

文章编号: 1000-8055(2006)05-0820-04

高位垂直进气径向出流旋转盘腔 换热的实验研究

徐国强, 张 笙, 罗 翔, 丁汀, 陶 智, 雷 斌

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 用实验的方法对高位垂直进气转静系旋转盘附近冷气换热特性的基础数据进行补充和拓展研究, 建立了高速旋转换热实验台, 并运用遥测技术采集温度信号, 得到了转盘表面温度、局部努赛尔特的分布及平均努赛尔特数, 主要结论为: (1) 转盘表面温度呈外高内低分布。(2) 转盘表面的局部努赛尔特数在 $r < 0.4b$ 的区域基本不变, $r > 0.4b$ 的区域里, 局部努赛尔特数随半径的增加而迅速增大。(3) 其它条件不变时, 随流量系数的提高, 平均努赛尔特数大幅度上升。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 高位进气; 旋转盘; 换热

中图分类号: V231.1; V231.2

文献标识码: A

Experimental investigation on heat transfer in shrouded rotating disk with high positioned air inflow

XU Guo qiang, ZHANG Sheng, LUO Xiang,
DING Shui-ting, TAO Zhi, LEI Bin

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The heat transfer characteristics of the rotor-stator disk system were investigated experimentally. The distributions of temperature on the rotating disk surface, local and averaged Nusselt number of the rotating disk were obtained from the test. Conclusions are drawn as follows: The temperature gradient near disk center is insignificant; the Nusselt number at the inner radial position is almost invariable; and at outer radial position is increased with the increase of inlet mass flow coefficient. The averaged Nusselt number is dramatically increased with the increase of inlet mass flow coefficient.

Key words: aerospace propulsion system; high positioned air inflow; rotating disk; heat transfer

自 50 年代以来, 高位射流冷却结构已在发动机冷却设计中采用。高位射流有两大好处, 其一

是当采用预旋后, 可以降低相对总温; 另一个好处是将从转盘边缘来的热量有效地加以阻隔, 这样

收稿日期: 2005-08-04; 修订日期: 2005-12-31

作者简介: 徐国强(1964-), 男, 河北承德人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院航空发动机气动热力重点实验室教授, 博士生导师, 主要从事旋转换热的研究。

既可以使全盘平均温度降低, 又可以使径向温差减小, 对涡轮盘的冷却非常有利。Metzger (1989)^[1]研究了射流位置、喷嘴与转盘间距和射流孔数对自由旋转盘换热的影响。Ko 和 Rhode (1992)^[2]用数值计算的方法计算了有外流存在时盘腔内的流场与温度场, 射流点在 $0.5R$ 处, 但他们没有给出盘面的换热情况分析。文献[3]研究了高位垂直进气外缘加热转静系旋转盘流动与换

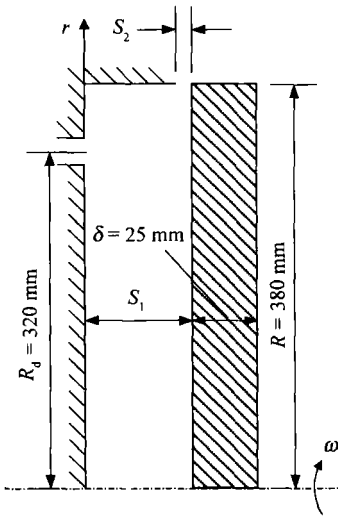


图 1 高位进气转静旋转盘模型

Fig. 1 Model of the shrouded rotating disk with high positioned air flow

热特性, 得到了转速、冷气流量、出气间隙对盘流动与换热的影响, 并与中心进气结构作了比较。但是由于受实验条件的限制实验研究的范围相对较窄, 在一定程度上限制了其应用。本文将在目前已有的资源的基础上, 运用实验的方法对如图 1 所示的高位进气转静系旋转盘模型的换热基础数据进行补充和拓展研究。拓宽实验范围, 充实现有实验数据, 使其更靠近发动机设计状态。

1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 冷却空气进入静盘盘腔后, 再经半径为 $R_d = 320$ mm 处的 144 个直径为 $\Phi 5$ mm 的进气孔冲击旋转盘。其流量由热式气体质量流量计测量。转静盘间隙 $S_1 = 30$ mm, 出口间隙 $S_2 = 3$ mm。驱动装置是一台 30 kW 的直流电机, 转速由可控硅进行调节和控制。实验时, 主轴的转速可在 $0 \sim 3\,000$ r/min 内连续变化, 其转速由光电式数字转速表测定。本实验采用电加热来模拟实际发动机涡轮叶片传导到涡轮盘的

热量。通过炭刷式引电器, 将直流电引到布置在转盘边缘的加热带上。

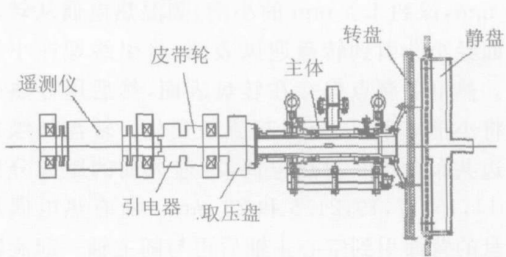


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental equipments

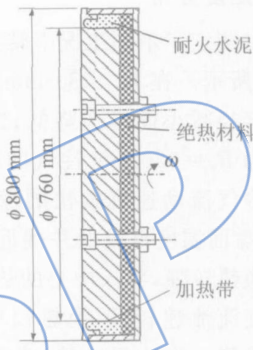


图 3 转盘组件

Fig. 3 Rotating disk module

实验件是一个由不锈钢(1Cr18Ni9Ti)加工的厚 $\delta = 25$ mm, 直径 $\Phi 800$ mm 的圆盘。为了对旋转盘进行加热, 在旋转盘边缘开有内径 $\Phi 760$ mm, 外径 $\Phi 780$ mm, 深 19 mm 的环形沟槽, 加热用的加热带和测温用的热电偶就埋在这里。电阻丝外裹有云母带以防短路, 并用耐火水泥将整个沟槽填满, 如图 3 所示。实际涡轮盘是双面冷却的, 换热基本上是对称的, 中间截面基本相当于绝热, 为简化实验, 本实验取其一半来研究, 在转盘的背面贴有发泡材料和石棉板等绝热材料, 然后用盖板将其压紧。由于在转盘的外缘开有埋设加热带的环形槽, 所以实验的有效半径为 $b = 380$ mm。在转盘迎风面上布置了 3 组共 62 对 $\Phi 0.3$ mm NiCr-NiSi 热电偶, 其与盘心的距离分别为 0, 30, 60, 105, 150, 195, 240, 285, 320, 350, 375 mm; 10, 40, 80, 125, 170, 215, 260, 305, 345, 375 mm; 20, 50, 90, 135, 180, 225, 270, 310, 340, 370 mm。在上述半径处开有贯穿的孔, 直径为 $\Phi 1.5$ mm。为了尽量保持转盘的动静平衡, 这 3 组孔分别开设在 3 条相互间夹角为 60° 的径向直线上,

在同 1 条直线上的孔也以圆心为中心成对称分布。在转盘迎风面一侧沿小孔的切向开出长约 10 mm, 深约 1.5 mm 的小槽, 测温热电偶从转盘背面经小孔引到转盘迎风表面, 将引线埋在小槽内。热电偶测点焊接在转盘表面, 然后用导热硅胶将小槽抹平, 以免引起流场变化。转盘外缘加热边共布置了 6 对热电偶, 距迎风面的距离分别为 11, 15, 17, 19, 21.5 和 23 mm。所有热电偶从转盘的背面引到空心主轴后再与随主轴一起旋转的旋转遥测仪相连。

2 实验结果分析

2.1 盘面温度分布

实验时测定了不同工况下转盘表面的温度分布, 如图 4 所示。在 $R > 250$ mm 以上的区域, 盘面温度随半径减小而迅速降低, 这主要是来自于冲击半径为 $R_d = 320$ mm 冷气的冲击作用以及转盘边缘处冷气流动速度较快的缘故。在 $R < 250$ mm 以下, 盘面温度都较低并接近一致, 主要在于转盘边缘换热较强, 导入中心的热量较少, 并且中心腔内的气流流速较低, 换热较小的缘故。为了给转盘提供第一类边界条件, 盘面温度按如下曲线拟合:

$$t(r/b) = a_1 + a_2(r/b)^n$$

此曲线能较好地拟合实验测得的盘面温度, 如图中的实线所示。实验结果表明: 冷气流量的增大会使盘面整体温度降低, 但温度分布无明显变化。

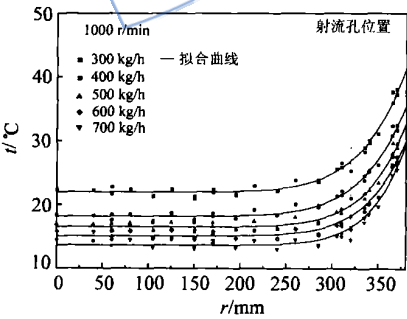


图 4 不同流量时转盘温度分布

Fig. 4 Distributing of the temperature in different flux

2.2 盘面局部努赛尔特数分布

实验时利用热电偶测出转盘冷却表面和加热边的温度, 作为第一类边界条件, 转盘的背面为绝

热边界条件, 用数值计算的方法求解热传导微分方程得出转盘内的温度分布, 进而得到转盘表面的局部热流密度、局部和平均对流换热系数。

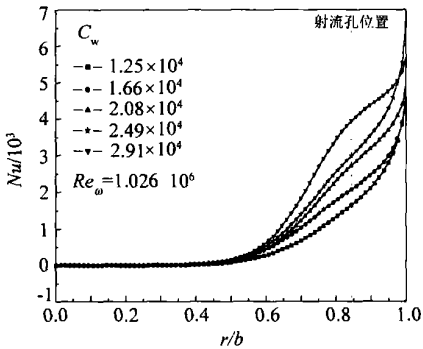


图 5 转盘表面局部努赛尔特数分布

Fig. 5 Distributing of the local Nusselt number on the surface of rotating disk

图 5 给出了固定旋转雷诺数 Re_ω ($Re_\omega = \omega r^2/\nu$, 式中: ω 为转盘角速度, ν 为运动粘度)。不同冷气流量系数 C_w ($C_w = \dot{m}/\dot{m}_b$, 式中: $\dot{m}$ 为冷气流量, μ 为气体动力粘度) 情况下转盘表面对流换热的局部努赛尔特数 Nu ($Nu = \alpha r/\lambda$, 式中: α 为转盘表面的局部换热系数, λ 为气体的导热系数) 的分布。可以看出, 局部努赛尔特数大致可分为两个区域: 在 $r/b < 0.4$ 以内, 局部努赛尔特数基本不变; 在 $r/b > 0.4$ 以外, 随半径的增大迅速增大。由于采用的是高位进气, 进气点在转盘的外缘, 冷气对转盘进行强有利的冲击冷却, 使转盘这一区域的努赛尔特数增大。从图中还可以看出: 随着流量的增加在转盘外缘盘面的局部努赛尔特数不断上升, 但中心区域变化很小。

2.3 盘面平均努赛尔特数

图 6 给出了不同旋转雷诺数下转盘表面平均努赛尔特数 Nu_{av} ($Nu_{av} = \alpha_{av} r/\lambda$, 式中: α_{av} 为转盘表面的平均换热系数) 随流量系数的变化关系, 从实验结果可以看出, 在本实验研究范围内, 当其它条件不变时, 随着流量系数的增加, 转盘表面平均努赛尔特数是不断增大的。其原因是, 在其它条件保持不变时, 流量系数的增加, 冷气对转盘的冲击冷却作用加强, 盘面感受到的冷气流量增大, 强化了转盘的换热。

4 结 论

本文主要得到以下结论:

- (1) 转盘表面温度呈外高内低分布, 可用

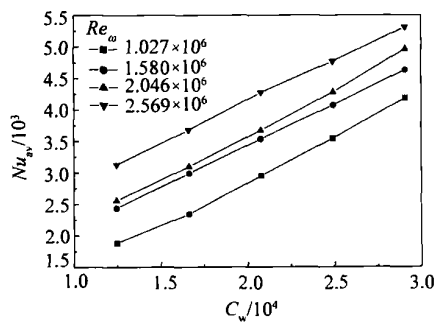


图 6 转盘表面局部努赛尔特数分布

Fig. 6 Distributing of the averaged Nusselt number on the surface of rotating disk

$t(r/b)=a^1+a^2(r/b)^n$ 曲线拟合。

(2) 转盘表面的局部努赛尔特数在 $r<0.4b$ 的区域基本不变, $r>0.4b$ 的区域里, 局部努赛尔

特数随半径的增加而迅速增大。

(3) 其它条件不变时, 随流量系数的提高, 平均努赛尔特数大幅度上升。

参考文献:

[1] Metzger D, Partipilo V Singleand. Multiple jet impingement heat transfer on rotating disk[R] . AIAA 89- 0174.

[2] Ko S H, Rhode D L. Thermal details in a rotor stator cavity at engine conditions with a mainstream[J] . Journal of Turbo machinery, 1992, 114: 446 453.

[3] 徐国强, 陶智, 丁水汀, 等. 高位垂直进气旋转盘流动与换热的实验研究 [J] . 航空动力学报, 2000, 15(2) : 164 168.

Xu Guoqing, Tao Zhi, Ding Shuiting, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer in shrouded rotating disk with highr positioned air inflow [J] . Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2) : 164 168.