

组合密封圈密封性能仿真研究

王玺¹, 仲健林², 夏文嘉², 王恒²

(1. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 2. 南京理工大学 机械学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为分析组合密封结构密封性能,对其密封状态下应力进行仿真研究。通过静态压缩实验获取橡胶材料和聚四氟乙烯材料力学性能;建立组合密封圈的有限元模型,研究了预压缩率、侧向油压和作动器运动方向对橡胶 O 形圈密封性能的影响;进一步分析了运动方向对斯特封密封性能的影响。研究表明,密封圈应力与压缩率、油压成正比,运动方向对 O 形圈应力有影响,运动方向对斯特封应力影响较小。

关键词:组合密封;O 形圈;斯特封;密封性能;有限元

中图分类号:TP391.9 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2019)06-0130-04

Simulation Study of Sealing Performance of Combined Sealing Ring

WANG Xi¹, ZHONG Jianlin², XIA Wenjia², WANG Heng²

(1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: To analyze the sealing performance of the combined sealing structure, the stress in the sealed state is simulated. The mechanical properties of rubber materials and PTFE materials are obtained by static compression experiments. The finite element model of combined sealing ring (O-rings and stepseals) is established. The effect of the pre-compression ratio, lateral oil pressure and actuator movement direction on the sealing performance of the rubber O-ring is studied and the influence of the direction of the motion on the sealing performance of the stepseals is further analyzed. The research result shows that the stress of the sealing ring is proportional to the compression ratio and the oil pressure. The direction of the motion has an effect on the O-ring stress, and little effect on the stepseals.

Keywords: combined sealing; O-ring; stepseals; sealing performance; finite-element

0 引言

橡胶材料是密封件中常见的密封材料,密封件中密封圈的失效或密封圈功能的逐渐衰减往往是引发液压系统发生漏油的主要因素,其中,密封件的设计、预压缩率和介质压力等都可能是造成密封件的失效的原因^[1]。密封件的失效将导致整个产品的性能和使用寿命大幅度降低,乃至造成不可挽回的灾难性后果^[2]。针对密封件密封性能问题,吕和祥^[3]在研究橡胶表面接触问题的时候,提出了分组联立求解的方法,对橡胶的受力情况进行分析。王伟^[4]等人利用大型有限元软件考察了橡胶 O 形圈接触面上的应力分布的规律。郑之盛^[5]在橡胶形圈密封原理的基础上,进一步分析了压缩率、拉伸率和材料特性装配的加工精度等对密封性能的影响。常洁等^[6]分析了在一定压缩率下摩擦系数、环境温度差等因素对密封特性的影响。

本文通过静态压缩实验获取橡胶材料和聚四氟乙烯材料力学性能,采用超弹性本构模型和线弹性本构模型拟合相关材料参数;采用 ABAQUS 软件建立组合密封圈(O 形圈和斯特封)的有限元模型,研究了预压缩率、侧向油压和作动器运动方向对橡胶 O 形圈密封性能的影响;进

一步分析了运动方向对斯特封密封性能的影响。

1 密封结构材料力学性能

1.1 密封结构示意图

如图 1 所示,液压缸活塞杆密封采用接触式的组合密封结构,其中,组合密封结构采用斯特封+O 形圈形式,斯特封由橡胶 O 形圈和聚四氟乙烯阶梯形圈组成,O 形圈为橡胶材料。

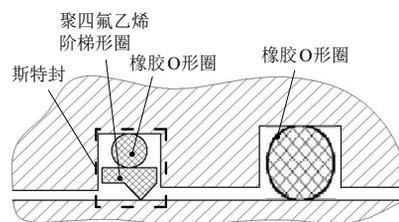


图 1 组合密封结构

1.2 密封结构材料力学性能

通过对密封结构本体材料——橡胶进行实验研究,获

得材料本身的力学性质,图2为橡胶静态压缩实物图。



图2 橡胶静态压缩

根据试验测试获得的压力-位移曲线(图3),结合M-R超弹性本构拟合相关材料参数,M-R超弹性本构为:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) \quad (1)$$

其中: C_{10} 和 C_{01} 为材料常数,本文上述常数拟合值分别为1.94和0.46; \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 为偏张量。

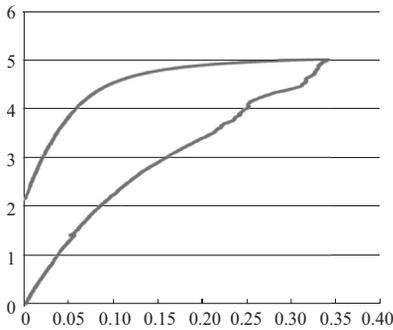


图3 橡胶压力-位移曲线图

聚四氟乙烯材料压缩试验如图4所示,试验测得的压力-位移曲线如图5所示,采用线弹性本构进行拟合,本文聚四氟乙烯弹性模量为960MPa。



图4 聚四氟乙烯静态压缩

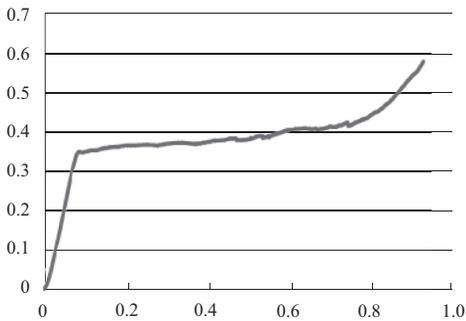


图5 聚四氟乙烯压力-位移曲线图

2 密封结构有限元建模

2.1 组合密封结构有限元模型

根据组合密封结构尺寸参数,材料参数采用第1节中试验测试所获参数。组合密封结构有限元模型如图6所示。

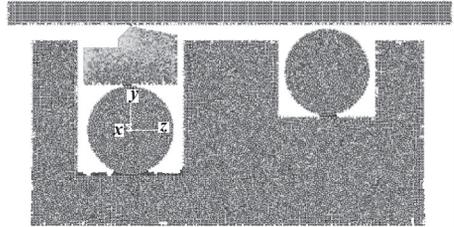


图6 组合密封圈有限元模型

该有限元模型由4部分构成,左侧为一个斯特封(橡胶O形圈和阶梯形聚四氟乙烯挡圈),右侧为橡胶O形圈。

2.2 橡胶O形圈

在ABAQUS/CAE中的Property界面中,材料命名为rubber,将其材料属性定义如下:Mass Density设置为 9.9×10^{-9} ,而Hyperelastic中的 C_{10} 、 C_{01} 和D1分别设置为1.94、0.46和0。在Mesh界面,对于网格的划分,网格类型为CPS4R。采用控制网格总数的方式,以自由网格划分技术划分。将Element Shape选为Quad。

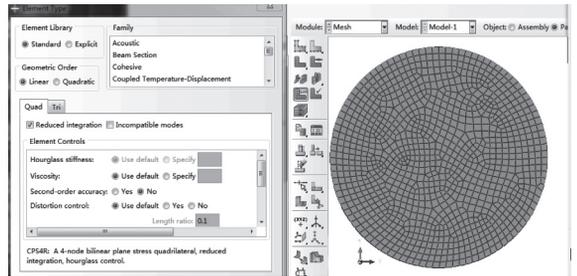


图7 网格选取图

2.3 聚四氟乙烯挡圈

与橡胶O形圈类似,在Part部分将Modeling Space设置为2D Planer,即二维平面,其余保持默认参数。在Property界面,材料命名为ptfe,将材料属性中Density中参数如下设置:Mass Density为 2.2×10^{-8} ,Young's Modulus为960,Poisson's Ratio取0.45。在Mesh界面中,将Element Shape选为Quad-dominated,网格类型CPS4R,将接触面部分的网格划分密一点,以自由网格技术划分。图8是其有限元模型。

3 密封性能分析

3.1 压缩率对O形圈应力影响

图9-图12为橡胶O形圈在不同压缩率下的压缩状态。

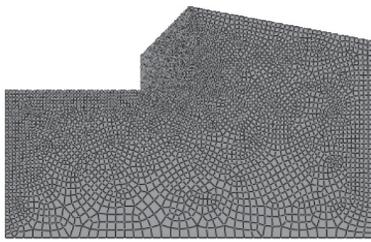


图 8 聚四氟乙烯挡圈有限元模型



图 9 压缩率 $W=5\%$



图 10 压缩率 $W=10\%$



图 11 压缩率 $W=15\%$



图 12 压缩率 $W=20\%$

由图 9-图 12 可知,随着压缩率的增大,应力集中逐渐由上下两侧向中间汇集和扩展。压缩率太小,会影响到密封性能,造成泄漏;压缩率太大,又会造成 O 形圈的应力松弛,使 O 形圈发生永久的变形,弹性降低,减少了密封圈的使用寿命,进而失去密封的能力。橡胶 O 形圈内部最大应力和压缩率几乎成正比的关系,在综合考虑的条件下,本文选取压缩率为 15% 的压缩状态作为研究对象,

以进行下一步的研究。

3.2 油压对 O 形圈应力影响

图 13-图 15 为橡胶 O 形圈在不同油压下的压缩状态。



图 13 压强 $p=1\text{ MPa}$



图 14 压强 $p=2\text{ MPa}$



图 15 压强 $p=4\text{ MPa}$

由图 13-图 15 可知,随着侧向油压逐渐增大,橡胶 O 形圈的应力集中大致位于与 O 形圈的两侧,且满足内部应力大于施加的油压,满足密封条件。橡胶 O 形圈内部最大应力和侧向油压大小成正比关系,在综合考虑下,本文选取油压为 2 MPa 时橡胶 O 形圈的状态。

3.3 作动器方向对 O 形圈应力影响

本文选取的橡胶 O 型圈将在压缩率 W 为 15%,侧向油压为 2 MPa 的情况下作动器的运动过程。考虑到模型中的侧向油压是单向,故对作动器左右运动分别进行仿真。仿真结果如图 16-图 17 所示。

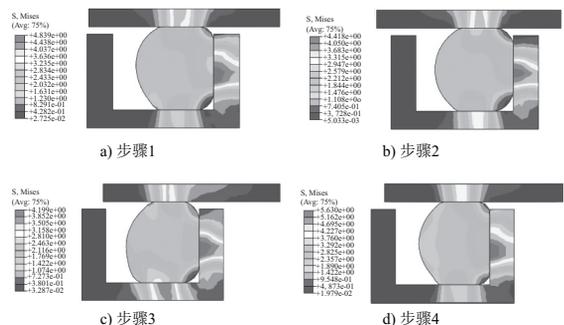


图 16 向右运动内部应力分布

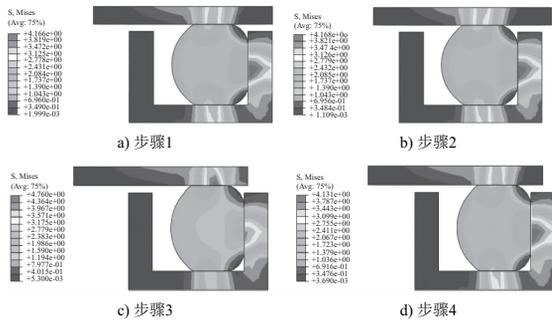


图 17 向左运动内部应力分布

由图 16-图 17 可知,运动方向不同时,橡胶 O 形圈内部应力分布的应力集中是有所区别的,但是,不管作动器的运动方向如何,橡胶 O 形圈内部应力主要集中在与缸壁和沟槽的接触面附近。

3.4 作动器方向对斯特封应力影响

对向左和向右两个方向对斯特封内部应力集中进行分析,如图 18-图 19 所示。

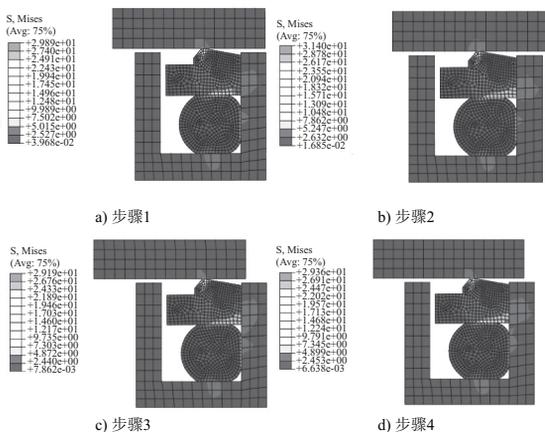
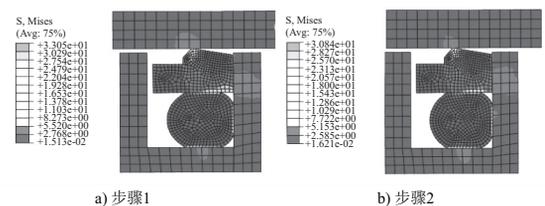


图 18 向左运动应力分布



a) 步骤1 b) 步骤2

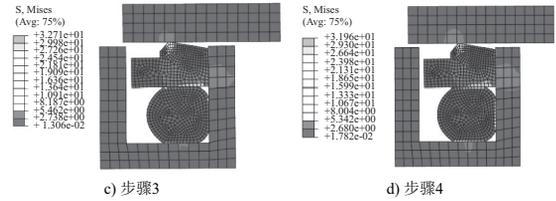


图 19 向右运动应力分布

由图 18-图 19 可知,斯特封与缸壁接触部位的集中应力非常大,导致其他部分的应力集中不明显。运动方向对斯特封内部的应力分布几乎没有影响。

4 结语

1) 随着压缩率的增大,应力集中逐渐由 O 形圈两侧向中间汇集和扩展。压缩率太小,会影响到密封性能,造成泄漏;压缩率太大,会造成 O 形圈的应力松弛,使 O 形圈发生永久的变形,弹性降低,缩短密封圈的使用寿命,进而失去密封的能力。橡胶 O 形圈内部最大应力和压缩率几乎成正比的关系,

2) 随着侧向油压逐渐增大,橡胶 O 形圈的应力集中大致位于 O 形圈的两侧,且满足内部应力大于施加的油压,满足密封条件。橡胶 O 形圈内部最大应力和侧向油压大小成正比关系。

3) 运动方向不同时,橡胶 O 形圈内部应力分布的应力集中是有所区别的;斯特封与缸壁接触部位的集中应力非常大,运动方向对斯特封内部的应力分布几乎没有影响。

参考文献:

[1] 白莉,宋存德,刘刚.深水气井套管接头密封圈气密性分析[J].润滑与密封,2018,43(6):12-17.
 [2] 张国渊,陈国忠,赵伟刚,等.高速低温动静结合型机械密封结构优化及运转试验[J].航空动力学报,2018,33(5):1093-1102.
 [3] 吕和祥.橡皮环大变形接触问题[J].应用数学和力学,1986(3):239-248.
 [4] 王伟,赵树高.橡胶 O 形圈密封圈的非线性有限元分析[J].润滑与密封,2005(4):106-107,110.
 [5] 郑之盛.O 形圈密封圈密封性能影响因素分析[J].现代商贸工业,2010,22(22):426-427.
 [6] 常洁,陈同祥.长寿命航天器结构密封性能仿真分析研究[J].航天器工程,2014,23(3):49-53.

收稿日期:2018-07-24

(上接第 126 页)

参考文献:

[1] 文春波,钱发军,刘鹏.农业秸秆资源化利用现状与评价[J].生态经济,2018,34(2):147-150,157.
 [2] ALFRED J, STAMM. Fundamental physical approach to wood and cellulose science[J]. Journal of Chemical Education, 1964, 41(4):198-201.
 [3] 马元庚.介绍一种移动式炭化炉[J].林产化工通讯,1993(4):24-26.
 [4] 于平,姬登祥,黄承洁,等.生物质催化热裂解技术的研究进展[J].能源工程,2011(1):25-29.

[5] 王有权,王虹,王喜才.用敞开放式快速炭化窑生产炭的工艺:中国,200610048274.3[P].2009-6-17.
 [6] THEJASREE P, KUMAR G D, LAKSHMI S L P. Modelling and analysis of crankshaft for passenger car using ANSYS[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(10):11292-11299.
 [7] 王林军,曹慧萍.基于 ANSYS-Workbench 的转子模态分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):89-93.
 [8] 李宇萌,蔡俊.浅谈 ANSYS 软件中模态分析的步骤[J].科技展望,2016,26(33):109-111.

收稿日期:2018-08-13