

文章编号:1000-8055(2011)09-1970-05

直通型篦齿泄漏的特性试验

张效伟¹, 朱惠人¹, 张霞¹, 张文存²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 陕西省石油化工研究设计院 水处理所, 西安 710054)

摘 要: 对广泛应用于航空发动机的直通型篦齿进行试验, 测量了不同结构组合, 不同工况参数下直通型篦齿的流量和压力, 计算得出相应的换算流量系数, 分析了倾斜角度、间隙以及转速对换算流量系数的影响, 并获得经验关联式。研究表明: 当进、出口气流压比较小时, 篦齿换算流量系数随压比增加较快, 然后增加缓慢, 并渐趋于一定值; 相同压比下, 篦齿向来流方向倾斜角度和间隙宽度减小, 换算流量系数均减小, 倾斜角度存在最佳值, 应在 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$; 转速的影响过程较为复杂, 在本试验范围内换算流量系数随其增加而减小。

关键词: 航空发动机; 直通式篦齿; 封严特性; 旋转效应; 换算流量系数; 倾斜角

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on discharge characteristics of straight-through labyrinth

ZHANG Xiao-wei¹, ZHU Hui-ren¹, ZHANG Xia¹, ZHANG Wen-cun²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Water Treatment,

Shannxi Research Institute of Petroleum and Chemical Industry,
Xi'an 710054, China)

Abstract: Experimental investigation was conducted on the discharge characteristics of the straight-through labyrinth, which was applied widely in aero-engines, under different configurations and operating parameters. Influences on the nominal discharge coefficients of the inclination angle, the clearance of the labyrinth pins and the revolving speed of the shaft were considered. Discharge flow rate and pressures at the entrance and the exit of the labyrinth were measured, and then nominal discharge coefficients and a correction equation were acquired. Moreover, comparisons of experiment data with data calculated from the classical correction equation were done. The results show that nominal discharge coefficients increase with the rising ratio of the inlet total pressure and the outlet pressure, and then tend to a certain constant for each configuration at each operating point. However, they decrease with the decreasing inclination angel and clearance of the through labyrinth in this study. Also the optimum value of inclination angel is in a range of $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$. For the shaft revolving speed of the labyrinth disc, it works complicatedly, and nominal discharge coefficients decrease with its increase clearly.

收稿日期:2010-10-19; 修订日期:2011-01-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2007CB707701)

作者简介:张效伟(1976—),男,陕西宜君人,博士生,主要从事航空发动机小尺度复杂结构的流动与换热特性研究。

E-mail:zhangxw1013@mail.nwpu.edu.cn

Key words: aero-engine; straight-through labyrinth; seal characteristics; rotation effect; nominal discharge coefficient; inclination angle

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^[1]. 未来航空发动机性能的提高一半将取决于封严技术的改善^[2], 封严技术长期受到国内外学者的关注.

由于直通型篦齿封严结构简单, 易于加工, 所以在实际工程中得到了广泛应用. 近年来, 国内外学者对一些典型篦齿结构密封机理及影响规律做了大量研究. 文献[3]中综述篦齿研究进展时提到 Egli, Martin 和 Vermes 对篦齿进行理论分析并给出各自的计算泄漏量公式; Rhode 等^[4-5], Morrison 等^[6]和 Michaud 等^[7]通过数值计算与试验结合的方法, 详细地研究了篦齿腔内的流动特性. 国内吴丁毅^[8-9]通过大量的试验, 系统地研究了静止状态下直通型篦齿结构的泄漏特性, 讨论分析了各因素的影响, 给出基于 Martin 公式的泄漏量计算关系式, 并显示齿腔内流场; 杨军^[10]和张霞等^[11]通过试验的方法对直通型篦齿封严特性进行了研究, 并考虑了转动的影响, 尤其王鹏飞等^[12]试验研究了高转速对直通型篦齿封严特性

影响.

本文采用试验的方法, 研究了直通型篦齿在不同几何结构组合和工况参数下的流量特性, 分析了流动参数、篦齿倾斜角度、间隙和转速对其流量特性的影响, 给出了修正式, 并与文献中的经典结果相比较.

1 试验装置

图1为试验系统示意图, 由气源(包括罗茨空气压缩机1和气罐2); 供气开关3; 过滤器4; 压力调节阀5; 流量计组(包括表前球阀6, 7, 8, 转子流量计9, 10, 11和调节阀12, 13, 14); 进气腔15; 试验件(包括篦齿转盘16和静环17); 机械传动机构18(皮带传动, 电机和变频器19); 流量、压力、温度、转速测量仪器和数据采集系统等组成. 设备最大工作转速为5 000 r/min. 试验时测量篦齿试验段上游总压和总温, 试验段下游静压和总温及通过篦齿的气体泄漏量和篦齿盘转速. 旋转试验中的动态齿尖封严间隙由有限元软件 ANSYS 计算得到, 篦齿上下游压比通过调压系统来控制.

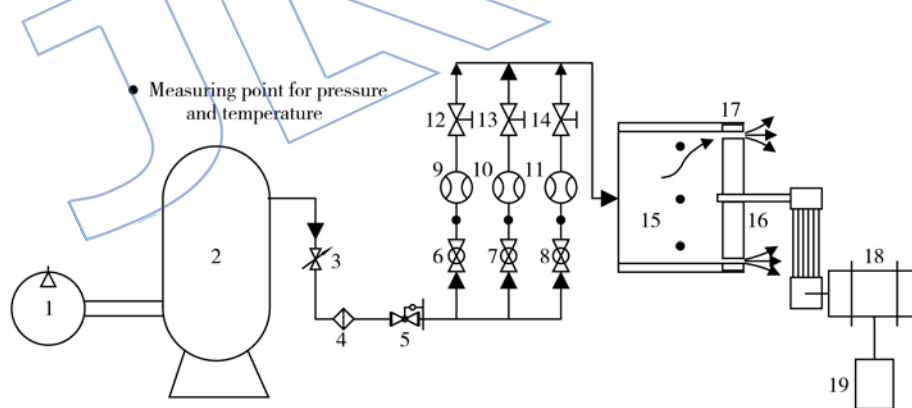


图1 试验系统示意图

Fig. 1 Sketch of test rig

按照某型发动机中的篦齿结构, 设计加工了篦齿试验件, 其结构如图2所示, 其中齿高 h , 齿间宽度 b 和齿尖宽度 t 分别为 3, 4 mm 和 0.4 mm, α 为篦齿倾斜角度, L 为封严长度, s 为间隙宽度, z 为齿数, 试验中参数变化如表1. 试验时分别通过更换篦齿盘和外封严环来改变篦齿倾斜角度和封严间隙.

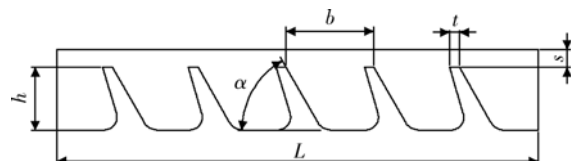


图2 篦齿几何参数定义

Fig. 2 Geometry parameters of labyrinth

表1 试验参数
Table 1 Test parameters

$\alpha/(^{\circ})$	z	L/mm	s/mm	$N/(\text{r}/\text{min})$
90	2,3	14	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	0~5000
	4,5	22		
45	2,3	14	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	0~5000
	4,5	22		
60	2,3	14	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	0~5000
	4,5	22		

2 结果与分析

2.1 评价参数

通常运用换算流量系数 φ 作为评价密封效果优劣的主要参数,它主要反映了篦齿前、后腔的压力之比(压比)对篦齿泄漏特性的影响,表达式如下^[3,8]:

$$\varphi = \frac{m\sqrt{T_i^*}}{Ap_i^*} \quad (1)$$

式中 m 为篦齿缝隙的泄漏量; T_i^* 为篦齿缝隙进口总温; p_i^* 为篦齿缝隙进口总压; A 为齿尖处气流流通面积, $A = \pi s d_m$, d_m 为篦齿平均直径, s 为篦齿的齿间间隙. 试验中试验件几何尺寸用精度为 0.01 mm 的内、外径千分尺测量,压力和温度的测量精度均为 1%,流量计精度为 2.5%,由随机误差传递公式计算可得换算流量系数的不确定为 3.69%.

2.2 结果与分析

图3~图5为部分典型工况下的试验结果. 其中图3为齿尖斜度 α 分别为 90° , 60° 和 45° 在零转速情况下所对应的泄漏量和换算流量系数随压比的变化曲线;图4为 $\alpha = 60^{\circ}$ 在篦齿齿数 $z = 5$, 不同间隙宽度,静止状态下所对应的换算流量系数随压比的变化曲线;图5为 $\alpha = 60^{\circ}$ 在齿数 $z = 5$, 间隙宽度 $s = 0.3 \text{ mm}$, 不同转速情况下所对应的换算流量系数随压比的变化曲线. 由图3~图5可以看出,随着压比的增加,泄漏量呈线性增加;换算流量系数增加,在低压比阶段,增加速度较快,然后增加速度变缓,压比进一步增加,换算流量系数趋于某一定值.

几何参数对篦齿流量特性具有重要影响. 图3示出了篦齿向上游的倾斜角度减小,泄漏量和换算流量系数均减小. 这是因为当篦齿倾斜一定

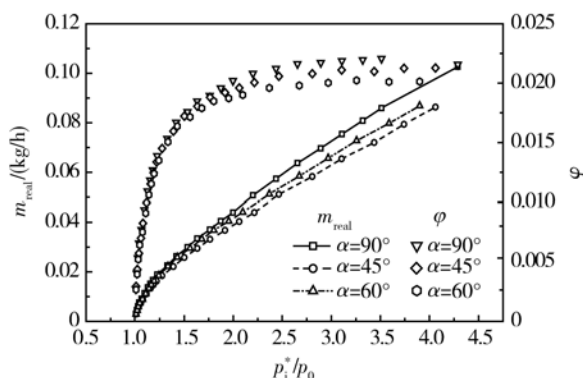


图3 齿尖斜度对泄漏量及换算流量系数的影响

($z = 5, s = 0.3 \text{ mm}, N = 0 \text{ r}/\text{min}$)

Fig. 3 Effect of inclination angel on discharge flow rate and conversion discharge coefficients

($z = 5, s = 0.3 \text{ mm}, N = 0 \text{ r}/\text{min}$)

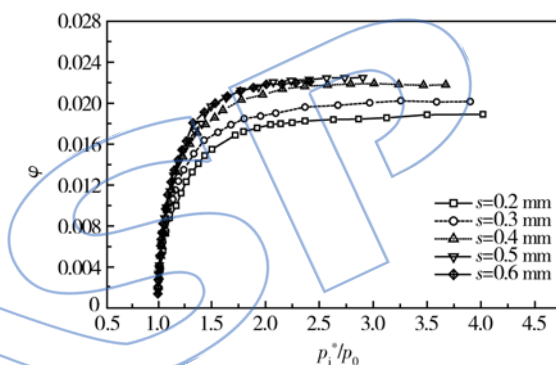


图4 间隙宽度对换算流量系数的影响

($\alpha = 60^{\circ}, z = 5, s = 0.3 \text{ mm}, N = 0 \text{ r}/\text{min}$)

Fig. 4 Effect of gap on conversion discharge coefficients

($\alpha = 60^{\circ}, z = 5, s = 0.3 \text{ mm}, N = 0 \text{ r}/\text{min}$)

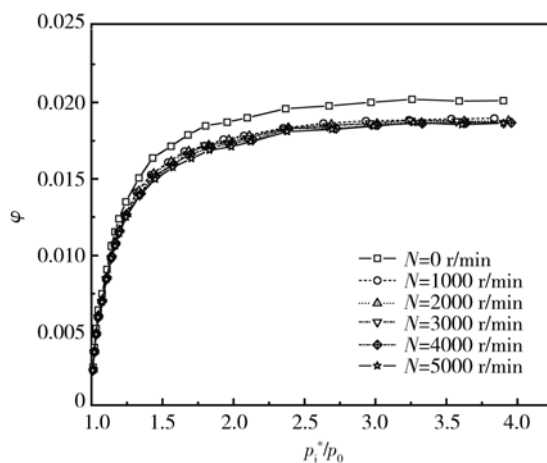


图5 转速对换算流量系数的影响

($\alpha = 60^{\circ}, z = 5, s = 0.3 \text{ mm}$)

Fig. 5 Effect of shaft speed on conversion discharge coefficients

($\alpha = 60^{\circ}, z = 5, s = 0.3 \text{ mm}$)

角度时,促使下弯射流直接冲击下游齿面形成的分支气流顺势沿着倾斜齿形流向空腔内,使得大涡区的湍流得到充分发展,湍流度变大,流体内摩擦增大,使射流与涡流之间的质量、动量交换增加,使得更多的气体卷入漩涡中造成动能损失增加,减小透气效应,泄漏量减小.大涡区的能量耗散在总能量损失中占主要作用,对气流的能量耗散远远超过小涡区对能量耗散的贡献,这些作用会明显地提高斜齿的密封性能;但倾角进一步减小时,齿腔过于狭窄,不利于大涡区漩涡的发展,使得大涡区的能量耗散增加不明显,综合密封效果提高不明显^[13-14].这说明篦齿向上游倾斜可以提高其封严性能,但是倾斜角度的存在最佳值,由图3可知,倾斜角度的最佳值约在45°~60°.

由图4可看出,在相同压比下,随着篦齿间隙宽度的增大,换算流量系数明显增大,但增加的速度越来越小.密封间隙增大时,气体流速降低,齿腔底部速度分布逐渐稳定,齿腔中流动稳定性逐渐增强,对上部层流区的影响减弱,一方面上部层流区厚度增大,另一方面上部层流区的气流速度明显较大,且越靠近壁面速度越大,使得流体在篦齿空腔内的上部的射流区的流量所占比例较大,篦齿的节流效应减弱,射流与齿腔中的涡流质量交换减少,旋涡转速变慢,封严性能减弱^[10,15].

图5示出了运转条件对篦齿换算流量系数的影响.由图可以看出:与静态下相比,转动条件下的换算流量系数明显较小,造成这种现象的原因一方面在于设备安装存在偏差和转轴的径向跳动,难以准确获得间隙宽度的真实值;另一方面转动对测量系统有所影响,比较不同转速下对应换算流量系数,非常接近,但能清楚地看出转速增加,换算流量系数减小,这说明在所试验的范围内,已显现出转速的影响.转动条件下,篦齿齿腔内气体流动由于在轴向速度、周向速度和离心力的共同作用而发生变化,流动损失增加;更为重要的是转速增大时篦齿封严间隙会不断变小,实际泄漏面积减小,这对篦齿密封性能的提供是有利的^[16].由本试验对间隙宽度的处理方法,当转速从0增加到5000 r/min时,由于篦齿盘的径向伸长使得间隙宽度减小最大可达5.9%,由这一点可知,在篦齿的实际使用中综合考虑材料在高温高速条件下蠕变和最小间隙宽度尤为重要.

3 经验关联式拟合与比较

换算流量系数 φ 主要与齿数 z , 相对封严间

隙(间隙与齿节距之比 s/t), 压比 p_i^*/p_0 和旋转数 R_0 等有关. 所以, 利用最小二乘法将试验结果拟合整理为

$$\varphi = a_1 \left(\frac{s}{t} \right)^{a_2} \left(1 - \frac{1}{z} \right)^{a_3} \times [1 - \ln(e - a_4 R_0^{a_5})] \sqrt{\frac{1 - (p_i^*/p_0)^{-2}}{z + \ln(p_i^*/p_0)}} \quad (2)$$

其中 s 为缝隙宽度; t 为齿节距; R_0 为旋转数. 各系数如表2所示.

表2 公式(2)中系数
Table 2 Coefficients in equation (2)

$\alpha/(\circ)$	90	45	60
a_1	0.0589	0.0580	0.0529
a_2	0.2292	0.2358	0.2123
a_3	0.2106	0.3435	0.4315
a_4	1.7683	1.8781	1.7699
a_5	-0.0322	-0.0273	-0.0283

图6为 $\alpha=60^\circ$, 齿数 $z=5$, 间隙 $s=0.3\text{ mm}$ 结构组合, $N=0, 2000\text{ r/min}$ 和 4000 r/min 时试验数据与修正式及文献中的经典值相比较. 从图可看出: 试验所得修正式和试验值吻合较好, 且随着转速增加, 偏差逐渐减小, 当 $N=4000\text{ r/min}$ 时几乎重合; 经典关联式预测值明显较大, 且偏差基本不变.

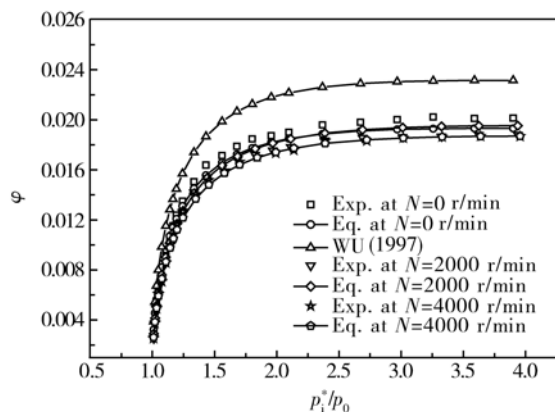


图6 试验结果与关联式对比
($\alpha=60^\circ$, $z=5$, $s=0.3\text{ mm}$)

Fig. 6 Comparison of experimental data and correction equations
($\alpha=60^\circ$, $z=5$, $s=0.3\text{ mm}$)

4 结 论

对不同结构组合篦齿在不同转动条件的流量特性进行试验,分析讨论了流动参数、几何参数和转速的影响规律,得出如下结论:

1) 压比是影响篦齿换算流量系数的主要因素.随着压比的增加,换算流量系数增加;在小压比范围内,换算流量系数随压比增加较快,当压比增加到一定范围内,换算流量系数渐趋于一定值.

2) 相同压比条件下,篦齿的几何参数是影响其性能的重要因素.随着篦齿倾斜角度的减小,换算流量系数减小;但篦齿倾斜角度存在最佳值,约在 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内.

3) 转动的影响较为复杂,转速的增加,换算流量系数减小.

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.
- [2] Stargess G J. Application of CFD to gas turbine engine secondary flow system[R]. The Labyrinth Seal, AIAA-SS-3203,1988.
- [3] 纪国剑,吉洪湖,白花蕾.齿间环形凹槽结构对直通篦齿封严特性影响的数值研究[J].流体机械,2007,35(12):21-24;83.
JI Guojian,JI Honghu,BAI Hualei. Numerical investigation of leakage effect of rub-groove on straight-through labyrinth seal[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(12): 21-24; 83. (in Chinese)
- [4] Rhode D L, Demko J A, Tragner U K, et al. Prediction of incompressible flow in labyrinth seals[J]. Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(1): 19-25.
- [5] Rhode D L, Sobolik S R. Simulation of subsonic flow through a generic labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108(4): 674-680.
- [6] Morrison G L, Johnson M C, Tatterson G B. 3-D laser anemometer measurements in a labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1991, 113(1): 119-125.
- [7] Michaud M, Vakili A, Meganathan A. An experimental study of labyrinth seal flow[R]. USA: IJPGC2003-40097, 2003.
- [8] 吴丁毅.直通式篦齿封严特性的实验研究[J].推进技术, 1997, 18(3): 79-82.
- [9] 吴丁毅.直通式篦齿密封内部流场显示研究[J].流体机械, 1997, 25(2): 11-15.
WU Dingyi. An experimental investigation on seal Character of straight-through labyrinth[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(3): 79-82. (in Chinese)
- [10] 杨军.直通型封严篦齿内流动特性试验研究及数值计算[D].成都:电子科技大学,2009.
YANG Jun. An experimental and numerical study on flow characteristics of straight-through labyrinth[D]. Chengdu: Electronic Technology University, 2009. (in Chinese)
- [11] 张霞,张效伟,朱惠人,等.直通式篦齿封严特性的实验研究[J].航空动力学报,2010,25(8):1753-1757.
ZHANG Xia, ZHANG Xiaowei, ZHU Huiren, et. al. Experimental investigation on seal characteristics of straight-through labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1753-1757. (in Chinese)
- [12] 王鹏飞,刘玉芳,郭文,等.高转速对直通型篦齿封严特性影响的试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2007,20(2):45-48.
WANG Pengfei, LIU Yufang, GUO Wen, et al. Influence of high rotational speeds on the labyrinth sealing characteristics[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 5(2): 45-48. (in Chinese)
- [13] 刘振侠,赵海刚,张丽芬,等.静态封严篦齿内部流动与换热的数值计[J].航空动力学报,2008,23(3):449-453.
LIU Zhenxia, ZHAO Haigang, ZHANG Lifan, et al. Numerical analyses of flow field and heat transfer in cavity of straight labyrinth seal at static state[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 449-453. (in Chinese)
- [14] 丁学俊,黄来,黄丕维,等.迷宫密封中可压流体流场的数值模拟[J].润滑与密封,2007,32(5):27-29.
DING Junhai, HUANG Lai, HUANG Piwei, et. al. Numerical simulation of incompressible flow in labyrinth seal[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(5): 27-29. (in Chinese)
- [15] 杨军,曾军,康湧.直通型篦齿流场计算[J].燃气涡轮试验与研究,2002,15(4):13-16.
YANG Jun, ZENG Jun, KANG Yong. Flow field calculation of straight-through labyrinth[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(4): 13-16. (in Chinese)
- [16] 顾永泉.流体动密封(下册)[M].北京:中国石化出版社,1992.