

# 凸起数对各封严结构封严效率影响的实验

王 鸣<sup>1,2</sup>, 邬泽宇<sup>1</sup>, 罗 翔<sup>1,3</sup>, 胡彦文<sup>1</sup>, 曹 楠<sup>1</sup>  
(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院  
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;  
2. 中国航空发动机集团 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;  
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

**摘 要:** 实验用二氧化碳体积分数测量法研究了凸起数目的变化对盘腔内各参数(静压、总压、封严效率)的影响,目的是获得不同封严结构的封严效率和最小封严流量随凸起数目的变化规律。实验在主流雷诺数和旋转雷诺数为一定范围内,测量了不同封严流量下的参数。结果表明:在实验工况范围内,凸起的数目变化对腔内的静压影响较小,靠近封严环的静压变化几乎可以忽略;而总压和封严效率都和凸起数目成正比,但不同封严结构的变化程度有所不同。从整体上看,径向封严结构效率的提升最明显,轴向封严和静盘双齿封严改善较小。平均每增加一个凸起,三种结构所需的最小封严流量分别可以减少 0.96%、0.30%、0.28%。此外,安装了凸起后,旋转雷诺数对封严效率的影响也会更加明显。  
**关 键 词:** 燃气入侵; 转静系; 轮缘封严; 凸起数目; 封严效率  
**中图分类号:** V231.3      **文献标志码:** A

## Experiment on the effect of protrusion amount on sealing efficiency of different rim seals

WANG Ming<sup>1,2</sup>, WU Zeyu<sup>1</sup>, LUO Xiang<sup>1,3</sup>, HU Yanwen<sup>1</sup>, CAO Nan<sup>1</sup>  
(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;  
2. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;  
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The effect of different protrusion amounts on various parameters (static pressure, total pressure, sealing efficiency) was experimentally studied by measuring carbon dioxide volume fraction, so as to obtain the change rule of the sealing efficiency and the minimum flow rate of sealing air of different sealing structures. In the experiment, the experimental parameters of different dimensionless sealing flow rates were measured under the condition that the annulus Reynolds number and the rotating Reynolds number changed within a certain range. The results show that the change of the protrusions amount has little effect on the static pressure in the cavity, and the static pressure change near the sealing ring is almost negligible. The total pressure and sealing efficiency will increase with the increasing protrusion amount. On the whole, the improvement of the radial sealing structure efficiency is the most obvious, and the improvement of the axial sealing and the double-tooth static disk sealing is relatively small. On average, for each increase of one protrusion, the minimum sealing flow rate required for the three structures can be reduced by 0.96%, 0.30% and 0.28% respectively. In addition, after the protrusion is installed, the influence of the rotating Reynolds number on the sealing efficiency will be more obvious.

sion amount. However, the degree of change in the different sealing structures is different. As a whole, the efficiency of radial rim seal is most obvious, and the improvement of the axial rim seal and double teeth rim seal is less. For each additional protrusion, the minimum sealing flow rate required for each of the three structures can be reduced by 0.96%, 0.30%, 0.28%, respectively. In addition, the rotating Reynolds number will have a more significant effect on the sealing efficiency after the protrusions are installed.

**Key words:** gas ingestion; rotator-stator system; rim seal; protrusion amount; sealing efficiency

在航空发动机涡轮盘装配过程中,除部分部件焊接外,很多部件是通过螺栓固定连接的,这破坏了转动部件表面的平滑。相对于光滑转盘,凸起对盘腔内的流场影响剧烈,因而对这一部分的研究有很重要的现实意义。

一直以来,前人在这一方面将关注点主要集中在转盘的扭矩系数变化上。Zimmermann 等<sup>[1]</sup>对附有凸起转盘的风阻问题进行了较为深入的研究。通过理论分析,将转盘上引起风阻损失的因素概括为三种类型。此外测量了多种形状凸起的扭矩系数,提出了覆盖物减阻的方案。同时,他还研究了螺栓间距的对扭矩系数的影响。Millward 等<sup>[2]</sup>实验研究了转静系盘腔内螺栓的数量  $n$ 、直径  $D$ 、间距  $p$  以及横截面积  $A$  对于转盘扭矩的影响,同时提出整体覆盖的减阻效果要明显好于部分覆盖。Daniels 等<sup>[3]</sup>对带有螺栓凸起的涡轮转盘模型扭矩系数进行了实验研究。结论表明:径向外流时,增大叠加通流使得转盘扭矩增大;而径向内流则相反。转盘的扭矩系数随着轴向间隙的增大而增大。Gartner<sup>[4]</sup>利用求解动量积分方程的方法对不同螺栓凸起布置方式对于转盘扭矩的影响开展了研究,计算得到的结果与实验结果相比较,有着较高的符合度。Coren<sup>[5]</sup>利用实验装置较为系统地研究了螺栓凸起分别在静盘和转盘上时对于转盘风阻扭矩的影响。Miles<sup>[6]</sup>在测量凸起导致的风阻扭矩的基础上,还对风阻引起的转盘壁面温度升高量进行了测量,同时利用粒子图像测速法对螺栓附近流体的切向速度进行了测量,其研究发现,叠加通流会极大地增加核心区的切向速度。罗翔等<sup>[7]</sup>深入探究了对于中心进气开式转静系结构的风阻扭矩特性,通过实验分析认为流动结构是影响风阻扭矩的关键因素,并且,对于此种结构,间隙比的变化也对扭矩系数有一定影响。Long 等<sup>[8]</sup>对中心进气转静盘腔进行了实验研究。研究发现转盘上螺栓数量的增加对转盘扭矩影响较大,而转盘温升的增幅较小;凹槽对于

转盘的扭矩系数和盘面温升的作用程度基本偏小。张晶辉等<sup>[9]</sup>认真研究了盘缘冷却气体对透平转子特性的影响,其结果说明了入侵流和冷却气体对于处在下游的进口气流角有很重要的作用。Moghaddam 等<sup>[10]</sup>利用数值模拟的方法研究了有叠加流的封严转静系内,螺栓对转盘表面温度、扭矩系数以及流场的影响,其计算结果与 Millward<sup>[2]</sup>通过实验得到的规律吻合程度较好。罗翔、陶智等<sup>[11-12]</sup>系统性地研究了转静系盘腔内的风阻和温升特性,并针对各种情况下的凸起安装方式总结了很多较为实用的经验公式。

但另一方面,一些学者在对盘腔封严效率探索的基础上,研究发现,带有凸起的盘腔可以获得更高的封严效率。朱莉娅等<sup>[13]</sup>通过运用理论分析和瞬态数值相结合的办法揭露了入侵气流和冷却气体的掺混机理。此外,康文武等<sup>[14]</sup>采用实验方法研究了高低位进气对燃气入侵的影响,结果表明不同进气方式对封严效率的轴向分布有影响,但对于整个盘腔的效率改变不大。林立等<sup>[15]</sup>运用实验和数值相结合的方法探究了低位预旋进气转静腔的特性,分析并获得了其质量流量和转速对腔内各流动参数的影响。童飞等<sup>[16]</sup>运用数值方法研究了齿间凸起对直通蓖齿封严特性的影响,结果表明齿间凸起能有效提高通道的密封性能,降低通道的泄漏量。Liu 等<sup>[17-18]</sup>通过实验研究了凸起对燃气入侵的影响,并结合 Owen 等<sup>[19-20]</sup>提出的孔板理论模型,创新性地引出了一个可以衡量对带凸起情况下腔内燃气入侵程度的关键因子,并在后续的研究中,比较了不同的凸起参数对腔内燃气入侵的影响。

通过前人的研究可以看出,涡轮盘腔内的凸起对风阻扭矩的影响受多种因素的作用,但对于凸起的参数对封严效率的影响则较少,尤其是在凸起数目方面缺乏较系统的研究。本篇论文以三种封严结构为主要研究对象,通过改变动盘表面的凸起数目分布,对其对腔内流动特性和封严效

率的影响进行了相关研究。

1 实验装置

实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家重点实验室全环台上进行,设计转速为 3000 r/min。整体结构如图 1 所示,整个系统由主流供气、封严流供气、实验件和数据采集等几部分构成。

1.1 主流供气系统

主流气体由通道最右端的高压离心压机带动,持续从外界大气抽取空气。主流风机通过直流调速电动机驱动,主流气体通道的内、外机匣直径分别为 534、574 mm,透平一级包含有动静叶分别为 67、40 个。外界气体首先从入口段流入,流过两组叶片后,然后和腔内的冷却气体汇合,再经过气流通道后方的纱网和格栅,最终由风机排入周围环境。入口段、纱网和格栅等的安排主要是为了消除气流在整个抽气通道内的不均匀度。

1.2 封严流供气系统

封严通路的最大流量可以达到 350 kg/h,由离心压机压缩空气作为气源。来自压气机的气流经过稳压箱后与二氧化碳(CO<sub>2</sub>)充分混合后流出,然后通过调节前后两组阀门的开度控制进入腔内的流量。上述分流后的封严气体先经过冷却箱,再通过一分六路腔从不同周向位置分别进入透平转静腔内。最后,腔内的冷却气体从封严环流出后汇入主流。实验通过测量腔内各径向位置处 CO<sub>2</sub> 的体积分数来确定燃气入侵的程度。

1.3 实验件

本实验选用径向封严、轴向封严和静盘双齿封严三种轮缘封严结构。每种封严结构的封严间隙( $S_c$ )均为 2 mm,动静盘间隙均为 18 mm。凸起形状为正六边形,其安装半径  $r=0.884b$  位置处,其中  $b$  为动盘半径,其当量直径为 10 mm。三种封严结构和凸起参数如图 2 中所示。

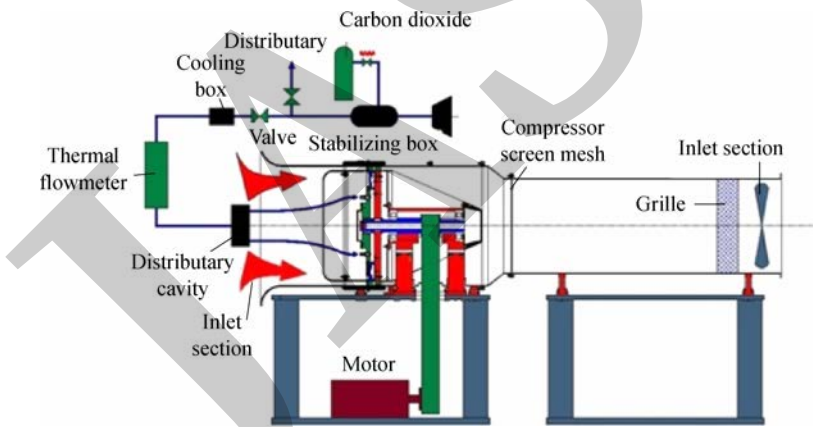


图 1 实验设施的整体示意图  
Fig. 1 Overall layout of experimental facility

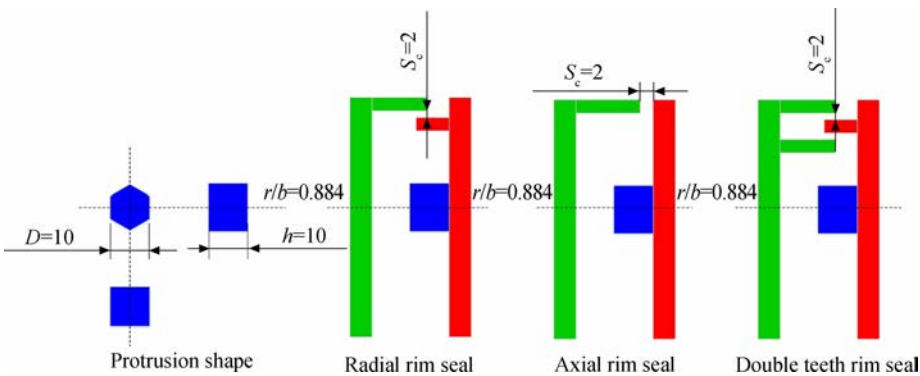


图 2 三种轮缘封严结构(单位:mm)  
Fig. 2 Structure of three rim seals (unit:mm)

## 1.4 数据采集系统

实验要求对主流流量、封严流量、转盘转速以及旋转腔内沿径向位置的压力和  $\text{CO}_2$  体积分数等数据进行采集。

通过测量总压与静压的压力差,得到主流流量。皮托管被设置在来流入口处的环形通道来测量总压,静压管安装在相同的位置获得静压。差压传感器(罗斯蒙特 3051S)校准装置量程为  $0 \sim 722.5 \text{ Pa}$  用来测量压差。每次实验前,仪器将在标准风洞中进行校准。压力和流速的不确定度小于  $\pm 2\%$ 。封严流由浮子流量计和阀门配合实现粗调,然后用热式流量计精准测得其质量流量。转盘通过有机玻璃窗口和 P+FOBT200-18G M60-E5 漫射型红外光电传感器相配合实现其转速的测量,转速的测量结果最终由 YK-23 型智能转速表来实时显示。转速不确定度为  $7 \text{ r/min}$ 。盘腔内各径向位置处的静压值也是由静压管和罗斯蒙特压差传感器测量得到的,传感器的校准量程为  $0 \sim 3.126 \text{ kPa}$ 。通过弯转  $90^\circ$  的皮托管将切向来流滞止,可以获得对应测点处的切向速度,测量的不确定度都在  $\pm 2\%$  范围内。封严效率的测量采用在射流中掺混  $\text{CO}_2$  气体作为示踪粒子,其腔内各径向位置的封严效率是由分布在 10 个径向点的  $\text{CO}_2$  体积分数得到,具体位置为  $r/b = 0.828 \sim 0.978$  之间每间隔  $4 \text{ mm}$  布置一个小测孔。通过调节  $\text{CO}_2$  钢瓶出口处减压阀阀门的开度,同时持续监控,将射流  $\text{CO}_2$  体积分数的波动范围保持在  $2\% \sim 4\%$  以内。GXH-3010E 红外线分析仪被用来测量示踪粒子的体积分数。仪器的工作范围为  $0\% \sim 5\%$ ,误差不到整个量程的  $2\%$ 。实验需要用三台红外线分析仪进行示踪粒子的体积分数测量。分别用来测空气中的  $\text{CO}_2$  体积分数  $\varphi_0$ 、主流中的  $\text{CO}_2$  体积分数  $\varphi_1$ 、腔内 10 个径向位置测点处的  $\text{CO}_2$  体积分数  $\varphi$ 。腔内不同测点的切换通过电磁阀和 ADAM4168 相互配合来实现控制。最终获得的三种示踪粒子的体积分数,代入下面的公式就可以算出该处位置对应工况的封严效率  $\epsilon$ 。实验通过持续增加封严流量,当  $\epsilon$  达到 0.99 时对应的封严流量即为此工况下的最小封严流量。

$$\epsilon = \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_0 - \varphi_1} \quad (1)$$

## 1.5 参数定义及工况说明

本次实验中涉及到的主要参数有:

主流雷诺数

$$Re_w = \rho W b / \mu \quad (2)$$

旋转雷诺数

$$Re_\phi = \rho \Omega b^2 / \mu \quad (3)$$

无量纲封严流量

$$C_w = \dot{m} / \mu b \quad (4)$$

上述定义式中  $\rho$ 、 $W$ 、 $\mu$ 、 $\Omega$ 、 $\dot{m}$  分别为空气密度、主流通道流速、空气动力黏度、动盘旋转角速度、射流质量流量。实验通过控制以上三个参数变化来确定工况,其范围为  $Re_w = 4.39 \times 10^5, 7.51 \times 10^5 < Re_\phi < 1.20 \times 10^6, 1000 < C_w < 8500$ 。

## 2 实验结果与分析

实验通过对三种封严结构的静压分布、总压分布和体积分数的分析,获得不同封严结构下的封严特性,并计算得到对应的最小封严流量。

### 2.1 静压分布

盘腔内部的流动极为复杂,为了更好地研究盘腔内部主流与封严流的流动过程、掺混机理等,有必要先确定盘腔内部静压( $p$ )的分布情况。实验通过在静盘壁面布置静压测点获取盘腔内部的稳态压力分布,得到了在不同的封严结构和不同旋转雷诺数情况下,盘腔内部的静压随着凸起数目( $n$ )增加的变化关系。限于篇幅,现选取旋转雷诺数  $Re_\phi = 1.05 \times 10^6$  时,三种结构在不同的凸起数目时,不同无量纲封严流量下,对应的静压的径向分布,结果如图 3 所示。

从图 3 可以发现,由于旋转效应产生的离心力导致盘腔内部静压的大小从整体上看,沿半径的增大方向呈上升趋势。但根据实验数据同时也可以看出,凸起数目的不同对静压变化的影响也有区别。单独考察某一封严结构下不同凸起数目对静压的影响,整体上看,凸起的安装会使腔内的静压与光滑盘相比有所降低,但降低的程度在不同情况下有所不同。首先,无论对于何种封严结构,高半径位置处的降低幅度都要明显小于低半径位置处。个别工况下,比如径向封严结构在凸起数目为 3 时,临近封严环处测点的静压甚至会略有增加。其次,对于径向封严和轴向封严结构,凸起的数目越多,对应着静压降低的幅度也越大。而双齿封严结构在凸起数目为较低时则略有不同。

根据 Owen<sup>[19-20]</sup> 的孔板理论,盘腔内部靠近封严环处的静压对决定是否发生燃气入侵有重要

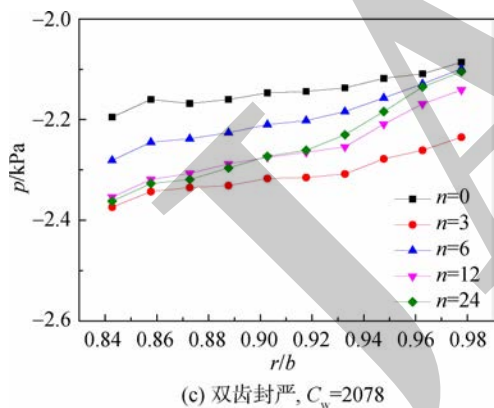
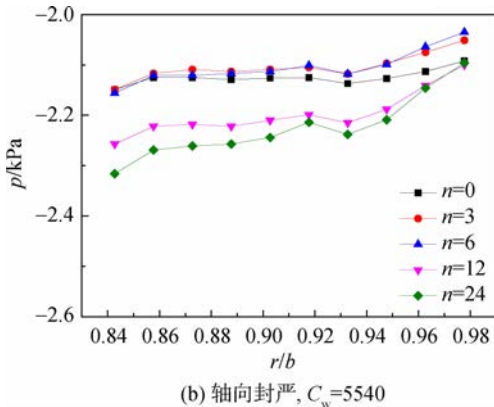
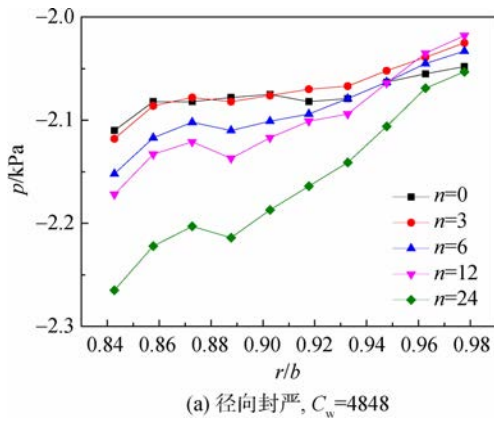


图 3 不同凸起数目下静压沿径向的分布  
( $Re_\delta=1.05\times10^6$ )

Fig. 3 Radial distribution of static pressure for different protrusion amount ( $Re_\delta=1.05\times10^6$ )

影响。从实验结果可以看出,凸起的安装对径向封严和轴向封严影响较小,而对于双齿封严结构则影响稍大一些。

2.2 总压随封严流量的变化结果

实验通过在静盘壁面布置总压测点获取盘腔内部的总压( $p_t$ )分布,得到了在不同的封严结构和不同旋转雷诺数情况下,盘腔内部总压随着凸起数目增加的变化关系。现选取旋转雷诺数为  $Re_\delta=1.05\times10^6$  时,三种结构在不同的凸起数目

时,某一无量纲封严流量下,对应的总压的径向分布,结果如图 4 所示。

如图 4 所示,整体上来说,不论在何种封严结构和凸起安装数目下,由于凸起对腔内气体做功,盘腔内部总压的大小都会沿半径的增大方向呈上升趋势。同时,观察图线可以发现,总压的增幅沿径向仍然由外向内逐渐减小。对有凸起安装的实验组,在靠近封严环的高半径位置处,腔内的总压梯度较小,总压变化比较平缓;而在靠近旋转核心的低半径位置处,总压梯度明显增大,总压呈迅速

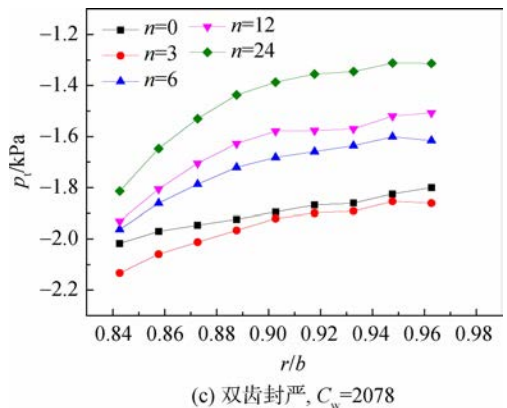
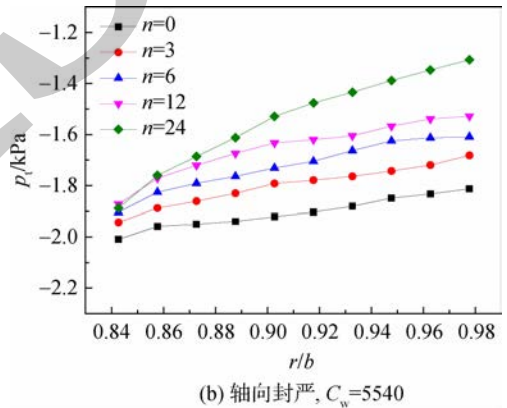
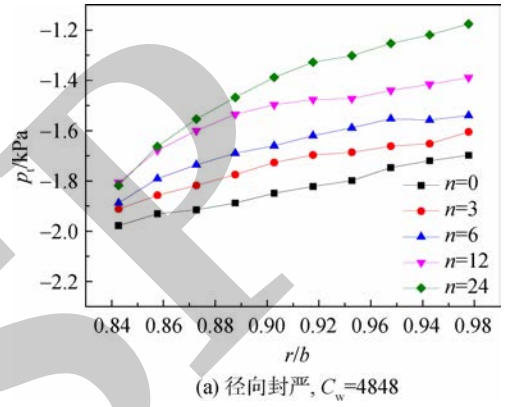


图 4 不同凸起数目下总压沿径向的分布  
( $Re_\delta=1.05\times10^6$ )

Fig. 4 Radial distribution of total pressure for different protrusion amount ( $Re_\delta=1.05\times10^6$ )

下降趋势。而对于没有安装凸起的对照组,总压梯度则由内到外基本保持一致,因此这种现象的产生必然是受到凸起安装在测点中部区域位置的影响。以径向封严结构为例,在靠近封严环的高半径位置处,实验组  $n=24$  比  $n=6$  的总压增加了 364 Pa,增幅明显,而在靠近旋转核心的低半径处,两个实验组的总压只相差了 70 Pa,增幅降低很多。

从影响封严效果最大的靠近封严环的高半径位置测点看,对于径向封严和轴向封严结构,随着凸起安装数目的增加,最外侧测点的总压也会随之增加,凸起数目越多,对应各测点的总压越高。而对于双齿封严结构,总压的分布虽然整体上和前两种结构相差不多,但在凸起数目为较少时略有不同。但由于受到静压值降低过大的影响,当凸起数目为 3 时,凸起的安装虽然会带来切向速度的增加,然而此时增加的动压不足以弥补损失的静压,因而最终此数目下的总压会低于没有安装凸起的对照组。

2.3 封严效率随封严流量的变化结果

为了便于分析,本文使用  $r/b=0.96$  位置处测试得到的  $\text{CO}_2$  体积分数对应的封严效率来代表整个涡轮腔内的封严效率,最终获得了三种不同封严结构在不同工况下的体积分数和压力变化曲线,现选取旋转雷诺数  $Re_\phi=1.05\times10^6$ ,每种凸起数目下,不同的无量纲封严流量对应的封严效率来分析,结果如图 5 所示。

从图 5 中观察得出,盘腔内部的封严效率( $\epsilon$ )和封严流量( $C_w$ )成正比,在盘腔内部到达封严之前,封严流量越大,封严效率越高;同时,对于三种封严结构,凸起数目对腔内封严效率影响明显。

在实验工况范围内,同一封严结构、封严流量下,随着凸起数目的增加封严效率会有显著的提升,两者成正比关系。以径向封严结构为例,有凸

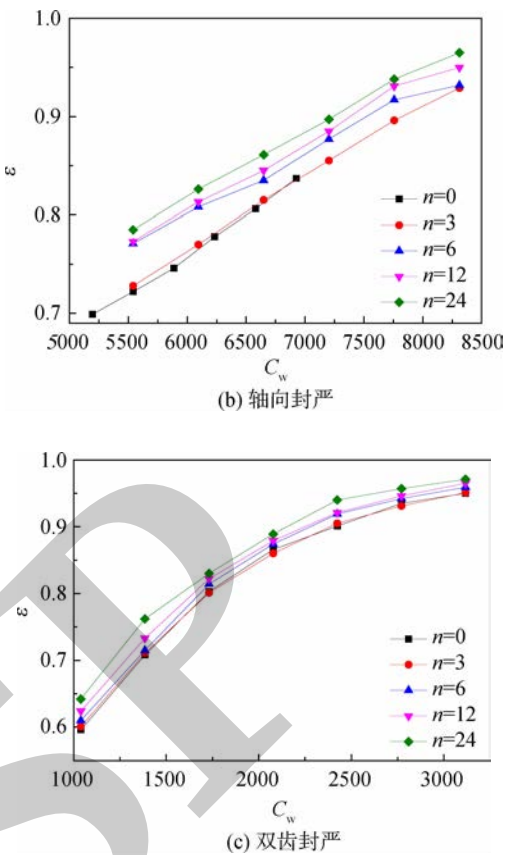
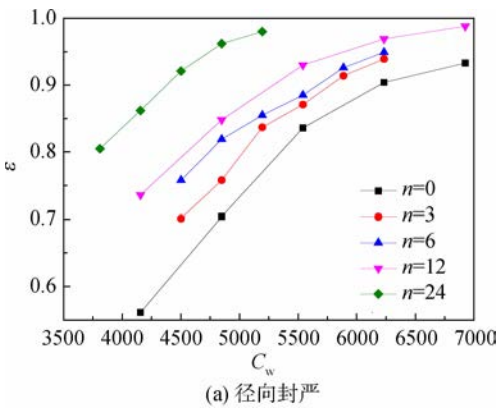


图 5 不同凸起数目下封严效率随封严流量的变化  
( $Re_\phi=1.05\times10^6$ )  
Fig. 5 Variation of sealing efficiency with sealing flow rate for different protrusion amount  
( $Re_\phi=1.05\times10^6$ )

起安装的实验组分别比光滑盘对照组的封严效率平均提高了 3.5%、4.9%、9.4%和 17.8%。和轴向封严与静盘双齿封严结构相比,径向封严结构安装了凸起后的效率提升效果明显,不仅在  $n=3$  时,封严效率仍然整体高于光滑盘对照组,在多凸起安装数目下,封严效果更加突出,实验组  $n=24$  相比于  $n=12$  时的封严效率提升了接近一倍,所以,在相同工况下,增加凸起数目可以大幅提升径向封严结构的封严效率。

总体上看,对于三种封严结构,凸起对径向封严结构封严效果的提升明显,轴向封严次之,而双齿封严结构则最不明显。这主要是因为双齿封严结构本身的封严效果较好,其结构将盘腔内部分为内外两个腔室,有了外腔的缓冲,主流中的燃气将很难直接到达内腔之中。相同工况下达到封严所需的冷气流量也较小,大约只有前两种结构的一半左右。在封严效率本身不低的情况下,继续安装凸起带来的封严效率提升则会显著缩小。

2.4 最小封严流量

本文对测得的封严效率使用线性插值处理办法得到不同结构下凸起在不同旋转雷诺数时的最小封严流量( $C_{wmin}$ ),结果如图 6 所示。

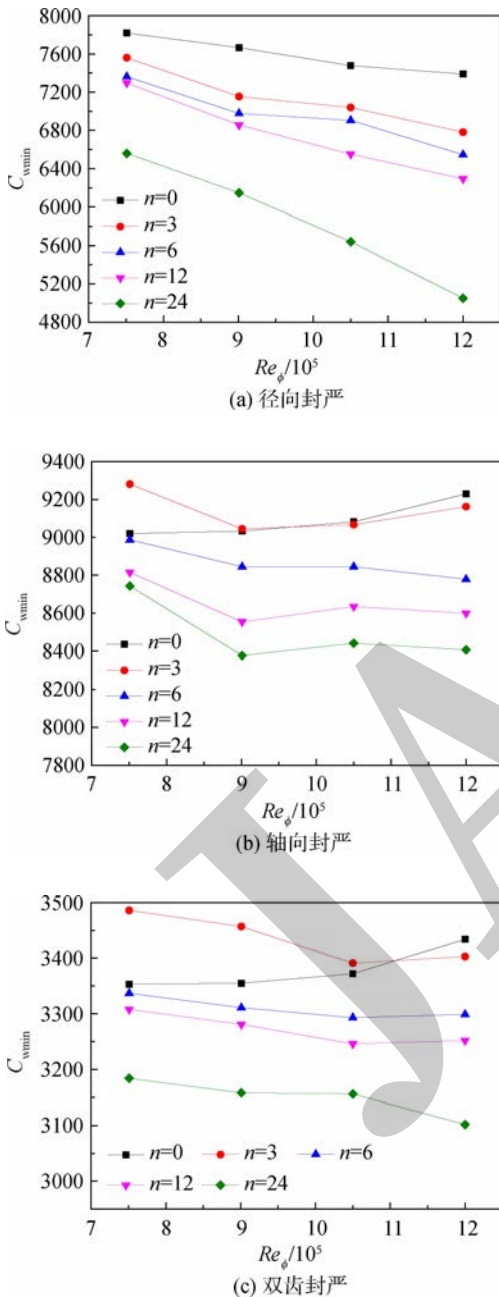


图 6 不同凸起数目的最小封严流量

Fig. 6 Minimum sealing flow rate for different protrusion amount

如图 6 所示,对于径向封严结构,在实验工况范围内,从整体趋势上看,光滑盘对照组和四个有凸起安装实验组的最小封严流量都会随着旋转雷诺数的升高而下降,但光滑盘的变化比较平缓,四个有凸起安装实验组下降的梯度明显更大,可以

看出有凸起安装实验组和光滑盘对照组之间的差距在逐渐扩大,高旋转雷诺数下,凸起对封严效率的提升更大。在同一旋转雷诺数下,凸起数目越多,最小封严流量越小。

对于轴向封严结构,整体上看,旋转雷诺数不变时,增加动盘上的凸起数目,盘腔封严所需的最小封严流量会降低;和光滑盘对照组不同,随着旋转雷诺数的提高,实验组所需的最小封严流量会略有下降。当凸起数目  $n=3$  时,在低转速下,获得的最小封严流量要高于光滑盘对照组,随着转速的升高,两者不断接近并最终在高转速下交叉并反超;而三组高凸起数目的最小封严流量则始终低于对照组,并且随着转速的升高,最小封严流量之间的差距在逐渐拉大。相比于径向结构,轴向结构的最小封严流量略有增加。

对于静盘双齿封严结构,其最小封严流量的变化规律和轴向封严结构大体相似。但因为封严结构的不同,相同工况下,其所需要最小封严流量大幅下降,只有轴向结构的不到 40%。

通过把相同  $Re_\phi$  对应的最小封严流量的变化率做一个算术平均,相互比较可以看出,若平均每加装一个凸起,三种封严结构所需的最小封严流量分别平均减少 0.96%、0.30%、0.28%。

3 结 论

本次实验得出的主要结论有如下几点:

1) 凸起的安装对盘腔内的静压分布有一定影响,具体看每种封严结构,其中径向封严和轴向封严影响较小,而对双齿封严结构则影响稍大一些。但相比于总压的变化程度看,静压的变化相对较小。尤其是在对封严效率影响最直接的高半径处的静压值,大部分工况下变化范围都小于 50 Pa,可以忽略不计。

2) 凸起的安装会明显影响盘腔内部的流场分布,在实验测量的有限凸起数目的情况下,提高盘腔内安装的凸起数目会显著增加封严环处流体的总压,在绝大部分工况下,凸起数目和总压的增幅成正比。但对于静盘双齿和轴向封严这两种封严结构,在凸起安装数目较少并且旋转雷诺数不够高时,受静压的影响,凸起的安装反而会降低盘腔内的总压值。

3) 在安装了凸起后,对于以上三种封严结构,凸起封严效率的提升效果和总压的变化基本一致。从整体上来看,径向封严结构封严效率的提升效果最明显,轴向封严和静盘双齿封严结构

效率改善较小。平均每增加一个凸起,三种结构所需的最小封严流量分别可以减少 0.96%、0.30%、0.28%。

4) 除凸起本身的因素外,旋转雷诺数对带凸起盘腔封严效率的提升有很大的关系,因为总压的变化直接受到旋转雷诺数的影响。在低旋转雷诺数时,总压的提升极其有限,获得的总压不足以弥补静压降低的损失,此时盘腔内的封严效率反而会有所下降。随着旋转雷诺数的提高,三种封严结构下的封严效率都会得到显著提高。

## 参考文献:

- [1] ZIMMERMANN H, FIRSCHING A, DIBELIUS G H, et al. Friction losses and flow distribution for rotating disks with shielded and protruding bolts[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1986, 108(3): 547-552.
- [2] MILLWARD J A, ROBINSON P H. Experimental investigation into the effects of rotating and static bolts on both windage heating and local heat transfer coefficients in a rotor/stator cavity[R]. ASME Paper 89-GT-196, 1981.
- [3] DANIELS W A, JOHNSON B V, GRABER D J. Aerodynamic and torque characteristics of enclosed co/counter-rotating discs[R]. ASME Paper 89-GT-177, 1989.
- [4] GARTNER W. A momentum integral method to predict the frictional torque of a rotating disc with protruding bolts[R]. ASME Paper 98-GT-138, 1998.
- [5] COREN D. Windage due to protrusions in rotor-stator systems[D]. Brighton, UK; University of Sussex, 2007.
- [6] MILES A L. An experimental study of windage due to rotating and static bolts in an enclosed rotor-stator system [D]. Brighton, US; University of Sussex, 2012.
- [7] 罗翔, 张达, 徐国强. 中心进气开式转静系转盘风阻扭矩实验[J]. *推进技术*, 2015, 36(8): 1199-1205.  
LUO Xiang, ZHANG Da, XU Guoqiang. Experimental study on windage torque in unshrouded rotor-stator system with central inflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(8): 1199-1205. (in Chinese)
- [8] LONG C A, MILES A L, COREN D D. Windage measurements in a rotor stator cavity with rotor mounted protrusions and bolts[R]. ASME Paper GT2012-69385, 2012.
- [9] ZHANG J H, MA H W. Unsteady numerical investigation for effects of rim sealing flow on performance of a turbine rotor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(4): 470-478.
- [10] MOGHADDAM E R, COREN D, LONG C A, et al. A numerical investigation of moment coefficient and flow structure in a rotor-stator cavity with rotor mounted bolts[R]. ASME Paper GT2011-45588, 2011.
- [11] LUO X, ZHANG D, TAO Z, et al. Windage measurements in a rotor-stator system with superimposed cooling and rotor-mounted protrusions[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(4): 042505. 1- 042505. 11.
- [12] TAO Z, ZHANG D, LUO X, et al. Windage heating in a shrouded rotor-stator system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(6): 062602. 1- 062602. 10.
- [13] 朱莉娅, 罗翔, 徐国强, 等. 涡轮级燃气入侵的理论分析及数值模拟[J]. *推进技术*, 2014, 35(11): 1511-1516.  
ZHU Liya, LUO Xiang, XU Guoqiang, et al. A theoretical and numerical study of turbine rim seal ingestion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(11): 1511-1516. (in Chinese)
- [14] 康文武, 罗翔, 刘冬冬, 等. 高低位进气方式对轮缘封严特性影响研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(10): 1958-1963.  
KANG Wenwu, LUO Xiang, LIU Dongdong, et al. Investigation for effects of high and low gas inlet on characteristics of rim sealing[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(10): 1958-1963. (in Chinese)
- [15] 林立, 谭勤学, 吴康. 低位预旋进气转静系盘腔流动特性研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(2): 258-265.  
LIN Li, TAN Qinxue, WU Kang. Study of flow dynamics in rotor-stator cavity[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(2): 258-265. (in Chinese)
- [16] 童飞, 张丽, 华锐睿, 等. 齿间凸起对直通篦齿封严特性影响的数值研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(1): 119-123.  
TONG Fei, ZHANG Li, HUA Ruirui, et al. Numerical investigation of protrusions on leakage of straight through labyrinth seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(1): 119-123. (in Chinese)
- [17] LIU Dongdong, TAO Zhi, LUO Xiang, et al. Development of a new factor for hot gas ingestion through rim seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(11): 1567-1572.
- [18] LIU Dongdong, TAO Zhi, LUO Xiang, et al. Investigation on the evaluation of turbine cavity with protrusion by considering ingress and windage loss[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(11): 1573-1578.
- [19] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part I rotationally induced ingress[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3): 1983-1989.
- [20] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part II externally induced and combined ingress[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3): 1990-1995.

(编辑: 陈 越)