

典型阶梯篦齿高转速密封性能试验

王鹏飞^{1,2}, 郭文², 张靖周¹

(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 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 在高转速密封试验设备上,进行了实际尺寸阶梯篦齿压比(1.05~2.8)、相对密封间隙(齿尖密封间隙和齿宽比)(2.4~4.0)、泄漏雷诺数(1900~28000)及旋转速度(0~12000 r/min)等对密封性能影响的试验。结果显示:篦齿流量系数随压比变大而上升,随相对密封间隙变大而降低;转速低于5000 r/min时,旋转对篦齿流量系数影响不明显,高转速、小压比时,篦齿流量系数随转速的升高而降低,降幅超过30.1%;较小雷诺数下,篦齿流量系数随雷诺数的减小快速降低,雷诺数超过6000以后,篦齿流量系数受雷诺数的影响不明显;气流通过阶梯篦齿第一道齿的压力损失最小,通过最后一道齿的压力损失最大,通过中间各齿的压力损失相当。基于试验测试数据,修正了典型阶梯篦齿流量系数的求解关系式,修正后的关系式计算值与实测值吻合良好。

关 键 词: 空气系统; 篦齿; 密封性能; 流量系数; 压力分布

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on seal characteristics of high rotational speed of stepped labyrinth seals

WANG Pengfei^{1,2}, GUO Wen², ZHANG Jingzhou¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Experiments were carried out to investigate the seal characteristics of real size models of a typical stepped-labyrinth seal. Flow coefficients of the labyrinth seal were obtained in a high speed experiment facility at different pressure ratios (1.05—2.8), relative sealing clearances (2.4—4.0), Reynolds numbers (1 900—28 000) and rotational speeds (0—12 000 r/min). Results indicated that the flow coefficient of labyrinth seal rose with the increase of pressure ratio, and decreased with a higher relative sealing clearance. No noticeable change of flow coefficient was found when the labyrinth seal ran under a rotational speed of 5 000 r/min. However, under high rotational speed and low pressure ratio conditions, the flow coefficient declined more than 30.1% as the operating speed went up. Moreover, under the conditions with lower Reynolds numbers, a rapid drop of flow coefficient was found with the decreasing Reynolds numbers. When the Reynolds numbers were larger than 6 000, no

收稿日期:2016-05-07

作者简介:王鹏飞(1980—),男,高级工程师,博士生,主要从事航空发动机内流空气系统与高温件冷却设计及研究。

E-mail: pengfeigte@163.com

引用格式:王鹏飞,郭文,张靖周.典型阶梯篦齿高转速密封性能试验[J].航空动力学报,2017,32(12):3057-3063. WANG Pengfei, GUO Wen, ZHANG Jingzhou. Experiment on seal characteristics of high rotational speed of stepped labyrinth seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 3057-3063.

clear effect on flow coefficients can be observed. Axial pressure distribution measurements showed that pressure drop reached its minimum and maximum values when air flowed through the first and the last seal tooth respectively, the pressure dropped through the remaining teeth were almost uniform. According to the findings, an empirical expression to evaluate flow coefficients of stepped-labyrinth seals was also obtained, and agreed with the experimental results perfectly.

Key words: air system; labyrinth; seal characteristics; flow coefficients; pressure distribution

篦齿是航空发动机空气系统中大量采用的密封结构,其密封性能设计水平对发动机性能、转子轴向力控制、高温部件冷却,及发动机强度、寿命和可靠性设计具有重要影响。深入开展篦齿密封性能研究意义重大且具有潜在的经济收益。

篦齿密封性能取决于合理的设计密封间隙、齿腔形状以及各密封齿的高度、尖部厚度、数目、节距、形状,密封环结构等。在发动机中,篦齿上下游压比、进口气流预旋比(气流切向速度与当地转子的线速度之比)、转速、雷诺数等工作条件也是其密封性能的重要影响因素。有关篦齿密封性能的研究也集中在以上方面。文献[1]对较早所开展的研究做了归纳,文中指出篦齿密封性能研究需要考虑多个影响因素,较早的研究工作不够全面,局限性较大。为了满足试验测量需要,大部分试验研究基于真实结构作一定简化或放大的模型来开展。Wittig等^[2]试验测量了模型放大对篦齿流量系数的影响,结果显示,在相同的试验条件下,以3倍、5倍和8倍的比例缩放后,篦齿流量系数的差异高于10%。文献[3]的研究中也发现篦齿模型放大比例对流量系数具有影响。针对结构复杂的阶梯篦齿,Morrison等^[4]试验表明增加齿数会降低篦齿流量系数,但当齿数超过8齿以后,再增加齿数,流量系数变化不明显;同时发现当封严齿处于阶梯表面居中位置时,能获得最小的流量系数。文献[5-6]在几何放大模型上研究了雷诺数单独变化对阶梯篦齿密封性能的影响,结果表明在低雷诺数区域,流量系数随雷诺数的增加有显著的变大,而当雷诺数大于一定值后,再改变雷诺数,篦齿流量系数变化不显著。Michaud等^[7]通过流动可视化研究了静止阶梯篦齿中的封严机理,结果显示阶梯篦齿中齿腔涡流引起的黏性损失、各齿尖位置喷射引起的黏性耗散损失、气流在齿面上的止滞、气流方向突变等构成了其主要损失。文献[8]试验研究了实际尺寸篦齿的节流间隙、齿数、齿腔深度和宽度等对封严

泄漏量和密封腔内压力分布的影响。航空发动机是高速旋转机械,在转速对篦齿密封性能影响的认识上,各研究者提出了不同的观点^[9-15],一般认为低转速下,旋转对篦齿密封性能的影响不明显,高转速下,旋转会影响篦齿密封性能,但试验数据较少。王鹏飞等^[16-17]在高速旋转试验设备上研究了高转速下的直通型直齿的密封性能以及阶梯篦齿的风阻温升特性。

前期大多数针对阶梯篦齿密封性能的试验是基于几何放大模型来研究,试验结果用于工程设计时需再次修正;有关雷诺数单独变化对篦齿密封性能影响的试验较少;且旋转密封试验的转速较低,难以有效揭示高转速下旋转效应对阶梯篦齿密封性能的影响。本文针对某型航空发动机实际尺寸阶梯篦齿结构,在高速旋转试验设备上,开展了压比、相对密封间隙、转速以及雷诺数等参数对篦齿密封性能的影响情况研究,基于大量试验数据,修正了篦齿泄漏量工程计算模型。

1 研究模型

以具有典型密封结构特征的某型航空发动机实际尺寸阶梯篦齿为研究模型,密封结构见图1。齿尖最大直径为420 mm,各齿的密封间隙一致,篦齿盘最大设计旋转速度为19 000 r/min。篦齿静止机匣流道侧为光滑面,试验中采取组装不同

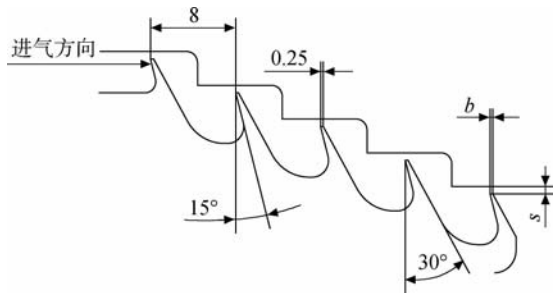


图1 阶梯篦齿密封结构(单位:mm)

Fig.1 Structure of stepped labyrinth seal (unit:mm)

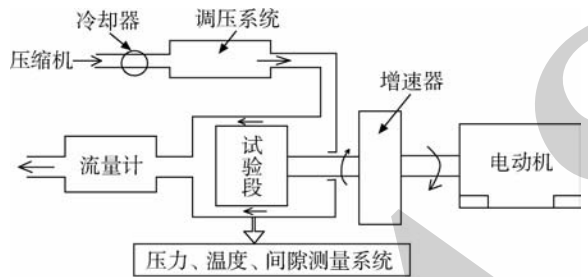
尺寸机匣来调整密封间隙。

2 试验装置及试验方法

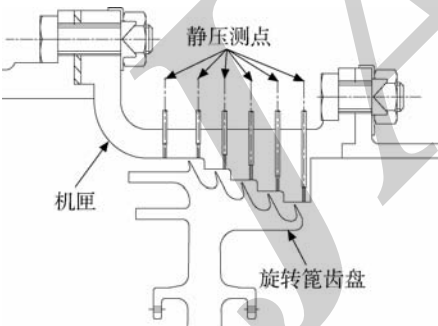
2.1 试验装置及测试方法

高转速试验装置如图 2 所示,主要包括压缩机直供气的供气系统、机械系统、压力控制阀门、流量测试仪器、压力与温度测试仪器、转子转速测试仪器等。转子最高旋转速度为 20 000 r/min。供气系统可提供最大压力为 0.5 MPa、流量为 2.0 kg/s 的干燥空气,来流空气为均匀气流,无预旋。

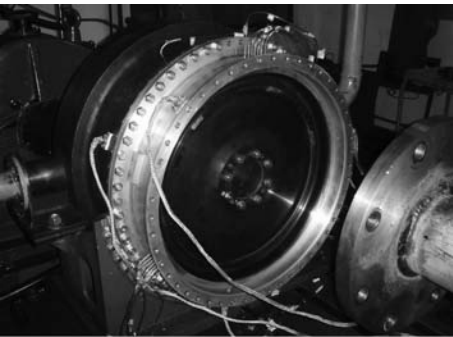
在篦齿进口、出口位置分别布置周向 3 点均布的总压和总温探针。在各齿间及进出口位置布置周向 3 点均布的壁面静压测点,如图 2(b)所示。在处理试验数据时,截面测量参数均指周向 3 点的平均值。为了保证流量测量的准确性,在



(a) 试验系统示意图



(b) 阶梯篦齿的齿间静压测量示意图



(c) 试验段照片

图 2 旋转篦齿试验系统

篦齿下游位置分别使用热式质量流量计与流量管对比测量通过篦齿的空气流量,测量精度为±2%。试验中采取改变通过篦齿的空气流量和温度来调节雷诺数。

2.2 试验数据处理

雷诺数 Re 定义如下:

$$Re = \dot{m} / \mu \pi R \tag{1}$$

式中 $\dot{m}$ 为通过篦齿的空气质量流量; μ 为空气动力黏度; R 为齿尖半径。

数据处理时引入流量系数 $C_d^{[1,4]}$ 来评价篦齿密封性能,其表征了结构参数、压比、雷诺数和转速等对密封性能的影响,表达式如下:

$$C_d = \dot{m}_{\text{test}} / \dot{m}_{\text{ideal}} \tag{2}$$

$$\dot{m}_{\text{ideal}} = \frac{A p_i^*}{\sqrt{RT_i^*}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \pi_p^{-2}}{n + \ln \pi_p}} \tag{3}$$

$$\pi_p = p_i^* / p_o \tag{4}$$

$$A = 2\pi R s \tag{5}$$

$$k = \sqrt{1 / \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{s/t}{s/t + 0.02} \right)} \tag{6}$$

式中 p_i^* 为进口总压; p_o 为出口静压; π_p 为进出口压比; T_i^* 为进口总温; n 为封严齿数目; s 为密封间隙; A 为齿尖流通面积; t 为齿节距; $\dot{m}_{\text{test}}$ 为试验测量的篦齿泄漏质量流量。

3 试验结果及讨论

3.1 压比的影响

在静止和旋转状态下,篦齿流量系数 C_d 随进出口压比 π_p 的变化规律如图 3 所示。由图可知,在其他参数不变的情况下,篦齿流量系数 C_d 随压比增加而变大,近似线性变化,而且不同转速 N 下的变化趋势相同。从图中还可以发现,压比大于 2.0 后,流量系数的增幅逐渐减缓。相对密封间隙 s/b (密封间隙与齿宽比值) 为 2.4、3.2 和 4.0 时,流量系数随压比的变化规律相同。

图 3 所示的试验结果同时表明,压比与相对密封间隙 s/b 相比,压比变化对流量系数 C_d 的影响更小。这个现象说明对于阶梯篦齿,相对密封间隙与压比相比,前者对篦齿流量系数 C_d 的影响更明显。这和文献[10]数值模拟研究所发现的现象一致。

3.2 转速的影响

在较宽的转速范围内研究了旋转对篦齿密封性能的影响,试验中篦齿盘达到了 15 000 r/min 的转速,录取了 12 000 r/min 下的测量数据,此时

Fig. 2 Experiment rig for rotating labyrinth seals

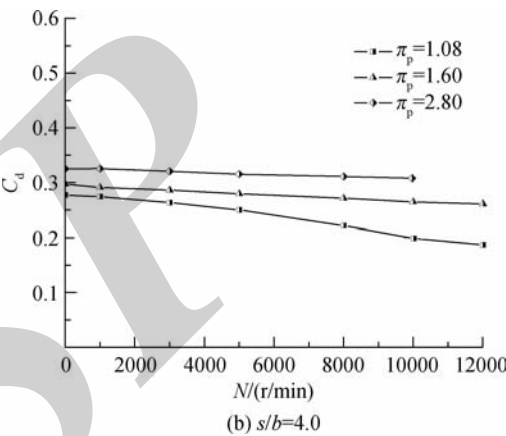
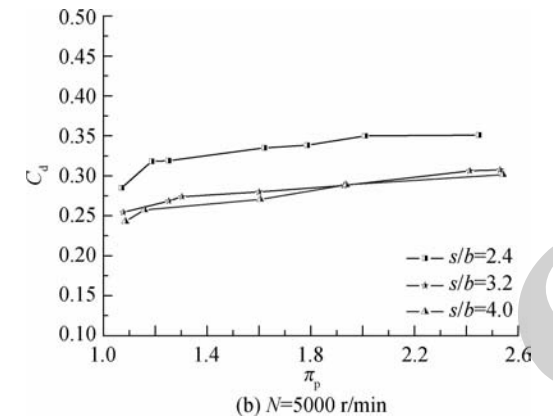
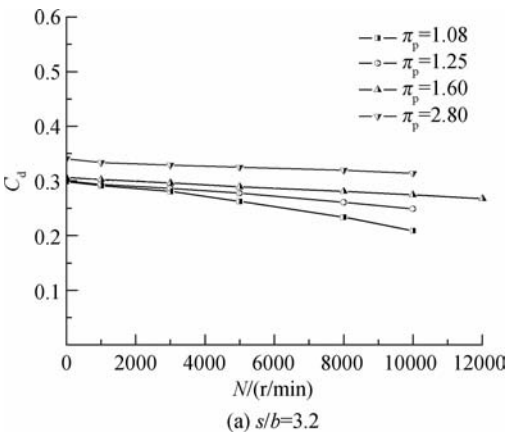
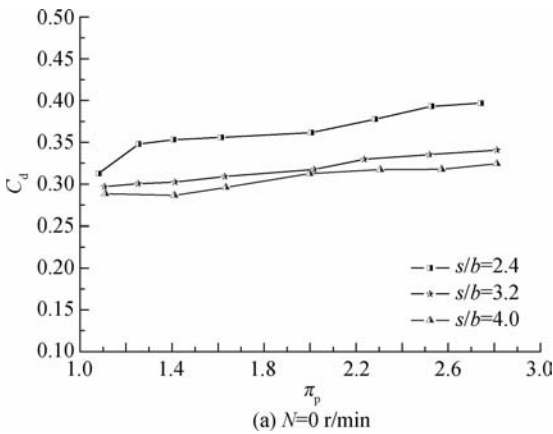


图 3 压比对流量系数 C_d 的影响
Fig. 3 Effect of π_p on C_d

图 4 转速 N 对流量系数 C_d 的影响
Fig. 4 Effect of N on C_d

齿尖切向速度为 264 m/s。

由于转速增大时,密封间隙会减小,因而,处理试验数据所采用的密封间隙是相应转速下的工作间隙,保证了分析用篦齿泄漏面积与其实际泄漏面积基本一致。

图 4 显示了相对密封间隙 s/b 分别为 3.2 和 4.0 时流量系数 C_d 随篦齿转速的变化趋势,如图所示,在其他参数不变的情况下,流量系数 C_d 随转子转速的升高而降低。转速在 5 000 r/min 以下,转速对流量系数 C_d 的影响不明显,转速高于 5 000 r/min 以后,升高转速,流量系数 C_d 明显降低。尤其压比越小(较小的 Re),转速对流量系数的影响越显著,图 4(a)中,压比为 1.08 下,由静止升高转速至 10 000 r/min($Re=1858$),流量系数 C_d 的降幅达到了 30.1%;图 4(b)中,在压比为 1.08 和转速为 10 000 r/min 时($Re=2386$),流量系数的降幅为 28.3%。在较高的压比下,即较大的雷诺数下,转速对流量系数的影响很小。

图 4 所示的试验结果同时表明,在不同的相对密封间隙下,流量系数 C_d 随转速的变化规律一致。

3.3 相对密封间隙的影响

图 5 给出了静止和旋转状态下流量系数 C_d 随相对密封间隙 s/b 的变化规律。由图可知,在转子转速、进出口压比不变的情形下,流量系数 C_d 随相对密封间隙的增大而降低。这一现象验证了文献[18]的数值计算结果,即结构和本文中类似的阶梯篦齿,当密封间隙小于一定值时,增大密封间隙可以获得更小的流量系数。

图 5(a)和图 5(b)还同时反映出,对于本文所研究的阶梯篦齿,在小间隙时,改变密封间隙对流量系数影响显著,在较大间隙时,改变密封间隙对流量系数的影响不大。静止状态下,在压比为 2.0 时, s/b 由 2.4 增加到 3.2,流量系数的变化幅度为 12.1%,而 s/b 由 3.2 增加到 4 时,流量系数的变化幅度仅为 1.86%。

阶梯篦齿流量系数随相对密封间隙的变化规律和直通篦齿相反,阶梯篦齿的台阶结构使得从齿尖喷射出的气流冲向台阶表面,受到阻挡后向齿腔偏转冲向篦齿背风面,并发生流动分离,在台阶前和齿腔形成反向涡流。当密封间隙较小时,

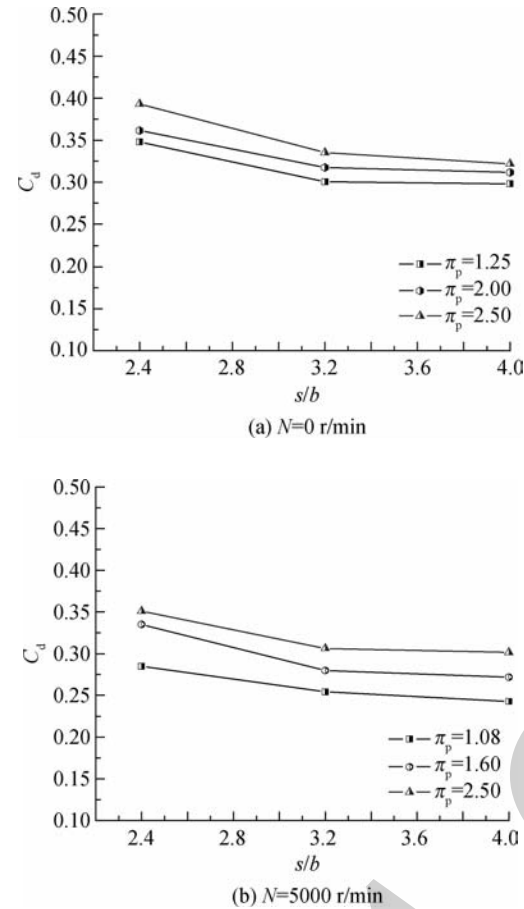


图 5 相对密封间隙 s/b 对流量系数 C_d 的影响
Fig. 5 Effect of s/b on C_d

增大间隙可以降低主流速度,使得更多的气流卷入涡流,提升了密封性能,随着密封间隙变大,影响减弱。

3.4 雷诺数的影响

在密封间隙、压比等参数不变的情形下,研究了只有雷诺数改变时,篦齿流量系数 C_d 的变化情况,试验结果见图 6。从图可以看出,在低雷诺数,即小压比下,雷诺数对流量系数 C_d 有明显影响, C_d 随雷诺数变小而迅速降低;但雷诺数增大后,改变雷诺数对流量系数 C_d 影响不明显。图 6 所示的试验结果同时表明,雷诺数小于 6 000 时,流量系数 C_d 对雷诺数变化的敏感性更高。当篦齿的结构参数相对密封间隙 s/b 分别为 2.4、3.2 和 4.0 时,雷诺数单独变化对流量系数 C_d 的影响规律基本一致。

试验结果还表明,雷诺数较高时,流量系数 C_d 主要受压比的影响而非雷诺数。文献[5]和文献[6]在阶梯篦齿的试验中也发现了类似的现象。文献[6]在试验中发现当雷诺数达到一定值时,流量系数只随压比变化,而不再受雷诺数的影响。

其原因是雷诺数较小时,黏性力相对惯性力更大,降低雷诺数后摩擦阻力变大,致使流量系数降低。当雷诺数升高后,惯性力相对黏性力更大,流量系数主要受压比和泄漏面积的影响。

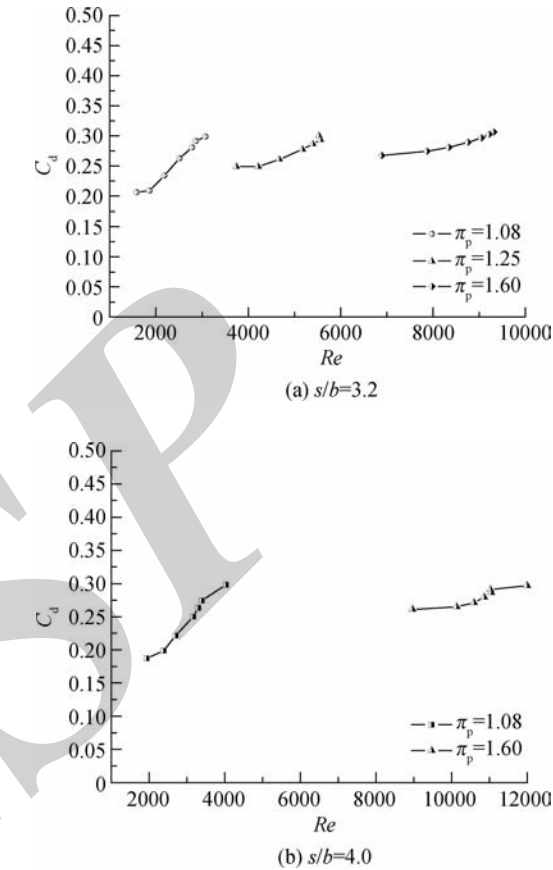


图 6 雷诺数 Re 对流量系数 C_d 的影响
Fig. 6 Effect of Re on C_d

3.5 齿腔压力沿流向分布

为了详细了解篦齿的密封性能,试验中测量了各齿间齿腔的压力,图 7 给出了阶梯篦齿沿流向的齿腔压力分布,图中的横坐标为沿流向的齿腔编号,纵坐标为齿腔的无量纲压力(试验测量的各齿腔压力 p 与篦齿进口总压 p_i^* 之比)。由图 7 (a)可以看出,在不同的压比下,沿流动方向齿腔压力近似线性逐渐减小,相比较,气流经过第一道齿的压降最小,经过最末一道齿的压降最大,经过中间各齿的压降基本相同,这说明阶梯篦齿最后一道齿的节流作用最显著。图 7 (b)显示了篦齿进口总压 p_i^* 为 0.2 MPa 时,不同转速 N 下的齿腔压力分布,可以看出,旋转状态下沿流向的齿腔压力变化规律与静止状态相同,但气流通过相同密封严齿的压降随转速的升高而降低。转速分别为 0、12 000 r/min 时,气流通过第 5 道密封严齿的无量

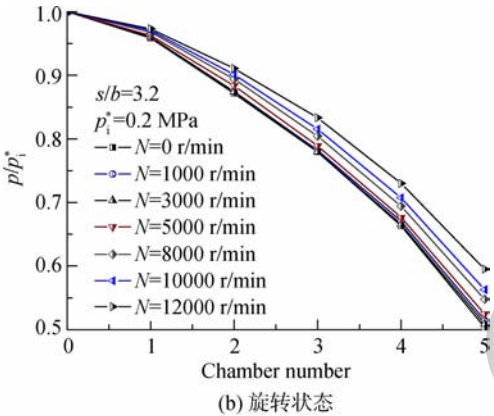
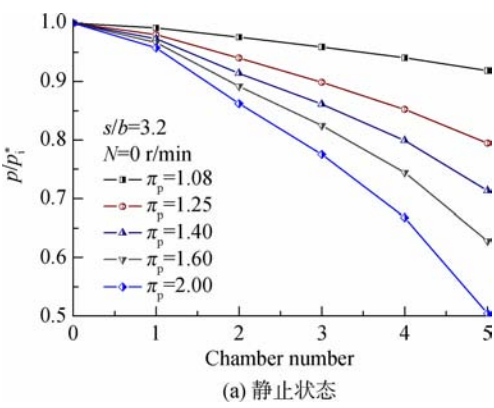


图 7 沿流动方向的齿腔压力分布
Fig. 7 Stepped labyrinth seal chamber pressure distribution

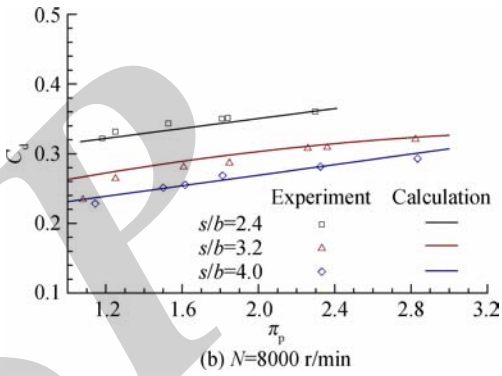
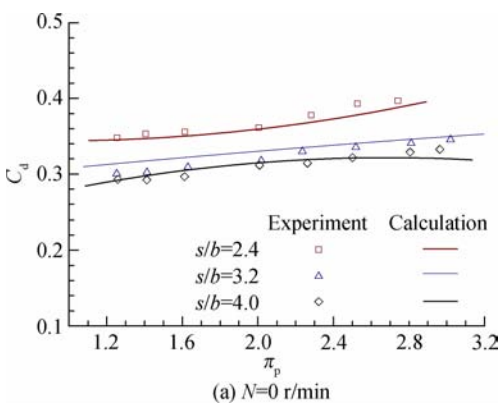


图 8 计算结果与试验数据比较
Fig. 8 Comparison of calculation and experiment result

4 结 论

本文在宽广的转速范围内试验研究了实际尺寸阶梯篦齿的密封性能,在试验范围内得到如下研究结果:

- 1) 阶梯篦齿的流量系数随相对密封间隙变大而降低,但随压比变大而升高,变化幅度均逐渐变小。
- 2) 转速小于 5 000 r/min 时,旋转对篦齿流量系数无明显影响,转速高于 5 000 r/min 后,篦齿流量系数随转速增大而降低,且压比越小,流量系数变化幅度越大,压比为 1.08 时,由静止至 10 000 r/min,流量系数降幅达到了 30.1%。
- 3) 在结构参数和压比给定的条件下,雷诺数小于 6 000 时,篦齿流量系数随雷诺数的减小快速降低,而雷诺数较大时,雷诺数变化对篦齿流量系数影响较小。
- 4) 沿流动方向齿腔压力呈线性降低,其中,篦齿泄漏流经第一道齿的压降最小,流经最末一道齿的压降最大,流经中间各齿的压降相同。
- 5) 基于试验数据,获得了阶梯篦齿流量系数经验关系式,其计算值与试验值具有良好的符合性。

纲压力变化分别为 24.1%和 18.5%。

3.6 经验关系式拟合与验证

由试验结果可知,压比、相对密封间隙、雷诺数等均对流量系数 C_d 有明显影响,高转速小雷诺数时流量系数 C_d 还受到转速大小的影响。因而,将流量系数 C_d 与相关参数的经验关系式表达为

$$C_d = \dot{m} \left(\frac{s}{b} \right)^n (1 - tR_i^t) \tag{7}$$

其中转速的影响用旋转数 R_i 来表征。

$$R_i = Ta / Re \tag{8}$$
$$Ta = \frac{\rho \omega \frac{D}{2} 2s}{\mu} \sqrt{\frac{2s}{D}} \tag{9}$$

式中 Re 为雷诺数, Ta 为泰勒数, μ 为气体动力黏度, ω 为转子角速度, ρ 为气体密度。

利用经验关系式对后续试验工况下的流量系数 C_d 进行了预估,预估值与测试值的比较如图 8 所示,可以看出,在不同的相对密封间隙和压比下,经验关系式的预估值与试验值的符合性良好,最大相对误差为 6.3%。

参考文献:

- [1] ZIMMERMANN H, WOLFF K H. Air system correlations; Part 1 labyrinth seals[R]. ASME Paper 98-GT-206, 1998.
- [2] WITTIG S, KIM S. Scaling effects on leakage losses in labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(2):305-309.
- [3] BRAUN E, DULLENKOPF K, BAUER H J. Optimization of labyrinth seal performance combining experimental numerical and data mining methods [R]. ASME Paper GT2012-68077, 2012.
- [4] MORRISON G L, CHI D. Incompressible flow in stepped labyrinth seals[R]. ASME Paper 85-FE-4, 1985.
- [5] SCHRAMM V, WILLENBORG K, KIM S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow field and discharge behavior of a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 2000-GT-0291, 2000.
- [6] WILLENBORG K, KIM S, WITTIG S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(4):815-822.
- [7] MICHAUD M, VAKILI A, MEGANATHAN A. An experimental study of labyrinth seal flow[R]. Atlanta, Georgia: International Joint Power Conference, 2003.
- [8] 胡东旭, 贾力, 杨立新. 迷宫密封泄漏特性的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3):549-555.
- HU Dongxu, JIA Li, YANG Lixin. Experiment on leakage characteristics in labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3):549-555. (in Chinese)
- [9] WASCHKA W, WITTIG S, KIM S. Influence of high rotational speeds on the heat transfer and discharge coefficients in labyrinth seals[R]. ASME Paper 90-GT-330, 1990.
- [10] LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping. Effects of pressure ratio and fin pitch on leakage flow characteristics in high rotating labyrinth seals[R]. ASME Paper 2006-GT-91145, 2006.
- [11] PAOLILLO R, MOORE S, CLOUD D, et al. Impact of rotational speed on the discharge characteristic of stepped labyrinth seals[R]. ASME Paper GT2007-28248, 2007.
- [12] 王锁芳, 吕海峰. 转静态密封迷宫齿流场的数值分析和密封性能的试验[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3):445-449.
- 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):445-449. (in Chinese)
- [13] 纪国剑, 吉洪湖. 阶梯迷宫齿与衬套轴向位置和转速对密封性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3):421-424.
- JI Guojian, JI Honghu. Experimental investigation of effect of step axial location and rotating speed on leakage of stepped labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3):421-424. (in Chinese)
- [14] 纪国剑, 吉洪湖, 曹广州. 旋转对小间隙迷宫齿-蜂窝结构密封性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2):142-145.
- JI Guojian, JI Honghu, CAO Guangzhou. Effect of rotating speed on leakage characteristics of labyrinth-honeycomb seal with small clearance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(2):142-145. (in Chinese)
- [15] YAN Xin, LI Jun, SONG Liming, et al. Investigations on the discharge and total temperature increase characteristics of the labyrinth seals with honeycomb and smooth lands [R]. ASME Paper GT2008-50399, 2008.
- [16] 王鹏飞, 刘玉芳, 郭文, 等. 直通式迷宫齿密封性能的数值分析和试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(1):32-36.
- WANG Pengfei, LIU Yufang, GUO Wen, et al. Numerical analysis and experimental investigation of straight-through labyrinth sealing characteristic[J]. Journal of Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1):32-36. (in Chinese)
- [17] 王鹏飞, 郭文, 张靖周. 旋转密封迷宫齿风阻温升的试验研究与数值分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6):1402-1408.
- WANG Pengfei, GUO Wen, ZHANG Jingzhou. Experimental investigation and numerical analysis of windage heating in rotating labyrinth seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6):1402-1406. (in Chinese)
- [18] KOOL G A, KLOOSTERMAN A B, RADEMAKER E R, et al. Advanced seal test rig validation and operation[R]. ASME Paper 2006-GT-90915, 2006.

(编辑:王碧琚)