

DOI: 10.7652/xjtuxb201401010

涡轮轮缘密封非定常主流入侵特性的数值研究

陶加银, 高庆, 宋立明, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 采用附加示踪变量的方法,通过数值求解 URANS 和 SST 紊流模型的方法研究了轮缘密封非定常燃气入侵特性和封严效率,计算了不同冷气量下定常和非定常时均径向轮缘密封的封严效率,并与实验值进行了比较,验证了非定常数值方法研究轮缘密封燃气入侵特性的有效性,对比分析了径向和径向-轴向轮缘密封中等冷气量下定常和非定常的燃气入侵特性。结果表明:静叶尾迹和动叶前缘附近的压力势场的非定常干涉效应及盘腔中非定常的压力分布会强化主流燃气入侵;相比非定常计算,定常分析会低估轮缘密封的燃气入侵量及燃气入侵对盘腔流场的影响;相比径向轮缘密封,径向-轴向轮缘密封可以显著提高涡轮盘腔的封严效率。

关键词: 涡轮轮缘密封;非定常燃气入侵;数值模拟

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0053-07

Numerical Investigations on Unsteady Mainstream Ingestion Characteristics of Turbine Rim Seals

TAO Jiayin, GAO Qing, SONG Liming, LI Jun

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The mainstream ingestion characteristics of turbine radial and radial-axial rim seals in an experimental model turbine stage were numerically investigated by solving the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equations and the SST turbulence model. The additional passive tracer was used to simulate the distribution of mainstream ingestion and its mixing with the sealing flow. The averaged unsteady sealing efficiency of the radial rim seal agrees well with the experimental data. The effectiveness of the utilized URANS approach to investigate the mainstream ingestion characteristics of the turbine rim seal was verified. The steady and unsteady mainstream ingestion characteristics were compared and analyzed at moderate cooling flow. The numerical results show that the unsteady interaction between the vane trailing wake and the blade bow wave will strengthen the mainstream ingestion of rim seals. Unlike the unsteady simulations, the steady simulations will underestimate the mainstream ingestion and its influence on the wheel cavity flow field for two rim seals. The sealing efficiency of the inner cavity will be significantly improved by applying the radial-axial rim seal.

Keywords: turbine rim seal; unsteady mainstream ingestions; numerical simulation

航空发动机转盘和静止部件之间存在一个环形腔室称为转静盘腔,考虑到转盘在高转速下的变形

和偏移,为保证旋转部件安全,转静盘外缘存在较大的间隙。此时,主流的高温燃气会在压力差的作用

收稿日期: 2013-04-23。 作者简介: 陶加银(1988—),男,硕士生;李军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106123);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目。

网络出版时间: 2013-10-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131015.0900.001.html>

下通过转静盘之间的间隙侵入盘腔内部,入侵的高温气流和转盘的摩擦与传热很容易导致转盘过热,在高速旋转的情况下极易造成机械失效,引起安全性问题。为了阻遏主流高温燃气的入侵,从盘腔引入冷却气流来封严盘腔和冷却轮盘。为了避免冷气流需求过多导致工质损失而引起发动机效率和经济性降低,需要合理地设计轮缘密封结构,力求在同等的冷气量下减少燃气入侵,提高封严性能,改善盘腔的冷却效果^[1]。

国内外学者针对轮缘密封进行了大量的研究工作。Roy 在单级透平实验台上研究了两种静叶/动叶布置时的轮缘密封性能,测试了瞬态和时均的压力场分布,给出了 CO₂ 示踪气体浓度定义的封严效率^[2]。Teramachi 等实验和数值研究了齿结构对于轮缘密封封严性能的影响^[3]。Narzary 等实验研究了单齿轮缘密封和双重轮缘密封的封严性能,指出双重密封结构具有更好的封严效果,而且盘腔流场呈现三维非定常特性^[4]。Zhou 等和 Sangan 等采用 CO₂ 示踪气体浓度法研究了包含主流叶片通道时不同轮缘密封结构下的燃气入侵特性^[5-6]。孙纪宁等利用 CO₂ 体积分数法研究了轮缘密封结构对旋转诱导燃气入侵特性的影响^[7]。高庆等采用定常数值方法研究了涡轮轮缘密封的机理以及影响封严效率的结构参数^[8]。鉴于涡轮中主要存在的是主流压力不均匀分布导致的外部诱导燃气入侵,而且盘腔流场和燃气入侵具有高度的三维非定常特性,因此开展轮缘密封非定常燃气入侵特性的研究对于优化设计轮缘密封结构具有重要作用。

本文以 Sangan 等的实验^[6]研究径向和径向-轴向轮缘密封结构并考虑主流静叶/动叶相互干涉效应,采用 CFD 软件 ANSYS-CFX 数值求解 URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 和 SST 湍流模型,采用附加示踪变量的方法对外部诱导的非定常燃气入侵特性进行了研究,对比和分析了定常和非定常的结果差异,比较了径向和径向-轴向轮缘密封结构的封严效率和燃气入侵对盘腔流场的影响。

1 计算模型及数值方法

图 1 给出了径向和径向-轴向轮缘密封结构。表 1 是轮缘密封结构的几何参数。密封间隙比 ($G_{c,ax}=S_{c,ax}/b$) 为 0.010 5,盘腔间隙比 ($G=S/b$) 为 0.105,盘腔冷却空气为中心进气,位置在归一化半径 $r/b=0.44$ 处。

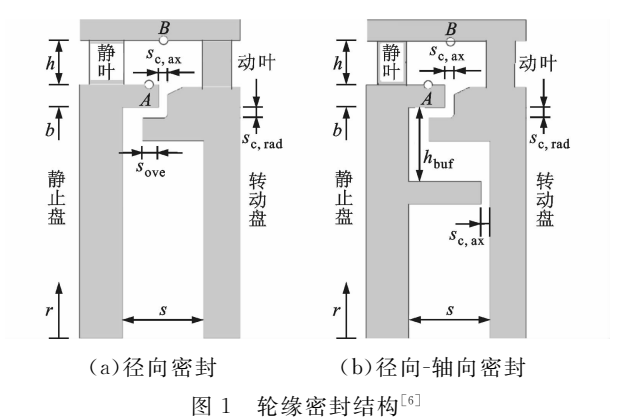


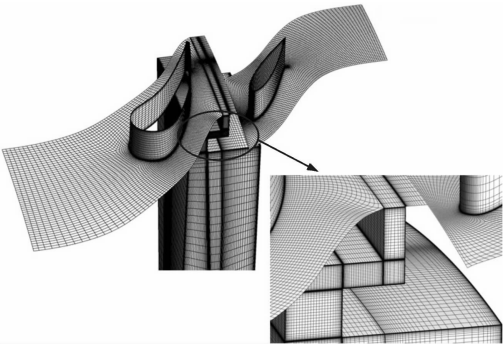
图 1 轮缘密封结构^[6]

表 1 轮缘密封结构几何参数^[6]

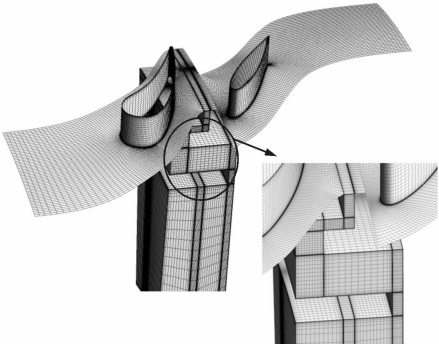
参数	径向密封	径向-轴向密封
h/mm	10	10
b/mm	190	190
$s_{c,ax}/\text{mm}$	2	2
$G_{c,ax}$	0.010 5	0.010 5
s_{ove}/mm	3.70	3.70
$s_{c,rad}/\text{mm}$	2.40	2.40
h_{buf}/mm		16.5

实验中静叶为 32 个,动叶为 41 个,采用 Domain Scaling 方法开展轮缘密封非定常燃气入侵特性研究。网格采用 IGG/AutoGrid 生成的多块结构化六面体网格,壁面进行加密,满足 $k-\omega$ SST 湍流模型对于 $y^+<1$ 的要求。对于盘腔与主流通道的交界面采用完全匹配连接。图 2 给出了轮缘密封结构的计算网格图。采用 ANSYS-CFX 数值求解 URANS 方程和 SST 湍流模型。静叶和盘腔设为静止域,动叶为旋转域,工质采用理想空气。主流进口和冷气进口给定质量流量,出口给定平均静压。计算过程中,当连续方程、动量方程、能量方程和湍流方程的均方根残差小于 10^{-4} 时,认为计算收敛。非定常计算是以定常得到的收敛解为初场,时间步取 3.125×10^{-5} s,对应动叶旋转一个计算通道是 20 步。

本文采用添加一个附加示踪变量并求解其湍流输运方程的方法,通过示踪变量的浓度(即附加变量的质量分数)分布来模拟实验中 CO₂ 示踪气体分布,利用示踪变量的浓度来定义封严效率。在冷气进口设示踪变量浓度为 1,主流进口为 0,主流入侵和封严气流的掺混以及湍流扩散会导致计算域中示踪变量浓度分布介于 0 和 1 之间。利用示踪变量的浓度定义封严效率



(a)径向密封



(b)径向-轴向密封

图 2 轮缘密封计算网格图

$$\epsilon_c = \frac{c - c_a}{c_o - c_a} \tag{1}$$

式中： c 为当地示踪变量浓度； c_a 为主流进口示踪变量浓度； c_o 为封严冷气进口示踪变量浓度。当不提供封严冷气时，完全是主流入侵，盘腔的封严效率为 0，当封严冷气可以完全阻止主流入侵时，盘腔中全是封严冷气，封严效率为 1。

图 3 给出了径向轮缘密封的封严效率的定常计算、非定常计算和实验数据的比较，结果表明非定常计算与实验数据吻合良好，而定常计算高估了径向轮缘密封的封严效率。图 3 同时也验证了本文采用非定常数值方法研究轮缘密封燃气入侵和封严效率结果的可靠性。

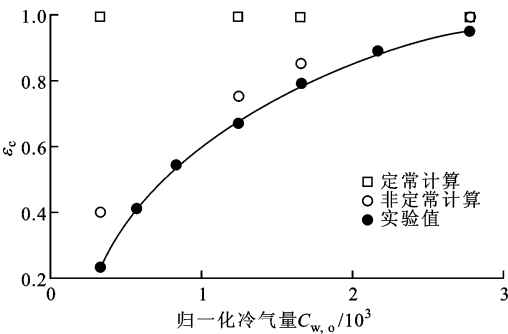
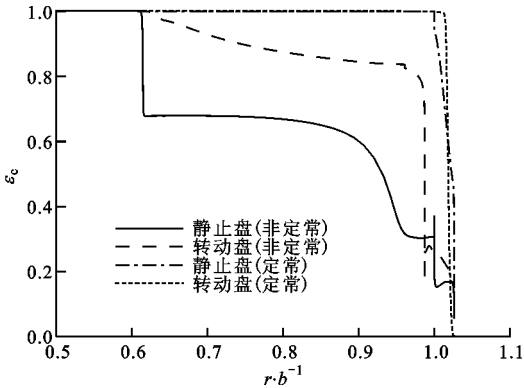


图 3 径向轮缘密封的封严效率比较

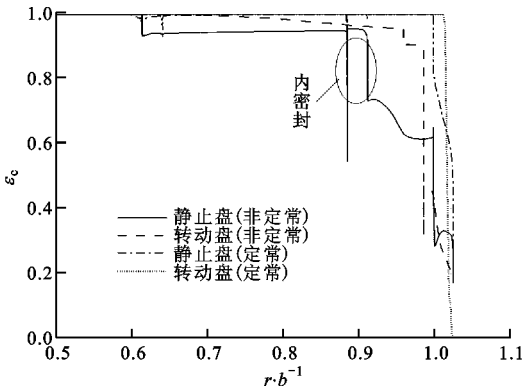
2 结果分析

采用相同的主流和冷气量对径向和径向-轴向轮缘密封的非定常燃气入侵特性和封严效率进行计算分析。主流流量 $\dot{m}_a = 0.51 \text{ kg/s}$ ，对应轴向雷诺数 $Re_w = \rho Wb/\mu = 4.4 \times 10^5$ ；冷气流量 $\dot{m}_o = 5.23 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ ，对应的归一化冷气量 $C_{w,o} = \dot{m}_o/\mu b = 1500$ ；转速为 314.159 rad/s ，对应的旋转雷诺数 $Re_\phi = \rho \Omega b^2/\mu = 8.17 \times 10^5$ 。出口平均静压为大气压。

图 4 给出了两种轮缘密封动静盘的定常和非定常时均封严效率沿径向的分布。径向和径向-轴向轮缘密封的动静盘封严效率的定常结果基本一致，在整个盘腔范围基本上没有受到入侵燃气的影响，只是在外部的密封间隙内效率急剧下降，说明定常计算时主流燃气入侵的影响主要在密封间隙内，无法捕捉到主流入侵深入盘腔内部的影响。非定常计算的封严效率沿径向逐渐降低，数值比定常结果明显小很多，说明相比非定常计算，定常计算会低估主流燃气入侵。径向-轴向密封是在径向密封的基础上在盘腔内由静盘延伸构成一个轴向密封，将盘腔



(a)径向密封



(b)径向-轴向密封

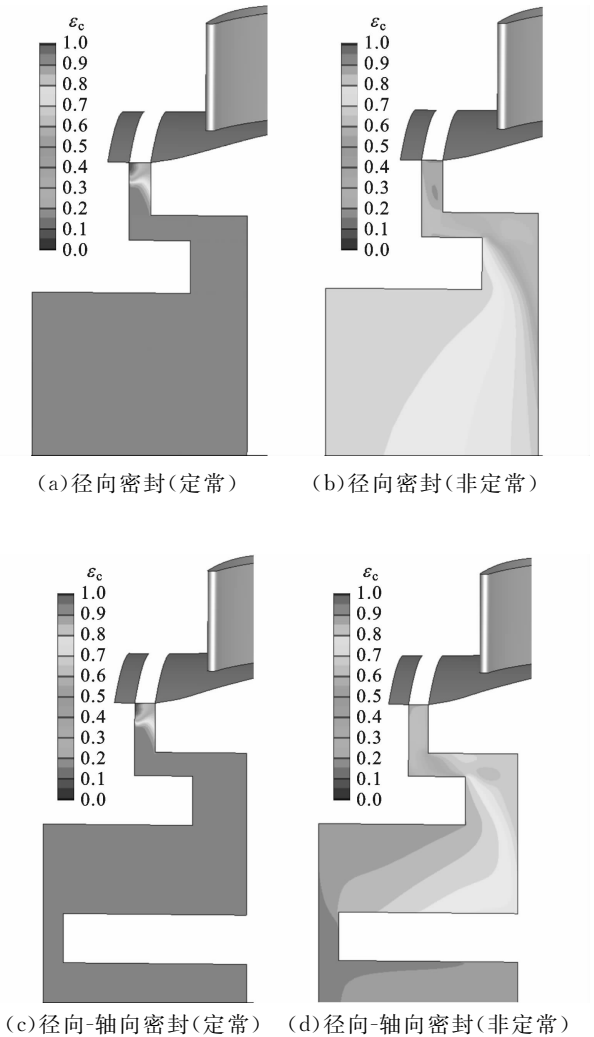
图 4 轮缘密封动静盘上封严效率的径向分布

分为内腔室和内外密封之间的外腔室。在内腔室部分,静盘上的封严效率比径向密封提高了约 40%,动盘上的封严效率提高了 10%左右,说明引入内部密封可以显著改善对内部腔室的保护。对于径向-轴向密封在外部腔室里动盘和静盘上的封严效率也比径向密封的要高,这是由于内部密封强化了进入外部腔室的封严冷气射流,也会改善外部腔室的封严性能。

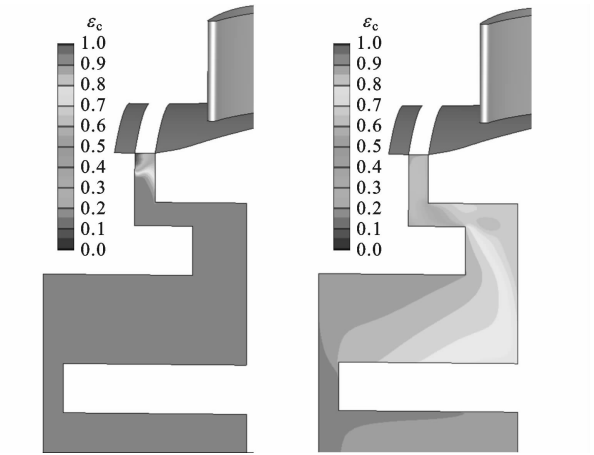
为了更清晰地分析燃气入侵在盘腔中的分布以及与封严冷气的掺混情况,图 5 给出了盘腔周期面定常和非定常时均的封严效率云图。定常计算时主流入侵影响仅限于密封间隙靠近主流的区域,而且两种密封没有明显区别。但是,对比非定常计算的时均结果,主流入侵影响更加明显,也更加深入盘腔内部。周期面上的非定常封严效率分布呈现斜条状分布,这是由于入侵主流顺着静盘边界层内流

而封严冷气顺着动盘边界层外流,同时从静盘到动盘的轴向迁移导致封严效率随着半径增大而降低。非定常时均结果表明,径向-轴向密封相比径向密封对于阻遏主流高温燃气进入盘腔尤其是盘腔深处优势很明显,极大地降低了主流燃气入侵内部盘腔,在外盘腔封严效率分布比较类似,但是动盘附近的封严效率仍然比对应径向密封高 0.1~0.2 左右。这是因为径向-轴向密封的存在强化了进入外部腔室的冷气射流,增强了对动盘附近的冷却效果。

图 6 给出了两种轮缘密封结构盘腔内部距静盘 2 mm 处旋流系数沿径向的变化对比,图中同时比较了定常值和非定常时均值,其中 Z 指的是从静盘起的距离, S 为动静盘距离, r 为从旋转对称轴起的半径,旋流比 $\beta = V_\varphi / \Omega b$, V_φ 为切向速度, Ω 为转速, b 为盘腔外半径。定常下的旋流比小于非定常时均值,表明定常计算低估了主流入侵对盘腔的影响。对于径向-轴向密封结构,引入内密封后内外盘腔的旋流比都比径向密封的有所降低。但是,外盘腔的旋流比下降较小,这说明内密封对于外盘腔的影响较小。径向密封在 $r/b < 0.85$ 的范围内定常值和非定常时均值已经趋于一致,但是对于双重密封结构在 $r/b < 0.94$ 的范围内定常值和非定常时均值几乎没有区别,这说明对于径向密封主流入侵的影响更深入盘腔。在 $r/b < 0.75$ 的范围内两种结构定常和非定常时均的旋流比分布都趋于一致,表明在靠近冷气入口的盘腔深处的流动结构主要受到转盘和吹扫冷气的控制,主流入侵对流场的影响已经很微弱。



(a) 径向密封(定常) (b) 径向密封(非定常)



(c) 径向-轴向密封(定常) (d) 径向-轴向密封(非定常)

图 5 轮缘密封盘腔周期面定常和非定常时均的封严效率分布

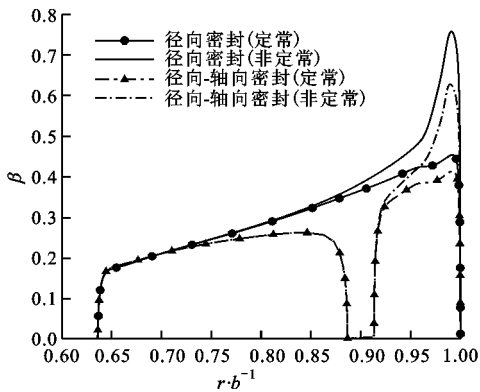
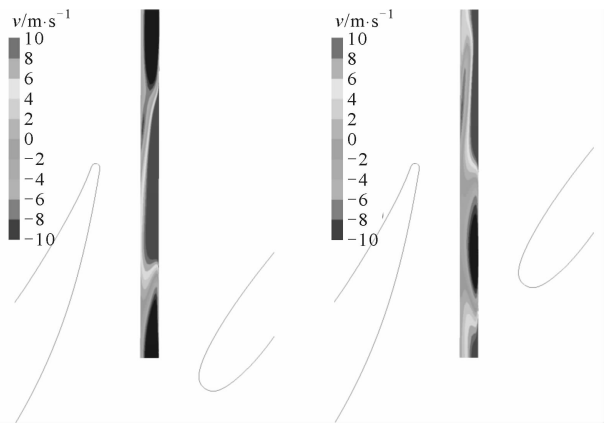
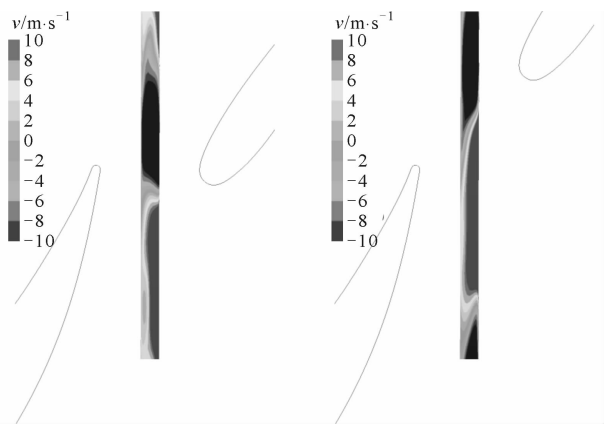


图 6 $Z/S=0.1$ 时旋流比沿径向的分布

静叶与动叶的相对运动导致静叶的尾迹和动叶前缘压力势场的影响也随着位置的变化而变化,引起轮缘密封处的入侵和出流的区域和强度也会不断变化。图 7、8 分别为径向和径向-轴向密封时 4 个不同时刻盘腔与主流交界面处的径向速度分布,正

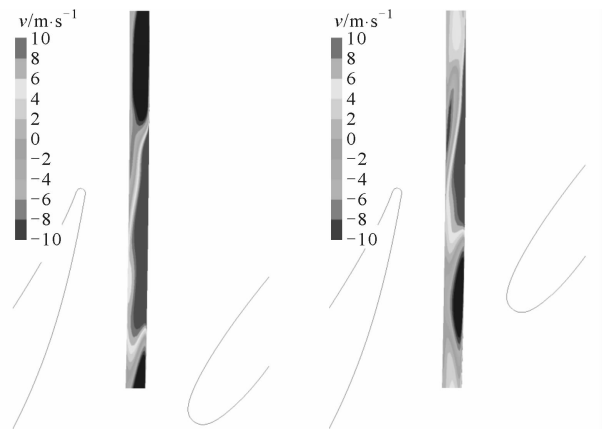


(a) T_0 时刻 (b) T_1 时刻

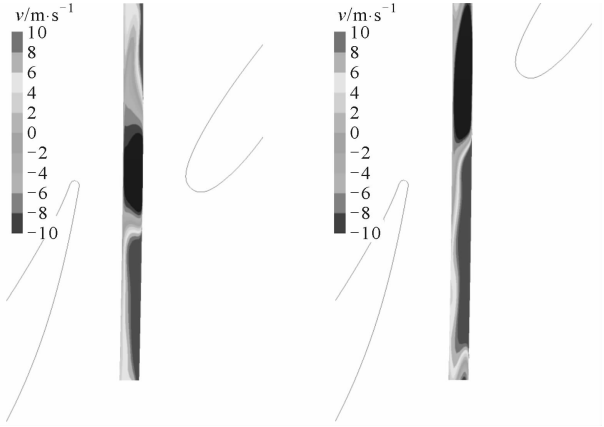


(c) T_2 时刻 (d) T_3 时刻

图 7 径向密封不同时刻盘腔与主流交界面径向速度分布



(a) T_0 时刻 (b) T_1 时刻



(c) T_2 时刻 (d) T_3 时刻

图 8 径向-轴向密封不同时刻盘腔与主流交界面径向速度分布

值的地方是出流区,负值的地方是入侵区。随着动叶的旋转,盘腔附近主流的压力场也在不断变化,密封间隙处入侵区的位置和强度也在不断改变,静叶尾迹和动叶前缘头部的压力势场都会引起主流燃气入侵,当静叶尾缘和动叶前缘接近时,静叶尾迹和动叶前缘压力场干涉最强,引起的入侵也最严重。这充分显示了非定常动静干涉对于主流入侵的影响,也是定常计算低估入侵量的原因之一。两种密封结构的变化规律类似,显示了主流流动对于导致燃气入侵的主导地位。

主流周向压力分布的不均衡是导致外部诱导入侵的主要因素,为了衡量主流周向压力的不均衡分布,定义压力系数为

$$C_p = (p_a - \bar{p}_a) / (0.5 \rho \Omega^2 b^2) \quad (2)$$

式中: p_a 为当地静压; $\bar{p}_a$ 为周向压力平均值; ρ 为密度。

图 9 针对两种密封结构对比了定常、非定常时均以及 4 个物理时刻下的压力系数分布,横坐标 θ^*

$= (\theta - \theta_0) / (\theta_1 - \theta_0)$ 为归一化周向角度。相比定常计算,非定常时均的周向压差有所增加,而且随着动静叶相对位置的变化,周向压力不断变化,导致密封间隙处入侵和出流的位置与强度随之变化,而且压力波动也会在时均压差的基础上强化入侵。

图 10、11 给出了 4 个时刻径向和径向-轴向密封盘腔周期面上封严效率和流场结构的变化。分析径向密封结构, T_0 和 T_3 时刻截面对应着很强的主流入侵,可以明显看到主流穿过封严间隙侵入盘腔,由于入侵主流具有轴向速度,进入狭小的封严间隙后会冲击动盘,径向密封在间隙底部逆流折转,入侵流容易在环形狭缝中形成漩涡,在密封间隙处和间隙出口靠近动盘处存在一个明显的低浓度入侵区。入侵主流穿过径向间隙后与冷气混合,随后顺着静盘继续入侵。 T_1 和 T_2 时刻该截面为出流,动盘输运上来的冷气一部分继续顺着动盘离开盘腔形成封严射流,一部分折转进入静盘边界层。

分析图 11 径向-轴向密封的封严效率和流场,

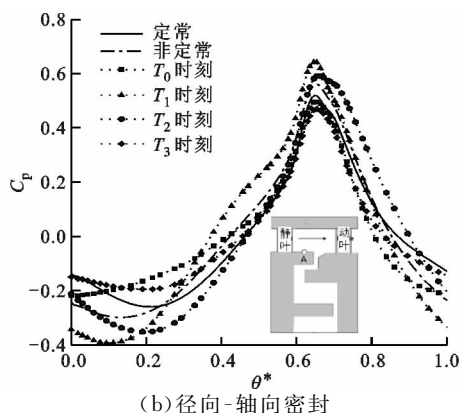
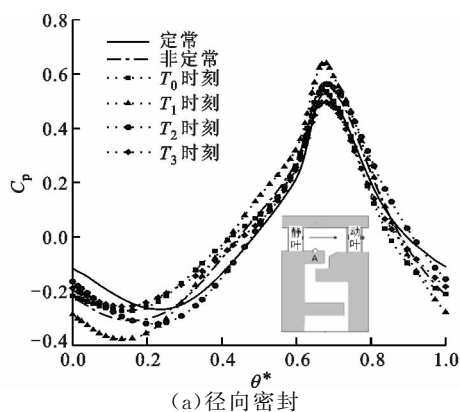


图9 轮缘密封主流压力系数周向分布

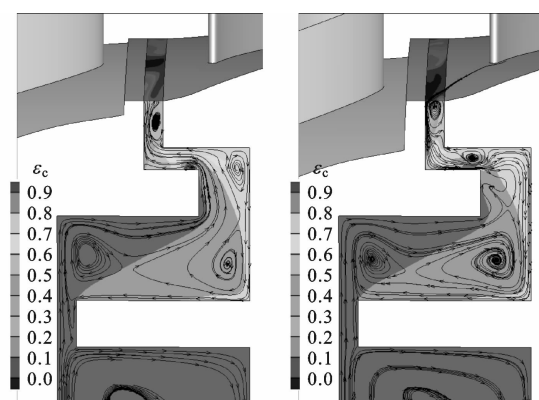
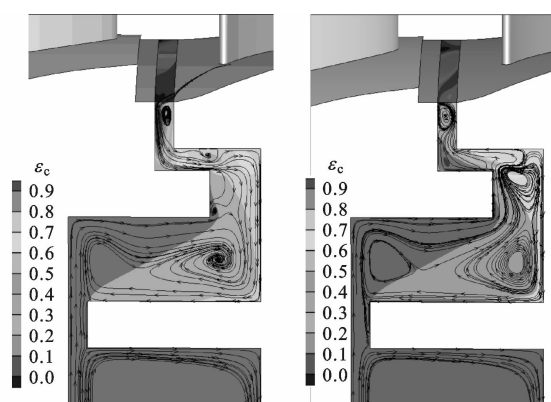


图11 径向-轴向密封不同时刻盘腔周期面封严效率和流场

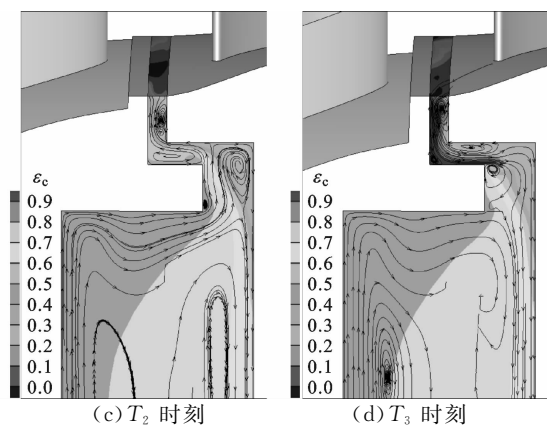
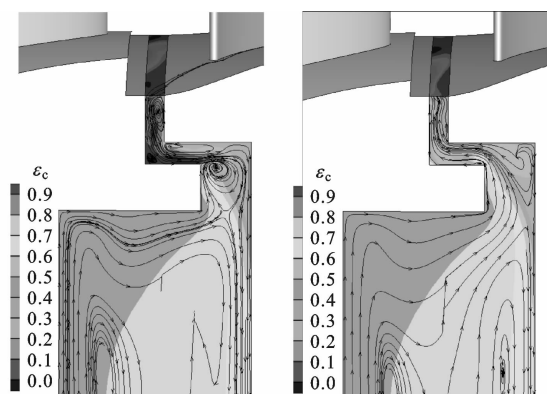


图10 径向密封不同时刻盘腔周期面封严效率和流场

基本规律和径向密封相似,但是在密封间隙处4个时刻都存在漩涡,这显然有利于阻遏入侵主流深入盘腔。对比两种结构在 T_0 和 T_3 时刻,径向-轴向密封间隙处和外盘腔封严效率比径向密封高。引入内部密封后,动盘运输的冷气到达内密封附近一部分折转顺着静盘内流构成内部腔室的循环,一部分通过内密封间隙进入外盘腔,入侵的主流很少能够穿过内部密封进入内部腔室,与径向密封对比,内部腔室的封严效率有明显提高。从减少冷气量和提高封严效率的角度来看,选择径向间隙的多重交错密封齿结构,可以显著减少对封严冷气量的需求。

3 结 论

采用非定常 CFD 方法数值研究了单级模型透平两种轮缘密封结构的燃气入侵特性,采用附加示踪变量模拟燃气入侵和封严冷气的掺混和分布,比较了两种轮缘密封结构定常和非定常的封严效率以及主流入侵对盘腔流场的影响。

与实验结果相比,在低冷气量时定常计算预测的主流入侵很少,封严效率比实验值显著偏高。相

比非定常模拟,定常计算会低估燃气入侵量以及燃气入侵对盘腔流场的影响。入侵的主流会增强盘腔中流动的旋流系数,而且随着不断深入盘腔这种影响会逐渐衰减。静叶尾迹和动叶前缘附近的压力势场的非定常干涉效应会导致盘腔与主流交界面附近压力场的非定常波动,从而引起密封间隙处主流入侵区域和入侵强度随着动叶的旋转而变化,主流和盘腔中非定常的压力波动会在时均压差的基础上强化主流燃气入侵。引入双重密封后可以显著抑制主流侵入内封严以下盘腔区域,改善对内部腔室轮盘的保护,相比单一密封结构可以明显改善封严性能,减少封严冷气量的需求,从而提高发动机的经济性。

参考文献:

- [1] 曹玉璋. 航空发动机传热学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [2] ROY R P, FENG J, NARZARY D, et al. Experiment on gas ingestion through axial-flow turbine rim seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2005, 127(7): 573-582.
- [3] TERAMACHI K, MANABE T, YANAGIDANI N, et al. Effect of geometry and fin overlap on sealing performance of rim seals [C] // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2002: 3938.
- [4] NARZARY D, FENG J, ROY R P, et al. Ingestion into a rotor-stator disk cavity with single-and double-

rim seals [C] // 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference&Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: 3982.

- [5] ZHOU D W, ROY R P, WANG C Z, et al. Main gas ingestion in a turbine stage for three rim cavity configurations [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031023.
- [6] SANGAN C M, SCOBIE J A, OWEN J M, et al. Experimental measurements of ingestion through turbine rim seals: part 3 single and double seals [C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2012. New York, USA: ASME, 2012: GT2012-68493.
- [7] 孙纪宁, 罗翔, 刘金楠, 等. 体积分数法测量几种转静系中的最小封严流量 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 981-985.
- SUN Jining, LUO Xiang, LIU Jinnan, et al. Volume fraction technique for measuring the minimum value of mass flow in turbine rotor-stator disk cavities [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 981-985.
- [8] 高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮增压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 Jiayin, 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.

(编辑 荆树蓉 苗凌)

(上接第47页)

- characteristics of automotive engine's hydro-elastic mount [J]. Automotive Engineering, 2002, 24(2): 105-111.
- [11] 陈志勇, 史文库, 王清国, 等. 基于液固耦合有限元分析的驾驶室液压悬置结构参数 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(S2): 98-103.
 - CHEN Zhiyong, SHI Wenku, WANG Qingguo, et al. Structure parameter of light vehicle cab's hydraulic mount based on fluid-structure interaction finite element analysis [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(S2): 98-103.
 - [12] SHANGGUAN Wenbin, LU Zhenhua. Experimental study and simulation of a hydraulic engine mount with fully coupled fluid-structure interaction finite element analysis model [J]. Computers and Structure, 2004, 82: 1751-1771.

[本刊相关文献链接]

- 孙璐, 刘亦夫, 周磊, 等. 排气再循环下柴油引燃天然气发动机循环变动特性研究 [J]. 2013, 47(3): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201303007]
- 卢勇, 裴普成, 晁鹏翔. 新型缸内直喷发动机滚流燃烧室设计与研究 [J]. 2012, 46(11): 17-22. [doi:10.7652/xjtuxb201211004]
- 盛新堂, 高广新, 吴国伟, 等. 二甲醚发动机燃料喷射过程及其影响因素研究 [J]. 2012, 46(1): 9-12. [doi:10.7652/xjtuxb201201002]
- 汪映, 郭振祥, 周杰. 预混充量压缩着火和直接喷射对发动机性能影响研究 [J]. 2011, 45(3): 44-47. [doi:10.7652/xjtuxb201103008]
- 李骏, 官艳峰, 李伟, 等. 汽油直喷发动机燃烧特性分析 [J]. 2010, 44(7): 9-13. [doi:10.7652/xjtuxb201007003]

(编辑 葛赵青 苗凌)