

DOI: 10.7652/xjtuxb201409010

径向轮缘密封封严效率的数值研究

高庆, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 通过 SST 湍流模型求解三维 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程组,研究了涡轮径向轮缘密封封严特性,采用附加变量法研究了主流入侵程度,数值计算获得的主流通道的压力及轮缘密封封严效率分布与实验数据吻合良好,在此基础上研究了几何结构参数对涡轮径向轮缘密封的封严性能的影响规律。结果表明:径向轮缘密封封严效率随着密封内齿长度的增加而升高,随着径向间隙尺寸的减小而升高;密封径向内齿向下倾斜时,密封封严效率提高;与径向内齿安装在静盘侧相比,安装在动盘侧时的密封封严效率更高;密封的轴向及径向等几何参数一定时,采用迎风齿结构可以提高径向轮缘密封的封严性能。

关键词: 涡轮;轮缘密封;封严效率;数值模拟

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)09-0055-07

Numerical Investigations for Sealing Efficiency of the Turbine Rim Radial Seal

GAO Qing, LI Jun

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

Abstract: The sealing efficiency of turbine rim radial seal is numerically investigated by 3-D Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations and SST turbulence model, and the additional passive tracer method is used to simulate the mainstream ingestion phenomenon. The rim seal experimented in Bath university is selected as the calculation objective to verify the numerical accuracy, and the predicted distribution of pressure in blade passage and sealing efficiency of the rim seal at different cooling flow rates well agree with the experimental data. The influence of geometry parameter on sealing effectiveness of turbine radial rim seal is numerically investigated. The numerical results show that sealing efficiency of the rim seal increases with increasing inner fin length; the sealing efficiency of rim seal increases with decreasing radial clearance; the rim seal set with inner fin set on rotor disk has the higher efficiency than that on stator disk. With the same axial and radial parameters, upwind fin structure can improve the sealing performance of the radial rim seal.

Keywords: turbine; rim seal; sealing efficiency; numerical simulation

涡轮盘是燃气透平中重要的承力部件,静止隔板与转动轮盘之间存在轮盘腔室,在实际流动过程中,高温主流气体会通过轮缘间隙入侵轮盘腔室,从

而加热轮盘,导致涡轮盘变形,造成安全隐患^[1]。为了避免轮盘过热,需要采用空气冷却系统对轮盘进行冷却。轮缘密封是二次空气冷却系统的重要组成部分

收稿日期: 2013-12-15。 作者简介: 高庆(1988—),男,博士生;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(51376144);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2014-06-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140618.1138.007.html>

部分,可阻止高温主流气体入侵轮盘腔室。性能优良的轮缘密封结构,可以减少从压气机引入的冷气流,提高发动机的气动效率,因此轮缘密封封严效率及其影响因素的研究具有重要意义。

国内外学者在轮缘密封封严效率方面进行了实验及数值研究。Roy等在单级透平实验平台上研究了2种不同静叶/动叶布置时的轮缘密封性能,给出了利用CO₂示踪气体浓度定义的封严效率在盘腔中的分布^[2]。Bohn等利用LDV技术对一个1.5级模型透平上游腔室的轮缘密封及盘腔内部的速度场进行了实验测量,对比了各种封严冷气流下不同位置的速度场分布^[3]。Zhou等实验研究了3种高宽比和相同轮缘密封形状的轮盘腔室结构对主流燃气入侵轮盘腔室的影响^[4]。Hills等数值研究了主流燃气通过涡轮轮缘密封入侵轮盘腔室的非定常流动特性^[5]。Mirzamoghadam等对一高压透平的轮缘密封燃气入侵特性进行了定常数值研究,比较了不同冷气流下燃气入侵及与主流的相互影响^[6]。文献[7]对轴向轮缘密封的燃气入侵特性进行了数值研究,并利用孔板模型进行了分析。

本文以文献[8]模型为对象,采用附加变量法研究了轴向和径向轮缘密封的封严效率,以及径向轮缘密封的径向齿长度、径向间隙尺寸、径向齿倾斜角度、径向内齿安装位置和迎风齿结构对封严效率的影响,以期对径向轮缘密封几何结构设计提供参考。

1 计算方法及模型

1.1 计算方法

采用浓度法实验测量轮缘密封封严效率时,先在主流中加入示踪气体,然后测量盘腔内固定测点位置的示踪气体浓度,由示踪气体浓度来表征主流入侵盘腔的程度及轮缘密封的封严效率^[8]。封严效率定义为

$$\epsilon_c = \frac{c_s - c_a}{c_0 - c_a} \quad (1)$$

式中: c_s 为参考点示踪气体浓度; c_a 为主流进口示踪气体浓度; c_0 为冷气流进口示踪气体浓度。

本文采用添加附加变量的方法来数值研究轮缘密封的封严效率,通过添加附加变量、求解湍流输运方程来模拟示踪气体在主流通道及盘腔内的输运扩散过程。湍流流动的标量输运方程通用式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u\phi) = \nabla \cdot \left(\left(\rho D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \phi \right) + S_\phi \quad (2)$$

式中: ϕ 为示踪气体的比体积浓度; S_ϕ 为体积源项; D_ϕ 为动能扩散系数; μ_t 为湍流黏度; Sc_t 为湍流施密特数。温度为300 K时,标准大气压下CO₂在空气中的 $D_\phi = 1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

计算中冷气进口示踪附加变量值为1,主流进口示踪附加变量值为0,主流入侵和封严冷气流的掺混将使得计算域中示踪附加变量值介于0和1之间。根据式(1),当盘腔处于完全封严状态时,轮缘密封的封严效率为1;当盘腔处于完全入侵状态时,封严效率为0。

1.2 方法验证

本文考核的对象是单级模型透平的轮缘密封结构^[8]。由于主流透平级通道涉及静止域和旋转域的数据信息传递,以及动静叶交接面位置对涡轮盘腔的影响,所以考核涉及4种模型(A~D)。计算模型为周期性的,定常时采用混合平面法处理交界面,非定常时采用滑移面法处理交界面。为了保证动静交界处的周向范围相同,非定常计算中对动叶进行了区域缩放,以满足计算要求。图1为计算模型静止域、旋转域以及动静叶交界面位置示意。在模型A、B中,盘腔计算域为静止域,动静叶交界面在轮缘密封进口下游,其中模型A为定常的,模型B为非定常的;在模型C、D中,盘腔计算域为旋转域,动静叶交界面在轮缘密封进口上游,其中模型C为定常的,模型D为非定常的。

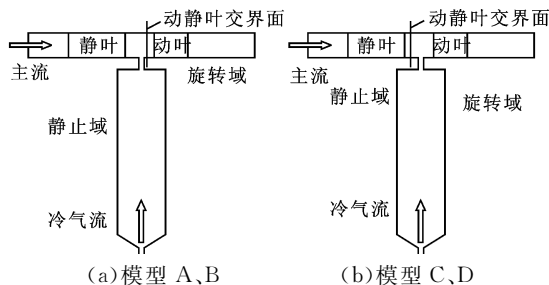


图1 计算模型中静止域、旋转域以及动静叶交界面位置示意

图2为冷气流 $C_w = 986$ 时4种模型的封严效率沿径向分布的计算值与实验值对比。冷气流定义如下

$$C_w = \frac{m}{\mu b} \quad (3)$$

式中: m 为质量流量; μ 为动力黏性系数; b 为轮缘端壁面半径。

由图2可知,采用附加变量法时,动静叶交界面位置的选取对轮缘密封封严效率计算有显著影响。

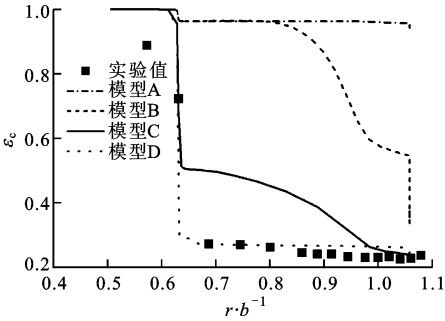
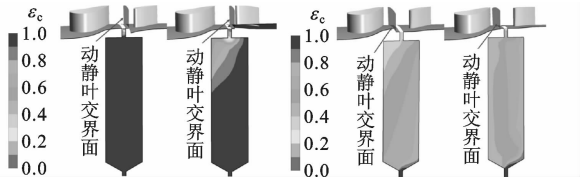


图 2 $C_w=986$ 时封严效率沿径向分布的计算值与实验值对比

动静叶交界面位于密封进口下游时,如模型 A、B,封严效率计算值较实验值高,表明该模型低估了主流入侵的程度,其中非定常模型 B 优于定常模型 A,但模型 B 计算结果仍低估了主流入侵的程度。当动静叶交界面位于密封进口上游时,模型 C、D 的封严效率计算值与实验值吻合得更好,模型 D 与实验值吻合最好。模型 C 在 $r/b<0.9$ (r 为轮盘半径) 的低位区域的计算值与实验值有些偏差,但总体趋势与实验值保持一致,在入侵主流影响明显的区域 $r/b>0.9$ 的计算值仍与实验值吻合。

图 3 为 $C_w=986$ 、转速为 2 000 r/min 时,4 种计算模型获得的周期面封严效率云图。当动静叶交界面位于密封进口下游时,从模型 A 的计算结果可以看出,盘腔内部区域的封严效率基本为 1,说明此计算方法并没有准确地捕捉到主流入侵现象,而非定常计算模型 B 的计算结果对主流入侵现象有所反映,但未能反映盘腔内所有主流入侵情况;当动静叶交界面位于密封进口上游时,从模型 C、D 的计算结果均可以清楚地显示主流侵入盘腔的现象。在静盘面附近,封严效率较低,在动盘面,封严效率较高,同一半径处沿着轴向从静盘到动盘,封严效率存在从低到高的梯度。这是因为,盘腔中冷气流受转盘旋转引起的“泵效应”的作用沿着动盘向上流动,静盘中主流入侵气体在渗入静盘边界层后向下流动,流动过程中会有部分流体发生横向移动,通过盘内的旋流核心进入动盘边界层内,导致动盘区域封严



(a)模型 A (b)模型 B (c)模型 C (d)模型 D

图 3 4 种模型周期面封严效率分布

效率较高,而静盘区域封严效率较低,由此产生轴向浓度梯度。采用附加变量计算方法时,将动静叶交界面设置在密封进口上游的模型 C、D,均可有效捕获到主流入侵现象。2 种方法的主要区别是,在低于半径位置处静盘面附近区域,模型 D 捕捉入侵现象的能力更强,在盘腔内大多数区域两者计算结果类似。相对于模型 D,模型 C 可以大大缩短计算时间。因此,本文采用模型 C 研究密封齿结构对径向轮缘密封封严性能的影响。

压力系数定义为

$$C_p = \frac{p_a - \bar{p}_a}{0.5\rho\Omega^2 b^2} \tag{4}$$

式中: p_a 为观测点静压; $\bar{p}_a$ 为观测点对应端壁位置静压的周向平均值; Ω 为轮盘转速; ρ 为密度。

图 4 为采用模型 C 时不同冷气流下轮缘密封的封严效率的实验值与计算值比较。实验及计算中的封严效率基准点为 $r/b=0.958$ 。图 5 为采用模型 C 时主流通道处周向压力分布的实验值与计算值的比较。

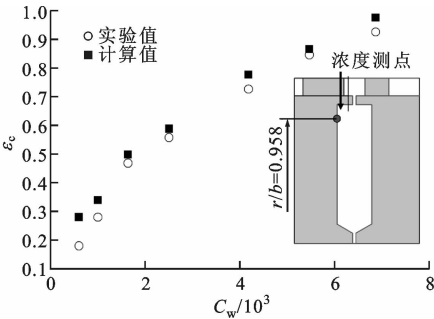


图 4 采用模型 C 时不同冷气流下轮缘密封的封严效率的实验值与计算值比较

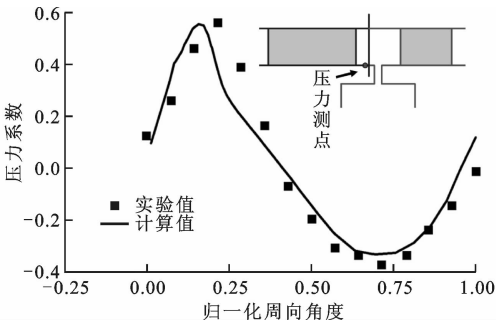


图 5 采用模型 C 时主流通道处周向压力分布的实验值与计算值的比较

从图 4 和 5 中可以看出,计算值与实验值吻合良好,从而验证了模型 C 的有效性。

1.3 计算模型

计算模型:轴向和径向轮缘密封的轴向间隙均为 4 mm;主流通道高度 $h=50$ mm; $b=345$ mm;封严效率参考点半径 $r_0=330$ mm;轮缘密封轴向间隙 $S_{c,ax}=4$ mm;轮缘密封径向间隙 $S_{c,rad}=2\sim 6$ mm;轮缘密封轴向齿厚度 $H_1=5$ mm;轮缘密封径向内齿长度 $L=0\sim 10$ mm;轮缘密封径向内齿厚度 $H_2=5$ mm;轮缘密封径向内齿倾斜角度 $\alpha=-10^\circ,0^\circ,10^\circ$;轮缘密封轴向间隙比 $G_{c,ax}=S_{c,ax}/b=0.011\ 6$;盘腔间隙比 $G=S/b=0.087$ 。表 1 为径向轮缘密封基准(baseline)及结构参数。图 6 为轴向及径向轮缘密封的几何结构,其中浓度效率参考点 $r_0/b=0.956$ 。

表 1 径向轮缘密封基准及结构参数

结构的基准及序号	L/mm	$S_{c,rad}/\text{mm}$	$\alpha/(\text{^\circ})$
基准	5	4	0
1	0	4	0
2	10	4	0
3	5	2	0
4	5	6	0
5	5	4	-10
6	5	4	10
7(增加迎风齿结构)	5	4	0
8(径向内齿结构安装在静盘)	5	4	0

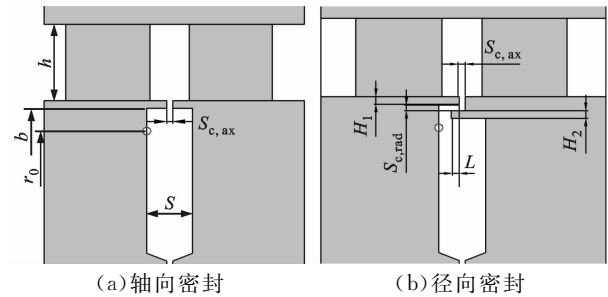


图 6 轴向及径向轮缘密封的几何结构

图 7 为径向轮缘密封基准计算网格。采用 NUMECA-AUTOGRID 生成多块结构化网格,其中主流透平级流道采用 H-O-H 拓扑结构化网格,叶片表面采用 O 型拓扑贴体网格,叶片进出口延伸处及盘腔结构处采用 H 型结构化网格。生成网格时主流通道与盘腔内密封间隙处的网格节点完全匹配,以保证求解精度。主流通道中静叶沿周向布置了 49 个节点,沿轴向布置了 62 个节点;动叶片沿周向布置了 47 个节点,沿轴向布置了 83 个节点;主流通道沿叶高布置了 47 个节点,在密封间隙处布置了 30 个节点。计算网格节点总数为 120 万,满足网格

无关性要求^[9],网格最小正交角度为 37° 时质量良好。

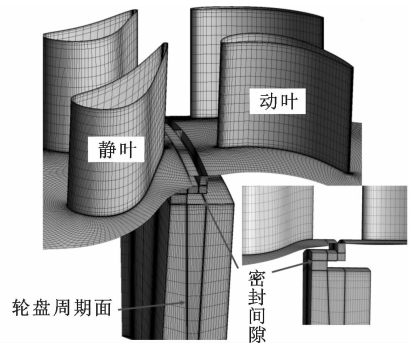


图 7 径向轮缘密封基准计算网格

计算工质采用空气,主流进口总压给定,总压 $p_{inlet}=113\ 484$ Pa,总温为 320 K;主流出口平均静压给定,平均静压 $p_{out}=101\ 325$ Pa;冷却气流进口质量流量给定, $m=1.47\sim 11.73$ g/s,冷却气流进口总温给定,为 300 K,转速为 3 600 r/min。固壁面为无滑移绝热壁面,计算中动静叶交接面以混合平面法(stage)连接。当连续方程、动量方程、能量方程、湍流方程的均方根残差小于 10^{-6} 、观测点效率值保持不变时,认为计算收敛。

2 结果分析

2.1 轴向和径向轮缘密封封严效率

图 8 为 $C_w=1\ 853$ 、转速为 3 600 r/min 时,轴向和径向轮缘密封盘腔内压力分布云图。受旋转离心力的作用,盘腔内气流沿径向存在明显的压力梯度,半径越大,压力越高,而沿轴向,压力场分布较为均匀。对比轴向和径向轮缘密封结构发现,同一半径下盘腔内压力分布基本相同,表明该工况下轴向和径向轮缘密封的盘腔内压力分布相似。

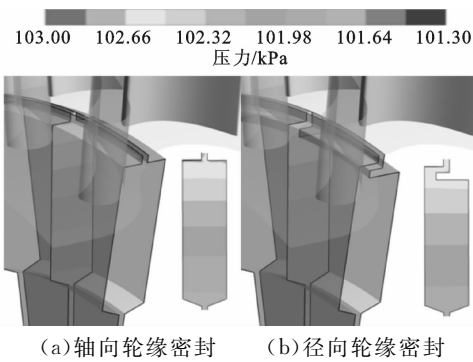


图 8 $C_w=1\ 853$ 、转速为 3 600 r/min 时轴向和径向轮缘密封盘腔内压力分布云图

图 9 为 3 种冷气量下轴向和径向轮缘密封的封严效率。当 $C_w=243$ 时,轴向轮缘密封的封严效率

为 0.04, 径向轮缘密封的封严效率为 0.34。当 $C_w=1\ 853$ 时, 轴向轮缘密封的封严效率为 0.32, 径向轮缘密封的封严效率达到 0.9, 已处于基本封严状态, 表明径向轮缘密封的封严性能优于轴向轮缘密封。

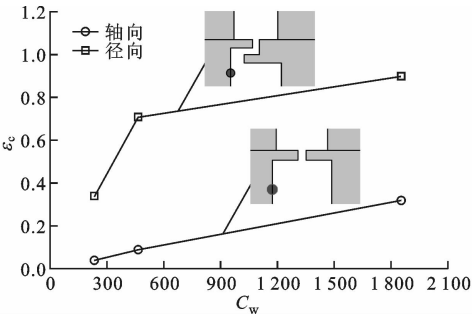


图 9 3 种冷气量下轴向和径向轮缘密封的封严效率

图 10 为轴向和径向轮缘密封的盘腔内子午面流场形态。在盘腔内, 冷气流沿动盘向上流动, 主流入侵气体在密封间隙与冷却气体混合后沿动静盘向下运动。对于轴向轮缘密封, 主流入侵气体通过轴向间隙后受到的阻碍较小, 可以较为顺畅地沿静盘向下运动, 盘腔无法得到有效保护。对于径向轮缘密封, 由于内齿结构会提前迫使沿动盘上升的冷却气流沿静盘一侧运动, 使得冷却气流与入侵气流的掺混力度增强, 掺混下密封间隙狭缝处会形成涡系结构, 这些涡系结构又会增大主流气体侵入盘腔时的流动阻力, 从而达到了减少主流入侵的目的。

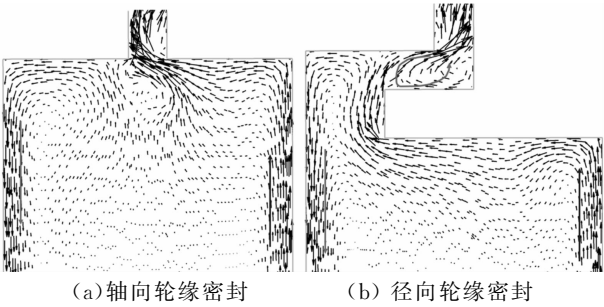


图 10 轴向和径向轮缘密封的盘腔内子午面流场形态

图 11 为 $C_w=243, 1\ 853$ 时轴向和径向轮缘密封盘腔内封严效率分布云图。当 $C_w=243$ 时, 冷气量较少, 2 种密封结构下盘腔内均发生较为严重的主流入侵现象。如图 11a 所示, 对于轴向轮缘密封, 盘腔内入侵气体掺混; 对于径向轮缘密封, 主流入侵主要集中在由内齿和外齿构成的狭缝区域, 该区域封严效率较低。在内齿以下的盘内区域, 相对于轴向轮缘密封, 径向轮缘密封的封严效率从 0.1 左右提高到 0.4 左右。当 $C_w=1\ 853$ 时, 对于轴向轮缘密封, 盘腔内入侵现象明显, 与 $C_w=243$ 相比, 盘腔

内封严效率大幅度提高。对于径向轮缘密封, 当 C_w 由 243 增加到 1 853 时, 由于冷气的吹扫作用使得停滞在内外齿之间狭缝区域的主流流体减少, 密封间隙处的封严效率提高, 同时在该冷气流量下, 内齿结构以下的盘腔内的封严效率在 0.8 以上, 处于一个良好的封严状态, 可见封严效率得到提升。

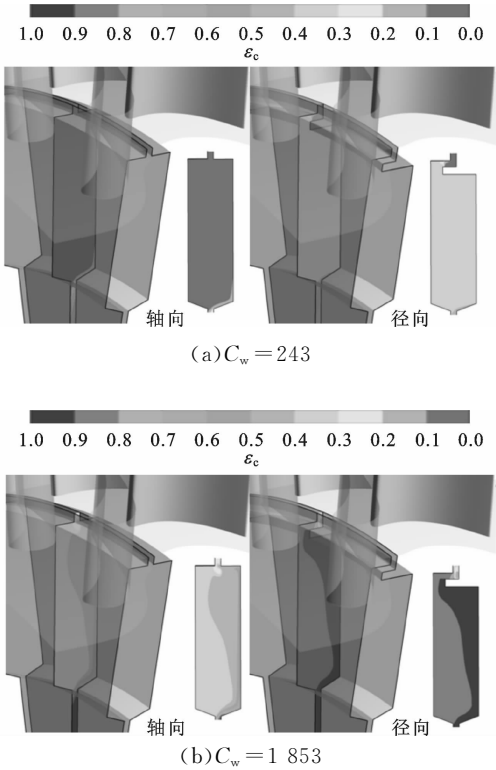


图 11 $C_w=243, 1\ 853$ 时轴向和径向轮缘密封盘腔内封严效率分布云图

2.2 几何结构对封严效率的影响

图 12 为 3 种冷气量、不同 L 下的径向轮缘密封的封严效率比较。从图中可以看出: $C_w=243$ 时, L 从 5 mm 增加到 10 mm, 径向轮缘密封的封严效率从 0.12 提高到 0.59; $C_w=1\ 853$ 时, L 从 5 mm 增加到 10 mm, 封严效率从 0.81 提高到 0.92。这表明, 在冷气量相同的情况下, L 越大, 密封封严性能越好。

图 13 为 3 种冷气量、不同 $S_{c,rad}$ 下的径向轮缘密封的封严效率比较。 $C_w=243$ 时, 对比结构 3、4 发现, $S_{c,rad}$ 从 2 mm 增加到 6 mm, 径向轮缘密封的封严效率从 0.76 降低到 0.18; $C_w=1\ 853$ 时, 2 种结构的封严效率均大幅提高, 结构 3 的封严效率略高于结构 4。这表明, 径向间隙越小, 密封封严性能越好。

图 14 为 3 种冷气量、不同 α 下的径向密封的封严效率比较。 $C_w=243$ 时, 对比结构 5、6 发现, α 从

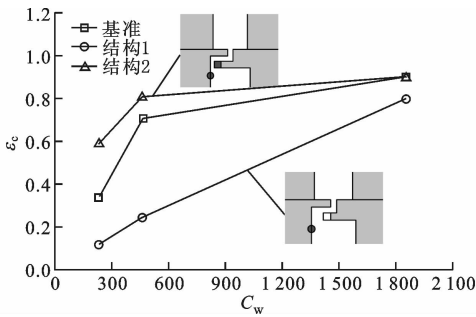


图 12 3 种冷气量、不同 L 下的径向轮缘密封的封严效率比较

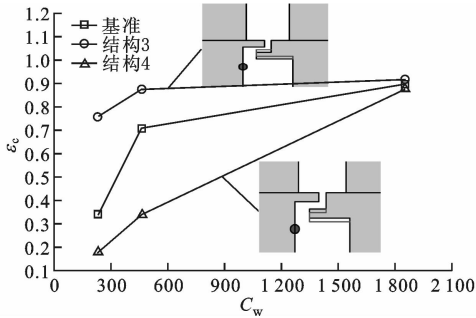


图 13 3 种冷气量、不同 $S_{c,rad}$ 下的径向轮缘密封的封严效率比较

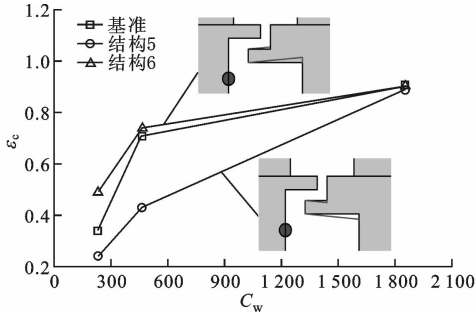


图 14 3 种冷气量、不同 α 下的径向密封的封严效率比较

-10° 变化到 10° ,封严效率从 0.24 增加到 0.49。 L 一定时,内齿向下倾斜结构的径向轮缘密封的封严效率较高。这是因为, L 一定,当密封齿向下倾斜时,径向密封在靠近轴向间隙处的转折通道口位置的有效间隙 S_1 减小,如图 15 所示,因此入侵主流进入盘腔的流动阻力增大,封严效率提升;同理,当密封齿向上倾斜时, S_1 增大,封严效率降低。

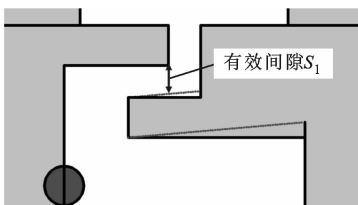


图 15 有效间隙示意图

图 16 为 3 种冷气量工况下且存在迎风齿结构时轮缘密封的封严效率的变化。结构 7 是基于密封基准结构且在内齿端部增加了迎风齿,其余几何参数均保持不变。增加迎风齿后封严效率提高, $C_w = 243$ 时,封严效率从基准结构的 0.34 提高到 0.6; $C_w = 463$ 时,封严效率从基准结构的 0.71 提高到 0.78。因此,实际工程中,在密封间隙等参数确定后,可以考虑增加迎风齿结构来进一步提高轮缘密封的封严性能。

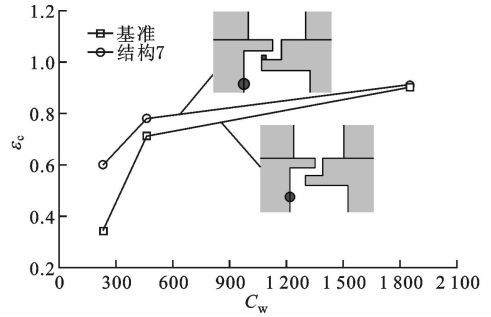


图 16 3 种冷气量工况下且存在迎风齿结构时轮缘密封的封严效率的变化

图 17 为 3 种冷气量工况下不同径向内齿安装位置对封严性能的影响。结构 8 中径向内齿安装在静盘一侧,基准结构中径向内齿安装在动盘一侧,其余几何参数均保持不变。 $C_w = 243$ 时,径向轮缘密封基准结构的封严效率比结构 8 高约 0.12; $C_w = 463$ 时,径向轮缘密封基准结构的封严效率比结构 8 高约 0.13。这表明,径向内齿安装在动盘一侧,有助于提高密封的封严性能。这是因为,入侵气体从主流进入盘腔时轴向速度仍然很高,若将径向内齿安装在动盘,则入侵主流在冲击外密封齿凸台后反向流动,并沿着由内外密封齿形成的间隙向盘内流动,流动阻力较大,然而若将径向内齿安装在静盘,则入侵主流进入内外密封齿形成的间隙后向盘腔内流动,流动阻力较小。因此,动盘侧安装内齿,径向

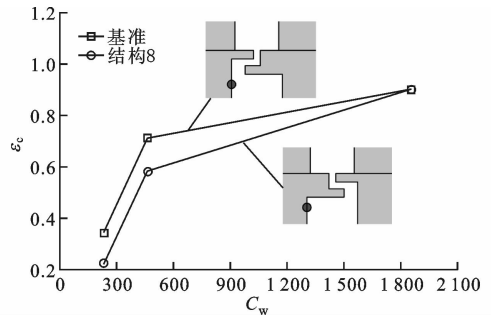


图 17 3 种冷气量工况下不同径向内齿安装位置对径向密封封严效率的影响

轮缘密封具有较高的封严性能。

3 结 论

本文采用添加附加变量的方法,通过数值方法求解了三维 RANS 方程组和 SST 湍流模型,分析了 9 种不同径向轮缘密封结构在 3 种冷气量工况下的封严效率,得出如下结论。

(1)采用附件变量法研究主流侵入时,动静叶交界面的位置对计算结果影响很大,动静叶交界面位于密封进口上游时,计算值与实验值吻合良好且可对轮缘密封的封严性能做出有效预估,而当动静叶交接面位于密封进口下游时,计算值与实验值偏差较大,无法对轮缘密封的封严性能做出可靠预测。

(2)相同冷气量工况下,径向轮缘密封的封严效率随着 L 的增加而升高,随着 $S_{c,rad}$ 的减小而升高。当径向内齿向下倾斜时,有效间隙减小,径向密封的封严效率提升;当径向内齿向上倾斜时,径向密封的封严效率下降。径向内齿安装位置会影响密封的封严效率,对比径向内齿安装位置时发现,将径向内齿安装在动盘侧,密封的封严效率较高。在确定了轴向及径向间隙等几何参数的情况下,采用迎风齿结构可以进一步提高径向轮缘密封的封严性能。

参考文献:

- [1] 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, ASME GT2010-22205 [R]. New York, USA: ASME, 2010.
- [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] BOHN D E, DECKER A, MA H W, 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, ASME GT2003-38459 [R]. New York, USA: ASME, 2003.
- [4] 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.
- [5] HILLS N J, CHEW J W, TURNER A B. Computational and mathematical model of turbine rim seal ingestion [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002,

124(2): 306-315.

- [6] MIRZAMOGHADAM A V, HEITLAND G, MORRIS M C, et al. 3D CFD ingestion evaluation of a high pressure turbine rim seal disk cavity, ASME GT2008-50531 [R]. New York, USA: ASME, 2008.
- [7] ZHOU Kunyuan, WILSON M, OWEN J M, et al. Computation of ingestion through gas turbine rim seals, ASME GT2011-45314 [R]. New York, USA: ASME, 2011.
- [8] 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, ASME GT2012-68493 [R]. New York, USA: ASME, 2012.
- [9] 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 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.

[本刊相关文献链接]

- 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. 2014, 48(1): 53-59. [doi: 10.7652/jxtxb201401010]
- 邱波,李军,冯增国,等. 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究. 2013, 47(7): 7-12. [doi: 10.7652/jxtxb201307002]
- 高庆,陶加银,宋立明,等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究. 2013, 47(5): 12-17. [doi: 10.7652/jxtxb201305003]
- 晏鑫,李军,丰镇平. 迷宫密封传热特性的数值研究. 2012, 46(11): 1-5. [doi: 10.7652/jxtxb201211001]
- 高广新,袁竹林,周阿朋,等. 二甲醚发动机燃料供给系统偶件间隙泄漏测量. 2012, 46(11): 12-16. [doi: 10.7652/jxtxb201211003]
- 李志刚,李军,丰镇平. 袋型阻尼密封转子动力特性的多频单向涡动预测模型. 2012, 46(5): 13-18. [doi: 10.7652/jxtxb201205003]
- 陈成军,杨国庆,常东方,等. 面向结合面密封性能要求的装配连接工艺设计. 2012, 46(3): 75-83. [doi: 10.7652/jxtxb201203014]
- 邱波,李军. 刷式密封传热特性研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(09): 94-100. [doi: 10.7652/jxtxb201109018]
- 陈春新,邱波,李军,等. 刷式密封迟滞特性的数值研究. 2011, 45(5): 36-41. [doi: 10.7652/jxtxb201105007]
- 李志刚,郎骥,李军,等. 迷宫密封泄漏特性的试验研究. 2011, 45(3): 48-52. [doi: 10.7652/jxtxb201103009]

(编辑 苗凌)