

分流通对台阶型篦齿封严性能影响研究

董红伟, 谭晓茗, 张庆才, 张靖周

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 为提高涡轮级间篦齿的封严性能, 设计了一种带分流通道的台阶型篦齿封严结构, 研究了不同压比与转速下分流通对篦齿封严泄漏特性和传热特性的影响规律, 并与光滑篦齿进行对比。结果表明: 在衬套上增设一个分流通后, 处于通道出口处的气流在离心力作用下被卷吸进通道, 增强了篦齿的封严效果; 分流通道的周向间隙率 β 越大, 封严效果越佳, 当周向间隙率 β 为 3 时, 绝热壁面流量系数为 13.47%, 绝热壁面风阻温升为 48.7 K; 分流通数量增加, 篦齿的泄漏加剧; 随着压比增加, 密封泄漏量增大, 分流通可以引导核心射流回流, 故泄漏量增速逐渐变缓而绝热壁面风阻温升增速加剧; 当转速从 3×10^3 r/min 增加到 2.1×10^4 r/min, 气流摩擦耗散加剧, 篦齿绝热壁面流量系数逐渐降低, 绝热壁面风阻温升逐渐升高, 分流通对高转速下篦齿的封严效果提升显著。

关键词: 数值模拟; 分流通; 台阶型篦齿封严; 流量系数; 风阻温升

中图分类号: V233.93

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)04-0622-08

Investigation on Effects of Diversion Channels on Leakage of Stepped Labyrinth Seal

DONG Hongwei, TAN Xiaoming, ZHANG Qingcai, ZHANG Jingzhou

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve the leakage performance of the turbine interstage seal, a stepped labyrinth seal structure with a diversion channel is designed. The influence of the diversion channel on the leakage and heating characteristics of the labyrinth seal is investigated under various pressure ratios and rotational speeds, and compared with the smooth labyrinth seal. The results show that adding a diversion channel on the casing enhances the sealing effect of the labyrinth seal by allowing airflow at the outlet to be rolled and sucked into the channel under the effect of centrifugal force. The larger the circumferential clearance rate β of the diverter channel, the better the sealing performance. When the circumferential clearing rate β is 3, the insulated wall flow coefficient is 13.47% and the insulated wall wind resistance temperature rises by 48.7 K. The increase in the number of diversion channels intensifies the leakage of the seal. As the pressure ratio grows, the sealing leakage increases, and the diversion channel may guide the core flow return, so the leakage growth rate gradually slows down while the insulated wall wind resistance temperature rise growth rate increases. As the rotational speed increases from 3×10^3 r/min to 2.1×10^4 r/min, the airflow friction diffusion worsens, the labyrinth seal insulated wall flow coefficient decreases, the insulated wall wind resistance temperature rises, and the diversion channel improves the labyrinth seal's sealing effect at high rotational speed.

Key words: numerical simulation; diversion channel; stepped labyrinth seal; flow coefficient; windage

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-A-III-003-001)。

收稿日期: 2024-01-19; **修订日期:** 2024-03-05

通信作者: 谭晓茗, 女, 博士生导师, 教授, E-mail: txmyy@nuaa.edu.cn。

引用格式: 董红伟, 谭晓茗, 张庆才, 等. 分流通对台阶型篦齿封严性能影响研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(4): 622-629. DONG Hongwei, TAN Xiaoming, ZHANG Qingcai, et al. Investigation on effects of diversion channels on leakage of stepped labyrinth seal[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 622-629.

heating

非接触式环形篦齿封严通常用于多级旋转机械,如压气机和涡轮,目的是限制气体泄漏、调节各个腔室之间的压力平衡。这些密封件的封严性能可以直接影响发动机的效率。有研究表明,高压涡轮每减少1%的泄漏,比油耗就会降低0.3%,推力就会增加0.8%^[1]。

对比诸多的密封技术,篦齿封严(Labyrinth seal, LS)具有低成本、维护简单和结构可靠等特点,经常被作为首选密封方案^[2]。然而传统篦齿封严的性能受限于旋转部件与静子之间的径向间隙,在理想情况下,篦齿零间隙可以避免任何性能损失,可惜这种情况在实际使用中是不可能实现的,篦齿封严自身的制造公差和定子和转子工作过程中发生的蠕变、振动以及热变形等因素导致其总是需要保留一定的间隙^[3]。为此,国内外研究人员的一个重点研究方向就是在传统篦齿封严上改进篦齿结构以提高其密封性能。

对于上述问题,Morgan等^[4]提出了一种弯曲流道,使篦齿流道复杂化,从而提高了密封性能。Cangioli等^[5]设计了一种交错篦齿流道结构,并通过实验对其性能进行了检验。Li等^[6-7]通过数值方法研究了交错篦齿封严的泄漏性能,他们发现交错篦齿使得泄漏路径降低了直通性,增强了流动湍流性,与直通式篦齿相比,交错篦齿的密封性能有显著提高。Chun和Ahn^[8]用数值方法研究了交错篦齿封严的形状参数变量对其流量系数的影响。

除了改变篦齿的流道来改善篦齿封严的泄漏性能,另一种方式则是设置流体屏障。流体屏障是一种以最小的几何变化来减少泄漏的流动控制方法,它主要通过高速射流阻断泄漏气流来实现密封性能的提高^[9]。Maccalman等^[10]采用燃气射流替代篦齿封严中的某级齿,发现了气体的泄漏流量有明显减少。Hogg和Ruiz^[11]通过沿倾斜密封齿的上游端面向密封腔内注入流体来形成流体屏障,其密封泄漏量能够减少25%。Rai等^[12]提出了一种静子注气密封结构,注气起到了流体屏障的作用,其阻断了泄漏流路,有效地降低了泄漏流量。国内针对主动射流抑制泄漏也有一些研究,唐萌等^[13]研究了不同转速及不同齿顶间隙下射流对篦齿封严的影响。曹永华^[14]通过粒子示踪技术观察逆向射流与篦齿泄漏通道内部流场的掺混效应,并通过实验数据得出射流位置、射流角度的变化对泄漏系数的影响。

流体屏障方案需要从外部引入气体,为此,Ghaffari等^[15-16]提出了简化供气系统的无源方案。他们提出了一种旁路通道结构,通道进口位于涡轮

叶片前缘、出口位于叶顶,气流在叶片前缘气流滞止区与叶片顶部之间的压力差作用下流动,在叶顶位置形成一股射流,这个设计有助于减少11%的叶片尖端泄漏。Wasilczuk等^[17-19]将旁路通道这一结构与密封篦齿结合,提出了一个相关的概念,称为气幕技术(Air curtain technology, ACT)。ACT的旁路通道完全融入密封齿内,利用密封齿的上游和齿顶间隙之间的压力差来驱动射流,通过这项技术可以使气流的泄漏量减少18%。Gu等^[20]提出了一种利用螺旋气幕发生器减少直通篦齿封严泄漏的新型流量控制方法,并通过数值计算研究发现了该结构随着螺旋流效应的增强,其密封性能也随之增强,最大泄漏减少率可达到59.2%。

本文在传统台阶型篦齿封严的基础上,提出了一种新的结构——带分流通道的台阶型篦齿封严,并通过对该结构进行数值仿真计算,研究分流通周向间隙率、通道沿程数量、压比和转速等因素对篦齿封严性能的影响。

1 计算模型与计算方法

1.1 计算模型与网格划分

带分流通道的台阶型篦齿结构如图1所示,其结构主要包括封严衬套、转子和气流通道。分流通道则设置在衬套台阶间。为了消除进出口回流对篦齿段的影响,气流通道进出口段均延长至10倍以上的通道当量直径。台阶型篦齿的主要参数见表1。

基于商业软件Fluent Meshing进行多面体网格划分,在篦齿齿顶间隙、齿腔及分流通处施加

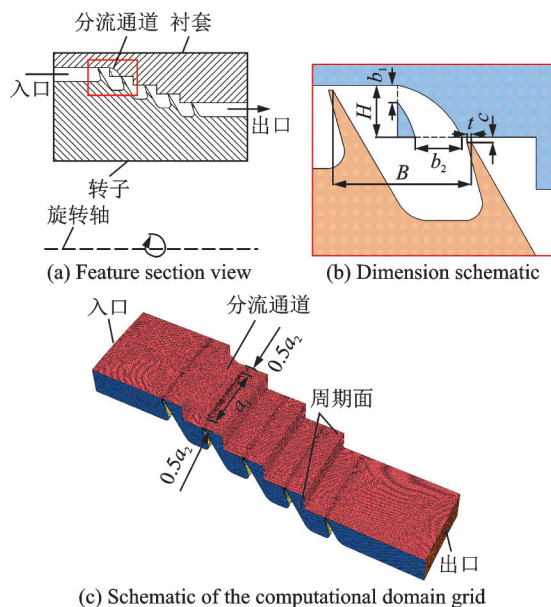


图1 篦齿模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the labyrinth model

表1 篦齿封严尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of the labyrinth seal

Parameter	Value	Parameter	Value
c/mm	0.3	t/mm	0.25
B/mm	8	H/mm	3
b_1/mm	1	b_2/mm	2.7
$\alpha_1/(\circ)$	4.5	$\alpha_2/(\circ)$	1.5

网格局部加密,采用 Poly-Hexcore 非结构体网格生成方法,使六面体网格与多面体网格共节点连接,提升整体网格中六面体网格的数量以节省网格量,同时提升计算效率和收敛速度。转子及静子壁面设置5层边界层网格,第一层棱柱网格高度为0.003 mm,增长率设置为1.2。经计算验证,转静盘壁面 y^+ 值均在1左右,满足 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在近壁区使用增强壁面处理 (Enhanced wall treatment) 时对于 y^+ 的要求。

台阶型篦齿腔内的气流流动可视为稳态的三维流动问题,篦齿转静盘壁面均设置为绝热。分流通道的周向离散均匀分布,通道的周向旋转角度 α_1 为 4.5° ,周向间隔角度 α_2 为 1.5° 。为了保留在周向旋转特征下尽可能减少仿真计算网格量,模型周向旋转 6° (周向仅包含一个分流通道的周向) 作为数值计算区域,计算域示意图见图1(c)。

1.2 网格无关性验证

针对光滑台阶型篦齿模型,选用近244.4万、301.4万、351.8万、398.1万、458.4万的网格数目,验证网格的无关性并绘制流量系数 C_D 与风阻温升 ΔT 随网格数变化的关系曲线,如图2所示。

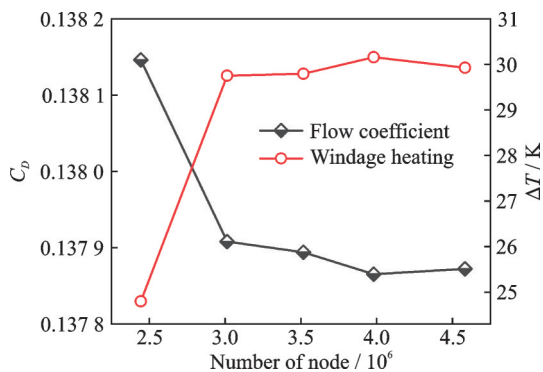


图2 网格无关性验证

Fig.2 Verification of grid-independence

研究表明,当网格数达到300万后,继续增加网格量,流量系数与风阻温升曲线均趋于稳定值,篦齿流量系数与风阻温升的变化均小于0.5%,可认为选取该网格数对计算结果的影响已经不大。故后续数值计算研究选取的网格数均在300万左右。

1.3 计算方法与边界条件

选用商业软件 ANSYS Fluent 进行数值计算

求解,湍流模型选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。湍流方程中考虑黏性耗散项和曲率修正。计算过程中不考虑壁面传热。流体域工质为考虑可压缩性的理想气体。空气的物性参数考虑温度的影响,其中导热系数和比热容按 Kinetic 理论计算,黏性系数按 Sutherland 公式计算,自由度设置为5。动量方程、能量方程、湍流方程中的对流项采用二阶迎风格式,压力和速度耦合采用 Simple-C 算法。数值计算的收敛通过两个判据确定:(1)各方程残差小于 1.0×10^{-5} ; (2)监视的篦齿齿顶间隙和转静盘壁面温度保持稳定。

进口截面为压力进口条件,给定总压、总温、轴向进气速度方向,出口截面为压力出口条件,给定静压。出口压力恒定为100 kPa,进口压力根据进出口压比给定,进口温度设定为600 K。计算利用冻结转子法处理衬套和转子的相对运动,旋转坐标系固定在转子上,转子相对于旋转坐标系静止,衬套绝对静止,流域在旋转坐标系下求解,旋转速度为15 000 r/min,篦齿转盘的最小旋转半径 $r=145$ mm。

1.4 计算方法验证

由于与本文计算模型对应的实验结果尚未得到,为验证计算方法的可靠性,暂选用文献[21]的篦齿模型实验数据进行验证。其中进口总压为1 500 kPa,出口压力1 000 kPa,进口温度为300 K,湍流模型分别尝试了 Realizable $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、Standard $k-\epsilon$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型,各湍流模型与实验数据的对比如图3所示。图中1位置对应于衬套上篦齿进口截面与静盘壁面相交处,6位置为出口截面与静盘壁面相交处,2~5位置对应4个衬套台阶处。

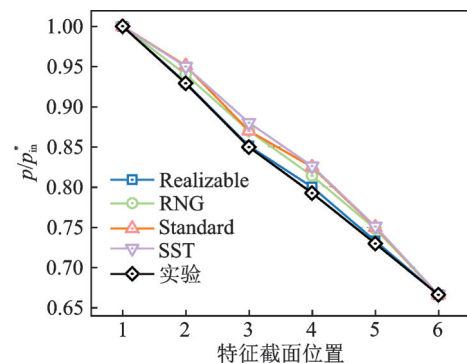


图3 计算方法验证

Fig.3 Validation of computational methods

从图3中可以看出,所选取的4个湍流模型与试验数据的沿程无量纲压力均相差较小,比较4个模型后,其中 Realizable $k-\epsilon$ 模型与实验数据偏差最小。同时考虑到旋转工况计算时,Realizable $k-\epsilon$ 模

型的收敛性较好,振荡幅度小。故后续计算过程中的湍流模型均选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

1.5 参数定义

(1) 篦齿雷诺数 Re 定义如下

$$Re = m / \mu \pi R \quad (1)$$

式中: m 为篦齿泄漏空气的质量流量; μ 为空气的动力黏度; R 为篦齿的齿尖位置半径大小。

(2) 篦齿压比 (Pressure ratio, PR) 定义为模型进口截面的总压与出口截面的静压之比, 即

$$PR = p_{in}^* / p_{out} \quad (2)$$

式中: p_{in}^* 为进口总压; p_{out} 出口静压。

(3) 篦齿风阻温升 ΔT 定义为

$$\Delta T = T_{out}^* - T_{in}^* \quad (3)$$

式中: T_{out}^* 为篦齿出口段截面的总温; T_{in}^* 为入口段截面的总温。

(4) 流量系数 C_D 定义为实际泄漏流量 m 和理想流量 m_{ideal} 之比, 即

$$C_D = m / m_{ideal} \quad (4)$$

理想质量流量 m_{ideal} 定义为

$$m_{ideal} = \frac{p_1^* A}{\sqrt{T_1^* R_g}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_4}{p_1^*} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_4}{p_1^*} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5)$$

式中: R_g 和 k 分别为气体常数和绝热指数; A 一般取为级间篦齿齿顶的最小流通面积, 常用来反映泄漏特性。

(5) 周向间隙率 β 定义为

$$\beta = \alpha_1 / \alpha_2 \quad (6)$$

式中: α_1 为分流通道的周向旋转角度; α_2 为分流通道的周向间隔角度。该参数反映了分流通道的周向分布情况。

2 计算结果与分析

本文主要研究分流通道的篦齿封严性能和风阻温升的影响, 并对分流通道的周向间隙率、通道数量、旋转速度和进出口压比这4个参数进行研究。为此, 所计算的工况为: 旋转速度 $N=3 \times 10^3 \sim 2.1 \times 10^4$ r/min; 沿程通道数量 $S=1 \sim 4$; 气流进出口压比 $PR=1.1 \sim 1.5$; 分流通道的周向间隙率 $\beta=1/3 \sim 3$ 。

2.1 带分流通道的篦齿基本涡流结构

图4给出了在转速 $N=1.5 \times 10^4$ r/min、压比 $PR=1.5$ 、分流通道的数量 $S=1$ 工况条件下, 光滑篦齿与周向间隙率 $\beta=3$ 的带分流通道的篦齿的速度流线图。可以看见, 在光滑篦齿内, 气流流经第一齿的齿顶时气流转向并加速通过转子与衬套间的狭小间隙。进入第一齿后高速的核心射流紧贴衬套

壁面并在到达台阶拐角处时发生大幅度转向, 核心射流流向转子壁面, 随后高速的核心射流紧贴转子壁面流向第二级篦齿。在高速核心射流的带动下, 两齿间腔内形成了两个反向旋转漩涡, 漩涡与核心射流的相互作用增强了气流动能耗散, 阻碍了气流的泄漏。

图4(b)为在衬套上布置分流通道的篦齿模型, 其中的气流在通过第一级篦齿齿顶后发生分离, 一部分气流流入通道内, 其余气流沿原篦齿通道流向第二级篦齿; 在到达第二级篦齿前, 篦齿通道内的气流发生第二次分离, 大量气流受到自身旋转的离心力作用被卷吸进分流通道的内部, 与第一次发生分离进入通道的上游气流相碰撞, 在通道内部形成一道屏障并阻碍了上游气流的泄漏, 两股气流互相掺混形成了一个逆时针的漩涡, 通道内部的气流湍流强度明显加强, 上下游的气流在通道内部不断摩擦碰撞, 形成了一个高速高温的区域, 气流的能量也被大量耗散掉。在台阶式篦齿的基础上增加分流通道的结构, 其原本的流场结构便会被破坏, 气流由于通道的存在会发生多次分流, 导致气流的流动阻力增加, 耗散加剧, 篦齿的泄漏量减少。

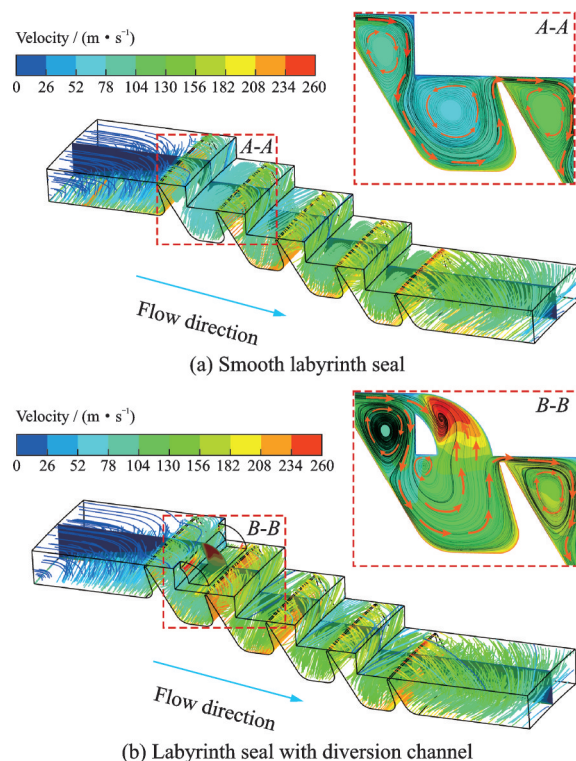


图4 篦齿封严流线图

Fig.4 Flow diagram of the labyrinth seal

2.2 周向旋转角度的影响

考虑到分流通道的周向设置为均匀离散分布, 通道间隙率不同对其周向漩涡流场结构也会有不同的影响, 故下面针对分流通道的周向间隙率进行

研究。计算选取了5个不同周向间隙率的篦齿模型,其间隙率 β 分别为1/3、1/2、1、2、3,图5为5个模型的分流通道出口截面的径向速度分布图,径向速度可以直观地反应出气流在分流通道出口处的回流与泄漏情况。图中速度大于零的区域表示篦齿腔内气体回流进入分流通道,速度小于零的区域表示通道内部流体泄漏。

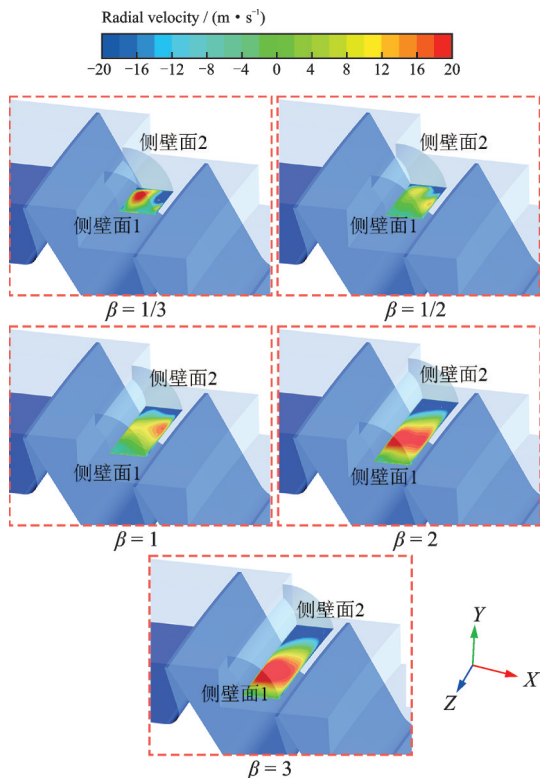


图5 5种周向间隙率下通道出口处径向速度分布

Fig.5 Radial velocity distribution at the outlet of the channel under five circumferential clearance rates

气流流入篦齿进口段,受到转子壁面旋转拖拽从而获得了周向速度。在分流通道内部时,气流沿周向流动不断冲击分流通道的侧壁面1,造成通道出口处靠近侧壁面1区域出现低压,齿腔内的气流受到离心力和压差作用回流入通道内,而靠近侧壁面2处的气流则从通道内部泄漏到篦齿腔。

对比不同周向间隙率的径向速度分布,当 β 从1/3增加到1/2时,气流的回流区域有所减小,之后随着通道 β 的增大,出口截面的回流区域与泄漏区域均在增大,且回流区域明显大于泄漏区域。综上所述,分流通道在周向间隙率较大时能很好地起到抑制泄漏的作用。

图6给出了台阶式篦齿的流量系数和风阻温升随分流通道周向旋转角度 α_1 的变化规律。从图中可见,当旋转角度 α_1 从1.5°增大到2°,篦齿的流量系数变化较小,风阻温升有所降低;当旋转角度 α_1 从2°增大到4.5°,篦齿的流量系数降低了0.89%,

风阻温升升高了15.7%。流量系数的变化趋势与图5分流通道出口截面的径向速度分布可以很好地对应。当分流通道的周向旋转角度从4°增加到4.5°时,流量系数仅降低了0.08%,认为其已经基本不变,而风阻温升升高了4.1%,温度变化幅度随旋转角度的增加而加剧。继续增大分流通道的周向旋转角度以工程角度分析其带来的风阻温升影响远大于流量系数的收益,因此以周向旋转角度4.5°作为后续的研究对象。

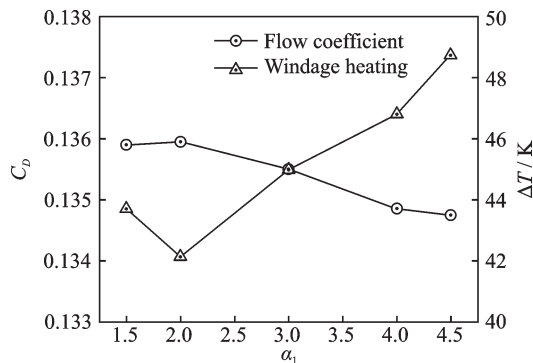


图6 流量系数和风阻温升随通道周向旋转角度的变化
Fig.6 Variation of flow coefficient and wind resistance temperature rise with channel circumferential rotation angle

2.3 分流通道数量的影响

图7为分流通道沿程数量对台阶式篦齿的流量系数和风阻温升的影响研究。当增加沿程分流通道后,其中当沿程分流通道从数量1增加到2时,流量系数变化非常剧烈,升高了4.7%,风阻温升大幅下降,降低了24.5%,可见在下游增加分流通道不利于篦齿封严,与光滑台阶式篦齿的封严效果相比仍有不足;随着下游分流通道数量的继续增加,风阻温升随数量增加呈现缓慢上升的趋势,而流量系数随通道数量增加仍在继续升高。故下游增设分流通道会显著恶化气流的封严效果。

为分析流量系数在下游增设分流通道后大幅升高的原因,现以沿程通道数1和2时的第一级分

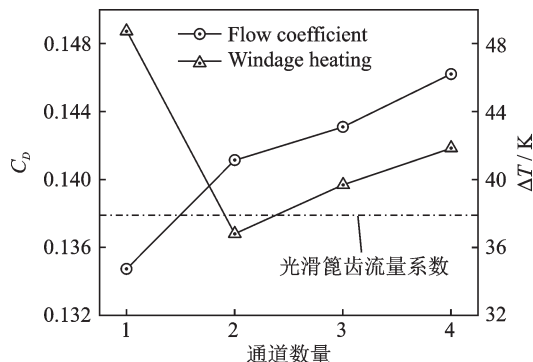


图7 流量系数和风阻温升随通道数量的变化

Fig.7 Variation of flow coefficient and wind resistance temperature rise with the number of channels

流通道出口截面径向速度分布云图对象进行分析。从图8中可见,下游分流通道的增加促进了气流的泄漏,第一级分流通道的出口截面处的回流区域显著减少,大量气体流入分流通道的出口流出,气体泄漏到下游。总而言之,下游分流通道的增加会导致分流通道的密封性能提升作用被抵消,不利于篦齿的封严。

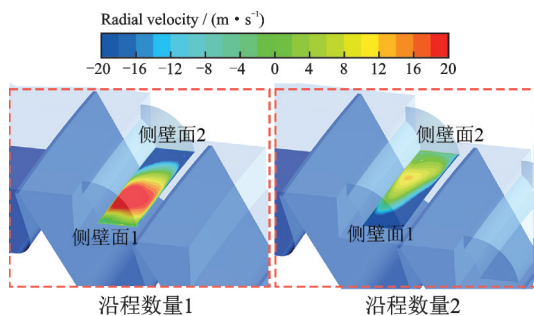


图8 第一级分流通道的出口截面径向速度分布

Fig.8 Radial velocity distribution at the outlet section of the first stage diversion channel

2.4 转速的影响

通过上述对分流通道的周向旋转角度以及分流通道的沿程数量的影响研究,发现通道的旋转角度增大后篦齿流量系数逐渐下降,其密封效果增强,而在下游增加分流通道的降低篦齿封严性能。因此,下文压比与转速的研究均以分流通道的周向旋转角度为 4.5° (即周向间隙率 $\beta=3$)、沿程分流通道的数量为1的篦齿模型作为研究对象。

图9展示了当进出口压比 $PR=1.5$ 时不同转速下通道出口处径向速度分布。从图中可以看出,不同转速下分流通道的出口面的气流泄漏位置靠近侧壁面2,气流的卷吸回流位置靠近侧壁面1。当转速为 3×10^3 r/min时,气流受到的离心应力较弱,通道出口面径向速度大于0的区域占比很小,通道出口处气流大量泄漏,分流通道的密封起到负面作用;随着转速增大,在通道出口面处气流回流区域明显变大,相对应泄漏区域被压缩,分流通道的对台阶型篦齿的密封效果增强。

图10给出了当 $PR=1.5$ 时,台阶型篦齿的流量系数和风阻温升随转速变化趋势。随着篦齿的旋转速度从 3×10^3 r/min增加到 2.1×10^4 r/min,篦齿的流量系数逐渐减小,封严效果增强。在 9×10^3 r/min以下,光滑篦齿的封严效果稍好于带分流通道的篦齿,而随着转速升高,分流通道的篦齿封严的作用增强,在转速达到 9×10^3 r/min以上时,篦齿腔内气流的离心作用增强,核心射流更容易被卷吸进分流通道的增大了流动阻力,使高转速下的带分流通道的篦齿泄漏系数减小。随着转速的增加,分流通道的抑制泄漏能力也随之增强,当

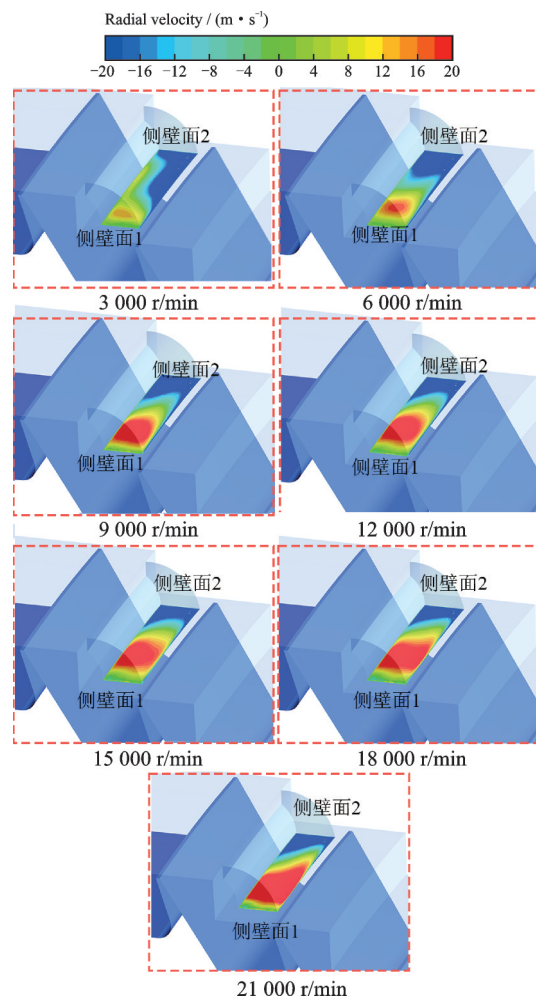


图9 不同转速下通道出口处径向速度分布($PR=1.5$)

Fig.9 Radial velocity distribution at the outlet of the channel at different rotational speeds ($PR=1.5$)

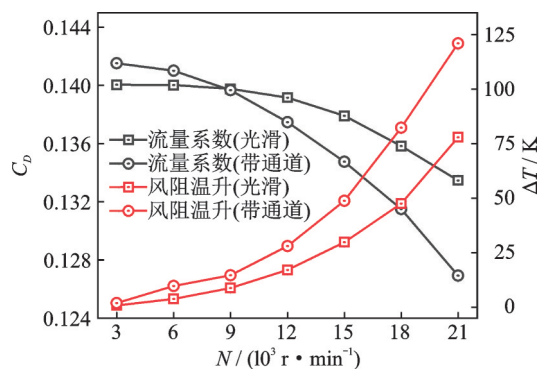


图10 转速对流量系数和风阻温升的影响($PR=1.5$)

Fig.10 Effect of rotational speed on flow coefficient and wind resistance temperature rise ($PR=1.5$)

旋转速度达到 2.1×10^4 r/min时,带分流通道的篦齿相较于光滑篦齿的流量系数降低了4.9%。

对于篦齿风阻温升变化,随着篦齿的旋转速度增加,气流流经篦齿的风阻温升逐渐升高。在相同转速下,带分流通道的篦齿风阻温升要高于光滑篦齿。当篦齿的旋转速度为 3×10^3 r/min时,分流通道的影响较小,两个模型的风阻温升仅相差1 K;当旋转速度增大到 2.1×10^4 r/min时,带分流通道的

篦齿风阻温升相较光滑篦齿高43 K,可见高转速下分流通道对篦齿风阻温升的影响不可忽视。

2.5 压比的影响

图11为转速 $N=9\times 10^3$ 、 1.2×10^4 、 1.5×10^4 r/min下篦齿的流量系数随进出口压比变化图,其中实线为带分流通道篦齿,虚线为光滑篦齿。从图中可见,在相同的转速条件下,随着气流压比的增大,篦齿的流量系数逐渐升高,篦齿的封严效果变差;在相同转速条件下带分流通道的台阶型篦齿流量系数显著低于光滑台阶型篦齿,而随着转速的增加,两者的流量系数差异更加明显。当转速为 9×10^3 r/min时,带分流通道的篦齿流量系数较光滑篦齿降低了1.6%;当转速为 1.5×10^4 r/min时,两者流量系数的差距达到了4.4%。可见,分流通道在高转速工况条件下对台阶型篦齿封严的密封性能提升更为显著。

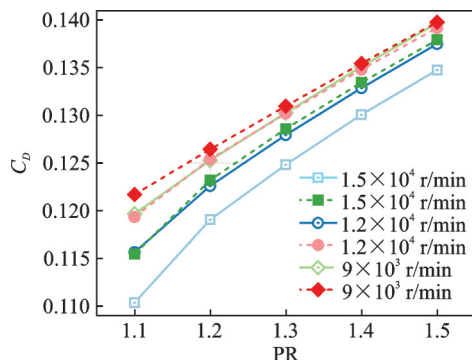


图11 压比对流量系数的影响(实线为带分流通道篦齿封严,虚线为光滑篦齿封严)

Fig.11 Influence of pressure ratio on flow coefficient (Solid lines represent the labyrinth seal with flow channels and dashed lines represent smooth labyrinth seal)

图12为转速 $N=9\times 10^3$ 、 1.2×10^4 、 1.5×10^4 r/min下篦齿的风阻温升随进出口压比变化图,其中实线为带分流通道的台阶式篦齿,虚线为光滑台阶

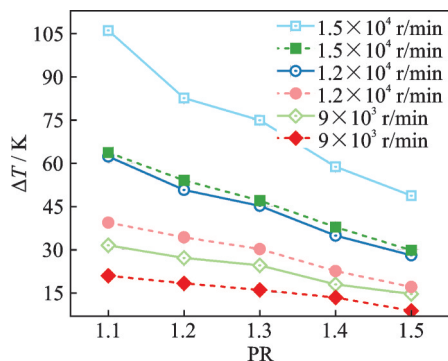


图12 压比对风阻温升的影响(实线为带分流通道篦齿封严,虚线为光滑篦齿封严)

Fig.12 Effect of pressure ratio on wind resistance temperature rise (Solid lines represent the labyrinth seal with flow channels and dashed lines represent smooth labyrinth seal)

式篦齿。从图中可见,在固定转速下,气流的风阻温升随着气流进出口压比的升高而不断降低,且风阻温升随进出口压比的变化曲线近似线性。

针对分流通道对台阶式篦齿的影响,在同一转速下,当气流进出口的压比相同时,带分流通道的篦齿内部气流的风阻温升要远高于光滑篦齿,而且随着转速的增加,两个模型风阻温升的差异也更加显著。出现该现象主要是由于数值模拟设置的衬套和转子壁面均为绝热壁面,相较于光滑篦齿,带分流通道后,大量气流被卷吸进通道内,而通道内上下游气流互相碰撞、掺混产生的耗散热量又无法通过壁面传导出,从而在通道处形成了局部高温区域,致使气流的风阻温升大幅升高。当转速升高时,分流通道内上下游气流之间的碰撞、掺混也随之增强,气流产生的耗散热量也随之增加,最终其与光滑篦齿风阻温升的差异也越大。

3 结 论

本文主要研究分流通道对篦齿封严性能和风阻温升的影响,并对分流通道的周向间隙率、通道数量、旋转速度和进出口压比这4个参数进行研究。为此,所计算的工况为:旋转速度 $N=3\times 10^3\sim 2.1\times 10^4$ r/min,沿程通道数量 $S=1\sim 4$,气流进出口压比 $PR=1.1\sim 1.5$,分流通道周向间隙率 $\beta=1/3\sim 3$ 。通过本文对带分流通道的台阶型篦齿研究得到了以下结论:

(1)分流通道对篦齿封严的作用主要是通过离心作用使核心射流被卷吸进分流通道内,从而增大了气流流动阻力,降低了台阶型篦齿的流量系数。

(2)分流通道的周向间隙率 β 对篦齿的封严特性有所影响,当 β 从 $1/3$ 增大到 $1/2$,篦齿的流量系数有所升高,风阻温升有所降低;继续增大 β ,篦齿的流量系数逐渐降低、风阻温升逐渐升高。当 $\beta\geq 1$ 时,增大周向间隙率 β 有助于提高篦齿的封严性能。

(3)随着分流通道数量的增加,篦齿的流量系数逐渐升高,分流通道的抑制泄漏能力逐渐恶化,其中当沿程分流通道从数量1增加到2时,流量系数变化非常剧烈,升高了4.7%。在下游增设分流通道会导致分流通道对台阶型篦齿的密封性能提升作用被抵消,不利于篦齿的封严。

(4)随着旋转速度从 3×10^3 r/min增加到 2.1×10^4 r/min,篦齿的流量系数逐渐降低,分流通道的抑制泄漏能力逐渐增强。当转速达到 2.1×10^4 r/min时,带分流通道的篦齿相较于光滑篦齿的流量系数降低了4.9%。

(5)在固定转速下,随着气流进出口压比从1.1增加到1.5,气流的风阻温升不断降低,且风阻温升

随进出口压比的变化曲线近似线性;同时篦齿的流量系数随之升高,篦齿的封严性能不断恶化。

参考文献:

- [1] LI Guoqing, ZHANG Qian, LEI Zhijun, et al. Leakage performance of labyrinth seal for oil sealing of aero-engine[J]. Propulsion and Power Research, 2019, 8(1): 13-22.
- [2] LIU Kuo, HAN Lingsheng, WANG Yongqing, et al. Theoretical and experimental research towards labyrinth sealing mechanism of liquid nitrogen in the cryogenic spindle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108502.
- [3] RATHMANN U, OLMES S, SIMEON A. Sealing technology: Rub test rig for abrasive/abradable systems[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Montreal, Canada: ASME, 2007: 223-228.
- [4] UNTAROIU A, WOOD G H, MORGAN R N. Design of experiments to investigate geometric effects on fluid leakage rate in a balance drum seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(7): 072506.
- [5] CANGIOLI F, VANNINI G, PENNACCHI P, et al. Rotordynamic characterization of a staggered labyrinth seal: Experimental test data and comparison with predictions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(1): 011009.
- [6] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Labyrinth seal rotordynamic characteristics part I: Operational conditions effects[J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(5): 1199-1211.
- [7] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Labyrinth seal rotordynamic characteristics part II: Geometrical parameter effects[J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(5): 1281-1291.
- [8] CHUN Y H, AHN J. Effects of geometric parameters of a staggered labyrinth seal on leakage flow[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37: 2959-2968.
- [9] HILFER M, HOGG S, INGRAM G. Experimental validation of a curtain type fluidic jet seal on a turbine rotor shroud[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Montreal, Quebec, Canada: ASME, 2015: V05CT15A012.
- [10] MACCALMAN J, HOGG S, INGRAM G. Application of fluidic curtains to turbine rotor tip seal geometries[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Oslo, Norway: ASME, 2018: V008T29A017.
- [11] HOGG S I, GOMEZ RUIZ I. Fluidic jet barriers for sealing applications[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. [S.l.]: ASME, 2011: 779-788.
- [12] RAI A C, PRABHUDHARWADKAR D, MURTHY S, et al. Effect of air-curtains on labyrinth seal performance[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Seoul, South Korea: ASME, 2016: V05AT15A021.
- [13] 唐萌, 赵晨旭, 翟世杰. 射流对不同封严篦齿特性的影响分析研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 130-134.
TANG Meng, ZHAO Chenxu, ZHAI Shijie. Study on effect of jet on characteristics of different labyrinth seal[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(3): 130-134.
- [14] 曹永华. 一种基于射流抑制泄漏的篦齿封严效果研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
CAO Yonghua. A study based on using jet to suppress leakage flow in the labyrinth seal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [15] GHAFFARI P, WILLINGER R, BAUINGER S, et al. Impact of passive tip-injection on tip-leakage flow in axial low pressure turbine stage[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Montreal, Quebec, Canada: ASME, 2015: V02AT38A002.
- [16] GHAFFARI P, WILLINGER R. On the impact of passive tip-injection on the downstream flow field of a shrouded LP-turbine: CFD and experimental results [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Seoul, South Korea: ASME, 2016: V02BT38A009.
- [17] WASILCZUK F, FLASZYNSKI P, KACZYNSKI P, et al. Air curtain application for leakage reduction in gas turbine shroud sealing[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112: 106636.
- [18] WASILCZUK F, FLASZYŃSKI P, KACZYŃSKI P, et al. Passive reduction of leakage by transverse jet [J]. Journal of Fluids Engineering, 2021, 143(1): 011204.
- [19] WASILCZUK F, FLASZYNSKI P, PYCLIK L, et al. Feasibility study of fluidic sealing in turbine shroud [J]. Materials, 2021, 14(13): 3477.
- [20] GU Qianlei, WU Zhengfeng, YANG Jiangang, et al. A flow control method for the leakage reduction of annular gas seals using the helical gas curtain generator [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 141: 108528.
- [21] ZHANG Li, ZHU Huiren, LIU Cunliang, et al. Experimental and numerical investigation on leakage characteristic of stepped labyrinth seal[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Seoul, South Korea: ASME, 2016: V05AT15A016.