

贮箱法兰O形环密封特性研究

赵鸿敬¹ 朱江²

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)
(2 四川航天烽火伺服控制技术有限公司,成都 611130)

文 摘 利用ABAQUS有限元分析软件,对某航天器贮箱容器GH4169合金O形密封环(简称O形环)进行了有限元分析,探讨了O形环不同压缩率、尺寸、涂层因素对O形环回弹及密封性能的影响。结果表明:压缩率是O形环回弹特性的重要影响因素,不同压缩率下O形环回弹量和回弹率有较大差别;O形环结构尺寸(外径、壁厚)对接触应力等接触性能影响较大;增加涂层有助于提高接触面宽度,但接触应力会有所降低。因此,法兰密封设计中密封环的选取需要综合考虑压缩量、结构尺寸、涂层等影响因素。

关键词 O形环,密封性能,回弹性能,接触应力,有限元分析

中图分类号:TH136

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.018

Research on Sealing Characteristics of Tank Flange O-ring

ZHAO Hongjing¹ ZHU Jiang²

(1 Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076)
(2 Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Corporation, Chengdu 611130)

Abstract Using ABAQUS finite element analysis software, a finite element analysis was conducted on the GH4169 alloy O-ring (referred to as O-ring) of a spacecraft storage container. The effects of different compression ratios, sizes, and coating factors on the rebound and sealing performance of the O-ring were explored. The results indicate that compression ratio is an important influencing factor on the rebound characteristics of O-rings, and there are significant differences in the rebound amount and rebound rate of O-rings under different compression ratios. The dimensions of the O-ring structure (outer diameter, wall thickness) have a significant impact on contact stress and other contact properties. Adding coatings can help increase the width of the contact surface, but the contact stress will be reduced. Therefore, the selection of sealing rings in flange sealing design needs to comprehensively consider factors such as compression, structural dimensions, coatings, etc.

Key words O-ring, Sealing performance, Resilience performance, Contact stress, Finite element analysis

0 引言

运载火箭的贮箱是航天运载器动力系统的关键部件之一^[1],由于其工作环境苛刻,对密封性能要求较为严格。O形密封环由于具有结构简单、回弹性好等特点,广泛应用在航空航天和核电等领域^[2]。

目前,国内外对金属O形环密封的研究已有相关报道。沈明学等^[3]对反应堆压力容器用Inconel 718合金O形环进行了有限元分析,探讨了O形环结构参数对密封性能的影响;郭飞等^[4]利用有限元软件研究了金属O形环压缩过程中关键截面的变形位移和关键截面特征点的运动轨迹的变化,分析了O形环整体变形情况;魏光强等^[5]采用了化学成分分析、

硬度测试、银镀层质量分析等分析方法对某核电站压力容器O形环进行了泄漏分析。结果表明,O形密封环与顶盖密封槽接触程度偏低,水流浸蚀镀银层导致O形密封环泄露;励行根等^[6]利用ABAQUS有限元软件对Inconel 718直管进行压缩回弹有限元分析,并将模拟得到的O形环回弹量与线比压结果与试验数据进行比较,误差不超过5%。

目前,国内外对于O形环研究主要集中于核压力容器,对于某些航天器用压力容器研究较少。由于航天器密封所用的O形环尺寸较小,如外径为5 mm,通过实验验证其回弹及密封性能较为困难,实验精度要求较高。因此,本文利用有限元方法对某航天用密封环

收稿日期:2022-06-22

第一作者简介:赵鸿敬,1975年出生,高级工程师,主要从事特种工程塑料、胶黏剂、橡胶密封及阻尼减振材料及应用的研究工作。E-mail:13641205392@163.com

进行回弹及密封性能分析,重点讨论GH4169合金O形环压缩率、外径、壁厚及涂层因素对密封的影响规律,其研究可为密封结构设计提供指导。

1 结构及有限元模型

1.1 分析结构

航天用某压力容器法兰密封处简化结构如图1所示。O形环安装在下法兰凹槽中,通过施加螺栓预紧力使上下法兰压紧密封环。O形密封环材料为GH4169合金,表面覆有厚度为0.1~0.15 mm的涂层,涂层材料为聚四氟乙烯,材料参数由表1所示。

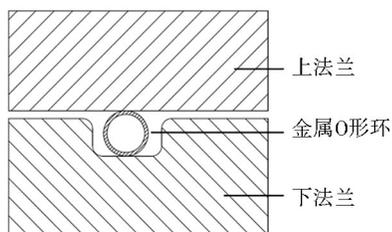


图1 某航天用压力容器密封结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sealing structure for a certain aerospace pressure vessel

表1 有限元分析所用材料参数

Tab. 1 Material parameters used in finite element analysis

结构	材料	E/MPa	μ
O形环	GH4169	2.14×10^5	0.3
涂层	聚四氟乙烯	500	0.3

1.2 有限元模型

金属O形环的压缩回弹属于非线性行为,涉及材料非线性、几何非线性。根据O形环结构及受力特点,取上下法兰和O形环为研究对象,建立二维轴对称模型。其中,O形环设置为弹性体,上下法兰简化为平面刚体,如图2所示。在上下法兰与O形环之间设置接触对,摩擦类型为库伦摩擦,摩擦因数取0.15。为模拟O形环压缩过程^[7],根据密封结构受力特点,定义下法兰为全约束,上法兰只可沿轴向(Y向)移动,如图3所示。

O形环采用CAX4R单元(4节点轴对称减缩积分单元)。对模型进行网格无关性验证,网格尺寸为15和 $10 \mu\text{m}$ 时最大MISES应力相差小于5%。为提高计

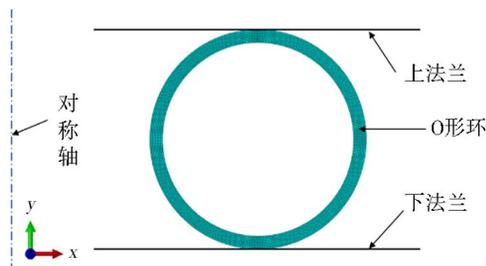
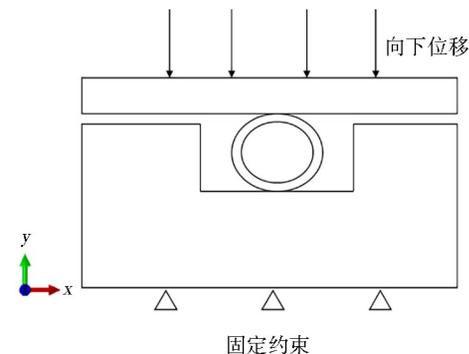


图2 网格模型

Fig. 2 Grid model

算效率,有限元分析网格尺寸选用 $15 \mu\text{m}$ 。



固定约束

图3 边界设置

Fig. 3 Boundary setting

2 结果分析与讨论

影响O形环密封特性因素较多,外部因素如密封环压缩率、密封槽槽深、密封环与法兰之间摩擦因数等;内部因素如密封环外径、壁厚、材料等。

2.1 压缩率

受到介质内压、温度载荷等作用,上下法兰之间产生轴向位移,出现一定开缝,O形环由于具有回弹能力,可以对密封面分离进行补偿,以保证达到密封要求。因此,O形环压缩一回弹特性是密封设计重要参考因素。压缩率为O形环压缩量与外径的比值;回弹量为O形环压缩一卸载后回弹值的大小。考虑到压缩率超过30%时,O形环中心凹陷程度较大,接触边界较复杂。因此,对O形环选取压缩率最大不超过30%的六组压缩率进行压缩回弹模拟^[8]。

图4为外径4 mm壁厚0.4 mm的O形环在四组压缩率下的塑性应变云图。

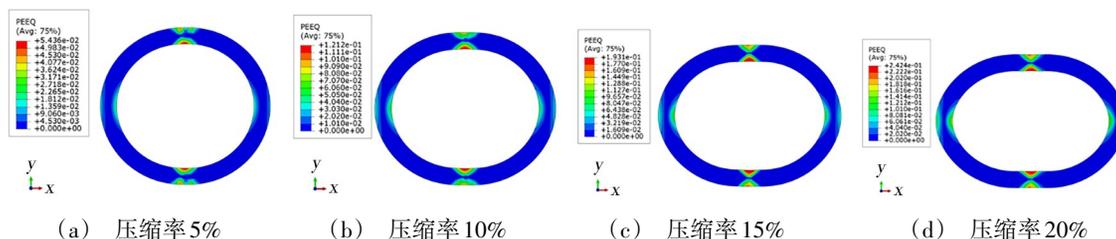


图4 O形环塑性应变云图

Fig. 4 Plastic strain cloud map of O-ring

压缩率为5%, O形环上下顶点位置、左右弯曲较大位置出现了塑性应变, 随着压缩率增加塑性应变逐渐增大。由云图看出, 上下顶点处塑性应变大于左右侧塑性应变, 内侧塑性应变大于外侧塑性应变。

图5和图6分别为O形环回弹率和回弹量随压缩率变化曲线。可以看出, 五组壁厚下的O形环回弹率随压缩率的增加逐渐减小, 且回弹率减小曲线逐渐平缓; O形环回弹量随压缩率的增加逐渐增大, 且壁厚越厚, 相同压缩率下, O形环回弹量越低; 当压缩率超过25%时, 回弹量增加幅度较小。

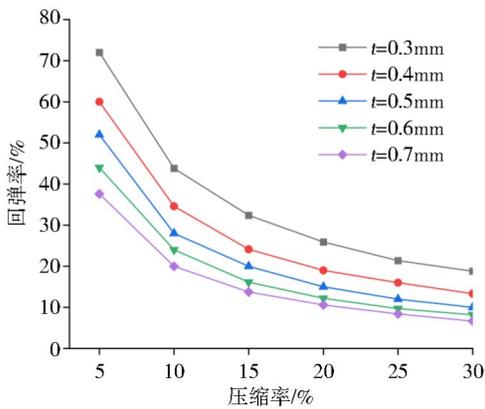


图5 $d=5\text{ mm}$ 的O形环回弹率变化曲线

Fig. 5 Rebound rate variation curve of O-ring with $d=5\text{ mm}$

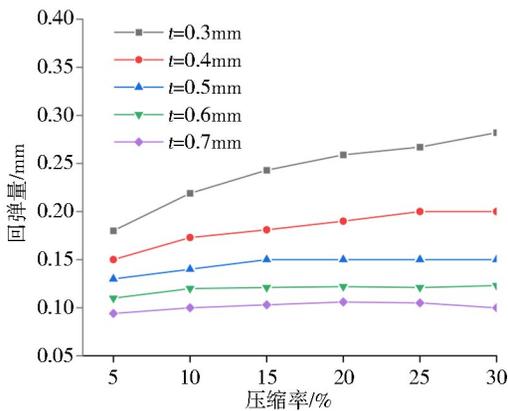


图6 $d=6\text{ mm}$ 的O形环回弹率变化曲线

Fig. 6 Rebound rate variation curve of O-ring with $d=6\text{ mm}$

2.2 外径

图7是两种外径O形环最大接触应力、最小接触应力随压缩率的变化曲线。可以看出, 随着压缩率的增大, 两种尺寸的O形环最大接触应力先小幅减小后增加, 压缩率超过20%时, 最大接触应力增加较缓慢; 最小接触应力在整个计算压缩率范围内变化不大。图8为不同外径的O形环在压缩率为10%, 接触应力随位置的变化曲线。O形环接触应力呈现两侧高、中间小的分布规律, 左右两侧高峰值构成密封环带, 且左右两侧高峰接触应力不对称分布, 最大接

触应力出现在外侧; 可以看出, 增加O形环外径, 最大接触应力减小。

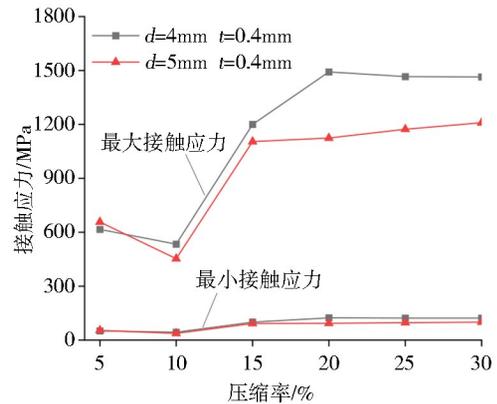


图7 外径对O形环最大、最小接触应力的影响

Fig. 7 The influence of outer diameter on the maximum and minimum contact stress of O-ring

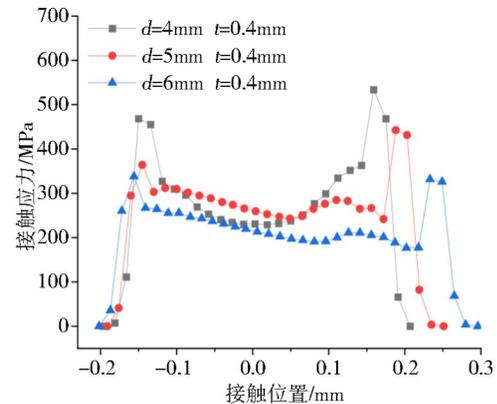


图8 外径对O形环接触应力分布的影响

Fig. 8 The influence of outer diameter on the distribution of contact stress of O-ring

2.3 壁厚

图9为两种壁厚O形环在压缩率为10%时接触应力随位置的变化曲线。在相同位置, 壁厚为0.5 mm的接触应力均大于壁厚0.4 mm的接触应力。由此可见, 壁厚对O形环密封影响较为明显, 通过增加

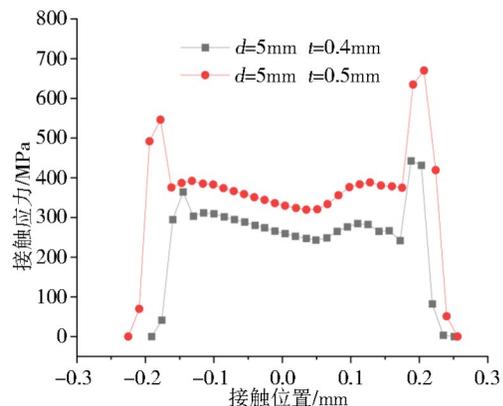


图9 壁厚对接触应力分布的影响

Fig. 9 The influence of wall thickness on the distribution of contact stress

壁厚可以提高接触应力,增加密封可靠性。结合2.1结论,增加壁厚回弹量及回弹率会下降,因此密封设计须同时考虑压缩率和壁厚的影响。

图10为两种壁厚O形环接触宽度变化曲线。接触宽度随着压缩率增大先增加后减小,当压缩率超过20%,接触宽度变化幅度较小;接触宽度出现最大值对应的压缩率有所不同。壁厚为0.4 mm接触宽度出现最大值对应的压缩率为13.6%,壁厚为0.5 mm接触宽度出现最大值对应的压缩率为15.1%。由此可见,壁厚越大,接触宽度出现最大值对应压缩率越大。

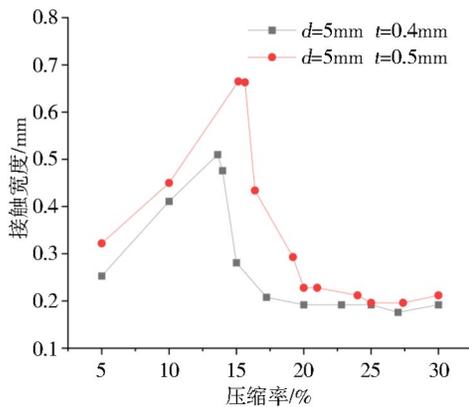


图10 壁厚对接触宽度的影响

Fig. 10 The influence of wall thickness on contact width

2.4 表面涂层

涂层是影响O形环密封性能的重要因素之一,增加涂层可以提升密封表面的密封性能^[9]。图11为增加涂层前后O形环压缩的载荷-位移曲线。可以看出,三种情况O形环载荷-位移曲线变化趋势基本相同;增加涂层后,相同压缩率所需的载荷较大,且涂层越厚,所需载荷越大。表2列出了三种情况的O形环压缩30%所需的最大载荷及载荷相对增加率。

图12为外径6 mm的O形环增加涂层前后接触应力变化曲线。增加涂层后,O形环接触应力峰值远

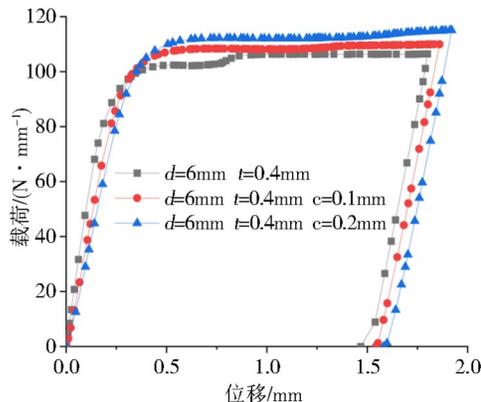


图11 增加涂层O形环压缩载荷-位移对比

Fig. 11 Comparison of compressive load and displacement of coated O-ring

表2 O形环压缩所需的最大载荷及载荷相对增加率

Tab. 2 The maximum load required for O-ring compression and the relative increase rate of load

O形环	最大载荷/(N·mm ⁻¹)	增加率/%
无涂层	106.5	-
涂层0.1 mm	110	3.3
涂层0.2 mm	115	8

小于无涂层情况;相同压缩率下,接触宽度大于无涂层情况。主要是由于涂层材料较O形环合金材料塑性更好,上下法兰压紧O形环后,涂层材料对接触压力起到均化作用,增加了接触宽度,密封更稳定^[10]。

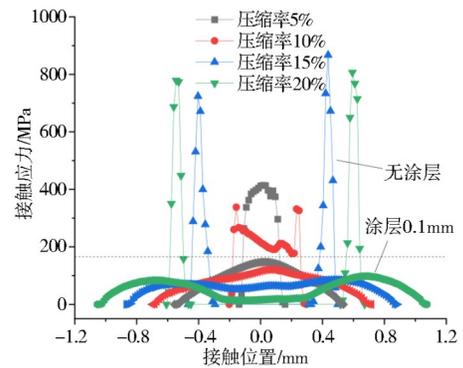


图12 增加涂层后O形环接触应力对比

Fig. 12 Comparison of contact stress after coated O-ring

3 结论

(1)压缩率对O形环密封面接触应力分布、接触宽度及塑性变形等特性有重要影响。压缩率过小,接触面接触应力较小;压缩率过大,O形环塑性变形增大,接触面中心位置凹陷增大,密封性能降低。因此,压缩率为10%~20%,O形环回弹率及接触应力分布较为理想,密封性能最佳。

(2)O形环尺寸(外径、壁厚)不同,其密封性能差别较大。增加壁厚,O形环接触应力会提高,但回弹率和回弹量会降低;增加外径,最大接触应力会降低。因此O形环选取要综合考虑外径及壁厚的影响。

(3)涂层材料对接触应力起到均化作用,接触宽度增加,接触应力分布更均匀,密封更稳定。

参考文献

- [1] 王腾,张茜,李澍,等. 运载火箭贮箱典型结构件自主统一造型方法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(6): 33-38.
- WANG T, ZHANG X, LI S, et al. Research for the unified and independent modeling method of the classic parts on the tank of launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(6): 33-38.
- [2] 刘艳军,吴国风. 金属O形环密封结构的泄漏模型研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(9): 19-24.

LIU Y J, WU G F. Research on leakage model of metal O-ring seal structure[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(9): 19-24.

[3] 沈明学, 谢林君, 赵丽娜, 等. 反应堆压力容器用 Inconel 718 合金 O 形环密封性能[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(12): 1785-1791.

SHEN M X, XIE L J, ZHAO L N, et al. Sealing characteristics of O-ring of Inconel 718 alloy in reaction pressure vessel[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(12): 1785-1791.

[4] 郭飞, 黄毅杰, 励行根, 等. 非圆金属 O 形环装配预紧过程仿真模拟[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10): 1-6.

GUO F, HUANG Y J, LI X G, et al. Simulation of pre-tightening process of non-circular metal O-ring assembly [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(10): 1-6.

[5] 魏光强, 田大容, 李卫军, 等. 某核电站压力容器 O 形密封环泄漏原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(4): 41-45.

WEI G Q, TIAN D R, LI W J, et al. Cause analysis on leakage of O-ring seal of pressure vessel in a nuclear power station [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Phys. Test.), 2020, 56(4): 41-45.

[6] 励行根, 杭建伟, 魏世军, 等. 反应堆压力容器金属

O 形密封环的研制[J]. 压力容器, 2016, 33(5): 1-8.

LI X G, HANG J W, WEI S J, et al. Manufacture of O-ring for reaction pressure vessels [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(5): 1-8.

[7] JIA X H, CHEN H M, LI X G, et al. A study on the sealing performance of metallic C-rings in reactor pressure vessel [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 278: 64-70.

[8] 蔡力勋, 叶裕明, 左国. Inconel 718 合金 O 形环的高温压扁弹塑性行为[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 818-822.

CAI L X, YE Y M, ZUO G. Elastic and plastic behavior of O-ring specimens of Inconel 718 alloy under side-compressing at elevated temperatures [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39(5): 818-822.

[9] LIU Y, ZHOU K, HUANG W F, et al. Numerical and experimental analysis of the reusability of spring energized metal C rings [J]. Science China (Technological Sciences), 2014, 57(8): 1670-1676.

[10] 张文昌, 励行根, 魏世军, 等. 金属 O 形环力学性能仿真分析与试验验证[J]. 润滑与密封, 2019, 44(8): 8-12.

ZHANG W C, LI X G, WEI S J, et al. Simulation analysis and test validation of mechanical properties of metallic O-ring [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(8): 8-12.