

软金属密封结构密封性能数值仿真研究

黄其殷, 白旭东, 李妙婷

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对液氧煤油发动机管路中广泛应用的软金属密封结构, 采用单边接触模型和材料弹塑性模型相结合的方法, 通过有限元软件 Nastran 隐式非线性模块对其进行数值仿真。得到并分析了结构应力、位移及接触应力等相关参数。结果表明, 软金属密封结构在 45 MPa 内压下, 结构强度满足使用要求, 密封面接触应力大于 300 MPa, 密封安全系数大于 1.67。

关键词: 软金属; 密封; 数值仿真; 非线性模块

中图分类号: V434.1-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 03-0029-05

Numerical simulation of soft metal sealing performance

HUANG Qi-yin, BAI Xu-dong, LI Miao-ting

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The soft metal sealing structure widely used in LOX/kerosene rocket engine was numerically simulated by means of the Nastran implicit nonlinear module and the method which combines the contact model and material elastic-plastic model. The relevant parameters such as structure stress, displacement, contact stress and so on are analyzed. The result shows that the intensity of the soft metal sealing structure can satisfy the requirement of application when it is at the pressure of 45 MPa, the contact stress of the sealing surface is above 300 MPa, and the sealing safety factor is more than 1.67.

Keywords: soft metal; sealing; numerical simulation; nonlinear module

0 引言

由于发动机工作条件十分恶劣, 在其工作条件下应满足密封无泄漏、结构可靠、质量小、拆卸方便、制造成本低、互换性好及多次使用的要求^[1]。软金属密封结构应用于高压补燃循环液氧

煤油发动机的高压气路和高压液路接头, 其密封可靠性是确保发动机正常工作的重要基础之一。较以往发动机球面密封结构, 软金属密封结构通过采用不同材料的密封垫, 适用于-190 ℃低温液氧、常温燃料及 500 ℃高温燃气等工作环境, 在使用中表现出良好操作性、密封性及抗震性。

国内外学者通过商业有限元软件 ABAQUS 和

收稿日期: 2012-03-16; 修回日期: 2012-05-18

基金项目: 国家“863”项目(2005AA722063)

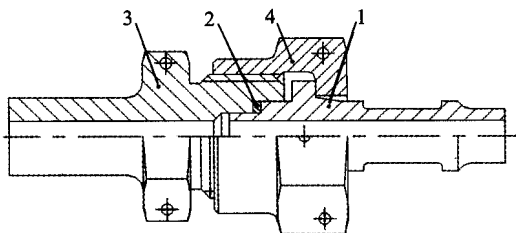
作者简介: 黄其殷 (1983—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机总体设计

ANSYS 对航天器氧系统和燃料系统管路密封结构密封性能进行了仿真分析^[2-4]。针对软金属密封结构,将通过有限元软件 NASTRAN 隐式非线性模块,建立起软金属密封结构接触和材料弹塑性有限元模型,并对其密封机理和密封性能进行仿真分析。

1 密封结构组成

软金属密封结构如图 1 所示,包括凹台阶接头、软金属密封垫、凸台阶接头及外套螺母 4 个零件,在凹台阶接头和凸台阶接头密封面上开有 V 型密封槽。

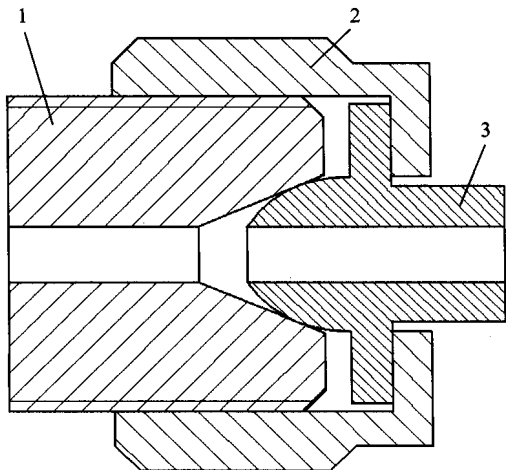
常用的球面密封结构如图 2 所示,由凹球面接头、外套螺母及凸球面接头组成。



1-凸台阶接头; 2-密封垫; 3-凹台阶接头; 4-外套螺母

图 1 软金属密封结构

Fig. 1 Configuration of soft metal seal



1-凹球面接头; 2-外套螺母; 3-凸球面接头

图 2 球面密封结构

Fig. 2 Configuration of spherical seal

与球面密封相比,在工程应用中发现软金属密封具有以下优点:

- 1) 使用温度范围广,可在 $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氧温度, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 富氧燃气环境下正常工作;
- 2) 管路通径应用范围广,从 4 mm 小通径管路到 32 mm 通径管路均可保证可靠密封;
- 3) 重复使用性强,软金属强度远小于接头强度,不会损伤接头密封面,因此每次拆装只需更换密封垫即可多次重复使用;
- 4) 良好的加工性,软金属密封结构中,凸、凹台阶接头的配合面较长,在装配时起导向作用,可防止因装配偏差造成密封垫受力不均而影响密封性能,不需要特殊精加工;
- 5) 良好的抗震性,密封垫塑性变形后,填充导向配合间隙,使凸、凹台阶接头配合非常紧密,整个密封具有良好的抗震放松能力。

2 数值模型与计算方法

凹台阶接头、凸台阶接头及外套螺母材料为高强不锈钢,弹性模量 $E=210\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$, $\sigma_{0.2}=980\text{ MPa}$;软金属密封垫为经退火处理的工业纯铝 L4,弹性模量 $E=70\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.27$,屈服应力小于 50 MPa 。由于不锈钢屈服强度远大于纯铝屈服强度,因此,在计算中不锈钢材料使用弹性本构模型,L4 材料特性采用弹塑性本构模型,接触计算采用单面接触模型^[5-6]。

三维弹塑性接触问题控制方程为:

平衡方程

$$d\sigma_{ij} + df_i = 0 \quad (1)$$

几何方程

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (du_{ij} + du_{ji}) \quad (2)$$

弹塑性本构模型

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} + \epsilon_{kl}^p) \quad (3)$$

Von Mises 屈服准则

$$F(\sigma_{ij}, k_0) = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] - \frac{1}{3} \sigma_{s0}^2 = 0 \quad (4)$$

力随后迅速增加, 结构第二次进入硬化阶段。在工作过程中, 随着管路内压增加, 逐渐平衡部分轴向预紧力, 使密封垫的应力逐渐下降。

从图 10 可以看到, 在预紧过程, 接触应力随加载历程增加而增加, 接触应力在 170 MPa 附近, 由于密封垫进入塑性阶段, 导致数值计算振荡所致。在工作过程中, 开始施加管路内压, 结构应力单向加载平衡被打破, 凹台阶接头和凸台阶接头开始卸载, 导致计算振荡, 随着管路内压的逐步提高, 接触压力缓慢降低。

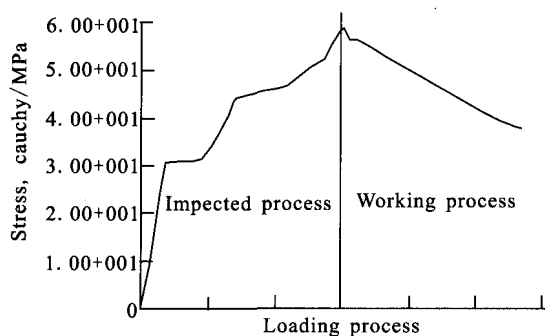


图 9 应力-加载历程曲线

Fig. 9 Stress versus loading process

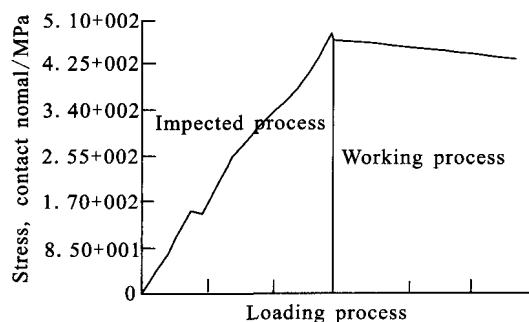


图 10 接触应力-加载过程曲线

Fig. 10 Contact stress versus loading process

从以上计算结果可以发现, 软金属密封结构的密封机理为: 随着螺纹提供轴向压紧力增大, 软金属密封垫被压缩, 逐步填满凸台阶接头、凹台阶接头密封面上微小凸凹不平, 并发生大范围

弹塑性变形, 楔入接头 V 型密封槽中, 最终使介质通过密封面的阻力大于密封面两侧的压差完成密封。

4 结论

1) 软金属密封结构的密封机理: 随着螺纹提供轴向压紧力增大, 软金属密封垫被压缩, 逐步填满凸台阶接头、凹台阶接头密封面上微小凸凹不平, 并发生大范围弹塑性变形, 楔入接头 V 型密封槽中, 最终使介质通过密封面的阻力大于密封面两侧的压差完成密封。

2) 软金属密封结构具有使用温度范围广, 从液氧-190 ℃到富氧燃气 500 ℃, 工作时间长, 具有良好的加工性和抗震性能。

3) 软金属密封结构在管路内压 45 MPa 下, 结构最大应力为 875 MPa, 密封垫变形受压变形后楔入密封槽内, 密封垫接触应力分布均匀, 且大于 300 MPa, 密封安全系数大于 1.67。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] PHILLIPS Dawnr R, WINGATA Robert J. Seal analysis for the ares-I upper stage fuel tank manhole covers, AIAA 2010-2783[R]. USA: AIAA, 2010.
- [3] 王建武, 刘军生, 陈少斌. 球面型管路连接件密封性能分析及力学性能测试[J]. 火箭推进, 2010, 36(6): 36-41.
- [4] PHILLIPS Dawnr R, WINGATA Robert J. Seal joint analysis and design for the ares-I upper stage LOX tank, AIAA 2011-1721[R]. USA: AIAA, 2011.
- [5] 张洪武. 参变变分原理与材料和结构力学分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 陈红火. Marc 有限元分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 王文斌. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

(编辑: 马 杰)