

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.007

轴承腔环瓣式浮环密封摩擦热分析*

王佳星¹, 李双喜^{1*}, 马文杰², 冯瑞鹏¹, 刘志伟¹

(1. 北京化工大学 流体密封技术研究中心, 北京 100029; 2. 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: 针对航空发动机轴承腔高转速、变压差下的摩擦生热问题, 对环瓣式浮环密封的主要参数进行了研究。采用 ANSYS 有限元软件, 建立了密封摩擦发热以边界条件施加的热模型; 基于 Fluent 建立了跑道散热流固热耦合模型, 研究了不同阻封气温度、冷却油流量下跑道的温度变化, 模拟了温度分布及冷却油散热效果, 得出了影响密封发热的主要因素。研究表明: 密封摩擦发热会引起局部温度过高, 产生不均匀热应力导致密封面变形, 增大泄漏量, 压差、转速等对密封摩擦发热影响很大, 应通过减小关闭压力的方式来减少密封的发热; 冷却液的冷却效果与跑道的生热量存在极限值, 继续增加供油量不会提高跑道的降温效果; 该结果可为轴承腔环瓣式浮环密封的摩擦过程研究提供参考。

关键词: 环瓣式浮环密封; 摩擦发热; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: TH117.1; TB42

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)09-1032-07

Frictional heat analysis of bearing cavity ring-shaped floating ring seal

WANG Jia-xing¹, LI Shuang-xi¹, MA Wen-jie², FENG Rui-peng¹, LIU Zhi-wei¹

(1. Research Center for Fluid Sealing Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the problem of frictional heat generation under high speed and variable pressure difference in the bearing cavity of an aero-engine, the main parameters of the ring-lobe floating ring seal were studied. ANSYS finite element software was used to apply the frictional heat of seal under boundary conditions to establish a thermal model. Based on Fluent, a runway cooling fluid-solid-heat coupling model was established. The temperature change of the runway under different blocking gas temperature and cooling oil flow was studied. The temperature distribution and cooling oil cooling effect were simulated, and the main factors affecting the heating of the seal were obtained. The results indicate that the frictional heating of the seal will cause the local temperature to be too high, causing uneven thermal stress to cause deformation of the sealing surface and increase the amount of leakage. The pressure difference and speed will have a great impact on the frictional heating of the seal. The sealing pressure should be reduced by reducing the closing pressure. There is a limit to the cooling effect of the coolant and the heat generation of the runway. Continued increase in fuel supply will not increase the cooling effect of the runway. The research provides a reference for the friction process of the bearing cavity ring flap floating ring seal.

Key words: ring flap floating ring seal; frictional fever; finite element analysis; structural optimization

0 引 言

航空发动机主轴承腔处于高温、高速、变载荷等较为恶劣的工况中^[1], 对密封的要求较高。环瓣式浮环

密封具有适应工况范围广、密封性能稳定性强的特点, 因此已经成为航空航天领域重要密封形式之一^[2]。工作状态下过高的温度会导致润滑油在密封处产生碳化, 增大密封面摩擦磨损, 导致密封寿命减小, 甚至密

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB2000800)

作者简介: 王佳星(1993-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 主要从事化工设备设计及流体机械与密封方面的研究。E-mail: buctwangjx@163.com.cn

通信联系人: 李双喜, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: buctlsx@126.com

封环损坏,因此摩擦生热的冷却降温尤其关键。

韩国的 Kyung Won University 机械工程系对液体火箭涡轮泵中浮环密封进行了研究分析^[3]。美国航天局在 1978 年对液体火箭涡轮泵转轴中的分瓣浮环密封做了 NASA 分析报告^[4-5],认为分瓣浮环密封在高速、低压、极端温度的条件下,具有更低的磨损和泄漏量,并且具有很长的使用寿命。苏令^[6]根据 Ng 和 Pan 湍流润滑理论,修正并完善了内开动压槽结构的环瓣式浮环密封数值计算模型,模型加入了结构参数对密封性能的影响;王飞^[7]在此基础上分析了密封的性能,并对密封的结构参数进行了优化,使密封在保证最小泄漏量的条件,尽可能地减少摩擦磨损;郑利胜^[8]通过建立三维模型,将热载荷与密封环结构耦合,得到了受摩擦热影响下的密封应力状态;闫玉涛^[9]利用摩擦磨损试验机研究了石墨 M210 在高温状态下的摩擦磨损性能,这种石墨材料的摩擦因数在高温下先增大后减小,最后保持稳定;胡亚非^[10]研究了不同浸渍石墨和人造石墨的摩擦磨损特性,发现浸渍石墨比较容易形成稳定的膜润滑状态。

本文将针对航空发动机主轴承腔高转速、变压差下摩擦生热问题,通过有限元软件,将密封摩擦发热以热边界条件的方式施加到跑道模型上,模拟跑道的温度分布及冷却油散热效果,找出不同参数对密封发热量的影响,得出影响密封发热的主要参数,为环瓣式浮环密封的性能优化提供改进思路。

1 环瓣式浮环密封热边界条件

1.1 环瓣式浮环密封工作原理和热环境

环瓣式浮环密封作为一种具有自动补偿功能的径向密封,可以在高温、高速的工况下,很好地抵消轴膨胀和轴跳动。

密封分为接触式环瓣式浮环密封和流体动压型环瓣式浮环密封。接触式环瓣式浮环密封环内径与转子处于接触状态,流体动压型环瓣式浮环密封环内径与转子处于非接触状态。密封结构主要包括:密封环、跑道、密封座、压缩弹簧、环形箍紧弹簧、防转销^[11]。

环瓣式浮环密封结构如图 1 所示。

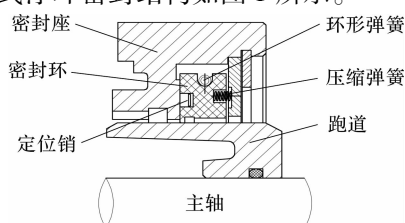


图 1 环瓣式浮环密封结构图

由图 1 可以看出:密封环的内径表面与装在转轴上的跑道外径面配合接触,形成主密封面,承受高速转动摩擦;密封环侧面的凸边与密封座的端面贴合,形成辅助密封界面;环瓣密封环与跑道的初始载荷接触状态靠环形箍紧弹簧实现,与密封的初始接触载荷靠压缩弹簧或者波形弹簧实现。

停车工况下,通过弹簧提供的闭合力和高精度的配合面,密封环可以形成比较好的静密封。封环的环瓣中间位置开定位槽,与密封座上的防转销配合,既可以防止密封随轴转动,又允许密封径向移动,可以补偿轴的偏心和转动时的径向跳动。密封环的主副密封面凸缘均设置在靠近低压侧,这样可以有效地降低压差引起的不平衡力,减小接触载荷,减少摩擦磨损,增加使用寿命。密封环的分段数一般为 3~5 段,具体的数量主要由石墨材料的强度决定^[12],强度高,分段数可以增加。增加密封环的分段数,可以减小密封环运转时的扭转力矩,使密封环受力摩擦均匀。密封环两个分段搭接部分留有一定间隙余量,可以对主密封面磨损时以及在制造、安装过程的误差进行径向补偿,防止搭接头顶撞而使主密封面出现接触不良^[13]。

轴承腔工作状态下,密封面会因为摩擦生热,同时润滑油会不可避免泄漏到密封面上,过高的温度会导致润滑油在密封处产生碳化,增大密封面摩擦磨损,导致密封寿命减小,甚至密封环损坏,因此散热就很重要。

轴承润滑和降温多采用喷射供油和环下供油的方式^[14],跑道喷油散热的方式主要有 3 种,分别是跑道外径直喷式、环下油孔冷却式、悬臂环下冷却式。笔者将以悬臂环下冷却式作为分析对象,研究跑道的温度分布及散热情况。

1.2 环瓣式浮环密封热边界条件

有限元模型分析的边界条件包括冷却油入口、冷却油出口以及热边界条件。其中,热边界条件主要有主密封面的摩擦热、跑道与空气接触的热对流边界、滑油与空气接触的热对流边界、跑道与轴之间的导热系数。热流密度可以通过密封面摩擦生热量比上接触面积求得,导热系数可以通过相关资料查取。而由于流体介质流动的复杂性,对流换热系数的确定只能估算。

(1) 密封摩擦热

环瓣式浮环密封的发热主要有两部分组成,包括主密封面的发热和辅助密封面的发热^[15]。

主密封面的发热量为:

$$Q_1 = \pi D_0 B p_g f_2 V_{g1} \quad (1)$$

辅助密封面的发热量为:

$$Q_2 = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4} p_g f_1 V_{g2} \quad (2)$$

在运行过程中, 主轴的径向跳动量很小, 辅助密封面的摩擦线速度 V_{g2} 很小, 因此辅助密封面的摩擦热可以忽略不计, 进行有限元模拟分析时, 只须计算主密封面的摩擦热, 作为密封的热边界条件。

(2) 对流换热系数

对流换热系数计算公式^[16-17] 为:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot 0.135 \cdot [(0.5R_{ec}^2 + R_{ef}^2) \cdot P_r]^{0.33} \quad (3)$$

式中: R_{ec} —流体旋转运动的雷诺数, $R_{ec} = \omega d^2 / \nu$; R_{ef} —流体轴向运动的雷诺数, $R_{ef} = ud / \nu$; P_r —普朗特常数; α —对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; d —传热面直径, 轴向为柱面外直径, 径向平面随直径方向逐渐增大, m; ω —跑道角速度, $rad \cdot s^{-1}$; ν —流体运动粘度, $m^2 \cdot s^{-1}$; u —跑道周围介质轴向平均流速, 本文主要为密封泄漏量流速, m/s; λ —流体的导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

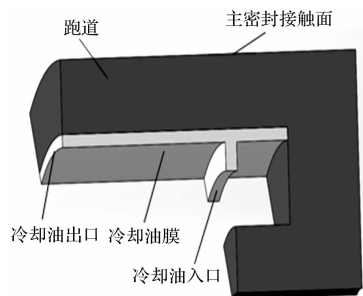
根据经验可知, 气体与金属的对流换热系数相对比较小, 并且不同位置半径处的对流换热系数差值很小, 因此对流换热系数在跑道直径方向的变化可以全部约等于跑道外径面处的对流换热系数。

2 摩擦生热与散热影响因素分析

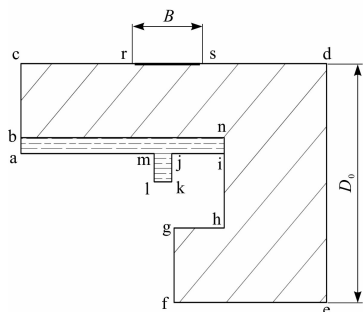
2.1 浮环密封热分析有限元模型

浮环密封摩擦热过程主要分为摩擦生热与跑道散热, 有限元模型分为两部分: 跑道和冷却油膜。

跑道散热有限元模型及边界如图 2 所示。



(a) 有限元模型示意图



(b) 边界示意图

图 2 模型及边界示意图

由图 2 中可看到: 基于有限元模型, 在摩擦生热工况下, 跑道外侧通过施加相应的边界条件模拟实际工况, 与密封环接触的跑道面施加密封环摩擦发热量, 分析密封结构参数、工况参数、摩擦系数对密封发热的影响。

在冷却油冲洗散热工况下, 跑道内侧面与冷却油直接接触, 跑道和油之间的换热系数可以通过 Fluent 有限元软件迭代计算, 大大提高了计算精度。跑道采用 sweep 方法划分为六面体网格, 为提高计算精度, 流体部分按膜厚方向进行 sweep 划分为六面体网格, 最小不少于 3 层。

经过网格无关性测试, 证明网格质量满足要求, 没有因网格问题产生的计算误差。

在进行有限元模拟时, 为研究阻封气温度对跑道的的影响, 笔者加入阻封气的温度变量, 在不同阻封气温度下, 研究通油量对跑道降温效果的变化。

模型边界条件加载如表 1 所示。

表 1 边界条件

边界名称	边界类型	参数设定
fe	跑道与轴接触面	绝热边界
rs	密封面摩擦热	由式(1)计算得出
lk	冷却油速度入口	流量/入口截面积
ab	冷却油压力出口	轴承腔压力
am、ml、kj、ji	空气与冷却油对流换热	由式(3)计算得出
bc、cr、gf、gh、hi	轴承腔温空气对流换热	由式(3)计算得出
sd、de	高温阻封气对流换热	由式(3)计算得出

由表 1 可以看出: 在计算对流换热系数时, 需要介质在不同温度下的运动粘度、导热系数和普朗特常数, 模拟的阻封气为空气。跑道材料选用 Fluent 中内置钢材材料。密封冷却油由轴承腔润滑系统提供。

由于冷却油在冷却跑道的过程中参数不断变化, 为提高计算精度, 在 Fluent 软件中创建材料时, 笔者先将参数随温度的变化物性参数拟合成近似曲线, 提取曲线的拟合公式, 最后把公式输入到 Fluent 中。

2.2 浮环密封摩擦生热及温度场分析

2.2.1 主轴转速对密封发热量的影响

在压差为 0.08 MPa 条件下, 笔者模拟转速在 10 000 r/min 和 30 000 r/min 情况, 转速对密封发热影响相当大, 阻封气温度将达到几百摄氏度, 高压侧温度集聚将更加严重, 跑道必须增加有效强制降温措施。经分析得出, 转速对跑道发热量的影响呈近似线性增长趋势, 这对于轴承腔热平衡计算是不可忽视的因素。跑道温度升高也间接表明密封摩擦磨损加重。

2.2.2 压差对密封发热量的影响

转速为 18 000 r/min 下, 随着压差的增大, 摩擦发

热更加明显,这会导致跑道热应力和热变形增大,密封与跑道的贴合程度变差,使密封性能变差。经分析得出,压差与跑道最高温度成线性增长。当设计压差较大时,为提高跑道的散热效果,可以增加密封环的数量,采用多级密封,将热源分散,既可以降低密封的泄漏量,又能提高跑道的散热效果。

2.2.3 环形弹簧箍紧力对密封发热量的影响

在密封结构、工况确定的条件下,可以通过弹簧箍紧力调节密封的随动性和微调密封泄漏量。环形弹簧箍紧力对密封发热量影响非常大,在设计弹簧箍紧力时,应充分考虑密封环摩擦和温度对弹簧力的影响。

经分析得出,箍紧力与跑道最高温度呈线性变化,同时,当转速由 18 000 r/min 增加到 30 000 r/min 时,跑道最高温度相同的情况。通过对比可以发现,箍紧力与压差引起的发热量变化可以直接进行叠加,即一条压差温度变化线与一条箍紧力温度变化线即可得到在两个变量范围内任意组合下的跑道最高温度,这对于估计跑道在某一工况下的跑道最高温度有比较大的实际意义。

2.3 浮环密封冲洗散热分析

轴承腔工况参数如表 2 所示。

表 2 轴承腔工况参数

阻封气压力 P_0 (绝压)/Pa	轴承腔压力 P_i (绝压)/Pa	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	阻封气温度 $T_1/(^{\circ}\text{C})$	轴承腔温度 $T_2/(^{\circ}\text{C})$
181 325	101 325	18 000	100/300	80

根据表 2 中的参数,笔者对高压侧阻封气温度分别为 100/300 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,冷却油供油量从 0.5 $\text{L} \cdot \min^{-1}$ 到 7 $\text{L} \cdot \min^{-1}$,跑道温度的变化情况进行模拟。

不同阻封气温度在通油时的跑道散热温度分布云图如图 3 所示。

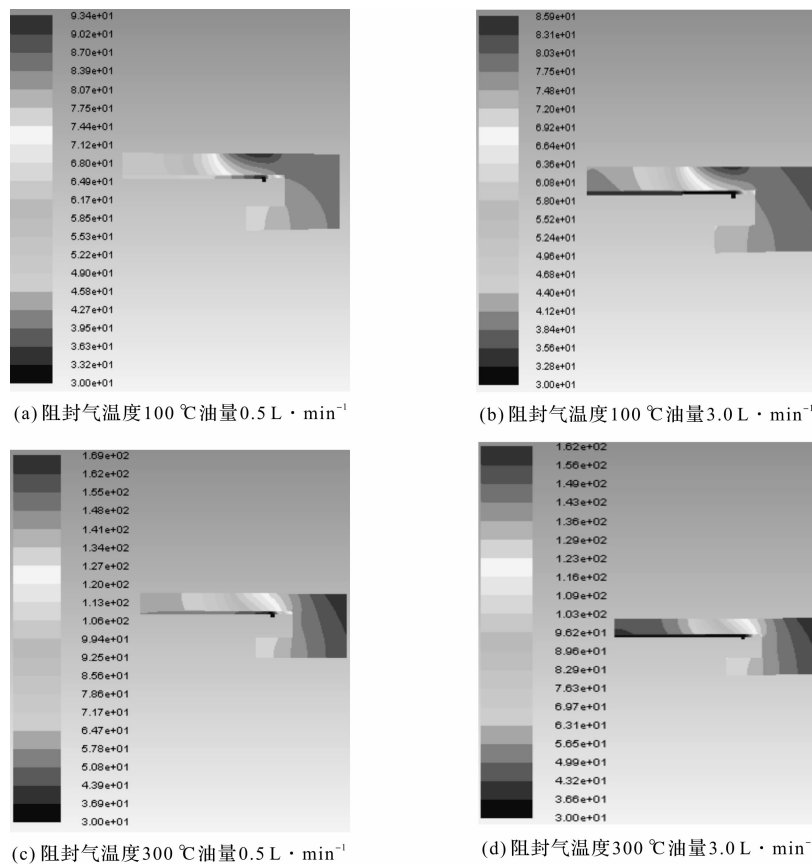


图 3 跑道散热温度分布云图

从图 3 可以看出:跑道内侧喷油可以明显降低跑道温度,尤其是轴承腔低压侧跑道的温度;同时,在高速下,高温阻封气对跑道的温度分布影响也很大。

将图 3(a,c) 分别与图 3(b,d) 进行对比可以发现:

(1) 当冷却油量从 0.5 $\text{L} \cdot \min^{-1}$ 增加到 3 $\text{L} \cdot \min^{-1}$,

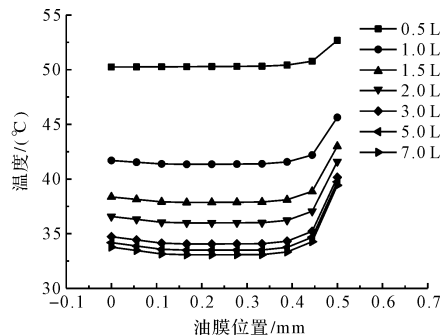
油冷却效果对油出口侧的跑道冷却效果非常明显,对于阻封气侧的温度影响效果相对较小;

(2) 当冷却油量为 0.5 $\text{L} \cdot \min^{-1}$ 时,冷却油出口温度与所接触的跑道的温度差别不大,说明冷却油吸热量已经接近饱和,可以通过增大通油量来提高跑道

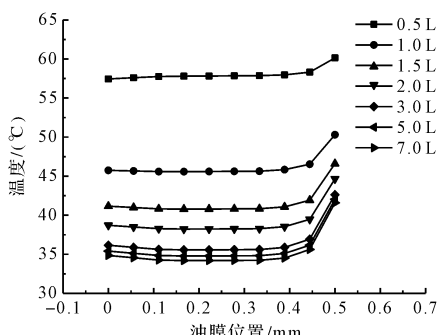
降温效果;

(3) 当冷却油量为 $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 油温进出口的变化不大, 表明跑道与冷却油换热量已经接近饱和, 再增大通油量降温效果已经微乎其微。

对比图 3(b, d) 可以发现, 当阻封气温度从 $100 \text{ }^\circ\text{C}$



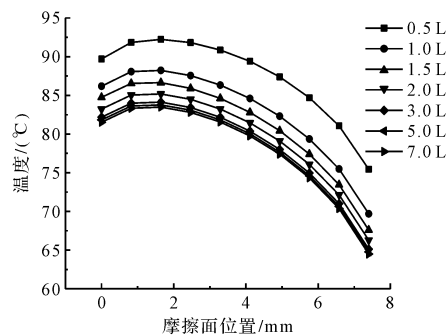
(a) $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷却油出口温度分布



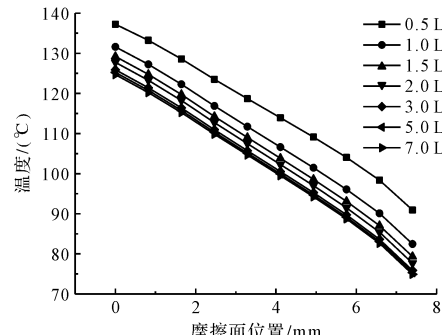
(c) $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷却油出口温度分布

增加到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 密封摩擦热的影响温度环带逐渐消失, 这表明跑道的温升主导因素从摩擦热变为阻封气加热。

随着喷油量与阻封气温度改变, 冷却油出口温度和摩擦面温度的具体数量变化情况如图 4 所示。



(b) $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 跑道摩擦面温度分布



(d) $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 跑道摩擦面温度分布

图 4 冷却油出口和跑道摩擦面温度分布

图 4(a, c) 中, 冷却油出口温度分布横坐标为边界 a 到 b; 图 4(b, d) 中, 摩擦面温度分布横坐标为边界 s 到 r。

3 试验验证

密封试验装置结构如图 5 所示。

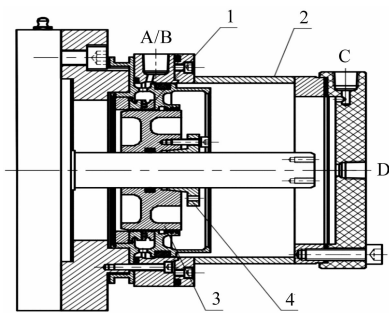


图 5 试验装置结构图

1—密封环; 2—密封腔; 3—跑道; 4—涨套

根据图 5 的结构并结合前面的分析, 通过对密封环施加不同压差、转速、环形弹簧箍紧力等, 笔者验证了理论计算结果的准确性。

3.1 压差对泄漏量的影响

环瓣式浮环密封变压差泄漏量试验主要包括两

方面: 静态泄漏量和动态泄漏量; 测量压差范围为 $0.01 \text{ MPa} \sim 0.1 \text{ MPa}$, 出口压力为大气压; 动态泄漏量测量转速为 $18\,000 \text{ r/min}$ 。

试验时, 测量值为密封总泄漏量。将结果与理论计算值进行对比可以得出, 随着压差的增大, 密封静态泄漏量的试验值与计算值增长趋势逐渐放缓; 试验值与计算值误差随着压差的增大而增大, 这主要是由于试验测量时, 密封环未与跑道跑合, 加工和安装的误差导致的密封泄漏间隙影响随压差的增大而被放大; 密封动态泄漏量变化趋势基本相同, 但试验值曲线与计算值曲线的贴合程度明显加强, 由此说明, 密封的跑合优化了试验值与计算之间的误差。

由以往对密封泄漏量的计算经验可以得出, 这种误差已经属于可接受误差范围内。

3.2 转速对泄漏量的影响

在 0.04 MPa 和 0.1 MPa 压差下, 试验测试密封随转速的变化情况, 通过与计算值的对比分析, 主要验证速度系数的准确性。试验转速范围为 $6\,000 \text{ r/min} \sim 20\,000 \text{ r/min}$, 可以得出密封泄漏量随转速增长呈内凹型曲线增长。试验值与计算值趋势相同, 这说明转速

对密封的影响越来越大。

根据试验分析,转速对密封泄漏量的影响主要来源于电机主轴的跳动。转速的增加,主轴跳动给密封环带来的惯性力会成加速增加,导致密封的追随性降低,进而使密封的泄漏量增大。

试验值与计算值的贴合性逐渐变好,密封与跑道的跑合使密封泄漏量在一定程度上得到了优化,由此也证明了速度系数的准确性。

3.3 环形弹簧箍紧力对密封性能的影响

环形弹簧作为密封正常运转的核心部件,其大小影响密封的泄漏量和发热量等密封参数。通过对密封环施加不同环形弹簧箍紧力,验证了理论计算结果准确性。

研究箍紧力对密封发热量的影响,可以通过试验时测量密封运转一定时间后跑道的温度变化情况。环形弹簧箍紧力对密封的发热量影响很大,为保证密封环不会因发热量过大被烧坏,试验时仅测量无通压、转速为 8 000 r/min、运转 5 min 条件下跑道的温度。跑道温度采用测温枪测量,测温枪对准跑道内侧表面,读取跑道内表面最高温度。

通过弹簧测力计测得弹簧拉力值如表 3 所示。

表 3 试验环形弹簧箍紧力实测值

	弹簧 1	弹簧 2	弹簧 3	弹簧 4	弹簧 5
工作长度弹簧 拉力/N	1.7	2.0	2.7	3.2	3.7

分析表 3 数据可知:当弹簧力为 1.7 N 时,密封发热量较少;当弹簧力大于 2.0 N,跑道最高温度随弹簧力成加速增长趋势,弹簧力为 3.7 N 时,温度升高了超过 40 ℃。由此可以看出,箍紧力对密封的摩擦发热量影响非常大。

大箍紧力、高转速试验后跑道和密封环如图 6 所示。

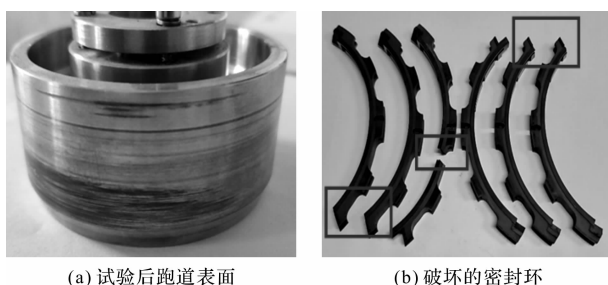


图 6 运转试验后跑道及密封环

从图 6(a)可以看出:跑道表面已经产生变色,可见密封摩擦已经产生非常高的温度。密封环如图 6(b)所示,试验后发现密封环磨损严重,并出现了环瓣和搭接头断裂的情况,可见过高的箍紧力会严重降低密封环的使用寿命。

4 结束语

本文针对航空发动机主轴承腔高转速、变压差下摩擦生热问题,对环瓣式浮环密封的主要参数进行了研究,得到以下结论:

(1) 基于有限元软件,建立密封跑道传热模型,通过跑道的温度分布研究工况、结构参数对密封发热量的影响,发热量的大小通过跑道的温度分布更加直观地表现出来;

(2) 研究工况参数对密封发热量的影响结果表明,压差、转速对密封摩擦发热的影响非常大。当设计压差、转速较大时,应通过减小关闭压力的方法来减少密封的发热;环形弹簧箍紧力对密封泄漏量影响不大,对密封发热量影响很大;

(3) 研究结构参数对密封发热量的影响结果表明,主密封面宽度不仅对泄漏量影响很大,对密封发热量也影响很大,在密封设计时,可以通过密封发热量曲线确定主密封面宽度的设计值范围;

(4) 基于 Fluent 建立的跑道散热流固热耦合模型,研究不同阻封气温度、冷却油流量下跑道的温度变化。研究结果表明,当阻封气温度升高,气体对跑道升温变化将成为主要因素,最好再外部做适当降温;跑道与冷却油换热存在极限值,继续增加供油量不会提高跑道的降温效果。

本文研究结果可为环瓣式浮环密封的性能优化提供改进思路。

参考文献 (References):

- [1] 马芳,刘璐.航空轴承技术现状与发展[J].航空发动机,2018,44(1):85-90.
- [2] 王泓然,张栋善.航空发动机密封技术研究[J].科学咨询,2018(23):52.
- [3] HA T W, LEE Y B, KIM C H. Leakage and rotordynamic analysis of a high pressure floating ring seal in the turbo pump unit of a liquid rocket engine[J]. *Tribology International*, 2002,35(3):153-161.
- [4] NASA. Liquid rocket engine turbopumps[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1973.
- [5] NASA. Liquid rocket engine turbopump rotating-shaft seals [R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1978.
- [6] 苏令.新型浅槽环瓣型浮动环密封综合性能分析及软件开发[D].北京:清华大学精密仪器与机械学系,2006.
- [7] 王飞,刘向锋,刘莹.浅槽环瓣型浮动环密封的性能分析[J].润滑与密封,2005(6):74-76,85.

- [8] 郑利胜. 航空发动机圆周密封环热—结构分析[D]. 沈阳:东北大学机械与自动化学院,2013.
- [9] 闫玉涛,李雪娟,胡广阳,等. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[J]. 航空动力学报,2014,29(2):314-320.
- [10] 胡亚非,王启立,刘 硕,等. 石墨密封材料润滑膜形成规律及摩擦磨损研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2):223-226.
- [11] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册(第12册)[M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [12] 吴延泽,周先军,彭木图,等. 核级石墨密封垫片应力补偿机理研究[J]. 压力容器,2017,34(11):41-46.
- [13] 王 莹. 直升机传动系统圆周密封技术研究[J]. 机械工程师,2018(2):118-120,123.
- [14] 王振岭,葛泉江,林国昌. 航空发动机主轴轴承润滑与冷却技术研究[J]. 航空发动机,2012,38(3):15-17,23.
- [15] 闫玉涛,张 博,胡广阳,等. 石墨圆周密封热-结构耦合分析[J]. 航空动力学报,2018,33(2):273-281.
- [16] 吴兆山,郑国运,李 香,等. 泵用干运转机械密封的设计和试验研究[J]. 流体机械,2019,47(1):26-30,45.
- [17] 孙宪栋. 高速干摩擦波纹管氦气机械密封性能研究[D]. 北京:北京化工大学机电工程学院,2018.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

王佳星,李双喜,马文杰,等. 轴承腔环瓣式浮环密封摩擦热分析[J]. 机电工程,2020,37(9):1032-1038.

WANG Jia-xing, LI Shuang-xi, MA Wen-jie, et al. Frictional heat analysis of bearing cavity ring-shaped floating ring seal[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(9):1032-1038.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1025 页)

参考文献 (References):

- [1] 季杭馨,胡中文,朱永田,等. 30 m 级光学/红外望远镜的宽视场多目标光谱仪[J]. 天文学报,2019(4):69-88.
- [2] VAN BELLE G T, MEINEL A B, MEINEL M P. The scaling relationship between telescope cost and aperture size for very large telescopes[C]. Ground-based telescopes, Glasgow: SPIE, 2004.
- [3] 安其昌,张景旭,杨 飞,等. 大口径望远镜风载分析综述[J]. 机电工程,2015,32(12):1649-1652.
- [4] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学,2012,5(4):327-336.
- [5] LEWIS I J, LYNN J, YANG S, et al. Optomechanical design of the MUSE spectrograph structure[C]. Ground-based Instrumentation for Astronomy, Glasgow: SPIE, 2004.
- [6] FARAH A, GODOY J, VELAZQUEZ F, et al. Finite element analysis of the GTC commissioning instrument structure[C]. Large Ground-based Telescopes, Waikoloa: SPIE, 2003.
- [7] RONQUILLO B, VEGA M A, GARCIA R, et al. Mechanical design of ELMER instrument for GTC telescope[C]. Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes, Waikoloa: SPIE, 2002.
- [8] ADKINS S M, ARMANDROFF T E, JOHNSON J, et al. Advances in instrumentation at the W. M. Keck observatory[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, Amsterdam: SPIE, 2012.
- [9] BALDWIN D, SZENTGYORGYI A, BAMES S, et al. Advanced structural design for precision radial velocity instruments[C]. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, Edinburgh: SPIE, 2016.
- [10] MUELLER M, SZENTGYORGYI A, BALDWIN D, et al. The opto-mechanical design of the GMT consortium large earth finder (G-CLEF)[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, Edinburgh: SPIE, 2016.
- [11] BERNSTEIN R A, BIGELOW B C. An optical design for a wide-field optical spectrograph for TMT[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II, Marseille: SPIE, 2008.
- [12] SURYA A, RADOVAN M, THIRUPATHI S, et al. Flexure compensation simulation tool for TMT-WFOS spectrograph[C]. Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VIII, Austin: SPIE, 2018.
- [13] TSANG D, AUSTIN G, GEDIG M, et al. TMT telescope structure system: seismic analysis and design[C]. Ground-based and Airborne Telescopes II, Marseille: SPIE, 2008.
- [14] JESSEN N C, NIELSEN H U, SCHROLL J, et al. CFRP lightweight structures for extremely large telescopes[J]. Composite Structures, 2008,82(2):310-316.
- [15] 陈文琳,吴洪亮,熊 飞. 基于等刚度原理的材料轻量化[J]. 塑性工程学报,2014,21(4):117-122.
- [16] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[编辑:冯黎雅]