

文章编号: 1000-8055(2008)03-0421-04

# 台阶篦齿与衬套轴向位置和转速对 封严特性影响的实验

纪国剑, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 设计了上台阶和下台阶篦齿两组实验模型, 研究了旋转和静止两种状态下篦齿进出口压比、篦齿与衬套轴向相对位置以及转速对封严特性的影响。结果表明: 齿型结构尺寸相同时, 上台阶篦齿和下台阶篦齿的封严特性相似, 增加篦齿前后腔压比, 台阶篦齿的泄漏系数增加; 进口总压和总温一定时, 齿间压力沿流动方向线性下降; 台阶篦齿与台阶衬套的轴向相对位置的改变对台阶篦齿的泄漏量影响不大; 低转速时旋转速度对台阶篦齿泄漏影响也不大。

**关 键 词:** 航空、航天推进系统; 台阶篦齿; 旋转速度; 泄漏系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## Experimental investigation of effect of step axial location and rotating speed on leakage of stepped labyrinth

Ji Guo-jian, Ji Hong-hu

(College of Energy and Power Engineering,

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

**Abstract:** Experimental investigation of up-stepped and down-stepped labyrinth seals was made to study the effects of the pressure ratio of inlet and outlet and relative axial location of step and labyrinth on leakage characteristics at rotational and static states. The results show that the sealing characteristics of both up-stepped and down-stepped labyrinth seals are similar. The leakage coefficient increases with the increase of the pressure ratio. At given inlet total pressure and total temperature, the pressure distribution along the sealing passage decreases almost linearly. The leakage is almost unchanged with variation of the step axial location or the low rotating speed in the experimental range.

**Key words:** aerospace propulsion system; stepped labyrinth seal; rotating speed; leakage coefficient

篦齿封严是一种利用齿尖节流和齿腔涡流作用来增加流阻以控制流量的非接触式封严结构。传统的直通篦齿由于透气效应较高, 泄漏量较大, 台阶形篦齿以其特有的台阶结构, 避免了透气效应<sup>[1]</sup>, 封严特性得以改善, 在航空发动机中运用较为广泛<sup>[2]</sup>。有关台阶篦齿的研究, 国内外学者做了

很多工作, 吴丁毅<sup>[3]</sup>实验研究了静止状态下不同齿型和密封间隙台阶篦齿的泄漏特性, 由于实验件为二维放大模型结构, 部分结论还需要进一步的验证。Stocker<sup>[4]</sup>研究了转速对台阶斜齿密封性能的影响。

在实际使用中, 台阶篦齿和台阶衬套的轴向

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-06-29

作者简介: 纪国剑(1980), 男, 江苏镇江人, 博士生, 主要从事飞机发动机封严技术的研究。

相对位置会受到设计, 加工, 装配以及热膨胀的影响, 从而影响篦齿封严的泄漏特性. 目前, 国外学者已经开展了一些有关轴向位置的变化对篦齿封严特性影响的研究, 如 Wang Yi<sup>[5]</sup> 通过数值计算研究了轴向位置对齿间涡流作用的影响, Morrison<sup>[6]</sup> 实验研究了不同轴向相对位置及转速下齿间压力的变化.

本文设计了上台阶和下台阶篦齿实验件, 首先研究了篦齿前后腔压比对台阶篦齿封严特性的影响, 分析了齿间压力变化规律, 在此基础上, 对不同旋转速度和轴向相对位置的台阶篦齿的封严特性进行了研究.

1 实验装置及数据处理

1.1 实验系统

图 1 是篦齿封严旋转实验台示意图, 该实验台为单轴、桶式对称结构, 可同时进行两组实验件的实验, 其中左侧为上台阶篦齿结构, 右侧为下台阶篦齿结构. 实验系统还包括压缩机以及测量系统. 实验中测量的数据主要包括进口总温总压、静压、出口总温静压、齿间压力、间隙流量等. 实验时转速的调整是通过调节驱动电机的电流频率实现的, 运用数字转速仪测量转速, 旋转速度  $\omega$  分别为 0, 609, 1 211, 2 118 r/min 和 2 723 r/min.

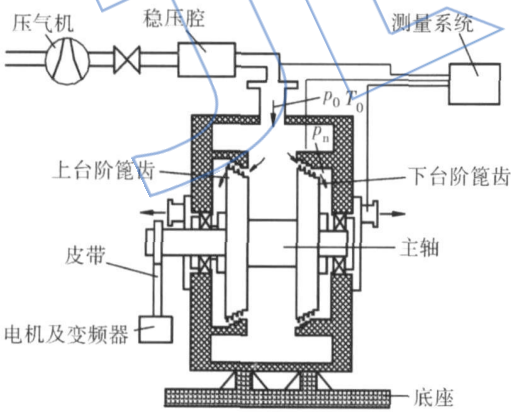


图 1 实验系统图  
Fig. 1 Figure of test system

1.2 实验件

实验篦齿盘有上台阶篦齿和下台阶篦齿两组. 图 2 为下台阶篦齿盘结构示意图, 篦齿盘由 5 个斜齿组成, 齿的结构由前倾角  $\alpha$  和后倾角  $\beta$ , 齿厚  $t$ , 齿高  $H$ , 齿间距  $B$ , 台阶衬套高度  $e$  等参数确定, 篦齿转盘直径取各齿直径的算术平均值, 即  $D$  为 370. 69 mm. 篦齿与衬套设计密封间隙  $c$  为 0.

2 mm, 实验件加工精度控制在 5% 以内, 忽略篦齿齿盘偏心和主轴跳动的影响, 认为间隙恒定. 图 2 也给出了下台阶篦齿结构的齿间压力测试方法示意, 沿流动方向共布置了 6 个直径为 1 mm 的引压孔, 其中测点 2~ 5 位于两齿中间, 测点 1 和 6 分别位于篦齿前腔和后腔.

上台阶篦齿的齿型结构参数与下台阶篦齿相同, 主要区别在于上台阶篦齿盘沿流动方向齿尖流通面积(篦齿盘直径在增加)逐级增加, 下台阶篦齿则刚好相反, 另外受篦齿前后倾角的影响, 上台阶篦齿盘齿腔形状略有改变, 如图 3 所示.

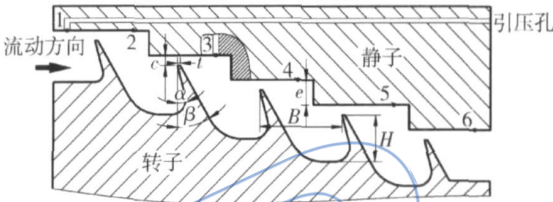


图 2 下台阶篦齿结构及齿间压力测试示意图  
Fig. 2 Structure of down stepped labyrinth seal and the distribute of pressure tap location

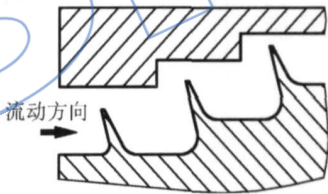


图 3 上台阶篦齿结构局部示意图  
Fig. 3 Structure of up stepped labyrinth seal

1.3 数据处理

实验主要研究了篦齿前后腔总压比  $p_0/p_n$ 、篦齿旋转速度和篦齿与衬套轴向相对位置对封严性能的影响. 数据处理时引入泄漏系数  $\varphi$ <sup>[4]</sup>, 其定义式

$$\varphi = \dot{m} \sqrt{T_0} / (p_0 A) \tag{1}$$

其中  $\dot{m}$  为篦齿缝隙的泄漏量,  $T_0$  和  $p_0$  分别为进口总温和总压,  $A$  为齿尖处气流流通面积,  $A = c\pi D$ . 泄漏系数是评价封严性能的一个参数, 同时引入了泰勒数  $Ta$ , 定义式为

$$Ta = \frac{\rho \Omega r^2 c}{\mu} \tag{2}$$

$\rho$  为实际状态下气流密度,  $\Omega$  为旋转角速度,  $r$  为篦齿盘半径,  $\mu$  为实际状态下气流的动力粘性系数. 泰勒数反映离心力和粘性力的比值, 也直接反映了转速的大小.

2 实验结果及分析

2.1 进出口压比影响

图 4 给出了进口总温为 300 K 时, 上台阶和下台阶迷宫齿泄漏系数随迷宫齿前后腔压比的变化曲线. 由图可以看出, 对上台阶迷宫齿结构而言, 泄漏系数随压比的增加而增加, 压比较低时增加较快, 进一步增加压比, 增加幅度变缓; 下台阶迷宫齿结构的泄漏系数随压比变化规律与上台阶迷宫齿相近, 当压比小于 1.3 时, 下台阶迷宫齿结构的泄漏系数较高, 而当压比大于 1.3 时, 下台阶迷宫齿结构的泄漏系数较低, 封严性效果较好. 这个差异或许与上下台阶迷宫齿结构避免透气效应时的机理有关, 上台阶迷宫齿结构主要通过迷宫齿的阻挡作用消除或减弱透气效应, 下台阶迷宫齿则主要利用台阶衬套的阻挡作用, 改变流体的流动方向<sup>[7]</sup>.

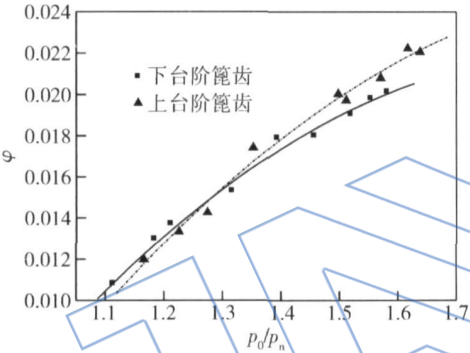


图 4 上下台阶迷宫齿封严特性比较

Fig. 4 Seal characteristic comparison between up stepped and down stepped labyrinth seals

要研究台阶迷宫齿的泄漏特性, 就必须了解迷宫齿内部流场和压力分布. 图 5 给出了下台阶迷宫齿齿腔压力  $p_i$  沿流向的分布, 图中的横坐标 (1~6) 为图 2 所示的压力测点, 纵坐标是以进口总压  $p_0$  为参考的无量纲压力. 由图 5 可见沿流动方向, 齿间压力呈线性逐级下降; 随着迷宫齿进口总压的增加, 齿间压力变化曲线的斜率的绝对值也随之增加. 当迷宫齿进口总压较低时, 沿流动方向压力损失较低, 总压增加到 0.225 MPa 时, 压力损失明显增加, 进一步增加总压到 0.453 MPa 时, 曲线的斜率不再变化, 封严效果基本不变.

2.2 转速影响

实验时固定迷宫齿转盘前腔进口总压, 测量五种转速下的上台阶迷宫齿和下台阶迷宫齿封严结构的泄漏量. 图 6 给出了进口总压分别为 0.148, 0.255, 0.352 和 0.452 MPa 时, 下台阶迷宫齿封严

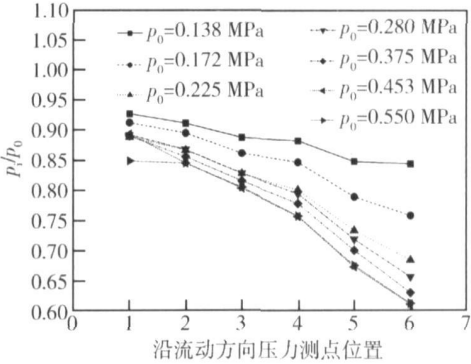


图 5 下台阶迷宫齿齿间压力分布

Fig. 5 The pressure distribute of down stepped labyrinth seal

结构泄漏系数与泰勒数的关系曲线. 在进口总压一定时, 随着泰勒数的增加, 泄漏系数基本保持不变. 这个结论是在齿尖流体最大周向速度为 54.5 m/s (对应的最大  $Ta$  数为 5 625) 的条件下得到的, 该轴向速度相对于流体的轴向速度而言较小, 流体速度方向沿轴向偏转不大, 这与 Stocker 的研究是一致的.

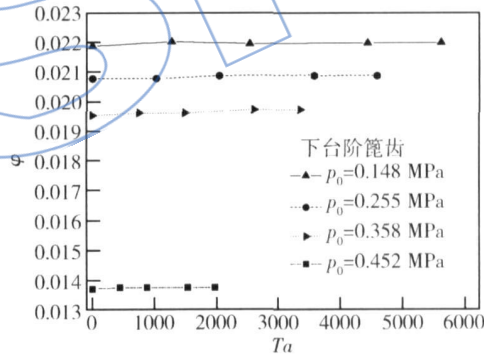


图 6 转速对下台阶迷宫齿封严特性的影响

Fig. 6 Effect of rotating speed on the sealing characteristic of down stepped labyrinth

2.3 台阶迷宫齿与衬套的轴向相对位置的影响

实验时首先研究了迷宫齿位于台阶衬套中心时的封严特性, 然后将迷宫齿转盘相对台阶衬套向右偏移了 1.8 mm, 如图 7 所示, 其中实线为偏移前迷宫齿转盘位置, 虚线为偏移后迷宫齿转盘位置.

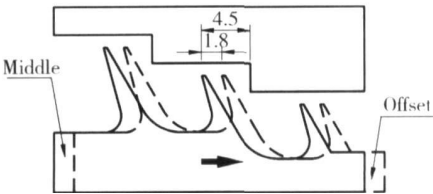


图 7 调整轴向位置示意图 (单位: mm)  
Fig. 7 Alteration of the step axial location of labyrinth seal

图 8 和图 9 分别给出了两种轴向位置下, 下台阶篦齿封严结构进口总压和旋转速度与泄漏量的关系图. 由图 8 可以看出随篦齿进口总压增加, 两种轴向位置下泄漏量大小及变化都基本相同. 由图 9 可以看出, 篦齿进口总压一定时, 改变篦齿盘旋转速度, 两种轴向位置下泄漏量基本相同. 综上可见台阶篦齿与衬套轴向相对位置的变化会改变齿腔形状, 对齿腔内涡流的大小和结构有所影响, 但对其整体的封严性能影响不大.

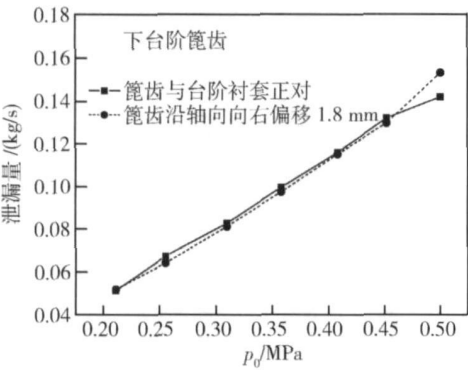


图 8 不同总压下台阶衬套位置对泄漏量的影响  
Fig. 8 Effect of the step axial location on down stepped labyrinth leakage with different total pressure

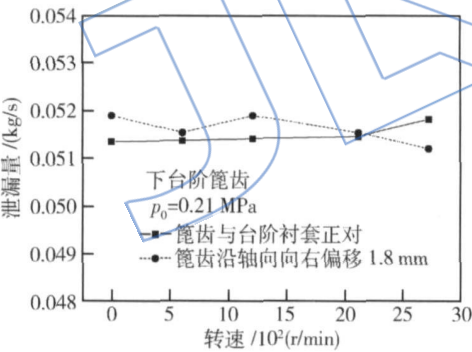


图 9 不同转速下台阶衬套位置对泄漏量的影响  
Fig. 9 Effect of the step axial location on down stepped labyrinth leakage with different rotating speed

3 结 论

对实验数据进行分析总结, 得到以下几点结论:

- 1) 齿型结构尺寸相同时, 上台阶篦齿和下台阶篦齿结构的封严性能相近, 泄漏系数均随着进出口压比的增加而增加. 当压比小于 1.3 时, 上台阶篦齿结构的泄漏系数较低, 封严效果较好. 当压比大于 1.3 时, 下台阶篦齿结构的泄漏系数较低, 封严性效果较好;
- 2) 旋转对台阶篦齿封严性能影响不大. 在实验范围内( 齿尖最大速度小于 54.5 m/s ), 泄漏系数基本不变;
- 3) 台阶篦齿与台阶衬套轴向相对位置的改变对泄漏量影响不大, 基本可以忽略.

参考文献:

[ 1 ] 塔鲁达纳夫斯基. 非接触密封[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 155-160.

[ 2 ] 刘大响. 航空发动机设计手册[ M ]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 300-302.

[ 3 ] 吴丁毅. 台阶式篦齿封严特性的实验研究[ J ]. 流体机械, 1995, 23( 11 ): 7-10.

WU Dingyi. An experimental investigation on seal character of stepped labyrinth[ J ]. Fluid Machinery, 1995, 23 ( 11 ): 7-10.

[ 4 ] Stocker H L, Cox D M. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid smooth, abradable , and honeycomb lands[ R ]. NASA. CR-135307, 1977.

[ 5 ] WANG Yi. Study of airflow features through step seals in the presence of disengagement due to axial movement[ R ]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria: GT2004-53056.

[ 6 ] Morrison G L. Measures effect of step axial location on labyrinth seal leakage[ J ]. Journal of Propulsion and Power, 1992, ( 8 ): 1129-1130.

[ 7 ] 王国峰. 航空发动机篦齿封严旋转实验台的设计与内部流场数值模拟[ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.