受的最大应力主要集中在滑环的右上端部和左下端部,且接触压力分布较为均匀,有利于提高组合密封结构的密封性能.

参考文献:

- [1] 陈国定, Haiser H, Haas W, 等. O形密封圈的有限元力学分析[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(5): 740-741.
- [2] 周志鸿, 张康雷, 李静, 等. O形橡胶密封圈应力与接触压力的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2006, 4(176): 85-89.
- [3] 徐同江. 基于 ANSYS 的 O形密封圈的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [4] Nikas G K. Theoretical study of solid back-up rings for elastomeric seals in hydraulic actuators[J]. Tribology International, 2004, 37(9): 689-699.
- [5] Abouel-Kasem A. Numerical analysis of leakage rate for the selection of elastomeric sealing materials[J]. Sealing Technology, 2006, 2006(11): 7-11.
- [6] 韩传军, 张杰, 黄岗, 等. 往复密封中星形密封圈的密封性能分析[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 28-36.
- [7] 刘萌, 王青春, 王国权. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 橡胶工业, 2011, 58(4): 241-245.
- [8] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4): 8-10.
- [9] 郑明军, 王文静, 陈政南等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 2003, 50(8): 462-465.
- [10] 王成刚, 肖健, 刘慧, 等. 格莱圈密封性能非线性有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(2): 42-47.
- [11] 李振涛, 孙鑫晖, 张玉满, 等. O形密封圈密封性能非线性有限元数值模拟[J]. 润滑与密封, 2011, 36(9): 86-90.
- [12] 穆志韬, 邢耀国. 密封结构中超弹性接触问题的有限元分析方法[J]. 航空计算技术, 2003, 33(4): 44-47.
- [13] 张梅, 费业泰, 金施群. 普通 O形圈在超高压密封中的应用[J]. 液压与气动, 2006(11): 65-68.
- [14] Muller H K. Abdichtung bewegter maschinenteile, Medienverlag [M]. Waiblingen: Medienverl, 1990.