

文章编号: 1000-8055(2006) 02-0326-05

高旋转雷诺数下预旋进气转-静盘腔 流动换热特性

杨成凤, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 运用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对高旋转雷诺数和预旋进口速度下, 静盘外缘预旋进气、转盘外缘轴向出流模型的流动和换热过程进行了三维数值模拟, 主要研究了冷气流量 C_w 、旋转雷诺数 Re_e 等参数对转盘对流换热系数和出口温度分布的影响, 并与垂直进气方式进行了对比。研究表明: 预旋进气方式与垂直进气相比可降低涡轮叶片冷气入口总温; 冷气流量增大以及旋转雷诺数增大均使得转盘平均换热增强; 涡轮叶片入口温度随冷气流量增大而降低, 随着旋转雷诺数的增大先升高后降低。

关键词: 航空、航天推进系统; 预旋; 转-静盘; 流动; 传热; 数值模拟

中图分类号: V231.1; V211.3

文献标识码: A

Flow and Heat Transfer in a Pre-Swirl Rotor-Stator Cavity under High Rotational Reynolds Number

YANG Cheng-feng, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A three-dimensional numerical study of the flow and heat transfer characteristics of a pre-swirl rotor-stator system equipped with a series of pre-swirl nozzles of circular cross-section was carried out. Pre-swirl nozzles were located on the outer rim of a stator disk with a radius equal to that of the rotor blade inlet holes. The RNG $k-\epsilon$ turbulent model was used for the simulation under the condition of high rotational Reynolds Number and throughflow rate. The convective heat transfer coefficients of the rotor and temperature distributions at the blade inlet holes were obtained for different non-dimensional throughflow rates and rotational Reynolds Numbers under a given swirl angle. The computational data were compared with that of a simple straight air inflow model. The results show that the cooling air total temperature entering the rotor blade holes is obviously lower with the pre-swirl nozzles compared to the straight nozzles without pre-swirl. The convective heat transfer is enhanced inside the cavity by increasing the non-dimensional throughflow rates and rotational Reynolds Number. And the cooling air temperature entering the rotor blade holes decreases with the increase of the non-dimensional throughflow rates, whereas it goes up and then drops down with the increase of the rotational Reynolds Number.

收稿日期: 2005-05-13; 修订日期: 2006-03-16

作者简介: 杨成凤(1980-), 女, 黑龙江克东县人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热与传质的研究。

Key words: aerospace propulsion system; pre-swirl; rotor-stator cavity; flow; heat transfer; numerical calculation

发动机中有各种各样的涡轮盘腔结构, 一般有高压冷却气流穿过这些盘腔, 对其进行冷却并起防止高温燃气进入涡轮盘腔的封严作用; 同时还可以利用涡轮盘腔预旋进气, 通过预旋喷嘴的气动效应使得沿转盘周向的流动加速, 从而降低冷却空气的静温和流体与转盘之间的相对切向速度, 提高涡轮叶片冷却的能力。国内外很多学者对此进行了研究^[1~8], 但是对于高旋转雷诺数、高冷气入口流量下的转-静盘腔内的流动换热特性研究还是非常缺乏的。本文针对一种有静盘外缘预旋进气、转盘外缘轴向出气的转静盘腔内流动和换热进行了数值研究, 并与垂直进气方式进行了对比, 分析了在高冷气流量以及高旋转雷诺数下转盘盘面的换热规律和预旋进气降温效果。

1 控制方程

三维圆柱坐标下的湍流流动和传热控制方程如下^[9]:

$$\frac{\partial(\rho u \Phi)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho w \Phi) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + S \quad (1)$$

式中: Γ 和 S 分别为变量 $\Phi_{u,v,w,T,k,\epsilon}$ 对应的广义扩散系数和源项^[9]。

已有的研究表明, 旋转对湍流的影响通常很复杂。它使从大尺度脉动传递到耗散涡的能量减少, 从而降低了耗散率 ϵ 。在受固体旋转支配的各向异性湍流中, 由于在哥氏力项的影响下雷诺应力张量的主轴发生旋转, 雷诺应力张量的各向异性将受到旋转的影响。Yakhot 等^[10]从理论上导出了重整化群 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 所得的方程形式与标准 $k-\epsilon$ 模型完全一致, 但不同的是湍流模型中的系数有所变化:

$$c_\mu = 0.085$$
$$c_1 = 1.42 - \frac{\bar{\eta} \left(1 - \frac{\bar{\eta}}{\bar{\eta}_b} \right)}{1 + \beta \bar{\eta}^3}, \quad c_2 = 1.68$$
$$\sigma_\epsilon = 0.7179, \quad \sigma_k = 0.7179 \quad (2)$$

这里:

$$\bar{\eta} = \frac{S k}{\epsilon}, \quad S = (2 S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}$$
$$\bar{\eta}_b = 4.38, \quad \beta = 0.015$$
$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

RNG $k-\epsilon$ 湍流模型仍属于高雷诺数湍流模型, 因而在近壁处要采用壁面函数来处理。

2 计算域和边界条件

图1所示为本文采用的转静盘简化模型, 本模型预旋进气孔在圆周上布置20个, 直径为4 mm, 预旋角为22°; 均匀分布在静盘外缘。在转盘上的轴向出流口与静盘上的预旋孔高位对应, 距轴线的距离为261 mm, 直径为6 mm。转盘与静盘之间的轴向距离为24.3 mm。在物理模型中, 设定转盘为恒壁温, 静盘和内、外围屏绝热; 内围屏与转盘以相同角速度旋转, 外围屏为静止件。

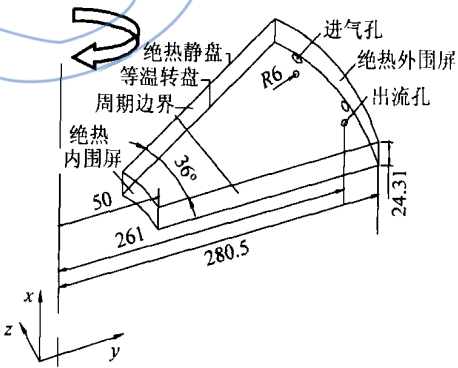


图1 转静盘腔结构示意图

Fig. 1 Sketch of rotator-stator cavity

网格划分: 整个盘腔采用非均匀结构化网格。按照实际三维模型建模, 由于旋转盘腔在旋转过程中的流动结构具有周期性变化特征, 本文的计算域选取为旋转盘腔的1/10, 冷气进口、出流口网格相对比较细密, 贴近转盘为满足 Ekman 边界层的特点, 布置间距渐增的网格, 第一层网格布置在0.1 mm处, 以比例因子1.2增长, 共布置8层, 整个计算域网格节点249 860个。

本文采用的无量纲参数定义如下:

旋转雷诺数 $Re_\theta = \Omega b^2 / \nu$, 其中: Ω 为转速, b 为转盘半径, $b = 280.5$ mm, ν 为流体运动粘度。

无量纲质量流量 $C_w = m / (\mu b)$, 其中: m 为气流质量流量, μ 为流体的动力粘度。

转盘局部努塞尔数 $Nu_r = h_r r / \lambda$

局部对流换热系数 $h_r = q_r / (T_w - T_{ref})$

式中: $q_r = \lambda (\partial T / \partial n)_w$, n 是壁面的法线方向。

恢复温度 $T_{ref} = T_{in} + R \Omega^2 r^2 / 2 C_p$

$$R = Pr^{1/3}$$

C_p 是定压比热容;

转盘平均努塞尔数 $Nu_{av} \equiv 1/A \int Nu_r dA$

无量纲出口温度 $\theta = \frac{T_{out}^* - T_{in}^*}{T_{wall}^* - T_{in}^*}$

其中: T_{out}^* 为转盘上出口空气的总温; T_{in}^* 为预旋入口冷气总温; T_{wall}^* 为转盘盘面静温。

边界条件:

进气口为流量入口 $C_w = 16\ 340 \sim 100\ 166$;

转盘旋转雷诺数 $Re_\theta = 1.86 \times 10^7 \sim 7.44 \times 10^7$; 转盘壁面温度 T_{wall}^* 恒定为 $1\ 000\ K$;

固体壁面速度使用无滑移壁面条件, 静盘和内外围屏为绝热;

盘腔周向截面采用周期性边界条件处理。

3 结果与分析

3.1 预旋和垂直进气方式对比

为了分析预旋进气的效果, 进行了预旋和垂直进气方式的比较。图2为两种进气方式下, 当 $C_w = 16\ 340$, $Re_\theta = 2.48 \times 10^7$ 时, 转盘出口口(对应于涡轮叶片冷气入口)的总温分布。可以看出, 进气有预旋时, 从转盘出口口流出的气体总温有较为明显的降低。

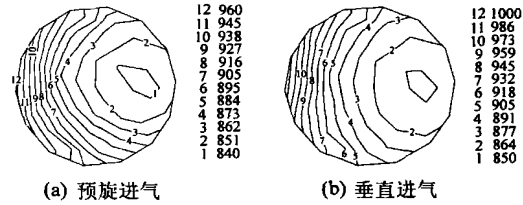


图2 转盘出流孔总温分布
($C_w = 16\ 340$, $Re_\theta = 2.48 \times 10^7$)

Fig. 2 Contours of the total temperature entering the receiver rotating-disk holes

3.2 无量纲质量流量 C_w 的影响

图4~图6反映了在 $Re_\theta = 2.48 \times 10^7$ 下, 入口冷气流量对转盘换热特性以及涡轮叶片冷气入口温度的影响。从图4可以看出, 随着冷气流量增大,

转盘盘面的换热加强, 平均努塞尔数增大。从图5可知, 涡轮叶片冷气入口平均温度随着冷气流量增大而降低, 针对本文研究的结构和参数条件, 可以得到无量纲出口温度与无量纲质量流量

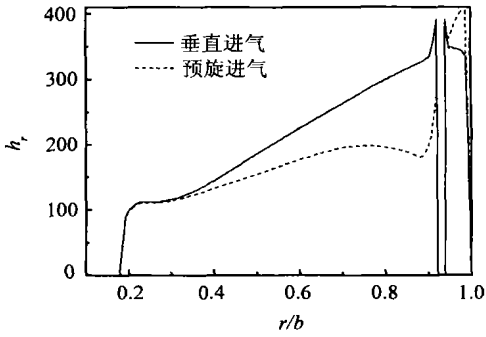


图3 转盘盘面局部对流换热系数比较
Fig. 3 Comparison of local heat transfer coefficient on rotating disk

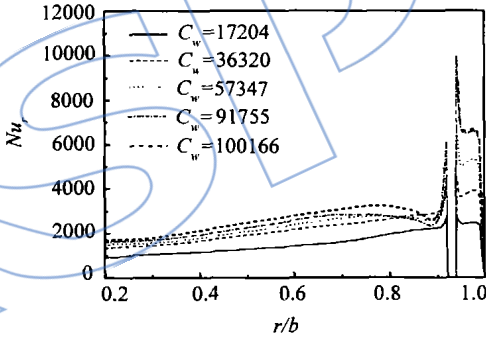


图4 转盘盘面局部努塞尔数分布
($Re_\theta = 2.48 \times 10^7$)

Fig. 4 Local nusselt number distribution on the rotor surface

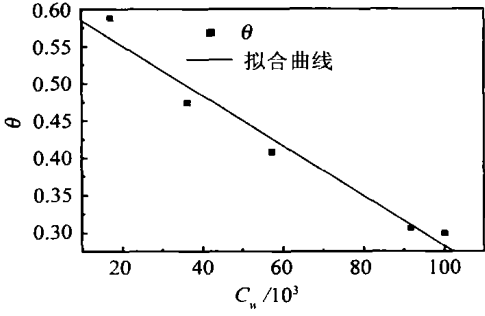


图5 无量纲出口温度随冷气流量的变化趋势
($Re_\theta = 2.48 \times 10^7$)

Fig. 5 Non-dimensional temperature at receiver rotating-disk holesvs the non-dimensional through flow rates

之间的拟合关系式: $\theta = -5.5 \times 10^{-6} C_w + 0.814$ 。图6为转盘平均努塞尔数随无量纲质量流量的变化拟合曲线, 在研究范围内, 可以得到拟合关系式: $Nu_{av} = 62.8 C_w^{0.34}$ 。

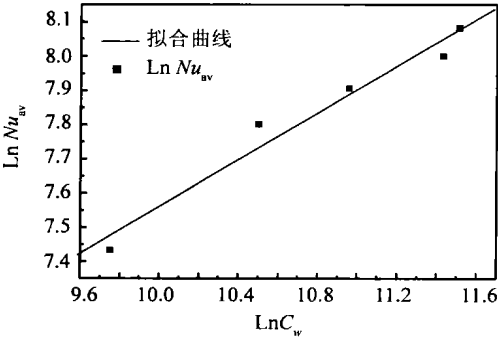


图6 转盘平均努塞尔数拟合曲线
($Re_\theta = 2.48 \times 10^7$)

Fig. 6 Linear fit of averaged Nusselt number on the rotor

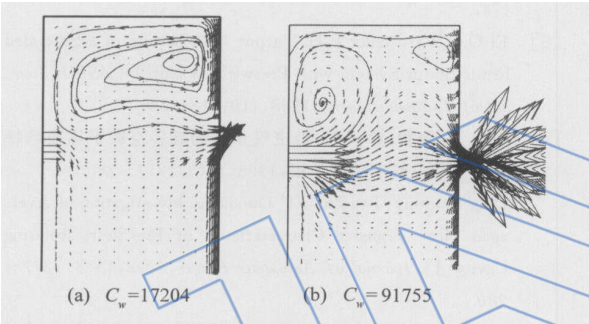


图7 预旋孔附近的流场
($Re_\theta = 2.48 \times 10^7$)

Fig. 7 Velocity vector near the preswirl nozzle

图7所示为预旋孔附近的速度场, 无量纲入口流量不同时, 盘腔内大致呈现了两种流动特征。对于 $C_w = 17\ 204$ 和 $C_w = 36\ 320$ 两种状态下, 冷流体从预旋进口流入后向盘腔内侧(半径减小方向)流动、并在转盘的泵吸作用下向转盘偏移, 在预旋孔对应的径向位置至外围屏之间, 形成了一个尺度的回流区。同时在图3中可以看到, $C_w = 17\ 204$ 和 $C_w = 36\ 320$ 对应的局部努塞尔数变化曲线在 $r/b = 0.7 \sim 0.92$ 之间呈现出单调增加的趋势。对于 $C_w = 57\ 347$, $C_w = 91\ 755$ 和 $C_w = 100\ 166$ 三种状态, 从预旋孔流入的流体进入盘腔后向外围屏方向移动, 在静盘与外围屏角区形成一逆时针旋涡。在 $r/b = 0.7 \sim 0.92$ 之间, 转盘盘面局部努塞尔数呈现出先降低再升高的趋势, 随着无量纲入口流量的增大, 转盘外缘区域的对流换热能力不断提高(见图4)。

3.3 旋转雷诺数 Re_θ 的影响

图8所示为在 $C_w = 91\ 755$ 时, 转盘局部努塞尔数随旋转雷诺数变化的分布规律。图9为预旋孔附近的流场分布。同样, 不同旋转雷诺数下盘腔内呈现出了不同的流动特征。

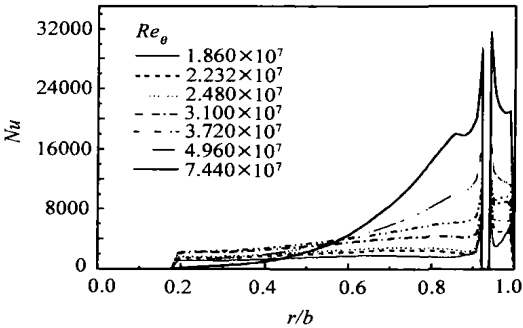


图8 转盘盘面局部努塞尔数分布
($C_w = 91\ 755$)

Fig. 8 Local Nusselt number on the rotor

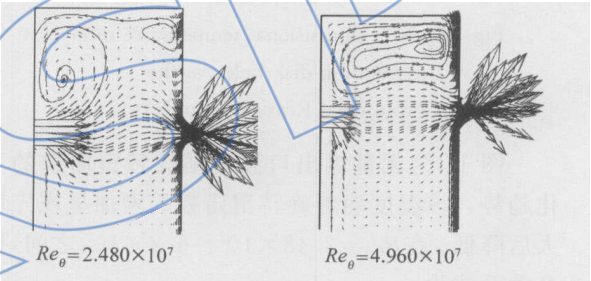


图9 预旋孔附近的流场
($C_w = 91\ 755$)

Fig. 9 Velocity vector near the preswirl nozzle

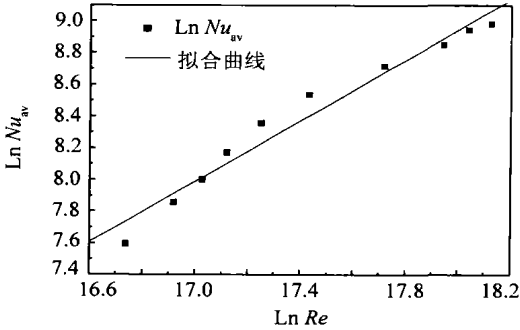


图10 转盘平均努塞尔数拟合曲线
($C_w = 91\ 755$)

Fig. 10 Linear fit of averaged Nusselt number on the rotor

对于 $Re_\theta = 4.96 \times 10^7$ 和 7.44×10^7 两种状态, 在 $r/b = 0.8 \sim 0.9$ 区域内换热系数明显增大, 这

是由于冷流体“集中”在此区域,进入盘腔内部的冷流体相对减少,致使靠近转轴的转盘盘面换热减弱。预旋进口至外围屏区域换热随旋转雷诺数增大始终呈增强的趋势。从整体上看,平均努塞尔数随着旋转雷诺数的增大而增大,见图10。可以得到如下的拟合关系式:

$$Nu_{av} = 2.5 \times 10^{-4} Re\theta^{0.975}$$

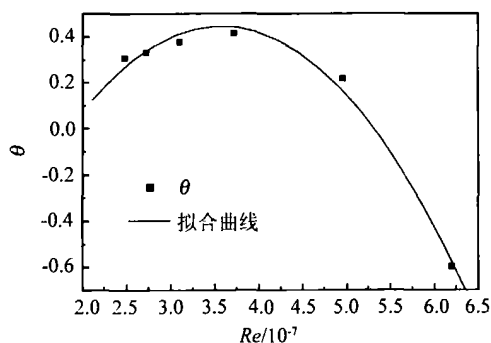


图11 无量纲出口温度随旋转雷诺数的变化趋势

($C_u = 91\ 755$)

Fig. 11 Non-dimensional temperature receiver rotating disk holes vs the rotational Reynolds numbers

图11为无量纲出口温度随旋转雷诺数的变化趋势。该温度随着旋转雷诺数的增加呈现先增大后降低。在 $Re\theta = 2.48 \times 10^7 \sim 6.2 \times 10^7$ 之间,拟合关系式为:

$$\theta = -0.15(Re\theta \times 10^{-7})^2 + 1.07(Re\theta \times 10^{-7}) - 1.47$$

4 结 论

本文使用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对静盘外缘预旋进气、转盘外缘轴向出气的转静盘腔内流动和换热进行了数值研究,并与垂直进气方式进行了对比。研究结果表明:

(1) 在相同的旋转雷诺数和无量纲进气质量流量条件下,预旋进气与垂直进气相比,可降低转盘出口空气的温度。

(2) 在研究范围内,转盘盘面对流换热随着冷气流量的增大而增强,无量纲出口温度随着流量的增大而降低。

(3) 在研究范围内,转盘盘面对流换热随着

旋转雷诺数的增大而增强,无量纲出口温度随旋转雷诺数的增大呈现先增大后减小的趋势。

(4) 在不同的旋转雷诺数和无量纲进气质量流量下,预旋进气口外侧的盘腔内形成不同的流动特征。

参考文献:

- [1] Karabay H, Chen J X, Pillbrow R, Wilson M, Owen J M. Flow in a Cover-Plate Preswirl Rotor-Stator System [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1999, 121: 160~166.
- [2] Karabay H, Owen J M, Wilson M. Approximate Solutions for Flow and Heat Transfer in Pre-Swirl Rotating-Disc Systems [R]. *ASME Paper 2001-GT-0200*, 2001.
- [3] Wilson M, Pillbrow R, Owen J M. Flow and Heat Transfer in a Preswirl Rotor-Stator System [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1997, 119: 364~373.
- [4] Dittmann M, Geis T, Schramm V, Kim S, Wittig S. Discharge coefficients of a Preswirl System in Secondary Air Systems [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2002, 124: 119~124.
- [5] El-Oun Z B, Neller P H, Turner A B. Sealing of a Shrouded Rotor-Stator System with Preswirl Coolant [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1988, 110: 218~225.
- [6] 丁水汀, 陶智, 徐国强. 带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(3): 277~280.
Ding Shuiting, Tao Zhi, XU Guoqiang. Investigation of Averaged Heat Transfer Characteristics of Pre-Swirl Rotating Cavity [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1998, 13(3): 277~280.
- [7] 丁水汀, 徐国强, 陶智, 邱绪光. 外缘预旋进气的旋转空腔主盘局部换热及流阻特性研究[J]. *推进技术*, 1998, 19(6): 45~49.
Ding Shuiting, Xu Guoqiang, Tao Zhi, Qiu Xuguang. Local Heat Transfer and Flow Characteristics of Rotating Cavity with Tangential Pre-Swirling Fringe Guide Van and Radial Outlet [J]. 1998, 19(6): 45~49.
- [8] 冶萍, 张靖周. 有预旋进气转静盘腔中的流动和换热特性数值研究[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(3): 370~374.
Ye Ping, Zhang Jingzhou. Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer Performances in Pre-Swirl Rotor-Stator Cavity [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(3): 370~374.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 陕西西安: 西安交通大学出版社, 1998, 351~374.
- [10] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization Group Analysis of Turbulence: Basic Theory [J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 21: 3~11.