

深海高压环境对 O 形密封圈 密封性能影响分析

危超亭, 金永平*, 刘德顺

(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: 在深海作业中, 密封泄漏是深海装备发生故障的重要原因之一。可靠的密封可以很大程度上延长其单次水下作业时间和装备使用寿命, 因此开展深海装备的密封技术研究具有重要的意义。文章以深海装备液压缸 O 形密封圈结构为研究对象, 应用 ABAQUS 软件建立 O 形密封圈结构二维轴对称有限元模型, 对深海不同水深压力情况下的不同压缩率和不同材料硬度的 O 形密封圈的密封性能进行有限元分析, 探明深海高压环境对 O 形密封圈密封性能的影响规律, 为深海高压环境下密封圈的优选以及优化设计等提供理论依据。

关键词: 深海装备; 高压; O 形密封圈; 有限元分析

中图分类号: TB743 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)04-0001-06

An Analysis of the Influence of Deep-Sea High-Pressure Environment on the Sealing Performance of O-ring

WEI Chaoting, JIN Yongping, LIU Deshun

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

Abstract: In deep-sea operation, seal leakage is one of the important reasons for deep-sea equipment failure. Reliable sealing can greatly extend the time of single underwater operation and the service life of equipment, so it is of great significance to carry out the research on sealing technology of deep-sea equipment. In this paper, the O-ring structure of the hydraulic cylinder of deep-sea equipment is taken as the research object, and the two-dimensional axisymmetric finite element model of the O-ring structure is established by using ABAQUS software. The finite element analysis of the sealing performance of the O-ring with different compression ratio and different material hardness under different deep-sea water depth and pressure is carried out, and the influence of deep-sea high-pressure environment on the sealing performance of the O-ring is proved. It provides a theoretical basis for the optimization and optimization design of sealing rings under deep-sea high-pressure environment.

Keywords: deep-sea equipment; high pressure; O-ring; finite element analysis

海洋中蕴含着丰富的资源, 因此海洋的勘探和开发具有非常大的发展潜力^[1-2]。深海装备是进行海洋勘探和开发的重要载体, 密封作为深海装备的重要组成部分, 一直是海洋探索与开发的核心问题之一。机械密封既可以防止机械装备内的介质泄漏, 同时也可以防止海水以及扰动的沉积物侵蚀破坏机械内部结构, 密封性能对于深海探测的效果、资源开采的质量等起着至关重要的作用, 因此需要开展深海装备的密

封研究.近年来,一些学者对深海装备密封结构的密封特性进行了深入的研究.SALANT 等^[3-5]通过混合润滑模型计算,得出了 U 形密封的泄漏率、摩擦力、接触区长度等参数,并分析了粗糙度对泄漏率的影响;LINGERKAR 等^[6]通过有限元分析得出摩擦力矩、O 形圈摩擦功率损失和界面温度随滑动速度和工作压差的变化规律;桑勇等^[7-9]建立 O 形密封圈的轴对称模型,研究 O 形密封圈在不同液压油压力、不同压缩率和不同工况下的最大 Von Mises 应力、最大接触压应力的变化,并据此分析密封圈的密封性能;易攀等^[10]利用有限元分析软件 ABAQUS 开展深海高压环境下不同材料硬度对组合密封结构性能的影响研究,探明不同硬度对于密封性能的影响规律.目前大部分研究都停留在压力较低的浅海密封领域,少有的一些深海密封研究比较浅显,对于深海密封的设计参考意义不大.

本文应用 ABAQUS 软件对密封圈进行有限元仿真,分析深海不同水深压力、不同压缩率和不同材料硬度对于 O 形密封圈最大 Von Mises 应力和最大接触压力的影响,重点讨论深海环境压力对 O 形密封圈密封性能的影响规律,这对深海高压环境下密封圈的选用和设计具有指导意义.

1 密封结构有限元模型

1.1 密封结构

在深海作业时,装备承受的环境压力随着海水深度的增加而增加,水深每增加 100 m,其环境压力大约增加 1 MPa.为了保证深海装备液压系统正常工作,一般设置压力补偿机制.这时,如果液压系统设计工作压力为 20 MPa,则系统内部实际压力为 $(20+P)$ MPa (P 为水深压力,MPa),O 形密封圈受力模型如图 1 所示.本文选取深海装备液压系统中某个液压缸为研究对象,其中密封结构如图 2 所示.O 形密封圈的线径 d 为 3.5 mm,密封圈半径为 d_1 ,密封槽宽度 b 为 4.2 mm,密封槽上倒角半径 r_1 为 0.2 mm,圆角半径 r_2 为 0.5 mm.密封结构中的孔和轴的硬度远大于密封圈,可以视为刚体以简化模型.

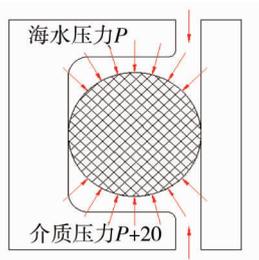


图1 O形密封圈受力模型

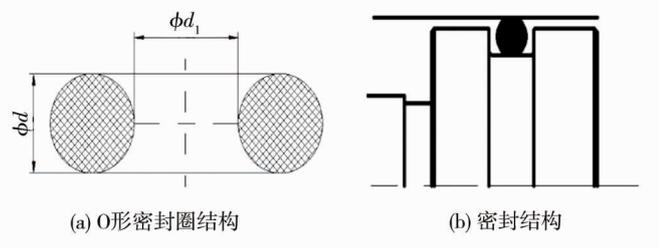


图2 O形密封圈几何模型

全氟橡胶具有物理性质稳定、耐高温、耐腐蚀和耐磨性能良好等优点,广泛应用于工业生产中,因此本文的 O 形橡胶密封圈的材料亦采用全氟橡胶.橡胶是一种超弹性体材料,具有十分复杂的材料特性,为了表征不可压缩橡胶材料的非线性和超弹性特性,在进行有限元仿真分析时采用两参数 Mooney-Rivlin 模型^[11]描述 O 形密封圈的材料特性,O 形密封圈材料硬度为邵氏硬度(75,80,85,90 HA).

1.2 有限元建模

考虑到液压缸密封结构的对称性,在 ABAQUS 中建立密封结构的二维轴对称模型.

1.2.1 接触定义

橡胶材料在进行有限元分析时所建立的接触属于非线性接触,非线性接触问题主要存在 2 个难点:(1)在求解模型之前无法确定密封接触区域;(2)接触问题往往会伴随有摩擦的计算,使得本就难以求解的有限元模型更加难以收敛.针对以上 2 个难点,在密封结构有限元模型中,使用直接约束法求解模型中的接触问题.建立轴与密封圈和孔与密封圈这 2 组接触对,在所建立的接触对中选刚性较大的轴与孔的表面为主表面,选定密封圈的表面为从表面,并指定摩擦类型为允许“弹性滑动”的罚摩擦,摩擦系数为 0.36.

1.2.2 边界条件与加载方式

首先建立轴、孔与 O 形密封圈之间的相互作用接触对,并对轴施加全约束,限制轴在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴

方向的位移均为0,之后对孔施加Y轴方向的位移,对密封结构进行装配实现O形密封圈的预压缩。

1.2.3 ABAQUS 网格划分

网格划分是有限元分析最重要的环节之一,合理的网格划分方式可以有效提高有限元分析的计算精度和计算速度.在所建立的密封有限元模型中,轴与孔的网格划分均采用自由网格划分方式和中性轴算法,采用四边形单元网格.O形密封圈作为主要形变元件,采用网格密度更大的四边形单元网格,考虑到其形变大的特性,选取CAX4RH单元类型,有限元网格如图3所示。

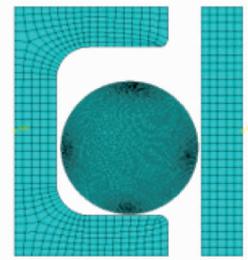


图3 密封结构模型网格

2 有限元仿真分析

在对密封圈进行有限元分析时,接触应力和 Von Mises 应力是最常用的2个判定指标.接触应力是指O形密封圈与轴、孔相互挤压时,在接触区域产生的应力,O形密封圈两侧的接触应力必须都大于介质压力且具备一定的接触长度才能实现可靠密封,因此目前普遍将接触应力作为判定O形密封圈失效的最主要判断依据.Von Mises 应力也被称作等效应力,是一种基于剪切应变能的应力,用以描述部件内部应力分布情况.密封圈长时间置于应力集中状态,容易造成密封圈回弹力降低、永久变形,同时密封圈破裂的位置最有可能发生在等效应力大、应力集中的区域,因此 Von Mises 应力通常作为进行O形密封圈疲劳失效和破损失效判断的主要评价标准^[12-15]。

2.1 不同压缩率对密封性能影响

图4和图5分别是截面压缩率为9%,12%,15%,18%的O形密封圈在水深压力为10~110 MPa下的最大 Von Mises 应力和最大接触应力变化曲线.不同水深压力下,不同压缩率对应的O形密封圈应力云图如图6和图7所示.分析图4和图5可知:随着压缩率增加,密封圈所受最大 Von Mises 应力逐渐增加,最大接触应力几乎没有变化;随着水深压力增加,密封圈的最大接触应力直线增加,最大 Von Mises 应力变化较小.特别指出,O形密封圈压缩率分别为9%,12%,15%,18%,水深压力为10~110 MPa时,最大接触应力总是大于液压系统的介质压力,由此可知初始密封满足设计要求。

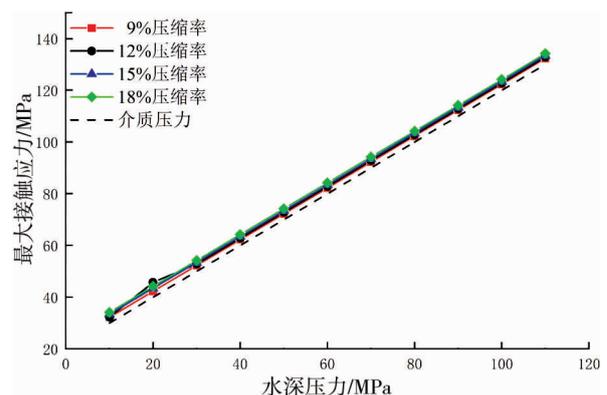
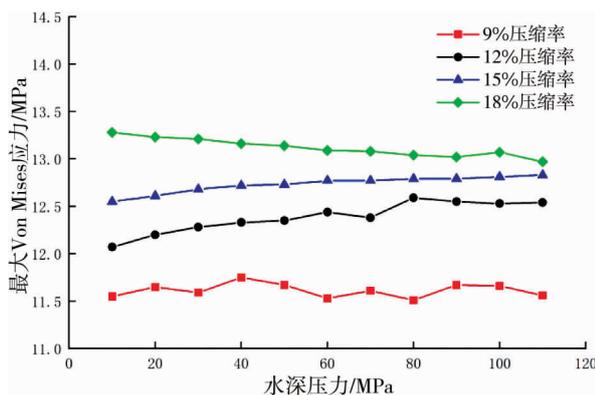


图4 不同水深压力下不同压缩率的密封圈最大 Von Mises 应力

图5 不同水深压力下不同压缩率的密封圈最大接触应力

由上述分析可知:(1)对于不同的压缩率,深海水深压力的变化对于密封圈的 Von Mises 应力影响较小,这意味着密封圈破损失效和疲劳失效受深海水深压力的影响较小;但是,密封圈的接触应力随水深压力增加而增加,这不但会增加液压缸往复运动的摩擦阻力,更重要的是会增大密封圈与液压缸活塞杆之间的摩擦,加快密封圈的磨损速度,加剧密封圈的磨损程度.(2)密封圈最大 Von Mises 应力随着压缩率的增加而增加,这种特性几乎与深海水深压力无关,也就是说密封圈疲劳失效无需考虑海深影响.另一方面,由图6、图7中的密封圈应力云图可知:压缩率越大,密封圈的最大 Von Mises 应力越大,容易造成密封圈应

力集中、甚至破坏.所以,在深海装备动密封的密封圈选型及压缩率选择时,应重点关注密封圈的磨损和挤压破损问题.

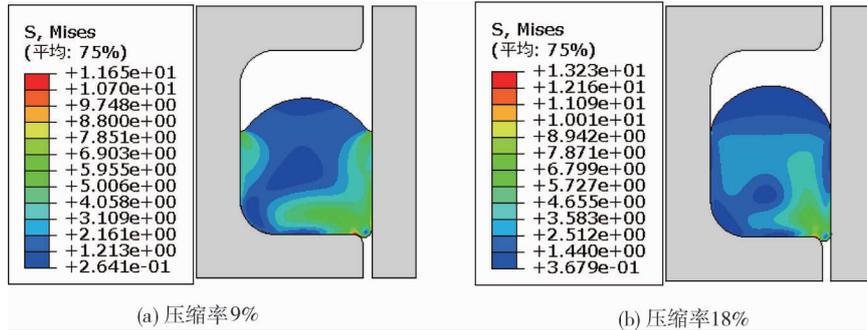


图6 水深压力为 20 MPa 时,不同压缩率下 O 形密封圈应力云图

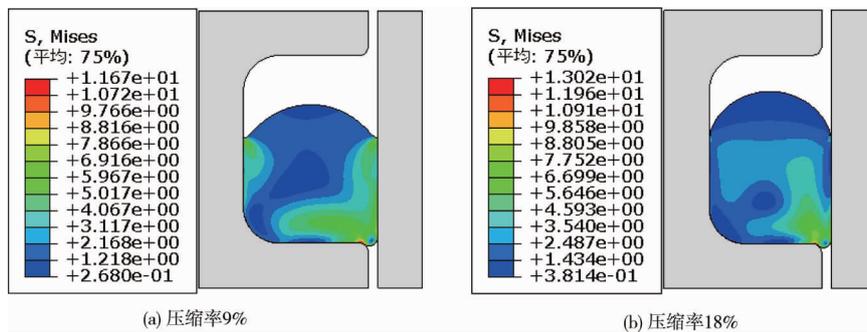


图7 水深压力为 90 MPa 时,不同压缩率下的 O 形密封圈应力云图

2.2 不同硬度对密封性能的影响

图8和图9分别为硬度为75,80,85,90 HA(压缩率为12%)的O形密封圈在水深压力为10~110 MPa时的最大Von Mises应力和最大接触应力变化曲线.分析图8和图9可知:O形密封圈的硬度从75 HA增加到80 HA时,最大Von Mises应力明显增加,但是在O形密封圈硬度从80 HA增加到90 HA时,最大Von Mises应力变化不明显;随着水深压力增加,密封圈的最大接触应力直线增加,最大Von Mises应力变化不明显.特别指出,硬度为75,80,85,90 HA的O形密封圈在水深压力为10~110 MPa时的接触应力总是大于液压系统介质压力,满足初始密封设计要求.

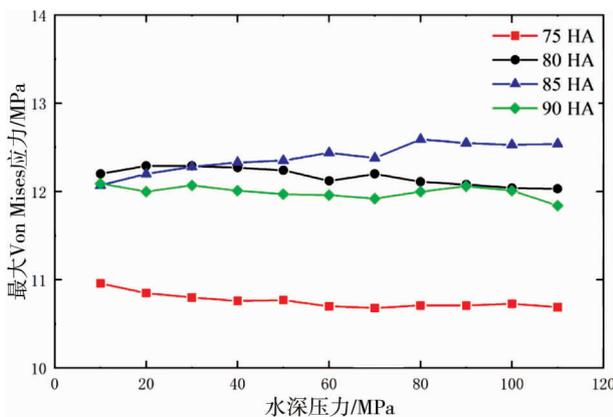


图8 不同海深下不同硬度的密封圈最大 Von Mises 应力变化曲线

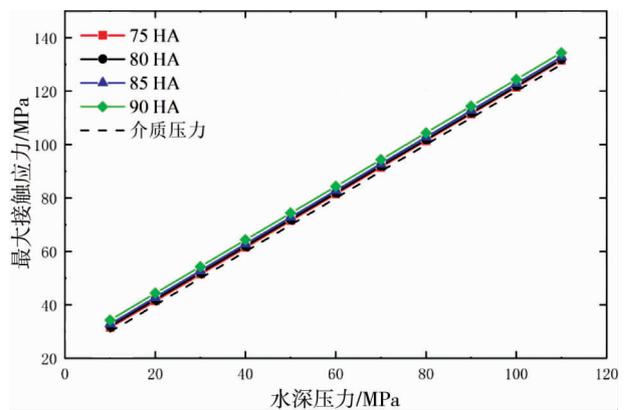


图9 不同海深下不同硬度的密封圈最大接触应力变化曲线

由上述分析可知:(1)密封圈硬度不同的情况下,深海水深压力的变化对密封圈的 Von Mises 应力影响较小,而密封圈的接触应力随水深压力的增加而增加;对于不同的水深压力,密封圈硬度变化对接触应

力的影响较小,但对 Von Mises 应力的影响较为复杂.(2) 密封圈硬度对 Von Mises 应力的影响,一方面是随着硬度增大,其 Von Mises 应力越大;另一方面,密封圈右下方受挤压形变量随着密封圈硬度的增加而逐渐变小(图 10~图 13),这说明随着密封圈硬度的增加,密封圈被挤入液压缸与活塞杆之间缝隙的形变量会减小,造成的应力集中程度越低,导致硬度为 90 HA 密封圈的最大 Von Mises 应力低于硬度为 85 HA 和 80 HA 的密封圈.(3) 密封圈硬度越低,其 Von Mises 应力越小,但是由于其抵抗变形能力弱,被挤入间隙的形变量就多,容易造成密封圈咬伤,所以,要求密封圈材料必须具有一定的硬度.

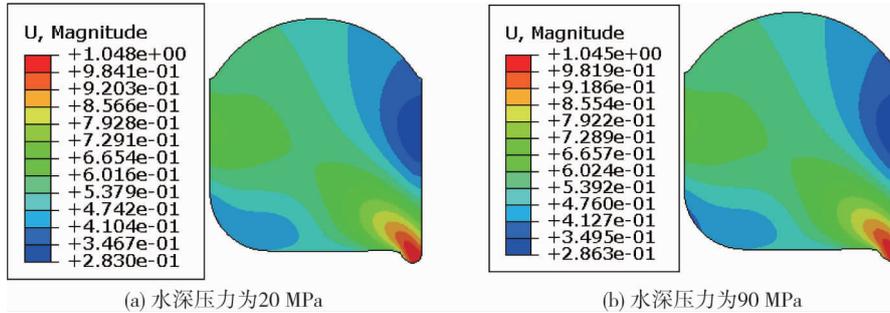


图 10 硬度为 75 HA 的 O 形密封圈在不同水深压力时的应变云图

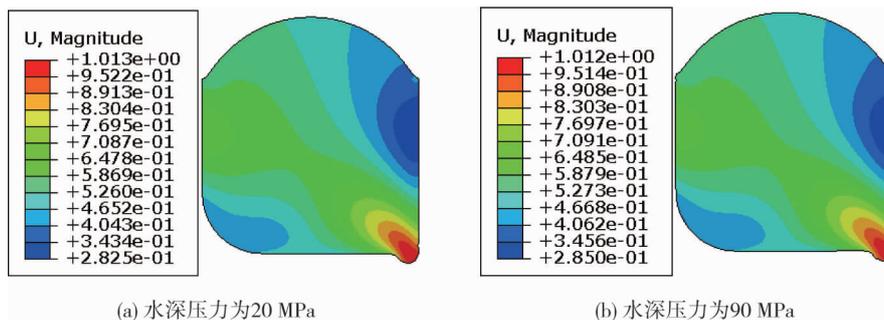


图 11 硬度为 80 HA 的 O 形密封圈在不同水深压力时的应变云图

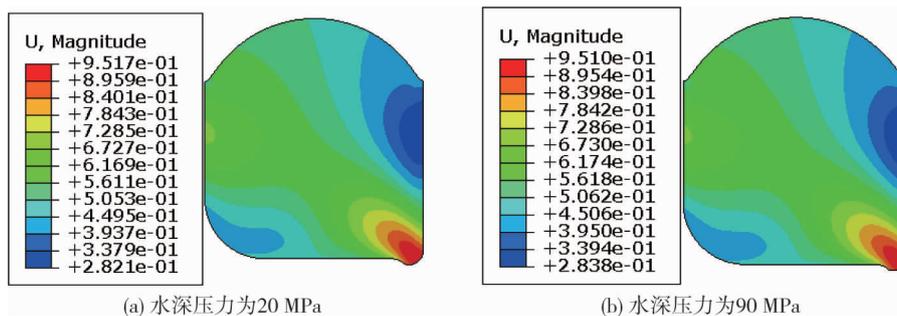


图 12 硬度为 85 HA 的 O 形密封圈在不同水深压力时的应变云图

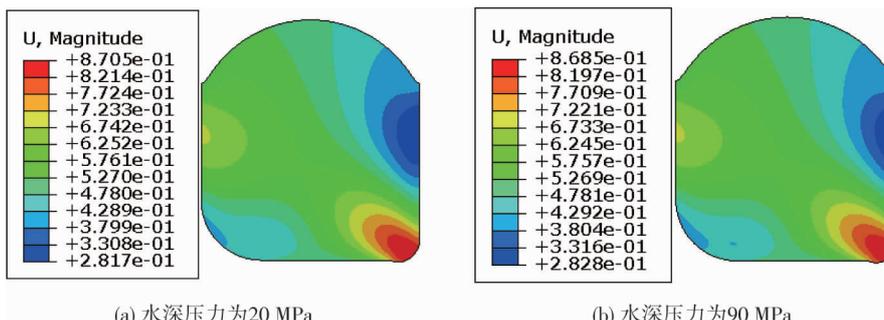


图 13 硬度为 90 HA 的 O 形密封圈在不同水深压力时的应变云图

3 结论

1) 密封圈的最大 Von Mises 应力受水深压力的影响较小,而最大接触应力则随着水深压力的增加而直线上升.密封圈的压缩率和材料对其最大接触应力的影响较小,但对最大 Von Mises 应力的影响较为复杂.具体来说,随着密封圈压缩率的增加,其最大 Von Mises 应力逐渐增大;当硬度从 75 HA 增加到 80 HA 时,密封圈的最大 Von Mises 应力明显增加,但在硬度为 80~90 HA 时,最大 Von Mises 应力的变化则不明显.

2) 密封圈材料的硬度和压缩率对其最大 Von Mises 应力和最大接触应力的影响规律几乎与深海水深压力无关.这意味着,在深海装备中,密封圈的结构选择和设计可以遵循普通机械装备密封圈的选择和设计原则.然而,还必须密切关注密封圈硬度和压缩率对其变形的影响,因为密封圈在变形过程中可能会被挤压进入液压缸与活塞杆之间的间隙,从而容易导致密封圈的挤压破损、咬伤、撕裂等破坏问题.

参考文献:

- [1] 陈鹰.海洋技术定义及其发展研究[J].机械工程学报,2014,50(2):1-7.
- [2] 曹学鹏,王晓娟,邓斌,等.深海液动力源发展现状及关键技术[J].海洋通报,2010,29(4):466-471.
- [3] SALANT R F, MASER N, YANG B. Numerical model of a reciprocating hydraulic rod seal[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(1): 91-97.
- [4] YANG B, SALANT R F. A numerical model of a reciprocating rod seal with a secondary lip[J]. Tribology Transactions, 2008, 51(2): 119-127.
- [5] YANG B, SALANT R F. Elastohydrodynamic lubrication simulation of O-ring and U-cup hydraulic seals[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2011, 225(7): 603-610.
- [6] LINGERKAR K, KHONSARI M M. On the effects of sliding velocity and operating pressure differential in rotary O-ring seals[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(7): 649-657.
- [7] 桑勇,王旭东,邵利来.水下机器人液压缸 O 形密封圈的有限元分析[J].液压气动与密封,2018,38(5):18-22.
- [8] 刘鹏,宋文杰,蒋庆林,等.深海高压环境下 O 形密封圈的密封性能研究[J].液压与气动,2017(4):66-70.
- [9] 樊智敏,李龙,王启林.深海高压环境下 O 形密封圈密封性能分析[J].机电工程,2019,36(2):131-135.
- [10] 易攀,金永平,彭佑多,等.深海高压环境下不同材料硬度对组合密封结构性能影响研究[J].海洋工程装备与技术,2018,5(6):421-428.
- [11] 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.
- [12] 任全彬,蔡体敏,王荣桥,等.橡胶“O”形密封圈结构参数和失效准则研究[J].固体火箭技术,2006,29(1):9-14.
- [13] 王隽.船舶艉轴密封装置 O 形橡胶密封圈失效分析[J].润滑与密封,2007,32(4):163-166.
- [14] 张振秀,聂军,沈梅,等.ANSYS 中超弹性模型及其在橡胶工程中的应用[J].橡塑技术与装备,2005,31(9):1-5.
- [15] 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,2006,31(4):86-89.