

文章编号:1000-8055(2020)09-1884-09

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2020.09.010

封严间隙对盘缘密封性能影响的数值研究

张庆才, 谭晓茗, 罗擎阳, 张靖周
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 通过对真实工况下高压涡轮的盘缘封严进行三维数值模拟,研究了 3 种不同轴向间隙和径向间隙对封严效率和盘腔内流场变化特性的影响规律,结果表明:针对复合封严结构及研究参数范围,由于静盘封严环将盘腔划分为封严外容腔和封严内容腔,而封严外容腔可以有效地将主流燃气阻隔在内,因此封严内容腔具有较高的封严效率。当轴向间隙增大时,封严环轴向重合度会逐渐减小,同时冷气出流阻力降低,盘腔的封严效率因而提高。当轴向间隙一定径向间隙逐渐减小时,封严外容腔径向距离减小,此时盘腔低半径处封严效率升高。

关 键 词: 盘缘封严; 燃气入侵; 轴向间隙; 径向间隙; 封严效率

中图分类号: V231.5

文献标志码: A

Numerical investigation on influence of sealing clearance on sealing performance

ZHANG Qingcai, TAN Xiaoming, LUO Qingyang, ZHANG Jingzhou
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A three-dimensional numerical simulation of the rim seal of a high-pressure turbine was carried out. To reveal the sealing efficiency and the flow field characteristics in the cavity, different parameters of axial and radial clearances were analyzed. Results showed that the sealing ring divided the disk cavity into an outer cavity and an inner cavity. The outer cavity could effectively resist the mainstream gas, therefore the inner cavity had a higher sealing efficiency. With the increase of axial clearance, the overlap length and the resistance of the coolant flow decreased, so the sealing efficiency of the disk cavity was improved. With a constant axial clearance, the radial distance of the outer cavity decreased as the radial distance decreased. The sealing efficiency at the lower radial region could be improved.

Key words: rim seal; gas ingestion; axial clearance; radial clearance; sealing efficiency

盘缘封严作为航空发动机二次空气系统的重要部件,可以有效抑制高温燃气入侵盘腔,防止涡轮盘烧蚀,而合理的结构设计可显著减少从压气

机侧抽引的冷空气的使用量。研究表明,涡轮盘腔内入侵的燃气增加到一定的体积分数便能使涡轮盘的寿命降低 50%;另外,减小 50%的封严冷

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 国家科技重大专项(2017-111-0003-0027)

作者简介: 张庆才(1995—),男,硕士生,主要从事航空发动机涡轮盘流动与换热特性研究。

引用格式: 张庆才,谭晓茗,罗擎阳,等. 封严间隙对盘缘密封性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1884-1892.
ZHANG Qingcai, TAN Xiaoming, LUO Qingyang, et al. Numerical investigation on influence of sealing clearance on sealing performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1884-1892.

气量可将涡轮发动机的整体效率提高 0.5%^[1],因此采用合适的封严结构不仅可以提高涡轮的性能与安全性,而且对发动机的整体设计具有重要意义^[2]。

为追求高效的盘缘密封,国内外研究者开展了大量的数值与实验研究工作。Johnson 等^[3]针对基础封严结构(轴向封严和径向封严等)提出了燃气入侵的流动机理,Owen 等^[4-5]根据燃气入侵的机理进一步提出外部诱导入侵(externally-induced ingress)和旋转诱导入侵(rotationally-induced ingress),揭示了盘腔内气流的流动特性。为以后封严结构的研究奠定了基础。

针对不同的封严结构,Schuler 等^[6-7]在复合封严和轴向封严的对比研究中,发现复合封严结构的封严效率高于轴向封严,采用圆弧倒角的复合封严还能改善叶根区域温度变化,降低气动损失。Popovic 等^[8]提出了覆叠封严、加容腔封严、改变倒角封严等不同形状的封严结构,揭示了各自的密封性能。Savov 等^[9]研究了单唇(single lip)和双唇(double lip)封严结构,发现双唇密封性能明显优于单唇封严,在取得相同的密封效果时,双唇封严所需的冷气量比单唇封严所需要的要少。陶加银等^[10-11]对常温低转速工况下双重轴向和径向-轴向封严结构进行了数值研究,计算得到了燃气入侵和冷气出流时的流场情况。研究表明,相比基础封严结构,引入双重封严明显改善封严性能。Jia 等^[12]研究了高温高转速真实工况下径向-轴向封严的密封性能,同样发现,与基础封严结构相比,径向-轴向封严将获得最佳的封严性能。

针对封严结构中添加凸起结构,Moon 等^[13]以覆叠封严(overlapping rim seal)模型为基础,在动盘封严环(overlapping)上添加封严齿,并研究了封严齿位置及其几何参数对密封效果的影响。计算结果表明,封严齿本身的安装就增强了封严性能,齿的高度对封严特性影响较大,而宽度影响甚微,并且封严齿存在着最佳位置。王鸣、邬泽宇等^[14-15]运用实验方法对径向封严、轴向封严、双齿封严 3 种封严结构内部添加凸起结构进行了研究,通过观察改变凸起数目和凸起迎风面积对涡轮腔内各参数(封严效率、总压、静压)的影响,揭示了封严效率和最小封严流量的变化规律。

针对封严本身的结构参数,Popovic 等^[16]在主流道只含有动叶情况下的覆叠封严结构中,研究了径向间隙、轴向间隙、轴向重合度等几何参数

对涡轮级效率和密封性能的影响。孔祥林等^[17]和高庆等^[18]以轴向封严为研究对象,开展了数值仿真计算。得到了不同动静叶轴向距离、密封间隙尺寸和盘缘封严轴向位置对盘缘密封燃气入侵和封严效率的影响规律。

在上述封严结构研究中,更多地是关注低转速、低压和常温工况下封严盘腔燃气入侵和封严效率问题,对于高温高压高转速的航空发动机真实工况下盘缘封严密封性能的研究还需要完善。本文采用稳态冻结转子方法^[19]对真实工况下第一级高压涡轮的复合盘缘封严进行了三维数值模拟,研究了不同轴向间隙和径向间隙对复合盘缘封严出口处的腔内流动情况、周向压力和封严效率的影响。

1 计算模型

本文采用的计算模型如图 1 所示,对某型高压涡轮进行了适当简化,导叶 30 片,动叶 60 片。选取其中 1/30 个圆周(12°)的物理模型进行数值计算。图 2 给出了复合盘缘封严的几何结构。涡轮盘盘缘半径 $b=287\text{ mm}$,静叶和动叶高度均为 60 mm,盘缘封严中存在着动盘封严环 1 和静盘封严环 2。静盘封严环将封严盘腔分割为内外两个容腔,涡轮盘高半径且位居封严外侧的为封严外容腔,另一个为封严内容腔。动盘封严环末端

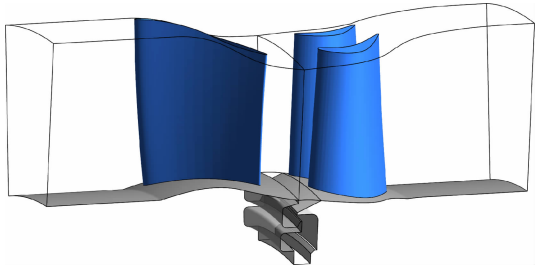


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

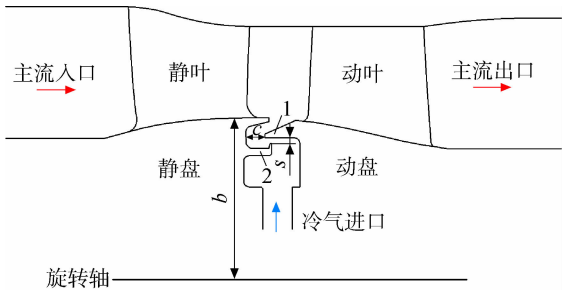


图 2 复合封严几何模型
Fig. 2 Composite rim seal geometry model

至静盘壁面距离为轴向间隙 c ; 静盘封严环末端齿尖至动盘封严环距离为径向间隙 s 。轴向间隙和径向间隙为本文研究变量, 在研究的过程中以保持动静叶型、动静叶轴向位置、主流道和轮毂轴向位置不变为前提。

相应的边界条件如下: 工质采用理想气体, 燃气入口和封严冷气入口均为质量流量入口, 单级涡轮出口给定平均静压, 参考压力为零; 封严腔冷气流加入一定体积分数的示踪气体(二氧化碳气体), 用于确定盘缘密封的封严效率。表 1 给出了具体的计算工况和边界条件。

表 1 计算条件和边界条件
Table 1 Calculation and boundary conditions

参数	数值及详情
轴向雷诺数 $Re_w/10^6$	2.15
旋转雷诺数 $Re_\varphi/10^7$	1.27
封严冷气占主流质量流量百分比/%	0.6
主流入口总温/K	1760
封严冷气入口静温/K	800
出口静压/Pa	629500
离散格式	高精度格式

旋转盘给定旋转角速度 ω , 旋转雷诺数定义为

$$Re_\varphi = \frac{\rho \omega b^2}{\mu}$$
 (1)

式中 ρ 和 μ 分别为气流的参考密度和动力黏度, b 为涡轮盘半径, 下标 φ 表示周向。

轴向雷诺数定义为

$$Re_w = \frac{\rho v b}{\mu}$$
 (2)

式中 v 为主流轴向速度 (m/s); b 为盘缘半径 (m); μ 为动力黏度 (kg/(m · s)), 下标 w 表示轴向。

无量纲角度定义为

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}$$
 (3)

式中 θ_0 是计算模型的起始角度, θ_1 是计算模型的终止角度, θ 为测点角度。计算模型中起始和终止角度分布如图 3 所示。

无量纲压力系数定义为

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{0.5 \rho \omega^2 b^2}$$
 (4)

式中 p 为选择点静压, $\bar{p}$ 为选择点对应位置静压

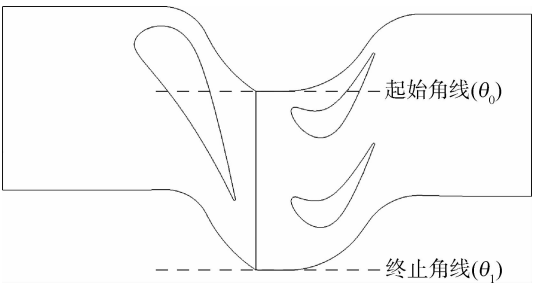


图 3 周向角度示意图

Fig. 3 Diagram of circumferential angle

的周向平均值, 该压力系数表征外部诱导入侵的诱因及周向压力分布。

封严效率定义为

$$\epsilon = \frac{\varphi - \varphi_\infty}{\varphi_0 - \varphi_\infty} \times 100\%$$
 (5)

式中用 φ 表示某处的二氧化碳体积分数, φ_0 代表冷气入口二氧化碳体积分数, φ_∞ 为主流二氧化碳体积分数, 本文用封严效率 ϵ 的大小来准确地描述复合盘缘封严的封严性能, 封严效率 $\epsilon = 100\%$ 表示该处无主流入侵, 完全密封, 封严效率 $\epsilon = 0$ 表示该处均为主流气体, 主流完全入侵。

2 计算方法

针对计算模型具有的旋转特性, 本文采用 ANSYS CFX 17.2 软件对 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程进行数值求解, 计算网格采用 ICEM-CFD 软件进行结构化网格划分, 网格如图 4 所示, 在轮毂、动叶、静叶等固体壁面处划分了附面层网格, 第 1 层网格布置在距壁面 0.008 mm 的位置, 经计算, 保证了壁面 y^+ 值在 60 以下。为了保证计算网格的无关性, 预先对多套网格进行了对比分析, 图 5 给出了网格数目对封严出口附近周向静压分布计算结果的影响, 图中横坐标为无量纲角度 θ^* , 纵坐标 p 为静压值。可以认为当整体网格数超过 600 万时封严出口处的周向静压分布相一致, 即满足网格独立性验证条件, 最终数值模拟选取的网格数为 650 万左右。

图 6 给出了动静计算域的划分, 静叶所处的计算域为静止域, 动叶和转-静盘腔所处的计算域为旋转域, 静止域和旋转域之间由转静交界面分隔开。其中, 盘腔内静盘固体壁面为静止壁面。吴康等^[20]在整级透平中转静轮缘封严问题的研究中发现, 上述计算域的设置能够准确地模拟腔室内部的流态。此外, 叶片、轮毂和封严固体

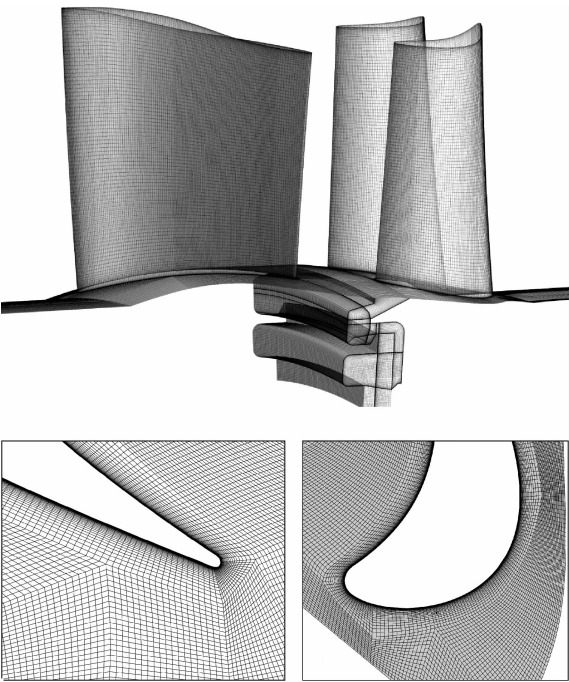


图 4 复合封严网格示意图

Fig. 4 Grid diagram of composite rim seal

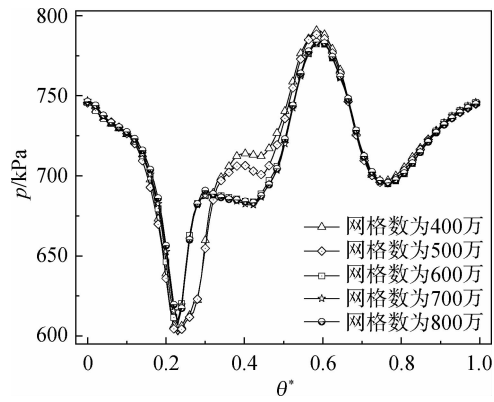


图 5 网格独立性验证

Fig. 5 Grid independence test

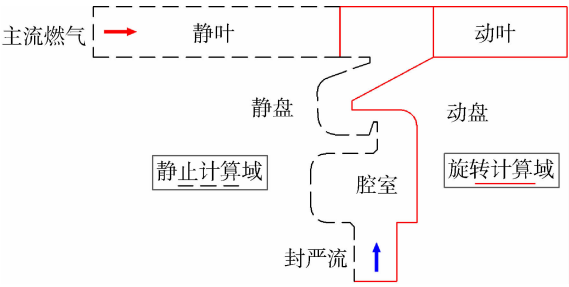


图 6 计算域示意图

Fig. 6 Diagram of computational domain

壁面设置为光滑、绝热、无滑移壁面,周向边界设置为旋转周期面,转-静交界面类型设置为 frozen rotor。

图 7 给出了不同湍流模型计算得到的静叶尾缘附近不同半径 r 处的静压分布情况,图中纵坐标中 $\bar{p}_{\text{exp}}$ 为实验数据的平均静压。 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 、RNG ($k-\epsilon$ 和 SST (shear stress transport) 湍流模型的数值模拟结果与实验数据相比都有一定偏差,本文选取与实验数据最为接近的 $k-\epsilon$ 湍流模型。

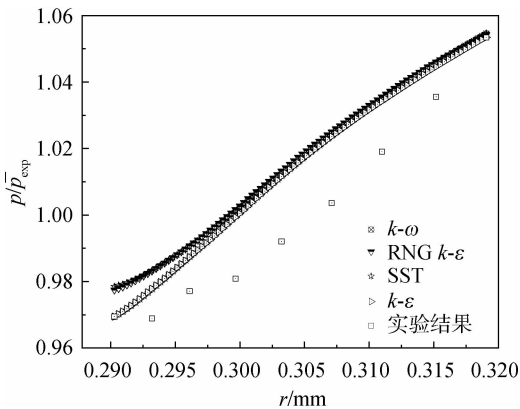


图 7 湍流模型验证

Fig. 7 Validation of turbulence models

数值计算差分格式均采用 high resolution 格式,选择 scalable 函数壁面处理方法。各变量的残差收敛标准为 10^{-5} ,且各监测面的参数不再发生变化时认为计算收敛。

3 计算结果与分析

3.1 封严轴向间隙的影响

为获得轴向间隙 c 对盘缘封严密封效率的影响。本文保持封严间隙与静叶尾缘的距离一定,改变封严间隙动盘侧结构的轴向位置,轴向间隙 c 分别取 4.5、5.5 mm 和 6.5 mm。图 8 为 3 种不同轴向间隙封严结构在给定冷气流量时,即一定冷气流量下封严间隙出口处中部的无量纲压力系数 C_p 沿周向的分布。图中明显看出盘缘封严间隙处压力的周向不均匀性,高压区域和低压区域周向交替分布,这是因为高压涡轮主流通道内的高温气体经静叶后受到静叶尾迹和动叶前缘流场的共同作用。

随着轴向间隙的增大,封严间隙出口处的面积增大,气流会进一步膨胀和混合,从曲线中可以看出:间隙处压力峰值逐渐下降,周向的压差也有所降低。而封严盘腔外部主流与盘腔内的压力差正是诱导燃气入侵的关键因素之一,轴向间隙增大会导致盘腔内外的压力差减小,相应的主流燃

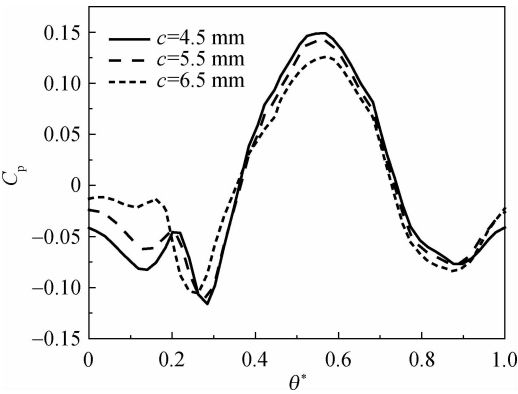


图 8 不同轴向封严间隙顶部周向无量纲压力系数分布
Fig. 8 Distribution of non-dimensional pressure coefficient along circumferential direction on top of different axial seal clearance

气入侵也减小。这表明增大轴向间隙对于提高本文研究的复合盘缘封严的封严效率有好处。

为了更好地研究轴向间隙变化对主流入侵的影响,图 9 对比了 3 种轴向间隙下主流与转-静盘腔交界面处的径向速度(radial velocity)分布,径向速度可以直观地反应气流在封严间隙处的入侵与出流情况。图中速度大于零的区域表示封严腔内气体出流,速度小于零的区域表示主流入侵。可以看出:主流入侵的区域主要集中在静叶尾缘附近,即为图 8 所示的高压区域。相对于盘腔内压力,静叶尾缘区域的外部通道内压力大,表现为尾缘区域入侵明显。而远离静叶尾缘和动叶前缘

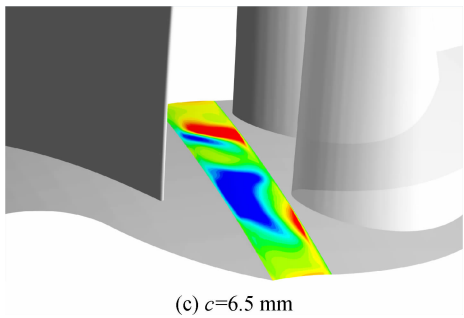
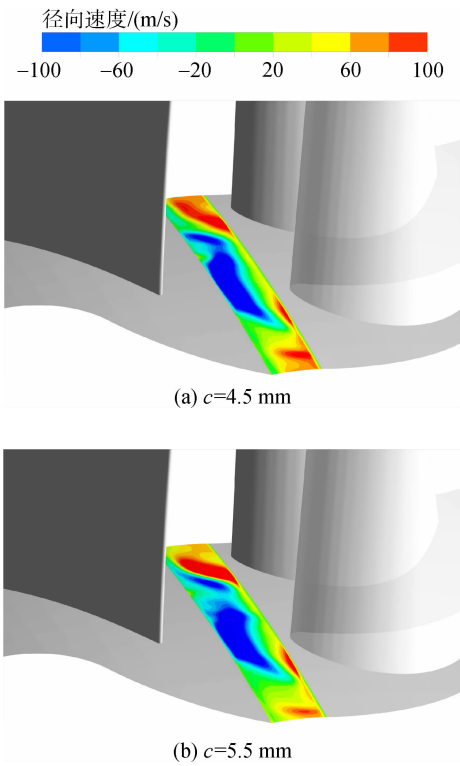


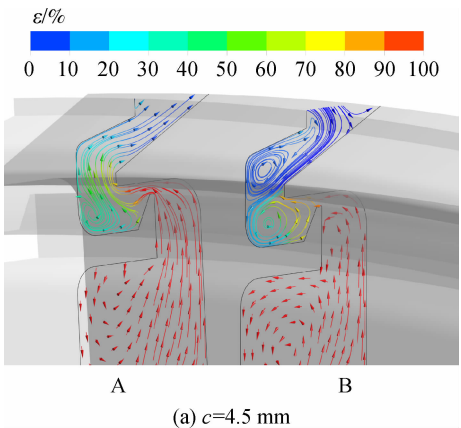
图 9 3 种轴向间隙下封严出口处径向速度分布
Fig. 9 Radial velocity distribution at the exit of the rim seal with three axail clearances

的低压区域,发生出流。

本文轴向间隙的增加会使得封严出口更接近动叶前缘,而此时,封严间隙受动叶前缘压力场的影响就会加强,表现为靠近动叶前缘附近的封严出流区的径向速度会随着轴向间隙增大而显著减小,特别是 $\theta^* < 0.2$ 的区域(从图 8 中也可以发现该区域的静压明显增大)。此外,从交界面处的径向速度云图可发现,轴向间隙 c 由 4.5 mm 增加至 6.5 mm,封严出流的面积是不断增加的。这表明增大轴向间隙对于复合盘缘封严的出流情况是具有一定的积极作用。

图 10 分别在 3 种轴向间隙盘腔内出流区和入侵区截了 2 个剖面,A 和 B 分别为出流区流场结构和入侵区流场结构,图中截面流线的颜色表示封严效率的大小(颜色的改变也反应了主流气体和封严冷气的分布和掺混情况)。图 11 给出了复合封严出流区和入侵区的流动简图。黑实线为燃气与冷气掺混后的流动路径,黑虚线为封严冷气的流动路径。

如图 11(a),在出流区,盘腔外部压力较小,封严冷气在离心泵效应的影响下,紧贴着旋转盘穿过封严外容腔,与封严出口入侵的燃气掺混后进入主流道。在静盘外容腔内,封严冷气沿动盘



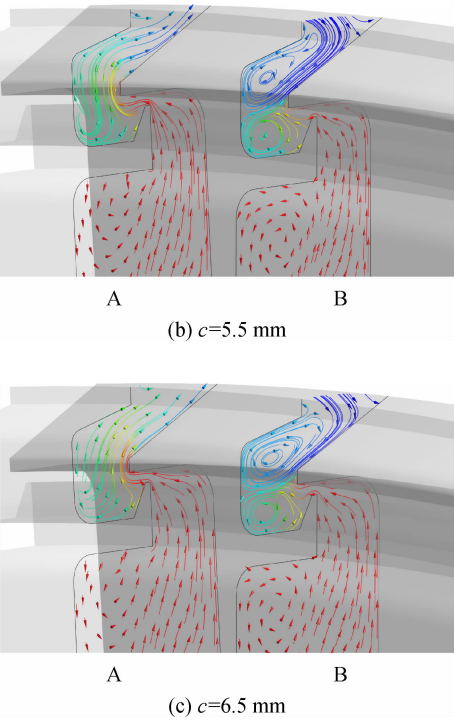


图 10 3 种轴向间隙下盘腔流场结构
Fig. 10 Flow field structure in rim cavity with three axial clearances

封严环末端流动时,会在容腔底部静盘侧诱导形成小的逆时针涡结构。而在动盘封严环倾斜表面上,封严出流与沿倾斜面入侵的气流也会形成小的顺时针涡系结构。封严冷气进入静盘外容腔后推动着掺混流流入主流道,很好地将高温燃气阻隔在静盘外容腔内,保证了封严内容腔内的封严效率。对比图 10 中 3 种轴向间隙出流区的流场结构可知:轴向间隙减小,静盘封严环和动盘封严环的轴向重叠度会因之增加,此时盘腔的流通通道将越发深入封严外容腔,增加了封严冷气的流动阻力,进而影响冷气的出流情况。正如图中动盘封严环末端面位置, $c=6.5\text{ mm}$ 封严结构的封严效率明显高于 5.5 mm , $c=5.5\text{ mm}$ 封严结构的封严效率明显高于 4.5 mm 。此外,出流区封严出口处的封严效率亦是如此。故在上述变化范围内,轴向间隙的增加有助于出流区封严冷气的出流。

图 11(b)为入侵区的流动情况,主流燃气冲击动盘封严环外倾斜壁面,燃气会被分成两组,大部分燃气沿着倾斜壁面下侵盘腔,一部分燃气向高半径处流动并回到主流道。动盘封严环末端面附近处的点线位置为强掺混界面,入侵的燃气在强掺混界面处与沿旋转盘流动的冷气相互掺混,在封严外容腔内形成了位居上部的顺时针涡和位

居下部的逆时针涡。在本文给定的冷气流量下,结合图 10 可以发现这两个涡系结构可以较好地将主流燃气限制在封严外容腔内,从而保证了封严内容腔的封严效率。

图 10 中对比三者入侵区的流动结构发现:轴向间隙的增加,增大了容腔结构。封严外容腔上部顺时针涡结构增大,而强掺混界面和冷气进入外容腔的位置不变,使得下部逆时针涡并没有明显改变。此外,增加轴向间隙不仅使主流吹击动盘封严环上倾斜表面的位置发生上移,这有利于减小下侵的燃气量;而且减小了封严冷气的流动阻力。具体表现在封严外容腔内两涡系的封严效率都有些许提升。

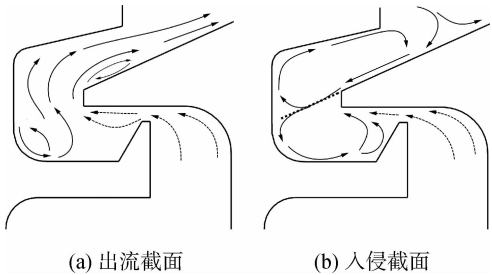


图 11 盘腔流场结构简化示意图
Fig. 11 Simplified flow field diagram in rim cavity

图 12 给出了盘腔内不同半径 r 处的面平均封严效率。结合图 10,静盘封严环的存在保证了封严内容腔的封严效率,在 $r/b<0.965$ 时,盘腔内的封严效率均为 100% 。静盘封严环的末端齿和封严外容腔将主流燃气阻隔在外。在外容腔下半部分中($0.965<r/b<0.975$),随着半径增加封严效率会有所提高,这是因为泵效应作用下的封严冷气沿着动盘封严环进入外容腔的中部区域。

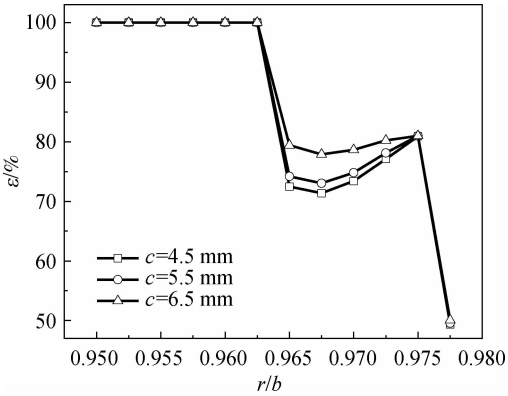


图 12 3 种轴向间隙下沿径向的封严效率分布
Fig. 12 Sealing efficiency distribution along the radial direction with three axial clearances

而主流燃气在图 11(b)强掺混界面处与冷气接触后,沿静盘壁面入侵至外容腔底部,故容腔底部的封严效率会发生低于容腔中部区域的情况。而从曲线对比中发现轴向间隙的增加明显提高了动盘封严环以下区域($r/b<0.975$)的封严效率。而主流入侵剧烈的封严外容腔上半部区域,封严效率虽有增加但并不明显。

3.2 封严径向间隙的影响

本节选择轴向间隙 $c=6.5\text{ mm}$ 的复合盘缘封严,在确保各结构因素不变的条件下,通过更改静盘封严环的径向位置来研究径向间隙 s 对盘缘密封封严效率的影响。径向间隙 s 分别取 1、2 mm 和 3 mm。图 13 给出了 3 种径向间隙下封严出口处中部的周向无量纲压力系数分布的比较。径向间隙的变化对封严出口处主流的压力影响很小,并没有轴向间隙改变影响得那么明显,封严出口处的压力峰值和周向压差并无改变。再结合图 14,可以发现:径向间隙的改变不影响主流与封严交界面处的入侵与出流情况。因此,本节将继续对盘腔内部的流动结构进行分析。

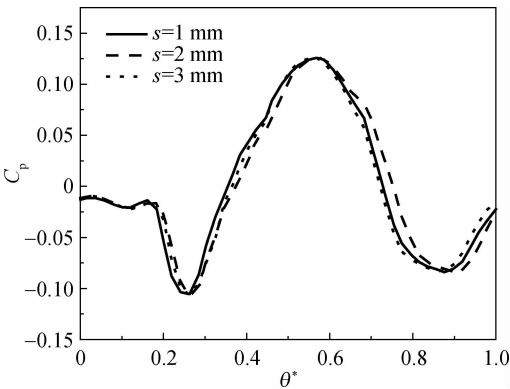


图 13 不同径向封严间隙顶部周向无量纲压力系数分布
Fig. 13 Distribution of non-dimensional pressure coefficient along circumferential direction on top of different radial seal clearance

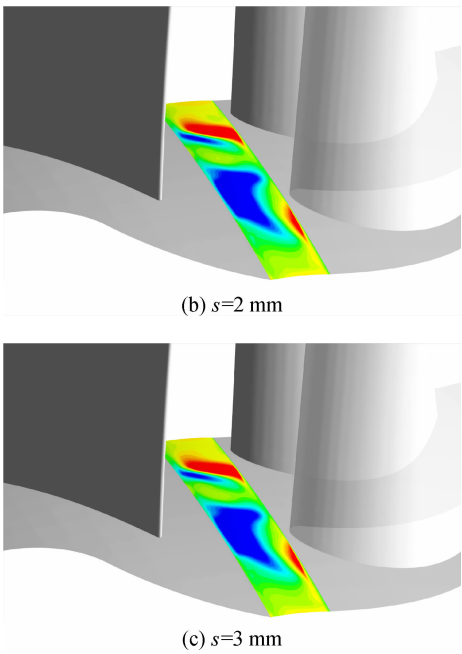
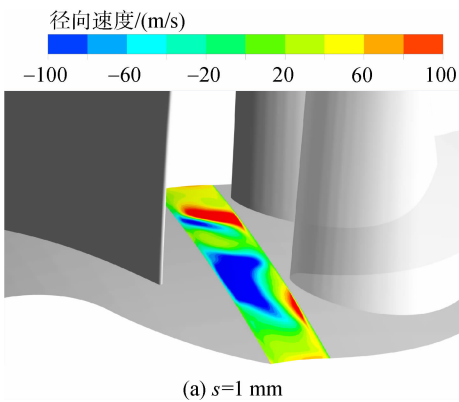
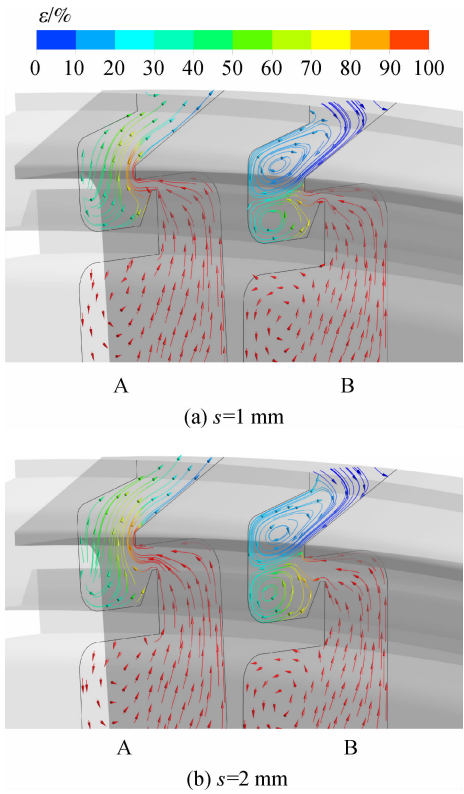


图 14 3 种径向间隙下封严出口处径向速度分布
Fig. 14 Radial velocity distribution at the exit of rim seal with three radial clearance

图 15 给出了盘腔出流区和入侵区的流场结构,在出流区,径向间隙的增加使得封严冷气原本经过的狭小通道变大,而冷气经通道后具有的较高动能也会随之减小。如图可见动盘封严环末端壁面处的封严效率依次下降,即紧贴着旋转盘向高半径处流动的封严冷气量有所降低。在入侵



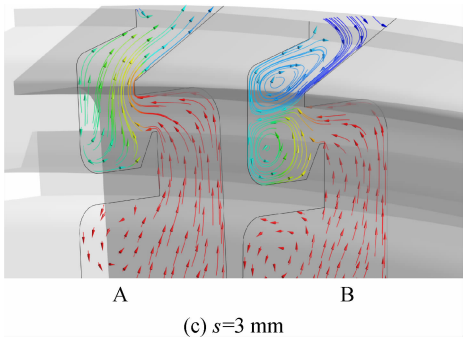


图 15 3 种径向间隙下盘腔流场结构
Fig. 15 Flow field structure in rim cavity with three radial clearances

区,径向间隙的增加使得封严外容腔径向长度加大,从截面流线可见外容腔下部区域的逆时针涡系结构随着径向间隙增大而增大。这将导致高温的燃气会在逆时针涡的带动下,沿着静盘壁面入侵至加深的外容腔底部。结合图 16,径向间隙的增加使得封严外容腔底部的封严效率过早地降低,且在高半径处($r/b>0.975$)也不存在明显提高该处封严效率的趋势。但径向间隙处的封严效率会随着径向间隙的增加而发生些许提升。

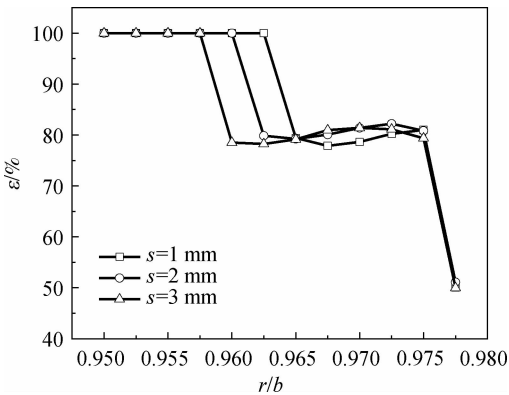


图 16 3 种径向间隙下沿径向的封严效率分布
Fig. 16 Sealing efficiency distribution along the radial direction with three radial clearances

4 结 论

本文围绕着盘腔中不同封严间隙对复合封严密封性能的影响进行分析,模拟真实工况下第一级涡轮主流道和封严流动区域,通过建模、网格划分、计算和分析,得到了不同轴向间隙和径向间隙对封严性能的影响规律,为复合封严结构的进一步优化以及在封严间隙不断变化的实际应用中提供参考。在本文所研究的范围内,得出结论如下:

1) 燃气入侵依然发生在受静叶尾缘高压影

响的封严区域,动叶前缘压力场也会对动叶前缘的封严区域产生一定影响。

2) 静盘封严环将盘腔分割成封严外容腔和封严内容腔,封严外容腔能够滞留大部分入侵的主流燃气,有效提高了封严内容腔的封严效率。

3) 轴向间隙对封严效率的影响较大,径向间隙的影响较小。在封严冷气出口处,轴向间隙能引起主流周向压力发生变化,而径向间隙的变化引起的改变几乎可以忽略。

4) 轴向间隙较小时,封严环的轴向重合度增大,冷气通过封严外容腔的阻力增加,不利于提高盘腔的封严效率。径向间隙较小时,封严外容腔的径向长度变小,外容腔内主流入侵的深度降低,且减小径向间隙有利于增加冷气通过后的动能,因而可提高盘腔的封严效率。

参考文献:

[1] SCOBIE J A,SANGAN C M,OWEN J M,et al. Review of ingress in gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2016,138(12):120801. 1-120801. 16.

[2] KOFF B L,KOFF B L. Gas turbine technology evolution:a designers perspective[J]. Journal of Propulsion and Power,2004,20(4):577-595.

[3] JOHNSON B V,MACK G J,PAOLILLO R E,et al. Turbine rim seal gas path flow ingestion mechanisms[R]. Indianapolis, Indiana, USA; the 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit,1994.

[4] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals;Part 1 rotationally-induced ingress[R]. ASME Paper GT2009-59121,2009.

[5] OWEN J M,ZHOU K,POUNNEY O,et al. Prediction of ingress through turbine rim seals;Part I externally induced ingress[J]. Journal of Turbomachinery,2012,134(3):031013. 1-031013. 10.

[6] SCHULER P,KURZ W,DULLENKOPF K,et al. The influence of different rim seal geometries on hot-gas ingestion and total pressure loss in a low-pressure turbine[R]. ASME Paper GT2010-22205,2010.

[7] SCHULER P,DULLENKOPF K,BAUER H J. Investigation of the influence of different rim seal geometries in a low-pressure turbine[R]. ASME Paper GT2011-45682,2011.

[8] POPOVIC I,HODSON H P. Improving turbine stage efficiency and sealing effectiveness through modifications of the rim seal geometry[J]. Journal of Turbomachinery,2013,135(6):061016. 1-061016. 10.

[9] SAVOV S S,ATKINS N R,UCHIDA S. A comparison of single and double lip rim seal geometries[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2017,139(11):112601. 1-112601. 13.

[10] 陶加银,高庆,宋立明,等. 基于附加示踪变量法的涡轮轮

缘密封非定常封严特性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(11):2154-2158.

TAO Jiayin, GAO Qing, SONG Liming, et al. Numerical investigations on the unsteady mainstream ingestion characteristics of turbine rim seals with additional passive tracer method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(11):2154-2158. (in Chinese)

[11] 陶加银, 高庆, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封非定常主流入侵特性的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1):53-59.

TAO Jiayin, GAO Qing, SONG Liming, et al. Numerical investigations on unsteady mainstream ingestion characteristics of turbine rim seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1):53-59. (in Chinese)

[12] JIA Xingyun, ZHANG Hai, JIANG Yuting. Performance of radial-axial clearance rim seal in realistic working conditions[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77: 373-387.

[13] MOON M A, LEE C S, KIM K Y. Effect of a rib on rim seal performance[J]. Letters in Heat and Mass Transfer, 2014, 59(12):130-135.

[14] 王鸣, 邬泽宇, 罗翔, 等. 凸起数对各封严结构封严效率影响的实验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5):1165-1172.

WANG Ming, WU Zeyu, LUO Xiang, et al. Experiment on the effect of protrusion amount on sealing efficiency of different rim seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5):1165-1172. (in Chinese)

[15] 邬泽宇, 罗翔, 胡彦文, 等. 凸起迎风面积对不同轮缘封严结构封严效率影响的实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(5):1065-1072.

WU Zeyu, LUO Xiang, HU Yanwen, et al. Experiment study on effects of section area of protrusion on sealing efficiency of different rim seal [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(5):1065-1072. (in Chinese)

[16] POPOVIC I, HODSON H P. The effects of a parametric variation of the rim seal geometry on the interaction between hub leakage and mainstream flows in high pressure turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(11):112501. 1-112501. 11.

[17] 孔祥林, 陶加银, 冯增国, 等. 结构参数对轮缘密封封严特性影响的数值研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(4):280-285, 291.

KONG Xianglin, TAO Jiayin, FENG Zengguo, et al. Effects of geometrical parameters on sealing performance of turbine rim seals[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(4):280-285, 291. (in Chinese)

[18] 高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5):12-17.

GAO Qing, TAO Jiaying, SONG Liming, et al. Numerical investigation on the sealing efficiency of the turbine rim seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 12-17. (in Chinese)

[19] DA SOGHE R, BIANCHINI C, SANGAN C M, et al. Numerical characterization of hot-gas ingestion through turbine rim seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(3):032602. 1-032602. 9.

[20] 吴康, 任静, 蒋洪德, 等. 整级透平中转静轮缘封严问题研究: Part I 封严与入侵[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5):873-877.

WU Kang, REN Jing, JIANG Hongde, et al. Rotor-stator rim seal analysis in one stage gas turbine: Part I ingestion and seal[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5):873-877. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)