

外缘轴向进气的旋转空腔主盘局部换热及流阻特性研究

北京航空航天大学 丁水汀* 陶 智 徐国强 邱绪光

【摘要】 某型发动机的实际涡轮盘腔冷却结构被简化成外缘轴向进气的旋转空腔模型, 以实验方法研究了旋转雷诺数 (Re_w)、冷气雷诺数 (Re_c)、哥拉晓夫数 (Gr^*) 对主盘局部换热及流阻特性的影响。实验发现, 冷气雷诺数、哥拉晓夫数的增大, 使主盘局部换热系数在盘缘附近迅速增大, 而在接近盘心时出现负值。阻力系数随旋转雷诺数的增大而减小, 随冷气雷诺数的增大而增大。

主题词: 旋 转 盘 换 热

分类号: V231.1

1 前 言

本文主要研究文献 [1] 中的旋转腔主盘面局部换热及流阻特性。实验模型与发动机原型近似 1:1, 其旋转半径为 305 mm, 有效实验段内半径 $R_2 = 140$ mm、外半径 $R = 270$ mm, 冷气进口半径 $R_1 = 258.5$ mm, 空腔间距 $S_1 = 35$ mm。实验装置测点布置及方法见文献 [1]。

实验范围: 旋转雷诺数 $Re_w = 0 \sim 1.5 \times 10^6$; 冷气雷诺数 $Re_c = 0 \sim 2 \times 10^5$; 哥拉晓夫数 $Gr^* = 2.0 \times 10^{11} \sim 1.4 \times 10^{14}$ 。

定义局部换热系数 $\alpha = q_r / (t_{wr} - t_c)$ 。式中 $q_r = -\lambda (\partial / \partial z)_w$ 为主盘面局部热流密度, λ 为主盘导热系数, t_{wr} 为主盘面温度, t_c 为冷气进口温度。

定义阻力系数 $\xi_1 = 2(p^* - p_0) / \rho \omega^2 R^2$ 。式中: p^* 为旋转腔进口总压, p_0 为出口环境压力, ω 为旋转角速度。

如果去除旋转腔内离心力对冷气所做的功 (泵效应) 对冷气压力提高的影响, 定义阻力系数 $\xi_2 = 2[p^* - p_0 - 0.5\rho\omega^2(R^2 - R_1^2)] / \rho\omega^2 R^2$, 显然 $\xi_1 = \xi_2 + [1 - (R_1/R)^2]$ 。

2 实验结果及分析

实验利用热电偶分别测出了不同工况下主盘面的径向温度分布如图 1, 外缘等热流加热, 盘背绝热。实验的主盘温度场计算取 5025 个节点, 用数值计算方法解热传导方程得到主盘温度场, 计算结

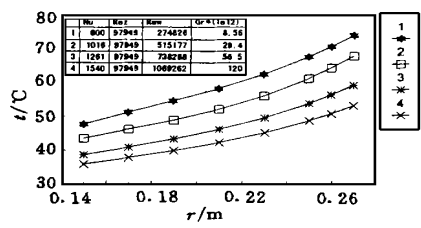


图 1 主盘表面温度分布

果很好的满足计算区域的热平衡。图 2 是计算所得的其中两个典型工况的主盘温度场。从温度分布定性可以看出, 当冷气雷诺数 (Re_z), 旋转雷诺数 (Re_w) 和哥拉晓夫数 (Gr^*) 较大时, 在主盘小半径处, 已经出现了热流为负的情况 (热流沿 z 向为正); 而 Re_z , Re_w 和 Gr^* 较小时, 这种情况不明显。从图 3 可以看出, 主盘的局部换热系数 (α) 从冷气喷嘴位置 ($R=R_1$) 沿负 r 方向, 基本不变, 直到底部才出现很小的负值情况。

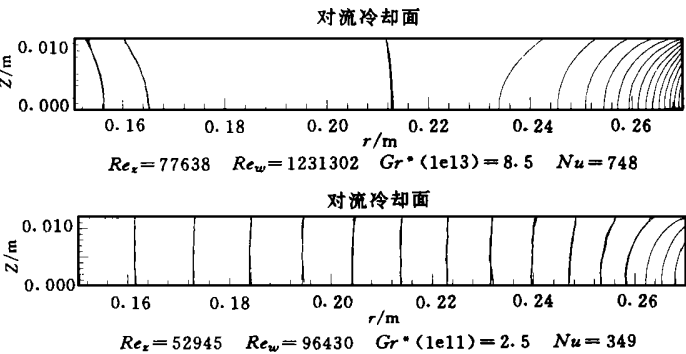


图 2 主盘内温度分布

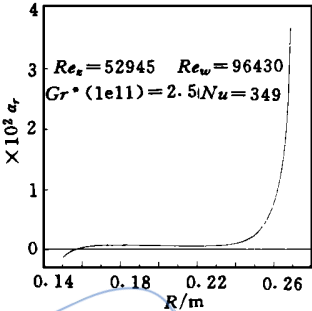


图 3 低参数下局部换热系数分布

图 4 为确定的旋转雷诺数、不同的进气雷诺数条件下, 主盘面的局部换热系数 α 的分布。可以看出, 总体 α 的分布以冷气进口半径位置 $R=R_1$ 为分界线, 当 $R_1 < r < R$ 时, α 迅速增大, 当 $r < R_1$ 时, α 随着半径的减小缓慢减小, 直至出现负值 (气流向盘加热)。哥拉晓夫数越大, α 出现负值的半径越大。另外, 随着哥拉晓夫数的增加, 局部换热系数 α 呈现两头增加的趋势, 即: 主盘高半径处的正换热增加, 同时盘低半径处的负换热也增加。

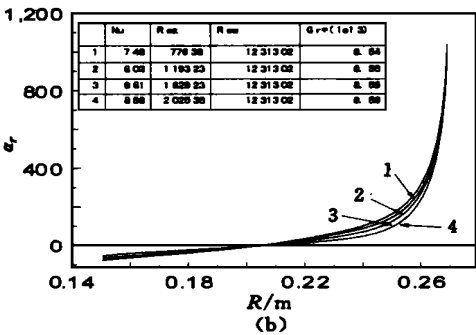
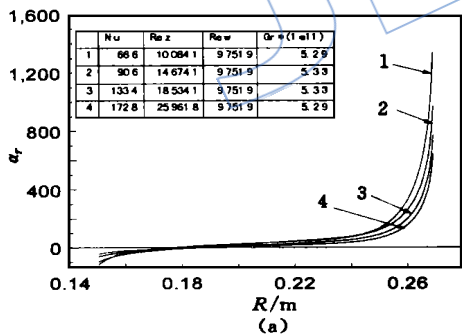


图 4 确定的旋转雷诺数、不同的进气雷诺数下的局部换热系数的分布

图 5 为确定的进气雷诺数、不同的旋转雷诺数及哥拉晓夫数条件下, 主盘面的局部换热系数 α 的分布。文献 [1] 已经指出, 旋转的增强, 将使 Re_w 和 Gr^* 同时增加, 这两个准则数控制着研究域中的不同子域。前者主要控制冷气主流区, 后者主要控制热盘附近的自然对流区, 而且无明确的分界限, 实验亦无法保证哥拉晓夫数 (Gr^*) 恒定的情况下去单独改变旋转雷诺数 (Re_w)。因此, 图 5 中的实验点, 均反映旋转的综合影响。可以看出, 总体分布大致和图 4 相同。同时, 随着哥拉晓夫数的增加, 局部换热系数 α 亦呈现两头增加的趋势。

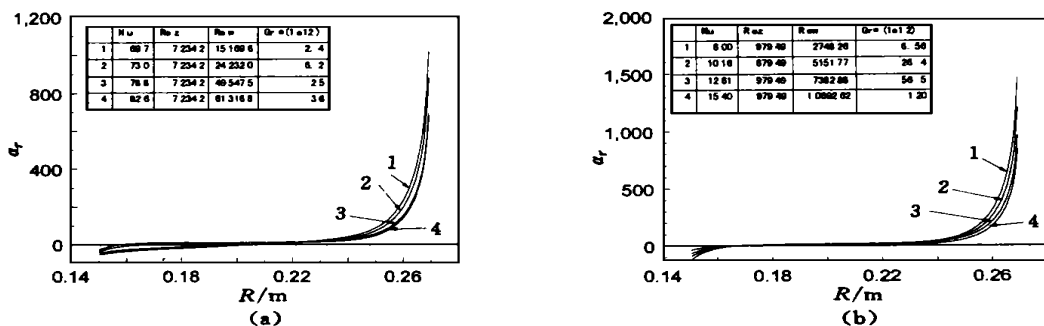


图 5 确定的进气雷诺数、不同的旋转雷诺数及哥拉晓夫数条件下的局部换热系数的分布

(1) 这种总体的分布形式是由流动结构决定的。根据文献 [1], 冷气从高半径 ($R = R_1$) 处轴向进入旋转空腔, 在进口附近受离心力作用向外偏转, 因此当 $R_1 < r < R$ 时, 局部换热系数迅速增大。当 $r < R_1$ 时, 是自然对流控制区。因此, 这段位置的局部换热系数较小, 且变化平缓, 越向盘心, α 越小。

(2) 由于实验模型为轮缘加热, 盘后绝热, 迎风面对流冷却, 盘心通过轮毂和传动轴向外导热的结构形式, 且迎风面冷气从高半径进入旋转腔。轮缘的加热量有两种途径向盘心传递, 一种是通过主盘的固体导热进行, 另一种是通过腔内的自然对流进行。对于本实验模型, 一方面盘缘附近的强烈对流换热使前者的固体导热的动力 (径向温差) 大大减小; 另一方面不锈钢盘的导热系数较小, 向盘心的导热面积又逐渐减小, 导致导热热阻较大, 同时离心力场下的自然对流又较强。根据最小阻力原理, 轮缘热量的一部分将由腔内流体带向盘心, 而固体导热将被有效削弱, 结果使局部换热系数 α 在小半径时出现负值, 即出现流体向固体加热的情况, 使整盘的温度趋于均匀, 有效地减小了热应力, 提高了旋转腔的疲劳寿命。

(3) 如图 3, 当进气雷诺数、旋转雷诺数及哥拉晓夫数较小的情况下, $R_1 < r < R$ 区域换热亦较小, 对盘缘热量沿固体盘导热的阻隔作用减弱。同时, 浮升力驱动的自然对流较弱, 因此负换热出现的半径较小, 且强度亦较小。图 4 和图 5, 随着进气雷诺数、哥拉晓夫数增大, $R_1 < r < R$ 区域换热亦增大, 对盘缘热量沿固体盘导热的阻隔作用逐渐增强。同时, 浮升力驱动的自然对流增强, 因此负换热出现的半径较大, 且强度亦增强。这是一个典型的耦合问题, 主盘面的换热系数分布既取决于对流换热又取决于盘内导热。

文献 [4] 的盘面局部换热系数的分布呈 'U' 型, 即: 盘心和盘缘高而中间平缓的分布, 也未出现负换热的情况, 与本实验模型的局部换热系数的分布不同, 这主要是由于冷却结构不同造成的。文献 [4] 的模型为转—静系, 且为中心进气, 因此自然对流无法形成, 同时冷气首先接触盘的最冷点, 造成转盘的整体温差较大。而本模型为转—转系, 且为高半径进气, 因此形成了较强的自然对流, 在主盘附近由于浮升力的作用, 被加热的冷气由盘端向盘心流动, 直至出现流体向转盘加热的情况。同时冷气首先接触盘的最热点, 造成转盘的整体温差较小。因此从有助于转盘均温的角度来看, 本模型要比文献 [4] 的模型优越。

图 6 和图 7 反映了高半径进气的旋转空腔的阻力特性。可以发现, 阻力系数随进气雷诺数的增大而增大, 随旋转雷诺数的增大而减小。进气雷诺数越小、旋转雷诺数越大, 阻力系数越小。如果应用阻力系数 ξ_r , 即: 扣除旋转腔泵效应的作用, 可以发现, 在进气雷诺数小、

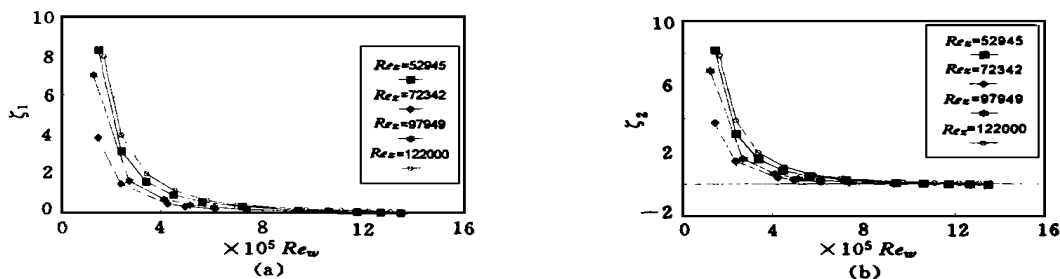


图 6 不同的进气雷诺数时, 阻力系数随旋转雷诺数的变化

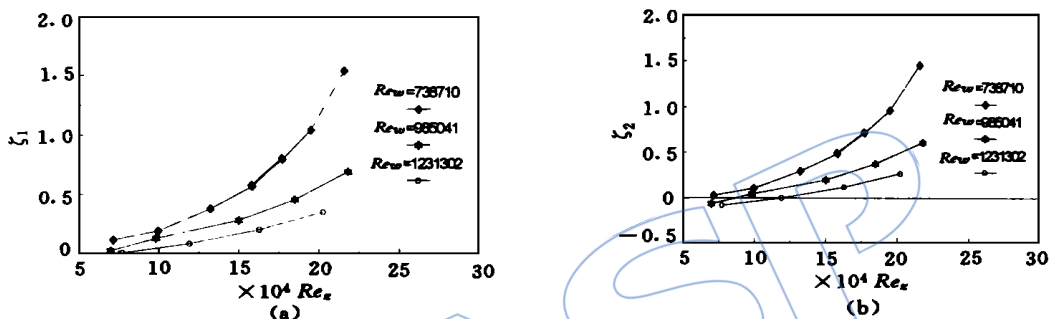


图 7 不同的旋转雷诺数、阻力系数随进气雷诺数的变化

旋转雷诺数大的情况下, 某些工况甚至出现阻力系数为负的情况, 这也说明了, 如果旋转腔静止, 剔除旋转的泵效应对出流的贡献, 要保证一定流量, 进口的冷气压力一定要提高。

3 结 论

(1) 对于外缘轴向进气、径向轮缘加热、径向出流的旋转空腔模型, 主盘面换热系数分布以冷气进口半径位置为分界线, 当 $R_1 < r < R$ 时, α 迅速增大, 当 $r < R_1$ 时, α 随着半径的减小缓慢减小, 直至出现负值 (气流向盘加热)。哥拉晓夫数越大, α 出现负值的半径越大。(2) 随着进气雷诺数和哥拉晓夫数的增加, 局部换热系数 α 呈现两头增加的趋势, 即: 盘高半径处的正换热增加, 同时盘低半径处的负换热也增加。(3) 本模型的流动结构, 使转盘的整体温度差别减小, 热应力减小, 有利于提高转盘的疲劳强度。(4) 阻力系数随进气雷诺数的增大而增大, 随旋转雷诺数的增大而减小。

参 考 文 献

- 1 丁水汀, 陶智, 徐国强, 袁怡祥, 邱绪光. 外缘轴向进气的旋转空腔主盘平均换热特性研究. 航空动力学报, 1998, 13 (3): 281-284
- 2 Ong C L, Owen J M. Prediction of Heat Transfer in a Rotating Cavity with a Radial Outflow. ASME 89- GT- 265, 1989
- 3 Long C A, Owen J M. The Effect of Inlet Conditions on Heat Transfer in a Rotating Cavity With a Radial Outflow of Fluid. ASME E. 86- GT- 95
- 4 徐国强, 丁水汀, 曹玉璋, 邱绪光. 具有中心进气外缘加热旋转盘的局部换热特性研究. 航空动力学报, 1995, 10 (3): 229

(责任编辑 杨再荣)

tion can be realized by connecting nodes in different components. A 3-shaft gas turbine engine's dynamic performance is simulated using an innovative gas path calculation method, the plenum algorithm. The extendability of the model is fully verified.

Key Words Gas turbines Simulation Models

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN LABYRINTH SEALS

Zhang Li, Liu Songling, You Shaokun, Xu Duchun

(7th Dept. Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

Heat transfer coefficients around labyrinth are the necessary boundary conditions and important parameters for the thermal analysis of construction in aircraft engines. Heat transfer experiments for straight-through conventional labyrinth, straight-through slant labyrinth and stepped conventional labyrinth are conducted under the conditions of different Reynolds numbers and gap widths. Effects of geometric and flow parameters on the heat transfer are considered physically. For the convenience of practical application, the relations are derived from the experimental data.

Key Words Labyrinth seals Tooth forms Heat transfer Experiments

LOCAL HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS OF A ROTATING CAVITY WITH AN AXIAL FRINGE INLET AND A RADIAL OUTLET

Ding Shuiting, Tao Zhi, Xu Guoqiang, Qiu Xuguang

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A turbine cooling configuration of an aero-engine was simplified into a rotating cavity with an axial fringe inlet and a radial outlet. The influences of rotating Reynolds number, cooling air Reynolds number and Grashoff number on the local heat transfer and flow characteristics were investigated experimentally. The results indicated that the local heat transfer coefficient on the edge of main disk rapidly increases with the increase of cooling air Reynolds number and rotating Reynolds number. The local heat transfer coefficient becomes negative near the center of the disk. The flow friction coefficient increases with the increase of the cooling air Reynolds number and decreases with the rotating Reynolds number.

Key Words Swirling Discs Heat transfer

AN EXPERIMENTAL STUDY ON OVERALL COOLING EFFECTIVENESS OF INCLINED MULTIHOLE PLATES

Li Bin and Hu Zhengyi (Gas Turbine Establishment, Jiangyou 610500)

Lin Yuzheng and Liu Gaoen

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The overall cooling effectiveness of the inclined multihole plates