

文章编号: 1000 8055(2009)03-0532-05

指式密封泄漏特性的实验研究

白花蕾, 吉洪湖, 纪国剑, 曹广州
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 设计了三组不同间隙的实验件, 研究了基本结构指式密封从初始使用到稳定后的泄漏特性. 结果表明: 指式密封在初始使用时泄漏量较大, 而且迟滞较为明显; 随着使用时间的增长, 密封性能趋于稳定, 稳定后“指”之间的间隙对泄漏系数影响比较大; 随着压差的增大, 泄漏系数先是增加, 后趋于定值; 在实验转速范围内($< 3000 \text{ r/min}$), 转子转速对指式密封泄漏系数影响不大; 密封泄漏系数随密封层数的增加而减少.

关 键 词: 指式密封; 泄漏系数; 迟滞现象

中图分类号: TB42

文献标识码: A

Experimental investigation on leakage characteristics of finger seal

BAI Hua lei, JI Hong hu, JI Guo jian, CAO Guang zhou

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Experimental investigation on leakage characteristics of baseline finger seal had been made. The results show that the flow factor of finger seal at initial static state is high and hysteresis is obvious. With the increase of usage time the flow factor decreases gradually and finally approaches to a steady state. Under this condition, the influence of clearance between fingers of finger seal on flow factor is great; with the increase of pressure drop the flow factor increases at first and gradually reaches to a constant level; the rotor speed has little affect on flow factor; and with the increase of the number of wafer the flow factor decrease.

Key words: finger seal; flow factor; hysteresis

指式密封是继篦齿密封和刷式密封之后发展起来的一种新型密封技术, 被称之为一种革命性的密封技术^[1-4]. 美国 AlliedSignal 发动机公司最先提出了指式密封的思想^[5], 接着美国 Honeywell 发动机公司和 NASA Glenn 研究中心做了大量的实验, 目前已准备将指式密封技术应用于下一代航空发动机中. 国外试验结果表明, 与篦齿密封相比, 指式密封显著地降低了泄漏量, 用指式密封代替篦齿密封, 可以减少 1%~2% 的漏气流量, 从而可以减少 0.7%~1.4% 燃油耗损和 0.35%~0.7% 的运行费用. 与刷式密封相比, 密

封性能相当, 但指式密封的制造成本大约为刷式密封的 50%.

国内对指式密封的研究先是从结构和强度方面开始的^[6-9]. 在泄漏特性的研究方面, 叶小强, 何立东等人^[10]实验研究了密封片层数对指式密封泄漏特性的影响, 实验结果表明指式密封泄漏量随密封片层数的增加而减少. 王旭等人^[11]对带有浮升力垫片的指式密封进行了实验研究, 主要考虑了进气压力、密封间隙和密封片层数对密封特性的影响. 带有浮升力垫片的指式密封主要是依靠转子的高速旋转产生动压, 使垫片浮升, 从而降

收稿日期: 2008 01 21; 修订日期: 2008 04 29

基金项目: 航空支撑科技基金(05B52005)

作者简介: 白花蕾(1983-), 女, 陕西渭南人, 硕士生, 主要从事密封技术研究. E-mail: baihualei@163.com

低指式密封与转子的磨损,但是在转子转速较低时,垫片可能无法浮升,另外,浮升力垫片与转子之间的间隙过大时,会导致泄漏增大. 本文主要实验研究了基本结构指式密封的泄漏特性, 设计了三组不同实验件, 研究了“指”之间的间隙以及转子转速、密封片层数对泄漏特性的影响.

1 实验装置和实验件

1.1 实验系统

图 1 是指式密封旋转实验台示意图. 指式密封实验装置主要由密封装置、电动机、气源和测量系统组成. 实验台由一台最大转速为 3 000 r/min 的电动机通过联轴器驱动, 电机转速可通过变频器调节和监测. 气源是一台最大流量为 5 m³/min 的压气机. 进入实验台主体的气流压力可由进口阀门和压力表来控制 and 监测, 进出口及指式密封前后腔和上下游压力均由精密压力表测量, 由于试验台的气流出口不在中心轴线位置, 所以在相对于出口位置的 90° 和 180° 方向均布置有测压点. 进出口气流温度由铜-康铜热电偶测量. 实验件的泄漏量由玻璃转子流量计测量, 其量程为 16 ~ 160 m³/h. 实验中转子的直径为 160 mm, 材料为 2Cr13, 表面经过硬化处理. 图 1 中 p_u 为上游压力, p_d 为下游压力, 压差 $\Delta p = p_u - p_d$.

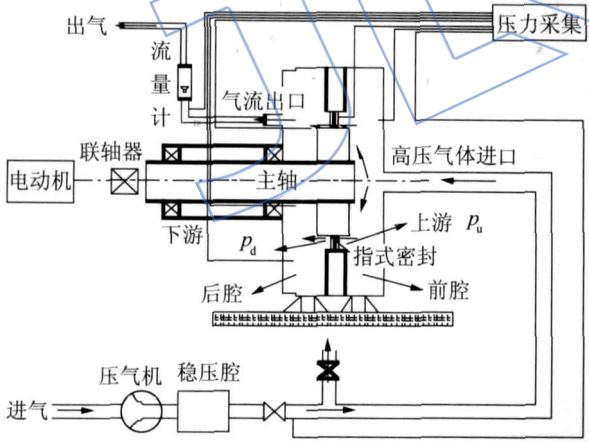


图 1 指式密封装置系统图
Fig. 1 System of finger seal test rig

1.2 实验件

完整的指式密封结构是由前后挡板, 隔片, 密封片通过铆钉联结, 如图 2 所示. 这样形成的指式密封件具有一定的柔韧性, 允许在轴向和径向的一定范围内变形, 以适应转子的径向跳动、离心变形和热膨胀变形.

为了研究不同“指”之间的间隙对泄漏特性的

影响, 本文设计了三组不同类型的实验件, 图 3 为指式密封指片示意图, 其中指梁型线为圆弧线, 密封片材料为 65Mn, 采用线切割技术加工成型, 每个密封片上“指”的个数为 72, 厚度为 0.3 mm, 指式密封与转子之间为过盈配合, 为保证动态实验中不形成泄漏通道, 根据转子的跳动量选定过盈量为 0.1 mm. 三组实验件“指”之间的间隙尺寸参数见表 1.

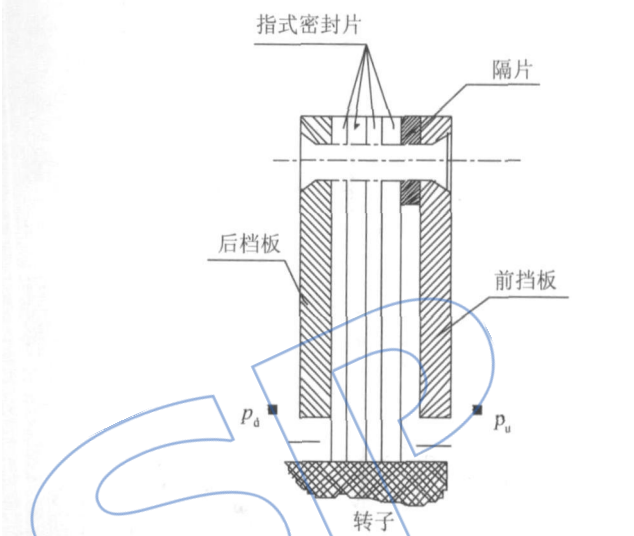


图 2 指式密封结构图
Fig. 2 Structure of finger seal

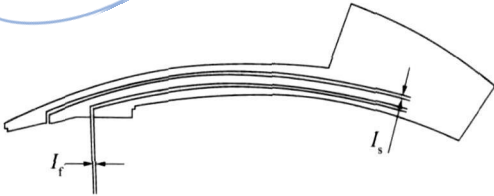


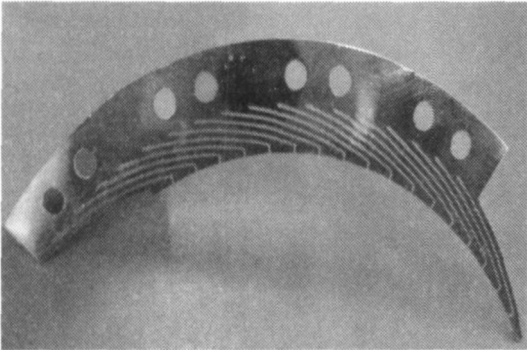
图 3 指式密封指片示意图
Fig. 3 Sketch of finger seal

表 1 指式密封间隙尺寸
Table 1 Clearance of finger seal

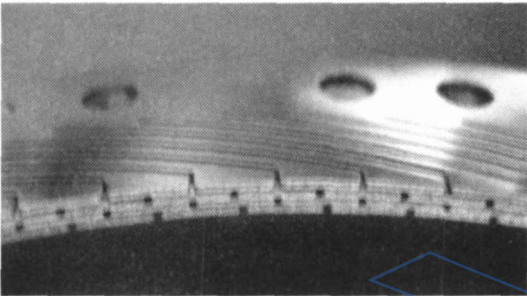
指式密封类型	间隙 I_s / mm	角度 I_t (°)
F1	0.3	0.2
F2	0.3	0.3
F3	0.4	0.3

指式密封环片是由 4 个相同结构的 1/4 密封环片组合而成, 密封片上设计有装配孔, 以便多个密封环片之间周向定位和使不同层的密封片交错排列, 见图 4(a). 实验中所用的指式密封装置由 4 个密封环片叠加而成. 图 4(b) 为 4 层指式密封片交错排列的实物图.

实验台和实验件装配时,首先保证转子与密封座内圆同轴、指式密封装置内圆和外圆同轴,密封装置外圆靠密封座内圆定心,这样就保证了转子和密封装置的同轴。



(a) 指式密封 1/4 环片



(b) 交错排列的指式密封片

图 4 实验用指式密封实验件

Fig. 4 Wafer and the test finger seal

2 实验结果与分析

在密封结构的研究中,通常用泄漏系数反映它的密封性能。泄漏系数 ϕ 定义为

$$\phi = \frac{\dot{m} \sqrt{T_{avg}}}{p u D_{seal}} \quad (1)$$

其中 $\dot{m}$ 为泄漏空气的质量流量(kg/s), T_{avg} 为密封气体的平均进口温度(K), D_{seal} 为转子的外径(m)。泄漏系数可以用来比较不同转子直径和不同运行状态下密封的泄漏水平,误差不超过 1.5%^[1]。

2.1 初始静态测试和持久性测试

图 5 为指式密封 F3 在初次使用时泄漏系数随上下游压差的变化曲线,图中显示了前两个循环的泄漏特性,即增压-减压-再增压-再减压的过程,箭头表示每次循环中压差增大和减小的过程。实验中压力大小是由管路进口压力表控制的,最大进口压力为 0.4 MPa。由图可以看出,循环 2 的泄漏水平要比循环 1 低一些,这是因为在

初次使用时,由于加工和安装等方面的误差,指式密封片之间不能很好的贴合,随着使用时间的延长,密封片之间的间隙会越来越小,泄漏量会不断减小直至达到一个稳定的状态。由图还可以看出在同一次循环中,压差增加和减小过程的两条曲线并不是重合的,压差减小时的泄漏系数要比压差增加时小一些,这一方面是由于使用时间使密封片之间的间隙变小;另一方面是由于当压差逐渐增大时,指式密封片被压紧,密封片之间的间隙变小,而在压力减小的过程中,由于密封片间以及密封片与后挡板之间的摩擦作用,使密封片不能恢复到增压过程中同压差下的位置,即与增压过程相比,密封片之间的间隙要小一些,从而导致了在静态过程中,压差减小时的泄漏水平比压差增大时略小一些。指式密封的这个特点与刷式密封是一致的。这种由于压差导致往复实验中两条曲线不重合的现象称为迟滞现象,这种迟滞现象与以往文献中由于转子的跳动和离心力引起的迟滞是不同的。

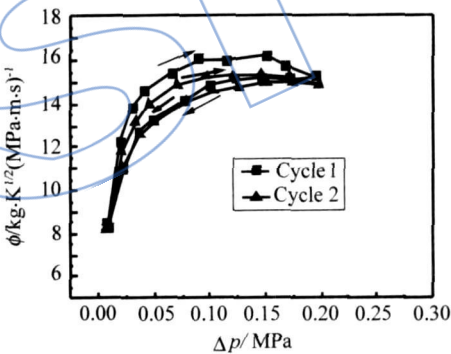


图 5 F3 初次使用时的泄漏特性

Fig. 5 Leakage characteristics during the initial static test of F3

为了研究性能稳定后各种参数对泄漏特性的影响,要对各组实验件进行持久性测试,使其性能稳定。持久测试中管路进口压力保持为 0.3 MPa,转子转速为 1800 r/min。在持久性测试中泄漏系数刚开始有微弱变化,到后来几乎不变,此时可认为指式密封的性能基本稳定。图 6 为 F3 性能稳定后泄漏系数随上下游压差的变化,由图中可以看出此时泄漏系数随上下游压差变化趋势与初始使用时相同,但泄漏系数值明显降低,此时 F3 的泄漏系数约为初始使用时的 89%。由图中还可以看出,性能稳定的指式密封在静态和旋转状态下的泄漏系数相差不大。随着压差的增加,泄漏系数先是增加,后趋于定值,此时流动阻塞。这种指式

密封在静态下随压差变化的规律与文献[1] 中是一致的。

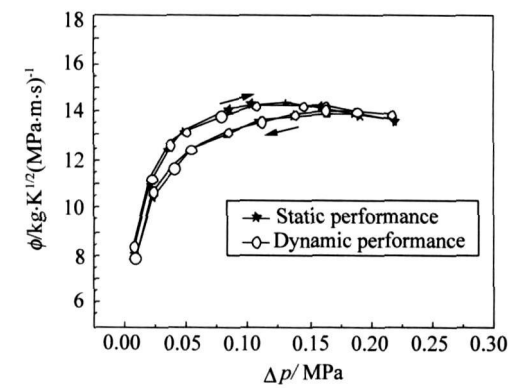


图 6 F3 稳定后的泄漏特性

Fig. 6 Leakage characteristics after endurance test of F3

2. 2 稳定后性能测试

在持久测试后, 指式密封泄漏特性已基本稳定, 在此基础上实验研究了“指”之间的间隙、旋转速度、以及密封层数对泄漏特性的影响. 在考虑各个参数对泄漏的影响时只列举了压差增大时的情况.

2. 2. 1 “指”之间间隙的影响

图 7 为 F1, F2 和 F3 三种指式密封稳定后“指”之间的间隙对泄漏系数的影响. 由图可以看出“指”之间的间隙 I_s 对密封的泄漏影响较大, 在泄漏系数趋于定值时, F3($I_s = 0.4\text{ mm}$) 的泄漏系数比 F2($I_s = 0.3\text{ mm}$) 约大 17.4%. 另外指端间隙的张角 I_f 也对密封的泄漏影响较大, 由图 7 可见 F2($I_f = 0.3^\circ$) 的泄漏系数比 F1($I_f = 0.2^\circ$) 约大 15%. 因此, 在设计时“指”之间的间隙不应太大.

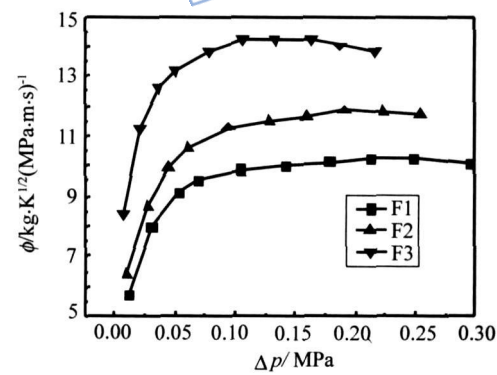


图 7 “指”之间的间隙对泄漏系数的影响

Fig. 7 Influence of clearance between fingers

2. 2. 2 转子转速的影响

图 8 为转子转速对指式密封泄漏特性的影响. 由图可以看出, 在实验的范围内转子转速对泄

漏系数影响不大. 上下游压差 Δp 等于 0.048 MPa 时, 泄漏系数较低, 在 Δp 等于 0.103 和 0.156 MPa 时, 泄漏系数较高, 而且后两种压差的泄漏系数在数量上也相差不大, 这与前面的结论“泄漏系数随上下游压差先是增大后趋于定值”是一致的。

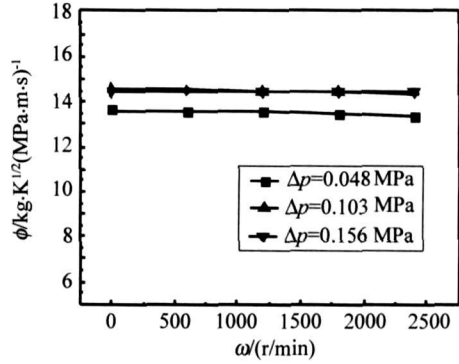


图 8 F3 旋转速度对泄漏特性的影响

Fig. 8 Influence of rotation speed on F3

2. 2. 3 密封片层数的影响

图 9 为密封片层数对指式密封泄漏特性的影响. 由图可以看出, 密封泄漏量随密封片层数的增加而减少. 当密封片层数增加时, 密封结构的轴向尺度变大, 气体通过密封间隙的沿程阻力相对增大, 从而泄漏量降低.

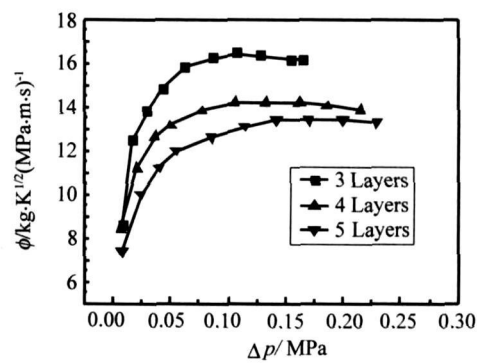


图 9 F3 密封片层数对泄漏特性的影响

Fig. 9 Influence of the number of wafer on leakage of F3

3 结 论

- 1) 指式密封在初始使用时由于密封片之间的间隙较大, 所以泄漏系数较大, 迟滞性也较为明显.
- 2) “指”之间的间隙对泄漏特性影响比较大. 泄漏系数随上下游压差变化先是增加, 后趋于定值, 此时流动阻塞.
- 3) 在实验转速范围内, 转子旋转转速对指式

密封泄漏系数影响不大.

4) 密封泄漏量随密封片层数的增加而减少.

参考文献:

- [1] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low Hysteresis, finger seal test results [R]. Los Angeles, USA: 35th AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999.
- [2] Steinetz B M, Hendricks R C. Advanced seal technology in meeting next generation turbine engine goal [R]. NASA/ TM-1998-06961, 1998.
- [3] Braun M J, Steinetz B M. Two and three dimensional numerical experiments representing two limiting cases of an air-line pair of finger seal components [C] // The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, Hawaii: [s. n.] February 10-14, 2002.
- [4] Steinetz B M, Hendricks R C. Engine seal technology requirements to meet NASA's advanced subsonic technology program goals [R]. AIAA 94-2698.
- [5] Johnson M C. Laminated finger seal with logarithmic curvature: us, 5, 108, 116 [P]. 1992.
- [6] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封型线力学性能的有限元分析 [J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2): 218-221. CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. On selecting proper shape of finger seal [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(2): 218-221. (in Chinese)
- [7] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封的迟滞特性分析 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 121-124. CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. Analysis to the hysteresis of finger seal [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 121-124. (in Chinese)
- [8] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 对数螺线指尖密封的装配变形分析 [J]. 机械科学与技术, 2006, 21(6): 866-867. CHEN Guoding, XU Hua, YU Lie, et al. Assembly deformation analysis of logarithmic screw curve finger seal [J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 21(6): 866-867. (in Chinese)
- [9] 苏华, 陈国定. 指尖密封型线形成的研究 [J]. 机械科学与技术, 2003, 22(6): 876-878. SU Hua, CHEN Guoding. Study of the shape curve of finger seal [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(6): 876-878. (in Chinese)
- [10] 叶小强. 叶轮机械先进密封的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006. YE Xiaoqiang. Research of the advanced seal of turbomachinery [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 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)