

后挡板结构对刷式密封泄漏特性影响实验研究*

周 坤, 潘 君, 王晓燕, 力 宁, 胡廷勋, 谭 键

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了研究后挡板结构对刷式密封泄漏特性的影响, 模拟航空发动机静态和动态工况, 对三种不同后挡板结构的刷式密封泄漏特性进行实验研究。实验结果表明: 相比于标准型刷式密封, 后挡板结构中设计环形平衡腔能有效缓解刷式密封刷丝滞后效应, 但间隙值过大将导致刷式密封性能下降; 刷式密封实验件b(有环形平衡腔, 与刷丝束之间的间隙为0.2mm)的泄漏参数 Φ_2 保持在 $7g \cdot \sqrt{K} \cdot mm / (N \cdot s)$ 以内, 表现出优异的密封性能, 这说明合适的环形平衡腔间隙值设计, 能有效缓解刷式密封刷丝滞后现象。根据实验结果, 环形平衡腔的间隙设计值应不大于0.4mm。

关键词: 航空发动机; 泄漏特性; 刷式密封; 密封性能; 试验研究

中图分类号: TB42 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 12-2834-06

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190555

Experimental Investigation for Effects of Back Plate Structure on Leakage Characteristics of Brush Seal

ZHOU Kun, PAN Jun, WANG Xiao-yan, LI Ning, HU Ting-xun, TAN Jian

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: To study the effects of back plate structure on leakage characteristics of brush seal, an experimental investigation on leakage characteristics of brush seal with three different back plate structures was carried, which simulated the static and dynamic working conditions of a specific aeroengine. The experimental results showed that the back plate structure with a relief annulus could better alleviate the hysteresis of brush seal than the standard brush seal, but the excessive size of relief annulus gap would lead to the performance degradation of brush seal. The leakage parameter of brush seal b (with a relief annulus gap of 0.2mm from the bristle pack) Φ_2 were kept within $7g \cdot \sqrt{K} \cdot mm / (N \cdot s)$ and it showed excellent sealing performance. The results also showed that hysteresis effect of bristle pack could be effectively alleviated by designing reasonable relief annulus gap. According to the experimental results, the relief annulus gap should be no more than 0.4mm.

Key words: Aeroengine; Leakage characteristics; Brush seal; Sealing characteristics; Experiment investigation

1 引 言

刷式密封是近年来发展起来的一种可应用于航空发动机气体流路的新型接触式动密封,其泄漏量相比于篦齿密封减小约20%~50%^[1]。因其优异的

密封性能,得到广泛重视并在航空发动机中逐步得到了工程应用^[2]。

国内外专家学者对刷式密封的泄漏特性进行了大量研究。国外学者Chew等^[3]基于多孔介质计算模型研究了刷式密封的泄漏特性并与试验数据进行对

* 收稿日期: 2019-08-09; 修订日期: 2019-09-18。

通讯作者: 周 坤, 硕士, 高级工程师, 研究领域为航空发动机密封设计及试验。E-mail: zk5891@126.com

引用格式: 周 坤, 潘 君, 王晓燕, 等. 后挡板结构对刷式密封泄漏特性影响实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2834-2839. (ZHOU Kun, PAN Jun, WANG Xiao-yan, et al. Experimental Investigation for Effects of Back Plate Structure on Leakage Characteristics of Brush Seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12): 2834-2839.)

比;Basu等^[4]研究了标准型刷式密封的滞后效应和刚度效应的机理,并首次提出了低滞后刷式密封结构设计思路;Conner等^[5]基于实验方法研究了压差、转速等环境工况对刷式密封的泄漏特性的影响规律;Wood等^[6]通过对刷式束接触压力的测量,分析了刷丝束变形和压差对刷式束接触压力的影响;Chupp等^[7]进行了刷式密封泄漏特性实验,研究了上下游压差与泄漏量的关系,并通过实验数据验证了刷式密封滞后效应。在国内,孙晓萍^[8]对刷式密封泄漏特性和耐久性进行了实验研究,验证了刷式密封的耐久性和结构完整性;李军等^[9]实验研究了密封间隙、压比、转速对刷式密封泄漏特性的影响规律;胡广阳等^[10]对刷式密封泄漏及磨损特性的实验研究表明,结构参数对刷式密封性能有重要的影响。周坤等^[11]研究了环境工况对低滞后刷式密封泄漏特性影响规律,并进行了50h的持久实验,实验结果表明低滞后刷式密封具有持久保持良好性能的能力;杜春华等^[12]实验研究了低前挡板型小尺寸刷式密封的泄漏特性。从已有的文献看,目前的研究主要集中于刷式密封性能数值计算,国内对刷式密封的性能实验研究较少,鲜有关于结构参数对刷式密封性能影响规律的实验研究。

刷式密封在工作状态下,高、低压侧压差使刷丝束与后挡板紧密接触,由于摩擦力的作用,刷式密封存在“刷丝滞后”现象^[13]。为了缓解或减小刷丝滞后现象,在工程上的解决方法是在后挡板上设计有环形平衡腔,设计的关键是环形平衡腔与刷丝束之间的间隙值,环形平衡腔间隙过小,刷丝束与后挡板间的摩擦力降低有限,不能有效减小刷丝滞后效应;而间隙过大,会使刷丝在工作时弯曲过大,降低刷式密封的密封性能。因此,后挡板上的环形平衡腔的间隙值是影响刷式密封性能的最主要结构参数之一。本文采用实验的方法,对不同后挡板结构刷式密封,进行了静态、动态泄漏特性实验,研究了后挡板结构对刷式密封泄漏特性的影响规律。

2 实验方法

2.1 试验设备

针对刷式密封实验时高温、高速和高压的特点^[14],刷式密封泄漏特性实验在动密封实验台上进行。动密封实验台原理图见图1^[15]。

试验台由电机进行驱动,通过传动系统将支座中的旋转轴达到实验要求的转速,空气系统能提供实验所需的高温、高压的气体,用来模拟密封试验件

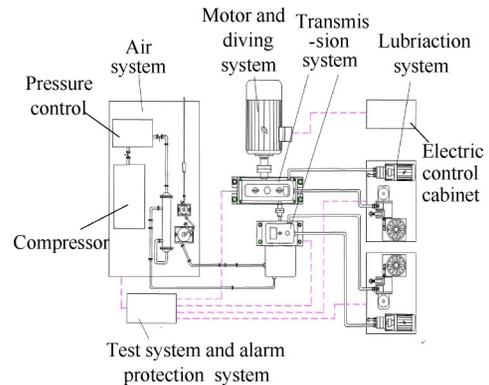


Fig. 1 Schematic diagram of the seal test rig

的高低压侧压差和环境温度,润滑系统对设备和支座进行润滑;测试系统能测量密封实验时的转速、温度、压力、振动以及气体或滑油泄漏量。

2.2 泄漏量测试方法

由于刷式密封介质为热空气,环境温度及测量精度要求较高,因此采用压力平衡法测量泄漏量,测试原理如图2所示。*B*腔连接实验台的空气系统,密封试验件的气体泄漏进入*A*腔,*A*腔与大气相通。实验时当高压腔(*B*腔)压力值恒定时,*B*腔的进气量即为密封试验件的气体泄漏量。

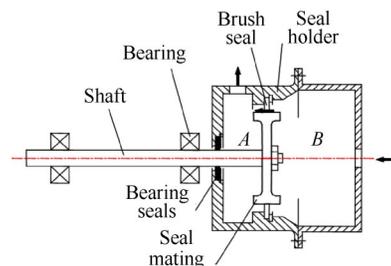


Fig. 2 Schematic diagram of the brush seal leakage measurement

2.3 实验件

刷式密封的结构组成如图3所示,采用熔焊工艺将前挡板、后挡板及中间的柔性遮流板、刷丝束连成一体。

根据低滞后刷式密封工程应用经验,本文设计了三种不同后挡板结构的刷式密封实验件。图4为三种后挡板结构的刷式密封示意图,其中实验件a无环形平衡腔,与刷丝束之间的间隙为0mm(即为标准型刷式密封);实验件b有环形平衡腔,与刷丝束之间的间隙为0.2mm;实验件c有环形平衡腔,且间隙值为0.4mm。三件刷式密封试验件其余结构参数保持一致,如刷式密封的单根刷丝直径为 $\Phi=0.08\text{mm}$,刷丝束厚度为2mm,刷丝自由长度13mm。图5为刷式

密封实物图。刷式密封与密封跑道采用过盈配合,刷丝材料为钴基高温合金材料,前、后挡板及柔性遮流板材料为镍基高温合金。在封严跑道上和刷丝接触部分喷涂有碳化铬的耐磨涂层,以减小刷丝和跑道的磨损。

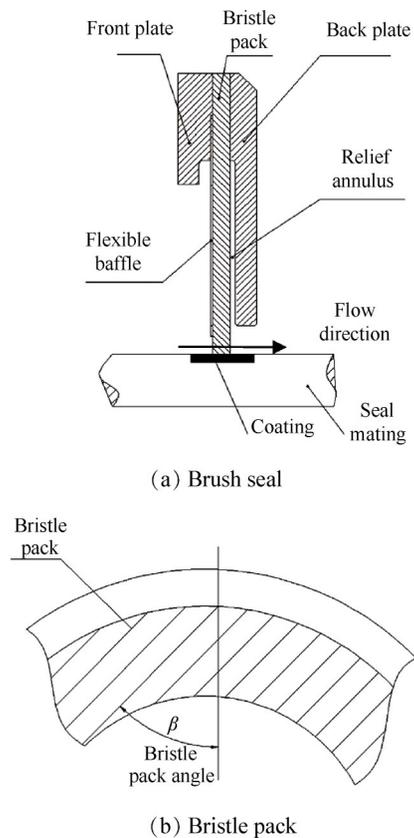


Fig. 3 Schematic diagram of brush seal



Fig. 4 Schematic diagram of brush seal specimen



Fig. 5 Outside view of brush seal

2.4 实验工况及泄漏参数 Φ_2

在动密封实验台进行了刷式密封的静态、动态泄漏特性实验。本次实验的最高转速达到 $3 \times 10^4 \text{r/min}$, 环境温度为 $(20^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C})$, 实验件所受最大压差达到 0.3MPa 。

不同的刷式密封结构和实验工况使得泄漏特性数据略有差异,数据单位制和整理方法也因此而不同。在工程实际中,通常用泄漏参数 Φ_2 来衡量刷式密封的密封性能,其值越小说明密封性能越好。泄漏参数 Φ_2 的关系式为^[15]

$$\Phi_2 = \frac{W \sqrt{T_u}}{D_o p_u} \quad (1)$$

式中 W 为质量泄漏量, g/s ; T_u 为上游气体总温, K ; D_o 为跑道外径, mm ; p_u 为上游气体总压, MPa 。

3 实验结果及分析

3.1 静态实验结果

静态实验是为了检验刷式密封在跑道转速为 0 的工况下的泄漏特性。图 6 为三种后挡板结构刷式密封的静态泄漏特性曲线。

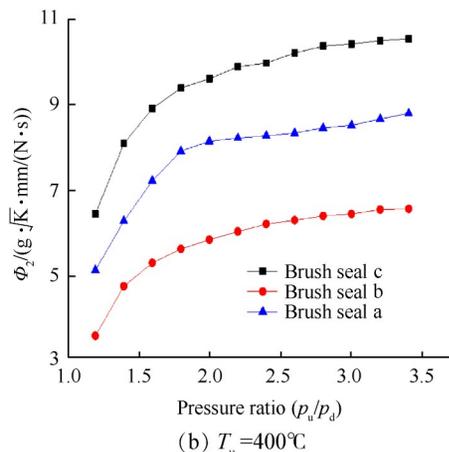
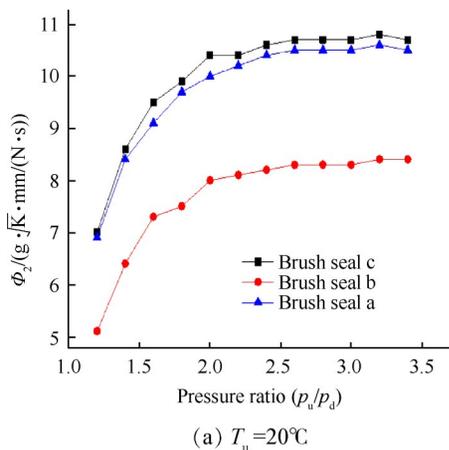


Fig. 6 Static leakage characteristic curves

从图中可以看出,随着压比(高、低压侧绝对压力的比值)的增大,刷式密封的泄漏参数 Φ_2 先逐渐增加,当压比在1.5~3.5时,泄漏参数 Φ_2 趋于稳定。刷式密封实验件b的静态泄漏参数 Φ_2 小于刷式密封实验件a,c,刷式密封实验件a的泄漏参数 Φ_2 略低于刷式密封实验件c。这是因为环形平衡腔的间隙为0时,由于刷丝与后挡板间的摩擦力,刷丝束不能及时回弹,存在滞后效应现象导致泄漏量增大;而过大的环形平衡腔间隙值0.4mm使刷丝束与后挡板不接触,进而减小了刷丝束的刚性,使刷丝在压差的作用力下易发生形变而导致实验件c的泄漏量增大。随着温度的增加,刷式密封泄漏参数 Φ_2 下降,这是因为随着温度的升高,空气的粘度增大以及密封跑道热膨胀的影响,导致气体泄漏量降低。实验件a在高温下由于转子热膨胀和空气粘度升高,所以其泄漏参数 Φ_2 比室温下降;实验件c在常温和高温下的泄漏参数 Φ_2 变化不大,随着温度升高其泄漏参数 Φ_2 下降不明显,泄漏参数 Φ_2 保持在较高水平,这说明实验件c的刷丝刚性减小过大,在压差工况下发生了较大弯曲,导致泄漏量下降。在静态实验中,刷式密封实验件b的泄漏参数 Φ_2 保持在 $7g \cdot \sqrt{K} \cdot mm / (N \cdot s)$ 左右。

3.2 动态实验结果

动态实验是为了检验刷式密封在密封跑道旋转状态下的泄漏特性。图7是三种后挡板结构刷式密封实验件在室温工况下,转速分别为 $1.5 \times 10^4 r/min$ 和 $3 \times 10^4 r/min$ 时的动态泄漏特性曲线。当压比在1.2~2.0时,随着压比的提高,刷式密封的泄漏参数 Φ_2 逐渐增加;在压比为2~3.4时,随着压比的提高,泄漏参数 Φ_2 缓慢增加。随着转子转速的增加,泄漏参数 Φ_2 下降;刷式密封实验件b的泄漏参数 Φ_2 明显小于刷式密封实验件a,c;刷式密封实验件a的泄漏参数 Φ_2 略低于刷式密封实验件c。

图8是三种后挡板结构刷式密封实验件在高温工况下的动态泄漏特性曲线。从图中可以看出,刷式密封实验件b的泄漏参数 Φ_2 明显小于刷式密封实验件a,c;刷式密封实验件a的泄漏参数 Φ_2 低于实验件c,这是因为环形平衡腔的间隙为0时,由于刷丝与后挡板间的摩擦力,因存在滞后效应现象导致泄漏量增大;而过大的环形平衡腔间隙值0.4mm,减小了刷丝束的刚性,使刷丝在压差的作用力下易发生形变而使刷丝束与密封跑道处密封间隙过大而导致实验件c的泄漏量增大,而实验件b因为环形平衡腔间隙的存在,增加了刷丝束的柔顺性进而提高了刷丝的跟随性,缓解了刷丝滞后效应,而且在试验工况条

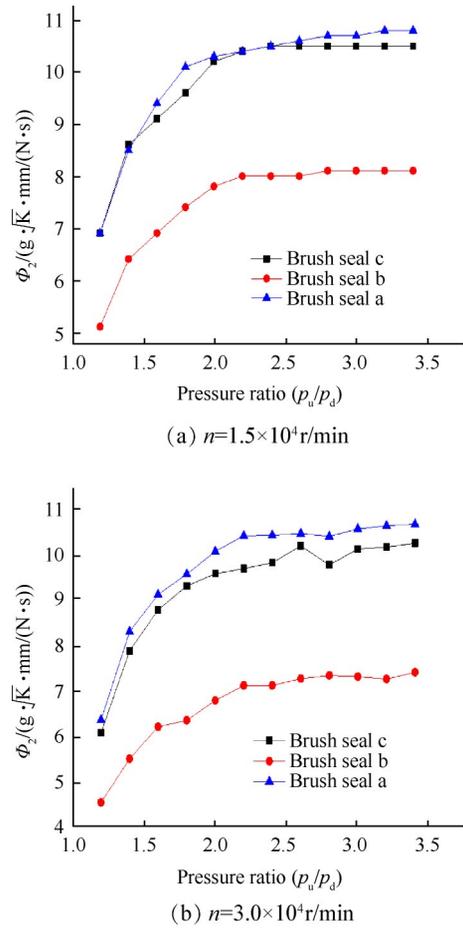


Fig. 7 Dynamic characteristic curves at room temperature 20°C

件下,刷丝的刚度满足设计要求,不会发生过大大形变而使泄漏量偏大。在动态实验中,刷式密封实验件b的泄漏参数 Φ_2 保持在 $7g \cdot \sqrt{K} \cdot mm / (N \cdot s)$ 以内,按照国内外通用的刷式密封性能衡量指标(泄漏参数 $\Phi_2 \leq 0.007$),其表现出优异的密封性能。相比于标准型刷式密封(试验件a),设计有环形平衡腔的刷式密封试验件(试验件b和试验件c)的滞后效应得到改善,但过大的间隙值会导致刷式密封性能下降。

从图7~8可以看出,在高温工况动态实验中,实验件a的泄漏参数 Φ_2 小于实验件c,而在室温工况静态、动态实验中,实验件a与实验件c泄漏参数 Φ_2 差别不大,实验件c在实验工况下一直保持在比较高的泄漏量。这是因为在高温工况下密封跑道在转速和温度的影响下,密封跑道径向增大大量相比于室温工况下变化量增大,密封跑道与刷丝之间的相对间隙变小,相比于室温工况,高温工况下的刷式密封实验件a的泄漏量下降;实验件c由于过大的环形平衡腔间隙值,刷丝的柔性增大而刷丝的刚度降低,以至于不能抵抗空气压差的作用力而发生过大变形,在实

验工况下的泄漏量保持在比较高的水平。因此,在高温工况下实验件 a 的泄漏参数 Φ_2 会小于试验件 c。

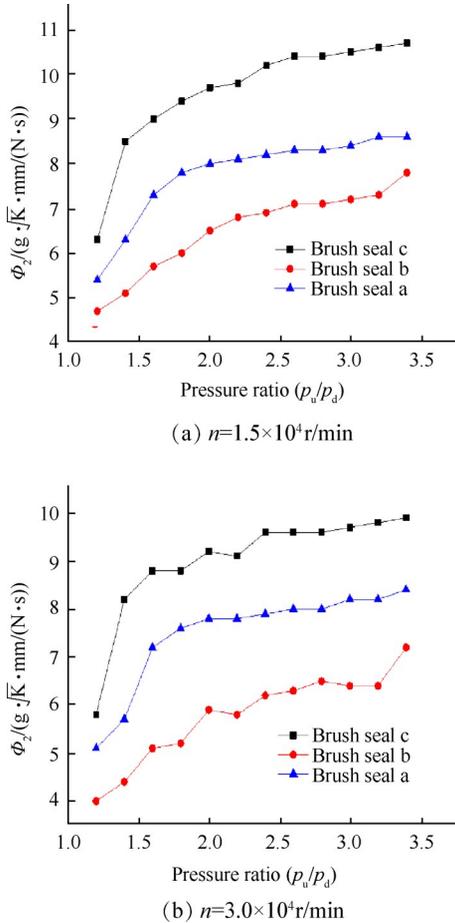


Fig. 8 Dynamic characteristic curves at high temperature 400°C

图9是刷式密封在温度为400°C,压差为0.2MPa工况下,随着转速的上升和下降时的泄漏参数 Φ_2 变化曲线。从图中可以看出,实验件 b 和实验件 c 在实验工况下,随着转速的升高和降低,泄漏参数 Φ_2 升高和降低曲线变化很小,而实验件 a 存在一定差异,且实验件 b 的泄漏参数 Φ_2 明显小于实验件 a 和 c。这说明随着环形平衡腔间隙的增大,能有效降低刷丝束与后挡板之间的摩擦力,进而增加了刷丝的柔顺性,使刷丝束能及时跟随密封跑道运动,减小刷式密封的气体泄漏量,所以能有效缓解刷式密封滞后效应,但环形平衡腔间隙值过大,虽然增加了刷丝束的柔顺性,但是刷丝束的刚性降低极易发生形变导致刷丝束与密封跑道间隙增大,将导致刷式密封性能下降。实验件 a 转速下降时的泄漏量大于转速上升时的泄漏量,这说明其存在明显的滞后效应现象。

刷式密封实验件 b 泄漏参数 Φ_2 保持在 $7\text{g}\cdot\sqrt{\text{K}}\cdot$

$\text{mm}/(\text{N}\cdot\text{s})$ 以内,这说明合适的环形平衡腔间隙值设计,将使刷丝束与跑道有比较好的跟随性,能有效缓解刷式密封刷丝滞后效应现象和保持优异的密封性能。与文献[15]中的刷式密封泄漏参数 Φ_2 进行了对比,刷式密封实验件 b 与国外刷式密封泄漏特性相当。通过刷式密封静、动态泄漏特性试验数据,试验件 c 的泄漏参数 Φ_2 已经达到了 $10\text{g}\cdot\sqrt{\text{K}}\cdot\text{mm}/(\text{N}\cdot\text{s})$ 左右,这说明泄漏量已经偏高,与篦齿密封的泄漏特性相当。通过实验数据,刷式密封随着环形平衡腔与刷丝束之间的间隙值增大,刷丝束与后挡板之间的摩擦力降低,刷丝的柔性越好,缓解刷丝滞后现象越明显;当刷丝束与环形平衡腔的间隙值达到 0.4mm 后,其密封性能下降明显,已不能满足设计要求;间隙值在 0.2mm 左右时,不但能有效缓解滞后效应还能保证优异的密封性能。由于刷式密封实验件加工周期和经费的影响,本次实验件样本数较小,未能精确得出泄漏量与不同间隙值的关系式,后续将通过数值计算和实验验证的基础上进行进一步的研究。根据本文的实验数据,环形平衡腔的间隙值不超过 0.4mm 时,刷式密封的泄漏特性保持在比较好的水平。

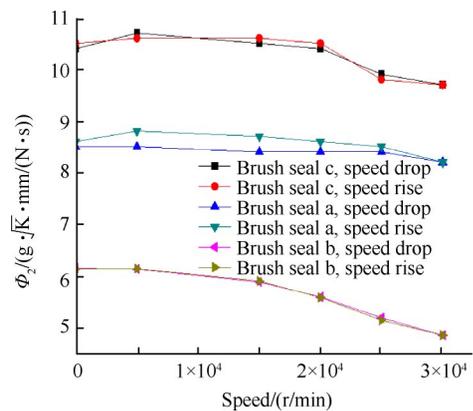


Fig. 9 Dynamic characteristic curves (400°C, 0.2MPa)

3.3 刷式密封实验件 b 持久实验

本文对刷式密封实验件 b 进行了 50h 的持久实验。图 10 为刷式密封实验件 b 在持久实验中泄漏参数随时间变化曲线。本次实验共进行了 50h,实验工况为:转速 3×10^4 r/min,压差 0.3MPa,环境温度为 400°C。实验过程中,每隔 0.5h 记录一次泄漏量。从图 10 可以得出,在 0~50h,刷式密封实验件 b 的密封泄漏参数 Φ_2 没有下降的趋势,保持稳定;从图 11 可以看出,经过 50h 的实验,刷丝与跑道未出现异常磨损,这说明实验件 b 具有持久保持密封性能的潜力。

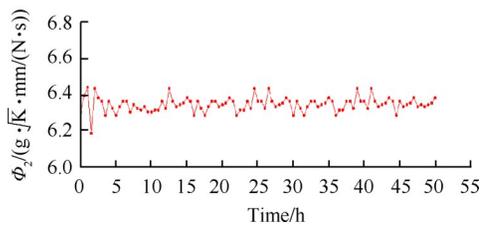


Fig. 10 Curves of seal leakage factor Φ_2 changed with time

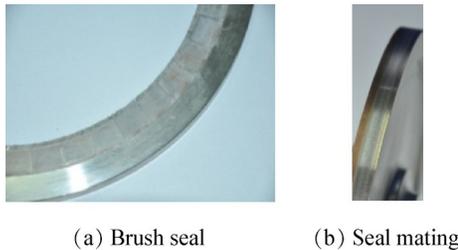


Fig. 11 Outside view of brush seal specimen of endurance tested

4 结 论

本文模拟航空发动机真实工况,实验研究了后挡板结构对刷式密封性能的影响规律,得到以下结论:

(1)刷式密封实验件b在实验工况下,泄漏参数 Φ_2 保持在 $7g \cdot \sqrt{K} \cdot mm / (N \cdot s)$ 以内,表现出优异的密封性能,这说明合适的环形平衡腔间隙值设计,能有效缓解刷式密封刷丝滞后现象。根据实验结果,环形平衡腔与刷丝束之间的间隙值 $\leq 0.4mm$ 为宜。

(2)随着温度和转速的增加,刷式密封的泄漏参数 Φ_2 下降;随着压比的增加,泄漏参数 Φ_2 先逐渐增大,当压比在1.5~3.5时,泄漏参数 Φ_2 缓慢增加。

(3)刷式密封在静态和动态实验中,刷式密封实验件b的泄漏参数 Φ_2 小于实验件a和c,刷式密封实验件a的泄漏参数 Φ_2 略小于实验件c。

(4)相比于标准型刷式密封,环形平衡腔设计能有效缓解刷丝滞后效应,且泄漏特性优于标准型刷式密封。但是环形平衡腔间隙值过大,将导致刷式密封的刷丝刚性降低而使其密封性能下降。

后续将通过数值计算和实验验证的方法,对环形平衡腔对刷式密封刷丝刚度和泄漏量进行进一步的研究,得到环形平衡腔结构与刷丝刚性和泄漏量

的关系式。

参考文献

- [1] Tyacke J, Jefferson-Loveday R, Tucker P, et al. Application of LES to Labyrinth Seals[R]. *AIAA* 2011-3861.
- [2] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[D]. 北京:航空工业出版社, 2005.
- [3] Chew J W, Lapworth B L, Millener P J. Mathematical Modeling of Brush Seal[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1995, 16(6): 493-500.
- [4] Basu P, Datta A, Johnson R, et al. Hysteresis and Bristle Stiffening Effects of Conventional Brush Seals [R]. *AIAA* 93-1996.
- [5] Conner K J, Childs D W. Rotordynamic and Leakage Characteristics of a 4-Stage Brush Seal[D]. *Texas: The Agricultural and Mechanical College of Texas*, 1990.
- [6] Wood P E, Jones T V. A Test Facility for the Measurement of Torques at the Shaft to Seal Interface in Brush Seal[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, 121(1): 160-166.
- [7] Chupp R E, Dowler C A. Performance Characteristics of Brush Seals for Limited-Life Engines[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(2): 390-396.
- [8] 孙晓萍. 刷式密封性能及耐久性实验研究[J]. 航空发动机, 2002, (3): 37-41.
- [9] 邱波, 李军, 冯增国, 等. 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 7-12.
- [10] 胡广阳, 孙丹, 刘宁宁, 等. 刷式密封泄漏及磨损特性实验研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(2): 1-5.
- [11] 周坤, 力宁, 郭徽, 等. 低滞后刷式密封泄漏特性试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(4): 132-136.
- [12] 杜春华, 吉红湖, 胡娅萍, 等. 低前挡板型小尺寸刷式密封泄漏特性的试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 298-305.
- [13] Crudgington P, Bowsher A, Kirk T. Brush Seal Hysteresis[R]. *AIAA* 2012-4003.
- [14] 力宁, 彭最花, 贺玲, 等. 航空发动机高温高速密封实验台研制[J]. 润滑与密封, 2014, 39(6): 121-123.
- [15] Gul K Arora, Margaret P Proctor. JTAGG II Brush Seal Test Results[R]. *AIAA* 97-2632.

(编辑:史亚红)