

文章编号: 1000-8055 (2004) 03-0346-05

反向旋转盘间非稳态换热特性的 实验研究

蔡毅, 徐国强, 陶智, 丁水汀, 何亚军
(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 将反向旋转的高低压涡轮盘简化成了几何形状相对简单的反转盘系统。用实验的方法研究了非稳态情况下改变冷气流量和改变两盘转速对两盘温度和盘面平均努塞尔数的影响。结果表明: (1) 进气雷诺数是最重要的影响因素, 它对换热的影响是瞬时的, 雷诺数升高两个盘面的努塞尔数同时增加; (2) 在本实验范围内, 转速对盘面换热的影响有限, 而且它只影响转速变化的盘的表面换热而对对面的盘没有明显的影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 换热; 反向旋转; 旋转盘

中图分类号: V 231.1 文献标识码: A

Experimental Investigation of Unsteady Heat Transfer Between Counter-Rotating Disks

CAI Yi, XU Guo-qiang, TAO Zhi,
DING Shui-ting, HE Ya-jun

(National Key Laboratory of Aircraft Engine,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The contra-rotating turbine disks of an aero-engine were simplified as a counter-rotating plan disk system. The unsteady effects of the coolant flow rate and rotating speed on fluid flow and heat transfer were investigated experimentally by employing a rotating heat transfer test rig. Experimental results indicated that: (1) The inlet Reynolds number is the key factor influencing the average Nusselt number. When the inlet Reynolds number varies, the Nusselt number responds simultaneously. The heat transfer of two disk surfaces was both enhanced due to the increase of the inlet Reynolds number. (2) The effect of the rotating speed variation on heat transfer is, however, limited that it only influences, to some extent, the disk under rotating variation and little effect was observed for the other disk.

Key words: aerospace propulsion system; heat transfer; counter-rotating; rotating disk

在航空发动机中采用高压涡轮转子和低压涡轮转子反向旋转的涡轮结构, 一方面可以省去两转子间的导向叶片, 从而减轻涡轮的重量和减小气动损失, 最终提高推重比; 另一方面可以减小

飞机做机动飞行时的陀螺力矩。由于反转涡轮结构的这些优点, 所以很多国家都在研究并已经在第三代航空发动机开始采用。用于冷却反向旋转涡轮的冷气在两涡轮盘间流动, 这样就形成了反

收稿日期: 2003-09-17; 修订日期: 2003-10-27

作者简介: 蔡毅 (1964-), 男, 四川成都人, 北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室博士生, 主要从事航空发动机传热及空气系统等方面的研究。

向旋转盘腔的流动和换热问题, 研究中多将其简化成形状相对简单的反向旋转盘系统, 如图1所示。国内外对反向旋转的两盘间稳态流动和换热做了一定的研究, 描述了流动结构并认为盘面换热主要受冷气流量和两盘转速的影响^[1~5]。实际发动机在飞行过程种要经历许多非稳定状态, 对反向旋转盘间非稳态流动和换热问题的研究还未见报道。本文用实验的方法对冷气流量, 两盘转速对盘面的非稳态换热的影响进行了研究。

1 实验设备和实验模型

实验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力国防科技重点实验室的多功能旋转换热实验台上进行的。实际涡轮盘是双面冷却, 为使研究简化, 实验时取其一半, 在2个转盘的背面装有玻璃棉和石棉板等绝热材料, 然后用盖板将其压紧, 使其尽可能满足绝热条件。

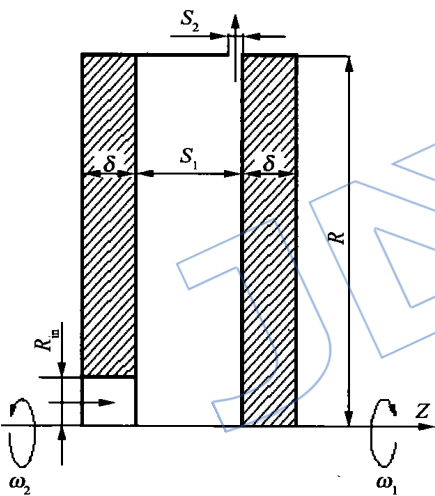


图1 实验模型
Fig. 1 The test model

如图1所示, 左边的转盘为上游盘, 右边的转盘为下游盘。两盘的材料均为低碳钢, 厚度为30 mm, 有效直径为400 mm, 上游盘中心开有直径为50 mm 的进气孔, 下游盘为实心。在上游盘面的不同半径上布置了20对 NiCr- NiSi 热电偶, 下游盘面的不同半径处布置了17对热电偶, 上游盘的进气孔壁上布置了3对热电偶。所有热电偶的信号首先经过 SmartLink 智能小型分散数据采集器进行采集并放大, 再通过滑环引电器转移到静止测试系统上。两盘均可以0到2500 r/min 的转速双向旋转。转速通过光电式数字转速表来测量。两盘的外缘用电加热来模拟涡轮叶片以热传导方式对涡轮

轮盘的加热, 两盘加热量均保持800 W 不变。由压缩机提供的冷却空气经稳压箱后进入实验段上游的空心旋转轴, 再经上游盘进气孔进入盘腔对两盘进行冷却。流量由街流量测试系统来测量。所有测试信号都被送入计算机, 进行监视、保存和处理。

数据处理时, 分别将实验测得的两盘冷却端面温度拟合成温度与径向坐标关系式, 上游盘进气孔壁的温度拟合成温度与轴向坐标的函数, 分别作为第一类边界条件, 两盘加热边作为等热流边界条件处理; 转盘背面按绝热边界条件处理。实验时, 当转盘在某一条件下达到稳定后, 记录所有的实验数据, 作为求取转盘初始温度的条件, 然后改变转速或流量, 在每一个时间步长, 记录所有实验数据, 用数值计算的方法求出盘内的温度分布和盘表面的热流密度, 进而根据牛顿冷却公式求得冷却表面对流换热的平均努赛尔数。平均努赛尔数的定义式为:

$$N_{av} = \alpha_v R / \lambda$$

平均对流换热系数 α_v 的定义为:
$$\alpha_v = \frac{Q_{conv}}{A (t_w - t_0)}$$

其中: Q_{conv} 为从转盘冷却表面散出的总流量, A 为盘面面积, t_0 为冷气入口温度, t_w 为壁面平均温度, 其平均方法为按面积加权平均。

2 实验结果及讨论

2. 1 流量变化对换热的影响

图2和图3分别表示了上游盘和下游盘盘面温度 t 在冷气流量 m 突然变化后随时间 τ 的变化

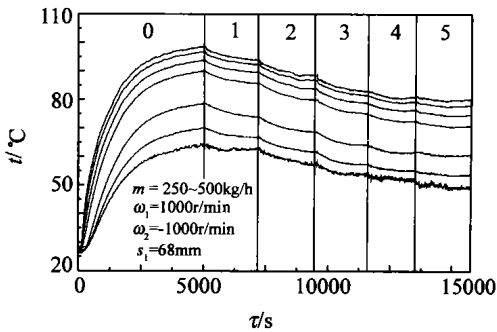


图2 流量变化后上游盘面温度随时间的变化
Fig. 2 Upstream disc temperature variation with flow rate and time

过程。两盘的转速分别为+ 1000 r/min 和- 1000 r/min。实验开始时向盘腔内通入 250 kg/h 的冷

气, 然后开始加热, 待系统达到热平衡后, 记录所有的实验数据, 作为本实验工况的初始条件, 然后再将流量增加50 kg/h。0到5区域分别表示不同的流量, 依次为250 kg/h, 300 kg/h, 350 kg/h, 400 kg/h, 450 kg/h 和 500 kg/h。图上的7条线分别表示盘面上7个不同半径处的温度。7个半径分别为2.5 cm (下游盘为0 cm), 4.9 cm, 8.9 cm, 15.1 cm, 17.2 cm, 18.8 cm, 19.8 cm (在图中对应的曲线由下到上)。从图中可以看出, 随着冷气流量的增大, 上游盘和下游盘的盘面温度都明显降低。每次流量改变后, 盘面温度开始降低的速度较快, 然后逐渐减慢, 最终需要很常的时间才稳定下来。另外, 流量改变后, 盘面各点温度随时间的变化率是相同的。

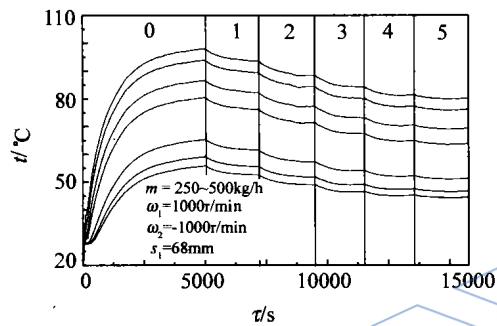


图3 流量变化后下游盘面温度随时间的变化
Fig. 3 Downstream disc temperature variation with flow rate and time

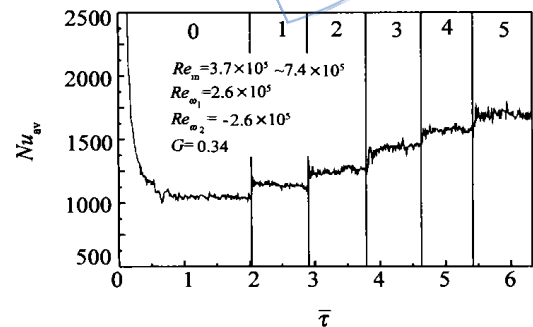


图4 进气雷诺数变化后, 上游盘面平均努塞尔数随无量纲时间的变化
Fig. 4 Upstream disc averaged Nusselt number variation with inlet Reynold number and nondimensional time

图4和图5与图2和图3是对应的, 为同一个实验过程。0到5五个区域所对应的进气雷诺数分别为: 3.7×10^5 , 4.4×10^5 , 5.2×10^5 , 5.9×10^5 , 6.7

$\times 10^5$, 7.4×10^5 。随着进气雷诺数的增大, 上游盘和下游盘盘面的平均努塞尔数都明显增大。原因主要是流量的增加将使腔内径向出流的平均速度增大, 单位时间流过转盘单位表面积的冷气量加大, 速度和温度边界层变薄, 换热加强。另一方面, 进气流量的增加也将使腔内回流区涡的运动加剧, 有利于换热的加强。对于下游盘中心部分, 进气流量的增加提高了冷气的进气流速, 加强了对该部分的冲击冷却效果。

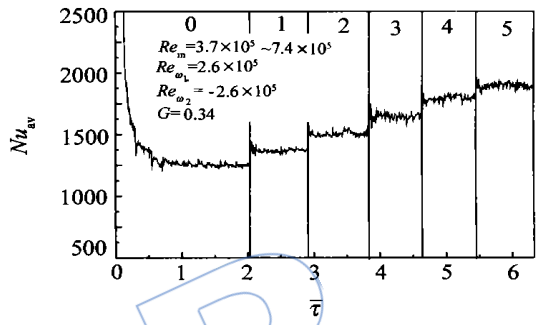


图5 进气雷诺数变化后, 下游盘面平均努塞尔数随无量纲时间的变化
Fig. 5 Downstream disc averaged Nusselt number variation with inlet Reynold number and nondimensional time

平均努塞尔数随流量的变化具有瞬时性, 在每一次进气雷诺数突然变化并保持稳定后, 平均努塞尔数也立即变化并很快稳定。可以看出, 整个图呈阶梯状分布。另外, 下游盘的平均努塞尔数较上游盘稍大一些。这主要是下游盘的换热条件要优于上游盘。

当两盘间隙分别为23 mm, 38 mm, 53 mm 和 83 mm 时, 所获得的实验结果和上述结果一致。

2. 2 两盘反向旋转时转速对换热的影响

图6和图7分别表示当上游盘转速 ω 突然变化后上游盘和下游盘盘面温度 t 随时间 τ 的变化曲线。实验开始时, 向系统提供250 kg/h 的冷气和对两盘进行加热, 并使下游盘转速保持1000 r/min 不变, 待系统达到热平衡后, 记录所有实验数据, 作为实验工况的初始条件。然后将上游盘转速从0 r/min 迅速提高到500 r/min, 待系统稳定后, 再将转速突然增加500 r/min, 如此直到上游盘转速为2000 r/min。0到4区域对应的转速分别为0 r/min, 500 r/min, 1000 r/min, 1500 r/min, 2000 r/min。图8和图9分别表示当下游盘转速突

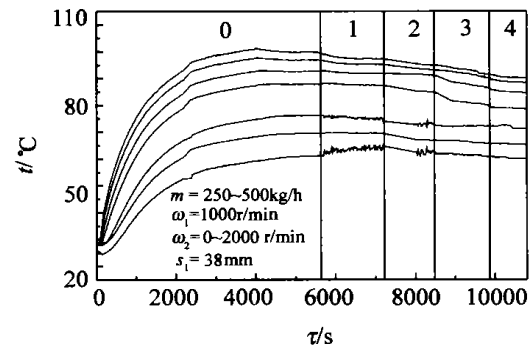


图6 上游盘转速改变后, 上游盘面温度
随时间的变化

Fig. 6 Upstream disc temperature variation
with rotating speed of upstream
disc and time

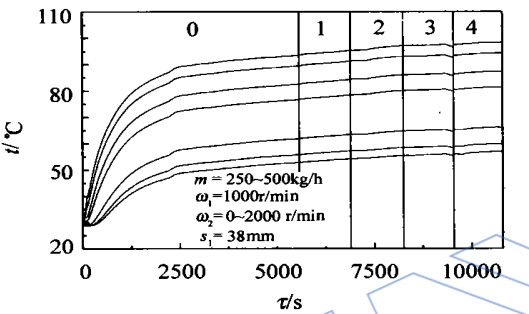


图7 上游盘转速改变后, 下游盘面温度
随时间的变化

Fig. 7 Downstream disc temperature variation
with rotating speed of upstream
disc and time

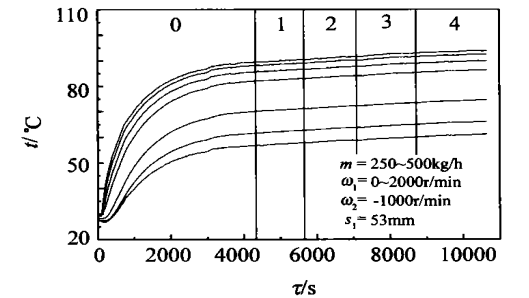


图8 下游盘转速改变后, 上游盘面温度
随时间的变化

Fig. 8 Upstream disc temperature variation
with rotating speed changing of
downstream disc

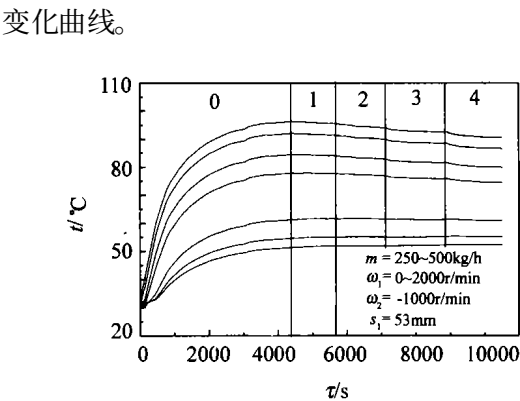


图9 下游盘转速改变后, 下游盘面温度
随时间的变化

Fig. 9 Downstream disc temperature variation
with rotating speed of downstream
disc and time

随着上游盘转速的增大, 上游盘盘面温度逐渐降低, 而下游盘温度则略有升高。上游盘不同位置处, 温度下降的幅度也不一样。随着半径的减小, 温度下降的幅度越来越小, 盘缘下降的幅度最大, 盘心基本不变。

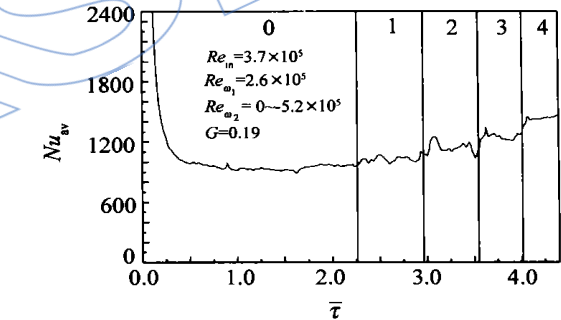


图10 上游盘旋转雷诺数改变后, 上游盘面平均
努塞尔数随无量纲时间的变化

Fig. 10 Upstream disc averaged Nusselt number
variation with rotational Reynolds
number of upstream disc and
nondimensional time

下游盘转速突然增大后, 上游盘温度有微小的升高; 而下游盘温度随则有一定程度的降低, 并且盘面半径不同的位置下降的幅度不一样, 半径越大的位置下降的幅度越大, 即在盘的边缘, 温度下降的幅度最大, 而在盘心区域, 温度基本上没有什么变化。总的来说, 无论是哪个转盘的转速增加, 该盘的盘面温度都会下降, 而另一个盘的

然变化后上游盘和下游盘盘面温度 t 随时间 τ 的

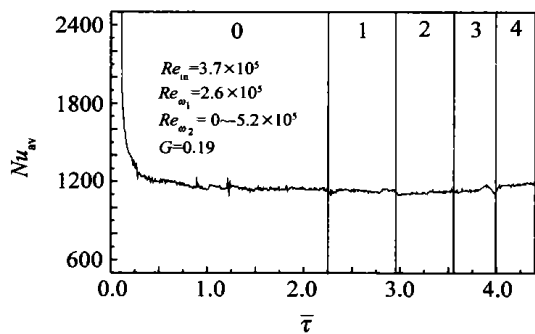


图 11 上游盘旋转雷诺数改变后, 下游盘面平均努塞尔数随无量纲时间的变化

Fig. 11 Downstream disc averaged Nusselt number variation with rotational Reynolds number of upstream disc and nondimensional time

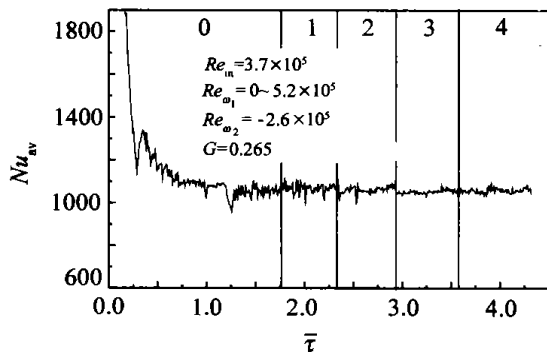


图 12 下游盘旋转雷诺数改变后, 上游盘面平均努塞尔数随无量纲时间的变化

Fig. 12 Upstream disc averaged Nusselt number variation with rotational Reynolds number of downstream disc and nondimensional time

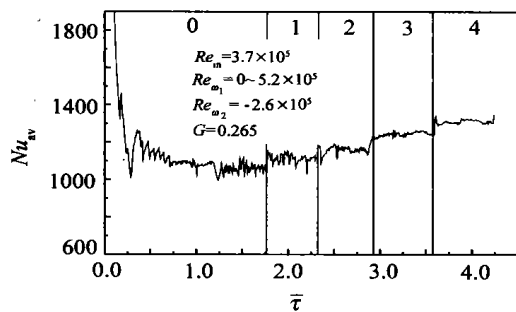


图 13 下游盘旋转雷诺数改变后, 下游盘面平均努塞尔数随无量纲时间的变化

Fig. 13 Downstream disc averaged Nusselt number variation with rotational Reynolds number of downstream disc and nondimensional time

温度略微有些上升。

图 10~图 13 和图 6~图 9 对应, 分别给出了两盘转速突然变化后, 盘面平均努塞尔数随时间的变化。随上游盘旋转雷诺数的增大, 上游盘的平均努塞尔数明显增大, 而下游盘的平均努塞尔数基本没有变化; 随下游盘旋转雷诺数的增大, 下游盘的平均努塞尔数有明显的增大, 而上游盘的平均努塞尔数基本没有变化。说明某一转盘旋转雷诺数的变化仅对本身的换热有一定的影响, 而对另外一个转盘的换热影响较小。

3 结 论

本文用实验的方法研究了反向旋转盘间冷气流、两盘转速对其非稳态换热的影响, 得到了以下主要结论:

(1) 冷气流量的改变对盘面换热影响非常明显, 随着冷气流量的增大, 盘面换热明显增强。冷气流对换热的影响是瞬时的和全场的。在系统稳定后突然改变流量, 两盘的温度将随之发生变化, 开始时其变化的速度较快, 随后变化的速度逐渐减慢, 最终需要很常的时间温度才稳定下来, 另外盘面各点温度随时间的变化率是相同的。

(2) 某一转盘的转速突然变化只对本身的换热有一定程度的影响。随着该盘转速的增大, 该盘面换热增强, 而另外一个转速不变的转盘的盘面换热基本上没有发生变化。某一转盘转速变化对该盘换热的影响略有滞后。此外, 转盘转速的变化对本身盘面各处换热的影响是不同的, 随半径的增大, 影响的程度也越大。

参考文献:

- [1] Kilic M, Gan X, Owen J M. Transitional Flow Between Contra-Rotating Disks [J]. J. Fluid Mech., 1994, 281: 119 - 135.
- [2] Kilic M, Gan X, Owen J M. Turbulent Flow Between Two Disks Contra-rotating at Different Speeds [J]. Transactions of the ASME, 1996, 118: 408 - 413.
- [3] Kilic M, Gan X, Owen J M. Superposed Flow Between Two Disks Contra-Rotating at Differential Speeds [J]. Int. J. Heat and Fluid Flow, 1994, 15: 138 - 446.
- [4] Gan X, Kilic M, Owen J M. Flow Between Contra-Rotating Disk [J]. Transactions of the ASME Journal of Turbomachinery, 1995, 117: 298 - 305.
- [5] Chen J X, Gan X, Owen J M. Heat Transfer From Air-Cooled Contra-Rotating Disks [J]. Journal of Turbomachinery Journal of Turbomachinery, 1997, 119: 61 - 67.