

带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究

北京航空航天大学 丁水汀* 陶 智 徐国强 袁怡祥 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预旋进气的旋转空腔模型, 以实验方法研究了旋转雷诺数(Re_ω)、冷气雷诺数(Re_c)、哥拉晓夫数(Gr^*)对主盘平均换热特性的影响。实验发现, 旋转空腔内流态将由罗斯比数(Ro)判断。根据实验结果给出了计算主盘表面平均对流换热系数的经验关系式。

主题词: 旋转 盘 换热

分类号: V 231.1

1 前 言

作为半模拟性基础研究, 本文将某型实际发动机的涡轮盘腔冷却系统简化成如图 1 所示的模型。对于盘、腔内换热问题的研究, 文献[1~3]作了一些报道, 但实验模型为径向内流、径向外流、以及轴向贯通流, 与本模型进、出流方式不同; 文献[1~3]对于径向外流及轴向贯通流也使用了罗斯比数(Ro)作为腔内流态的判定准则。另外, 国内对外缘轴向进气的旋转空腔主盘平均换热特性进行了研究^[4]。文献[4]由于采用轴向进气, 消除了进口段哥氏力的影响。本文主要研究预旋进气时, 图 1 所示的模型的换热特性并讨论离心力、哥氏力及浮升力对换热的影响, 重点分析了哥氏力的影响, 以加深对此类换热问题的了解, 为实际发动机涡轮部件的冷却设计提供依据。

2 实验装置和实验研究的准则关系式

实验模型与发动机原型半径近似 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, 空腔间距 $S_1 = 65$ mm。

压缩空气由图 1 所示沿周向均布的 80 个 (6×7) mm 的顺转向预旋角 $\theta = 25^\circ$ (即: 进气方向和空腔切向的夹角) 的预旋喷嘴流出, 经 $R_1 = 258.5$ mm 的 134 个 $\Phi 8$ 的附盘进气孔进入旋转腔体, $S_2 = 2$ mm, 然后由距附盘面 $S_3 = 47$ mm 的 36 个 $\Phi 12.5$ 的出气孔径向流出。实验装置、测点布置及数据处理方法详见文献[4]。

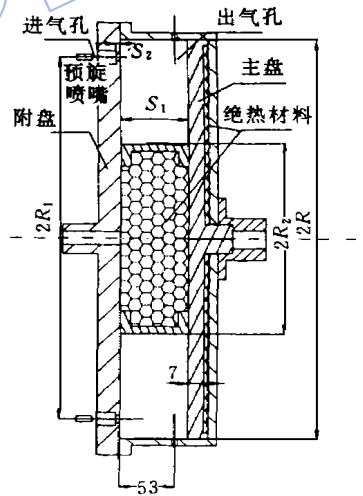


图 1 实验模型

实验在下列范围内进行: 旋转雷诺数 $Re_\omega = 8.3 \times 10^4 \sim 1.15 \times 10^6$; 冷气雷诺数 $Re_z = 1.4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$; 哥拉晓夫数 $Gr^* = 0.56 \times 10^{12} \sim 2.4 \times 10^{14}$ 。

根据旋转坐标系下的微分方程组及相似理论, 在流速较低的情况下, 忽略可压缩性的影响, 实验准则关系可表为:

$$Nu = f(Re_\omega, Re_z, Gr, Pr, S_1/R, S_3/R, R_1/R, R_2/R, \cot\theta) \quad (1)$$

式中: 努塞尔特数 $Nu = \alpha R / \lambda$, 普朗特数 $Pr = \nu / a$, 旋转雷诺数 $Re_\omega = \omega R^2 / \nu$, ω 为旋转角速度, 冷气雷诺数 $Re_z = V_z R / \nu$, V_z 为附盘平均进气绝对速度, 哥拉晓夫数 $Gr = \omega^2 \beta \Delta T R^4 / \nu$

实验中介质为空气, 普朗特数基本不变, $S_1/R, S_3/R, R_1/R, R_2/R, \cot\theta$ 也为常数。根据文献[4], 本文仍用两子域耦合的第二类边界条件下的哥拉晓夫数: $Gr^* = 2\omega^2 \beta q_R Z R^6 / \lambda \nu^2 (R^2 - R_2^2)$ 。式中: $\beta = 2/(\bar{T}_{wi} + T_c)$, $\bar{T}_{wi}$ 为迎风面平均壁温, $q_R = \text{const}$ 为主盘外缘平均热流, Z 为主盘轮缘加热边宽度。

$$\text{用实验方法求解以下关系: } Nu = f(Re_\omega, Re_z, Gr^*) \quad (2)$$

并确定式(2)的具体形式, 进而研究主盘迎风面的平均换热特性。式中各准则数的定性温度为冷气进口温度 T_∞ 。

3 实验模型分析与实验结果及讨论

由旋转坐标系下的动量方程可知, 冷气进入空腔后将受到的离心力和径向哥氏力的共同作用, 其径向合力为: $F_r = (\omega^2 R_1 + 2\omega V_\theta)$; 其中: $V_\theta = (V_z \cos\theta - \omega R_1)$ 为冷气切向相对速度。因此, 我们可以通过合力的方向来大致判断冷气的初期流向。

当 $F_r = (2\omega V_z \cos\theta - \omega^2 R_1) > 0$, 即: 罗斯比数 $Ro = V_z / \omega R_1 > 1/2 \cos\theta$ 时, 流线向外偏移。考虑到冷气进入空腔时的突扩影响并用特征尺度 R 代替冷气进口半径 R_1 , 引入修正系数 k_1 , 当罗斯比数 $Ro = V_z / \omega R_1 > k_1/2 \cos\theta$ 时, 流线向外偏移。但这种偏移是否会导致冷气冲击不到主盘面, 还要看冷气从附盘面到主盘面所需的时间 t_1 和冷气偏移至出气孔的时间 t_2 之比。我们先估计 t_1 的量级, 将冷气的行为视为无质量的刚体小球, 假设冷气的流程为 $(2S_1 - S_3)$, 忽略沿程阻力损失, t_1 可表为 $(2S_1 - S_3) / V_z \sin\theta$ 。假设冷气的径向运动为加速度恒为 $\omega^2 R$ 的加速运动, 冷气的流程为 $(R - R_1)$, 则 t_2 可表为 $\sqrt{2(R - R_1)R / \omega R}$ 。因此两个假拟时间之比 t_2/t_1 应与 $(V_z \sin\theta / \omega R) [\sqrt{2(R - R_1)R / (2S_1 - S_3)}]$ 的量级相当, 考虑到假设与真实情况下的差异, 引入修正系数 k_2 , 则 $t_2/t_1 = (V_z \sin\theta / k_2 \omega R) [\sqrt{2(R - R_1)R / (2S_1 - S_3)}]$ 。以上出现的 k_1 和 k_2 是要由实验确定的修正系数, 如果 $t_2/t_1 < 1$ 即: $Ro < k_2 [(2S_1 - S_3) / (\sin\theta \sqrt{2(R - R_1)R})]$, 旋转将导致主盘迎风面的相对冷气流量降低, 表现为在冷气雷诺数不变的前提下, 旋转的增强对换热有减弱的趋势。所以, 只有当 $k_1/2 \cos\theta < Ro < k_2 [(2S_1 - S_3) / (\sin\theta \sqrt{2(R - R_1)R})]$ 时, 旋转的增强将使主盘迎风面的相对冷气流量降低, 但于此同时又使自然对流的增强, 总体效果对主盘面换热的影响要由实验来确定。相反, 当 $F_r = (2\omega V_z \cos\theta - \omega^2 R) < 0$ 即: 罗斯比数 $Ro = V_z / \omega R < k_1/2 \cos\theta$ 时, 冷气向内偏移, 这将对主盘面的换热有利; 或者当 $t_1/t_2 < 1$ 即: $Ro > k_2 [(2S_1 - S_3) / (\sin\theta \sqrt{2(R - R_1)R})]$ 时, 也就是冷气雷诺数较大时, 冷气可靠地冲击盘面, 换热主要由强迫对流控制。同时旋转又加强了自然对流, 对主盘面换热亦有利。

(1) 转速一定的情况下, 主盘面的换热系数随冷气象诺数的变化规律: 从图 2 可以看出, 当转速不变时, 主盘面的换热系数随冷气象诺数的增大而增大。哥拉晓夫数按转速大小依次为: $1.12 \sim 1.51 \times 10^{10}$; $3.3 \sim 3.6 \times 10^{11}$; $1.6 \sim 1.78 \times 10^{12}$; $2.7 \sim 2.95 \times 10^{12}$ 。

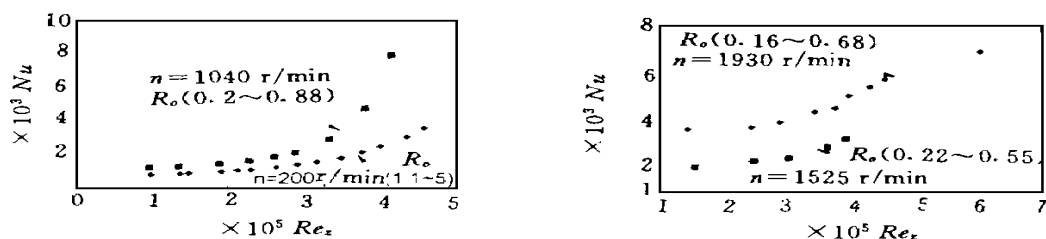


图 2 转速不变冷气象诺数对换热的影响

(2) 冷气象诺数一定的情况下, 主盘面的换热系数随转速的变化规律: 值得指出的是, 旋转的增强, 将使旋转雷诺数 (Re_w) 和哥拉晓夫数 (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 3~5 中的实验点, 均反映旋转的综合影响。图 3 和图 4 中的曲线实验范围依次为: 曲线 1 $Re_z = 1.9 \times 10^5$; $Gr^* = 1.1 \times 10^{12} \sim 1.85 \times 10^{14}$; 曲线 2 $Re_z = 2.9 \times 10^5$; $Gr^* = 3.8 \times 10^{12} \sim 2.35 \times 10^{14}$; 曲线 3 $Re_z = 3.3 \times 10^5$; $Gr^* = 0.55 \times 10^{13} \sim 2.1 \times 10^{14}$; 曲线 4 $Re_z = 1.4 \times 10^5$; $Gr^* = 2.35 \times 10^{12} \sim 0.95 \times 10^{14}$ 。

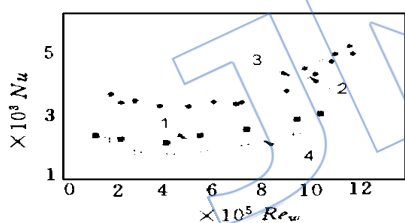


图 3 冷气象诺数不变旋转对换热的影响

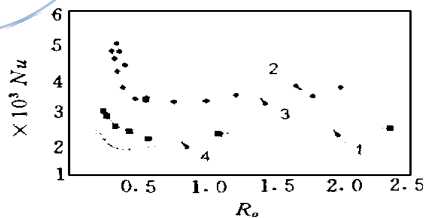


图 4 罗斯比数 Ro 对换热的影响

图 3 表明, 随着旋转的增强, 主盘面平均换热系数先下降后升高, 这一点从图 4 中可看出以某一确定的罗斯比数 Ro 为临界点, 在临界点前, 旋转的增强使换热增强, 在临界点后, 旋转的增强使换热减弱。这一结论同实验模型分析相一致。由实验数据可回归 $k_1 = 0.675$ 和 $k_2 = 3.47$, 分散度在 $\pm 20\%$ 。

图 5 实验点反映了哥拉晓夫数 (Gr^*)、旋转雷诺数 (Re_w) 对主盘平均换热特性的综合影响。图中曲线的实验范围依次为: 曲线 1 $Re_z = 1.9 \times 10^5$; $Re_w = 8.3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$; 曲线 2 $Re_z = 2.9 \times 10^5$; $Re_w = 1.5 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6$; 曲线 3 $Re_z = 3.3 \times 10^5$; $Re_w = 1.9 \times 10^5 \sim 1.14 \times 10^6$; 曲线 4 $Re_z = 1.4 \times 10^5$; $Re_w = 1.3 \times 10^5 \sim 9.1 \times 10^5$ 。

图 5 主盘面换热系数也出现先减弱后增大的现象, 主要是因为, 在临界点前, 旋转雷诺数增大使强迫对流换

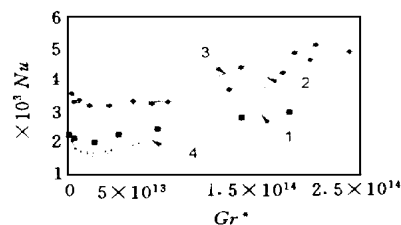


图 5 冷气象诺数不变哥拉晓夫数对换热的影响

热的减弱大于哥拉晓夫数增大使自然对流换热的增强,而在临界点后两者作用相同。这一点可以在分段回归公式中表现出来。

(3) 回归公式及结果讨论: 由于本模型的依变关系不单调, 因此本文对 65 个不同的实验工况进行了分段多元线性回归, 得到了准则公式(4), (5), 除 3 个点分散度较大外, 其余各点分散度在 $\pm 10\%$ 。

$$Nu = 0.2206R_{ez}^{0.667}Gr^{*0.41}Re_{\omega}^{-0.8584} \quad (0.372 < Ro < 2.5) \quad (4)$$

$$Nu = 0.00123R_{ez}^{0.8137}Gr^{*0.133}Re_{\omega}^{0.071} \quad (Ro < 0.372 \text{ 或 } 2.5 < Ro < 7.2) \quad (5)$$

在本实验模型中, 旋转雷诺数(Re_{ω})、冷气雷诺数(Re_z)和哥拉晓夫数(Gr^*), 控制的区域

不尽相同且互相影响。当罗斯比数满足 $k_1/2\cos\theta < Ro < k_2[(2S_1 - S_3)/(\sin\theta\sqrt{2(R - R_1)R})]$ 时, Re_{ω} 增加使流线向外偏移, 导致迎风面感受到的相对冷气流量降低同时 Gr^* 增加。这一点从公式(4)中 Re_{ω} 及 Re_z 的指数可以看出, Re_z 的幂指数小于平板紊流时的水平。而 Gr^* 的幂指数却较大, 也说明了腔内的自然对流占主导地位。 Re_{ω} 的幂指数为 -0.8584, 并不说明旋转增强使换热迅速降低, 因为 Gr^* 中的 ω 的指数为 0.82, 而 Re_{ω} 中的 ω 的指数为 -0.8584, 所以 ω 的总的幂指数仅为 -0.0384。虽然 Gr^* 中包含 Re_{ω} , 但不能将其合并, 因为它们表征了控制域空腔内不同子域内离心力和浮升力的不同影响, 在附盘区, 特别是进口主流区, 旋转雷诺数的影响起主要作用, 而在主盘附近, 哥拉晓夫数的影响起主要作用。同时, 迎风面相对冷气流量的降低, 也通过气体膨胀系数 β 的变化对 Gr^* 的大小产生影响。另外, 当罗斯比数满足 $Ro < k_1/2\cos\theta$ 时, Re_{ω} 增加使流线向腔内偏移, 导致强迫对流增强。这一点从公式(5)中 Re_z 的指数可以看出, Re_z 的幂指数大于平板紊流时的水平。而 Gr^* 的幂指数却较小, 说明了腔内的自然对流占从属地位。

结论 (1) 进气预旋的旋转空腔内的进口段流动, 受罗斯比数影响较大, 当 $Ro < k_1/2\cos\theta$ 时, 入流线向腔内偏移; 当 $Ro > k_1/2\cos\theta$ 时, 入流线向腔外偏移。这仅限于冷气进口附近, 因为冷气向内偏移的同时, 又产生了径向相对速度 V_r , 这必将产生顺转向的切向哥氏力 ($-2\omega V_r$), 使 V_{θ} 减小, 从而减弱了流线的向内偏移。同样, 流线的向外偏移也受到减弱。

(2) 考虑到冷气进口轴向相对速度 ($V_z \sin\theta$)、空腔间距及冷气进、出口位置的影响, 我们发现: 当 $k_1/2\cos\theta < Ro < k_2[(2S_1 - S_3)/(\sin\theta\sqrt{2(R - R_1)R})]$, 主盘面换热系数随旋转的增强而减弱, 随冷气雷诺数的增大而增大, 但其指数幂小于平板紊流换热的指数幂, 腔内自然对流较强; 当罗斯比数 $Ro = V_z/\omega R < k_1/2\cos\theta$ 时, 或 $Ro > k_2[(2S_1 - S_3)/(\sin\theta\sqrt{2(R - R_1)R})]$ 时, 主盘面换热系数随旋转的增强而增强, 随冷气雷诺数的增大而增大, 其指数幂大于平板紊流换热的指数幂, 换热主要由强迫对流控制。

参 考 文 献

- 1 Owen J M, Bilimoria E D. Heat Transfer in Cylindrical Cavities. J. Mech Engng Sci. 1977, 19: 175
- 2 Owen J M, Onur H S. Convective Heat Transfer in a Rotating Cylindrical Cavity. J. Engng Power. 82- GT- 151, 105: 265
- 3 Owen J M, Pincombe J R. Vortex Break down in a Rotating Cylindrical Cavity. Int. Heat Mech. 1979, 90: 109
- 4 丁水汀, 陶智等. 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

(责任编辑 杨再荣)

lized for discretization, SIMPLE algorithm is applied to pressure-velocity coupling, and the cell-face velocity interpolation method is employed for overcoming the pressure oscillations associated with the nonstaggered grid system. A visualization computing software is developed and applied to prediction of the heat convection in the cooling passage of low heat rejection engine

Key Words Curvilinear coordinates Convective heat transfer Numerical simulation

DROPSIZE CONDENSATION AS A TYPICAL FRACTAL GROWTH PROCESS

Yang Chunxin, Wang Ligang, Yuan Xiugan, Ma Chongfang

(5th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The dropsize condensation is a typical fractal growth process, according to the experimental data and conclusions published in last 30 years. The drop size distribution in dropsize condensation is deduced, based on the random fractal model. The fractal dimension index in the size distribution is determined with renormalization method. The analytical results are in good agreement with experimental data.

Key Words Dropsize condensation Drop Characteristic dimensions
Random distribution

A STUDY ON AVERAGED HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF A ROTATING CAVITY WITH PRESWIRLING INFLOW

Ding Shuiting, Tao zhi, Xu Guoqiang, Yuan Yixiang, Qiu Xuguang

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

ABSTRACT A turbine cooling configuration of an aeroengine was simplified to a rotating cavity with a tangential preswirling fringe guide vane and a radial outlet. The influences of rotating Reynold number, cooling air Reynold number and Grashoff number on the averaged heat transfer characteristics were experimentally investigated. The experiment indicated that the flow pattern in the rotating cavity is mainly controlled by Rossby number. The averaged heat transfer coefficient on the main disk increases with the increase of cooling air Reynold number and Grashoff number, the increase of rotating Reynold number decreases the heat transfer coefficient at some regions of the Rossby number and causes it to increase at others. Two experimental correlations for different regions of Rossby number, are established for the averaged heat transfer coefficient on the main surface.

Key Words Swirling Discs Heat transfer