

转速对压气机级间篦齿封严影响的实验

孔晓治, 刘高文, 雷 昭, 畅 然, 刘 阳
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 对压气机级间篦齿封严进行了实验研究. 不同压比下(1.05~1.3), 研究转速(1500~8100 r/min)对压气机级间篦齿封严的工作间隙变化、泄漏特性、温升特性和旋流特性的影响. 结果表明: 随转速的增大, 工作间隙减小, 流量降低; 小压比时流量系数降低, 较大压比时流量系数变化微小. 系统风阻温升随转速增大而增大, 转速越大时, 其温升越明显. 另外, 随转速的增大, 出口盘腔同一径向位置的旋转比增大; 同一转速下, 随出口盘腔径向位置的增大, 旋转比降低.

关 键 词: 级间; 篦齿封严; 流量系数; 风阻温升; 旋转比

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiment on influence of rotational speeds on labyrinth seal in compressor stator well

KONG Xiao-zhi, LIU Gao-wen, LEI Zhao, CHANG Ran, LIU Yang

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A rotating experiment rig with high rotational speeds was designed for the experiment of labyrinth seal in a compressor stator well. The influences of rotational speed (1500—8100 r/min) on the working tip clearance, leakage characteristic, windage heating and swirl characteristics at different pressure ratios (1.05—1.30) were studied. Results show that the working tip clearance decreases and the mass flow rate declines with the increasing of the rotational speed. For low pressure ratios, increasing the rotational speed results in falling discharge coefficient, while the variation of discharge coefficient is relatively small for high pressure ratios. The windage heating of system increases as the rotational speed increases. Higher rotational speed gives much larger temperature rise. In addition, it is obvious that increasing the rotational speed leads to an increase of the swirl ratio at a specific radial location. However, the swirl ratio shows a decrease with increasing radius in the outlet cavity.

Key words: stator well; labyrinth seal; discharge coefficient; windage heating; swirl ratio

篦齿封严是现代航空发动机中最基本的一种封严技术,是发动机空气系统的重要组成部分,主要用于压气机和涡轮级间、涡轮叶片的顶部封严、内流空气系统、燃气隔离以及主轴承腔润滑油封严系统中的油气隔离等^[1-2]. 相对于出现的一些封严技术,如刷式封严和环形浮动薄膜封严等,传统的篦齿封严是一种非接触式封严,主要特点是在高

温和高压下可靠性高,工作稳定,加工简单且易于维护^[3-4]. 作为非接触式动封严,旋转效应是不可少的研究内容,目前高转速下的实验研究数据较少.

篦齿封严是通过一系列齿尖的收缩和齿腔的扩张来消耗流体的能量. 当流体流过篦齿时,气流被多次节流加速,一部分压力能转化为动能,这部

收稿日期:2015-11-02

作者简介:孔晓治(1989—),男,河北沧州人,博士生,主要从事发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热方面的研究.

E-mail:kongxiaozhi_lx@163.com

分动能在湍流和黏性耗散的作用下转换成热能而消耗掉,最终达到封严效果^[5-6].国内外学者对篦齿封严的泄漏特性做了大量的研究.纪国剑^[7]在旋转状态下实验研究了直通篦齿和台阶篦齿的封严特性,但转速最大为3000 r/min;王鹏飞等人^[8]实验研究了高转速下直通篦齿的封严特性,但未能实验测量旋转状态下的动态间隙变化;Dennecke等人^[9]在旋转状态下实验研究了进口旋流对单纯篦齿段的风阻温升和旋流发展的影响.Paolillo等人^[10]研究了转速对台阶篦齿泄漏特性的影响,结果表明泄漏流量的大小主要取决于气流周向速度与轴向速度之比.

在航空发动机压气机中随着主流通道压力的升高,为了防止气流通过转子与静子间隙过多的泄漏,必须有级间篦齿封严.图1为某压气机级间封严结构图^[7].压气机级间封严与常规篦齿封严结构不同之处在于篦齿段进出口分别有一个由转子和静子组成的离心旋转盘腔和向心旋转盘腔^[11].Wellborn在低转速下实验研究分析了压气机级间封严流路中的速度和压力参数的变化^[12];Bayley和Childs利用先前关于转盘的扭矩系数公式理论推导预测了级间封严的风阻温升^[13],但并没有得到很好的验证;Leo^[14]在实际发动机中测量了压气机级间封严的温升情况,并且与转盘温升和篦齿段温升的经验公式进行了对比.刘高文等人^[15]利用数值计算的方法研究了转速和进口旋流对压气机级间封严的泄漏特性、温升特性和旋流特性的影响,指出进出口旋转盘腔中旋流的发展是影响级间泄漏和温升的重要因素.总之,当前国内外对于压气机级间封严特性的实验数据较少.

级间泄漏的这股气流除了会引起主流流量减少、压气机压缩功损失外,在转子的作用下产生的

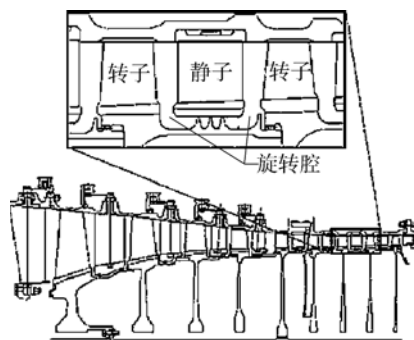


图1 压气机级间篦齿封严结构

Fig. 1 Structure of labyrinth seal in compressor stator well

旋流及风阻温升,也会影响叶根温度、强度、振动和变形.为了更好地了解压气机级间篦齿封严中的泄漏特性、风阻温升特性和旋流特性,本文将研究压气机级间篦齿封严齿顶间隙、流量系数、风阻温升和出口盘腔旋转比随转速变化的情况,以期压气机的结构设计及故障诊断提供帮助.

1 实验装置与测量

1.1 实验模型

真实发动机压气机级间篦齿封严结构包括静叶、动叶、鼓筒等结构,比较复杂,从节省实验成本角度考虑,对某压气机级间篦齿封严结构其中一级进行适当简化后的模型如图2所示.

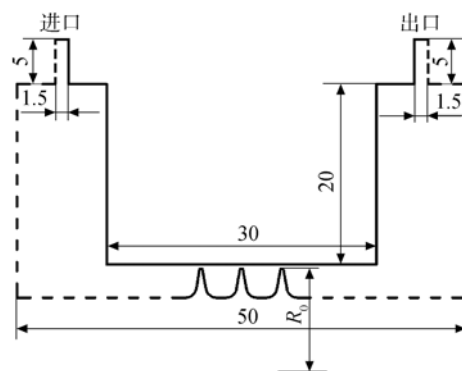


图2 实验简化模型(单位:mm)

Fig. 2 Simplified experimental model (unit:mm)

图2中虚线表示转动壁面,实线表示静止壁面,研究模型进出口各有一个规则的旋转盘腔,具体尺寸如图2,其中转子静态齿顶半径 $R_0 = 250$ mm.研究的齿型为典型封严结构的直通式篦齿,如图3其中齿数 N 为3,齿间距 B 为4.5 mm,齿高 H 为3.2 mm,齿顶间隙 c 在实验中是变化的,动态测得,前、后倾角 α 和 θ 都为 10° ,齿顶厚度 t 为0.3 mm.旋转实验台则根据该研究模型进行实验设计.

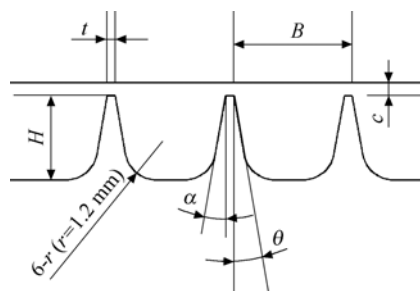


图3 篦齿结构参数

Fig. 3 Structural parameters of labyrinth

1.2 实验装置

实验系统示意图如图 4 所示. 设备主要由压气机、进出口压力调节系统、旋转实验台和测量系统组成. 压气机可以提供最大压力为 0.8 MPa, 最

大质量流量为 1 kg/s 的气体; 利用油润滑冷却系统对旋转实验台的高速旋转的轴承进行润滑冷却. 驱动系统由高速主轴电动机和联轴器组成. 该实验台最大转速可达到 10 000 r/min.

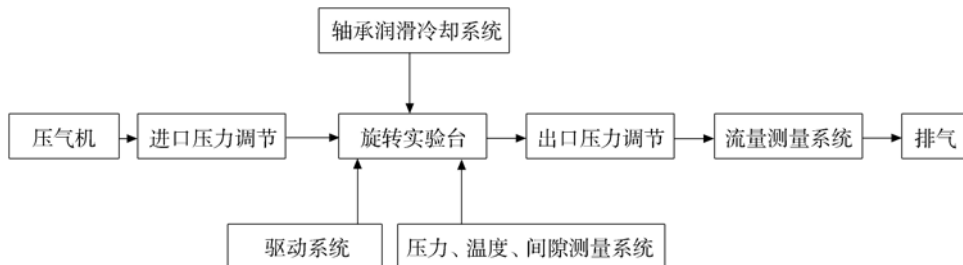


图 4 实验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

压气机级间篦齿封严旋转台的结构如图 5 所示, 为了方便更换实验件及静态齿顶间隙测量, 将转盘设计为左转盘和右转盘两部分, 左右盘间安装篦齿环. 气流由周向 8 个供气孔进入供气腔, 然后经周向若干小孔均匀进入级间封严篦齿实验段, 经出气腔排出. 通过图 3 中的进出口压力调节系统来调节旋转台进气与出气的压力. 由于采用了悬臂梁的结构形式, 下游盘腔的质量流量可以完全收集测量.

实验台中左右盘由非金属复合材料加工, 篦齿环由铝合金加工, 篦齿衬套由尼龙树脂加工, 如图 6 所示. 由于复合材料和尼龙树脂的导热系数很小, 所以忽略环境散热对风阻温升的影响.

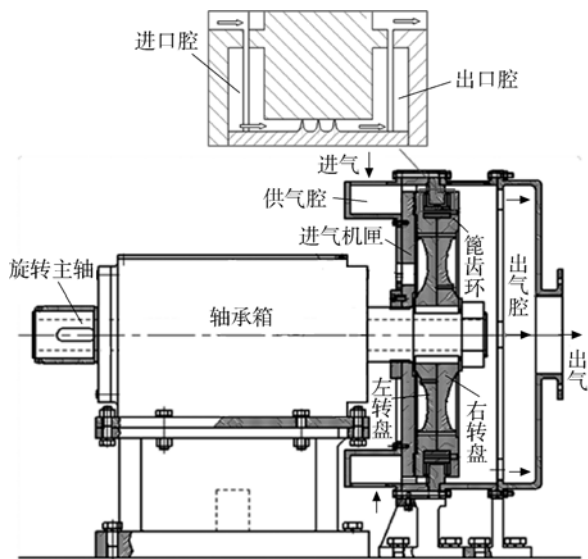


图 5 压气机级间篦齿封严旋转实验台

Fig. 5 Experimental rig of labyrinth seal in compressor stator well

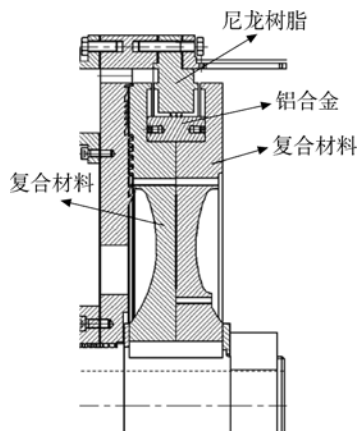


图 6 主要零件加工材料

Fig. 6 Materials of the main parts

1.3 测量方法

实验段测点布置位置如图 7 所示. 将测量截面 1, 4, 2, 3 分别定义为系统入口、系统出口、篦齿入口、篦齿出口; 测量截面 5, 6 为出口盘腔不同径向位置, 分别为 $R_5 = 268$ mm, $R_6 = 258$ mm. 实验时, 测量截面 1 的总压、总温 (由于截面 1 气流速度较低, 以静压代替总压); 截面 2 的静压总温; 截

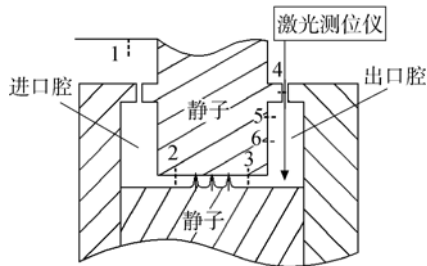


图 7 测点位置分布图

Fig. 7 Distribution of measurement stations

面3的静压、总温;截面4的静压、总温;截面5、截面6的周向速度。

安装好左转盘、篦齿环和篦齿衬套后,利用塞规测量静态齿顶间隙,然后安装右转盘及出气腔。实验中,利用激光测位仪实时监测篦齿环的径向位移变化量,从而在不同转速下可得到准确的齿顶径向间隙及转子半径,激光的测量位置如图7。塞规精度为 $\pm 0.001\text{ mm}$,激光测位仪精度为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。

2 参数定义

压比定义为系统进口总压 p_1^* 与系统出口静压 p_4 之比(截面1压力与截面4压力之比)^[16]

$$\pi = \frac{p_1^*}{p_4} \quad (1)$$

在级间篦齿封严结构中利用流量系数来反映泄漏特性,定义为^[16]

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\text{ideal}}} \quad (2)$$

理想质量流量定义为

$$\dot{m}_{\text{ideal}} = \frac{p_1^* A_1}{\sqrt{T_1^*} R_g} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_4}{p_1^*} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_4}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}$ 为实际质量流量, $\dot{m}_{\text{ideal}}$ 为理想质量流量, p_1^* , T_1^* 和 p_4 分别为系统进口总压、总温和出口静压, R_g 和 κ 分别为气体常数和绝热指数, A_1 为篦齿齿顶的最小流通面积

$$A_1 = 2\pi \times R \times c \quad (4)$$

式中 R 为齿顶处的转子半径。随着转速的增大转子半径和齿顶间隙都是变化的,数据处理时代入的为每个转速下实验测量的实际值。

截面4和截面1的总温差定义为级间篦齿封严的系统风阻温升

$$\Delta T_{\text{sys}} = T_4^* - T_1^* \quad (5)$$

利用旋转比来反映级间封严出口盘腔的旋流特性,定义为^[16]

$$\beta = \frac{V_\varphi}{U} = \frac{V_\varphi}{\omega R_n} \quad (6)$$

式中 V_φ 为截面5和截面6处气流的周向速度, U 为当地的转盘线速度, ω 为旋转角速度, R_n 为截面5和截面6处旋转半径(即 R_5 和 R_6)。

3 级间篦齿封严结构的基本流动特征

利用数值计算,在出口静压为 0.1 MPa ,压比为 1.10 ,转速为 0 r/min 和 8000 r/min 时得到的

级间封严基本的流动特征。

二维的数值计算模型与实验模型完全相同,将计算域划分为多个子域,分块划分网格。篦齿附近采用非结构化三角形网格并适当加密,其他区域采用结构化四边形网格。转子和静子壁面都要划分边界层网格,保证壁面 Y^+ 在1的量级,网格总数为130000左右。

利用Fluent6.3进行求解,物理方程选择二维稳态轴对称旋流模型,方程求解采用分离隐式求解器和SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equation)算法,离散格式为2阶迎风格式。经验证^[17]湍流模型选择realizable $k-\epsilon$ 。进口条件为压力进口,给定进口总压和总温,进气方向为沿径向无旋转;出口条件为压力出口,给定出口静压。篦齿壁面采用转动壁面,上壁面为静止壁面,整个计算域壁面都绝热。

对比图8(a)和图8(b)可以看出,有无转速时进口盘腔(左盘腔)气流流动特征差别较大。从图中可以看出,不加转速时,气流大部分贴着转子壁面进入进口盘腔。加转速时,级间篦齿封严结构中进出口的旋转盘腔为两个转-静旋转盘腔。在气流进入进口盘腔(左盘腔),由于转盘转动,转子壁面附近的气流径向外流,阻碍气流进入盘腔,迫使气流从静子盘附近径向流入盘腔内,并在盘腔中形成一个较大的顺时针方向旋涡。因此进口旋转盘

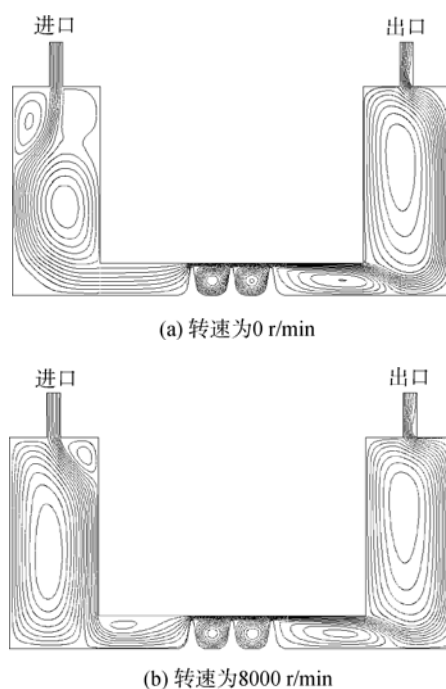


图8 级间篦齿封严结构流线图

Fig. 8 Streamline in the stator well labyrinth seal

腔对级间封严的泄漏起抑制作用. 加转速时, 在出口腔(右盘腔), 气流大部分被卷吸到转子盘面径向外流, 并顺势从出口环缝流出盘腔. 部分气流沿静子面径向内流, 并在盘腔中形成逆时针的旋涡, 这个旋涡对气流的流出起促进作用. 因此出口旋转盘腔对级间封严的泄漏起促进作用. 另外, 在篦齿封严位置, 气流经齿顶节流后在齿腔内部形成了以齿腔中心为涡心的旋涡. 节流损失及齿腔涡流损失是泄漏流的主要流动损失.

4 实验结果与分析

实验工况的压比范围为 1.05~1.30, 转速范围为 1500~8100 r/min.

4.1 转速对齿顶间隙的影响

图 9 为实验件安装后, 利用塞规测得的周向静态齿顶间隙分布. 可以看出, 齿顶间隙有一定的不均匀性, 最大间隙与最小间隙相差 0.3 mm. 数据处理时, 采用平均静态齿顶间隙为 0.988 mm. 在这里值得说明的是, 本文忽略静子机匣的径向变化, 每个转速下的齿顶间隙为平均静态齿顶间隙减去激光测位仪测得平均径向变化量. 图 10 为该实验件在压比 π 为 1.10 和 1.20 时, 齿顶间隙随转速 ω 变化的曲线. 可以看出, 一定压比下, 随着转速的增大, 篦齿环径向位移增大, 使得齿顶间隙减小; 压比为 1.10, 转速为 8100 r/min 时, 齿顶间隙减小到 0.502 mm. 篦齿环径向位移量的大小与旋转产生的离心力及温度有关, 转速的增大使得离心力和气流温升增大导致径向位移量增大.

另外, 在一定转速下, 实验停留时间的长短会

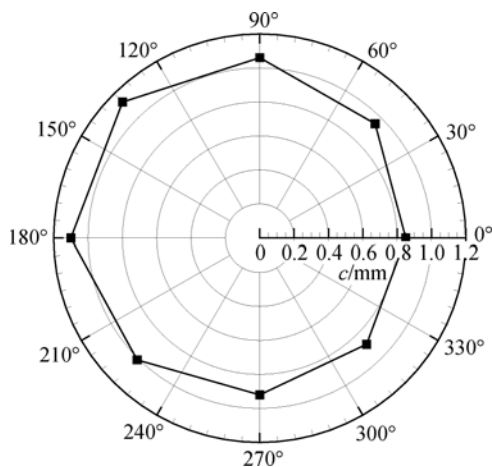


图 9 周向安装齿顶间隙分布

Fig. 9 Circumferential distribution of set up tip clearance

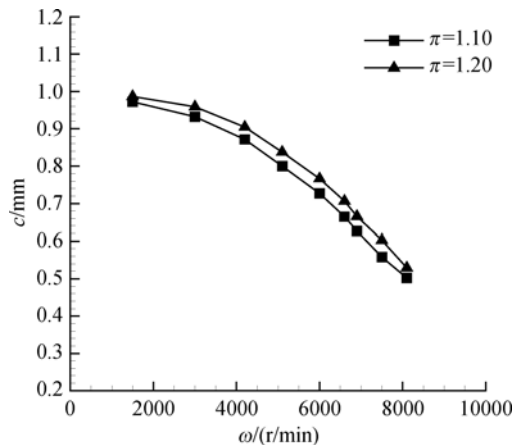


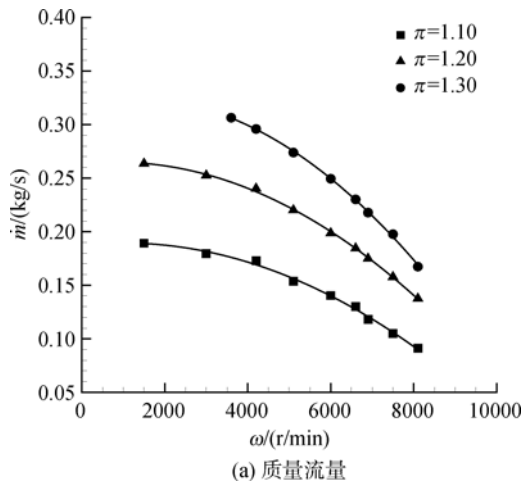
图 10 转速对工作间隙的影响

Fig. 10 Influence of rotational speed on working tip clearance

影响到气流和壁面温度, 从而影响径向位移量的大小. 稳定前, 随着实验停留时间的增大, 篦齿环径向位移量会增大. 本文的实验数据是在实验状态达到稳定时得到的. 所以在一定转速下, 随着压比的增大, 篦齿环径向位移变化量减小(图 10). 齿顶间隙是影响级间篦齿封严泄漏特性的重要参数, 准确测得每个转速下的齿顶间隙, 才能准确研究级间篦齿封严的泄漏特性.

4.2 转速对泄漏特性的影响

图 11(a) 和图 11(b) 给出了压比为 1.10, 1.20, 1.30 时, 质量流量和流量系数随转速的变化曲线. 从图中可以看出, 压比一定时, 随着转速的增大, 流量降低; 转速越大, 流量降低幅度越大. 这是因为, 随着转速的增大, 级间封严流道中旋流的增强和齿顶间隙的减小, 必然使得流量降低. 另外, 随着转速的增大, 压比为 1.10 和 1.20 时, 流量系数降低; 压比为 1.30 时流量系数变化很小; 总体上不同压比时的流量系数相差不大. 在这里



(a) 质量流量

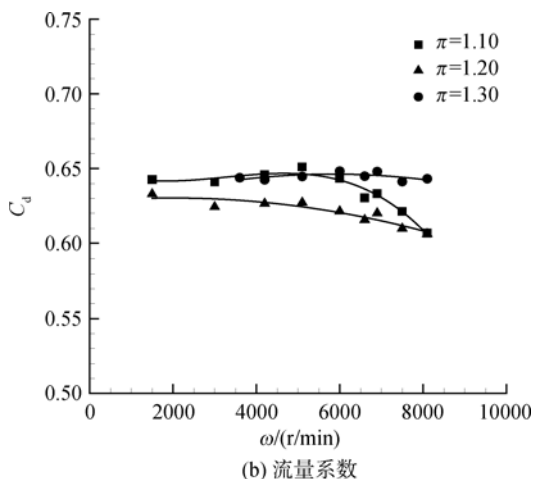


图 11 转速对泄漏特性的影响

Fig. 11 Influence of rotational speed on leakage characteristic

转速对于流量系数的影响是多方面的,随着转速的增大,一方面级间封严进口盘腔的旋流增强,对泄漏的抑制作用增大;另一方面级间封严出口盘腔的旋流增强,对泄漏的促进作用增大;另外,随着转速的增大,齿顶间隙减小,流量减小,使得轴向和径向的沿程损失降低,但气流的节流损失增大.从图中还可以看出,相同转速下,压比为 1.20 时的流量系数小于压比为 1.10 的流量系数,这是由于相同转速下两者的齿顶间隙不同的缘故.

4.3 转速对温升特性的影响

图 12 是在压比为 1.10, 1.20, 1.30 时系统风阻温升 ΔT_{sys} (截面 4 和截面 1 的总温差) 随转速变化的曲线.在一定压比下,系统风阻温升随转速增大而增大,转速越大时,其温升越明显;压比为 1.10 时,当转速达到 8100 r/min 时,温升为 23 K 左右.从机理上来说,随转子表面切向速度的增

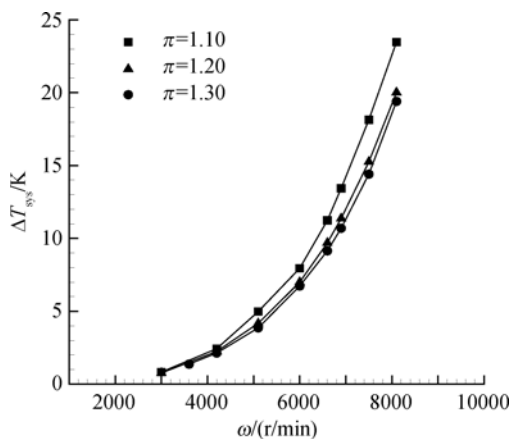


图 12 转速对温升特性的影响

Fig. 12 Influence of rotational speed on windage heating

大,转子对气流做功增多,气流吸收这部分功后总温升高.同时,转速的增大,使泄漏流量降低,也会使温升量增大.另外,相同转速下,压比越大,流量越大,温升越小.

实际发动机中,温度的升高会影响到转子和静子的变形,影响齿顶间隙的大小,从而影响泄漏特性.

4.4 转速对旋流特性的影响

旋流特性与泄漏特性和温升特性密切相关.由于泄漏与气动损失和轴向速度相关,旋流对应的周向速度会对轴向流动有阻碍,旋流越大会使轴向流动损失增大,泄漏减小.另外,旋流较大时,气流与盘间相对周向速度较小,转子对气流做功较小,风阻温升也较小.

图 13 为不同压比下,出口盘腔 $R_5 = 268$ mm 和 $R_6 = 258$ mm 处的旋转比 β 随转速变化曲线.

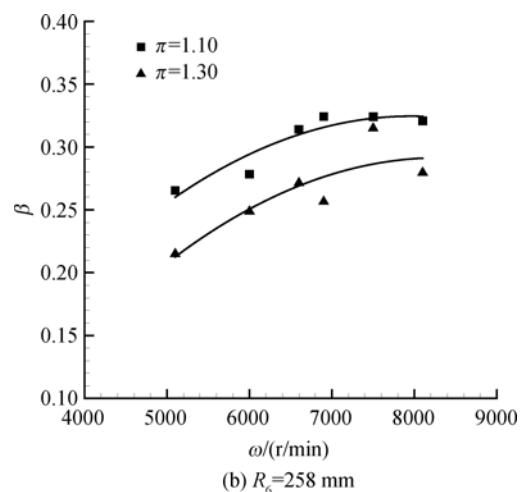
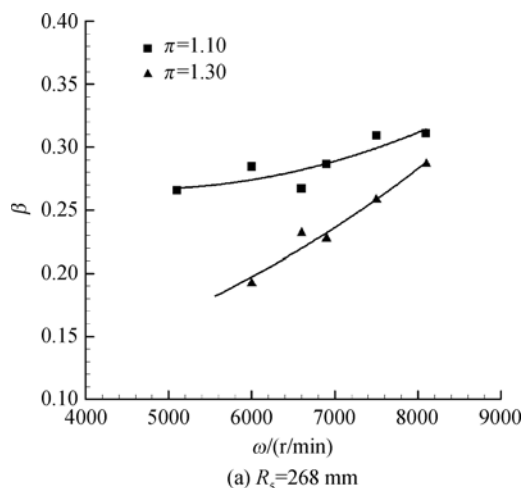


图 13 转速对旋流特性的影响

Fig. 13 Influence of rotational speed on swirl characteristic

从图中可以看出,压比一定时,同一径向位置处的旋转比随转速增大而增大;随着压比的增大,流量增大,旋转比降低。另外,对比图 13(a)和图 13(b)可以看出,相同压比和相同转速时,随着径向位置的增大,旋转比降低。根据旋流的相关理论,旋转盘腔中的气流旋转比沿径向变化在大流量情况下服从自由涡规律^[18]

$$\beta R^2 = \text{const} \quad (7)$$

本文级间篦齿封严结构的两个旋转盘腔由于流量偏小,不完全符合自由涡规律,但可认为近似地服从向心流动旋转比逐渐增大,离心流动旋转比逐渐减小的规律。

5 结 论

通过对压气机级间篦齿封严齿顶间隙变化、泄漏特性、温升特性和旋流特性的实验研究,得出如下结论:

1) 压气机级间封严流道中由于转子转动和进出口旋转盘腔引起的旋流作用是影响其泄漏特性、旋流特性和风阻温升特性的重要因素。

2) 随转速的增大,齿顶间隙减小,流量降低;小压比时流量系数降低,较大压比时流量系数变化较小。

3) 系统风阻温升随转速增大而增大,转速越大时,其温升越明显。

4) 随着转速的增大,出口盘腔同一径向位置的旋转比增大;同一转速下,随着出口盘腔径向位置的增大,旋转比降低。

参考文献:

- [1] 杨军. 直通型封严篦齿流动特性的试验研究及数值计算[D]. 成都:电子科技大学工程, 2009.
YANG Jun. Experimental investigation and numerical study of straight-through labyrinth characteristics of flow [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [2] 李志刚, 李军, 丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 142-148.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Numerical investigation on discharge behavior and predication formula establishment of leakage flow rate of honeycomb seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 142-148. (in Chinese)
- [3] Rhode D L, Adams R G. Computed effect of rub-groove size on stepped labyrinth seal performance[R]. ASME Paper GT2000-0292, 2000.
- [4] Willenborg K, Kim S, Wittig S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 2001-GT-0123, 2001.
- [5] 陈凯. 复杂参数影响下的级间封严流动特性和磨损特性研究[D]. 西安:西北工业大学, 2014.
CHEN Kai. Investigations on the flow characteristics of a labyrinth seal with and without rub-grooves in a stator well under complicated parameters[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014. (in Chinese)
- [6] Micio M, Facchini B, Innocenti L, et al. Experiment investigation on leakage loss and heat transfer in a straight through labyrinth seal[R]. ASME Paper GT2011-46402, 2011.
- [7] 纪国剑. 航空发动机典型篦齿封严泄漏特性的数值和实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
JI Guojian. Numerical and experimental investigation of sealing characteristics on typical labyrinth seals in aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [8] 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 Experimental and Research, 2007, 20(2): 45-48. (in Chinese)
- [9] Denecke J, Dullenkopf K, Wittig S, et al. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals[R]. ASME Paper 2005-GT-68677, 2005.
- [10] 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.
- [11] 刘高文, 陈凯, 刚铁, 等. 压比和雷诺数对压气机级间篦齿封严流动特性的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1554-1560.
LIU Gaowen, CHEN Kai, GANG Tie, et al. Influences of pressure ratio and Reynolds number on flow characteristics of labyrinth seal in compressor stator well[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1554-1560. (in Chinese)
- [12] Wellborn S R. Details of axial compressor shrouded stator cavity flows[R]. ASME Paper 2001-GT-0495, 2001.
- [13] Bayley F J, Childs P R N. Air temperature rises in compressor and turbine stator wells[R]. ASME Paper 1994-GT-185, 1994.
- [14] Leo V L. In-engine measurements of temperature rises in axial compressor shrouded stator cavities[R]. ASME Paper 2002-GT-30245, 2002.
- [15] 刘高文, 孔晓治, 陈凯, 等. 转动和旋流对压气机级间封严影响的数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1687-1693.
LIU Gaowen, KONG Xiaozhi, CHEN Kai, et al. Numerical study of the influences of rotation and swirl on labyrinth sealing in a compressor stator well[J]. Journal of Propul-

- sion Technology, 2014, 35(12):1687-1693. (in Chinese)
- [16] 夏全忠. 直通型封严齿瞬稳态特性研究[D]. 西安:西北工业大学, 2012.
- XIA Quanzhong. Investigations transient-static properties of straight labyrinth seal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [17] 孔晓治, 刘高文, 陈凯. 齿位置对压气机级间封严影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12):2925-2933.
- KONG Xiaozhi, LIU Gaowen, CHEN Kai. Numerical study on the influences of tooth position in a compressor stator well sealing [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(12):2925-2933. (in Chinese)
- [18] Peter R N. Rotating flow [M]. Burlington, US: Butterworth-Heinemann, 2011.

(编辑:王碧珺)