

# 火箭发动机端面密封静环热压工艺及故障分析

魏芳胜<sup>1</sup>, 庄宿国<sup>2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 张亚<sup>2</sup>, 张强<sup>2</sup>

(1. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:**静环是端面密封的主要组成部分, 石墨环热压环节是整个静环生产的核心, 热压成品率直接关系端面密封的质量可靠性。结合生产工艺过程, 深入分析了热压工艺机理, 建立了静环热压的数学模型, 明确了镶嵌应力、过盈量校核等一系列参数。在此基础上, 形成了一套完备的热压工艺方法。结合某型号试车端面密封故障问题, 对静环进行了仿真分析和试验验证。结果表明, 在热反浸过程端面密封受到高温作用, 由于石墨材料线性膨胀系数发生变化, 导致石墨环和静环座间的过盈量减小, 过盈连接部位局部存在微缝隙, 石墨环受高压介质挤压不均匀脱出, 石墨环脱出不均匀导致石墨端面变形, 产生泄漏。

**关键词:**静环; 热压工艺; 故障分析; 仿真计算; 试验验证

**中图分类号:**V261      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2019)05-0083-07

## Hot pressing technology and fault analysis of face seal ring for rocket engine

WEI Fangsheng<sup>1</sup>, ZHUANG Suguo<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, ZHANG Ya<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>

(1. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Static ring is the main component of the face seal, the hot pressing of graphite ring is the core of the static ring production, the yield is directly related to the quality reliability. Based on the production process, the mechanism of hot pressing process was deeply analyzed, and the mathematical model of static ring hot pressing was established, and a series of parameter, such as the mosaic stress, the amount of interference were defined. On this basis, a complete set of hot pressing process was formed. The simulation analysis and experimental verification of the static ring were carried out based on the seal failure of a certain type of tests. Results show that in the process of hot dipping high temperature effect of face seal, the interference between graphite ring and static ring seat decreases due to the change of linear expansion coefficient of graphite material, then there are some gaps in the interference junction, graphite ring by high-pressure uneven extrusion, which leads to deformation of the graphite ring face and results in leakage.

**Keywords:** static ring; hot pressing; fault analysis; simulation; test verification

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(U1737112); 中国航天科技集团有限公司重大工艺课题(ZDGY2017-20)

作者简介: 魏芳胜(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵制造及装配

## 0 引言

端面密封是液体火箭发动机涡轮泵的重要组件,其工作原理是利用动环与静环端面紧密贴合并依靠两者相对摩擦运动来实现密封作用,具有高转速、高压、高振动等特点,可靠密封是发动机稳定工作的重要保证<sup>[1-2]</sup>。静环的压制工艺是端面密封生产过程的核心,目前国内外液体火箭发动机中密封静环大多采用镶嵌式静环结构,镶嵌的密封环材料一般有3种,即石墨、硬质合金和碳化硅<sup>[3-6]</sup>;静环座通常为2Cr13,304,316、低膨胀合金4J32等。目前国内外针对过盈镶嵌的研究较多,但过盈镶嵌在端面密封中的应用研究较少,G. M. Yang, J. C. Coquille, J. F. Fontaine 基于轮毂和轴的过盈配合,分析了表面粗糙度对其装配连接的影响规律<sup>[7]</sup>。S. Sen, B. Aksakal 为了提高过盈连接能力,开展了热表处理和涂层喷涂特性研究<sup>[8]</sup>。谢龙滨从热变形和机械变形角度分析了镶嵌环加工完成后平面度的变化机理<sup>[9]</sup>。尹冬凯基于材料的线膨胀系数变化,研究了石墨环与静环座的结构应力变化<sup>[10]</sup>。

本文针对某发动机试车时端面密封出现的故障问题,深入剖析静环热压工艺,为液体火箭发动机涡轮泵端面密封故障诊断机理分析提供了支持,为相关型号质量可靠性的进一步提升奠定了基础。

## 1 机理分析及数学模型

某发动机涡轮端面密封主要用来隔离介质和高温燃气,由于发动机工作时端面密封所处的环境温度较高,若采用弹簧式端面密封,其辅助O形圈会因老化而失效,故一般采用膜盒式端面密封,其优点为焊接波纹管耐高温性能好,在高温燃气下仍能保持弹性,不会使密封失效。密封静环采用镶嵌式静环结构,见图1,镶嵌式静环由石墨环过盈镶嵌在静环座上而成,相比整体式静环,镶嵌式静环具有更好的强度和刚度。

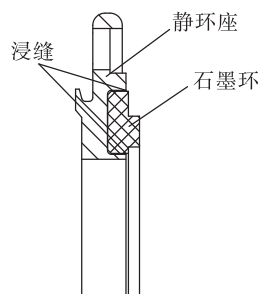


图1 镶嵌式静环示意图

Fig. 1 Mosaic static ring schematic diagram

### 1.1 机理分析

石墨环和静环座通过镶嵌方式连接,镶嵌结构是指把石墨环镶嵌到静环座中,使两者依靠过盈配合起到传递扭矩和密封的作用,镶嵌过盈示意图如图2所示。镶嵌后的石墨环外径受静环座的径向压应力,静环座内径受石墨环的径向压应力。过盈装配产生的径向压应力使得镶嵌石墨环与整体石墨环在结构设计、参数选择、应用条件等方面会有较大的差别,石墨环镶嵌结构的细微变化都可能对镶嵌后石墨环的传动与密封性能产生较大的影响<sup>[11-12]</sup>。

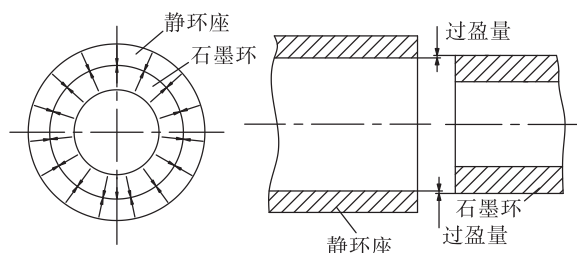


图2 过盈镶嵌示意图

Fig. 2 Interference mosaic diagram

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 镶嵌应力

静环过盈镶嵌属于厚壁圆筒理论,镶嵌应力计算如图3所示。

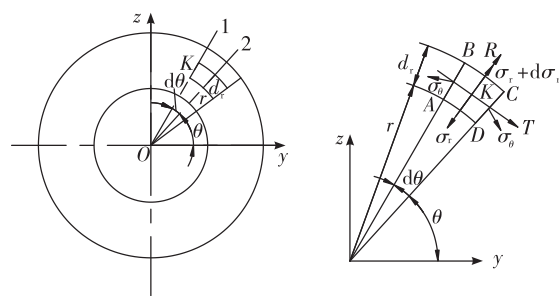


图3 静环座的应力计算模型

Fig. 3 Stress calculation model of static ring seat

对于静环座,受到内压的作用,如图4所示,其内表面(半径 $r = a$ )处应力

$$\sigma_r = -p_a \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = p_a \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_r$ 为静环座径向应力; $p_a$ 为静环座所受内压; $\sigma_\theta$ 为静环座周向应力; $a$ 为静环座的内径; $b$ 为静环座的外径。

静环座外表面(半径 $r = b$ )处应力

$$\sigma_r = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = p_a \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \quad (4)$$

静环座的半径拉伸量

$$u_2 = p_a \frac{a}{E_2} \left[ \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_2 \right] \quad (5)$$

式中:  $E_2$  为静环座的弹性模量;  $\nu_2$  为静环座的泊松比。

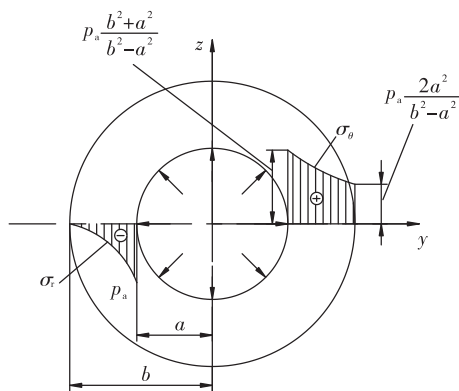


图4 静环座应力图(内压)

Fig. 4 Stress diagram of static ring seat (internal pressure)

石墨环受外压(图5),其内表面(半径  $r_1 = a$ ) 处应力

$$\sigma_\theta = -p_a \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \quad (6)$$

石墨环外表面(半径  $r = b$ )处应力

$$\sigma_r = -p_b \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = -p_b \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \quad (8)$$

式中  $p_b$  为石墨环所受外压。

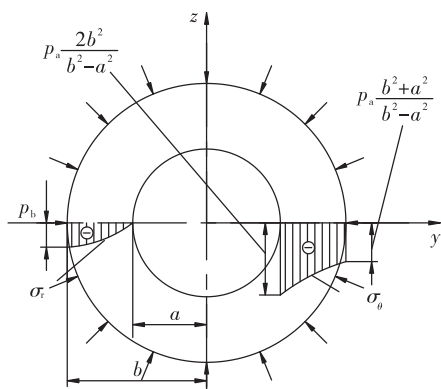


图5 石墨环应力图(外压)

Fig. 5 Graphite ring stress diagram (external pressure)

石墨环的半径拉伸量

$$u_1 = -p_b \frac{b}{E_1} \left[ \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_1 \right] \quad (9)$$

式中:  $E_1$  为石墨环的弹性模量;  $\nu_1$  为石墨环的泊松比。

从厚壁圆筒的结构来看,筒壁内表面与外表面的径向应力和周向应力都是不等的。比较静环座和石墨环各自的内表面与外表面周向应力,显然内表面大于外表面,因此都应以内表面周向应力值来校核静环座和石墨环的强度<sup>[13-14]</sup>。

### 1.2.2 过盈量校核准则

#### 1.2.2.1 最小过盈量

一般通过试验确定镶嵌石墨环的最小过盈量,历史经验表明,在常温下将最小过盈量控制在石墨环内径的0.1%~0.2%范围内,就能有效保证镶嵌石墨环在工作温度下的传递扭矩和密封性能。

#### 1.2.2.2 最大过盈量

镶嵌的最大过盈量受材料强度的限制,石墨环的镶嵌是压缩的过程,则镶嵌应变  $\varepsilon_1$  为:

$$\varepsilon_1 = \frac{\pi D - \pi(D - \delta_1)}{\pi D} = \frac{\delta_1}{D} = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (10)$$

式中:  $D$  为镶嵌配合直径;  $\sigma_1$  为石墨环的径向应力;  $E_1$  为石墨环的弹性模量;  $\delta_1$  为石墨环的镶嵌变形量。

由式(10)可得

$$\delta_1 = \frac{\sigma_1 D}{E_1} \quad (11)$$

由此可知,石墨环的镶嵌变形量与其屈服强度和静环座的镶嵌直径成正比,与材料的弹性模量成正比。当  $\sigma_1$  取屈服强度  $\sigma_s$  时,  $\delta_1$  值即为镶嵌的最大过盈量<sup>[15]</sup>。

## 2 热压工艺

静环生产工艺流程为:准备(选配过盈量、设置压装温度)→压装→车石墨台阶→真空浸渍→固化→气检。静环真空浸渍过程可确保树脂进入并填满静环座与石墨环间的间隙,线性升温固化过程可使树脂由液态变为固态而树脂内部不出现气泡,浸渍后气检是静环浸缝气密性的检验工序。

静环浸渍过程中检查树脂粘度不超过250 s,控制浸渍真空度不大于1 300 Pa,真空浸渍时间1 h ± 5 min,控制加压浸渍压力1.2~1.8 MPa及压力浸

渍 4 h ± 10 min,能够确保树脂进入石墨环与静环座之间的间隙部位。生产过程中通过黏度计检测树脂黏度;浸渍前对浸渍系统进行确认,确保设备正常运转,真空度在要求的范围内,浸渍过程中通过真空计可监视实际真空度;浸渍压力由移动式气瓶提供气源,稳压后输入至浸漆罐中,通过浸渍罐上的压力表监视实际加压压力。

静环固化过程严格控制烘箱升温速率,缓慢升温能够保证树脂均匀固化且不溢出,石墨环和静环

座均匀膨胀。DH - 1 电热烘箱采用线性控制升温方式,可预设程序,升温过程平缓、可控。

静环浸渍后气检是静环浸缝气密性质量检查工序。气检过程中使用专用工装,用 5 ~ 7 N · m 力矩扳手拧紧静环,0.5 MPa (表) 检查浸缝气密性,保证静环气检状态一致性,避免浸缝气密质量错判。

通过以上分析,对原来静环生产工艺流程进行改进,形成优化后的热压工艺如表 1 所示。

表 1 静环热压加工工艺  
Tab.1 Hot-pressing processing technology for static ring

序号	具体步骤	操作方法
1	清洗	静环座用丙酮浸泡 2 h 后清洗,再用汽油、无水乙醇清洗,石墨环用绢布浸丙酮、汽油、无水乙醇擦净
2	外观检查	目视检查静环、静环座外观,不允许有碰伤及划伤
3	尺寸测量	根据设计要求测量静环、静环座尺寸
4	压装	手动操作高温数控压力机,使压力机上压盘与石墨环上端面接触,缓缓施加压力约 50 ~ 100 N,迅速抬起上压盘。端面块随工艺垫块转动 180°,启动数控压装程序,进行端面块自动压装
5	配合尺寸检测	检查零件清洗过程,检查零件清洗前、后表面质量,检查零件配合尺寸
6	浸树脂	浸渍过程中通过真空计监视实际真空度;浸渍压力由移动式气瓶提供气源,稳压后输入至浸漆罐中,通过浸渍罐上的压力表监视实际加压压力

3 故障分析

3.1 故障机理

某型号试车后发现涡轮排气管处有介质漏出,对涡轮泵进行气密、液密试验及分解检查,确定是在端面密封泄漏。

导致该问题的主要原因为发动机停机后热反浸期间,石墨环与静环座过盈量减小形成局部微泄漏通道,介质泄漏到静环座内汽化产生推力使石墨环不均匀脱开,石墨环密封面发生马鞍形的变形,导致燃料泄漏。

主要原因分析:该批次端面密封石墨材料由石墨 A 更换为石墨 B,石墨 B 的线膨胀系数比石墨 A 低(两种石墨环的线膨胀系数见表 2),在热反浸过程中端面密封受到高温作用时,石墨环与静环座间的过盈量跟随温度变化的追随性有差异,即在高温环境中石墨 B 和静环座间的过盈量减小(石墨 A 的过盈量几乎不变),产生径向微缝隙,介质通过缝隙进入石墨环与静环座端面缝隙间(如图 6 所示的  $F_2$  处),在高温环境中泄漏至缝隙中的介质快速汽化产生较大压力,从而推动石墨环局部移动,造成石墨环不均匀脱出;石墨环脱出不均匀导致石墨端面

变形,产生泄漏。

表 2 热环境作用下石墨环与静环座过盈量变化量  
Tab.2 Variation of interference between graphite rings and stationary rings under thermal environment

石墨材料	石墨线膨胀系数	静环座线膨胀系数
石墨 A	7.84	7.2
石墨 B	5.04	

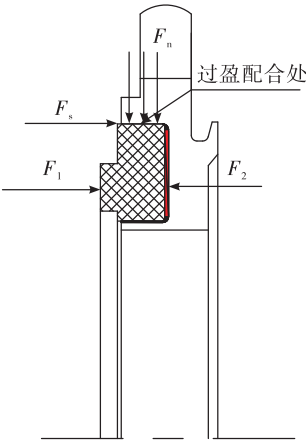


图 6 石墨环受力示意图  
Fig.6 Graphite ring force diagram

石墨环受力如图6所示,当 $F_2$ 大于密封面预紧力 $F_1$ 和石墨环外圆与静环座内壁摩擦力 $F_s$ (主要和过盈量有关)之和时,石墨环发生移动。

由上述分析可知,石墨B与静环座匹配性差,在高温环境中二者膨胀系数不同步,导致密封变形而泄漏。

### 3.2 仿真分析

在相同边界条件下,对不同石墨材料(石墨A

和石墨B)的静环进行了仿真分析,过盈量分别为0.06 mm,0.10 mm,0.18 mm。

图7为不同石墨材料静环受热分析,分析结果显示石墨A由于其线性膨胀系数高于4J32,当初始过盈量为0.06 mm,在高温(约360℃)作用下,石墨环与静环座始终过盈配合,不会出现脱开现象。石墨B由于其线性膨胀系数低于4J32,在高温(约360℃)作用下,当过盈量为0.06 mm,石墨环与静

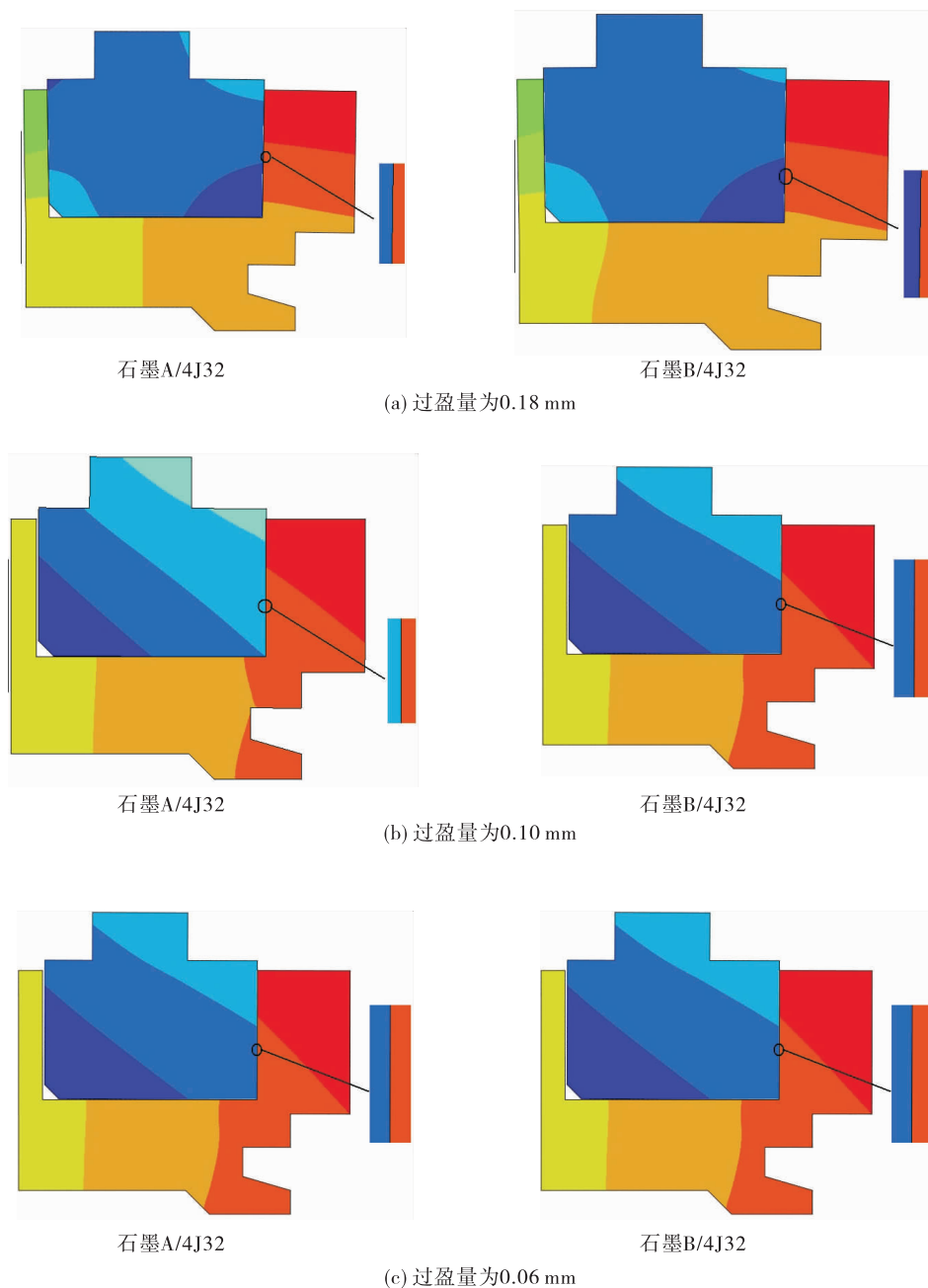


图7 不同石墨材料静环受热分析

Fig. 7 Heating analysis of static ring of different graphite materials

环座出现脱开,脱开间隙为 0.009 mm。

图 8 为石墨 B 凸台在不同过盈量情况下的变形分析,分析结果显示当过盈量为 0.18 mm 和 0.10 mm 时,石墨凸台受过盈力的影响,石墨凸台径向变形方向沿内环方向;而当过盈量为 0.06

mm,此时石墨环与静环座脱开,过盈力消失,石墨凸台径向变形方向沿外环方向,形成局部应力集中,在回温过程中外环处易产生局部变形,从而导致石墨环凸台平面度较差,密封失效,产生泄漏。

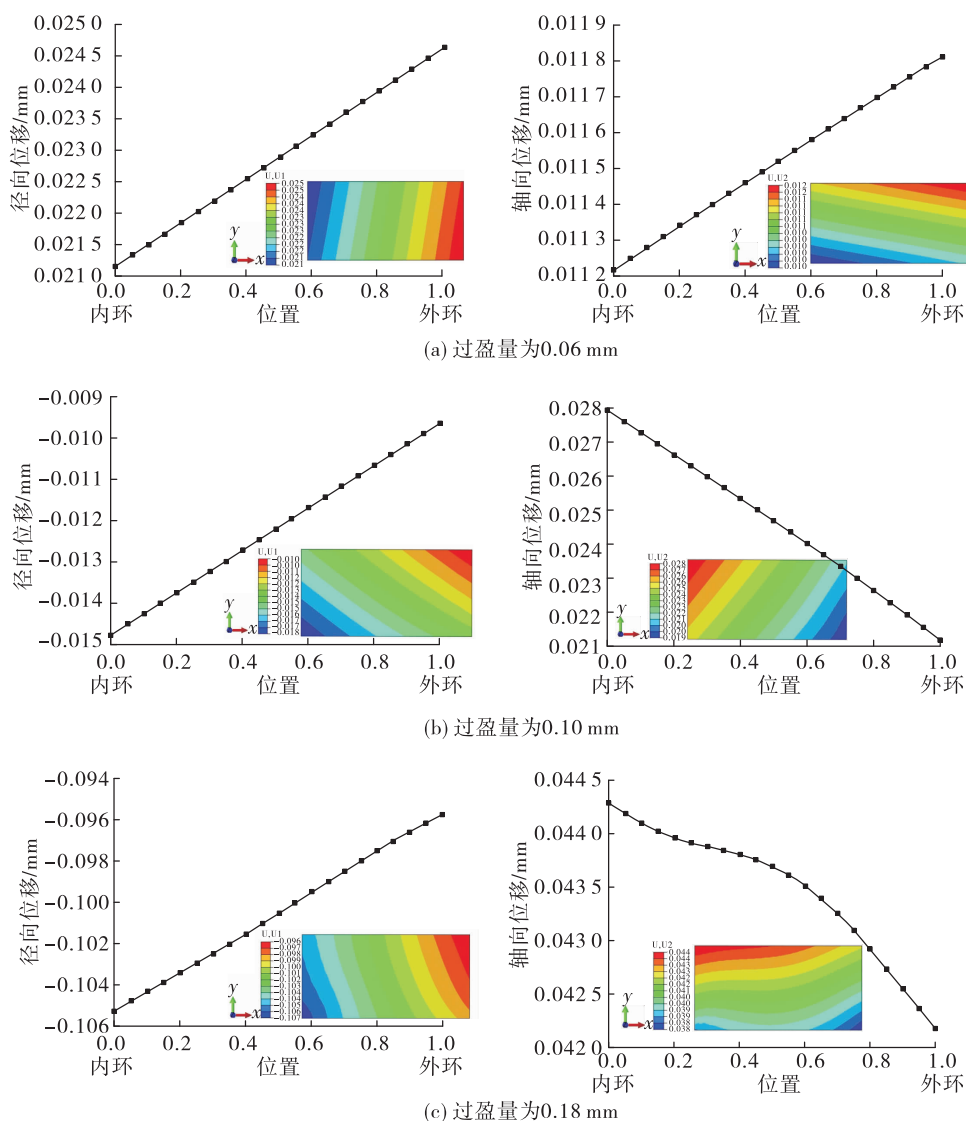


图 8 石墨 B 静环变形分析

Fig. 8 Deformation analysis of graphite B static ring

### 3.3 试验验证

选用静环石墨 A 和石墨 B 作为试验样品,在室温下测量石墨环凸台高度,然后在烧结炉中加温至各温度点,立即取出后测量尺寸变化,然后放入烘箱进行下一个温度点试验。

试验结果见图 9,从试验结果来看,石墨 B 静环在高温下的石墨环脱出约 0.6 mm,石墨 A 静环加

热到 400 °C 也未发生脱出现象。该试验验证了石墨 B 与静环座匹配性差,导致石墨环脱出;石墨 A 匹配性良好。

对故障静环产品进行了平面度测量,判断石墨环密封面是否发生变形,测量结果为石墨环密封面平面度约 0.033 mm,测量数据表明密封石墨环端面出现马鞍形,变形规律如图 10 所示。



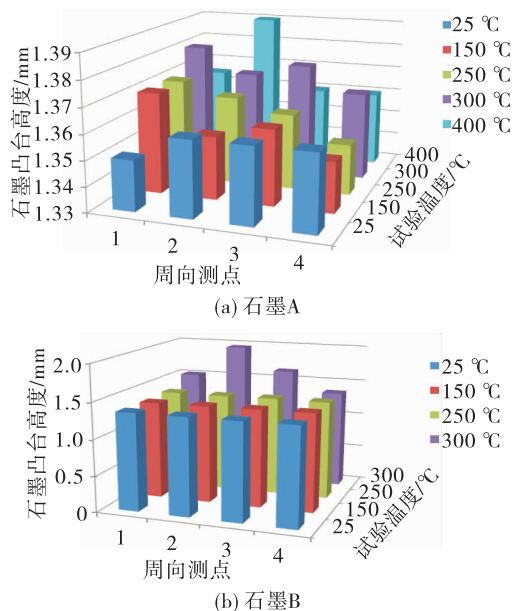


图9 静环高温试验部分测量数据

Fig. 9 Measurement data of high temperature test part of static ring

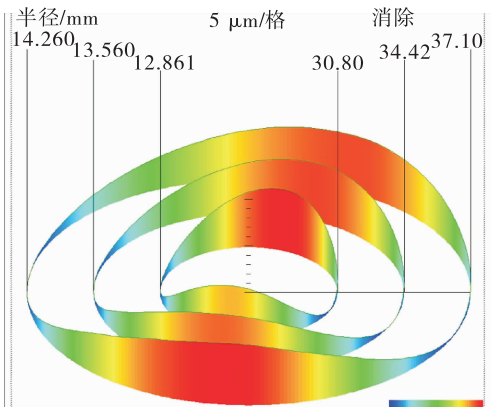


图10 密封面平面度变形规律

Fig. 10 Deformation law of flatness of sealing surface

## 4 结论

1)建立了静环热压的数学模型,明确了镶嵌应力、过盈量校核及热压温度确定等一系列参数,并在此基础上,形成了一套完备的热压工艺方法。

2)结合某次试车端面密封泄漏问题,对静环进行了机理剖析、仿真模拟和试验验证。结果表明在热反浸过程中静环受到高温作用时,石墨B和静环座间的过盈量减小,产生径向微缝隙,造成石墨环不均匀脱出,石墨环脱出不均匀导致石墨端面变

形,产生泄漏。

### 参考文献:

- [1] 张峰, 杨大昱, 李正大, 等. 涡轮泵机械密封泄漏机理分析及试验验证[J]. 火箭推进, 2018, 44(4): 73-77, 84.  
ZHANG F, YANG D Y, LI Z D, et al. Analysis and test verification of leakage mechanism for mechanical seal in turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(4): 73-77, 84.
- [2] 张树强, 王良, 赵伟刚. 液体火箭发动机涡轮泵用机械密封温度场及热载变形研究[J]. 火箭推进, 2014, 40(5): 92-98.  
ZHANG S Q, WANG L, ZHAO W G. Research on temperature field and heat deformation of mechanical seal in liquid rocket engine turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(5): 92-98.
- [3] 翟更大, 宋永忠, 宋进仁, 等. 碳/陶复合密封材料的研究[J]. 宇航材料工艺, 2001, 11(6): 17-19.
- [4] SCHMIDTHALS C, NOSOWICZ J. Influence of the wetting properties of liquids on the tribological behavior of selected sliding materials in mechanical seals[J]. Tribology Transactions, 2000, 43(3): 441-446.
- [5] TOKUMOTO K. Developments of wear and corrosion resistant cemented carbide[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 2016, 63(10): 889-899.
- [6] IMASATO S. Development of ultra-fine particle binderless cemented carbide "RCC-FN" [J]. Nippon Tungsten Review, 1991, 24: 1-4.
- [7] YANG G M, COQUILLE J C, FONTAINE J F, et al. Influence of roughness on characteristics of tight interference fit of a shaft and a hub[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(42/43): 7691-7701.
- [8] SEN S, AKSAKAL B. Stress analysis of interference fitted shaft-hub system under transient heat transfer conditions[J]. Materials & Design, 2004, 25(5): 407-417.
- [9] 谢龙滨. 镶嵌式硬质合金环变形的原因及预防[J]. 电碳, 1989(1): 15-17.
- [10] 尹冬凯. 潜水电机镶嵌式机械密封的受热变形[J]. 电机技术, 2002(2): 40-43.
- [11] 贺宝海. 镶嵌密封环结构优化研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [12] 赵专东. 圆柱面过盈联接仿真与验证[J]. 冶金设备, 2012, 195: 7-9.
- [13] 滕瑞静, 张余斌, 周晓军, 等. 圆柱面过盈连接的力学特性及设计方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 160-166.
- [14] 李婕, 蔡纪宁, 张秋翔, 等. 镶装式密封环过盈量的研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(11): 68-71.
- [15] 孙玉霞, 李双喜, 李继和, 等. 机械密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

(编辑: 马 杰)