

自紧式 K 形金属密封组件密封特性研究

赵 剑¹, 谭永华², 陈建华¹, 雷 征¹

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: K 形金属密封是液氧/煤油发动机液氧管路系统中经常使用的金属密封结构, 其密封性能关系着发动机能否可靠工作。针对自紧式 K 形金属密封组件, 采用非线性有限元方法, 基于局部理想粗糙度等效简化, 研究了密封机理。仿真结果再现了密封接触面的形成模式, 论证了“压力自紧式”密封特征和可重复使用特性, 并以密封接触面积和平均接触应力为指标, 获得了密封性能与拧紧力矩的敏感性关系。

关键词: K 形金属密封; 非线性有限元; 密封机理; 重复使用

中图分类号: V432-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 06-0035-07

Research on sealing characteristics of pressure-actuated K-shaped metal sealing component

ZHAO Jian¹, TAN Yong-hua², CHEN Jian-hua¹, LEI Zheng¹

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

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

Abstract: The K-shaped metal sealing component is used frequently in the liquid oxygen pipeline system of LOX/kerosene rocket engine. Its sealing performance straightly relates with the reliability of the engine. Based on the nonlinear finite element method (FEM) and the equivalent simplification of local roughness, the sealing mechanism of self-tightened K-shaped seal component is acquired. Numerical simulations have reproduced the sealing formation mode of contact surfaces, and demonstrated the characteristics of "pressure-actuated" and reusable performance. According to the total contact area and average contact stress, the sensitivity between sealing performance and assembly moment is obtained.

Keywords: K-shaped metal seal; nonlinear FEM; sealing mechanism; reuse

收稿日期: 2013-11-05; 修回日期: 2013-11-20

基金项目: 国家 863 项目(2013AA702302)

作者简介: 赵剑 (1986—), 男, 博士研究生, 研究领域为高压补燃液氧煤油发动机总装结构

0 引言

高压补燃液氧/煤油发动机工作压力高, 介质温度差别大, 传统形式的静密封结构已经不能适用。为此, 研制了多种新型密封结构, 其中 K 形环金属密封组件 (简称 K 形环) 成功应用于液氧管路系统^[1]。

工程上对球面密封^[2,4-5]和金属垫片^[3,7-8]等强制型金属密封结构研究较多, 研究者多基于非线性有限元方法和试验来研究密封机理、密封性能和影响因素。研究表明, 密封接触材料的相容性对密封性能有着较大的影响, 对于密封介质温度变化较大的环境, 密封件的热膨胀效应将影响密封面的接触作用^[3]。密封面材料的线膨胀系数与预紧压力有很大关系, 对于两种热膨胀系数相差较大的材料, 当温度变化时, 需要更多的压紧力作用^[5]。

金属垫片装配时, 连接件弹塑性变形对密封效果影响很大^[6]。表面形貌、压紧应力以及介质压力是金属垫片界面泄漏的主要因素, 密封表面形貌对密封效果的影响比压紧应力和介质压力显著得多^[7]。设计时应尽量增大连接件的强度和尺寸^[8], 改善受力状态, 减小密封面偏离和分离。

相对于球面密封和金属垫片密封, K 形环密封具有自紧式密封特性, 装配补偿性能好, 可用于有温度和压力波动的场合, 在液氧管路系统中比较常见。管路密封失效是液体火箭发动机所有失效环节中比较多见的一种失效模式^[3-4,9], 然而工程上关于 K 形环密封的研究内容相对较少。本文以液氧/煤油发动机用 K 形环密封组件为研究对象, 对装配过程中密封接触面的形成机理进行了研究, 论证密封组件的可重复使用特性, 并基于局部粗糙度等效处理, 分析软金属镀层塑性变形填充密封面“粗糙度凹坑”的作用模式。

1 K 形环密封结构及特点

密封组件主要由球面接头和 K 形环组成 (见图 1)。K 形环外表面镀铜和银。

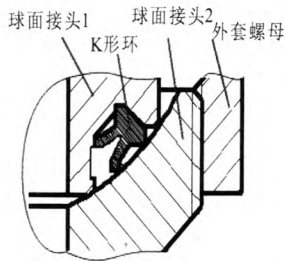


图 1 K 形金属密封组件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of K-shaped metal sealing component

K 形环依靠外套螺母提供轴向预紧位移约束, 使密封组件产生弹塑性变形, 接触面镀层金属发生塑性流动, 填充球面接头表面粗糙度间隙, 使密封面的阻力大于介质压力, 实现密封。与常规结构相比, K 形环金属密封有如下特点:

- 1) 结构独特, 在装配状态下, 每个接触面可以形成 2 道密封接触, 提高密封可靠性;
- 2) 密封面为悬臂结构, 在介质内压作用下, 密封面将产生附加密封压紧力, 提高密封比压, 具有压力自紧式密封特性。

2 仿真模型与方法

2.1 密封组件非线性特点

密封性能取决于密封面接触应力和密封面间隙^[7-8]。在装配预紧状态下, K 形环将产生弹塑性大变形, 各密封接触面之间存在摩擦、滑移以及变形等接触, 表现出材料、几何和边界条件非线性特性。

密封组件材料力学性能参数如表 1 所示, 其中球面接头、K 形环和外套螺母为高强不锈钢。K 形环外表面镀铜和银。由于铜镀层与基体结构相容性较好, 用作底镀层, 银用做功能性镀层。

表 1 中材料的力学性能参数为名义值 (相对于变形前的值), 在仿真计算时需要转换为真实的应力应变参数 (相对于变形后的尺寸), 具体转换关系为

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln(\varepsilon_{\text{norm}} + 1) \\ \sigma = \sigma_{\text{norm}} (1 + \varepsilon_{\text{norm}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{norm} 为名义应力; σ 为真实应力; $\varepsilon_{\text{norm}}$ 为名义应变; ε 为真实应变。

表 1 密封组件材料力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of sealing materials					
材料	E/GPa	ν	σ_y/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$
Steel	210	0.3	1 180	960	11
Ag	71	0.38	125	35	50
Cu	128	0.35	209	33.3	60

采用 Mises 流动理论描述材料进入塑性阶段的本构关系, 其内容包括塑性流动因子和屈服条件。在 Drucker 公设和 Ilyushin 假设前提下, 塑性变形满足正交法则: 塑性变形率沿着屈服面的外法线方向, 通过引入率形式的本构方程, 可以得到塑性流动因子的表达式。应用 Mises 屈服条件和各向同性硬化理论, 并引入 Mises 等效应力作为硬化参数, 即

$$\sigma_{\text{eq}} = (3J_2(\sigma))^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中 $J_2(\sigma)$ 为应力偏量的第二不变量, 因此 Mises 流动理论也称为 J_2 流动理论。

根据高强度钢的特点, 选用幂指数硬化模型来描述材料的弹塑性本构关系, 即

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma \leq \sigma_{\text{eq}} \\ k(\varepsilon)^n & \sigma > \sigma_{\text{eq}} \end{cases} \tag{3}$$

式中 k, n 为硬化参数。根据上述关系, 可以计算得到高强度钢幂指数硬化曲线 (见图 2)。

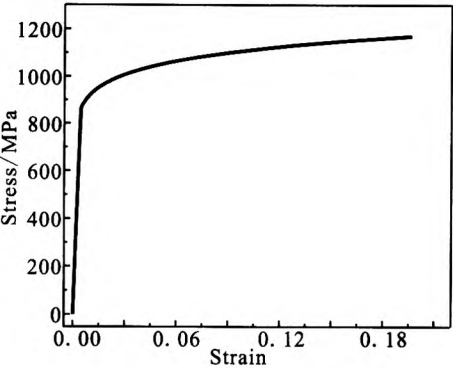


图 2 高强度钢幂指数强化曲线

Fig.2 Power exponent hardening curve for steel

2.2 模型与网格

K 形环密封组件为回转体结构, 在工作状态, 密封面承受轴向位移和均布内压载荷, 具有几何、载荷和变形的轴对称分布特点, 因此可以将其简化为二维轴对称结构 (见图 3)。

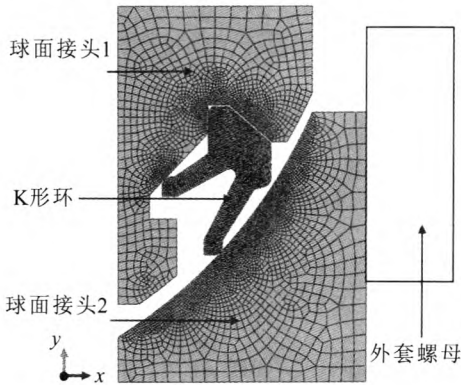


图 3 模型网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model and mesh

K 形环及球面接头采用轴对称非协调单元, 外套螺母简化为离散刚体。在接触局部网格细化, 网格收敛性检验表明: 17 137 个节点满足网格无关性要求。根据装配关系, 分别定义 K 形环与球面接头 1、球面接头 2 及外套螺母之间的接触关系。采用罚函数来表征接触面摩擦准则, 摩擦系数为 0.2, 应用 ABAQUS 软件进行非线性有限元分析。

2.3 等效预紧力计算

K 形环密封组件采用外套螺母的装配形式, 发动机装配技术要求中明确了外套螺母装配件拧紧力矩要求。为了便于仿真分析, 将拧紧力矩等效转换为轴向预紧力, 经过螺纹连接换算关系^[10]可以得到等效轴向预紧力 $F_t=43\ 750\sim50\ 000\ \text{N}$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 密封接触建立过程

球面接头 1 端部固定, 按照“初始位置-预紧位置-初始位置”的步骤在球面接头 2 端部施加轴向位移载荷, 模拟密封组件装配-拆卸过程。

图 4 中 S_0 点表示 K 形环 A 和 C 处初始产生接触作用位置 (图 5a); S_1 点表示 K 形环 D 处初

始产生接触作用位置 (图 5b), K 形环变形类似于悬臂梁的弯曲; S_2 点表示 K 形环 B 处初始建立接触作用位置 (图 5c)。从 K 形环结构特点可知, 随着装配位移增加, 组件 B 和 D 处接触挤压作用占据主导 (图 5d), 其“预紧力-位移”曲线近似为线性, 最小二乘刚度为 668 737 (N/mm)。

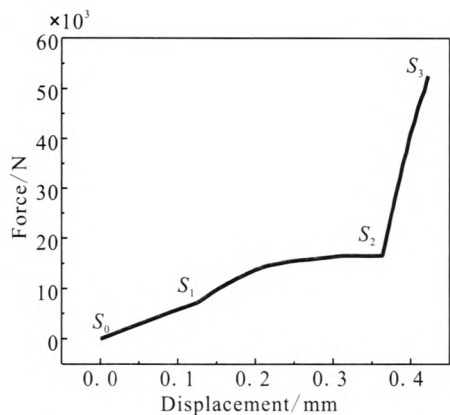


图 4 装配过程“预紧力-位移”曲线

Fig. 4 “Pretightening force to displacement” curve of assembly process

S_2 至 S_3 的过程中, 轴向位移增加 0.06 mm, 占总安装位移 14.2%; 预紧力却增加 35 944.4 N, 占预紧力 68.4%, 即 68.4% 的预紧力被用于 B, D 位置的接触挤压作用。

从结构上可知, A, D 密封接触面 (密封面 1) 共同承担 K 形环与球面接头 1 之间的密封作用。B, C 密封接触面 (密封面 2) 共同承担 K 形环与球面接头 2 之间的密封作用。这里定义密封面平局接触应力与总接触面积来综合表征泄漏通道的密封性能。

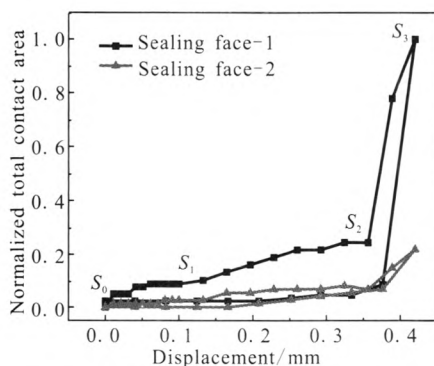
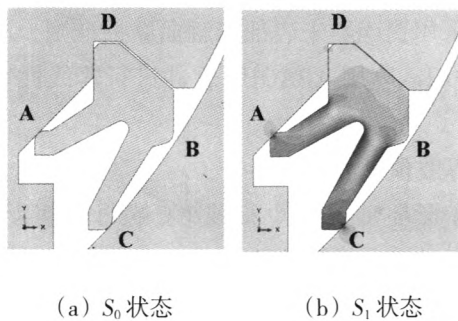


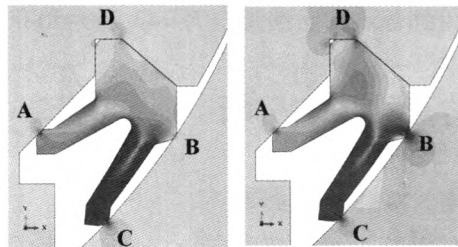
图 6 无量纲接触面积随装配位移变化

Fig. 6 Variation of dimensionless total contact area with assembly displacement



(a) S_0 状态

(b) S_1 状态



(c) S_2 状态

(d) S_3 状态

图 5 各装配状态点对应的 Mises 应力

Fig. 5 Nephogram of Mises stress corresponding to each assembly status

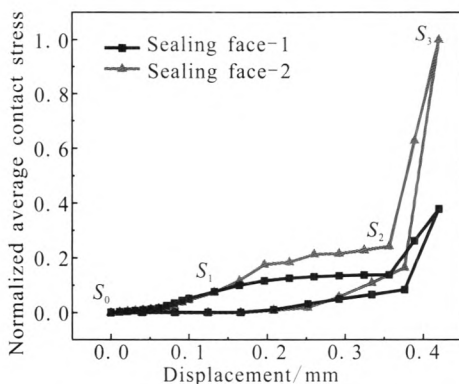


图 7 无量纲平均接触应力随装配位移变化

Fig. 7 Variation of dimensionless average contact stress with assembly displacement

从图 6 可知, 加载路径中, 密封面 1 的接触面积始终大于密封面 2。在 S_2 点后, 由于接触作用增强, 密封面 1 接触总面积迅速增大 5 倍。在不到 0.044 mm 的卸载位移内, 密封面 1 的接触面积迅速减少 92% 并小于密封面 2, 密封面 2 的

接触面积相应减小 70%。

图 7 表明两个密封面平均接触应力随装配路径的变化规律基本一致。加载路径后半段, 密封面 2 的平均接触应力约为密封面 1 的 2 倍。 S_2 点后, 接触应力迅速增大, 密封面 2 的增加幅值大于接触面 1。在不到 0.044 mm 的卸载位移内, 密封面 1 和 2 平均接触应力分别减小 80% 和 85%。

以上分析表明, 正常装配状态下的微小位移扰动对密封性能的影响较大, 所以装配时应严格控制位移扰动。密封面 1 中 D 处仅有部分区域具备密封功能, 实际密封总面积小于接触面积, 因此密封面 2 的整体密封性能要优于密封面 1。

3.2 内压对密封性能的影响

理想情况下, 假定装配完成后密封面相对位置不变, 密封组件内部施加均布压力载荷 20 MPa (实际工作时压力约为 1 MPa)。加内压后, 密封组件 Mises 应力分布基本不变 (参见图 8 和图 9), 最大应力值略有降低。

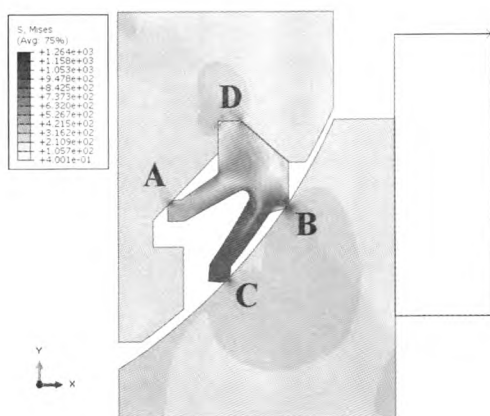


图 8 预紧状态 Mises 应力

Fig. 8 Mises stress of pretightened status

压力平衡了球面接头 2 部分装配预紧力, 使得 B 和 D 处接触作用略有减弱, 但增强了 A 和 C 处的接触作用。压力使总接触面积和平均接触应力都增大, 但增加幅值小于 1%。实际情况下, 内压将导致球面接头产生轴向分离载荷, 压力越高, 分离力越大。由于密封性能对于位移偏差十分敏感, 所以轴向分离载荷对密封性能十分不利。同时, 流体压力越高, 对密封面的要求也越高。总之, K 形环结构具有压力自紧式特点, 但

并不意味着压力越高, 密封效果越好。

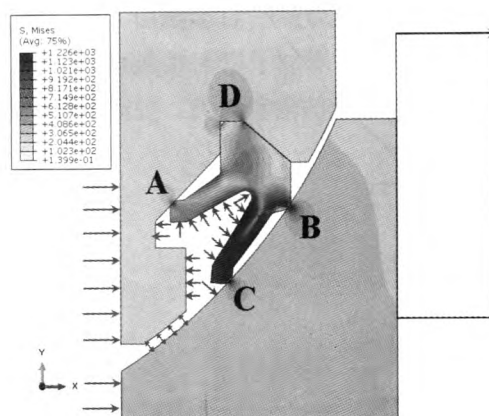


图 9 预紧加压状态 Mises 应力

Fig. 9 Mises stress of pretightened pressurization status

3.3 软金属镀层密封特性

K 形环外表面镀铜和银, 由于加工精度限制, 在球面接头表面存在加工粗糙度 ($6.3 \mu\text{m}$)。当 K 形环与球面接头接触作用时, 软金属镀层受到挤压产生塑性流动, 填充球面接头表面粗糙度凹坑, 有效提高密封性能^[1]。

将 K 形环密封组件进行简化, 仅研究密封接触位置 B 处的局部密封作用。考虑银镀层, 从材料性能可知 (表 1), 银与基体材料弹性模量相差较大, 故将基体等效为刚性, 并假定球面接头 2 粗糙度为理想正弦曲线结构 (图 10), 波峰波谷高度差为 $6.3 \mu\text{m}$ 。镀层与 K 形环的连接处理为绑定约束, 忽略其摩擦与滑移作用。

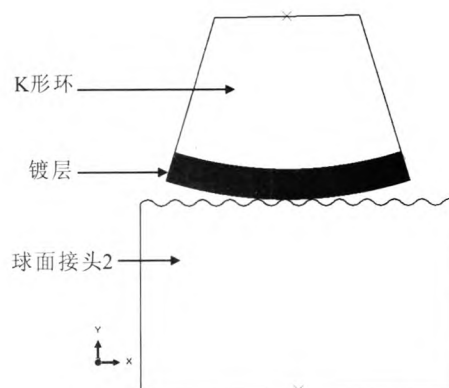


图 10 软金属密封分析模型

Fig. 10 Analytic model of soft metal seal

由图 11 可知,软金属镀层发生较大塑性挤压变形,在一定程度上填充了球面接头的表面粗糙“凹坑”,使得局部密封接触由“线接触”发展为“面接触”,增加了密封接触面积,从而增大了流体泄漏通道的沿程阻力,提高密封性能。

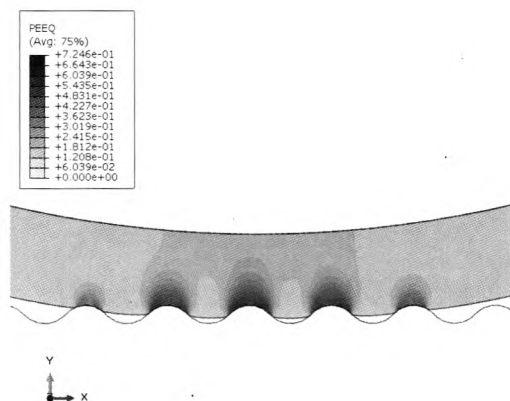


图 11 等效塑性应变云图

Fig. 11 Nephogram of equivalent plastic strain

3.4 重复使用特性

在现代产品设计中,可重复使用性能作为产品核心竞争力被广泛重视,液氧/煤油发动机也不例外。在实际工作时,需要拆卸发动机管路密封组件进行检查分析,其可重复使用性能需要进一步研究。

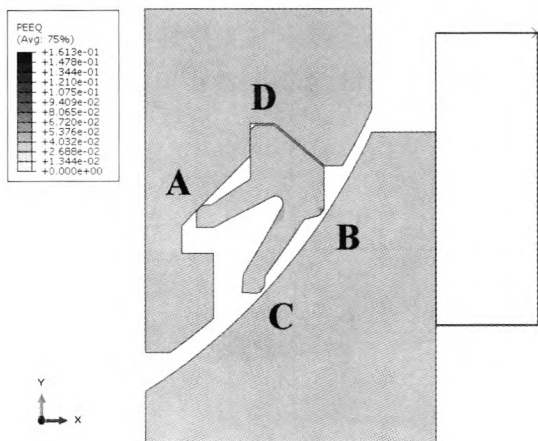


图 12 卸载后塑性应变

Fig. 12 Plastic strain after load-off

从图 12 中可发现,卸载后 K 形环塑性变形

较大,将 K 形环 B 处局部放大(见图 13,网格表示未加载的形貌),可以发现明显的压缩变形,最大塑性应变为 0.16。球面接头 1 没有塑性变形,球面接头 2 中 B 处塑性应变极值为 0.017,对应的最大变形量为 $1.2\ \mu\text{m}$,小于表面粗糙度要求 ($6.3\ \mu\text{m}$)。因此,在正常装配状态下,即使介质压力提高至 20 MPa,球面接头依然可以重复使用, K 形环塑性变形较大,不可重复使用。

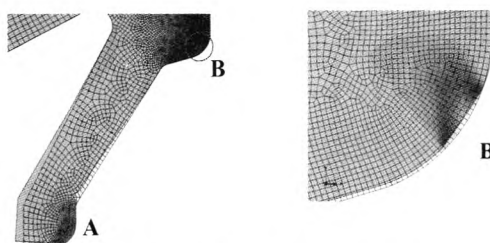


图 13 K 形环局部塑性应变

Fig. 13 Plastic strain of K-shaped ring

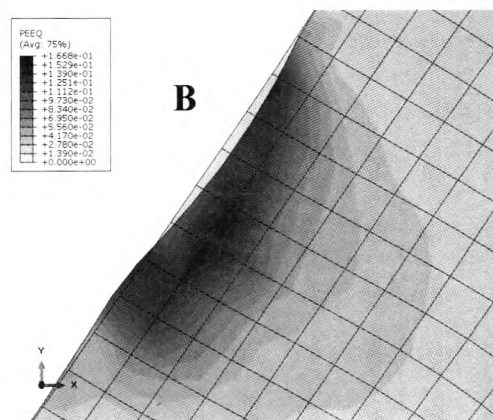


图 14 球面接头 2 局部塑性应变

Fig. 14 Local plastic strain of orbicular joint-2

文献 [4] 指出,火箭发动机管路系统中球面密封件装配时,需要严格控制拧紧力矩,如果拧紧力矩过大,将导致球面接头表面出现“压痕”^[4],影响其重复使用性能。实际拆装时也发现了这个问题。对于 K 形环密封件,也应控制拧紧力矩,图 14 表示拧紧力矩提高 30%,接触作用增强,球面接头 2 中 B 处出现局部塑性变形——“压痕”。这也从侧面反映出数值仿真结果的有效性。

4 结论

针对液氧/煤油发动机管路系统中K形环密封组件,采用非线性有限元方法,研究了其密封机理和可重复使用特性;基于局部粗糙度等效处理方法,分析了软金属镀层产生塑性变形填充接触面“粗糙凹坑”的作用模式,得到以下结论:

1) 装配状态下,K形环共形成4道接触密封,其中68.4%的装配预紧力被用于平衡其中两道密封面的挤压作用,密封性能对于位移扰动十分敏感;

2) K形环密封具有压力自紧式特性,但是压力升高将引起分离载荷增加,并提高密封要求,所以并不意味着压力越高密封性能越好;

3) K形环表面软金属镀层可以填充球面接头表面粗糙度“凹坑”,使得局部密封接触由“线接触”发展为“面接触”,增加了密封接触面积,增大了流体泄漏通道的沿程阻力,提高了密封性能;

4) 在正常装配状态下,即使介质压力提高至20 MPa,球面接头组件依然可以重复使用,K形环塑性变形较大,不可重复使用。

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] 周鑫, 庞贺伟, 刘宏阳. 球面密封结构的漏率预估[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 762-766.
- [3] 刘博, 乔桂玉, 许建, 等. 低温液体火箭发动机高压静密封有限元分析[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 39-45.
- [4] 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.
- [5] SMITH I M, DANIELS C C, DUNLAP P H, et al. Performance of sub-scale docking seals under simulated temperature conditions, AIAA 2008-4713[R]. Hartford, CT: AIAA, 2008.
- [6] YU Su-yuan, LIU Jun-jie, ZUO Wei-dong, et al. Sealing behavior of the HTR-10 pressure vessel flanges[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002 (216): 247-253.
- [7] 冯秀, 顾伯勤, 孙见君, 等. 金属垫片密封机制研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 97-99.
- [8] 冯秀, 魏龙. 金属垫片有效密封宽度有限元分析[J]. 流体机械, 2008, 36(9): 45-48.
- [9] 冯秀, 顾伯勤. 金属垫片密封表面形貌的分析表征[J]. 化工学报, 2010, 61(5): 1208-1212.
- [10] 黄其殷, 白旭东, 李妙婷. 软金属密封结构密封性能数值仿真研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 31-35.
- [11] 山本晃. 螺纹连接的理论及计算[M]. 郭可谦等译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984.
- [12] 陆锋, 宋丽蓉. 法兰与金属垫片密封表面接触分形模型[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2008, 6(2): 26-31.
- [13] 于振波, 蔡永梅, 唐晓初. C形密封圈结构的有限元分析[J]. 石油化工设备, 2007, 37(2): 25-28.
- [14] 庄拙, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于ABAQUS的有限元分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [15] 陈明详. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(编辑: 陈红霞)