

基于Ansys的O形橡胶密封圈密封性能及可靠性研究

赵敏敏¹, 黄 乐¹, 张 岐², 夏迎松³, 平 力⁴

(1. 广州机械科学研究院有限公司, 广东 广州 510700; 2. 广州国机智能橡塑密封科技有限公司, 广东 广州 510700;
3. 安徽中鼎密封件股份有限公司, 安徽 宣城 242300; 4. 杭州娃哈哈集团有限公司, 浙江 杭州 310009)

摘要:利用有限元分析软件Ansys建立了线径为7 mm的O形橡胶密封圈(简称O形圈)的二维轴对称模型,然后对其在不同径向间隙和不同油压下的密封性能进行分析,得到径向间隙以及油压对O形圈密封性能的影响。结果表明:油压对O形圈密封性能的影响较大,而径向间隙在油压较小时对O形圈密封性能的影响较小,在油压较大时影响较大;在径向间隙为0.3 mm、油压为16 MPa时O形圈的初始可靠度为98.5%。由各随机因素对极限状态函数的灵敏度可知,对O形圈初始可靠度影响最大的两个因素为O形圈线径和油压。

关键词:O形橡胶密封圈; Ansys; 有限元分析; 密封性能; 可靠性; 接触分析

中图分类号:TQ336.4⁺2; O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)02-0131-04

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.02.0131



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

O形橡胶密封圈(以下简称O形圈)具有密封可靠、生产加工方便以及价格低廉等优点,被广泛应用于机床、船舶、汽车、航空航天设备、冶金机械、化工机械、建筑机械、矿山机械、石油机械、塑料机械、农业机械以及各类仪器仪表上。O形圈在工作过程中靠其与轴和缸筒接触挤压来达到密封效果。以往对O形圈密封性能以及可靠性的研究绝大多数基于经验,无法准确地获得O形圈的密封性能及可靠性。数值仿真方法的推广为O形圈密封性能以及可靠性的研究提供了平台,通过对O形圈密封性能及可靠性进行仿真研究,可减少O形圈或类似产品的试验次数,节约成本,缩短产品研制周期^[1-4]。

本工作以某一规格径向活塞杆用O形圈为例,在Ansys中建立有限元分析模型,并在考虑了网格大小对O形圈密封性能影响的前提下,分别对不同压力和径向间隙下O形圈的密封性能进行研究,然后对该O形圈的可靠性进行数值仿真分析,以期本研究方法对O形圈的密封性能研究、可靠性预测、结构尺寸设计、失效研究以及故障诊断

提供一定的参考价值。

1 O形圈密封结构有限元模型的建立

在建立O形圈密封结构有限元模型之前,首先做以下几点假设^[5]:

- (1) 丁腈橡胶(NBR)具有确定的弹性模量和泊松比;
- (2) 沟槽刚度是O形圈的几万倍,不考虑沟槽的变形;
- (3) O形圈密封结构具有轴对称性;
- (4) NBR拉伸与压缩的蠕变性质相同。

为了准确地获得O形圈的密封性能及可靠性,可将O形圈以及沟槽作为整体进行分析,由于该密封结构具有轴对称性,因此为了节省计算机资源,将O形圈密封结构简化为二维轴对称模型来进行分析^[1]。本工作所分析O形圈基本尺寸线径为7 mm,根据GB/T 3452—2005《液压气动用O形橡胶密封圈》,其沟槽标称宽度为9.5 mm,沟槽标称深度为5.85 mm。

O形圈所用材料为NBR,其相关材料参数为弹性模量 14.04 MPa,泊松比 0.499。对于NBR等超弹性体材料,除定义材料弹性模量和泊松比外,可用Mooney-Rivlin模型来表征其材料性能^[6],通过对标准试样进行拉压试验,并在Ansys中进行曲线拟合,可获得材料的Mooney-Rivlin系数。

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB200100)

作者简介:赵敏敏(1988—),女,山西吕梁人,广州机械科学研究院有限公司工程师,硕士,主要从事结构可靠性设计与有限元仿真研究。

E-mail:zhaominmin@gmeri.com

本工作通过对NBR标准试样进行拉压试验,并将获得的拉压数据导入Ansys进行曲线拟合,得到了Mooney-Rivlin模型的两个参数值分别为 $C_{10}=1.87$, $C_{01}=0.47$ 。由于在有限元分析中需考虑NBR的不可压缩性,因此选择了PLANE182单元进行了网格划分,并对局部网格进行了细化,局部网格细化后的有限元模型如图1所示。

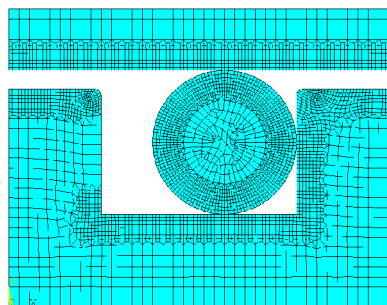


图1 密封结构有限元模型

2 O形圈密封性能研究

O形圈的密封性能主要取决于接触面接触压力与所承受压力的差值,理论上该差值大于零可实现密封,因此可通过对O形圈密封结构进行接触分析来获知其密封性能^[7]。

2.1 边界条件与接触定义

在安装状态下,O形圈与轴和缸筒均有接触,因此本接触分析共建立了3个接触对,由于缸筒和轴的刚度远大于O形圈,因此在建立接触对时以轴和缸筒面为目标面,O形圈面为接触面。

O形圈安装时是压缩装配,但是有限元建模时O形圈处于自由状态,所以接触分析时,约束及载荷的施加分为两个载荷步,先将缸筒轮廓线全约束,轴约束X方向的自由度,第1个载荷步为在轴的Y方向施加1个位移来模拟O形圈的初始压缩量,第2个载荷步在O形圈有间隙侧施加均布压强来模拟其在工作过程中所受的油压。

2.2 结果分析

密封接触面接触压力的大小可以反映O形圈密封性能的好坏,原则上,O形圈保证密封的必要条件是最大接触压力大于或等于油压^[7]。本工作以GB/T 3452—2005中线径为7 mm的O形圈为例,对其在不同径向间隙以及不同油压下的接触压力进行研究。

当O形圈中间部位的网格大小为0.5 mm时,接触面最大接触压力随油压以及径向间隙的变化规律如图2所示。从图2可以看出:油压对接触面最大接触压力影响较大;低压时径向间隙对接触面最大接触压力影响很小,但是高压时径向间隙过大会导致O形圈出现挤隙现象,最大接触压力会发生突变,而且位置也会发生转移。

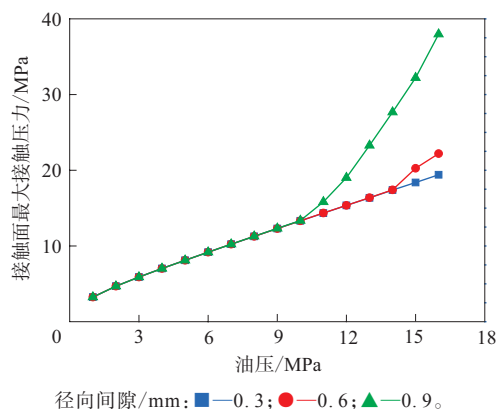


图2 接触面最大接触压力随油压及径向间隙的变化规律

当网格大小为0.5 mm、油压为16 MPa(该值为O形圈一般情况下所能承受最大压力),径向间隙分别为0.3、0.6和0.9 mm时,O形圈Von Mises应力和接触面接触压力分别如图3和4所示。

从图3和4可以看出,径向间隙越大,O形圈最大Von Mises应力越大,O形圈最大变形也越大,越容易被挤入间隙,而且随着径向间隙的增大,在O形圈与缸筒圆角的接触处,接触压力会发生突变[如图4(b)和(c)所示],O形圈在此处容易发生破坏。此外,从图4可以看出,当油压为16 MPa时,在不同径向间隙下,接触面最大接触压力均大于16 MPa,满足O形圈的密封条件,原则上可以达到预期的密封效果。但是,随着径向间隙的增大,最大接触压力的位置发生了变化,而且从图3(c)和图4(c)可以看出,当径向间隙为0.9 mm时,O形圈已出现挤隙现象,说明在实际工作过程中,要尽量控制密封间隙,必要时需加装保护挡圈,以减少因间隙过大造成O形圈的提前损坏。

3 O形圈可靠性分析

以往对O形圈等密封件质量仅仅通过材料、尺寸以及外观合格来保证,随着可靠性技术的推广,

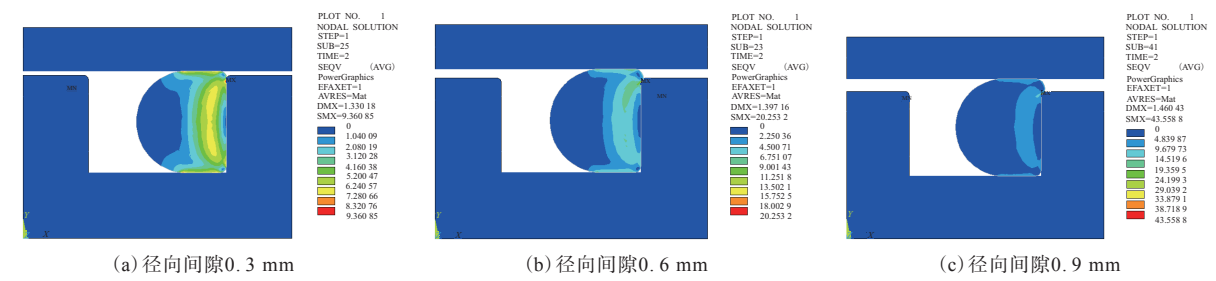


图3 网格大小0.5 mm、油压16 MPa时O形圈Von Mises应力

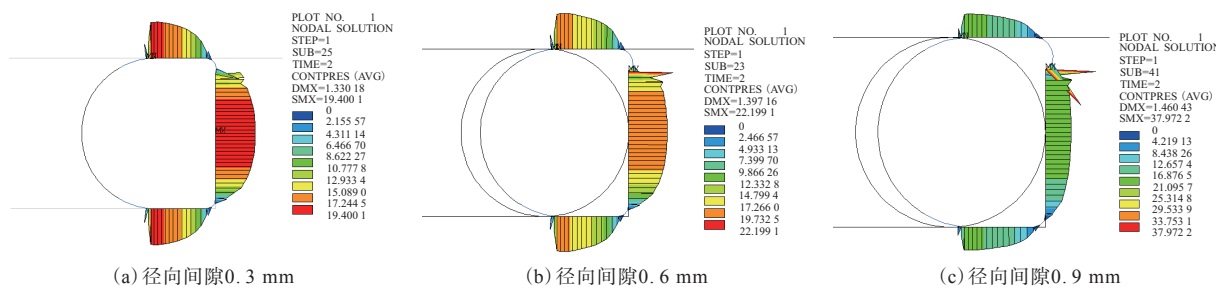


图4 网格大小0.5 mm、油压16 MPa时O形圈接触面接触压力

产品可靠性越来越受到重视。本工作基于Ansys的PDS模块,通过数值仿真方法研究了O形圈在投入使用时的可靠性,并对影响投入使用时可靠性的相关因素进行探讨。

3.1 输入条件确定

可靠性分析中,首先要确定可靠性分析输入条件。可靠性分析输入条件包括各随机参数的分布和特征以及可靠性分析方法的选择等。基于随机有限元的可靠性分析以随机有限元法为基础,随机有限元法有直接蒙特卡洛法、Taylor展开随机有限元法、摄动随机有限元法、Neumann展开随机有限元法4种,本工作采用Ansys中常用的蒙特卡洛直接抽样法对O形圈在投入使用时的可靠性以及影响可靠性的因素进行研究。

工程上的结构,无论是材料、载荷还是尺寸等方面都存在着不确定性^[8],可靠性分析的重要输入参数即为材料、载荷、尺寸参数的分布类型及特征。根据经验数据及一定的计算,得到各随机参数的分布及特征如表1所示。

3.2 结果分析

基于随机有限元的可靠度分析方法有5种:应力强度积分法、功能函数积分法、可靠度指标计算法、随机抽样法和响应面法^[9-10]。本工作采用功能函数积分法计算了O形圈在径向间隙为0.3 mm、油压为16 MPa条件下的可靠性,生成的可靠性分

析文件如图5所示。

从可靠性分析结果可以看出,虽然各输入随机变量均为正态分布,但是功能函数(接触压力与油压的差值)却不属于正态分布。从图5可以看出,在100次抽样中,所抽样本的功能函数最小值

表1 各随机参数的分布与特征			
参数类型	分布类型	均值	标准差
材料参数			
弹性模量/MPa	正态分布	14.04	0.1
泊松比	正态分布	0.499	0.03
尺寸参数			
O形圈线径/mm	正态分布	7	0.05
沟槽宽度/mm	正态分布	9.5	0.042
沟槽深度/mm	正态分布	5.85	0.017
缸筒圆角半径/mm	正态分布	0.3	0.001
载荷参数			
油压/MPa	正态分布	16	0.1

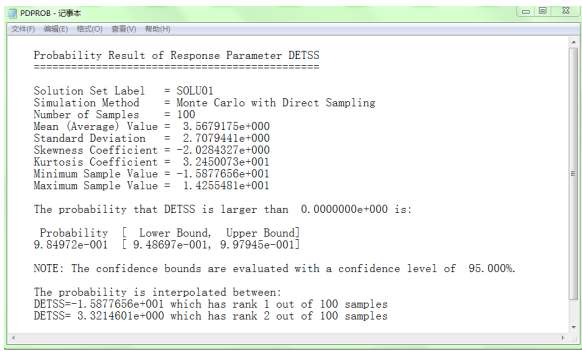


图5 O形圈可靠性结果报告

为-15.9,最大值为14.3,偏态系数小于零,说明功能函数属于左偏分布。功能函数大于零的概率为98.5%,说明该规格的O形圈在油压为16 MPa、径向间隙为0.3 mm时初始可靠度约为98.5%,即在一批合格的O形圈产品中,有98.5%的产品在投入使用时可以满足密封要求,剩下的1.5%在投入使用时不能满足密封要求。此外,通过各随机参数的灵敏度分析,获得了对O形圈初始可靠度影响较大的两个参数为线径和油压。

4 结论

(1)以Ansys为平台对线径为7 mm的径向活塞杆用O形圈的密封性能进行研究,对其在不同径向间隙和不同油压下的密封性能进行分析,得到了径向间隙以及油压对O形圈密封性能的影响。结果表明,油压对O形圈密封性能的影响较大,而在低压时径向间隙对O形圈密封性能的影响较小,高压时影响较大。

(2)对该O形圈的可靠性进行了研究。结果表明,当径向间隙为0.3 mm、油压为16 MPa时,该O形圈在所述随机输入参数下的初始可靠度约为98.5%。此外,通过各随机参数的灵敏度分析,获得了对O形圈初始可靠度影响较大的两个参数为

线径和油压,原则上适当减小O形圈线径可有效提高O形圈的初始可靠度。

参考文献:

- [1] 谭晶,杨卫民,丁玉梅,等. O形橡胶密封圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封,2006,41(9):65-69.
- [2] 胡殿印,王荣桥,任全彬,等. 橡胶O形密封圈密封结构的有限元分析[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(5):255-260.
- [3] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008:1-11.
- [4] 王海军,谷洲平. 三元乙丙橡胶海绵车门密封条压缩变形的仿真分析与试验验证[J]. 橡胶工业,2018,65(7):814-817.
- [5] 杨春明,谢禹钧,韩春雨. 基于ANSYS的橡胶O形密封圈密封性能的有限元分析[J]. 石油与化工设备,2010,13(4):21-24.
- [6] Rivlin R S, Saunders D W. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials (VII). Strain Distribution around a Hole in a Sheet[J]. Philosophy Transaction of Royal Society, 1951, A243:289-298.
- [7] 廖日东,左正兴,邹文胜. O形圈轴对称超弹性接触问题的有限元分析[J]. 润滑与密封,1996,31(5):30-33.
- [8] Mellah R, Auvinet G, Masroufi F. Stochastic Finite Element Method Applied to Non-linear Analysis of Embankments[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15:251-259.
- [9] Onkar A K, Upadhyay D. Probabilistic Failure of Laminated Composite Plates Using the Stochastic Finite Element Method[J]. Composite Structures, 2007, 48(2):780-798.
- [10] Lin S C. Reliability Predictions of Laminated Composite Plates with Random System Parameters[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15(4):327-338.

收稿日期:2019-09-14

Study on Sealing Performance and Reliability of Rubber O-ring by Ansys

ZHAO Minmin¹, HUANG Le¹, ZHANG Qi², XIA Yingsong³, PING Li⁴

(1. Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510700, China; 2. Guangzhou Guoji Intelligent Rubber & Plastic Sealing Technology Co., Ltd, Guangzhou 510700, China; 3. Anhui Zhongding Sealing Parts Co., Ltd, Xuancheng 242300, China; 4. Hangzhou Wahaha Group Co., Ltd, Hangzhou 310009, China)

Abstract: A two-dimensional axisymmetric model of rubber O-ring (referred to as O-ring) with line diameter of 7 mm was created in finite element analysis software Ansys, and the effect of radial clearance and hydraulic pressure on the sealing performance of O-ring was analysed. The results showed that hydraulic pressure had great impact on the sealing performance, while the effect of radial clearance was depended on the value of hydraulic pressure. When the hydraulic pressure was low, the effect of radial clearance was small, and when the hydraulic pressure was high, the effect of radial clearance became significant. The initial reliability of the O-ring seal was 98.5% when the radial clearance was 0.3 mm and the hydraulic pressure was 16 MPa. Based on the analysis of the sensitivity of random factors to the limit state function, it was found that the most significant factors influencing the reliability of O-ring were O-ring line diameter and hydraulic pressure.

Key words: rubber O-ring; Ansys; finite element analysis; sealing performance; reliability; contact analysis