

文章编号: 1000-8055(2010)08-1753-05

直通型篦齿封严特性的试验

张 霞, 张效伟, 朱惠人, 王振伟
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 对真实尺寸下直通型篦齿的封严特性进行了试验, 考察了几何参数及转速对篦齿封严特性的影响, 结果表明: ①在试验范围内, 篦齿泄漏系数均随雷诺数的增加而增大; ②泄漏系数随齿数的增加而降低; ③同一雷诺数下, 间隙较小时泄漏系数较大; ④小间隙($s=0.4, 0.5\text{ mm}$)时, 转速对泄漏系数的影响不大; 间隙为 $s=0.6\text{ mm}$ 时, 转速影响泄漏系数的界限为 2000 r/min .

关 键 词: 航空发动机; 直通型篦齿; 封严特性; 泄漏系数; 旋转

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Experimental investigation on seal characteristics of straight-through labyrinth

ZHANG Xia, ZHANG Xiaowei, ZHU Huiran, WANG Zhenwei

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The leakage characteristics of the real size labyrinth were investigated experimentally. The influences of geometric parameter and rotational speed were analyzed. The results show that: (1) in the experimental range, leakage coefficient increases with increasing Reynolds number. (2) Leakage coefficient decreases with increasing labyrinth number. (3) Leakage coefficient decreases with increasing clearance under the same Reynolds number. (4) Rotational speed has little effect on the leakage coefficient under small clearance ($s=0.4, 0.5\text{ mm}$); when clearance is 0.6 mm , rotational speed has definite effect on the leakage coefficient, i. e. 2000 r/min .

Key words: aircraft engine; straight-through labyrinth; seal characteristics; leakage coefficient; rotation

篦齿封严是航空发动机中广泛使用的一种非接触式封严结构, 由于直通型篦齿封严结构简单, 易于加工, 至今仍广泛应用于航空发动机中. 国内外学者对其密封机理及影响规律作了大量研究, 文献[1-2]从机理上对篦齿封严做了阐述, 最早提出了泄漏流量的计算方法; 文献[3-6]试验研究了封严篦齿的封严机理, 结果表明直通型篦齿在节流处、齿腔和齿面有能量损失; 文献[7]试验表明

在低雷诺数范围, 雷诺数变化对流量系数影响显著; 文献[8]对直通型篦齿转、静态下流量特性进行了试验研究, 结果表明在试验转速范围内, 转速对直通型篦齿泄漏量影响很小; 文献[9]通过试验研究了直通篦齿结构的泄漏特性, 并提出了经验公式; 文献[10]试验研究了转速对直通型篦齿封严特性的影响, 结果表明不考虑间隙变化时, 定压比下的流量参数随转速增大而减小; 文献[11]通

收稿日期: 2010-04-15; 修订日期: 2010-05-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB707701)

作者简介: 张霞(1985-), 女, 河北石家庄人, 硕士生, 研究领域: 航空发动机高温部件的强化传热技术.

E-mail: zhangxia810@126.com

过试验研究了直通型篦齿封严结构压损规律和临界特性,结果表明在其试验范围内,旋转对篦齿封严特性影响不大.上述有关文献大都采用放大模型,在工程应用上有一定的局限性,本试验在真实尺寸下,测量了直通型直齿在多种几何参数组合下泄漏量随雷诺数的变化情况,分析了间隙、齿数和转速对封严特性的影响,研究结果可以为空气系统计算提供依据,同时也为设计计算方法的校核提供数据.

1 试验装置与试验原理

1.1 试验装置

试验装置由供气系统、流量测量系统、压力测量系统以及传动系统组成.压缩空气由压气机提供,在进气管路上装有玻璃转子流量计,用于测量进气流量,其测量精度为 2.5 级.篦齿盘结构如图 1 所示,篦齿盘直径 D 为 200 mm,齿高 H 为 3 mm,齿距 B 为 4 mm,齿尖厚度 t 为 0.4 mm,前后倾角 α 和 β 均为 8° , N 为齿数, s 为齿间间隙.试验段部分参见图 2.表 1 是本试验的试验参数.

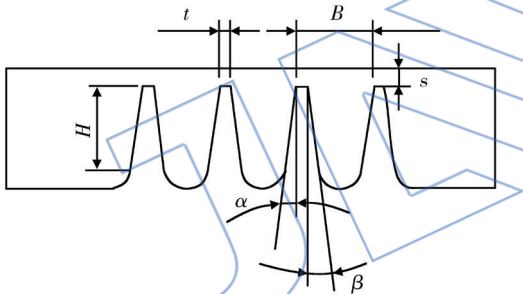


图 1 篦齿结构尺寸
Fig. 1 Schematic of the labyrinth

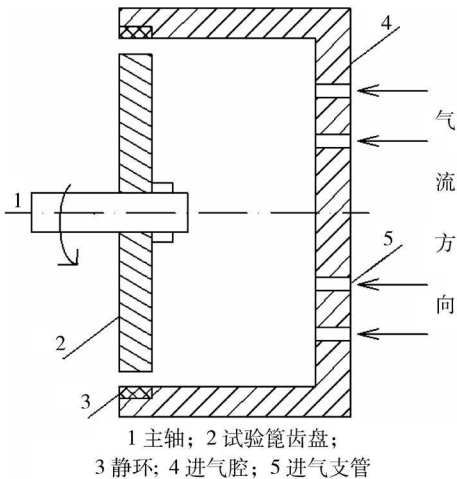


图 2 试验段示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of experimental section

表 1 试验参数
Table 1 Sketch of experiment system

齿数 N	间隙 s /mm	转速 n /(r/min)
2, 3, 4	0.4, 0.5, 0.6	0, 2 000, 4 000
5	0.4, 0.5, 0.6	0, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000

1.2 测试方法

气体经过滤器、减压器、调压器和流量计,然后进入进气腔,最后经篦齿环缝排向大气.系统采用不同量程的玻璃转子流量计的并联方式,流量计后均有阀门控制流量.进气腔入口处有 4 个进气管均匀分布,以提供均匀的气流.进气腔内壁圆周方向均匀布置 3 个测压探针探头,篦齿前的压力是通过测压探针探头测得后取平均值得到的.篦齿后的压力均为大气压力.试验中调节进气管上的阀门来改变不同流量工况下的流动参数.试验中,基于间隙水力直径的雷诺数范围是 0~18 000.

2 试验结果及分析

篦齿封严结构中,以篦齿的泄漏系数作为评价其密封效果优劣的主要依据.为使试验数据能推广应用于压力、温度与试验值不同的工况,本文将试验结果整理成泄漏系数 φ 与雷诺数的关系,泄漏系数 φ 定义为^[9]

$$\varphi = \dot{m}_r \sqrt{T_i^*} / (p_i^* \cdot A) \tag{1}$$

其中 $\dot{m}_r$ 为气体的实际质量流量; p_i^* , T_i^* 为篦齿盘进口处气流的总压和总温; $A = \pi \cdot D \cdot s$ 为篦齿齿间间隙的泄漏面积, D 为篦齿盘直径, s 为篦齿的齿间间隙.图 3~图 5 为试验结果,图中泄漏系数均随雷诺数的增加而增大.

2.1 齿数的影响

图 3 给出了齿数对泄漏系数的影响情况,可以看出,相同间隙下,随着齿数 N 的增加,泄漏系数 φ 减小,这是篦齿的多次节流产生的效果.在较大雷诺数变化范围内,齿数 $N = 2$ 的工况泄漏系数明显偏大,封严效果最差; $N = 3, 4$ 的工况泄漏系数基本一致,封严效果居于中间地位; $N = 5$ 的工况泄漏系数明显偏小,封严效果相对最好.这是因为从篦齿盘进口泄漏出去的大部分气体在每个齿槽空腔内旋转一周后才会进入下一个齿槽空腔内,由于齿数增加,齿槽空腔的数目就会增加,齿

槽数目的增加实际上造成了泄漏出去的气体沿程阻力明显增大, 流程明显增长, 因而产生的泄漏就相对较小, 即封严效果就相对要好一些.

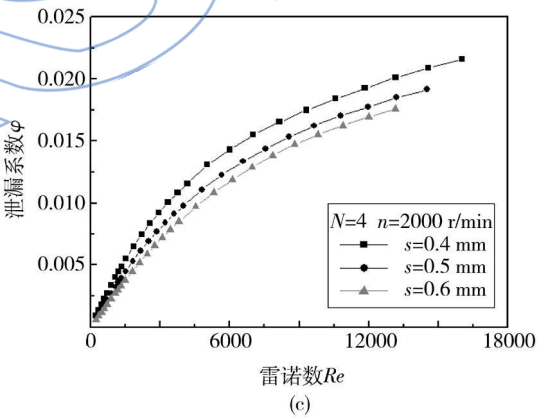
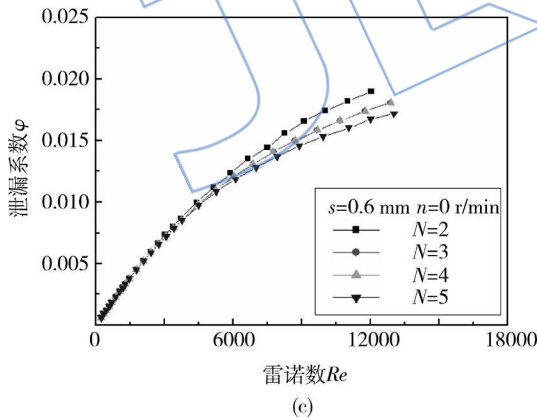
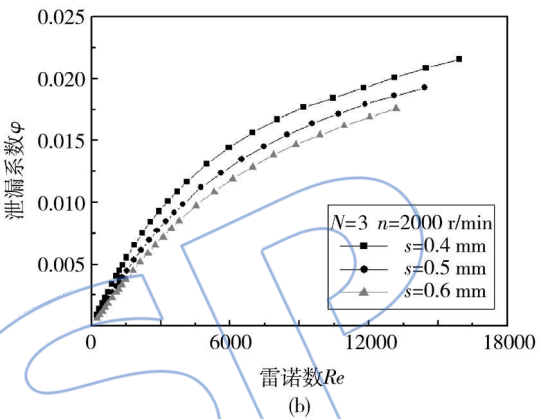
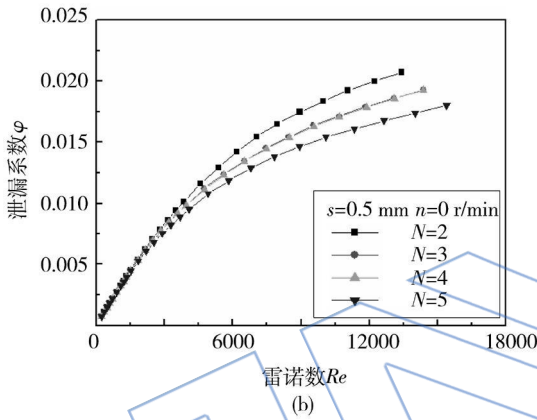
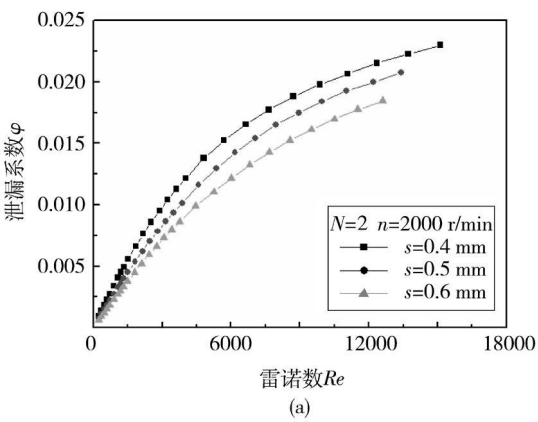
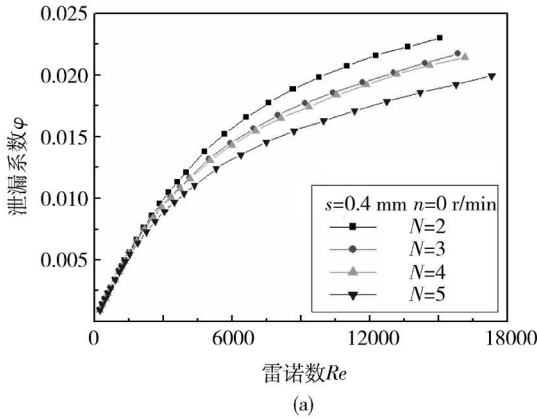


图 3 齿数对泄漏系数的影响

Fig. 3 Effect of labyrinth number on the leakage coefficient

2.2 间隙的影响

图 4 给出了间隙对泄漏系数的影响情况, 由图可以看出, 在较大雷诺数变化范围内, 间隙为 0.4 mm 时的泄漏系数较间隙为 0.5, 0.6 mm 时的明显偏大, 封严效果最差; 间隙为 0.6 mm 时的泄漏系数较间隙为 0.5 mm 时的均有明显减小,

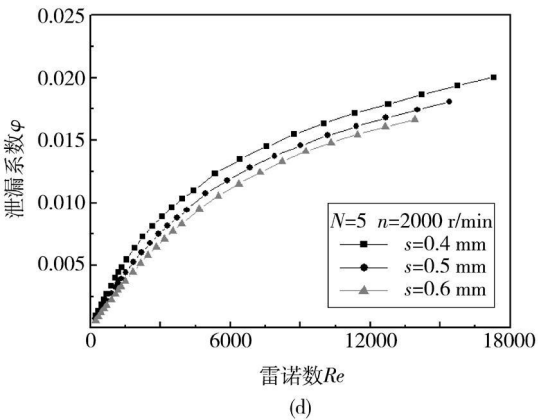


图 4 间隙对泄漏系数的影响

Fig. 4 Effect of clearance on leakage coefficient

封严效果相对较好. 篦齿进出口压比的影响可能是出现这种现象的原因之一, 间隙的减小相应压比明显增大, 此时气体进出口压差较大, 气流速度较大, 将使得流动的核心区向壁面扩展, 从而壁面附面层减薄, 有效流通面积相对增大, 表现出泄漏系数较大. 此外, 加工时间隙的偏差和静环内壁面相对粗糙度等因素也可能对泄漏系数产生影响.

2.3 转速的影响

图 5 是转速对泄漏系数的影响情况, 由图可看出: 在较大雷诺数变化范围内, 小间隙($s = 0.4$,

0.5 mm) 在各个转速工况(包括零转速)下的泄漏系数基本一致, 而大间隙($s = 0.6\text{ mm}$)下, 转速为 0 和 1000 r/min 时的封严效果基本一样, 其他转速下的泄漏系数与前两种转速有明显区别, 但各转速间的泄漏系数相差不大, 整体的封严效果较前两种转速要好, 可以得出: 大间隙($s = 0.6\text{ mm}$)下, 转速大于 2000 r/min 时对泄漏系数有影响, 小于 2000 r/min 时对泄漏系数几乎没有影响, 说明转速影响泄漏系数的界限为 2000 r/min . 出现这种现象的原因可能与篦齿间气流流动状态的改变程度有关. 众所周知, 篦齿盘低转速时泄漏气流的流动状态相对稳定, 由文献[12]可知, 进入齿腔的气流速度开始减小, 在齿腔中部达到最小并形成涡心, 当转速逐渐增加时, 篦齿盘的转动必然会对泄漏气流的稳定流动产生扰动, 主要会对齿腔内的旋涡状态产生影响, 比如涡心位置的移动和旋涡由稳定状态向非稳定状态的转变等, 小间隙($s = 0.4, 0.5\text{ mm}$)下产生的扰动不足以影响到旋涡的稳定状态, 所以转速对泄漏系数的影响几乎可以忽略不计, 但对于大间隙($s = 0.6\text{ mm}$)的工况, 间隙的增大导致流进空腔的气流量明显增加, 其产生的扰动对初始形成的旋涡造成了很大的影响, 致使篦齿空腔内的流动状态相对于低转速情况下发生了本质变化, 该变化一旦完成, 就达到了稳定状态, 再增加转速, 也仅仅是流动状态量的差别, 这也就是大间隙时, 转速为 0 和 1000 r/min 时的封严效果基本一样, 其他转速下的泄漏系数与前两种转速有明显区别, 但各转速间的泄漏系数相差不大的原因.

3 结 论

本文通过试验研究了真实尺寸下直通型篦齿的泄漏特性, 并分析了齿数、间隙以及转速对泄漏系数的影响, 主要有以下几点结论:

- 1) 在试验范围内, 篦齿泄漏系数均随雷诺数的增加而增大;
- 2) 在试验范围内, 泄漏系数随齿数的增加而降低;
- 3) 在试验范围内, 同一雷诺数下, 间隙较小时泄漏系数较大;
- 4) 在试验范围内, 同一雷诺数下, 小间隙($s = 0.4, 0.5\text{ mm}$)时, 转速对泄漏系数的影响不大; 大间隙($s = 0.6\text{ mm}$)时, 转速影响泄漏系数的界限为 2000 r/min .

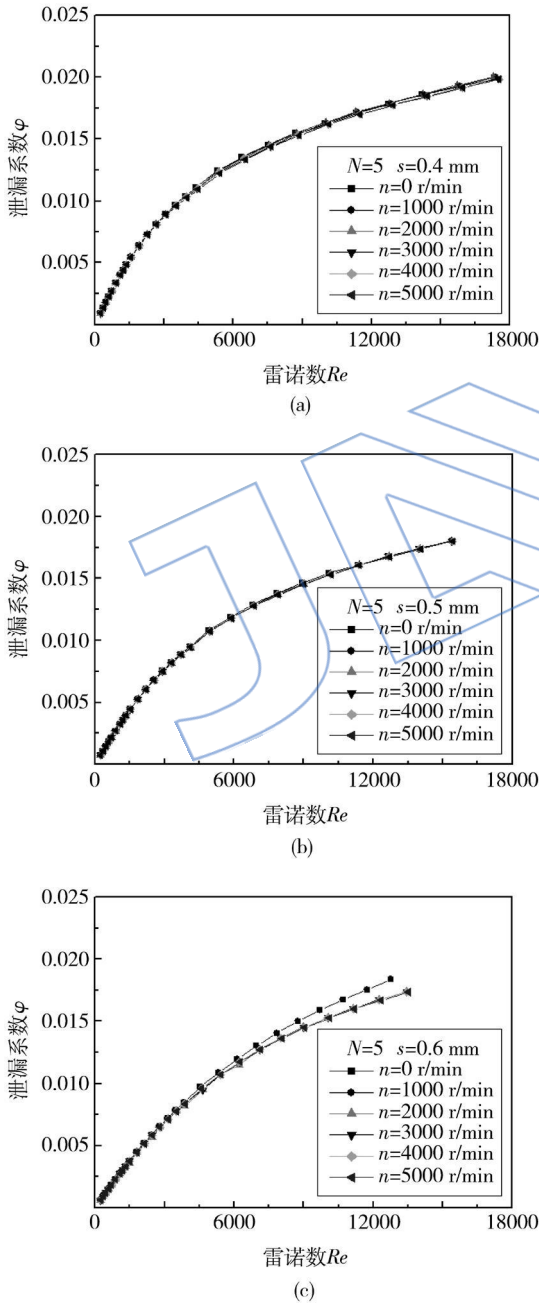


图 5 转速对泄漏系数的影响

Fig. 5 Effect of rotational speed on leakage coefficient

参考文献:

- [1] Egli A. The leakage of steam through labyrinth seals[J]. Transactions of the ASME, 1935, 57: 115-122.
- [2] Kearton W J, Keh T H. Leakage of air through labyrinth glands of staggered type[J]. Proc. Inst. Mech. Engrs., 1952, 166: 180-188.
- [3] Michaud M, Vakili A, Meganathan A. An experimental study of labyrinth seal flow[R]. IJPGC 2003 40097, 2003.
- [4] Vakili A D, Meganathan A J. Advanced labyrinth seals for steam turbine generators[R]. ASME GT 2006-91263, 2006.
- [5] Yucel U, Kazakia J Y. Analytical prediction techniques for axisymmetric flow in gas labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 255-257.
- [6] Willenborg K. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123: 815-822.
- [7] Schramm K, Willenborg S, Kim W S. Influence of a honeycomb facing on the flow field and discharge behavior of a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 2000-GT-0291, 2000.
- [8] 王锁芳, 吕海峰. 转静态封严篦齿流场的数值分析和封严特性的实验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 444-449.
WANG Suofang, LÜ Haifeng. Numerical analysis of flow and experimental investigation of labyrinth sealing characteristics at rotational and static states[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 444-449. (in Chinese)
- [9] 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): 79-81.
WU Dingyi. An experimental investigation on seal character of straight through labyrinth[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(3): 79-81. (in Chinese)
- [10] 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]. 燃气轮机试验与研究, 2007, 5(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)
- [11] 纪国剑, 吉洪湖. 直通篦齿封严结构压损规律和临界特性的研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 415-420.
JI Guojian, JI Honghu. Numerical and experimental investigation of pressure loss and critical sealing characteristics of straight through labyrinth seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 415-420. (in Chinese)
- [12] 黄晓光, 吴丁毅. 航空发动机中直通式篦齿密封腔内流动和换热的试验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 159-162.
HUANG Xiaoguang, WU Dingyi. Experimental investigation of flow and heat transfer in straight labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 159-162. (in Chinese)