

液体火箭发动机涡轮泵密封组件静力学特性

徐云飞^{1,2}, 刘 丽¹, 徐学军^{1,2}, 李 锋^{1,2}, 黄道琼^{1,2}, 段 捷³

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;

2. 液体火箭发动机技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710100;

3. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了提高液体火箭发动机涡轮泵端面密封的气检合格率, 开展了密封组件的静力学特性分析。采用有限元法建立了密封端面接触分析模型, 针对石墨环装配过盈量、弹簧刚度偏差与气检压力 3 个方面进行了仿真计算, 获得了端面变形量和密封压力分布的变化规律。计算结果表明: 在 0.13 mm 过盈量下, 石墨环上端面高度差为 7.2 μm ; 弹簧刚度偏差量变化引起的动静环端面压力分布最大差值约 0.1 MPa; 在气检过程中密封端面呈环形的压力分布。

关键词: 液体火箭发动机; 密封组件; 静力学特性; 密封压力分布; 有限元法

中图分类号: V434.21-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0017-05

Static mechanical characteristics of turbopump seal assembly in liquid rocket engine

XU Yunfei^{1,2}, LIU Li¹, XU Xuejun^{1,2}, LI Feng^{1,2}, HUANG Daoqiong^{1,2}, DUAN Jie³

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engine, Xi'an 710100, China;

3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: To rise the checking qualification rate of seal in turbopump end face in liquid rocket engine, the static mechanical characteristics of seal assembly is analyzed. The contact analysis model of seal assembly was set up with FEM. The simulating calculation for fit tolerance of graphite ring, bias of spring stiffness and checking pressure was performed to get the variation law of end-face deformation and sealing pressure distribution. The result indicates that the end face height difference of graphite ring upper surface is 7.2 μm at fit tolerance of 0.13 mm, the biggest different value of pressure distribution on end faces of moving ring and static ring is 0.1 MPa, which is caused by bias of spring stiffness, and the pressure distribution of sealing end-face appears in circular shape in the process of sealing checking.

Keywords: liquid rocket engine; seal assembly; static mechanical characteristic; sealing pressure distribution; finite element method

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11502186, 51506157)

作者简介: 徐云飞 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机技术

0 引言

在液体火箭发动机工作过程中,端面密封结构起着至关重要的作用。一旦端面密封失效,将会引起介质泄露,严重时将使氧化剂与燃料串腔爆炸,造成火箭发射失败。导致端面密封结构失效的主要原因是密封组件变形,国内外对液体火箭发动机涡轮泵的研究,主要包括涡轮泵转子及其支撑结构的动静态特性^[1-3]、端面密封热变形和压力变形^[4-8]等方面,但具体针对压力变形的影响因素分析研究却很少。

本文针对某发动机氧化剂泵端面密封结构气检泄漏率超差问题,建立了端面密封结构的有限元分析模型,对涡轮泵装配与检漏过程中影响密封特性的因素进行了研究,为发动机涡轮泵端面密封故障诊断机理分析提供支持。

1 涡轮泵端面密封结构简介

发动机涡轮泵端面密封结构如图 1 所示^[9]。主要由动环组件与静环组件组成,动环组件主要包括动环、动环轴套和压环;静环组件包括石墨环、静环座、静环衬套以及支撑弹簧等,其中石墨环通过热套方式过盈装配在静环座上。

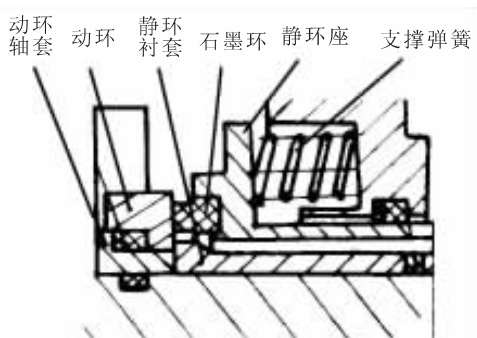


图 1 发动机涡轮泵密封端面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sealing end-face in engine turbopump

涡轮泵不工作时,在支撑弹簧的预紧力作用下,动环和石墨环组成的摩擦副保持贴合;涡轮泵工作时,带压力推进剂充填至环形的密封组件外侧后,通过对静环座施加附加的液压轴向力实

现摩擦副动密封^[9]。然而在产品加工完成后的气密检查时发现,由于石墨环与静环座之间过盈装配引起石墨环变形等原因,导致密封副端面压力分布不均,造成气检泄漏率超出容许值,影响产品交付合格率,因此有必要通过静力学仿真分析对密封面压力分布的影响因素进行分析。

2 模型建立

针对图 1 所示的密封结构,采用商业有限元软件 ANSYS 建立的有限元模型如图 2 所示,模型采用结构化网格进行划分,选择 20 节点的 Solid186 网格单元可以保证足够的计算精度。

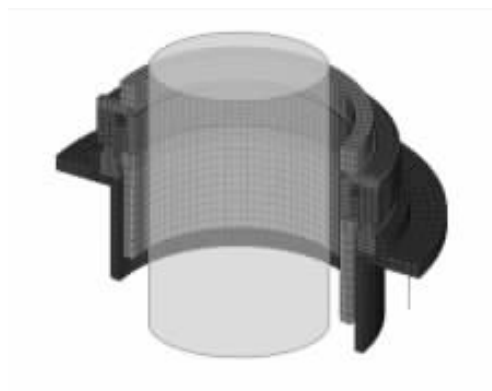


图 2 涡轮泵密封组件有限元模型

Fig. 2 FEM model of seal assembly in turbopump

由于石墨环刚度较低,而其余密封组件结构均为刚度较高的不锈钢材质,因此在接触分析时,石墨环与静环座以及动环之间的接触面设置为“刚体-柔体接触”、其余接触面均为“柔体-柔体接触”。值得注意的是,“刚体-柔体接触”设置中,刚性面设置为目标面,柔性面设置为接触面;而对于“柔体-柔体接触”,目标面与接触面可以任意设置。在计算前,将接触刚度的比例因子给定 0.1,接触算法选择增强的拉格朗日法。

导致密封组件气检泄漏率超差的原因主要包括:装配过盈量、支撑弹簧刚度偏差和气检压力。通过建立静力学仿真计算模型,结合相应的边界条件,对整个密封组件的静态特性进行计算和分析,有利于确定影响密封副密封特性的瓶颈参数,为密封结构改进方案的确定提供数据支持。

3 计算结果与讨论

3.1 装配过盈量分析

石墨环与静环座之间为过盈装配, 这一设计可以有效保证二者之间的密封, 但装配应力会引起石墨环变形, 可能导致石墨环与动环之间的接触面减小或接触压力分布不均, 影响密封的可靠性。

为研究过盈量变化对静环组件应力分布、接触压力及上端面轴向变形影响, 采用加工公差范围内不同的过盈量, 对静环组件装配后状态进行

静力学分析, 其中过盈量分别设置为 0.085 mm, 0.107 5 mm 及 0.13 mm, 计算得到的部分结果如图 3 和图 4 所示。

对于不同过盈量, 静环组件的应力最大值均出现在静环座上沿的环状区域中、石墨环的最大轴向位移均出现在其内表面上端附近的环状区域, 并且均随着过盈量的增大而增大。石墨环上端面与静环座外沿上端面变形内环均高于外环; 在 0.13 mm 最大过盈量下, 石墨环上端面高度差为 7.2 μm。

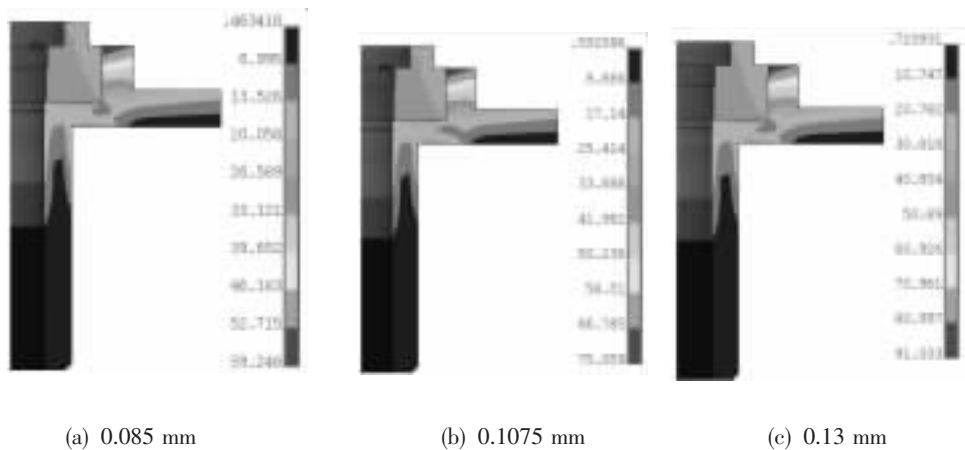


图 3 不同过盈量下的结构等效应力/MPa
Fig. 3 Von Mises stress distribution at different fit tolerances

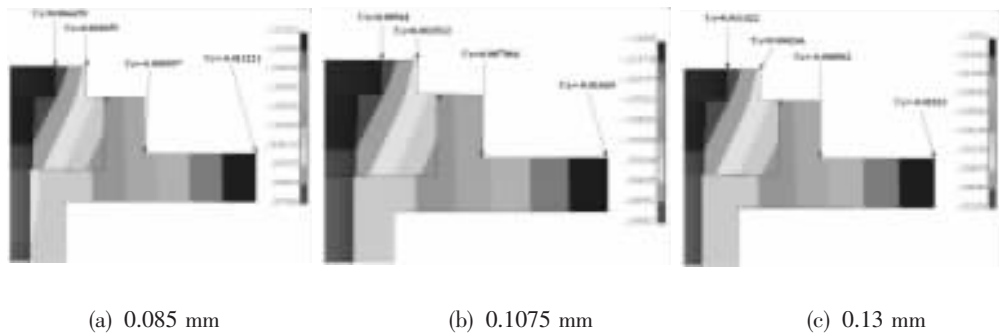


图 4 不同过盈量下的结构轴向变形/mm
Fig. 4 Axial strain at different fit tolerances

3.2 弹簧刚度偏差分析

静环座底部沿周向均匀设置 8 个支撑弹簧, 用于使动静环接触并预紧: 一方面, 离散布置的 8 个弹簧支撑力沿静环座和石墨环达到密封端面, 可能使密封压力分布均匀性较差; 另一方面, 弹

簧支撑刚度偏差会使动静环之间初始密封比压分布偏斜, 进而影响密封性能。根据弹簧设计要求, 其刚度偏差允许有±9%范围内的波动, 因此计算模拟的最恶劣工况为密封面的一二象限弹簧刚度正偏差 9%, 三四象限弹簧刚度负偏差 9%。

弹簧刚度均匀的情况下，动静环密封端面的压力分布较为均匀，最大压差 0.036 MPa，如图 5(a) 所示。由于 8 根弹簧沿周向均匀支持静环座外沿下端面，所以接触压力的极值点也是沿 1/8 周长均匀分布。而弹簧刚度偏差极限情况下，接触压力分布均匀均匀性较差，石墨环上端面最大接触压力差值 0.098 MPa，已经超过了最小压力值的 50%，如图 5 (b) 所示。因此可以认为，支撑弹簧刚度分布不均是影响密封组件密封性能的故障模式之一。

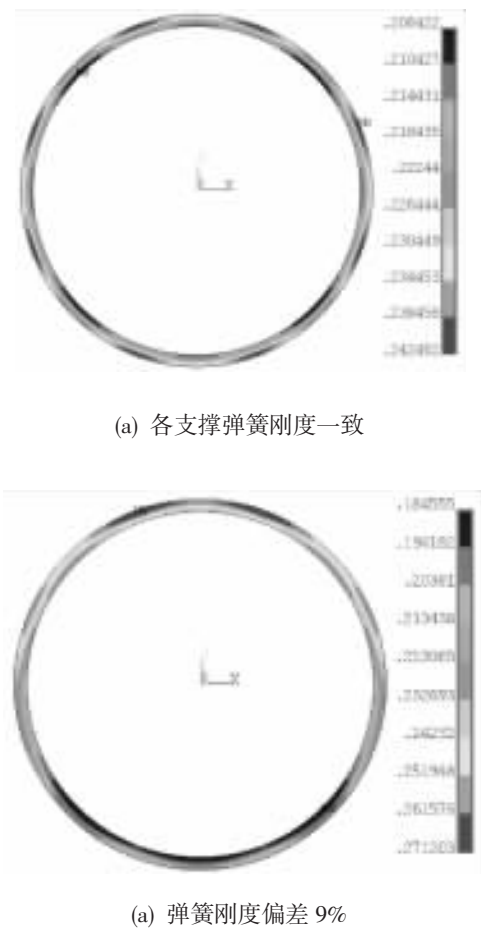


图 5 弹簧刚度偏差对密封比压的影响/MPa
Fig. 5 Influence of spring stiffness on sealing pressure distribution/MPa

3.3 气检压力分析

在密封组件泄漏率检查的过程中，气检压力作用会使整个结构的变形和应力分布发生变化，进而对密封副的密封性能产生一定影响。计算的边界条件为对受密封压力的面施加对应的压力，

如图 6 所示，密封端面上的密封比压分布计算结果如图 7 所示。

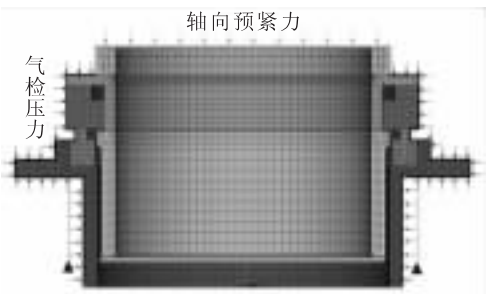


图 6 施加气检压力位置
Fig. 6 Schematic diagram of checking pressure position

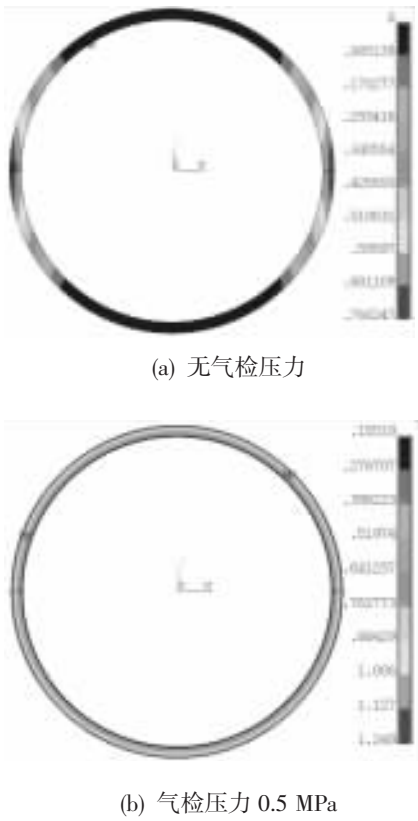
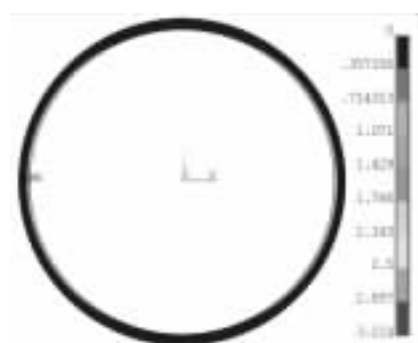


图 7 气检压力对密封比压的影响/MPa
Fig. 7 Influence of checking pressure on sealing pressure distribution/MPa

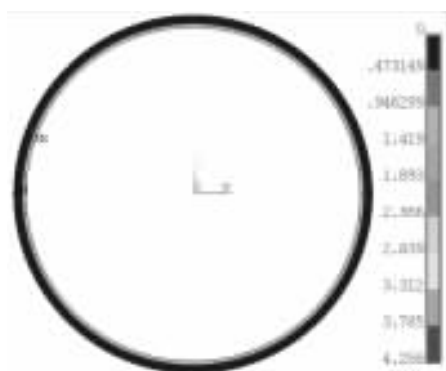
对比无气检压力与 0.5 MPa 气检压力下端面密封计算结果发现，无气检压力时，端面密封压力分布近似呈“马鞍形”，这主要是由于动环轴套与动环之间的传力是对称分布的 2 个支耳，装配压力传递过程引起动环变形造成；通入

0.5 MPa 气检压力后, 密封端面接触压力增大, 使得刚度小的石墨环变形量增大进而使得端面密封压力分布特性得到了改善, 另外静环座肩部由于受到不平衡的轴向力发生变形, 使得静环组件上翘, 造成外高内地的环形压力分布。

同时考虑石墨环装配过盈量与气检压力条件下的密封比压分布计算结果如图 8 所示。由图 8 可知: 无气检压力下, 端面密封压力分布变成了“双月牙形”, 压力分布均匀性差, 存在大比例的低压力区; 通入 0.5 MPa 的气检压力后, 压力分布有一定改善、且同样呈圆环形分布。可以看出, 对于静环组件过盈装配 0.13 mm 后, 气检过程中, 有效密封的面积比较低。



(a) 无气检压力



(b) 气检压力 0.5 MPa

图 8 同时考虑气检压力与石墨环装配过盈量 (0.13 mm) 对密封比压的影响/MPa

Fig. 8 Influence of checking pressure and fit tolerance of graphite ring on sealing pressure distribution/MPa

4 结论

通过某发动机涡轮泵密封组件的静力学特性研究, 得到以下结论:

- 1) 石墨环与静环座过盈装配 0.13 mm 时, 石墨环上端面高度差为 7.2 μm 。
- 2) 弹簧刚度偏差量变化引起的动静环端面压力分布最大差值 0.098 MPa, 已经超过了最小压力值的 50%。可以认为, 支撑弹簧刚度分布不均是影响密封组件密封性能的故障模式之一。
- 3) 对于静环组件过盈装配 0.13 mm 状态, 在气检过程中, 有效密封的面积比较低, 且呈圆环形分布。

参考文献:

- [1] 谢光军, 胡芑庆, 秦国军. 涡轮泵振动参数与统计特征量的线性相关性分析[J]. 推进技术, 2005, 26(6): 540-547.
 - [2] 白长青, 许庆余, 张小龙. 滚动轴承 - 火箭发动机液氢涡轮泵转子系统的动力特性分析[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 258-261.
 - [3] 徐悦, 田爱梅, 何磊, 等. 涡轮泵环形密封激振特性的数值计算[J]. 水动力研究进展, 2005, 20(增刊): 815 -820.
 - [4] DOUST T G, PARMAR A. An experimental and theoretical study of pressure and thermal distortions in a mechanical seal[J]. ASLE transactions, 1986, 29(2): 151-159.
 - [5] MERATI P, OKITA N A, PHILLIPS R L, et al. Experimental and computational investigation of flow and thermal behavior of a mechanical seal[J]. Tribology transactions, 1999, 42(4): 731-738.
 - [6] 洪先志, 董宗玉, 顾永泉. 机械密封端面力变形的解析计算[J]. 化工设计, 2002, 12(2): 37-39.
 - [7] 吴勋, 成跃, 解红雨, 等. 液体火箭发动机涡轮泵端面密封贮存变形研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 5-8, 15.
 - [8] 吴勋, 解红雨, 陈广南, 等. 液体火箭发动机涡轮泵端面密封长期贮存变形研究[J]. 宇航材料工艺, 2008, 5(1): 29-32, 40.
 - [9] 白东安, 段增斌, 张翠儒. 涡轮泵端面密封性能与漏气量影响研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 38-42.
- BAI dong'an, DUAN Zengbin, ZHANG Cuiru. Effects of leaking rate on turbopump end-face sealing performance [J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(1): 38-42.

(编辑: 马 杰)