

文章编号: 1000-8055(2007)03-0347-05

高位垂直进气转静系旋转盘腔流场的实验

陶 智¹, 高 娟¹, 蔡 毅², 耿汀¹, 罗 翔¹, 邹正平¹

(1. 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;

2. 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 利用粒子图像测速技术(简称 PIV)对高位垂直进气的转静系旋转盘腔流场进行了实验研究. 该盘腔由一个旋转盘、一个静止盘及静止的外围盘罩组成. 实验结果表明: PIV 粒子成像技术可以应用于旋转盘腔结构的流场测试, 在本实验的工况范围内, 大部分区域的流动已为湍流, 两盘间的流动结构明显具有 Batchelor 流型的特点, 转盘和静盘两个表面附近形成各自独立的边界层, 两边界层之间有一个旋转核心, 核心区内旋流系数 β 比大间隙封闭系统湍流流动时旋流系数的值 0.43 要小. 流量系数和旋转雷诺数的变化对旋流系数 β 的影响较小, 但转静间隙的变化对 β 的影响较为显著.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 转静系; 旋转盘腔; PIV; 流场; 旋流系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigation of the flow field between a rotating and a stationary disk at high positioned air inflow

TAO Zhi¹, GAO Juan¹, CAI Yi², DING Shu ting¹,
LUO Xiang¹, ZOU Zheng ping¹

(1. National Key Laboratory on Aero Engines, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Xi'an Aero Engine(GROUP) LTD, Xi'an 710021, China)

Abstract: The flow field between a rotating and a stationary disk at high-positioned air inflow condition was investigated by Particle Image Velocimetry (PIV) technology. The experiments indicate that PIV technology could be used on the flow measurement of the rotating cavity. The flow in the most area became turbulence in the range of experiments. Batchelor-type flow was observed in the experiments. Separate boundary layers were formed on the rotor and stator. Between the boundary layers there was an inviscid core rotating in the same direction as the rotor at a lower speed. The experimental data of the relative rotational speed β in the core was lower than 0.43, the value in the closure system with large clearance. β did not show obvious changes with the change of flow rate coefficient or rotational Reynolds number, but the axial clearance between the rotor and stator affected β much obviously.

Key words: aerospace propulsion system; rotating-stationary-disk system; rotating cavity; Particle Image Velocimetry(PIV); flow field; relative rotational speed

收稿日期: 2006-03-27; 修订日期: 2006-08-01

作者简介: 陶智(1963), 男, 辽宁大连人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为热端旋转部件内的流动与换热过程.

自 50 年代末以来, 高位射流冷却结构已在发动机冷却设计中采用并逐步获得推广. 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; 其二是将从转盘边缘来的热量有效地加以阻隔, 减小其向纵深传递^[1]. 这种冷却结构既可以降低全盘的温度水平, 提高高温持久强度, 又可以使转盘的径向温差得以减小, 降低热应力. 徐国强等对高位进气转静系旋转盘的换热特性进行了实验^[2], 并采用混合长度模型, 对其进行了数值计算^[3]. 但以往的研究大多针对盘面的换热, 而对转静盘之间的流动情况研究开展的较少, 因此本文对高位进气转静系盘腔内的流动情况进行了实验. 本文的实验特点是采用了 PIV 测速技术, 将流场生动形象地表现出来.

1 PIV 测速原理及实验模型

1.1 PIV 测速原理

在流场中布撒大量示踪粒子(小于 10 μm)跟随流场运动(空气中使用固体或者液体小颗粒烟雾, 水中使用密度接近水的空心玻璃微珠), 把激光束经过组合透镜扩束成片光照明流场的研究区域, 使用数字相机拍摄照片, 得到前后两帧粒子图像, 然后对其进行相关计算得到流场一个切面内定量的速度分布, 进一步处理可得流场涡量、流线以及等速度线等流场特性参数分布.

1.2 实验模型

该实验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家重点实验室的旋转换热实验台上进行的. 实验模型如图 1 所示.

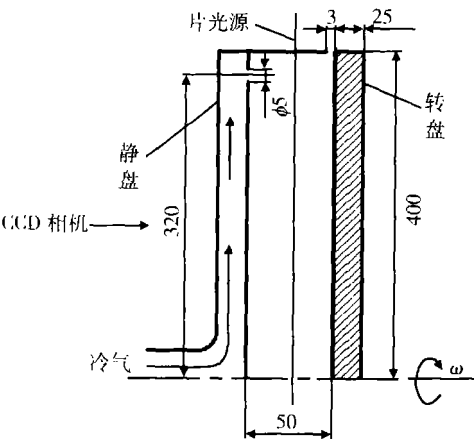


图 1 高位进气转静系旋转实验模型
Fig.1 A rotor stator system with
highr positioned air inflow

实验件是一个由不锈钢加工的厚 $\delta=25\text{ mm}$ 直径 $\phi 800\text{ mm}$ 的圆盘. 静盘及盘罩主要材料为有机玻璃, 出气孔的数目为 144 个, 沿周向均匀分布, 孔径大小为 5 mm, 孔中心线直径为 640 mm. 转静间隙 s 分别为 50 mm 和 20 mm, 出气间隙 $s_e=3\text{ mm}$.

实验时空气流量由电动阀门控制, 示踪粒子由专门的发生器产生, 并注入气流. 激光器发出的激光束经过光学元件后, 转变成具有一定厚度和张角的片光源, 该片光源从盘罩的侧面打入, CCD 相机从正面进行拍摄.

1.3 实验工况

实验工况范围: 在转静盘间隙分别为 20 mm, 50 mm, 出气间隙为 3 mm 时, 流量 m 变化分别为 300, 400, 500, 600, 700 kg/h; 对每一个确定的流量下, 测量转速分别为 1000, 1500, 2000, 2500 r/min. 转静间隙为 50 mm 时, 拍摄了各个工况下距离转盘 x 为 9, 14, 30, 35 mm 和 40 mm 5 个截面处的周向流场, 转静间隙为 20 mm 时只拍摄了一个截面.

2 实验结果分析

实验时拍摄区域为静盘一个扇形区域的两个矩形区域, 如图 2 所示. 中心区域因为中心进气管的原因而无法进行拍摄, 处理数据时, 由这两个矩形区域内的数据, 利用圆盘的对称性求出 1/4 圆盘区域的流场, 从而获得整个转盘的流场.

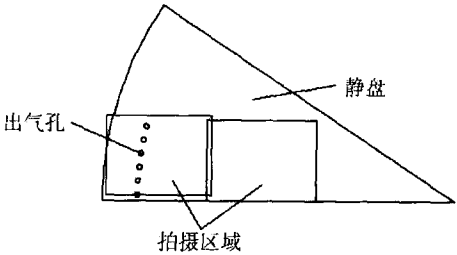


图 2 拍摄区域示意图
Fig.2 Map of photo area

2.1 速度场分析

由于距离转盘 9, 14 mm 和 30 mm 截面上的流场比较相似, 所以选择 30 mm 截面上的流场为例加以讨论. 由图 3 可以看出, 腔内的速度场可以分为两个部分: 一部分流体向外从出气间隙处流出系统, 另一部分是腔内的核心区的流动. 在一般情况下, 由于冲击冷却的作用, 在出气孔所对的区域会出现一段比较明显的速度驻点区, 从换热角

度来讲,这一区域直接被冷气冲击,冷却效果比较好.

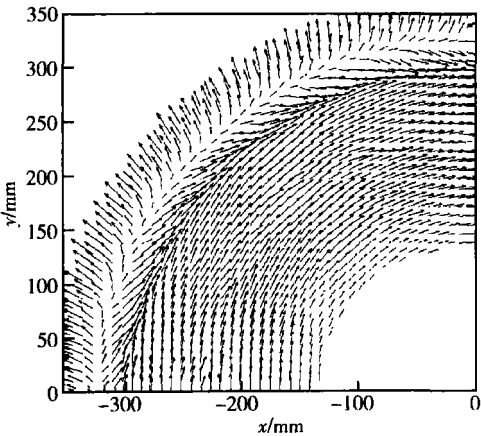


图 3 转静间隙为 50 mm, 流量为 300 kg/h, 转速为 1 000 r/min 时距转盘 30 mm 截面处的流场

Fig. 3 Vector map at $x = 30\text{ mm}$, $m = 300\text{ kg/h}$, $\omega = 1\,000\text{ r/min}$

在驻点以内的腔中,其速度场是由流体的粘性所决定的,速度呈切向分布,腔内流体以低于转盘的某个速度旋转.在流量相同转速不同的情况下,其切向速度随着转速的增加而略有增加.

在驻点以外的区域,速度场主要由气体的惯性力和离心力决定,速度矢量大部分向外.随着转速的提高,这个区域流体的粘性作用将得到加强,如图 4 所示,在转速较大而冷气流量较小的情况下,例如流量为 300 kg/h 转速为 2 500 r/min 时,粘性作用大于气体的惯性力和离心力的作用,使

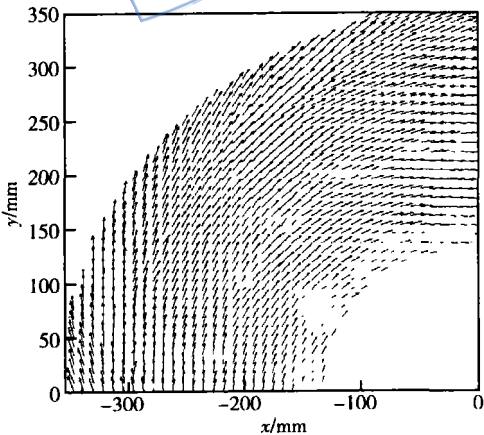


图 4 转静间隙为 50 mm, 流量为 300 kg/h, 转速为 2 500 r/min, 距转盘 30 mm 截面处的流场

Fig. 4 Vecto map at $x = 30\text{ mm}$, $m = 300\text{ kg/h}$, $\omega = 2\,500\text{ r/min}$

该区域的流动主要为切向运动.但在流量较大而转速较低的情况下,粘性引起的切向运动尽管存在,但它的影响远远不及惯性力和离心力,所以切向运动不是流动的主要方向.

距离转盘 35 mm 和 40 mm 截面上的流场和 9 mm, 14 mm, 30 mm 截面上的流场有很明显的不同.如图 3 和图 5 所示,驻点区以内的流场比较相似,但是驻点区外的流场截然不同.40 mm 截面上驻点区外的流体重新汇入到射流当中,而 30 mm 截面上驻点区外的流体从出气孔处向外流出.说明由高位出气孔射出的流体,一部分从出气间隙处流出,还有一部分碰到罩子改变方向回到出气孔附近重新汇入射流中,在出气孔和罩子之间的区域存在涡流区.

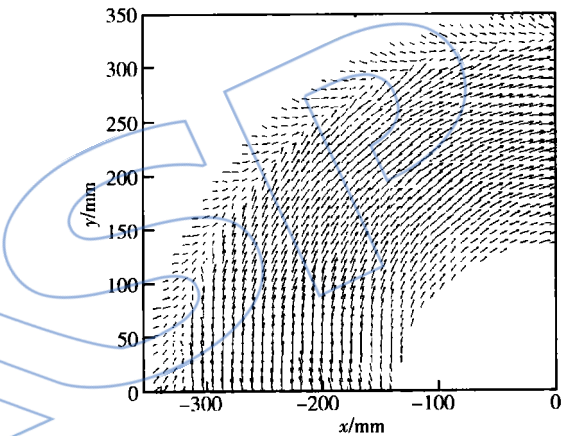


图 5 转静间隙为 50 mm, 流量为 300 kg/h, 转速为 1 000 r/min 时距离转盘 40 mm 截面处的流场

Fig. 5 Vector map at $x = 40\text{ mm}$, $m = 300\text{ kg/h}$, $\omega = 1\,000\text{ r/min}$

3.2 旋流系数分析

旋流系数 β 的定义式为:

$$\beta = \frac{u}{\omega r}$$

其中: u 为气体当地的切向速度, ω 为转盘角速度, r 为当地半径.

图 6 为转静间隙为 50 mm, 即间隙比 $G = z/s = 0.125$ (其中, z 为轴向位置, s 为转静间隙) 时 β 沿轴向的分布情况($x = r/b$ 为无量纲径向位置, b 为转盘外半径), 从图中可以看出, 两盘间的流动结构明显具有 Batchelor 流型的特点, 转盘和静盘两个表面附近形成各自独立的边界层, 两边界层之间有一个流体核心, 它以 $0 \sim \omega$ 间的某一个角速度 ω_c 旋转, 称为旋转核心. 由于转静间隙较大, 远大于转静盘上的边界层厚度, 所以本实验拍摄

的 5 个截面均处于旋转核心区. 另外, 因转速较高, 最小的旋转雷诺数已达到 $Re_{\phi} = 1.1 \times 10^6$ ($Re_{\phi} = \omega b^2/\nu$ 其中, ν 为气体的运动粘性系数), 流量较大, 最小流量系数为 $C_w = 1.15 \times 10^4$ ($C_w = Q/\sqrt{b}$, 其中 Q 为气体的进口体积流量), 所以大部分区域已为湍流.

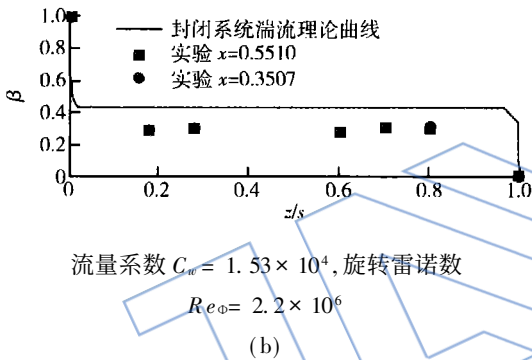
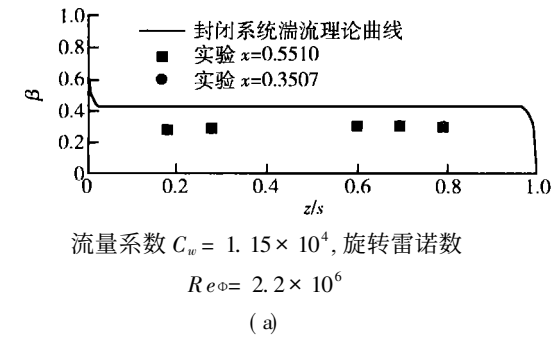


图 6 转静间隙为 50 mm 时不同工况下 β 沿轴向的分布图
Fig. 6 Variation of β with axial location at $s = 50$ mm

有关高位进气的研究较少, 经验公式也较少, 而高位进气低半径处的流动与封闭系统类似, 所以下面将本实验的实验结果与封闭系统的流动作比较. 在大间隙封闭系统中, 流动变为湍流后, 与层流一样, 两盘之间仍会存在一个旋转核心, 其旋流系数约为 0.43^[4], 而且与半径基本无关. 本实验拍摄的 5 个截面均在旋转核心区, 但从图 6 可以看出, 实验值比 0.43 要小一些, 这是因为: 与封闭系统相比, 进气孔以下低半径处由于气体向系统内入侵, 核心流动将被削弱, 转盘与流体的切向速度差变大, 导致旋流系数变小.

图 7 为转静间隙为 50 mm, 即间隙比 0.125 时距离转盘 30 mm 的截面上 β 沿径向的分布情况. 由图 7 可以看出 $x = 0.8$ 附近的值比其他区域要小, 因为本实验为高位进气, 进气孔位于 $x =$

0.8 处, 进气孔附近的流体主要受惯性力的控制, 粘性力的影响较小, 所以切向速度不大, β 值较小. 由图 7 中还可以看出, 在相同的流量系数下, 旋转雷诺数对 β 的影响不是特别明显.

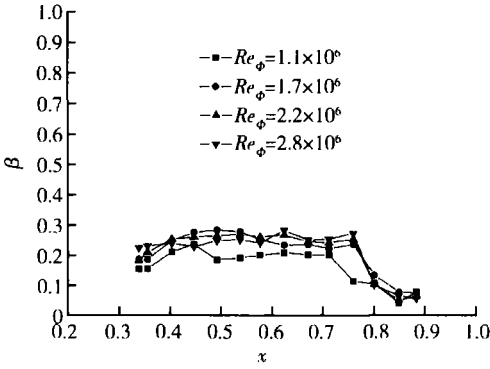


图 7 转静间隙为 50 mm 时流量系数 $C_w = 2.30 \times 10^4$ 下 β 沿径向的分布图
Fig. 7 Variation of β with radial location at $C_w = 2.30 \times 10^4$ and $s = 50$ mm

图 8 为转静间隙为 20 mm, 即间隙比为 0.05 时 β 沿径向的分布图. β 的分布与转静间隙为 50 mm 时基本相同, 但是 β 的值明显比 50 mm 时大, 基本在 0.4 左右, 这是因为转静间隙较小, 限制了流体的径向流动和轴向流动, 转盘旋转导致的粘性力对流场有很大的影响, 所以 β 值较大.

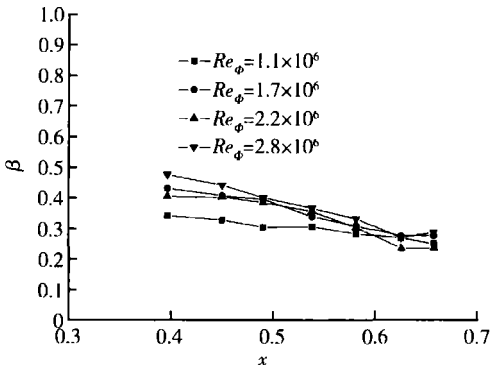


图 8 转静间隙为 20 mm 时流量系数 $C_w = 2.30 \times 10^4$ 下 β 沿径向的分布图
Fig. 8 Variation of β with radial location at $C_w = 2.30 \times 10^4$ and $s = 20$ mm

图 9 为转静间隙为 50 mm, 即间隙比 0.125 时距转盘 14 mm 的截面上 β 沿径向的分布图, 由图中可以看出, 在同一旋转雷诺数下, 流量系数对 β 的影响也不是很大, 只是随着流量系数的增大略有降低. 这是因为转盘带动气体一起旋转的能力一定, 流量越大, 惯性力的作用就越明显, 粘性力的影响相对较小, 所以 β 值越小.

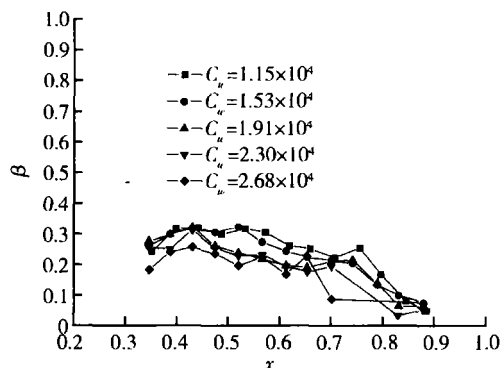


图9 转静间隙为 50 mm 时旋转雷诺数

$Re_\phi = 1.1 \times 10^6$ 下 β 沿径向的分布图

Fig. 9 Variation of β with radial location

at $Re_\phi = 1.1 \times 10^6$ and $s = 50$ mm

图 10 为转静间隙为 20 mm, 即间隙比 0.05 时 β 沿径向的分布图。图 10 中 β 的分布与 50 mm 时也基本相同, 在同一旋转雷诺数下, 随着流量系数的增大, β 的值变小, 但是 β 的值明显比 50 mm 时大。

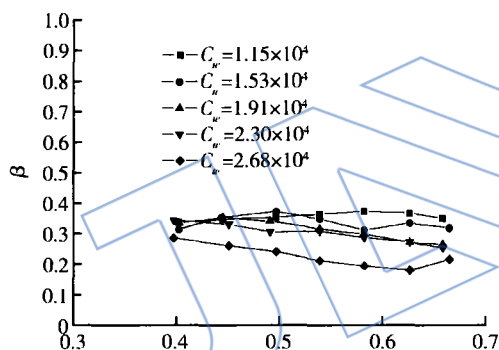


图 10 转静间隙为 20 mm 时旋转雷诺数

$Re_\phi = 1.1 \times 10^6$ 下 β 沿径向的分布图

Fig. 10 Variation of β with radial location

at $Re_\phi = 1.1 \times 10^6$ and $s = 20$ mm

3 结 论

通过 PIV 粒子成像技术对高位进气的旋转盘腔流场进行了测量, 对流场进行了处理和分析后, 得到以下结论:

(1) PIV 粒子成像技术可以应用于旋转盘腔结构的流场测试;

(2) 周向的流场分布可以按照冲击孔的位置分为两部分: 腔内中心区域的流动主要是受流体的粘性力作用, 作切向运动; 冲击孔以外的流体流动主要受流体的惯性力和离心力作用, 向外从出气间隙处流出系统;

(3) 在本实验的工况范围内, 两盘间的流动结构明显具有 Batchelor 流型的特点, 转盘和静盘两个表面附近形成各自独立的边界层, 两边界层之间有一个流体核心。流量系数和旋转雷诺数的变化对旋流系数 β 的影响较小, 但转静间隙的变化对 β 的影响较为显著。

参考文献:

- [1] 孙纪宁, 陶智, 丁水汀, 等. 高位进气、径向出流的旋转腔内流动与换热的数值研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 586-590.
SUN Jining, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer characteristics within a rotating cavity with a high positioned axial inlet and a radial outlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 586-590.
- [2] 罗翔, 徐国强, 丁水汀, 等. 高位垂直进气旋转盘非稳态换热的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 512-515.
LUO Xiang, XU Guoqiang, DING Shuiting, et al. Experiment investigation on transient heat transfer in rotor-stator system with high positioned air inflow[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(6): 512-515.
- [3] 徐国强, 詹国治, 丁水汀, 等. 高位垂直进气转静系旋转盘流动与换热计算[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 40-43.
XU Guoqiang, ZHAN Guozhi, DING Shuiting, et al. Numerical calculation for flow and heat transfer of a shrouded rotating disk with high positioned air inlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 40-43.
- [4] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
CAO Yuzhang. Heat transfer of aero engine[M]. Beijing: Press of Beihang University, 2005.