有无蜂窝的直通斜齿流动特性旋转实验研究 *

聂顺鹏，刘高文，雷　昭，冯　青

（西北工业大学 动力与能源学院，陕西 西安 710072）

摘　要：为了研究蜂窝对直通斜齿流动特性的影响，在光滑衬套和蜂窝衬套条件下的高速旋转篦齿实验台上，分别测量了工作间隙和流动特性随转速0~8700r/min和压比1.1~1.5的变化规律。实验结果表明：随着转速的增加，泄漏量下降了约50%，流量系数下降了约25%，风阻温升达到40K；随着压比的增加，泄漏量和流量系数也相应增加；蜂窝衬套相对于光滑衬套，流量下降了约20%，流量系数下降了约10%，风阻温升差异微小。蜂窝可以使篦齿流量及流量系数降低，提升封严性能，对风阻温升影响很小。

关键词：篦齿封严；直通斜齿；蜂窝衬套；流动特性；旋转

中图分类号：V231.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4055（2020）05-1015-08

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 190346

Experimental Study on Rotation on Flow Characteristics of Straight-Through Inclined Tooth with or Without Honeycomb

NIE Shun-peng，LIU Gao-wen，LEI Zhao，FENG Qing

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

Abstract：In order to study the effects of honeycomb on the flow characteristics of straight-through inclined tooth，the variation of working clearance and discharge characteristics with rotational speed 0~8700r/min and pressure ratio 1.1~1.5 were measured on the experiment rig of a high-speed rotating labyrinth under the cases with smooth bushing and honeycomb bushing. The experimental results show that with the increase of the rotational speed，the leakage flow decreases by about 50%，the discharge coefficient decreases by about 25%，and the windage heating rises to 40K. As the pressure ratio increases，the leakage flow and the discharge coefficient increase accordingly. With respect to the smooth bushing case，the mass flow rate with honeycomb bushing decreases by about 20%，the discharge coefficient drops by about 10%，and the difference of windage heating is slight. Honeycomb can reduce the mass flow rate and discharge coefficient of the labyrinth seal，and improve the sealing performance，and have little effect on the windage heating.

Key words：Labyrinth seal；Straight-through inclined tooth；Honeycomb bushing；Flow characteristic；Rotation

1　引　言

篦齿封严结构是一种被广泛运用的非接触式封严结构，它能够减小泄漏量的原因在于：气流流过齿顶与封严环面之间的齿顶间隙时气流被节流压缩，进入齿腔后气流突然膨胀并产生旋涡，从而使气流

*　**收稿日期**：2019-05-26；**修订日期**：2019-07-30。

作者简介：聂顺鹏，硕士生，研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热。E-mail：1398723121@qq.com

通讯作者：刘高文，博士，教授，研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热。E-mail：gwliu@nwpu.edu.cn

引用格式：聂顺鹏，刘高文，雷　昭，等. 有无蜂窝的直通斜齿流动特性旋转实验研究[J]. 推进技术，2020，41(5)：1015-1022.（NIE Shun-peng，LIU Gao-wen，LEI Zhao，et al. Experimental Study on Rotation on Flow Characteristics of Straight-Through Inclined Tooth with or Without Honeycomb[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2020，41(5)：1015-1022.）

的流阻增大，气流的能量被耗散，进而导致篦齿封严结构的压差减小，泄漏量减小。在航空发动机中，篦齿封严结构往往用于小间隙、高温和高转速的条件下，为了保证其能平稳地工作，篦齿上方的封严环面往往设计成可磨的。而目前金属蜂窝在航空发动机运用比较广泛，除了金属蜂窝的可磨损性，还在于金属蜂窝在一定程度上能够减小泄漏量，提高封严效果。

Kong等[1]实验研究发现，由于旋流的存在，有效流通面积减小，在压气机静叶的进出口腔内，离心泵效应对其泄漏特性起着十分重要的作用。Li等[2]指出泄漏流量是涡轮流动损失的主要来源之一。YAN等[3]通过计算研究表明，在相同的压比下蜂窝封严的泄漏特性比无蜂窝封严泄漏特性要好。Fraczek等[4-5]认为，减少涡轮机中的泄漏流量和机器安全运行是需要在设计过程中同时考虑的两个因素，并通过数值计算发现流量系数是随着间隙的变化而变化的。除此之外，通过对蜂窝的研究发现，气流流经蜂窝时会进入蜂窝内部从而能使得气流的泄漏量减少。孙丹等[6]分析得出风阻温升效应产生的主要原因是流经封严间隙的气流与高速旋转的转子相互摩擦导致的，文章研究过程中没有对高低齿实验件的初始间隙以及转动过程中的动态间隙如何测量进行相关的描述，而篦齿动态间隙却是影响风阻温升一个比较重要的因素。高杰等[7]通过数值运算发现，采用蜂窝面的迷宫密封能有效降低泄漏，减少泄漏的主要原因是因为泄漏流体进入蜂窝后，被蜂窝的六边形壁面限制，从而增大了旋涡的阻力，进而使得气流的能量被耗散导致的，此数值计算的结果也正好验证了本文的研究结果。王代军等[8]研究发现，转速小于1kr/min时，气流的流量系数基本不变，当转速高于1kr/min时随着转速的增加，流量系数会相应下降，原因来源于随着转速的增加，气流的方向以及篦齿的流通面积将会发生相应的改变，从而导致气流的流量系数下降。纪国剑等[9-10]运用数值计算方法研究发现，在一定范围内增加蜂窝单元尺寸会使得气流与蜂窝壁面的摩阻增加从而导致泄漏量下降，并且通过实验发现风阻温升主要是由篦齿盘转动时与泄漏气体摩擦生热以及泄漏气体之间的粘性生热组成的，但是作者在研究风阻温升时没有考虑传热的影响，随着转速增加，篦齿盘对气流做功增加，传热的影响也会增大。王鹏飞等[11]研究发现各转速下流量参数随压比的增大而持续增大。刘高文等[12]研究压比和雷诺数对压气机级间篦齿封严流动特性的影响，发现随着雷诺数的增大，篦齿流量系数先显著增大后逐渐趋于不变。胡东旭等[13]在篦齿封严泄漏特性的实验中指出，泄漏系数随着压比的提高而增大，但压比达到1.6后，增大趋势逐渐变缓，文章运用螺栓来间接地进行间隙的调节，此方法会对间隙的结果带来一定的误差，而且文章在对压比中进出口压力的测量时测点布置在靠近篦齿的位置，但是此位置的速度变化比较剧烈，会影响压力的测量准确性。郭海龙等[14]通过实验研究发现，工作间隙一定时，随着转速的增加，篦齿密封特性增强。孔晓治等[15]研究转速对压气机级间篦齿封严影响，实验发现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，而且系统风阻温升主要是受转速的影响。

目前，高转速条件下的旋转篦齿蜂窝结构的实验数据较少，因此本文运用实验的方法对直通斜齿-蜂窝结构进行了研究，分别在有蜂窝衬套和无蜂窝衬套条件下研究了压比和转速对旋转篦齿流动特性的影响。

2 实验装置和测量系统

2.1 实验台

实验台主要由供气系统、实验段、出气系统、驱动系统以及测量系统组成，具体示意图如图1所示。压气机可以提供最大压力为0.8MPa，最大连续流量为0.5kg/s的恒温气流；通过进出口压力调节装置可以实现进出口压力的连续变化；驱动系统由高速电机联轴器和电机的水冷系统组成，电机最高转速可以达到10kr/min；利用润滑油对实验台高速旋转的轴承系统进行润滑及冷却；测量系统包括压力、温度和间隙的测量。图2展示了气流在实验段的流动路径，从压气机来的气流通过进气机匣进气腔后分成两股，一股气体冷轴流经篦齿与机匣的环腔后流入中介机匣，最后通过出气机匣流出到孔板流量计进行质量流量的测量，另一股气体沿径向流经篦齿，进入转盘与进气机匣组成的盘腔后排入大气。

2.2 实验件

根据某发动机的篦齿结构参数，设计加工了如图3所示的篦齿实验件。

篦齿具体尺寸为：

转盘半径 r=293.7mm，齿顶宽度 t=0.45mm，无量纲齿高 $\frac{h}{t}$ = 13.33，无量纲齿间距 $\frac{P}{t}$ = 13.33，无量纲

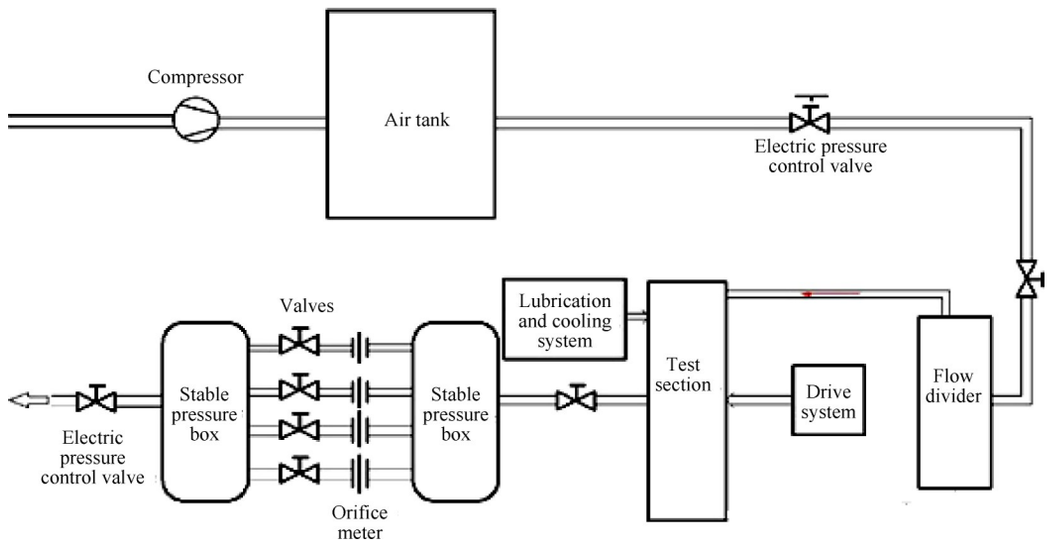


Fig. 1　Diagram of experiment system

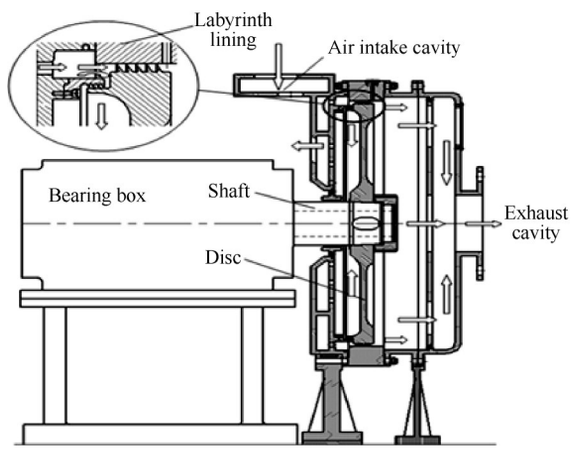


Fig. 2　Diagram of experiment rig for rotating labyrinth

间隙$\frac{c}{t}$ = 1.09(0转速下测量间隙),齿前倾角α = 15°齿后倾角β = 30°。根据实验研究的需要,设计加工了如图4所示的环形蜂窝结构实验件。蜂窝的具体尺寸为:蜂窝单元直径为d=0.8mm,蜂窝的厚度δ=0.05mm,蜂窝的高度为h=5mm,蜂窝的半径为R=294.15mm。

2.3　参数测量

实验段测点布置如图5所示,定义截面1~4分别

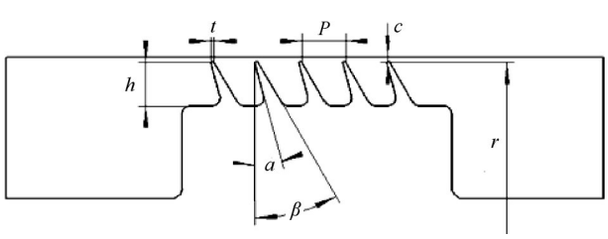


Fig. 3　Diagram of rotating labyrinth and geometrical dimensons

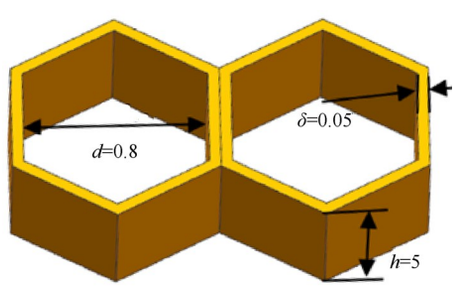


Fig. 4　UG diagram of honeycomb structure (mm)

为系统进口、篦齿进口、篦齿出口和系统出口。实验时,截面1上不同的周向位置打直径1.6mm的圆孔来测量系统进口的静压和总温;截面2测量篦齿进口的总压(此截面的气流速度较低,因此用静压代替总压)和总温;截面3上不同周向位置打直径1.6mm的圆孔来测量篦齿出口的静压、周向总压和总温,除此之外,在截面3上不同的周向位置打2个矩形孔来放置玻璃以便于激光测量转盘和机匣的变形;截面4不同的周向位置打直径1.6mm的圆孔来测量系统出口静压、周向总压和总温。

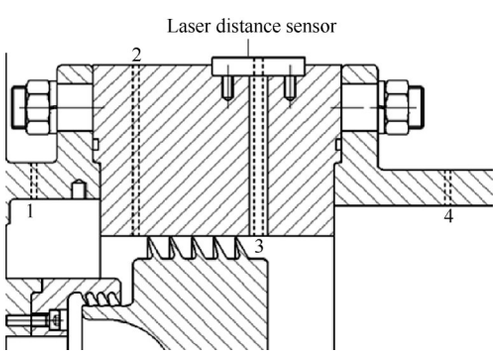


Fig. 5　Position diagram of measuring point at experimental section

2.4 误差分析

由于实验过程中实验件的加工精度和测量仪器会给实验数据带来一定的误差，因此，为了保证实验数据的准确性，本文对实验进行了误差分析，其中实验过程中所用的测量仪器都经过标定。实验中静态间隙用塞规测量，测量精度为±0.01mm，动态间隙由激光位移传感器测量，测量精度为±0.01mm，压力用压力扫描阀测量，精度为±0.05%，温度用温度扫描阀测量，精度为±1K。

通过误差传递公式可以得到相对误差传递公式为

$$\frac{\mathrm{d}y}{y}=\sqrt{\left(\frac{x_1}{y}\frac{\partial y}{\partial x_1}\frac{\mathrm{d}x_1}{x_1}\right)^2 L\cdots+\left(\frac{x_m}{y}\frac{\partial y}{\partial x_m}\frac{\mathrm{d}x_m}{x_m}\right)^2} \tag{1}$$

根据传递公式可计算得到齿顶间隙的误差为 $\left|\frac{\Delta c}{c}\right|_{\max}=\left|\frac{0.01}{0.29}\right|=3.45\%$，其中 Δc 为测量精度，c 为实验时最小的齿顶间隙，实际流量的最大误差为1.07%，理想流量的最大误差为3.47%，流量系数的最大误差为3.63%，因此旋转篦齿实验数据的主要误差来源于齿顶间隙的测量。

2.5 参数定义

随着转速的增加，篦齿由于离心力的影响，导致篦齿的半径会发生变化，而机匣为非金属材料，随着转速增加，温度升高，机匣会发生变形，从而导致篦齿工作间隙在不停的变化，实验时通过两个激光位移传感器分别实时监测，其中一个传感器测量转盘的变形量和另外一个传感器测量机匣的变形量。篦齿工作间隙定义为

$$c=c_0+\Delta s-\Delta r \tag{2}$$

式中 c_0 为初始间隙，Δs 为机匣的变形量，Δr 为转盘的变形量。篦齿进出口压比定义为

$$\pi=\frac{p_0^*}{p_1} \tag{3}$$

式中 p_0^* 为1截面所测的进口总压（由于速度低，用静压代替），p_1 为4截面所测的出口静压。理想流量定义为

$$m_{\mathrm{id}}=\frac{p_0^* A}{\sqrt{R_{\mathrm{g}}T_0^*}}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\left[\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \tag{4}$$

式中 T_0^* 为1截面所测的进口总温，R_{g} 为气体常数，k 为定熵指数，A 为最小流通面积。由于篦齿顶部与机匣之间为一个环形腔，因此最小流通面积 A 近似为式(5)所示。

$$A=2\times\pi\times r\times c\quad \pi取3.14 \tag{5}$$

式中 r 为转盘半径，c 为齿顶间隙。流量系数定义为

$$C_{\mathrm{D}}=\frac{m}{m_{\mathrm{id}}} \tag{6}$$

式中 m 为实际流量，m_{id} 为理想流量。风阻温升定义为

$$\Delta T=T_{\mathrm{outlet}}^*-T_{\mathrm{inlet}}^* \tag{7}$$

式中 T_{inlet}^* 表示的是1截面所测的进口总温，T_{outlet}^* 表示的是4截面所测的出口总温。

3 实验结果及分析

3.1 转速对旋转篦齿流动特性的影响

3.1.1 工作间隙

本节主要研究了各压比下，转速从0r/min增加到8.7kr/min时旋转篦齿工作间隙的变化。图6分别描述了在蜂窝衬套和光滑衬套条件下，旋转篦齿工作间隙随转速的变化。从图中可以看出，无论是在蜂窝衬套还是光滑衬套条件下，随着转速的增加，工作间隙都逐渐减小。当转速小于3kr/min时，旋转篦齿工作间隙随转速变化不是十分明显。当转速超过3kr/min时，旋转篦齿工作间隙随转速变化更加剧烈。转速由0r/min增加到8.7kr/min时，旋转篦齿工作间隙减小了约0.2mm。这主要是因为随着转速的增加，一方面转盘对气流做功增加，气流温度升高，对转盘和机匣会产生径向位移，由于转盘是钛合金材料，机匣是非金属材料，所以温度对转盘伸长量的影响大于对机匣伸长量的影响。另一方面转速会使转盘的离心作用加大，导致转盘径向伸长，根据式(2)可知在温度和离心双重作用情况下，随着转速的增大，旋转篦齿的工作间隙会逐渐减小。

3.1.2 泄漏特性

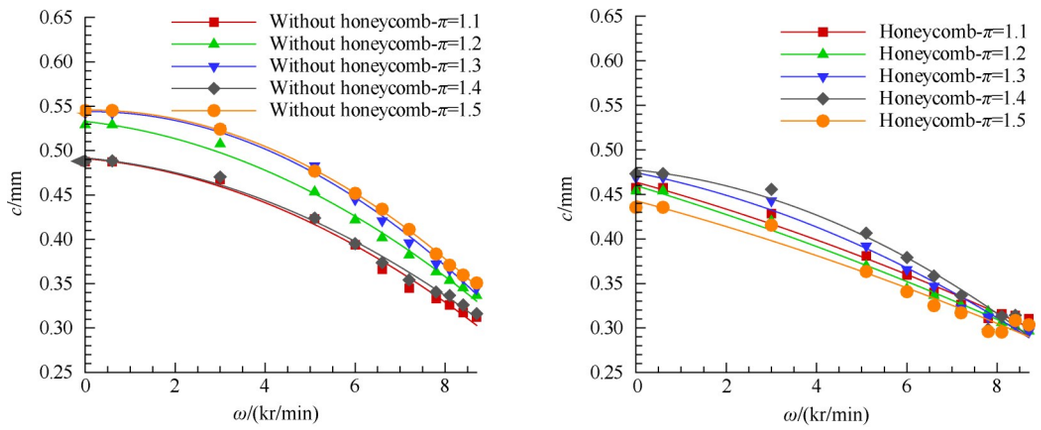
本节研究了压比分别为1.1，1.2，1.3，1.4和1.5的情况下，转速从0r/min增加到8.7kr/min时旋转篦齿泄漏特性的研究。图7和图8描述了泄漏流量 m 和流量系数 C_{D} 随转速变化的趋势图，从图中可以看出，无论在蜂窝衬套还是光滑衬套的条件下，随着转速的增加，泄漏流量和流量系数都减小。在光滑衬套条件下，转速由0r/min变化到8.7kr/min时，流量下降了约50%，流量系数下降了约22%。在蜂窝衬套条件下，转速由0r/min变化到8.7kr/min时，流量下降了约52%，流量系数下降了约25%。

泄漏流量和流量系数减小的主要原因有：(1)随着转速的增加，转子产生了离心力，导致齿顶间隙减

小，流体流经篦齿的有效流通面积减小，泄漏流量和流量系数都减小；(2)随着转速的增加，气流流经齿尖的周向速度增大，轴向速度减小，泄漏流量和流量系数都减小。

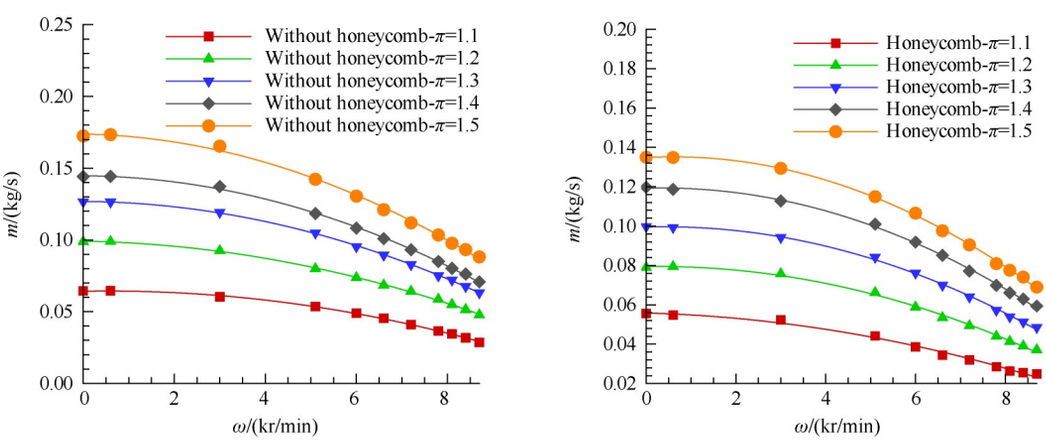
3.1.3　风阻温升

在保证相同压比的情况下，本节研究了转速从5.1kr/min变化到8.7kr/min时旋转篦齿风阻温升的变化。图9表示了风阻温升随转速的变化，从图中可以看出，在蜂窝衬套和无蜂窝衬套的情况下，随着转速的增加，风阻温升也增大。当转速增加到8.7kr/min时，在蜂窝衬套和无蜂窝衬套情况下，温升增加了约40K。这主要是由于随着转速的增加，转子对气流所做的功增大，从而使得气流的内能增加。根据能量守恒方程得出



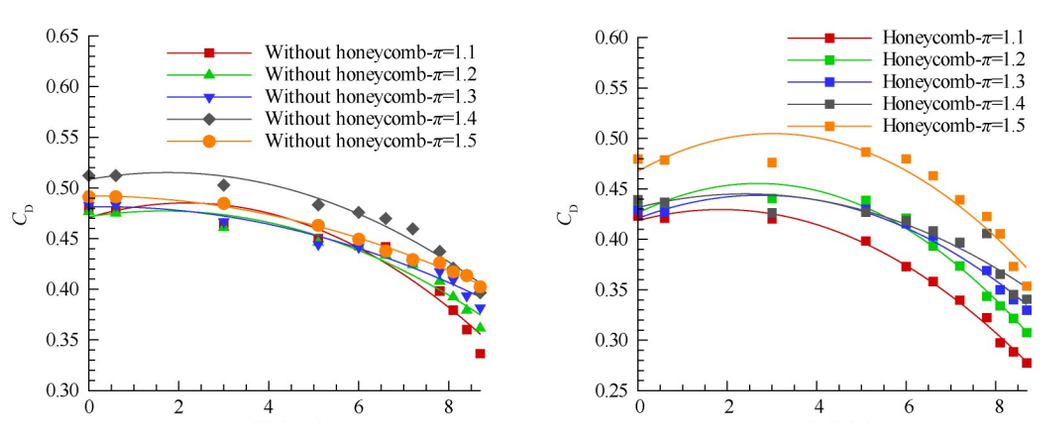
(a) Smooth bushing　　(b) Honeycomb bushing

Fig. 6　Working clearance changes with rotational speed



(a) Smooth bushing　　(b) Honeycomb bushing

Fig. 7　Leakage mass flow changes with rotational speed



(a) Smooth bushing　　(b) Honeycomb bushing

Fig. 8　Discharge coefficient changes with rotational speed

$$\Delta T = \frac{M_R \omega}{m C_p} \tag{8}$$

式中 ΔT 为风阻温升，C_p 为定压比热容，M_R 为转盘的摩阻力矩，ω 为转盘的旋转速度。

从式(8)中可以看出，风阻温升主要取决于 M_R，ω，m 和 C_p 四个因素的影响，当转子转速增加时，齿顶间隙减小，m 减小，从而导致在高转速时风阻温升的增加幅度更大。在实际发动机中，由于风阻温升的影响，会导致转子以及静子的径向变形，从而导致篦齿工作间隙的变化，最终会影响篦齿的泄漏特性。

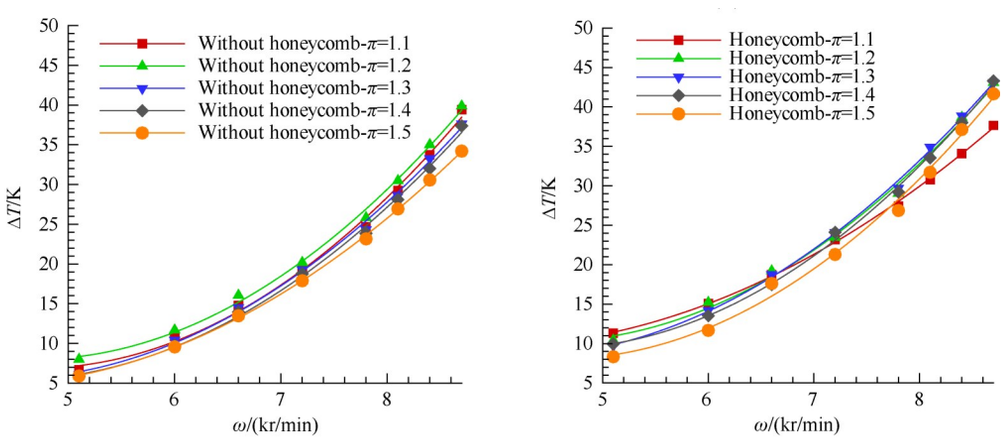
3.2 压比对旋转篦齿流动特性的影响

在保证转速相同的情况下，本节研究了在有蜂窝衬套和光滑衬套两种条件下，旋转篦齿泄漏特性随压比的变化。图 10 和图 11 描述了压比从 1.1 变化到 1.5 时，泄漏流量和流量系数的变化趋势。从图中可以看出：在转速一定的情况下，压比从 1.1 增大到 1.5 时，泄漏流量和流量系数都相应增大，在光滑衬套条件下，压比从 1.1 增大到 1.5 时，泄漏流量增加了约 180%，流量系数增加了约 10%。在蜂窝衬套条件下，压比从 1.1 增大到 1.5 时，泄漏流量增加了约 170%，流量系数增加了约 20%。这是因为随着压比的增大，齿尖的节流效果增强，可压缩性好。除此之外在小压比时，泄漏流量和流量系数增加的幅度比大压比时更大，这主要是因为小压比时泄漏流量和流量系数较小，气流受黏性和可压缩性的影响比较大，压比较大时泄漏流量和流量系数都较大，此时气流受黏性和可压缩性的影响较小，因而大压比时泄漏流量和流量系数增加的幅度较小。

3.3 蜂窝衬套对旋转篦齿流动特性的影响

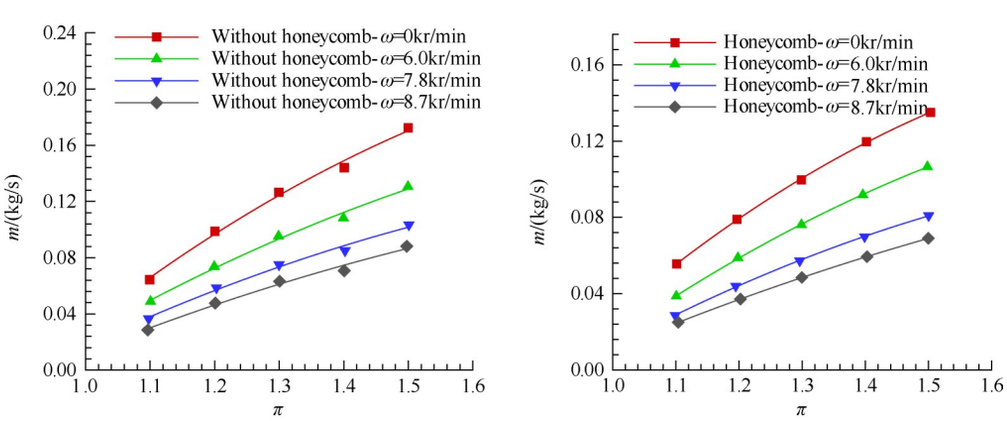
3.3.1 泄漏特性

在保证压比和转速相同的情况下，本节研究了蜂窝衬套对旋转篦齿封严特性的影响。图 12 描述了蜂窝衬套与光滑衬套对旋转篦齿泄漏特性的影响。从图中可以看出在同压比、同转速的情况下，蜂窝衬套下的泄漏流量和流量系数都小于光滑衬套的泄漏流量和流量系数，泄漏流量最大相差约 25%，平均相差约 20%，流量系数最大相差约 20%，平均相差约 10%，这就表示蜂窝衬套有助于提高旋转篦齿的封严特性。造成这一现象的主要原因是当篦齿的工作间隙以及其它气动参数一定时，蜂窝衬套壁面粗糙度



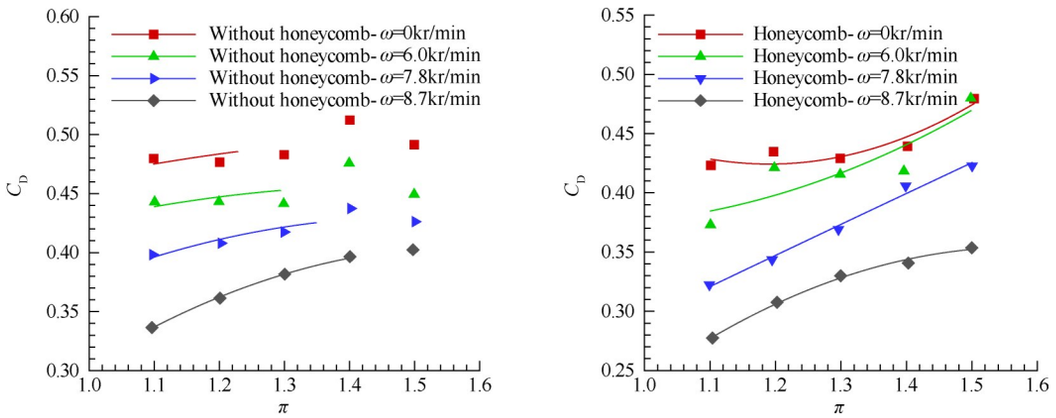
(a) Smooth bushing (b) Honeycomb bushing

Fig. 9 Windage heating changes with rotational speed



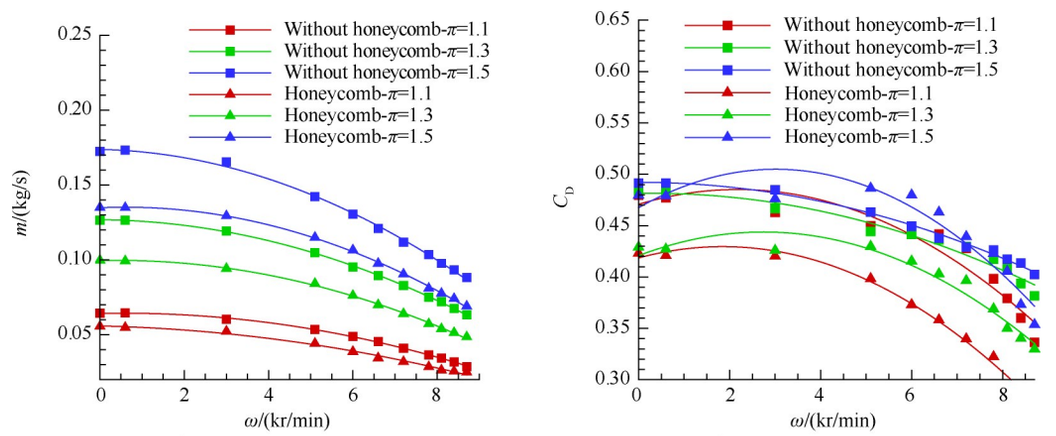
(a) Smooth bushing (b) Honeycomb bushing

Fig. 10 Leakage mass flow changes with pressure ratio



(a) Smooth bushing　　(b) Honeycomb bushing

Fig. 11　Discharge coefficient changes with pressure ratio



(a) Leakage mass flow　　(b) Discharge coefficient

Fig. 12　Comparison of leakage characteristics between honeycomb bushing and smooth bushing

大于光滑衬套，蜂窝衬套相当于一个粗糙壁面，当气流流经篦齿与蜂窝的环缝时，气流与蜂窝壁面接触，气流的流动阻力增大，气流的流动速度下降，因而导致了泄漏流量和流量系数的下降。

3.3.2　风阻温升

在保证压比和转速相同的情况下，本节研究了蜂窝衬套对旋转篦齿风阻温升的影响。图 13 表示了在压比 1.1，1.3 和 1.5 时，蜂窝衬套和光滑衬套条件下，风阻温升随转速的变化情况。从图中可以看出，蜂窝衬套相比于光滑衬套，二者的风阻温升在压比 1.1，转速较低时，光滑衬套条件下风阻温升略高，高转速时则表现为蜂窝衬套条件下略高；压比 1.3 时，光滑衬套条件下风阻温升较高；压比 1.5 时，则表现为蜂窝衬套条件下风阻温升较高，但是两种衬套条件下风阻温升的差异在 5K 范围内，可以认为蜂窝影响微小。由式(8)可以看出，风阻温升主要是由转速和泄漏流量这两个因素决定的，因此在保证气动参数和篦齿几何参数一致的情况下，蜂窝衬套对风阻温升影响微小。

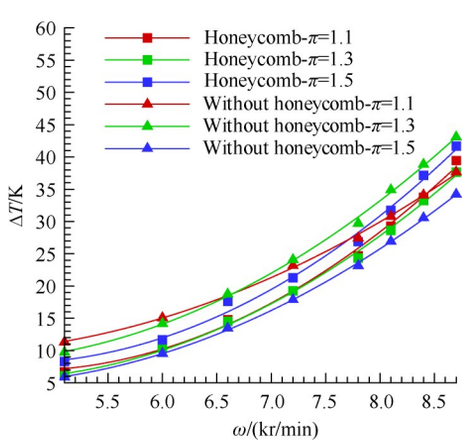


Fig. 13　Influence of honeycomb bushing on windage heating

4　结　论

通过实验研究转速、压比和蜂窝衬套对旋转篦齿的泄漏特性、风阻温升影响得出如下结论：

(1)随着转速的增加，齿顶间隙减小，旋转篦齿泄漏流量和流量系数都减小，泄漏流量减小约 50%，

流量系数减小约20%。同时气流风阻温升增加,当转速大于6kr/min时,气流风阻温升增加幅度更大,在最高转速8.7kr/min时风阻温升达到40K。

(2)随着压比的增大,旋转篦齿的泄漏流量和流量系数都相应增大,流量系数最大可增加19%,并且在小压比时泄漏流量和流量系数增加的幅度大于大压比的增加幅度。

(3)蜂窝衬套相对光滑衬套泄漏量下降了约20%,流量系数下降了约10%;蜂窝衬套和光滑衬套风阻温升的差异约5K,可以认为蜂窝衬套对旋转篦齿的风阻温升影响较小。

致 谢:感谢陈震、屠杰和李鹏飞在实验工作过程中的大力支持。

参考文献

[1] Xiaozhi Kong, Gaowen Liu, Yuxin Liu, et al. Experimental Testing for the Influences of Rotation and Tip Clearance on the Labyrinth Seal in a Compressor Stator Well[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 71: 556-567.

[2] Li J, Kong S, Yan X, et al. Numerical Investigations on Leakage Performance of the Rotating Labyrinth Honeycomb Seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(6).

[3] Yan X, Li J, Feng Z. Effects of Inlet Preswirl and Cell Diameter and Depth on Honeycomb Seal Characteristics [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(12).

[4] Fraczek D, Bochon Krzysztof, Wróblewski Wlodzimierz, et al. Influence of Honeycomb Rubbing on the Labyrinth Seal Performance[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(1).

[5] Fraczek D, Bochon K, Wróblewski W. Influence of Honeycomb Land Geometry on Seal Performance[R]. *ASME GT* 2016-57569.

[6] 孙 丹,卢 江,刘永泉,等. 篦齿封严风阻温升特性研究[J]. 航空学报, 2018, 39(11): 70-79.

[7] 高 杰,郑 群,李义进. 动叶顶部蜂窝面迷宫密封对涡轮级气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 160-168.

[8] 王代军,苏云亮,罗 翔. 旋转状态下篦齿流量特性试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 41-44.

[9] 纪国剑,吉洪湖. 旋转状态下篦齿-蜂窝结构封严特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(z1): 161-164.

[10] 纪国剑,吉洪湖,黄云霞,等. 直通篦齿蜂窝封严结构的风阻特性试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2655-2660.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 胡东旭,贾 力,杨立新. 篦齿封严泄漏特性的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 549-555.

[14] 郭海龙,冯 青,刘高文,等. 考虑间隙变化的旋转篦齿流动特性实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1779-1786.

[15] 孔晓治,刘高文,雷 昭,等. 转速对压气机级间篦齿封严影响的实验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1575-1582.

(编辑:史亚红)