

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2025.04.015

文献引用: 陈铭亮,梁晟林,戴庆文,等.低压工况O形圈动/静密封特性数值模拟与实验研究[J].润滑与密封,2025,50(4):112-117.

Cite as: CHEN Mingliang, LIANG Shenglin, DAI Qingwen, et al. Experimental and numerical simulation study on sealing characteristics of O-rings under low-pressure working conditions[J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(4): 112-117.

低压工况O形圈动/静密封特性数值模拟与实验研究

陈铭亮, 梁晟林, 戴庆文, 黄巍, 王晓雷
(南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016)

摘要: 作动筒是飞机起落架系统的重要组成部分, 为起落架、舱门的放下和收上提供动力源。作动筒采用的O形圈通常工作在高速、高压、高温、高寒、振动、冲击等恶劣工况下, 常常出现渗漏, 影响系统的正常运行。为降低O形圈密封失效的影响, 以丁腈橡胶O形圈为例, 利用有限元方法分析O形圈在低压状态下的密封特性, 探究压缩率、油液压力等对O形圈动/静密封效果的影响及其作用机制; 同时搭建低压密封性能测试实验台进行验证。结果表明: 在动/静密封工况下, 随着油液压力的增加, 高压压缩率的O形圈表现出更好的密封性能; 在动密封状态下, O形圈存在扭转现象, 这进一步提升了O形圈的密封性能。

关键词: 丁腈橡胶; O形圈; 高/低压工况; 动/静密封; 压缩率

中图分类号: TB42; V226

Experimental and Numerical Simulation Study on Sealing Characteristics of O-rings Under Low-pressure Working Conditions

CHEN Mingliang, LIANG Shenglin, DAI Qingwen, HUANG Wei, WANG Xiaolei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: The actuator tube is an important component of the aircraft landing gear system, which provides power source for the landing gear, hatch lowering and retracting. The O-ring used in the actuator usually works under high-speed, high-pressure, high temperature, high cold, vibration, impact and other harsh conditions, and leakage often occurs, affecting the normal operation of the system. In order to reduce the impact caused by the sealing failure of O-ring, taking nitrile rubber O-ring as an example, the sealing characteristics of O-ring under low pressure were analyzed by finite element method, and the effects of compression ratio and oil pressure on the dynamic/static sealing effect of O-ring and its mechanism were explored. A low-pressure sealing performance test bench was built for verification. It is found that under the dynamic/static sealing condition, with the increase of oil pressure, the O-ring with high compression ratio presents superior sealing performance. There exists rolling torsion behaviour of O-rings under the dynamic sealing condition, which further enhances the sealing performance of O-rings.

Keywords: nitrile rubber; O-ring; high/low-pressure conditions; dynamic/static sealing; compressibility

作动筒是飞机起落架系统的重要组成部分, 为起落架、舱门的放下和复位提供动力源。为保证工作效率, 防止泄漏、腐蚀, 主起收放作动筒采用了O形橡胶密封圈进行密封。O形橡胶密封圈是一种截面形

状为圆形的橡胶圈, 因其密封效果好、价格低廉、更换便捷, 已广泛应用于各类液压和气动工况^[1]。而作动筒用O形圈通常工作在高速、高压、高温、高寒、振动、冲击等恶劣工况下, 是密封结构中的薄弱部

基金项目: 航空科学基金项目 (ASFC-2020Z040052002)

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-11-09

作者简介: 陈铭亮 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械密封与橡胶材料的密封特性。E-mail: cml13115013706@nu-aa.edu.cn。

通信作者: 戴庆文 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学与表面工程、润滑与密封。E-mail: daiqingwen@nu-aa.edu.cn。

位，常常出现渗漏，导致密封失效，影响系统的正常运行。1986年美国“挑战者”号航天飞机失事便是因固体火箭发动机的 O 形圈密封失效引起的，造成了人类航天史上的惨剧。另据统计，日本炼油业约 70% 的燃烧、爆炸事故是因橡胶密封件失效造成。

国内学者对 O 形圈密封特性开展了大量研究工作^[2]。在静密封方面，王东辉等^[3]对预压缩率及油液压力与接触应力的关系进行了一系列的研究。而在 O 形圈动密封方面，富绪光等^[4]对航空发动机往复运动密封装置中 O 形圈的滑动摩擦力进行有限元仿真，研究了压缩率对 O 形圈滑动摩擦力的影响；孙立刚和张铎^[5]开展了 O 形橡胶圈摩擦力矩的影响因素分析；张镇国等^[6]建立了双道 O 形密封的轴对称模型，研究了油液压力、往复运动速率对 O 形圈密封性能的影响；王永乐等^[7]建立双浮动密封二维轴对称模型，分析了 O 形圈在不同压缩率及不同摩擦因数下的应力变化情况。此外，国外学者也通过数值模拟的方法对 O 形圈密封接触应力分布开展了分析工作。BATTINI 等^[8]建立了真空泄漏测试的有限元模型，评估了密封所需的接触压力水平。JO 等^[9]利用数值模拟的方法分析计算机程序的测试结果来模拟 O 形圈的预测寿命，并确定了产品的优化维护期。SHIN 等^[10]分析了各种密封压力下恒定挤压 O 形圈的变形行为和内应力分布，确定了 O 形圈的设计准则。

然而上述仿真研究过程通常仅考虑了静密封（或动密封）单一工况，而在静/动密封能力差异比较方面的研究尚不充分。同时，对仿真结果的有效性也缺乏相应的实验验证。为此，本文作者以丁腈橡胶 O 形圈为研究对象，采用有限元法探究其在低压（0~1.5 MPa）工况下的密封特性，并搭建实验平台对仿真结果进行验证，以期能为工程应用提供参考。

1 有限元模型及实验装置

1.1 实验装置

为了验证仿真的可靠性，并探究在低压条件下压缩率对 O 形圈密封效果的影响，文中搭建了相应的 O 形密封圈泄漏测试平台，如图 1 所示。该装置可通过升降台调节密封面法向间隙，获取 O 形圈压缩率。此外，密封壁面连接滑轨和电机，可实现切向往复运动。密封圈与端面间的接触压力及壁面往复运动过程中的摩擦力均可通过传感器采集记录。实验过程中，外部油液持续加载，密封接触应力可通过采集特定油压下的接触压力及密封圈与壁面的接触面积计算获得，油液的平均泄漏率可通过记录油管中的液位变化计算获得。

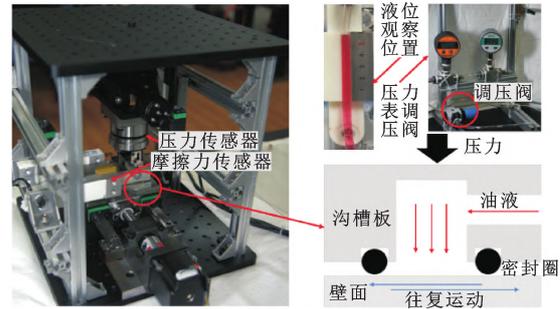


图 1 实验台示意

Fig. 1 Schematic of test bench

1.2 材料及本构模型

材料属性上，文中有限元分析和实验采用的接触密封壁面和 O 形圈的材料分别为常见的 45 钢和丁腈橡胶（NBR），其参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

| 结构 | 材料 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 | 密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|------|------|------------------------|-------|---|
| O 形圈 | 丁腈橡胶 | 14.04 | 0.499 | 1 330 |
| 密封壁面 | 45 钢 | 2.1×10^5 | 0.300 | 7 800 |

考虑到 O 形圈材料自身的特性，可将其视为超弹性体，即具有材料非线性以及几何非线性的力学特性^[11]。在有限元分析中，其应变能可采用 Rivlin 提出的不可压缩或近似压缩及各向同性橡胶材料的应变能函数进行描述^[12]：

$$W = \sum_{i=1, j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (1)$$

式中： C_{ij} 、 d_k 为 Mooney-Rivlin 模型常数； J 为初始和终止状态的体积比；应变不变量 I_1 、 I_2 可由下式计算获得：

$$\begin{cases} I_1 = J^{-2/3} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \\ I_2 = J^{-2/3} (\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2) \end{cases} \quad (2)$$

Mooney-Rivlin 模型通常包含多种材料参数，文中选取具有两参数的两项式 Mooney-Rivlin 模型，则此时 O 形圈材料的应变能函数^[13]可简化为：

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + 1/d_k (J - 1)^{2k} \quad (3)$$

式中： W 为应变能密度； C_{10} 、 C_{01} 为材料 Mooney-Rivlin 系数； $J=1$ ； I_1 、 I_2 为 O 形圈第一、第二应变张量不变量。

其应力-应变关系式为:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \quad (4)$$

基于公式 (1) — (4), 即可得到如图 2 所示的丁腈橡胶 (NBR) 的应力-应变曲线, 以用于后续有限元仿真计算。

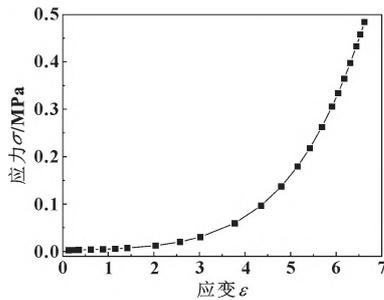
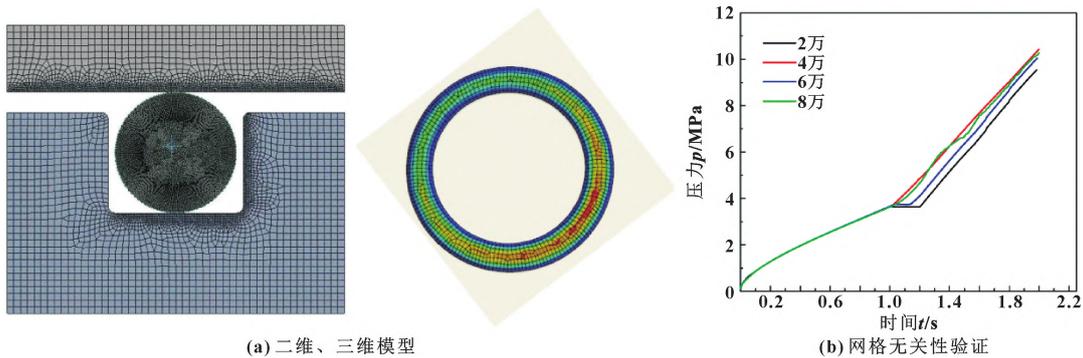


图 2 丁腈橡胶 (NBR) 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of nitrile rubber (NBR)



(a) 二维、三维模型

(b) 网格无关性验证

图 3 模型及网格无关性验证

Fig. 3 Model and grid independence verification: (a) 2D and 3D models; (b) grid independence verification

1.4 边界条件

为贴近实际工况, 文中将约束及载荷的施加分为 2 个载荷步。第一个分析步在垂直密封壁面的方向施加一个位移来模拟 O 形圈的初始压缩量, 第二个分析步在 O 形圈左侧通过 APDL 施加工作过程中所受的油压。此外, 对于有往复运动的动密封, 则在以上 2 个分析步的基础上再增加平行密封壁面方向上往复位移的分析步。

文中利用 APDL 命令流对 O 形圈施加流体渗透压力, 通过定义“壁面”和“橡胶圈侧面”, 指定一个完全暴露于流体中的起始点, 流体压力将沿着起始点向接触面加载, 且压力加载的方向垂直于单元面, 直到达到某个节点, 使得接触压力大于流体压力停止加载。图 4 所示为流体压力渗透加载原理, 如图所示, 当节点 107 的接触压力小于流体压力, 流体将继续向

1.3 几何模型及网格划分

由于 O 形圈密封结构具有轴对称性, 为了便于计算, 文中将采用简化的二维模型来进行分析。为与实验台保持对应关系, 文中还采用三维模型来分析密封原理。O 形圈密封结构基本尺寸见表 2, 有限元模型如图 3 (a) 所示。为验证网格无关性, 在保持其他条件不变的情况下, 逐步增大网格数量, 进行了系列仿真。图 3 (b) 给出了模型从 2 万到 8 万网格的数值解的变化曲线。可以看出, 网格数量增加到 4 万后, 数值计算结果误差在 10% 以内。所以文中划分的网格数量为 15 304, 节点数量为 47 223。

表 2 O 形圈密封结构尺寸

Tab. 2 O-ring seal structure dimensions

| 参数 | 内径 d_i/mm | 线径 d_w/mm | 沟槽宽度 B_g/mm | 沟槽深度 h_g/mm |
|----|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 数值 | 20 | 3.6 | 4 | 3 |

前加载; 反之, 如果节点 107 的接触压力值大于流体压力值, 流体将停止向前加载。利用这种加载方式, 可动态捕获临界点, 最终得到更准确的计算结果。

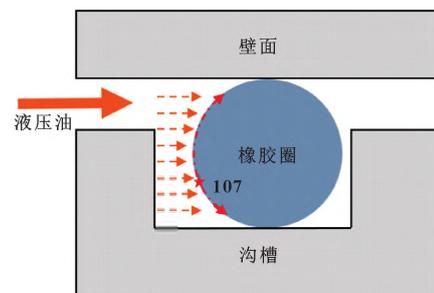


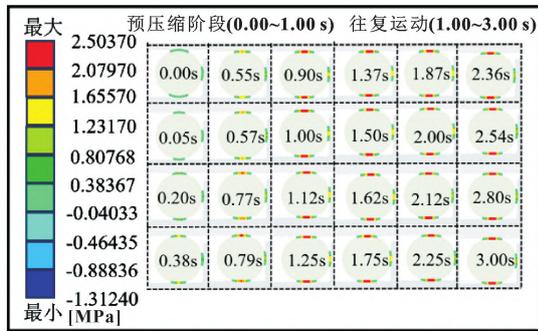
图 4 流体压力渗透加载原理

Fig. 4 Fluid pressure seepage loading principle

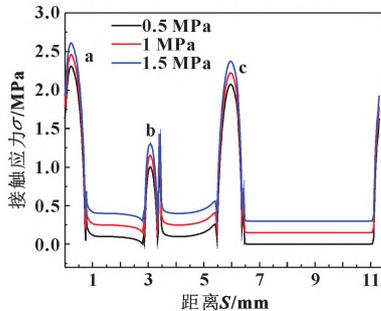
2 低压工况下O形圈的密封特性仿真

2.1 静密封特性

为探究O形圈的密封原理，文中在低压工况下仿真分析了O形圈周向接触应力分布。图5(a)所示为1.5 MPa介质压力下，压缩率10%时，O形圈仿真过程及截面周向的接触应力分布情况。可见，压缩率10%时，施加油液压力后，O形圈与沟槽底部、沟槽侧面及壁面依次形成了与图5(b)中对应的3个接触应力峰值，其中O形圈与壁面形成的密封面(c)为主要接触面，与沟槽面形成的密封面(a、b)为次要接触面。只要在主接触面产生的接触应力超过油液压力即可达到密封的效果。



(a) 1.5 MPa油液压力下O形圈仿真过程及截面周向接触应力分布



(b) 不同油液压力下O形圈周向接触应力分布

图5 静密封条件下10%压缩率O形圈周向接触应力分布
 Fig. 5 Circumferential contact stress distribution of O-ring with 10% compression under static sealing conditions; (a) O-ring simulation process and circumferential contact stress distribution under 1.5 MPa oil pressure; (b) circumferential contact stress distribution of O-ring under different oil pressures 10% compression rate at different oil pressures under static sealing conditions O-ring

图6所示为静密封条件下油液压力与O形圈表面接触应力的关系。可以看出，随着压缩率的增加，O形圈的接触应力显著增大，即同一尺寸的丁腈橡胶O形圈压缩率越高，其密封效果越好。同时，随着油液压力的增大，不同压缩率的O形圈主接触面接触应力也随之升高。而之所以相同压缩率和油液压力

下，动密封的最大接触应力更大，这应该与往复过程中密封圈的扭转现象有关。即O形密封圈因往复运动表现出扭转现象，由此增大了密封界面间的接触应力。

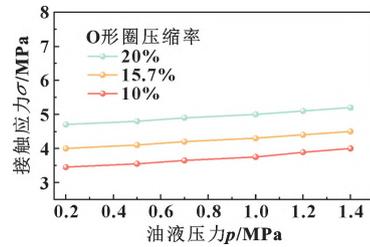


图6 静密封条件下油液压力与O形圈表面接触应力关系
 Fig. 6 Relationship between oil pressure and surface contact stress of O-ring under static sealing conditions

图7给出了压缩率为10%的O形圈在往复运动中O形圈沿水平径向截面对应的扭转角度仿真结果及几个关键位置的形态。可见，随着往复运动的进行，O形圈内侧沿运动方向逐渐发生扭转，在往复折返点时扭转现象最为显著；随着运动方向的改变，O形圈内侧出现较明显的扭转缝隙，随后扭转逐渐恢复。图中壁面位移为接触壁面在X方向上的运动变化，同时，通过定义O形圈内垂直方向的某一节点(节点编号17 866)，并截取节点-圆心连线与Y轴的夹角以获得扭转角。O形圈截面扭转角度和壁面运动同样随时间发生变化。由于密封圈接触部分受力各有不同，主运动方向上的变形遵循先运动、先挤压的规律，表现为O形圈在往复过程中循环发生单侧挤压、单侧放松的扭转现象。

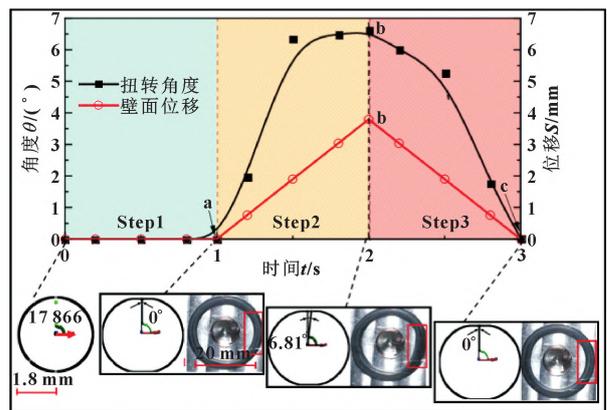


图7 滚动扭转示意
 Fig. 7 Schematic of rolling torsion

2.2 动密封特性

同样，为了探究低压条件下O形圈动密封特性，文中进行了动密封仿真分析，仿真结果见图8。

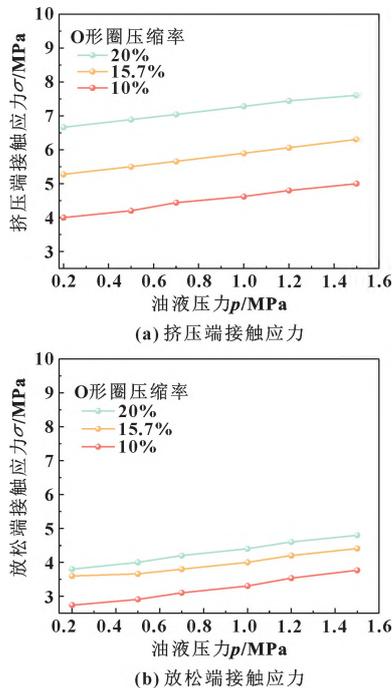


图 8 动密封条件下油液压力与 O 形圈表面接触应力关系
Fig. 8 Relationship between oil pressure and O-ring surface contact stress under dynamic sealing conditions:
(a) contact stress at extrusion end; (b) contact stress at relaxed end

图 8 所示为动密封条件下油液压力与 O 形圈挤压端、放松端接触应力关系。可知，动密封时 O 形圈表面接触应力仿真结果与静密封结果类似，都随着油液压力的增大而增大；但是，受挤压侧接触应力增幅较大，放松端接触应力增幅较小。对比图 6 不难看出，动密封条件下，挤压端的接触应力高于静密封条件下 O 形圈的接触应力，而放松端的接触应力低于静密封条件下 O 形圈的接触应力，所以动密封的泄漏率大于静密封的泄漏率。

3 低压工况下 O 形圈的密封特性实验研究

为了进一步探究在低压工况下，O 形圈动/静密封特性，文中在建立的实验台上研究了相同尺寸的 O 形圈，在 0~1.5 MPa 油液压力和不同压缩率下的动静/密封特性。

3.1 静密封特性

图 9 给出了在 0~1.5 MPa 油液压力下，4 种不同压缩率 O 形圈的实验过程以及其平均泄漏率与油液压力的关系。可以看出，随着油压的增大，不同压缩率的 O 形圈密封效果基本相同，并且有着相同的变化趋势，都随着油液压力的增加而降低；相同压缩率的 O 形圈密封效果呈现出趋同现象，即相同压缩率的 O 形圈的密封效果也随着油液压力的增加而降低。

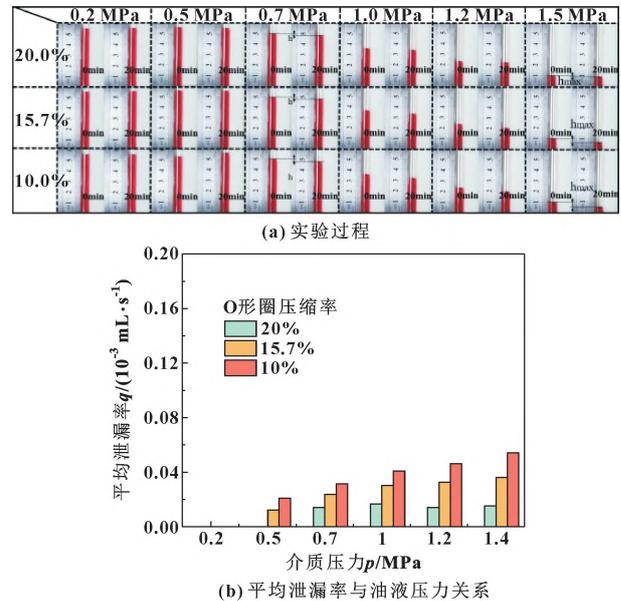


图 9 静密封工况下不同压缩率 O 形圈的实验过程结果
Fig. 9 Experimental results of O-rings with different compression rates under static sealing conditions: (a) experimental process; (b) the relationship between average leakage rate and oil pressure

3.2 动密封特性

同样，图 10 给出了动密封工况 0~1.5 MPa 油液压力下，4 种不同压缩率 O 形圈的实验过程以及其平均泄漏率与油液压力的关系。

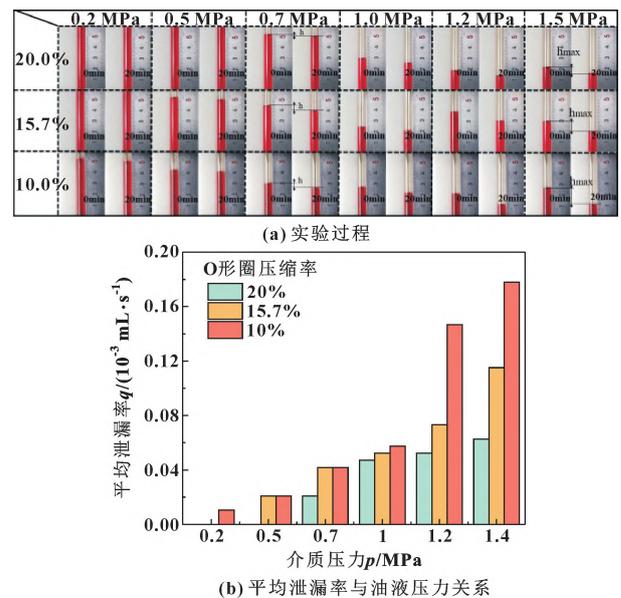


图 10 动密封工况下不同压缩率 O 形圈的实验过程结果
Fig. 10 Experimental results of O-rings with different compression rates under dynamic sealing conditions: (a) experimental process; (b) the relationship between average leakage rate and oil pressure

如图 10 所示,在动密封工况下,不同压缩率的 O 形圈密封效果差异较大,但都随着油压的增大而降低;并且当油液压力较高时,高压压缩率的 O 形圈表现出了比低压压缩率的 O 形圈更优秀的密封效果。同时横向对比动/静密封工况下的密封效果,相同压缩率的 O 形圈在动密封工况下的泄漏率较高。因为 O 形圈受力不均出现挤压、放松现象,导致 O 形圈挤压端接触应力高于静密封条件下的 O 形圈接触应力,放松端接触应力低于静密封条件下的 O 形圈接触应力,表现为相同压缩率的 O 形圈在动密封工况下的泄漏率较高。

4 结论

目前航空用作动筒随着服役年限增长,产品到达大修时限,检查发现有多种缺陷,尤其在功能类作动筒的维修过程中,缺陷逐渐凸显,尤其是渗漏这一缺陷,这给维修带来了诸多挑战。

采用简化的二维模型仿真分析低压工况下 O 形圈的动/静密封特性,并搭建往复密封实验台进行了验证。主要结论如下:

(1) 在静密封状态下,随着油液压力的增加,高压压缩率的 O 形圈呈现出更卓越的密封性能。在动密封状态下, O 形圈会存在扭转现象,该现象会使得 O 形圈表现出更好的密封性能,但同时会增加 O 形圈开裂的风险。

(2) O 形圈受力不均出现挤压、放松现象,导致 O 形圈放松端接触应力低于静密封条件下的 O 形圈接触应力,挤压端接触应力高于静密封条件下的 O 形圈接触应力,表现为相同压缩率下的 O 形圈在静密封工况下的密封效果更优。

(3) 仿真计算与实验结果得出,作动筒用 O 形圈的密封性能与预压缩率、密封工况以及密封状态相关。该结论可用于高/低压交变环境中的 O 形圈,为相同元件在不同工况下的维修、更换提供了相对工程经验更加准确的理论支持,同时减少了实验成本。

参考文献

- [1] 高锋.飞机液压系统泵—管路振动特性研究[D].杭州:浙江大学,2013.
GAO F. Investigation into the vibration characteristics of the pump and connected pipeline in the aircraft hydraulic system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [2] 黄兴,郭飞,叶素娟,等.橡塑密封技术发展现状与趋势[J].润滑与密封,2020,45(6):1-6.
HUANG X, GUO F, YE S J, et al. Research status and development trend of rubber and plastic sealing technology[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(6): 1-6.
- [3] 王东辉,戈嗣诚,王立武,等.柔性舱 O 型密封圈密封性能分析[J].航天返回与遥感,2021,42(1):48-56.
WANG D H, GE S C, WANG L W, et al. Analysis of the sealing

performance of O-ring in flexible cabin[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(1): 48-56.

- [4] 富绪光,陈江弥,罗震宇.往复运动密封装置中 O 形橡胶密封圈的滑动摩擦力有限元分析[J].橡胶工业,2021,68(5):332-338.
FU X G, CHEN J M, LUO Z Y. Finite element analysis of sliding friction force of rubber O-ring in reciprocating sealing device [J]. China Rubber Industry, 2021, 68(5): 332-338.
- [5] 孙立刚,张铎.高压载荷下旋转动密封结构转动转矩分析[J].固体火箭技术,2012,35(2):244-247.
SUN L G, ZHANG D. Analyzed on turning moment of revolving seal structure under high pressure load [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(2): 244-247.
- [6] 张镇国,沙宝林,王才,等.基于 Abaqus 的往复运动中双道 O 型圈密封性能分析[J].固体火箭技术,2019,42(1):85-91.
ZHANG Z G, SHA B L, WANG C, et al. Analysis of the double-sealing performance of O-ring in reciprocating movement based on Abaqus [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 85-91.
- [7] 王永乐,谢星,李香,等.双浮动密封橡胶 O 形圈接触应力分析[J].润滑与密封,2022,47(7):183-188.
WANG Y L, XIE X, LI X, et al. Contact stress analysis of the rubber O-ring for double floating seal [J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(7): 183-188.
- [8] BATTINI D, DONZELLA G, AVANZINI A, et al. Experimental testing and numerical simulations for life prediction of gate valve O-rings exposed to mixed neutron and gamma fields [J]. Materials & Design, 2018, 156: 514-527.
- [9] JO H J, KIM M, GWAK H. A Study on the life-time prediction for the rubber O-ring applied to decoy through the accelerated life test [J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2016, 17(10): 182-188.
- [10] SHIN D C, NAM J H, KIM D W. Experimental interior stress fields of a constantly squeezed O-ring modeling from hybrid transmission photoelasticity [J]. Experimental Techniques, 2016, 40(1): 59-72.
- [11] FRIED I, JOHNSON A R. Nonlinear computation of axisymmetric solid rubber deformation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 67(2): 241-253.
- [12] 黄建龙,解广娟,刘正伟.基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J].橡塑技术与装备,2008,34(12):22-26.
HUANG J L, XIE G J, LIU Z W. Finite element analysis of super-elastic rubber materials based on the Mooney-Rivlin and Yeoh model [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2008, 34(12): 22-26.
- [13] 黄国冠.氟塑料包覆硅橡胶 O 型密封圈的性能表征及应用研究[D].上海:华东理工大学,2017.
HUANG G G. Study of the properties characterization and application for fluoroplastic coated silicone O-ring [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.