

文章编号: 1000-8055(2009)04-0772-05

预旋对蜂窝密封和迷宫密封内流动传热特性影响

晏 鑫, 李 军, 丰镇平

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘 要: 采用数值求解三维雷诺平均纳维尔-斯托克斯 (RANS) 方程技术, 研究了进口预旋对典型航空发动机用光滑面迷宫密封和蜂窝密封的泄漏流动和传热特性的影响规律. 计算了 $-0.3, 0, +0.3$ 三种预旋工况下, 两种密封的流动特性和温升特性随压比的变化关系. 计算结果表明: 预旋对密封的泄漏特性和子午面上的流场形态的影响十分微弱; 在相同压比条件下, 正预旋会导致密封的总温升减小, 而负预旋会导致密封总温升增大; 蜂窝面的阻尼作用会削弱预旋对密封内温升特性的影响; 进口无预旋或施加正预旋时, 蜂窝密封的间隙热能比光滑面迷宫密封大, 但进口施加负预旋时恰好相反.

关 键 词: 流动传热特性; 数值模拟; 密封; 预旋; 泄漏流动; 间隙热能

中图分类号: V233.5

文献标识码: A

Influence of inlet preswirl on discharge and heat transfer characteristics of honeycomb and smooth labyrinth seals

YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping

(School of Energy and Power Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations were numerically solved to investigate the influence of the inlet preswirl on discharge and heat transfer characteristics in honeycomb and smooth labyrinth seals. The discharge and total temperature increase characteristics, as well as the leakage flow field of these two different seals, were also obtained under five different pressureratios at inlet preswirl ratios of $-0.3, 0, +0.3$. The results show that the influence of the inlet preswirl on the leakage flow rate and meridian flow structure is nearly negligible for both honeycomb and smooth labyrinth seals. Positive inlet preswirl can decrease the total temperature difference between the seal inlet and outlet, while the negative preswirl will cause the opposite effect. The damping effect of the honeycomb can reduce the influence of the inlet preswirl on the total temperature difference. The computed windage heating power of the honeycomb seal is larger than that of smooth labyrinth seal with positive or without inlet preswirl, while it's smaller for the negative inlet preswirl condition.

Key words: discharge and heat transfer characteristics; numerical simulation; seal; inlet preswirl; leakage flow; windage heating power

收稿日期: 2008-04-24; **修订日期:** 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (50506023); 新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0669)

作者简介: 晏鑫 (1983 -), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学和叶轮机械密封技术的研究.

符号说明

a	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
c_p	工质的比定压热容/($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)
H	间隙热能/ W
K_{in}	进口预旋比($K_{\text{in}} = V_t/U$)
$\dot{m}$	密封的质量流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
Ma_c	周向马赫数($Ma_c = U/a$)
R_m	转子的平均半径/ m
Re_x	轴向雷诺数($Re_x = \dot{m}/\mu_m \pi R_m$)
U	转子平均转速($U = \omega \cdot R_m$)
V_t	流体周向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
ω	转子转速/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
μ_m	工质的平均动力粘性系数/($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)
σ	间隙热系数
ΔT_{total}	总温升/ K ($\Delta T_{\text{total}} = T_{\text{total, out}} - T_{\text{total, in}}$)

航空发动机中普遍使用的迷宫密封和蜂窝密封装置不仅能有效地减小泄漏、提高机组的效率,更重要的是能有效地阻止高温燃气的入侵,保证冷却气流的冷却效果。根据相关文献 2005 年的统计^[1]:涡轮进口平均温度每年约提升 22 K,其中通过耐高温材料的改进可使得每年平均提高 8 K,剩下的 14 K 全部要依赖增强冷却效果这一领域的研究。密封装置作为航空发动机冷却系统中重要的组成部分,它的流动传热性能对热端部件冷却质量的提高起着举足轻重的作用。

密封装置的流动特性也称泄漏特性或封严特性,流动性能不好的密封装置会导致机组有用工质减少,降低机组的效率。对于级间密封而言,密封出口的气流将会影响下一级叶栅的进口气流角,对叶栅气动性能产生较大的影响^[2]。对于燃气轮机或航空发动机而言,密封内所特有的传热特性如间隙热能效应(或总温升效应)更不容忽视。为了提高发动机的效率,涡轮进口温度逐年提高,这就需要采用日益严格的冷却保护措施来降低工作于高温燃气中的叶片以及其它热端部件的温度。在内部气流冷却系统中,密封的主要功能是阻止高温气流进入冷却系统。但密封的转子会对粘性气流做功,这不仅会产生能量的损失,还会因为间隙热能效应^[3-5]导致工质总温的升高,使得冷却质量降低。为了保证高温部件运行的安全,必须从主流通道中抽出更多的工质来补充冷却气流量,但这样会使得有用工质减少,机组效率降低。另外,对于研究和设计工作者而言,密封出口温度的高低也会直接影响到后面部件的换热情况,因此,对于设计和评估工作者而言,确定密封的泄漏量

及出口温度是十分重要的。可以说,能否对高温燃气涡轮中密封结构内的流动传热特性进行准确地预测将会影响到机组的冷却效率和使用寿命。

叶轮机械中所有的旋转部件会对流经它的气流产生剪切应力,从而使得其它部件的进口气流存在周向速度,当然密封系统也不例外。进口气流的周向速度也称进口预旋,当进口气流周向速度方向与转子转向相同时为正预旋,相反时为负预旋。在工程中,为了调整转子的稳定性,常常会调整密封进口的预旋比,根据文献[6]的研究,密封进口预旋比从 -3.0~+3.0 时,密封转子系统的动力特性变化较大。可见在实际运行工况下,进口预旋会对密封的各项性能产生较大影响。

最初用于预测预旋对密封内间隙热能效应影响的主要手段是采用经验公式,如:Mc Greehan & Ko 公式^[7],但精度不高,且需要引入经验系数。近年随着 CFD 技术的发展,数值方法逐渐应用于密封内流动传热特性的研究。Denecke^[2]使用商用软件 Fluent,采用二维轴对称模型计算了光滑面迷宫密封的间隙热能效应,计算得到的密封速度场和温度场与实验值吻合良好。晏鑫等^[4,5]利用商用软件 CFX,采用三维周期性模型计算了光滑面迷宫密封和蜂窝面迷宫密封内的流场和温升特性,计算值与实验值也十分吻合。

本文采用商用流体力学软件 CFX,以模化后的用于典型航空发动机内部冷却系统中的光滑面迷宫密封和蜂窝面迷宫密封作为研究对象,分析了进口预旋和压比对密封泄漏流动和传热特性的影响机制。研究结果可以通过相似理论应用于机组的实际运行工况中^[8]。

1 计算模型和数值方法

图 1 是典型高压涡轮冷却系统的结构示意图,图中标示了气流的流动方向。可以看出,高压冷却气流与密封内的泄漏流混合后流入盘腔中进行冷却。由于泄漏流的掺混,会使得冷却气流温度升高^[3,5];另外,密封系统还起着阻止燃气入侵盘腔的作用。本文所研究的密封尺寸参见文献[2]或[5]。密封静子为阶状光滑面或蜂窝面结构设计,转子是高低齿迷宫结构。转子的平均半径为 253 mm,齿高 4 mm,径向间隙大小为 1.3 mm。蜂窝面的芯格尺寸为:芯格直径为 1.59 mm (1/16 英寸),深度为 4.2 mm。

图 2 和图 3 分别给出了蜂窝面和光滑面迷宫密封边界条件的设置。在计算中,考虑到结构的周

期性,取一部分弧段作为研究对象,弧段的两侧采用周期性边界,转子面为旋转固壁;工质为理想空气.紊流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,近壁面区采用壁面函数法求解,离散格式为高精度格式.壁面属性为无滑移绝热固壁.

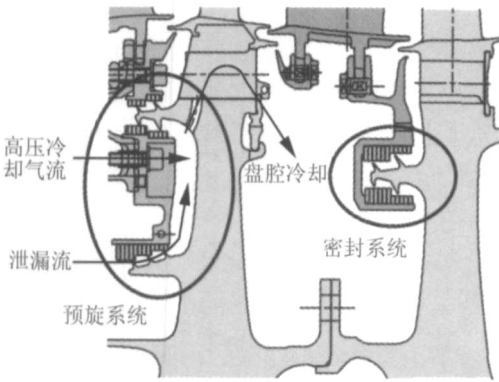


图 1 典型高压涡轮冷却及密封系统
Fig. 1 Sealing system of a typical HP turbine

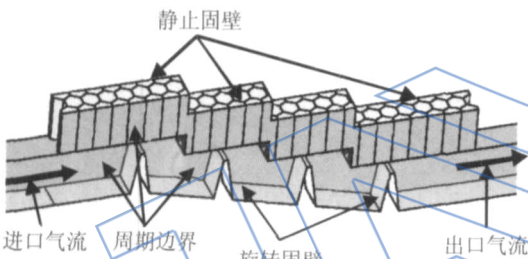


图 2 蜂窝密封计算边界条件设置
Fig. 2 Boundary-condition definitions of the honeycomb seal

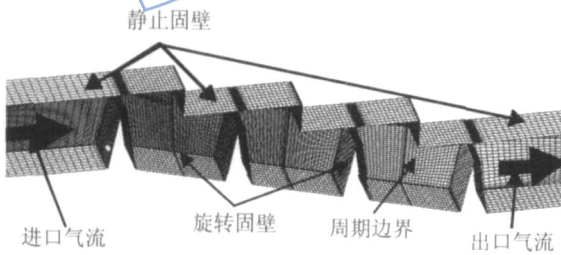


图 3 光滑面迷宫密封计算边界条件设置
Fig. 3 Boundary-condition definitions of the labyrinth seal with smooth stator

计算网格采用商用软件 ICEM 生成多块结构化网格.基于文献[4-5]所做的网格无关性分析,光滑面迷宫密封网格数为 14.2 万;蜂窝密封网格数为 53.3 万.网格的最小角度大于 45° ,最大长宽比小于 100.

2 结果分析

2.1 数值方法的考核

定义间隙热能 H 和间隙热系数 σ 分别为

$$H = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{total}} \quad (1)$$

$$\sigma = 2c_p \Delta T_{\text{total}} / U^2 \quad (2)$$

定义有效压比 Π 为

$$\Pi = \frac{p_{\text{in}}}{p_{\text{out}}} \cdot \left[1 + \frac{K-1}{2} K_{\text{in}}^2 Ma_c^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

文献[5]已对本文所采用的数值方法作了详细的考核,包括网格的无关性分析,数值计算得到的密封内流动特性和传热特性与实验值^[2]的对比.文中表明本文所采用的三维周期性模型在计算蜂窝密封和迷宫密封内的流动传热特性具有较高的精度.本文即是在文献[5]的基础上,采用三维周期性模型对蜂窝密封和迷宫密封内的流动传热特性作进一步的研究.

2.2 预旋对密封内流动传热特性的影响

在无进口预旋和进口预旋为 $K_{\text{in}} = \pm 0.3$ 时,研究了不同有效压比条件下蜂窝密封和迷宫密封内的泄漏量和总温升的变化规律.转子转速为 10^4 r/min ,进口给定总温和速度大小,总温给定为 300 K ,出口静压为 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$.

图 4 给出了在 $K_{\text{in}} = \pm 0.3$ 和 $K_{\text{in}} = 0$ 时蜂窝密封和光滑面迷宫密封的泄漏量与有效压比 Π 的关系.可以看出,在相同的 Π 下,预旋对蜂窝密封和光滑面迷宫密封的泄漏特性的影响可以忽略.另外,在相同 Π 时,无论是否存在预旋,蜂窝密封的泄漏量均大于光滑面迷宫密封.这是因为在相同的径向间隙条件下,蜂窝芯格与迷宫齿间

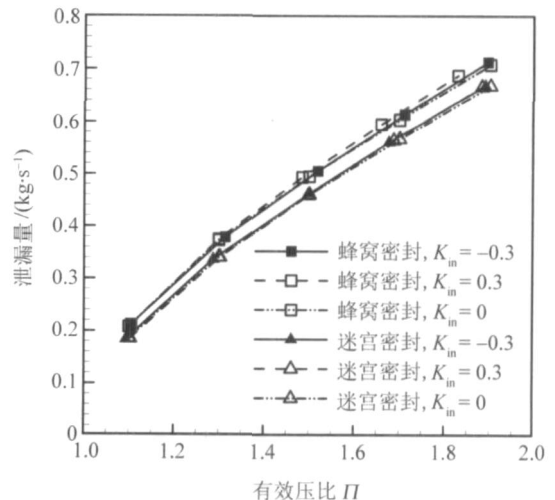


图 4 密封泄漏量随有效压比变化曲线
Fig. 4 Leakage rate versus Π in the seals

的实际间隙尺寸大于光滑面迷宫密封的间隙尺寸^[9].

图 5 给出了在 $K_{in} = \pm 0.3$ 和 $K_{in} = 0$ 时,蜂窝密封和光滑面迷宫密封的间隙总温升随 Π 的变化曲线.从图上可以看出,在有效压比为 1.1 时,流经密封的气流总温升高达 25~43 K(图中 6 种工况),泄漏流总温的升高降低了气流的冷却质量.施加 0.3 的正预旋使得光滑面迷宫密封内总温升约下降 10 K,但蜂窝密封总温升只下降了 5 K.负预旋使得密封内总温升上升相同的幅度.可见,过大的负预旋将会削弱热端部件的冷却效果,这在航空发动机的设计过程中应当注意.与光滑面迷宫密封相比,蜂窝的阻尼作用削弱了预旋对密封温升特性的影响.对于蜂窝密封和光滑面迷宫密封而言,密封内总温升随着 Π 的增加而降低.这是因为随着 Π 的增加,泄漏量增长幅度较大,由间隙热能的定义式可知间隙总温升会减小.从图上还可以看出,总温升与预旋近似成正比关系.

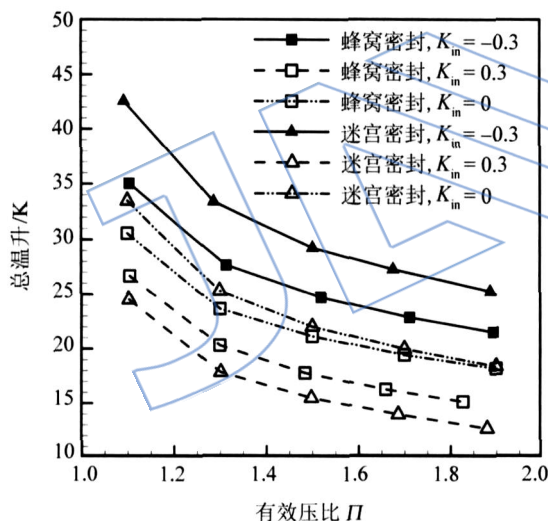


图 5 密封总温升随有效压比变化曲线

Fig. 5 Total temperature difference versus Π in the seals

间隙热能大小反映了转子有用功的损失^[3],如图 6 所示,在 $K_{in} = 0$ 时,由于蜂窝面的阻尼作用,使得蜂窝密封间隙热能略大于光滑面迷宫密封,而在 $K_{in} = 0.3$ 时,蜂窝密封内的总温升会明显大于光滑面迷宫密封,在 $K_{in} = -0.3$ 时恰好相反.另外从图上还可以看出:在相同的有效压比条件下,与进口无预旋相比,进口施加预旋后蜂窝密封的间隙热能下降(或上升)的程度比光滑面迷宫密封小,这是由于蜂窝芯格具有阻止预旋发展的阻尼作用所致.

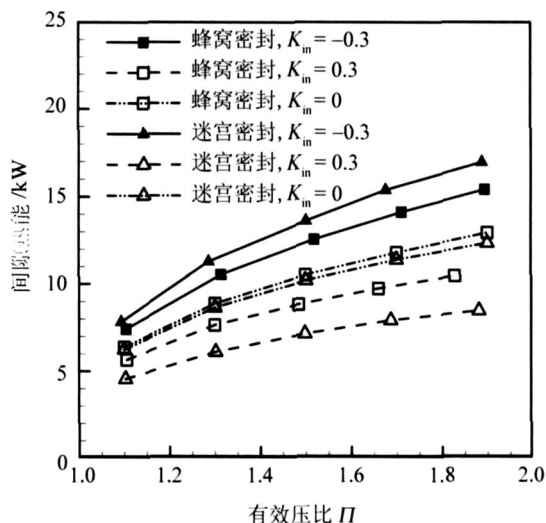


图 6 密封间隙热能与压比的关系曲线

Fig. 6 Windage heating power versus Π in the seals

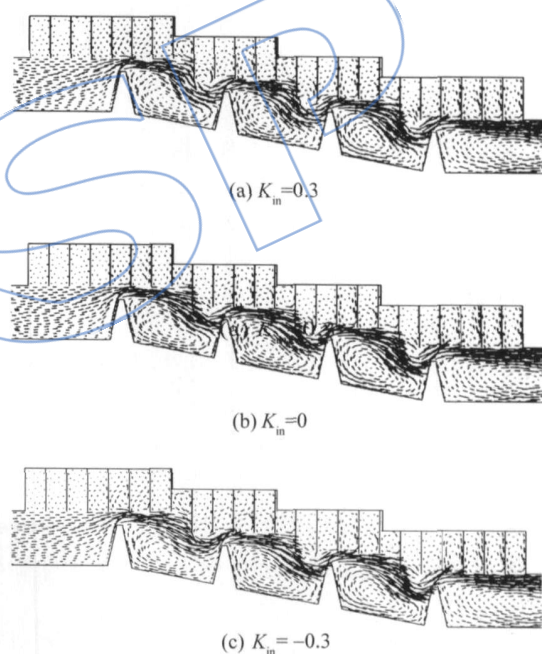


图 7 蜂窝密封子午面上流场图 ($\Pi = 1.3$)

Fig. 7 Velocity vector distributions of the honeycomb seal ($\Pi = 1.3$)

2.3 预旋对密封内流场结构的影响

图 7 和 8 分别是 $K_{in} = 0.3, 0$ 和 -0.3 时,蜂窝密封和光滑面迷宫密封在 $\Pi = 1.3$ 时子午面上的速度矢量.对于光滑面迷宫密封和蜂窝密封而言,气流在间隙处加速,在每个腔室均形成两个旋向相反的涡流.蜂窝密封的芯格中充斥着低速的流体,各个蜂窝芯格中形成了尺寸相近的漩涡.在靠近间隙处,蜂窝芯格中的这些漩涡受到腔室中气流的影响,或被压入孔内,或将腔室中的流体推向转子面方向,这都会影响到流体通过间隙时的

入射角.从图中还可以发现:在相同的 Π 下,进口预旋对蜂窝密封和光滑面迷宫密封的子午面上的速度场(包括流场结构和速度大小)影响十分小.

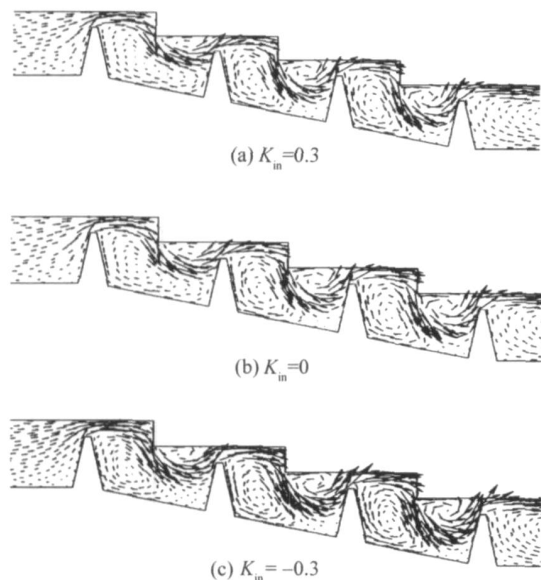


图8 光滑面迷宫密封子午面上流场图($\Pi = 1.3$)

Fig.8 Velocity vector distributions of the smooth labyrinth seal ($\Pi = 1.3$)

3 结 论

通过采用三维数值方法,研究了进口预旋对密封内流动传热特性的影响,计算结果表明:

1) 在相同 Π 下,无论有无预旋,蜂窝密封泄漏量均大于光滑面迷宫密封;预旋对蜂窝和光滑面迷宫密封的泄漏量影响较小;进口预旋对蜂窝密封和光滑面迷宫密封子午面上流场结构的影响可以忽略.

2) 在相同 Π 下,正预旋会导致密封的总温升减小,负预旋会导致密封总温升增大;蜂窝面的阻尼作用会削弱预旋对密封内温升特性的影响.

3) 无预旋工况下,蜂窝密封的间隙热能与光滑面迷宫密封近似相等;进口施加正预旋时,蜂窝密封的间隙热能大于光滑面迷宫密封;但施加负预旋时,蜂窝密封的间隙热能要小于光滑面迷宫密封.

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] Denecke J, Dullenkopf K, Wittig S, et al. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals [R]. ASME-Paper GT2005-68677, 2005.
- [3] Millward J, Edwards M. Windage heating of air passing through labyrinth seals [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3): 414-419.
- [4] 晏鑫, 李军, 丰镇平. 预旋对迷宫密封内流动传热特性影响的研究 [J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 7-10.
YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. A study of influence of inlet pre-swirl on flow and heat transfer characteristics of a labyrinth seal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 7-10. (in Chinese)
- [5] YAN Xin, LI Jun, SONG Liming, et al. Investigations on the discharge and total temperature increase characteristics of the labyrinth seals with honeycomb and smooth lands [R]. ASME-Paper GT2008-50399, 2008.
- [6] Scharrer J K. A comparison of experimental and theoretical results for labyrinth gas seals [D]. Texas, U. S. A.: Texas A & M University, 1987.
- [7] McGreehan W, Ko S. Power dissipation in smooth and honeycomb labyrinth seals [R]. ASME-Paper 89-GT-220, 1989.
- [8] Denecke J, Färber J, Dullenkopf K, et al. Dimensional analysis and scaling of rotating seals [R]. ASME-Paper GT2005-68676, 2005.
- [9] Schramm V, Willenborg K, Kim S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 140-146.