

膜盒式机械密封设计研究

张 峰, 宁建华, 赵伟刚, 王 良
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于膜盒式机械密封理论与经验, 研究了膜盒式机械密封密封材料、密封结构、密封性能、密封比压、泄漏量等之间的关系。基于 ANSYS 有限元软件平台面-面接触分析模块 Contact Pressure, 仿真分析和计算了膜盒式静环组件在过盈配合压装条件下端面块应力、应变场分布与变形量之间的关系, 得出了膜盒式机械密封密封材料选择、结构、静环组件、密封性能参数设计准则。在该准则中端面块过盈量选取范围为 0.16~0.18 mm 之间。采用该设计准则设计的膜盒式机械密封已经用于某战略弹道导弹武器系统用液体火箭发动机之中, 该发动机已经通过了地面热试车考核。

关键词: 机械密封; 膜盒; 过盈量设计; 仿真分析

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 06-0048-09

Design of bellows-type mechanical seal

ZHANG Feng, NING Jianhua, ZHAO Weigang, WANG Liang

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

Abstract: Based on the design theory and experience of bellows-type mechanical seal, the relationship among sealing material, sealing structure, sealing performance, sealing pressure and leakage of the bellows-type mechanical seal is researched in this paper. The simulation analysis and calculation of the relationship of deformation with stress and strain field distribution of end face block of the bellows-type stationary seal ring under the condition of interference fit are conducted based on surface-surface contact analysis module Contact Pressure on ANSYS finite element software platform. The design criteria for parameters of structure and sealing performance, and selection of seal material and static ring components of the bellows-type mechanical seal were obtained, in which the interference quantity of end block is 0.16~0.18 mm. The bellows-type mechanical seal designed with the design criterion has been used in the liquid rocket engine of a certain strategic ballistic missile weapon system. The engine has passed the assessment of the ground hot firing test.

Keywords: mechanical seal; bellows; magnitude design of interference; simulation analysis

收稿日期: 2016-01-11; 修回日期: 2016-03-17

作者简介: 张峰 (1986—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机密封设计

0 引言

机械密封广泛应用于石油、化工、航海、航空、航天以及核电工业等领域^[1-2]。高性能机械密封可提高设备工作与运行效率、可靠性、安全性、环保性,并可延长设备工作和使用寿命,降低能耗^[3]。机械密封是一种轴向端面动密封装置,该密封由动环、静环、膜盒、弹簧、液封轮、阻尼带、密封壳体以及辅助密封等组成。动环和静环摩擦副预紧力由膜盒弹性元件提供,以确保密封静态时处于有效密封状态。在机械密封处于工作状态时,依靠动环、静环、膜盒、弹簧、液封轮、阻尼带、密封壳体以及辅助密封等之间的相互作用来实现并完成动密封功能。液体火箭发动机一般采用膜盒式机械密封,密封工作压力为 1.5~3.5 MPa,工作温度为-253~+600 ℃,密封线速度 $V < 60$ m/s,该密封补偿性能好,抗振动能力强,密封性能优良,其静环结构-石墨与不锈钢端面块座采用过盈配合压装联接,有效地提高了石墨静环的整体强度,减小了力变形和热变形对密封的影响^[4-7]。本文基于膜盒式机械密封理论和 ANSYS 仿真软件平台,研究、分析、仿真和计算了膜盒式机械密封密封材料、密封结构、密封性能、密封比压、泄漏量等之间的关系以及不同过盈量下,端面块接触应力与变形量之间的关系,得到膜盒式机械密封设计准则。

1 发动机对密封的设计要求

发动机对膜盒式机械密封的设计要求见表 1。

表 1 液体火箭发动机对膜盒式机械密封的设计要求

Tab. 1 Design requirements of bellows-type mechanical seal for liquid rocket engine

项目内容	设计要求
密封前压力/MPa	1.5
密封前工作温度/℃	150~200
密封后工作温度/℃	600~700
允许泄漏率/(ml·min ⁻¹)	≤2
涡轮泵转速/(r·min ⁻¹)	25 000

注:使用要求:两次起动能力;累计工作时间 1 000 s

2 密封结构与工作原理

机械密封主要由端面摩擦副、弹性元件、辅助密封、传动件等组成,各基本单元的工作原理和作用为^[8]:

1) 密封端面摩擦副、静环依靠密封装置中的弹性元件在密封处于静态和工作过程中可使密封端面紧密贴合,以防止介质泄漏。为此,要求动、静环应具有良好的耐磨性;静环沿轴向要求可灵活移动,以自动补偿密封端面的摩擦与磨损,使之与动环始终保持良好的贴合状态;动环浮动性要好,以实现并完成缓冲功能。

2) 密封弹性元件有弹簧、波纹管、膜盒等,主要为密封提供轴向预紧、补偿和缓冲作用,弹性元件在密封处于静态和工作过程中必须始终能够提供足够的弹性和弹力以克服辅助密封和传动件的摩擦、动环的惯性作用,保证密封端面摩擦副能够处于良好的贴合状态、动环能够处于良好的动态追随状态。

3) 辅助密封有橡胶 O 形密封圈、V 形密封环、U 形密封环和异形薄壁金属密封环等,主要完成机械密封与泵、旋转轴接口处的密封以及静密封。

4) 传动件有传动销、传动环等,其作用主要是将旋转轴的转矩传递给动环,随之带动动环作旋转机械运动,机械密封则处于工作状态。

机械密封动、静环密封件表面具有一定的平面度和表面粗糙度,在机械密封处于工作状态时,密封摩擦副端面之间通常是以微凸体的形貌处于接触状态,此时,密封摩擦副端面之间存在一定的间隙,该间隙用公式 (1) 进行计算。正是由于该微观间隙的存在,机械密封处于工作状态时,在介质压力的作用下,密封介质可充满该间隙并形成具有一定刚度的流体膜,该流体膜在密封摩擦副之间起到了流体润滑作用,并有效地完成了密封功能。

$$\left. \begin{aligned} h &= h_{st} + h_{dyn} \\ h_{st} &= \left(R_{y1}^2 / R_{a1} + R_{y2}^2 / R_{a2} \right) / 2 \\ h_{dyn} &= k R_z \left[(\mu V) / (P_g R_z) \right]^n n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: h 为密封摩擦副端面间隙; h_{st} 为密封静间隙; h_{dyn} 为动压间隙; R_{y1} 、 R_{y2} 分别为动、静环的轮廓最大高度; R_{a1} 、 R_{a2} 分别为动、静环的表面粗糙度轮廓算术平均偏差; k 为无因次系数; R_z 为密封面微观平面度十点平均高度; μ 为密封介质动力粘度; V 为密封端面平均周速; P_g 为密封面比载荷; n 为指数。

膜盒式机械密封, 主要由膜盒式静环组件、动环等组成, 膜盒式静环组件主要由膜盒、端面块和后环等组成, 其中端面块由端面块座(9Cr18) 和石墨环过盈压装而成, 图 1 为膜盒式机械密封结构示意图。膜盒式机械密封工作时, 密封在介质压力 (即端面比压) 作用下, 使密封面紧密贴合, 并自动补偿石墨的摩擦与磨损, 从而实现有效密封。

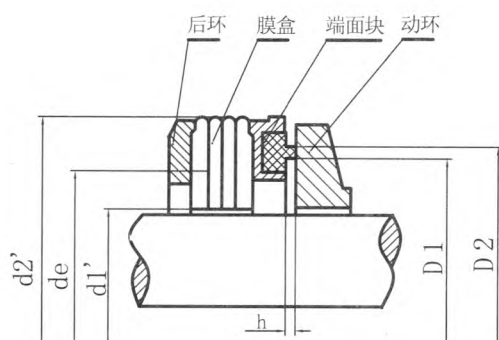


图 1 膜盒式机械密封结构

Fig. 1 Structure of bolloxs-type mechanical seal

3 仿真模拟

采用 ANSYS 软件平台仿真模拟计算膜盒式静环组件在不同过盈量下端面块接触应力与变形量之间的关系。ANSYS 软件平台是通用有限元模拟分析软件, 可用于模拟复杂工况下的动态冲击、金属成型、螺栓联接、工件装配、过盈配合等。运用 ANSYS 面-面接触分析模块 Contact-Pressure 可模拟过盈装配问题。

端面块座和石墨环在常温下的物性参数见表 2。

表 2 端面块座和石墨环常温下的物性参数

Tab. 2 Physical property parameters of end block and graphite ring under normal temperature

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度/ MPa	线膨胀系 数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
端面块座 (9Cr18)	216	0.3	—	10.5
石墨环	22	0.3	180	5.4

3.1 基本假设

采用 ANSYS 软件平台仿真模拟计算膜盒式静环组件端面块过盈连接的应力和应变场分析时, 为了简化处理, 进行以下基本假设:

- 1) 金属材料为各向同性, 石墨材料为各向异性, 不考虑机械加工导致材料表面硬化、粗糙、残余应力等因素;
- 2) 端面块座为目标面 (刚性), 石墨环为接触面 (柔性);
- 3) 过盈压装时, 石墨环和端面块座配合均匀, 石墨无剥落;
- 4) 作用在接触面上的摩擦力满足库伦定律;
- 5) 接触表面是连续平滑的。

3.2 接触面条件基本方程

对于接触问题, 其界面接触状态可分为分离、黏结接触和滑动接触, 不同接触情况下, 接触面的位移和力的条件各不相同^[9]。本文所涉及的接触面条件基本方程如下:

- 1) 局部位移、应变和应力矢量:

$$\left. \begin{aligned} u' &= \{u_1', u_2'\}^T \\ \varepsilon' &= \{\varepsilon_{11}', \varepsilon_{12}', \varepsilon_{22}'\}^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma' &= \{\sigma_{11}', \sigma_{12}', \sigma_{22}'\}^T \\ g_k &= u_k^I - u_k^{II} d_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- 2) 力和位移边界条件:

分离状态

$$\left. \begin{aligned} g &> 0 \\ p^I &= p^{II} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

黏结接触状态

$$\left. \begin{aligned} g' &= 0 \\ p^I + p^{II} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

3) 接触状态判定条件:
表 3 列出了接触状态的判定条件。

表 3 接触状态的判定条件

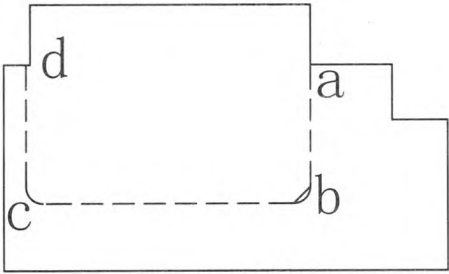
Tab. 3 Decision conditions of contact state

接触状态		判定条件
加载前	加载后	
分离	分离	$g' > 0$
	接触	$g' \leq 0$
黏结	分离	$g' < 0$
	黏结	$g' \geq 0$

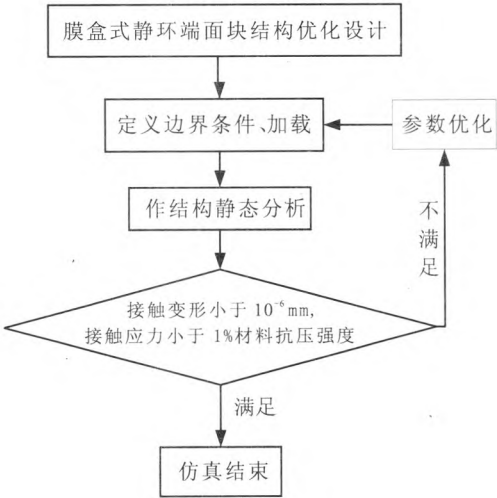
3.3 仿真模型与网格划分

膜盒式静环组件端面块为轴对称结构,建立轴对称模型,采用 PLANE182 单元进行网格划分,模型中石墨环与金属环存在三种接触状态:边界 a~b 为过盈接触、边界 b~c 为线线接触、边界 c~d 为间隙接触,如下图 2 (a) 所示。目标单元和接触单元分别采用 target169 和 contact172 单元模拟,采用设置不同的限定接触类型,建立三种不同接触结构模型进行仿真分析计算。仿真分析流程框图见图 2 (b)。

图 2 是仿真分析计算模型边界示意图和仿真分析计算流程框图。研究密封环与端面块座在不同过盈量下,石墨环的变形趋势和不同位置处过盈配合接触压强。仿真计算公式为:接触点微分方程公式 (2) ~公式 (3)、边界条件控制方程公式 (4) ~公式 (5)。仿真计算时,首先,在材料参数中输入密封环和端面块座材料的热物性参数 (见表 2);其次,给模型施加位移载荷,上法兰向下移动,使密封环处于预紧状态,其余方向不加载荷,保持固定;最后,进行仿真计算,表 3 用于评判过盈配合状态,评判密封环与端面块座是否发生接触,同时对密封环变形量和接触应力进行计算。



(a) 仿真模型边界



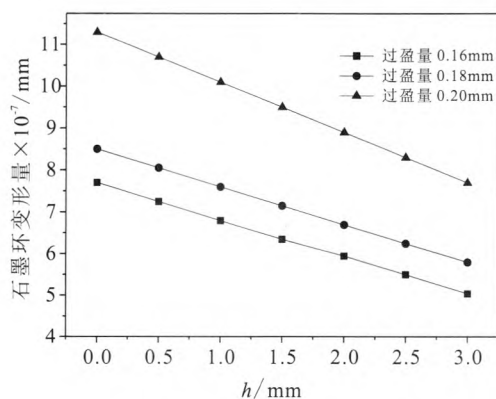
(b) 仿真分析计算流程框图

图 2 仿真模型边界与流程框图
Fig. 2 Diagram for boundary and flow of simulation model

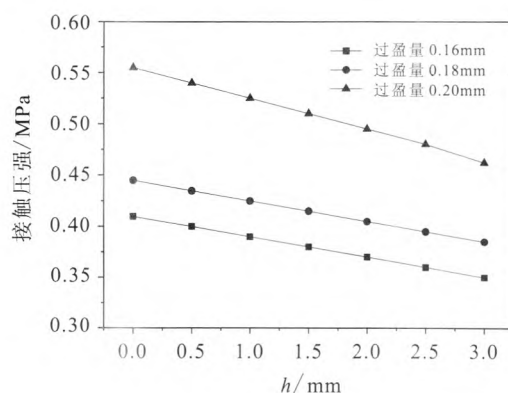
3.4 仿真结果

通过计算,可以得出不同过盈量下,石墨环的变形趋势和不同位置处过盈配合接触压强,见图 3。

分析过盈量为 0.16 mm, 0.18 mm 和 0.2 mm, 石墨环的变形情况和与端面块座的接触压强可知,过盈量在 0.16~0.18 mm 之间时,路径 b-a, 石墨环整体变形较小,其变形量约为 8×10^{-7} mm, 接触压强约为 0.38~0.41 MPa, 石墨未出现崩裂等现象;过盈量 0.2 mm, 石墨环整体变形上升至 1.15×10^{-6} mm, 沿路径 b-a, 石墨环变形依次减小,在 b 处,石墨内部出现崩裂,接触压强约为 0.51 MPa。



(a) 不同过盈量下石墨环的变形趋势



(b) 不同过盈量下过盈配合接触压强

图3 端面块过盈配合仿真计算结果

Fig. 3 Simulation results of interference fit of end face block

4 膜盒式机械密封设计规范

4.1 材料介质相容性等级

液体火箭发动机用膜盒式机械密封工作在强腐蚀介质环境中,为此要求机械密封用金属材料和非金属材料都能够具有良好的介质相容性,具体要求见表4。

表4 膜盒式机械密封介质相容性要求

Tab. 4 Requirements of media compatibility for bellows-type mechanical seal

介质类型	涉及产品材料	试验验证情况
N ₂ O ₄	静环	1级相容
N ₂ O ₄	动环	1级相容
N ₂ O ₄	O型圈	1级相容
N ₂ O ₄	其它辅助材料	1级相容
N ₂ O ₄	金属件	1级相容

4.2 材料选择原则

密封摩擦副的摩擦磨损性能,直接影响着机械密封的工作情况,碳石墨是机械密封摩擦副软面材料中用量最大、使用范围最广的基本材料,碳石墨材料具有独特的自润滑性和良好的导热性,耐腐蚀性好、摩擦系数小、线膨胀系数低等

特点,机械密封用碳石墨材料见表5。

基于碳石墨材料作为软面摩擦副,常用的配对摩擦副有石墨-马氏体不锈钢、石墨-镀铬不锈钢、填充玻璃纤维氟塑料-表面化学气相沉积氧化铝陶瓷不锈钢、石墨-表面喷涂碳化钨硬质合金等。

机械密封选用摩擦副时,材料参数超过材料极限值后,会造成密封面热裂、介质泄漏等问题。根据液体火箭发动机膜盒式机械密封工作介质和工作工况,选择浸渍金属碳石墨与9Cr18动环配对为密封摩擦副。在文献[10]中,俄罗斯学者格鲁别也夫教授认为密封环热裂的主要原因是由于环内切向应力过大导致密封面出现细微径向裂纹所致,由此推导出计算摩擦副最大许用PV值的公式

$$(PV)_{\max} = \frac{2\lambda\sigma_{\beta}}{faE} = \frac{2Th.SP}{ft} \quad (6)$$

式中: λ 为导热系数, W/(m·K); σ_{β} 为抗拉强度, Pa; a 为线膨胀系数, 1/K; E 为弹性模量, Pa; f 为摩擦系数; t 为环厚, m; $Th.SP$ 为热冲击系数, kW/m, $Th.SP = \lambda\sigma_{\beta}/(aE)$ 。

浸渍金属碳石墨的热物性参数为: $\lambda = 45$ W/(m·K); $\sigma_{\beta} = 180$ MPa; $f = 0.3$; $t = 0.01$ m; $a = 6 \times 10^{-6}$ (1/K); $E = 22$ GPa。将它们带入公式(6)计算,可得: $(PV)_{\max} = 40.9$ MPa·m/s。

表 5 机械密封用碳石墨材料
Tab. 5 Carbon graphite for mechanical seal

种类		优缺点
机械密封用碳石墨	浸渍树脂碳石墨	浸渍后密度、硬度、强度均增加, 耐热性能下降, 产生疱疹现象
	浸渍金属碳石墨	适用于高温介质, 导热性有所提高, 硬度低、耐化学腐蚀性差
	不透性碳石墨	耐热性、抗冲击性、耐腐蚀性均显著
	硅化石墨	自润滑性、导电导热性、热抗冲击性和高温强度高。
用于膜盒式机械密封的浸渍金属碳石墨		
性能指标	肖氏硬度 HS	开孔气孔率/%
性能参数	>60	<8
		>130
		>1.85
		>60
		>72
		抗压强度/MPa
		体积密度/(g/cm ³)
		抗折强度/MPa
		石墨化度 G/%

浸渍金属碳石墨-9Cr18 动环摩擦副的机械密封: 在密封实际工作过程中, 经过测量可知, 密封端面比压 $p=0.55\text{ MPa}$, 线速度 $V=44.5\text{ m/s}$, 由此可计算出, $PV=24.5\text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 。该 PV 值小于摩擦副最大许用 PV 值 $[(PV)_{\max}=40.9\text{ MPa}\cdot\text{m/s}]$, 说明浸渍金属碳石墨-9Cr18 动环摩擦副的机械密封工作是可靠的, 摩擦副材料选择是正确的。浸渍金属碳石墨的物理性能参数见表 5。

4.3 膜盒式机械密封结构设计准则

1) 端面块过盈量

常温状态下端面块过盈量 Δc 与温度 t 状态下端面块过盈量 Δt , 满足关系式 (7):

$$\left. \begin{aligned} \Delta t > 0 \\ d_{1t} > d_{2c} \\ \Delta c > |d_{1t} - d_{1c}| - |d_{2t} - d_{2c}| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: d_{1t} 和 d_{1c} 分别为温度 t 和常温下石墨环外径; d_{2t} 和 d_{2c} 分别为温度 t 和常温下端面块座内径。

2) 其它结构尺寸

密封凸台高度 h 选取: 考虑了石墨磨损量和石墨受介质压力引起弯曲变形等因素后, 密封凸台高度 h 的选取范围为 $1\text{ mm} \leq h \leq 2\text{ mm}$;

密封环带直径选取遵循关系式

$$25\text{ mm} \leq \frac{D_1 + D_2}{2} \leq 80\text{ mm} \quad (8)$$

动环厚度选取范围为 $5 \sim 10\text{ mm}$ 。

4.4 膜盒式机械密封性能参数设计准则

1) 载荷系数 K_i 与 K_0 根据公式 (9) 计算:

$$\left. \begin{aligned} K_i + K_0 &= 1 \\ K_i &= \frac{d_e^2 - D_1^2}{D_2^2 - D_1^2} \\ K_0 &= \frac{K_2^2 - d_e^2}{D_2^2 - D_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: K_i 为受内压时的载荷系数; K_0 为受外压时的载荷系数; d_e 为膜盒受力处于平衡状态下的直径; D_1 为石墨环内径; D_2 为石墨环外径。

2) 膜盒刚度 K_B 根据公式 (10) 进行计算:

$$K_B = \left(\frac{t}{w} \right) 3 \frac{\pi E (d_1' + d_2')}{4n} \cdot \frac{d_2'}{d_1'} \quad (10)$$

式中: t 为膜片厚度; w 为膜片宽度; E 为膜片材料的弹性模量; n 为膜片波数; d_1' 为膜片内径; d_2' 为膜片外径。

3) 端面比压 P_c 根据公式 (11) 进行计算:

$$P_c = P_s + (K_0 - \lambda_F) p_f + (K_i - \lambda) p \quad (11)$$

式中: P_s 为膜盒弹力; p_f 为封液介质压力; p 为介质压力; λ_F 为封液介质所引起的液膜反压系数; λ 为密封介质所引起的液膜反压系数。

4) 回流流量 Q_f 根据公式 (12) 进行计算:

$$Q_f = \frac{f P_s V A_f}{\rho C \Delta t} \quad (12)$$

式中: f 为摩擦系数; P_g 为比载荷; V 为端面平均滑移速度; A_f 为端面工作面积; C 为密封介质比热; ρ 为密封介质密度; Δt 为密封工作前后的平均温差。

5 膜盒式机械密封试验与验证

5.1 膜盒式静环组件仿真结果理论验证

膜盒式机械密封静环组件石墨与不锈钢静环座在过盈配合下压装成一体, 构成端面块。端面块与膜盒、后环等部件通过焊接形成一个静环组件。该组件在密封工作过程中, 必须完整, 不能发生失稳、出现裂纹等现象; 另外, 要确保所传递的扭矩足以克服密封转运过程中的摩擦力矩。膜盒式静环组件端面块受力分析结果见图 4。

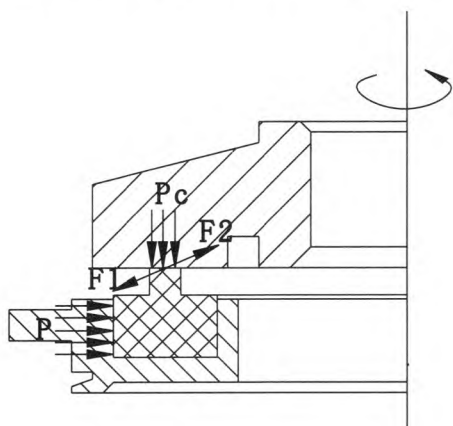


图 4 端面块受力分析结果示意图

Fig. 4 Diagram for force analysis of end face block

利用 ANSYS 有限元软件平台面-面接触分析模块 ContactPressure 仿真分析、计算结果和公式 (13) 可计算出不同过盈量下端面块石墨环的预紧力 F_1 , 计算结果见表 6。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} p_m \pi d_i^2 l_f \mu \\ F_1 &= \frac{T}{d_{av}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: T 为端面块扭矩; p_m 为包容件与被包容件配合面上接触压强; d_i 为配合直径; l_f 为配合长度; μ 为连接处材料摩擦副摩擦因数; F_1 为石墨环预紧力; d_{av} 为石墨环等效直径。

表 6 端面块石墨环预紧力计算结果

Tab. 6 Calculated results of pretightening force of end block graphite ring

过盈量/mm	P_M /MPa	T /(N·mm)	F_1 /N
0.16	0.38	762.2	21.8
0.18	0.41	822.4	23.5

液体火箭发动机涡轮泵用膜盒式静环组件在正常工作过程中, 作用在石墨环密封面上的正压力为 0.5~0.6 MPa, 有效作用面积为 160 mm², 根据公式 (14), 可计算出石墨环密封面的摩擦力 F_2 :

$$F_2 = \mu \cdot p_c \cdot A \quad (14)$$

式中: F_2 为石墨环密封面的摩擦力, N; μ 为摩擦系数, 取 $\mu=0.1$; p_c 为端面比压, 取 $p_c=0.55$ MPa; A 为环带面积, $A=160$ mm²。将该组数据带入公式 (14), 计算可得: $F_2=8.8$ N。由此可见, $F_1 \gg F_2$, 即端面块在过盈量为 0.16 mm 和 0.18 mm 时, 端面块石墨与不锈钢静环座过盈连接所产生的扭矩在密封工作过程中足以消除石墨环发生转动或者脱落的可能性, 膜盒式机械密封将会平稳、可靠地工作。从而说明: 利用 ANSYS 有限元软件平台面-面接触分析模块 Contact-Pressure 仿真分析、计算膜盒式静环组件端面块在过盈连接状态下的应力、应变场分布与变形量之间的关系是合理和正确的, 仿真分析计算结果是正确的。

5.2 膜盒式机械密封试验

根据膜盒式机械密封设计规范进行密封设计, 选取浸渍金属碳石墨-9Cr18 不锈钢动环为摩擦副, 浸渍金属碳石墨与 9Cr18 不锈钢静环座采用过盈配合压装成一体, 构成端面块, 端面块与膜盒、后环等部件进行焊接构成膜盒式静环组件。浸渍金属碳石墨与 9Cr18 不锈钢静环座压装过盈量为 0.16~0.18 mm, 该过盈量满足关系式 (7); 端面块和膜盒式静环组件完成了常温静态气密试验, 试验结果见表 7。端面块、膜盒式静环组件通过气密试验并达到设计要求后, 将静环组

件、动环、密封弹性元件、辅助密封、传动件等部件装配成膜盒式机械密封。将膜盒式机械密封装入图 5 所示的膜盒式机械密封介质运转试验系统密封试验器中, 进行膜盒式机械密封密封性能试验。对膜盒式机械密封通过介质试验进行考核和抽检验收, 试验结果见表 7。满足设计要求的膜盒式机械密封安装于液体火箭发动机涡轮泵之中。发动机进行了地面热试车, 对发动机和膜盒式机械密封进行地面热试车考核。发动机在 1 100 s 试车过程中, 膜盒式机械密封工作稳定, 未出现漏气、漏液等现象。发动机试车结束后, 对膜盒式机械密封进行分解。分解后发现: 膜盒式机械密封结构完整, 摩擦副对磨区域光滑, 石墨磨损量较小。

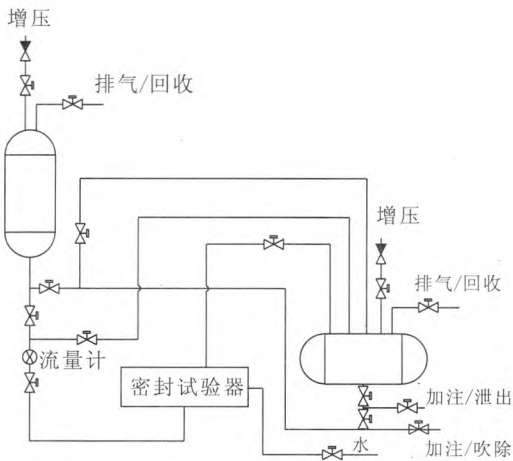


图 5 膜盒式机械密封介质运转试验系统

Fig. 5 Running test system of bellows-type mechanical seal with media

表 7 端面块、膜盒式静环组件、膜盒式机械密封试验结果

Tab. 7 Test results of end block, bellows-type static ring components and bellows-type mechanical seal

静态试验						
检测项目	数量	设计要求		试验结果		合格率
端面块	10 件	0.5 MPa (表压) 气压, 保压 3 min, 浸缝不允许泄漏		浸缝未发生泄漏		100%
膜盒式静环组件	3 件	0.5 MPa (表压) 气压, 保压 3 min, 密封泄漏量 ≤ 2 ml/min		泄漏量分别为 0.05 ml/min, 0.05 ml/min,0.07 ml/min		100%
运转试验						
	时间/s	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	p_{\max}/MPa	试后气密性/(ml/min)	对磨动环	起动次数
膜盒式机械密封 1	500	99	1.89	—	—	第一次起动
	700	116~124	3.51	0.02	磨痕均匀	第二次起动
膜盒式机械密封 2	1 100	118	0.26	—	—	第一次起动
	300	122	0.35	0.01	磨痕均匀	第二次起动

注: T_{\max} 为密封运转试验过程中密封摩擦副环境最高温度, p_{\max} 为密封运转试验过程中介质的最高压力

由表 7 可知, 采用上述设计准则设计的端面块、膜盒式静环组件和膜盒式机械密封, 常温静态气密试验和运转试验结果满足设计要求。发动机热试车结果表明: 膜盒式机械密封设计和运转指标达到了表 1 液体火箭发动机对膜盒式机械密封的设计要求。表明采用膜盒式机械密封理论与经验, 通过研究膜盒式机械密封密封材料、密封结构、密封性能、密封比压、泄漏量等之间的关

系, 采用 ANSYS 有限元软件平台面-面接触分析模块 Contact-Pressure 仿真分析与计算膜盒式静环组件在过盈配合压装条件下的应力、应变场分布与变形量之间的关系, 所得出的膜盒式机械密封设计准则是正确的。采用该设计准则设计的膜盒式机械密封已经用于某战略弹道导弹武器系统用液体火箭发动机之中, 该发动机已经通过了地面热试车考核。

6 结论

根据膜盒式机械密封理论与经验,研究分析了膜盒式机械密封密封材料、密封结构、密封性能、密封比压、泄漏量等之间的关系。采用ANSYS有限元软件平台面-面接触分析模块Contact-Pressure仿真分析与计算了膜盒式静环组件在过盈配合压装条件下的应力、应变场分布与变形量之间的关系,得出了的膜盒式机械密封密封材料选择、结构、静环组件、密封性能参数设计准则。采用该准则,选取浸渍金属碳石墨-9Cr18不锈钢动环为摩擦副,浸渍金属碳石墨与9Cr18不锈钢静环座压装过盈量为:0.16~0.18 mm之间,此时,浸渍金属碳石墨变形量小、接触应力均匀,端面块石墨与不锈钢静环座过盈连接所产生的扭矩在密封工作过程中足以消除石墨环发生转动或者脱落的可能性,膜盒式机械密封工作平稳、可靠。端面块、膜盒式静环组件、膜盒式机械密封常温静态气密、介质运转试验以及安装有该膜盒式机械密封的液体火箭发动机地面热试车结果表明:膜盒式机械密封理论研究与分析、ANSYS有限元软件平台面-面接触分析模块Contact-Pressure仿真分析与计算方法是合理和正确的,膜盒式机械密封密封材料选择、结构、静环组件、密封性能参数设计准则是合理和正确

的。采用该设计准则设计的膜盒式机械密封已经用于某战略弹道导弹武器系统用液体火箭发动机之中,该发动机已经通过了地面热试车考核。

参考文献:

- [1] 陈德才,崔德荣.机械密封设计制造和使用[M].北京:机械工业出版社,1993.
- [2] 李继和,蔡纪宁.机械密封技术[M].北京:化学工业出版社,1981.
- [3] SATORU S, HIROYUKI S, RICHARD G V. Development of a new seal material to reduce energy losses in vehicle transmissions[J]. Sealing technology, 2009(11): 8-11.
- [4] 彭旭东,冯向忠,胡丹梅,等.非接触式气体润滑密封变形的数值分析[J].摩擦学学报,2004,24(6): 536-540.
- [5] 蔡永宁,潘晓梅,彭旭东.激光加工多孔端面机械密封变形的数值分析[J].润滑与密封,2007,32(2): 81-84.
- [6] 郝木明,李香,李鲲鹏,等.端面弧形浅槽机械密封温度场及变形研究[J].流体机械,2010,38(4): 23-27.
- [7] 杨广雪,谢基龙.过盈配合微动损伤的关键参数[J].机械工程学报,2010,46(16): 53-59.
- [8] 顾永泉.流体动密封[M].山东:石油大学出版社,1990.
- [9] 刘扬,刘巨保.有限元分析及应用[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [10] 顾永泉.机械密封实用技术[M].东营:石油大学出版社,2009.

(编辑:王建喜)