

典型参数对盘缘封严性能综合影响机制^{*}

董伟林, 王锁芳, 夏子龙

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了掌握典型参数对盘缘封严燃气入侵的综合影响机制, 采用数值方法研究并揭示了燃气入侵形式与封严间隙涡系结构的内在联系, 在此基础上设计了一种内环型盘缘封严结构。结果表明: 增加转速和增加主流流量都会导致封严效率降低, 但是二者的作用却是相互羁绊的; 与传统孔口模型相比, 内环型盘缘封严结构能够有效将回流区涡限制在封严间隙内, 利用羁绊效应拓宽了高封严效率区域的工况范围, 提高了盘缘封严性能。

关键词: 盘缘封严; 燃气入侵; 羁绊效果; 内环型

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 06-1293-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180442

Integrated Influence Mechanism of Typical Parameters on Sealing Effectiveness of Rim Seal

DONG Wei-lin, WANG Suo-fang, XIA Zi-long

(Key Laboratory of Aero-Engine Thermal Environment and Structure, Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to have a good understanding of the integrated influence mechanism of the typical parameters on sealing effectiveness of rim seal, the internal relationship between the ingestion form and the vortex structure in sealing gap was studied and revealed by numerical method. On this basis, an inner ring rim seal was designed. The results show that not only increasing rotation speed but also increasing mainstream mass flow will lead to the reduction of the sealing efficiency, but the role of the two is to fetter each other. Compared with conventional orifice model, the inner ring rim seal utilize fetter effect to widen the work condition range of the high sealing efficiency by restricting the recirculation vortex in the sealing gap. Thus the sealing effectiveness was improved.

Key words: Rim seal; Ingestion; Fetter effect; Inner ring

1 引言

随着航空发动机性能需求和设计技术的不断提高, 涡轮前的温度(Turbine Inlet Temperature, TIT)变得愈来愈高, 对航空发动机热端部件进行有效冷却也愈来愈受到重视。通常从压气机级引入冷气对轮盘进行冷却及封严, 这股冷气流如果过少, 无疑会降低盘腔冷却效果及盘缘封严效率, 但是如果冷气流

过多, 又会使得主流燃气平均温度降低, 进而降低发动机整体循环效率。因此, 掌握盘缘封严结构的封严机理, 设计高效封严结构, 可以有效控制冷气用量, 防止燃气入侵至转静盘腔, 对于提高发动机经济及安全性意义重大。

国外对于转静盘腔燃气入侵的研究开展较早, 主要集中于英国 Bath 大学、英国 Sussex 大学和德国 Aachen 大学等机构, 主要研究项目有 ICAS-GT^[1-3],

^{*} 收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-09-03。

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_0356); 中央高校基本科研业务费专项资金。

作者简介: 董伟林, 博士生, 研究领域为转静盘腔流动及盘缘封严特性。E-mail: nuaadwl@163.com

通讯作者: 王锁芳, 博士, 教授, 研究领域为发动机流动与冷却。E-mail: sfwang@nuaa.edu.cn

ICAS-GT2^[4-6]以及MAGPI^[7-8]等研究计划。Bath大学的Owen^[9-10]将复杂盘腔简化为规则“孔口模型”进行研究,发现燃气入侵整体上可以分为两类:旋转诱导燃气入侵(Rotationally induced, RI),外部诱导燃气入侵(Externally induced, EI)。针对RI,入侵的原因为盘腔供给的流量小于转盘旋转“泵效应”夹带的流量;针对EI,入侵的原因主要是主流燃气经过导叶尾缘分离降速产生高压区,在压力最高点可能会导致燃气入侵。

Chew等^[11]发现随着导叶与封严出口距离的增加,周向压力波动逐渐减弱。Ko等^[12]等发现在主流的卷吸作用下盘腔内可能会形成一个涡流区涡(Gap recirculation zone)。国内茱莉娅等^[13]对不同结构参数的盘缘封严进行了数值和试验研究,并获得其封严效率分布,他们也发现了Roade所提出的回流区涡,并总结了封严效率的区域分布特性。董伟林等^[14]研究了盘缘封严结构临界泄漏特性。吴康等^[15]和Li等^[16]分别提出了非均匀布置出流孔和蜂窝型盘缘封严结构,结果表明其封严效果较传统封严结构有所提高。

总结已有研究,虽然单个参数(转速,主流流量,次流流量)对于封严效果的影响规律已经具备初步的了解,但是多参数对封严效果的综合影响机制以及涡系分布特征和燃气入侵之间的内在关系仍然不甚明朗,事实上,不同参数对于封严效率的影响规律可能并非简单叠加,而是与封严间隙涡系分布密切相关。本文以此为出发点,采用数值方法,分析了典型参数对于封严效率的综合影响机制,在此基础上,提出了一种新型盘缘封严结构(本文称之为内环型盘缘封严结构),并将其与传统孔口模型的封严效率进行了对比。

2 物理模型与计算方法

计算模型如图1所示,其主要结构参数与文献[17]保持一致,不同之处在于将双挡环简化成单挡环,同时封严间隙比 S_c/S 由0.43减小到0.21,这样做的原因是文献[17]采用的双挡环封严结构,其关注点在于盘腔的换热特性以及盘腔的整体封严效率,而本文关注的是封严间隙处的涡系分布规律。表1给出了本文研究模型的结构参数。需要说明的是,图1对盘腔高度进行了比例缩小,结构参数以表1为准。

主流雷诺数定义式为

$$Re_m = \rho V_m b / \mu \quad (1)$$

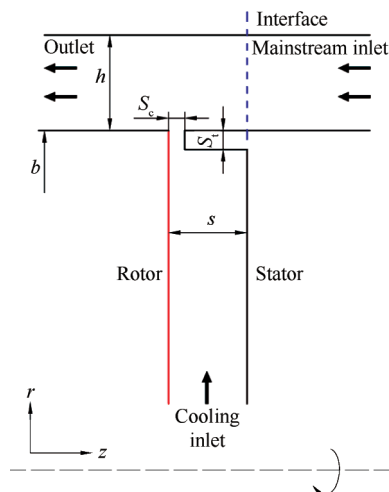


Fig. 1 Geometrical model of the rim seal

Table 1 Geometry parameters of the rim seal

Parameters	Value
Cavity inner radius b/mm	201.6
Annulus height h/mm	17
Minimum Clearance S_c/mm	3.4
Sealing ring thickness S/mm	4
Disk spacing S/mm	16.5

旋转雷诺数定义式为

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

冷气无量纲质量流量定义式为

$$C_w = m_c / \mu b \quad (3)$$

式(1)~(3)中 ρ 为密度, V_m 为主流轴向平均速度, Ω 为转速, μ 为动力粘度, m_c 为冷气质量流量。

采用ICEM-CFD软件进行结构化网格划分。由于本文采用SST $k-\omega$ 模型进行计算,对于近壁第一层网格距离设置为0.005,从而保证 $y^+ \approx 1$ 。将计算域分为静止域和旋转域,旋转域采用MRF模型进行计算,其交界面如图1蓝色虚线所示。主流和次流都采用流量进口,出口采用静压出口。密度采用理想空气进行计算。采用Ansys Fluent 12.1进行求解。表2给出了计算工况和边界条件。

Table 2 Calculation cases and boundary conditions

Parameters	Value
Re_m	$6.11 \times 10^4 \sim 1.22 \times 10^6$
C_w	137~2740
Re_ϕ	$0 \sim 3.3 \times 10^6$
Inlet total temperature/K	300
Density	Ideal-gas
Outlet static pressure/MPa	0.1
Viscous model	SST $k-\omega$

由于本文模型忽略导叶和动叶,计算模型变成周向均布,因此可以采用旋转二维轴对称模型或者周期性三维模型进行计算。图2给出了二维/三维模型和试验^[17]的径向速度对比图,发现在高半径处两种计算模型都与试验结果吻合良好,在低半径处二维模型则略微高估了流体的径向速度。考虑到本文的计算量较大,采用旋转轴对称二维模型进行计算。

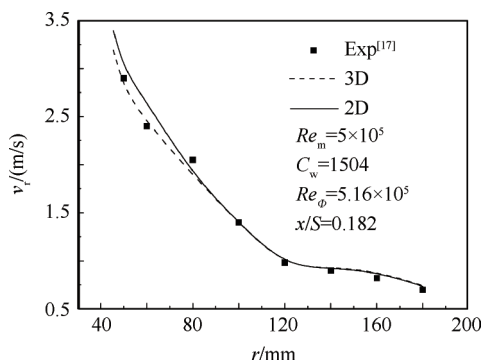


Fig. 2 Comparison of radial velocity for numerical and experimental results

图3对网格进行无关性验证,分别采用8万,12万,15万和20万四套网格进行计算,当网格数为15万时,腔内平均速度变化小于0.3%。因此最终网格数约选定为15万。

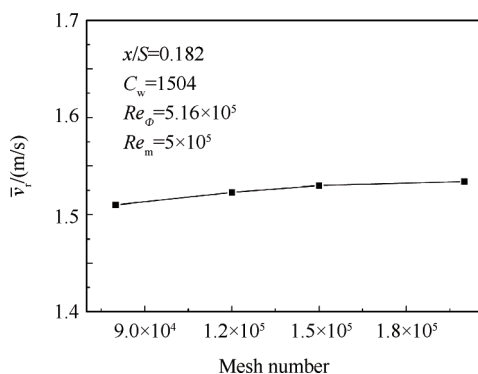


Fig. 3 Grid independence of numerical solution

采用添加用户自定义标量(User defined scalars, UDS)^[13-16]的方法来模拟示踪气体(在试验中通常为CO₂)浓度进行封严效率测量,并将其扩散系数设置为CO₂在空气中的扩散系数(1.6×10^{-5})。封严效率 ε_c 的表达式为

$$\varepsilon_c = \frac{c_s - c_a}{c_o - c_a} \quad (4)$$

式中 c_o 为主流入口的示踪气体浓度,其值设置为1, c_a 为封严冷气入口的示踪气体浓度,其值设置为0, c_s 为某个径向参考位置处的示踪气体浓度,本文以主

流是否进入到转静盘腔内部为燃气入侵标准,径向参考位置为挡环下端2mm处,对于孔口型封严结构,径向参考位置比 $r/b=0.97$,对于内环型封严结构,径向参考位置比 $r/b=0.95$ 。

3 结果与讨论

3.1 旋转雷诺数及主流雷诺数的影响

图4给出了旋转雷诺数对盘缘封严效率的影响曲线,从图4实线可以看出,随着旋转雷诺数的增大,封严效率逐渐降低,这是由于旋转泵效应的增强,使得更多的盘腔内部冷气被甩出至盘腔外,从而导致主流入侵至转静盘腔。将图4的实线和虚线进行对比,可以发现随着主流雷诺数的增大,平均封严效率明显提高。

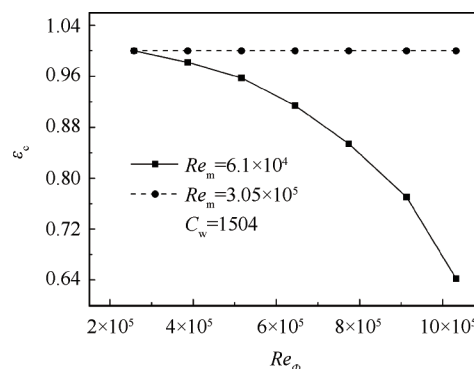


Fig. 4 Variation of sealing efficiency with rotational Reynolds number

图5给出了主流雷诺数对于盘缘封严效率的影响曲线,从图5的实线可以看出,随着主流雷诺数的增大,封严效率逐渐降低;将图5的虚线和实线进行比较,可以发现随着旋转雷诺数的增大,平均封严效率却提高了。将图5和图4的曲线进行对比,发现其规律正好与图4相反,也就是说,主流雷诺数对封严效率的影响作用和旋转雷诺数对封严效率的影响作用这二者之间是相互羁绊的,具体解释在图6给出。

图6给出了对应的流动迹线图 and 封严效率分布云图,从图6(a)中可以看出,随转速的增大,转盘附近流体被甩出腔外,使得主流燃气沿着静盘入侵至盘腔内,此时封严间隙流体的速度分布为靠近转盘流体径向向外而靠近静盘流体径向向内。随着主流雷诺数的增大,如图6(b),在主流的剪切力作用下,封严间隙通道内形成了一个回流区涡(与文献[13]一致),一方面,这个涡挤占了封严间隙的有效流通面积,另外一方面,这个涡的速度分布为靠近转盘流体径向向内而靠近静盘挡环流体径向向外,与由泵

效应所夹带的流体速度相反并互相抵消,从而削弱了转盘旋转泵效应的强度,提高了封严效率。从图6(c)中可以看出,随着主流雷诺数的增大,回流区涡的面积逐渐增大,更多的主流燃气被卷吸至盘腔并发生了燃气入侵(对应于文献[9,10]所提出的EI),使得封严效率降低。同样发现在图6(d)中,随着旋转雷诺数的增大,在泵效应夹带流体的冲击下,回流区涡被限制在封严环间隙内,使得盘腔内封严效率提高。

3.2 封严效率区域分布特性

如图7所示,对封严效率分布特性进行 $12 \times 3 \times 4 = 144$

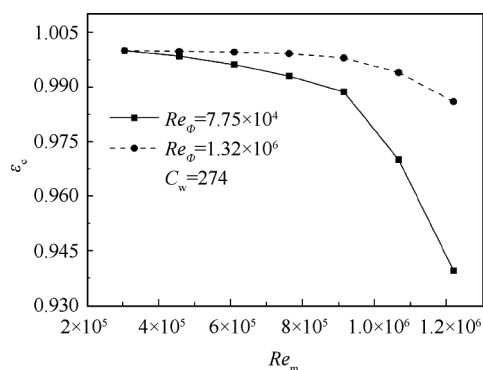


Fig. 5 Variation of sealing efficiency with mainstream Reynolds number

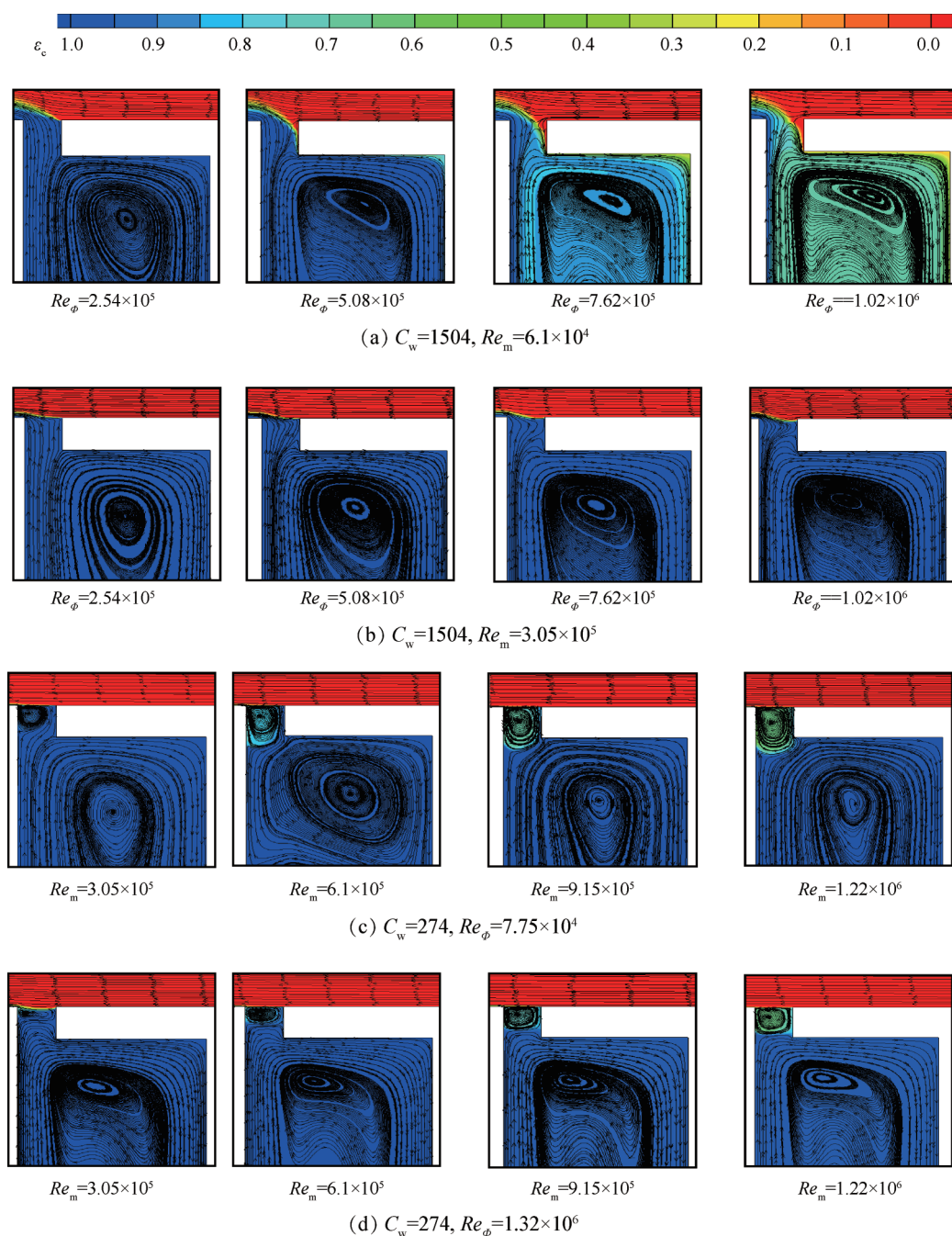


Fig. 6 Streamline and sealing efficiency counter of rim seal

种工况计算,得到其封严效率随旋转雷诺数和无量纲质量流量的变化云图。从图7(a)可以看出,当主流雷诺数较小时($Re_m=6.11\times 10^4$),封严效率云图呈现出明显的单调性,即随着冷气流量的增加封严效率提高,随着旋转雷诺数的增大逐渐发生燃气入侵(RI),使得封严效率降低。当主流雷诺数由 6.11×10^4 增至 3.06×10^5 时,如图7(b)所示,若定义封严效率 $\varepsilon_c > 90\%$ 为高封严效率区域,可以发现高封严效率区域的面积较图7(a)明显增大,这是因为主流的剪切力使得封严间隙内形成回流区涡并与泵效应夹带流量形成羁绊效果,需要更高的转速,转盘泵效应夹带的流量才能抵消这个回流区涡。如图7(c)和7(d)所示,当主流雷诺数增至 6.11×10^5 和 1.22×10^6 时,回流区涡的影响越来越显著,在冷气流量较低区域逐渐发生燃气入侵。在图7(d)的左下角出现了一块明显燃气入侵的区域,这部分低封严效率区域正是由于回流区涡将主流气体卷吸至盘腔所致(EI)。

3.3 一种新型的盘缘封严结构

在上述章节,发现了增大主流雷诺数和增大旋转雷诺数都会导致燃气入侵(分别是沿动盘和静盘入侵),但是二者却存在一种羁绊效果,基于此,本文设计了一种新型盘缘封严结构并称之为内环型盘缘封严结构,如图8所示,其结构特点在于静盘封严环

下端部增加一个挡环。该型封严结构设计出发点有三点:(1)不改变封严间隙 S_c ,以避免实际工程应用中的刮擦碰撞风险。(2)相比直接增加挡环厚度,内环型有限地增加了封严结构的重量。(3)将回流区涡限制于封严间隙通道内,扩大主流和转速的羁绊效果的工况范围,从而提高盘缘封严平均封严效率,特别是在高转速和高主流流量的工况。

图9给出了不同主流雷诺数下两种结构封严效率随转速的变化规律。从图9(a)可以看出,内环型封严结构的封严效率始终略微高于传统孔口型封严结构(在计算范围内平均提高了1.8%)的封严效率,这是因为在主流雷诺数较小时($Re_m=6.11\times 10^4$),旋转诱导燃气入侵为封严结构主要入侵形式,而内环型结构增加了最小封严间隙 S_c 截面的流通距离,略微增加了流动阻力,减少了转盘泵效应夹带流体的流量,进而减缓了燃气入侵。图9(b)为主流雷诺数较大时($Re_m=1.22\times 10^6$)两种结构封严效率曲线的对比,在转速为零时,封严间隙处在主流的剪切力作用下出现了明显的回流区涡。在这个涡的卷吸作用下,传统孔口型封严结构出现了明显燃气入侵现象,而新型封严结构由于在挡环的下端面增设了内环,将回流区涡有效限制在封严环内环与转盘的间隙内,避免其直接入侵至盘腔,在计算范围内平均封严效率提

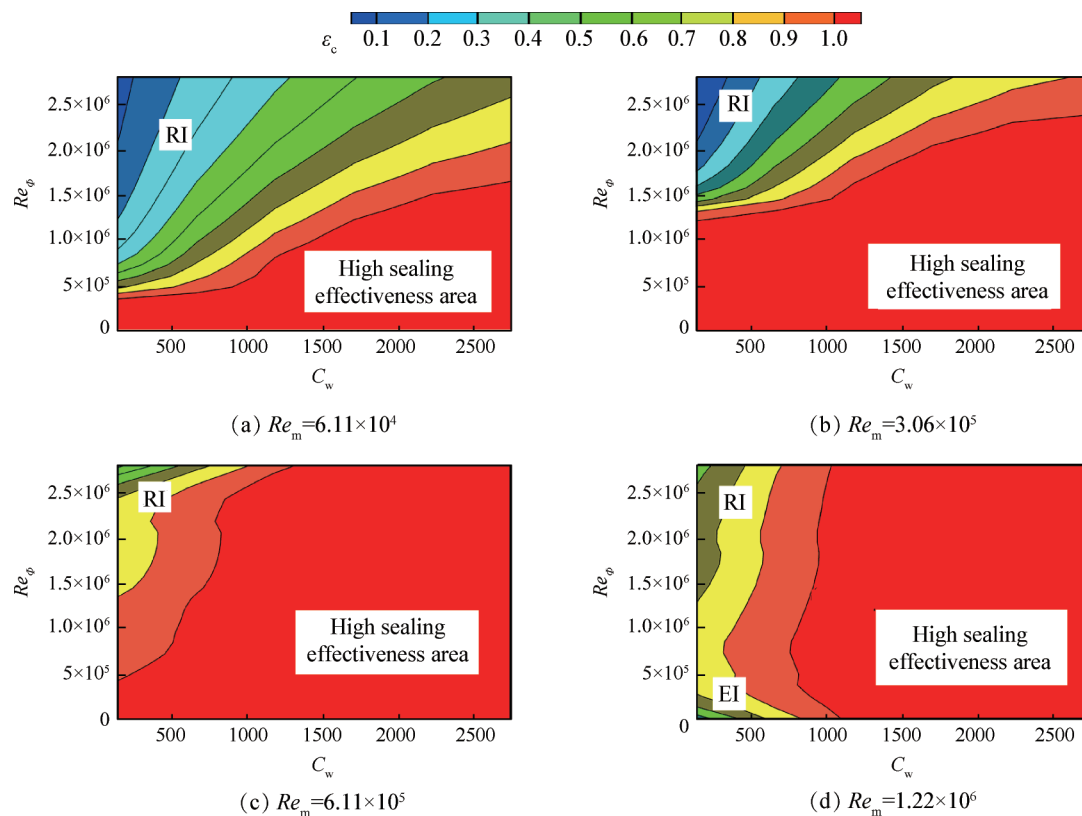


Fig. 7 Sealing efficiency counter with different Re_m and C_w

高了10.4%。随着旋转雷诺数继续增大,传统孔口模型封严结构封严效率迅速上升并接近内环型封严结构,这是因为泵效应夹带流量削弱了主流流体对封严间隙流体的剪切作用。当主流雷诺数由 2.1×10^6 继续增大时,旋转泵效应又占据了主导作用并引发了燃气入侵,使得封严效率逐渐降低。

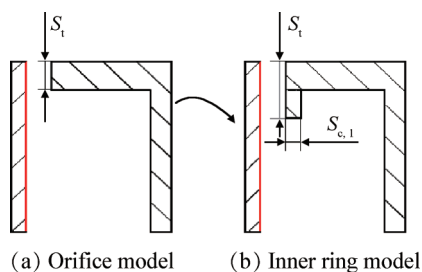


Fig. 8 Sketch of orifice model and inner ring model

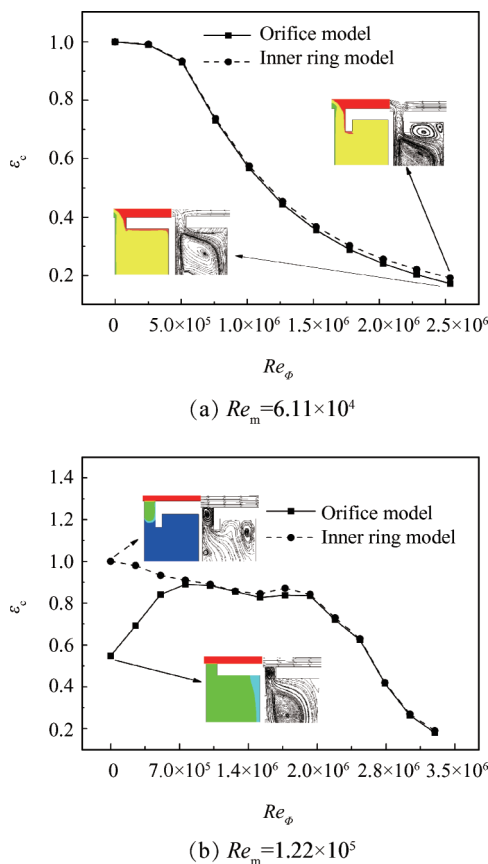


Fig. 9 Comparison of sealing efficiency for two kinds of rim seal

4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)增大转速和增加主流流量都会导致燃气入侵,其燃气入侵形式分别为沿静盘入侵和沿动盘入侵;在主流流量不是特别大的工况下,沿动盘入侵的

燃气由于回流区涡被限制在封严环间隙,使得其无法深入至盘腔。

(2)增加主流流量和增大转速对封严效率的影响作用相互之间存在羁绊效果,但当其中一个因素继续增大时,又将重新对燃气入侵形式占据主导地位。

(3)设计的内环型封严结构较传统孔口模型一方面略微削弱了泵效应的强度,另一方面有效地将回流区涡限制在封严间隙通道内,从而避免了燃气入侵至盘腔。在主流雷诺数为 1.22×10^5 工况下,平均封严效率提高了10.4%。

致 谢:感谢江苏省普通高校研究生科研创新计划项目和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。

参考文献:

- [1] Bohn D, Decker A, Ma H, et al. Influence of Sealing Air Mass Flow on the Velocity Distribution in and Inside the Rim Seal of the Upstream Cavity of a 1.5-Stage Turbine [R]. *ASME GT* 2003-38459.
- [2] Dittmann M, Dullenkopf K, Wittig S. Discharge Coefficients of Rotating Short Orifices with Radiused and Chamfered Inlets [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2004, 126(4): 803-808.
- [3] Bricaud C, Richter B, Dullenkopf K, et al. Stereo PIV Measurements in an Enclosed Rotor-Stator System with Pre-Swirled Cooling Air [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 202-212.
- [4] Bohn D E, Decker A, Ohlendorf N, et al. Experimental Investigations of the Influence of Sealing Air Mass Flow on the Adiabatic Wall Temperature Distribution on the Surface of the Rotor Blisk in a 1.5 Stage Turbine [R]. *ASME GT* 2006-90453.
- [5] Da S, Andreini F. Turbine Stator Well CFD Studies: Effects of Coolant Supply Geometry on Cavity Sealing Performance [R]. *ASME GT* 2009-59186.
- [6] Jeffrey A D, Antonio G V, Andreas B, et al. Heat Transfer in Turbine Hub Cavities Adjacent to the Main Gas Path [R]. *ASME GT* 2010-22130.
- [7] Eastwood D, Coren D D, Long C A, et al. Experimental Investigation of Turbine Stator Well Rim Seal, Re-Ingestion and Interstage Seal Flows Using Gas Concentration Techniques and Displacement Measurements [R]. *ASME GT* 2011-45874.
- [8] Idris A, Pullen K, Barnes D. An Investigation into the Flow Within Inclined Rotating Orifices and the Influence of Incidence Angle on the Discharge Coefficient [J]. *Journal of Power & Energy*, 2004, 218(1): 55-68.
- [9] Owen J M. Prediction of Ingestion through Turbine Rim

- Seals, Part 1: Rotationally-Induced Ingress[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2009, 131(3): 1083-1093.
- [10] Owen J M. Prediction of Ingestion Through Turbine Rim Seals, Part 2: Externally Induced and Combined Ingress [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(2): 1983-1995.
- [11] Chew J W, Green T, Turner A B. Rim Sealing of Rotor-Stator Wheel Spaces in the Presence of External Flow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(2): 433-438.
- [12] Ko S H, Rhode D L. Disk Temperature Details of Rim Seal Turbulent Heat Diffusion and Disk Frictional Heating[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 15(2): 280-287.
- [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 Li-ya, LUO Xiang, XU Guo-qiang, et al. A Theoretical and Numerical Study of Turbine Rim Seal Ingestion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(11): 1511-1516.)
- [14] 董伟林, 王锁芳, 夏子龙. 一种盘缘篦齿临界特性的数值分析和试验验证[J]. 推进技术, 2016, 37(1): 34-39. (DONG Wei-lin, WANG Suo-fang, XIA Zi-long. Numerical Analysis and Experimental Validation of Critical Sealing Characteristics of Rim Seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(1): 34-39.)
- [15] 吴康, 林立, 任静, 等. 端壁侧向出流对透平轮缘密封的影响及优化[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 758-765. (WU Kang, LIN Li, REN Jing, et al. Analysis and Optimization of Interaction Between Endwall Flank Flow and Turbine Rotor-Stator Rim Seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(6): 758-765.)
- [16] Li J, Gao Q, Li Z G. Numerical Investigations on the Sealing Effectiveness of Turbine Honeycomb Radial Rim Seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2016, 138(10): 1-16.
- [17] Roy R P, Xu G, Feng J. Pressure Field and Main-Stream Gas Ingestion in a Rotor-Stator Disk Cavity[R]. *ASME GT 2001-0564*.

(编辑:朱立影)