

指尖封严磨损特性及其对泄漏影响的试验

杜春华¹, 吉洪湖¹, 胡娅萍¹, 罗健², 马丹¹, 汤丽萍², 廖凯²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空发动机集团有限公司 商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 对间隙、过渡、过盈 3 种配合的指尖封严的磨损特性及其对泄漏的影响进行了试验研究, 分析了不同配合状态下封严件与转子的磨损现象、磨损长度以及封严泄漏系数的分布。试验结果表明: 封严磨损随封严与转子相对滑动距离增大而增加; 间隙配合状态下, 封严出现局部磨损, 磨损及其对泄漏的影响主要发生试验初始阶段; 过盈配合时, 封严件整体均出现磨损, 且磨损发生在整个试验阶段, 磨损对泄漏的影响在初始阶段较大、之后逐渐减小; 封严的间隙越小(过盈量越大), 磨损对泄漏影响越大。

关 键 词: 指尖封严; 磨损特性; 泄漏; 间隙配合; 过盈配合

中图分类号: V231; TB42

文献标志码: A

Experiment of wearing characteristics and its effect on leakage of finger seal

DU Chun-hua¹, JI Hong-hu¹, HU Ya-ping¹, LUO Jian²,

MA Dan¹, TANG Li-ping², LIAO Kai²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: Wearing characteristics of rotor and its effect on leakage of finger seals under three different kinds of fit, namely clearance fit, transition fit and interference fit, were experimentally investigated. The wearing of the rotor, wearing length of seal and distribution of leakage coefficient were analyzed. The results show that the wearing is severer when the sliding distance between the seals and the rotor increases. For finger seal with clearance fit, the seal is partially worn and the wear and its effect on the leakage mainly occur at the beginning of the experiment. For finger seal with interference fit, the whole seal is worn and the wear occurs throughout the experiment. The effect of wearing on the leakage is notable at the beginning and then is gradually decreased. The effect of wearing on leakage is greater when the clearance is smaller or the interference is larger.

Key words: finger seal; wearing characteristics; leakage; clearance fit; interference fit

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(51106072); 航空科学基金(2014ZB52027)

作者简介: 杜春华(1987—), 男, 博士, 主要从事密封技术研究。

引用格式: 杜春华, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 指尖封严磨损特性及其对泄漏影响的试验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 53-59. DU Chun-hua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experiment of wearing characteristics and its effect on leakage of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 53-59.

指尖封严是由 Heydrich, Mackey, Johnson^[1-3]根据刷式封严思想提出的一种先进封严技术。指尖封严的封严片具有一定的刚度,当封严片和转子之间存在接触压力时,该压力使得封严件和转子的接触面上产生磨损,进而导致泄漏量的增大。封严件与转子的配合有过盈、过渡和间隙3种状态,过盈配合是指尖封严工作的正常配合状态,此时封严件与转子之间的接触压力较大,加上受封严件加工精度和转子的偏心、膨胀、变形等因素影响,其磨损现象非常显著。为解决指尖封严的磨损问题,美国提出了非接触式指尖封严^[4],和采用在双片压力平衡非接触指尖密封中通过配合转子表面加工螺旋槽以在指尖靴和转子指尖形成气流膜来降低密封副的磨损^[5]。然而,对于过渡和间隙配合等非接触式封严,也会因为加工精度和转子的偏心、膨胀、变形等因素而出现局部磨损现象,进而影响封严效果。因此,研究指尖封严磨损及其磨损特性对指尖封严泄漏特性和传热特性的预测分析具有重要意义,是指尖封严研究的一个重要方面。

磨损是一个复杂的过程。指尖封严中指尖靴与转子间是面接触,其磨损机理可应用黏着磨损理论^[6-7],磨损的计算通常采用基于黏着磨损理论的 Archard 模型^[8-9],该模型指出磨损量与接触压力和相对滑动距离成比例。目前,虽然已建立了指尖封严磨损的定量计算模型^[10],但模型中参数需要试验来确定,而且计算模型还不能够完全解释磨损机理。

对指尖封严磨损研究的主要手段是数值计算和试验研究。在数值计算方面,张延超、王红艳等^[11-12]研究了渐开线型指尖封严结构参数对其磨损影响的主次关系,发现其主次关系依次是:基圆半径、宽度角、靴高、间隙角、指尖片厚。李二圣等^[13]构建了指封性能多目标优化的 Stackelberg 对策模型,采用遗传算法实现了可控优化并获得了具有低迟滞低磨损性能的“上凹”构形指封型线。宗兆科等^[14]对圆弧型指尖密封构型特征进行了分析,建立了指尖密封低泄漏和低磨损的综合性能优化设计方法并采用 Archard 黏着磨损模型推导出简化的黏着磨损定理计算指尖密封的磨损率。在试验方面,Proctor 等^[15-16]对压力平衡型指尖封严在高温、高速试验台上进行了试验研究,结果表明:指尖封严的大部分磨损都发生在初始测试中,采用碳化铬涂层的转子跑道具有良好的耐磨性。苏华^[10]通过磨损试验确定了指尖封严磨损

计算模型中的磨损系数的取值范围。王旭^[17]对封严材料进行试验研究分析得到 GH3044 指尖封严材料与碳化钨和陶瓷涂层跑道组成的摩擦副效果最好,其次是碳化铬涂层跑道,最差的是表面渗氮跑道。

影响指尖封严的磨损的主要因素包括指尖片与转子之间的压力及其相对滑动速度。其中相对滑动速度与转子转速密切相关,接触压力的影响因素众多,主要包括指梁型线、指梁基圆、周向角、指尖片厚度、靴高、间隙角等结构参数、上下游压差、封严材料以及封严配合状态等。由于配合状态直接关系到封严与转子的接触状态,因此对指尖封严的磨损也具有至关重要的影响。另一方面,磨损又会反过来影响封严间隙和配合状态,进而对泄漏特性产生影响。已有的文献对封严片结构、封严材料等对指尖封严磨损的影响都有研究,对配合状态这一重要影响因素则几乎没有考虑,而且磨损对封严泄漏特性的影响在以往的研究中也几乎没有涉及。

本文设计了间隙、过渡、过盈3种配合状态的6个封严试验件,每种配合状态包括两个试验件。对这6个试验件开展了转子轴心轨迹、磨损特性以及磨损对泄漏特性影响的研究。首先测量并分析了转子的轴心轨迹,确保了试验数据的有效性。在此基础上进一步研究了不同配合状态的磨损特性以及磨损对指尖封严泄漏特性的影响。

1 试验系统

1.1 试验台

试验装置由试验件系统、动力系统、气路系统和测量系统组成^[18]。试验件系统中,高压腔气流通过两对称的通道流向低压腔,可同时对两个试验件的进行测量。由于两试验件是对称分布,则其试验工况(压差、转速、环境温度等)可保持一致。动力系统是由1台最大转速为3000 r/min的电动机通过三角带来传输的,电动机转速通过变频器调节和显示。气路系统中的高压气源是由1台额定流量为20 m³/min,额定压力为0~0.8 MPa的压气机提供。

1.2 试验件

指尖封严试验件由前挡板、隔片、封严片、后挡板构成,它们之间通过铆钉联结,其中封严片在轴向是交错排列的。

本文设计了6个试验件,试验件的公称尺寸

为 150 mm, 6 个试验件与不同转子配合成间隙、过渡和过盈 3 种配合状态的试验组件. 试验方案^[18]: 将 6 套试验组件分为 3 组进行试验, 同组的两套试验组件同时在试验台上试验; 每组试验需要在 6 个不同压差下进行, 每个压差下进行 4 种不同转速升降, 每个循环进行 3 次.

2 试验测量与数据处理

2.1 试验测量

试验的测量系统包括了上下游压力测量、出口压力和流量测量、出口温度测量、主轴轴心轨迹测量、主轴实际转速测量等. 指尖封严上游压力和试验台出口压力采用 SK2088 型压力传感器测量, 指尖封严下游压力采用压力扫描阀测量; 出口温度使用 WZP-231 型热电阻; 出口流量采用涡街流量计和玻璃转子流量计测量; 主轴轴心轨迹和试验台振动测量分别采用电涡流传感器和加速度传感器进行测量; 主轴的实际转速使用光电式转速计测量.

试验前, 在封严件上均匀取 8 个测量点, 使用三坐标测量仪对其内径进行测量; 试验后, 将封严件拆卸清洗, 采用相同方法进行内径测量; 对试验前后两次内径测量结果分析可获得封严件的磨损量. 三坐标测量仪测量误差 (μm) 为 $3.5 + 4L/1000$, 对于本试验内径测量误差为 $4.1 \mu\text{m}$.

2.2 试验数据处理

2.2.1 泄漏量

玻璃转子流量计读出的是体积流量, 体积流量需要通过下式转换成质量流量

$$\dot{m} = \frac{q_v \rho_0}{3600} \sqrt{\frac{p_{\text{out}} T_0}{p_0 T}} \quad (1)$$

式中 q_v 为体积流量; ρ_0 为仪器标定状态下气体密度; p_{out}, T 为气体流经流量计时的压力、温度; p_0, T_0 分别为仪器标定状态的压力、温度.

文中采用的玻璃转子流量计的测量范围为 $1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $2 \sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的, 其测量精度为 1.5% , 最大误差为 $0.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$, 小于试验中不同转速下的流量变化, 试验数据测量有效.

2.2.2 泄漏系数

泄漏系数是衡量封严泄漏特性的物理量, 且可以消除了压力、温度和封严尺寸等因素的影响, 其计算式为

$$\phi = \frac{\dot{m} \sqrt{T}}{p_u D_i} \quad (2)$$

式中 D_i 为封严件的内径 (m), p_u 为指尖封严的上游压力 (MPa).

2.2.3 转子轴心轨迹

将由分别安装在转子水平和垂直方向的两个电涡流传感器采集到的转子轴心水平和垂直方向的位移信号合成李萨如图. 根据计算式: 真实值 = 显示值 / 标定值, 可以计算转子轴心在旋转过程中偏移量, 求其最大偏移量

2.2.4 试验件的磨损

本文采用磨损长度 (即磨损前后封严内径变化) 来表示封严的磨损量. 由于封严的磨损长度不能直接进行测量, 需要通过测量试验前后封严件的内径, 再按下式计算磨损长度

$$\Delta l = \frac{D_{i1} - D_{i2}}{2} \quad (3)$$

式中 D_{i1}, D_{i2} 分别为试验前、后封严件的内径.

3 试验结果与分析

3.1 轴心轨迹

根据指尖封严试验所得到的转子轴心轨迹图可得各试验组件在不同转速下的转子轴心轨迹范围^[18]. 分析总结可得如下结论: 间隙和过渡配合状态的 FS1, FS2, FS3, FS4 对应的转子轴心位移范围分别为 $5.0 \sim 7.0 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \sim 6.7 \mu\text{m}$; 两种配合状态下的封严配合间隙最小值为 0.013 mm , 大于转子轴心位移的最大值, 轴心轨迹变化不改变封严间隙状态, 但会改变局部接触的干涉量, 会增加局部磨损; 过盈配合状态下的封严组件 FS5 / FS6 的转子轴心位移范围 $8.2 \sim 10.0 \mu\text{m}$, 对应的过盈量分别为 0.034 mm 和 0.068 mm , 其绝对值大于转子轴心位移的最大值 0.01 mm , 因此转子轴心轨迹的变化不会改变过盈配合封严的配合状态, 但偏移的存在会使过盈量产生局部增加和减少, 磨损量取决于大过盈量部分, 因此会增加磨损. 但是, 在分析过程中同组试验的轴心偏移相同, 可消除装配偏心带来的影响, 试验数据仍然有效.

3.2 磨损特性

图 1 是试验后转子图片, 在图片中显示了各封严件对应转子的磨损状况, 图中显示: 间隙和过渡配合状态下的 FS1, FS2, FS3, FS4 对应的转子磨损痕迹较过盈配合状态的 FS5 和 FS6 的轻. 分

析其原因:受内圆圆度、转子轴心位移变化等因素影响,封严件与转子出现局部接触,从而使得具有一定间隙的封严也出现磨损.

图 2 为 FS4 试验后的图片,图中标号 1,3 部分和标号 2,4,6 的局部出现了黑色磨痕,其余部分几乎没有磨痕,说明封严 FS4 出现了局部磨损现象. 因此,间隙配合下的封严也会出现磨损,且封严件内圆圆度对其磨损特性具有一定影响.

过盈配合状态下的 FS5 和 FS6 对应的转子磨损较为严重,试验后指尖封严件整个圆部分都有明显的磨损,说明过盈配合状态下指封磨损较间隙配合时严重.

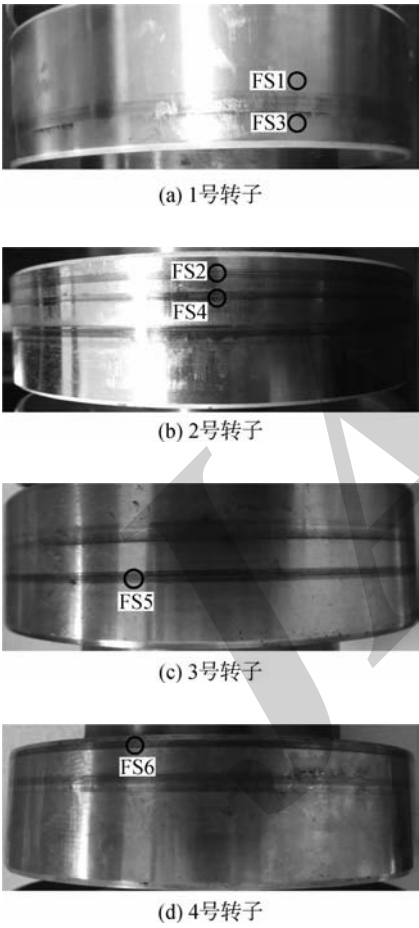


图 1 转子磨损图

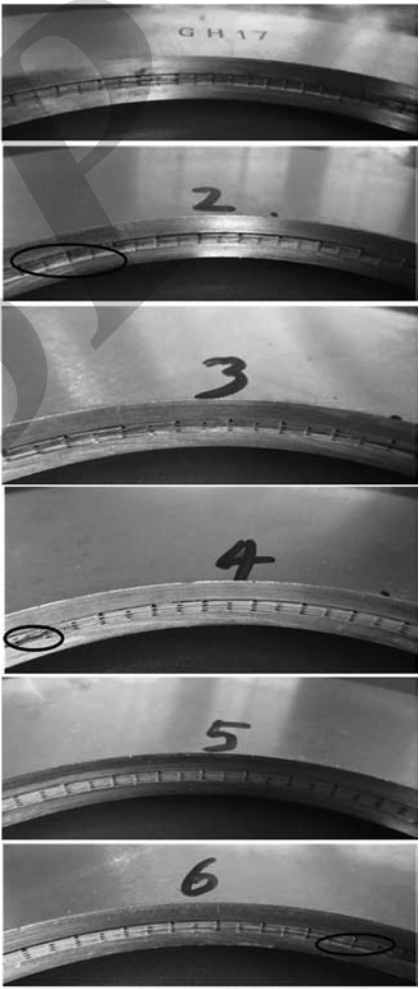
Fig. 1 Picture of rotor's wear

表 1 为试验件检测和轴心位移测量结果,表中给出了各试验件的磨损量、圆度及轴心偏移变化范围.

1) 比较第 1 组中的 FS2 与第 2 组的 FS4,间隙大的 FS4 的磨损量大于间隙小的,分析原因是两封严的配合间隙相差不大,圆度相当,但由于第 1 组试验转子旋转时间为 2052 min 远大于第 2 组



(a) 指尖封严件整体视图



(b) 指尖封严件局部视图

图 2 指尖封严件磨损图

Fig. 2 Picture of finger seals' wear

的 727 min,即 FS4 的相对运动行程长大于 FS2,因此封严 FS2 的磨损程度大于 FS4. 这一现象与磨损量与相对运动行程成比例^[18]相吻合. Archard 磨损计算模型说明磨损量与相对滑动距离成比例关系,在这里也得以验证.

2) 表 1 中显示第 1 组试验中的大间隙配合

的 FS2 对应转子的磨损较小,间隙配合的 FS1 的严重.分析原因是 FS2 的内圆圆度比 FS1 大,其局部磨损较为严重,在图 1(a)和图 1(b)中 FS1 对应的转子上的磨痕较 FS1 对应的不明显使其得以验证.第 2 组试验中 FS3 和 FS4 也出现了相同的现象.

3) 转子轴心轨迹变化范围远小于内圆圆度、封严间隙,其对小间隙配合的指尖封严磨损影响较小.对于过盈配合状态,其封严与转子间隙为 0 mm,轴心轨迹变化对指尖的磨损有一定影响.

表 1 指尖封严件测量参数

Table 1 Measurement parameters of all finger seals

组别	编号	配合量/ mm	圆度/ mm	磨损量/ μm	轴心 位移/μm
1	FS1	0.013	0.0257	7.39	5.0~7.0
	FS2	0.031	0.0701	16.395	5.0~7.0
2	FS3	0.019	0.0232	7.525	4.3~6.7
	FS4	0.026	0.0849	9.3	4.3~6.7
3	FS5	-0.034	0.0535	31.45	8.2~10.0
	FS6	-0.068	0.0769	25.155	8.2~10.0

3.3 磨损对泄漏特性影响的试验结果

3.3.1 过盈配合状态下磨损对泄漏的影响

过盈配合状态下,由于磨损的存在封严的过盈量会发生变化,进而影响封严的泄漏.图 3 是 FS5 不同压差下开始阶段和循环结束后零转速下的泄漏系数变化曲线,横坐标表示循环周期.

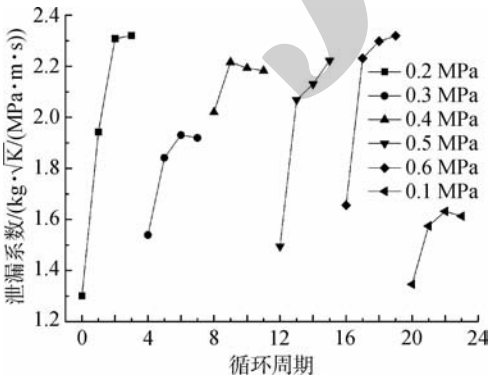


图 3 FS5 泄漏系数随循环周期变化

Fig. 3 Leakage coefficient of FS5 along with cycle time

图 3 中的试验过程中压差调节顺序:0.2, 0.3,0.4,0.5,0.6,0.1 MPa,其中 0.3 MPa 和 0.4 MPa 压差之间的时间间隔很短小于 0.5 h,其他

压差之间的时间间隔较长大于 12 h.分析图 3 可得:

1) 过盈配合状态下,不同压差的 0 转速时的泄漏系数随循环周期变化趋势是先增大后趋于平缓.分析其原因是开始阶段封严件与转子配合较为紧密磨损较为严重,泄漏系数变化较大,即各压差下泄漏系数在第 1 循环变化较大;各压差下第 2、第 3 循环后其泄漏系数变化不大,其原因是经一段时间磨损,指尖封严磨损趋于稳定,磨损率减小,泄漏变化随之减小,从而泄漏系数变化减小.

2) 指梁具有一定刚度,且压差作用下封严片之间、封严片与前后挡板之间都存在摩擦力,在过盈配合状态下指梁对转子表面有一定压力,使封严和转子产生磨损.由于初始阶段封严片与转子之间的过盈量较大,其接触力大,使磨损量和磨损率大,泄漏系数变化较大.0.2 MPa 压差是初始试验压差,初始试验阶段封严没有磨损,封严泄漏量较小,随着试验的进行,开始阶段的磨损率大,磨损较快,泄漏系数变化也比较大.随着磨损的进行,过盈量减小,接触力随之减小,磨损率变小,其泄漏系数变化较初始阶段缓慢.

3) 由于封严存在迟滞性且 0.3,0.4 MPa 压差的试验时间间隔很短,封严片与转子之间接触力变化不大,其磨损率变化不大,因此 0.4 MPa 压差的试验开始阶段的泄漏系数与 0.3 MPa 压差的试验结束时的相差不大,且其变化趋势也与 0.3 MPa 压差的试验结束阶段保持一致.其他压差试验之间时间间隔较长,封严已经消除迟滞性的影响而得以恢复,其初始阶段由于压差增大,封严片指尖摩擦力大,使封严片与转子接触力变大,磨损相对相同压力下试验的其他阶段严重,泄漏系数变化较大即各压差试验第 1 循环的泄漏系数变化较大.

4) 过盈配合状态下,磨损的大小直接影响封严过盈量的变化,对其泄漏特性的影响发生在整个试验阶段,直至封严配合状态发生改变即封严配合状态变为零间隙或间隙配合为止.

3.3.2 间隙配合状态下磨损对泄漏特性的影响

间隙配合状态下,由于受安装偏差和试验件加工精度的影响,封严存在局部磨损,该磨损影响其泄漏特性,图 4 是 FS3 各压差下开始阶段和第 3 循环结束后零转速下的泄漏系数.横坐标表示试验循环周期.试验过程中压差调节顺序:0.3, 0.4,0.5,0.6,0.1,0.2 MPa,其中 0.3,0.4,0.5 MPa 各压差之间的时间间隔很短小于 0.5 h,0.5

MPa 和 0.6 MPa 压差之间时间间隔较长大于 12 h.

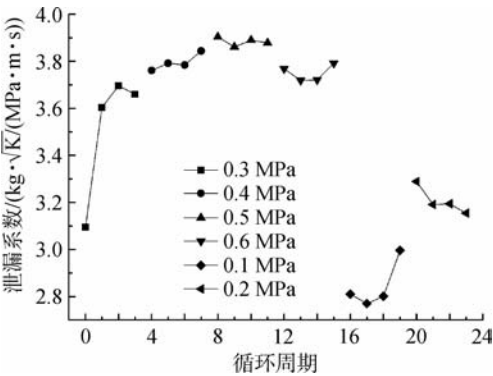


图 4 FS3 泄漏系数随循环周期变化

Fig. 4 Leakage coefficient of FS3 along with cycle time

分析图 4 可知：

1) 封严在初始阶段因为封严件加工和安装存在误差,使得封严件与转子指尖产生局部接触并产生一定压力,在转子旋转过程中封严件会产生磨损,影响其泄漏特性. 在在封严试验初始阶段封严磨损率较大,其泄漏系数会发生较大变化,如图 4 中 0.3 MPa 下试验的第 0 循环到第 1 循环所示. 随着磨损的进行,磨损率变小,泄漏系数变化缓慢,如图 4 中 0.3 MPa 下试验的第 1 循环到第 2 循环、第 2 循环到第 3 循环所示.

2) 由于初始阶段试验已将因封严件的圆度、轴心轨迹变化等因素引起的封严局部接触部分磨损掉,在后面的其他 3 个压差下的试验中,试验磨损量很小,对泄漏的影响也随之变小,其泄漏系数变化平缓.

3) 封严存在一定的迟滞性,0.3、0.4、0.5 MPa 压差下的试验时间间隔很短,3 个不同压差下的试验可看作连续的,0.3 MPa 压差下试验在第 2 循环到第 3 循环阶段磨损已趋于稳定,因此 0.4 MPa 和 0.5 MPa 压差下的试验的泄漏系数趋于稳定稳定,变化较小,如图 4 所示. 但是由于 0.5 MPa 和 0.6 MPa 压差下的试验间隔时间长,封严已恢复到自由状态,迟滞性的影响消失,则其泄漏系数较低.

3.3.3 不同配合状态下磨损对泄漏特性的影响

由于在试验初始状态下,磨损较为明显,对封严泄漏影响较大,因此对初始状态不同间隙下的磨损对泄漏影响进行分析. 图 5 是不同配合间隙封严试验初始阶段压差下的泄漏系数变化.

1) 间隙配合状态下,封严的磨损原因相同,

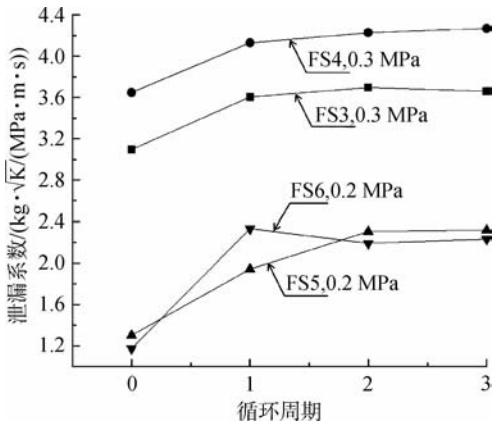


图 5 FS3,FS4,FS5,FS6 泄漏系数随循环周期变化

Fig. 5 Leakage coefficient of FS3,FS4,FS5,FS6 along with cycle time

都是由于封严件加工精度和安装误差引起的,该磨损是局部的,磨损量也比较少,则其引起的泄漏系数变化比较小.

2) 小间隙配合状态下其磨损较大,引起的泄漏系数变化较大,如图 5 所示在第 0 循环到第 1 循环过程中,FS3 间隙下的泄漏系数变化稍大.

3) 过盈配合状态下,在初始阶段过盈量大的其磨损量较大,其泄漏系数变化较大. 在磨损一段时间后,其磨损量趋于平衡,泄漏系数变化平稳. 过盈量大,封严片变形较大,封严与转子之间的接触压力较大,其磨损量也就越大,这一现象验证了 Archard 磨损计算模型中磨损量与接触面正压力成比例.

4) 初始阶段大过盈量配合的封严其泄漏系数小,但大过盈量磨损率较大,磨损速度快,其泄漏量变化较快,如图 5 中所示的 FS5 和 FS6 两配合状态下的试验在第 0 循环到第 1 循环过程中出现交叉. 随着磨损的进行,其磨损趋于平衡,过盈量逐渐趋于相等,其泄漏系数逐渐接近,如图 8 中所示的 FS5 和 FS6 两配合状态下的试验在第 2 循环和第 3 循环中变化.

5) 过盈配合状态下封严磨损对泄漏的影响比间隙配合状态下大,这是由于过盈配合状态下磨损较间隙配合严重,磨损率大.

4 结 论

本文对间隙、过渡、过盈 3 种配合的指尖封严的磨损特性及其对泄漏的影响进行了试验研究,分析了封严件与转子的磨损现象、磨损长度以及封严泄漏系数的分布. 研究结论如下：

1) 封严的磨损主要受封严件与转子之间相

对滑动距离影响,滑动距离大磨损严重.

2) 间隙配合状态下,封严出现局部磨损;磨损及其对泄漏的影响主要发生在初始阶段;封严间隙越小,磨损对其泄漏影响越大.

3) 过盈配合状态下,封严件整体均出现磨损;磨损及其对泄漏的影响发生在整个阶段,在初始阶段最严重,之后逐渐减小;封严过盈量越大,磨损对泄漏的影响越大.

参考文献:

[1] Heydrich H. Bi-directional finger; US, 5031922 [P]. 1991-07-16.

[2] Mackay C G. Laminated finger seal; US, 5042823 [P]. 1991-08-27.

[3] Johnson M C. Laminated finger seal with logarithmic curvature; US, 5108116 [P]. 1992-04-28.

[4] Arora G K. Non-contacting finger seal with hydrodynamic foot portion; US, 5755445 [P]. 1998-05-26.

[5] Arora G K. Dual pressure balanced non-contacting finger seal; US, 6364316 [P]. 2002-04-02.

[6] 克拉盖尔斯基. 摩擦磨损计算原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

[7] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[8] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8):981-988.

[9] Archard J F. Wear theory and mechanism[R]. New York: ASME Unite Engineering Center, 1980.

[10] 苏华. 指尖密封结构和性能的设计分析与试验研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.

SU Hua. Structural design and performance analysis and tests of finger seal[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)

[11] 张延超,陈国定,杨美玲. 指尖封严结构参数与泄漏量和磨损性能的灰关系分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(18): 2147-2151.

ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, YANG Meiling. Grey associative analysis of design parameters to leakage and wear performance for finger seal[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(18):2147-2151. (in Chinese)

[12] 王红艳,陈国定,张延超. 指尖密封性能与结构参数的灵敏度分析[J]. 润滑与密封, 2008, 33(10):11-16.

WANG Hongyan, CHEN Guoding, ZHANG Yanchao. Sensitivity analysis of finger seal performances and construction parameters[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(10):11-16. (in Chinese)

[13] 李二圣,陈国定. 一种低迟滞低磨损的指尖密封型线构形的研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4):759-764.

LI Ersheng, CHEN Guoding. Study on a new shape-curve of finger seal with low-hysteresis and low-wear[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4):759-764. (in Chinese)

[14] 宗兆科,苏华. 圆弧型指尖密封的几何构型特征及结构优化[J]. 航空学报, 2010, 31(2):393-399.

ZONG Zhaoke, SU Hua. Geometric feature and structure optimization of arc finger seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2):393-399. (in Chinese)

[15] Proctor M P, Kumar A, Delgado I R. High-speed, high-temperature finger seal result [R]. NASA/TM-2002-211589, 2002.

[16] Proctor M P, Delgado I R. Leakage and power loss test results for competing turbine seals [R]. NASA-2004-213049, 2004.

[17] 王旭. 流体静压型指尖密封的理论与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.

WANG Xu. A theoretical and experimental study for hydrostatic finger seal[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)

[18] 杜春华,吉洪湖,胡娅萍,等. 指尖封严的转子轴心轨迹与泄漏特性实验研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2575-2584.

DU Chunhua, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experimental investigation on the axis locus of rotor and leakage characteristics of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11):2575-2584. (in Chinese)

(编辑:叶 青)