

旋转通道内流阻特性实验的实现与验证

陈 豪^{1,2,4}, 邓宏武^{1,4}, 程俊华^{1,4}, 李 洋^{1,4}, 田淑青³

- (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国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
3. 中国航空工业集团公司 商用航空发动机有限责任公司 设计研发中心, 上海 201108;
4. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对涡轮叶片的蛇形内冷通道内流阻特性的研究, 在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室的旋转涡轮叶片内冷通道换热实验台上构建了旋转工况的测压系统. 该测压系统具有高精度、多路选通、高压高旋转数等特点. 在通道进口雷诺数从 20 000~70 000, 旋转数从 0~1.025 的范围内, 实验研究了旋转状态下, 冷态与热态流场下方形截面光滑 U 形通道流阻系数. 实验结果与国外同类实验对比验证了构建的实验系统的可靠性和优越性. 实验结果表明: 低雷诺数下静止工况的流阻随雷诺数增大而增大, 并在雷诺数增大到一定值后转而减小. 冷态下流阻随旋转数增大而增大, 低旋转数下旋转对热态流阻影响并不显著, 高旋转数下热态流阻随旋转数增大而显著增大.

关 键 词: 旋转测压; 内冷通道; 高压; 高旋转数; 高雷诺数; 实验技术

中图分类号: V235.1

文献标志码: A

Realization and verification of the flow characteristic experiment in rotating two-pass square duct with smooth walls

CHEN Hao^{1,2,4}, DENG Hong-wu^{1,4}, CHENG Jun-hua^{1,4},
LI Yang^{1,4}, TIAN Shu-qing³

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;
3. Research and Developing Center, Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 201108, China;
4. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the pressure and flow characteristics of the rotating channels, a new measurement system was invested and implemented in National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. The new measurement system with high measurement accuracy and plural air channels could reach high Rotation numbers by increasing the back pressure of test section. The Reynolds and Rotation numbers ranged from 20 000 to 70 000 and 0 to 1.025 respectively. The investigation used different temperature ratio conditions to investigate the pressure and flow characteristics of the rotating two-pass square duct with

收稿日期: 2014-04-16

作者简介: 陈豪(1990-), 男, 江西萍乡人, 硕士生, 主要从事叶片内冷通道换热研究.

smooth walls. The results proved the reliability and superiority of the measurement system by comparing with similar experiments in foreign countries. The result showed that the static flow resistance increased with the increasing Reynold number, and decreased when the Reynold number was high enough. In cold conditions, the flow resistance increased with the increasing Rotation number. In thermal state, the flow resistance showed no obvious change in low Rotation number, and increased significantly with the increasing Rotation number in high Rotation number.

Key words: rotating pressure measurement; cooling channel; high pressure; high Rotation number; high Reynolds number; experimental technique

由于现代航空发动机不断地发展,涡轮叶片面临着更加恶劣的工作环境,为了保证航空发动机的正常运转而产生的涡轮叶片的冷却技术受到了人们极大的重视.涡轮叶片内冷通道是叶片冷却技术中的经典结构,然而由于涡轮叶片在工作时处于旋转状态,冷却介质在流经旋转叶片内冷通道时,会受到很大的哥氏力和旋转浮升力的作用,这些作用力在通道中引起二次流,使主流分布不对称,从而影响了通道内流阻特性和换热特性.

近年来,国际上逐渐实现了高旋转数条件下内冷通道流阻与换热实验^[1-6].而国内对旋转下内冷通道的流阻与换热特性研究也已经有了一些基础^[7-13],但是实验参数范围较小,不能有效满足航空发动机涡轮叶片内冷通道的设计要求.

旋转内冷通道的流阻特性实验对航空发动机涡轮叶片的设计十分重要,压力测量作为流阻特性实验的有效途径,在研究中有着重要的地位.然而,对于能够真正满足真实发动机工作参数的旋转态压力测量实验,国内外却很少出现.

本文在前期光滑回转通道旋转换热研究^[14-16]的基础上,针对高旋转数状态下的内冷通道流阻换热特性实验设计了一套旋转测压系统.该系统能够实现旋转下的高压工况实验,使实验参数范围完全覆盖了真实发动机工作参数,并且设计了多路选通测压模块,使得多点测压得以实现.

本文通过一系列验证性实验证明了该测压系统的可靠性和优越性.

1 实验技术与实验设备

1.1 旋转换热实验台

本测压系统的实现和验证在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室的旋转涡轮叶片内冷通道换热实验台上进行.实验台采用模块化设计,其结构如图 1 所示,主要由动力系

统、供气系统、实验模块和测试系统组成.

实验台外部静止气路通过 DEUBLIN 公司生产的 1500 型双通道旋转进气接头将冷气引至旋转的实验段内,在保证高压气密性的前提下实现了气路的动静转换.实验段置于封闭的硬铝承压筒,筒内引气使得通道内外压力均衡,用以保证实验段的气密性和可靠性.

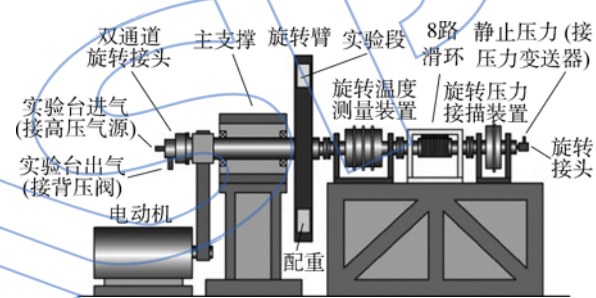


图 1 旋转换热实验台简图

Fig. 1 Schematic of rotating heat transfer test facility

1.1.1 动力系统

实验台采用一台大功率电动机提供旋转动力,实验转速范围为 $0 \sim 1\,000$ r/min,转速由通过实验室自主设计的控制程序直接由计算机进行实时控制,并由转速仪采集实时反馈到计算机上进行数据记录.

1.1.2 供气系统

实验台高压气路如图 2 所示.空气经过压缩机加压后经由空气滤清器进入稳压储气罐.气路备有一路与大气连通的泄压阀来保证安全.气体质量流量由美国 Flip Chip International (FCI) 公司生产的热式流量计实时采集至计算机记录,并由实验室自主设计的实验程序实时控制的气动阀进行流量调节.

为了保证实验参数的范围达到要求,在由旋转接头引出的气路出口处安装背压阀,通过调节背压阀可以使通道内保持高压状态,满足实验要求.

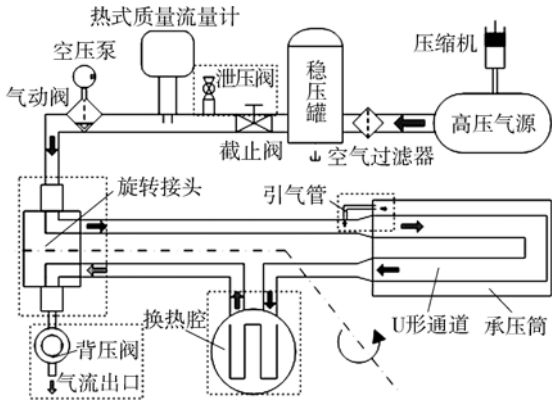


图 2 高压气路图

Fig. 2 Sketch of high pressure gas circuit

被加热后的出口气流在经过旋转接头流向背压阀时,会不断加热进气通道的冷气,使得进口气流持续升温而难以达到热稳定.故在保持旋转臂动平衡的配重段中安装换热腔用以冷却出口气流.

1. 1. 3 实验模块

用于验证测压实验系统的实验模型主体为光滑 U 形通道,如图 3 所示(图中 $p_1 \sim p_4$ 为压力测点).

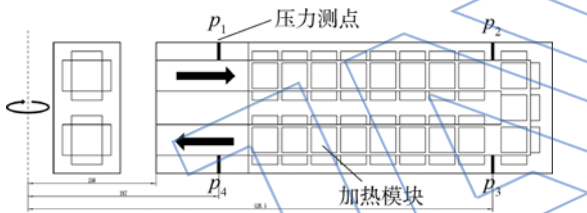


图 3 实验模型简图

Fig. 3 Schematic of test section

通道内截面是水力直径为 24 mm 的正方形,单流程通道长度(L)与水力直径(D_h)的比值约为 10.9,通道平均旋转半径与水力直径的比值为 17.25.由于进口条件对第 1 通道的流动换热有着至关重要的影响,为使提供更好的进口条件,本实验在通道进口之前依次设置了足够长的扩张段、整流段及稳流段,如图 4 所示.

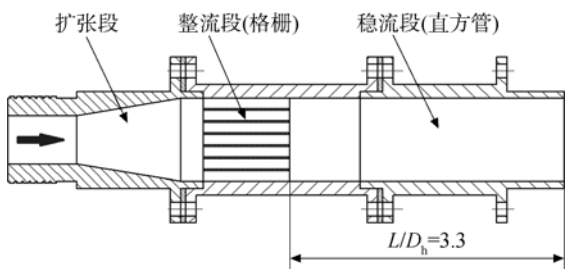


图 4 实验模型进口结构

Fig. 4 Structure of entrance of test section

通道沿程的每个加热模块由紫铜块、加热膜、T 型热电偶以及气凝胶保温材料、绝热隔板等构成.紫铜的导热系数很高,可以认为热电偶所测温度即是测点位置处铜块壁面的平均温度.实验的加热方式为电加热膜加热,通过一层较薄的导热硅胶将加热膜贴在铜块背面,壁面边界条件为等热流.

为了测得通道内流阻系数,需要获得通道内压力差.本实验分别在进出口以及通道 2 个转弯段处设置了一共 4 个压力测点,如图 3 所示,用以获得通道内各部分压力差.

1. 1. 4 测压系统

实验台压力测量系统如图 5 所示.

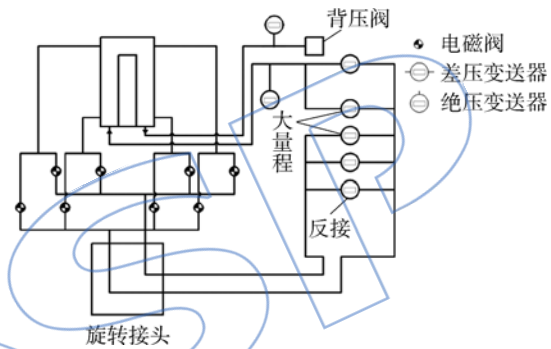


图 5 测压系统气路图

Fig. 5 Sketch of gas circuit of pressure measurement system

4 个压力测点由管径为 3 mm 的硬质聚氨酯管(PU)管引气,每个测点设置两条气路,由实验台轴心引至旋转电磁阀盘.旋转电磁阀盘内设有可由控制程序实现自动开闭的 8 个电磁阀,与实验件测点气路连接后,分两路由旋转接头引出.

实验台使用罗斯蒙特公司生产的 3051 压力变送器测量压力数据,其精度可达 $\pm 0.075\%FS$,保证了较高的压力测量精度.压力数据被实时传输至计算机内进行数据记录,也进一步提升了测压系统的可靠性.由于通道压差相比于绝对压力在数值上较小,为了进一步保证测量精度,在进气口处设置大量程绝压变送器以测量绝对压力,并由 2 个不同量程的差压变送器来测量实验段进口与进气口的相对压力,以此来间接测量实验段进口的绝对压力.由于差压变送器量程小,测量精度高,变相的提升了压力测量精度,而不同量程的差压变送器对应不同的压力大小,也最大限度地提高了测压系统的精度.

而气路由 8 个电磁阀控制开闭,可以实现 4

个测点中任意两点间的相对压力值的测量,在控制程序中预先设置后,可以实现所有所需数据的全自动测量与记录.为了保证实验结果的准确性,实验台设置了2个不同量程的绝压变送器以及一个反接的绝压变送器,以保证实验结果不会超出压力变送器量程.

此种自主设计的旋转压力-电磁阀选通系统可以通过编程实现多通路-两通路的压力转换,对于通道的测压测点的布置具有很好的拓展性.

在实时校准方面,通过测量 $\Delta p = p_{1,A} - p_{1,B}$ (由两条不同的测压气路 A、气路 B,对同一测点处的压力进行测量的压力差值)可以对系统实时标定和检测.理想情况下,当整个系统完美密封时,由于通道内的气体没有流动,故没有压力降,该测量值应当为零.然而由于实际系统并不是完全密封.某一点的漏气会导致测压管内气体的流动,进而产生压力降.最终压力变送器测得的两个通路的压差不为零.本实验在每个实验工况下均进行了压力系统检测,如图6所示.

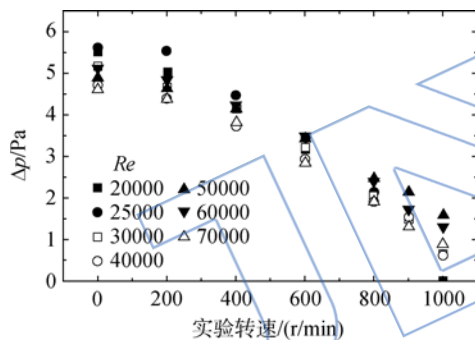


图6 压力测量系统在不同转速下的的系统误差
Fig. 6 Deviation of pressure measurement system at different rotation rates

实验数据表明,该压差与转速有较强的相关性,可以作为系统误差处理,其测量值即为系统误差的校正量.此外, $p_{1,A} - p_{1,B}$ 的测量还可以检测系统是否正常运转,如果其测量值突然变化剧烈,则可以断定必有某处管路出现了大量漏气,需要停止实验进行排查.

通过上述对旋转压力测量系统的调试,及实验过程中实时校验的数据分析,可以确定压力测量系统符合通道压差的测量要求,满足流阻实验的需要.

1.2 实验原理

实验使用流阻系数 f 来分析通道内流动特性.通道内流阻系数可以表示为

$$f = \frac{\Delta p}{4L/D_h(0.5\rho u^2)} \quad (1)$$

其中 Δp 为通道进出口压差, ρ 为气体密度, u 为通道进口气体平均流速, L 为通道长度, D_h 为通道水力直径.用 f_s 来表示静止时的流阻系数, f/f_s 来表示流阻系数的动静比.

2 实验数据处理及误差分析

为了便于实验研究,将真实涡轮叶片的内冷通道严格按照相似原理来进行简化和放大.在几何相似的基础上,通过对各控制方程的无量纲分析,得到控制旋转系对流换热过程的无量纲准则数:雷诺数 Re , 旋转数 Ro , 浮力数 Bo , 普朗特数 Pr 以及沿程无量纲位置 X/D_h .

雷诺数

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (2)$$

旋转数

$$Ro = \frac{\Omega D_h}{u} \quad (3)$$

沿程无因次位置 X/D_h 为整流段出口沿通道轴线到计算点的距离 X 与通道水力直径 D_h 的比值; μ 为空气黏度; Ω 为旋转速度.

本实验中假设冷气介质为理想气体,近似取进口温度和压力计算整个通道内气体密度 ρ .以此密度和进口质量流量 \dot{m} 以及通道进口面积 A 来计算气体流速 u .

本实验中铜块平均壁温为 $\overline{T_w}$, 进口气体主流温度为 T_{in} , 定义温度比为 $(\overline{T_w} - T_{in})/\overline{T_w}$.

2.1 压力修正

传统旋转测压方法大多是让压力传感器与实验件一同旋转,再将压力传感器的电信号通过滑环引电器引出.这种方法的缺点主要有:离心力对压力传感器的影响;电信号经过滑环引电器时引入的噪声信号.

本实验台的测量系统为了保证测量仪器的可靠性,将旋转通道中的气体由旋转接头引至外部静止空间后再接入压力变送器进行测量,有效避免了传统旋转测压方法的主要缺点.

由于通道内气体受到强力的离心力影响,离心力对通道内气体产生了泵效应.因此为了反映旋转通道内的真实流阻,在计算旋转状态下的摩擦系数时应该出去通道段进出口之间离心力引起的等效压力修正.另外,热态实验中由于主流温度梯度导致的密度差会在旋转时影响压力分布,需

要对其进行修正.修正后的进出口压差为

$$\Delta p_{ij,r} = \Delta p_{ij,m} + \Delta p_{ij,r0} + \Delta p_{ij,r1} \quad (4)$$

$$\Delta p_{ij,r0} = \frac{1}{2} \rho_i (r_i \omega)^2 - \frac{1}{2} \rho_j (r_j \omega)^2 \quad (5)$$

$$\Delta p_{ij,r1} = \int_i^j dp = \int_i^j \frac{p}{Rg(Ar+B)} r \omega^2 dr \quad (6)$$

$$T(r) = Ar + B \quad (7)$$

其中 $\Delta p_{ij,m}$ 为仪器测量的静压值, $\Delta p_{ij,r0}$ 为离心力引起的压力差, $\Delta p_{ij,r1}$ 为热态时主流密度差在旋转时产生的压力差. 式(7)为当地主流温度与当地旋转半径的关系.

2.2 误差分析

本实验直接测量的物理量有:气体质量流量、转速、气体压力、温度等,间接测量量有进气雷诺数、旋转数、流阻系数等.

根据测量仪器与实验台精度,进气压力最大相对误差为 2%,流量最大误差为 1% 读数 + 0.5% 满量程,本实验中最大误差为 2.6%,由于使用了 ADAM 模块进行数据的数字采集引入的最大误差为 0.1%,实验件几何尺寸最大误差为 0.1%,热点偶测温误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

间接误差是直接误差的一般函数,于是间接误差可由直接误差直接计算得出^[11].

Re 的最大误差为 2.6%, Ro 的最大误差为 3.33%, f/f_s 的最大误差为 7.15%,温度比最大误差为 2.1%.

3 验证实验结果及其讨论

3.1 验证实验的工况参数及可靠性

真实发动机的工作参数工况为:雷诺数在 50000 左右,旋转数为 0.25 左右^[12].

图 7 为实验台的工况验证实验结果,验证实验测量了 $Re=10000\sim 70000$ 范围内的 9 个雷诺数在转速 $n=0\sim 1000\text{ r/min}$ 时的旋转数分布

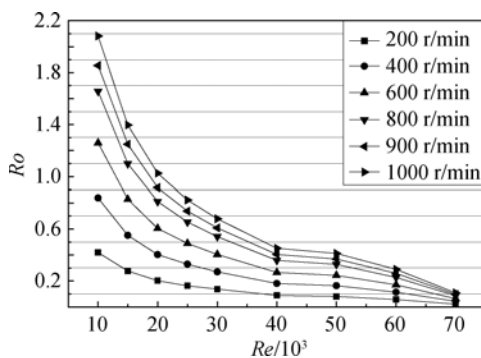


图 7 不同实验工况下的旋转数

Fig. 7 Rotation number under different conditions

情况.

目前的发动机涡轮叶片的内部冷却流动中的 Re 为 30000~50000,其旋转数 Ro 范围为 0.2~0.4 之间,而根据图 7 可知,在 $Re=50000$ 的工况下, $n=600\text{ r/min}$ 对应的 Ro 约为 0.24, $n=800\text{ r/min}$ 对应的 Ro 约为 0.32,说明本实验台的参数能够同时匹配发动机工况下的 Re 和 Ro ,并完全覆盖了发动机的工作范围.

且从图 7 中可以明显看出与传统低压实验相比,本实验技术大幅扩展了实验参数范围,可以为相关基础研究提供更多的实验数据.本实验台的最大旋转数达到了 2.0,这个范围在目前的公开文献更是罕见报导,尤其是大 Ro 下的流阻和换热数据.大旋转数的意义在于为航空发动机的内冷的设计提供更宽的优化范围,同时也可以为陆基的冷却结构提供参考.

ZHOU 等人在文献[17]中研究了光滑矩形截面 U 形通道的压力损失,其实验通道 R_a 比为 4:1, Re 工况为 70000,100000 和 150000.

图 8 为本文 Re 工况 70000 的实验结果与 ZHOU 等人^[17]的实验结果对比图.图中的 f_{14} 为整个通道进出口在各旋转数下的流阻系数, f_s 为静止时的流阻系数,图中纵坐标为两者比值 f_{14}/f_s .

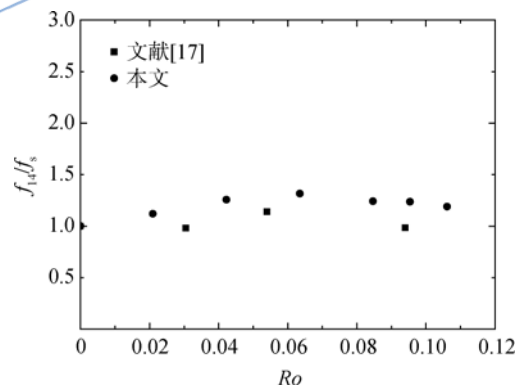


图 8 $Re=70000$ 工况实验结果与文献[17]实验结果的对比

Fig. 8 Experimental result of this paper compared with reference [17] when the Reynolds number is 70000

从图 8 中可以看到,两个通道的流阻系数动静比(R_a)有着相似的变化趋势.由于实验通道的 R_a 比以及水力直径不同,所以两个实验的流阻系数数值存在着差异,由 R_a 比引起的流阻系数的差异, Fu 等人在文献[18]中进行了实验研究. f_{14}/f_s 表征的是旋转对流阻系数的影响,虽然不同 R_a

比通道亦会产生差异,但是旋转造成的变化趋势大体是一致的。

通过与前人的实验结果对比,证明了本文实验数据的合理性,从而证明了本文所实现的多点高压旋转测压系统的可靠性。

3.2 部分实验结果分析

本文分别研究了 $Re=20\,000\sim 70\,000$,共8个雷诺数的冷态和热态工况下,旋转效应对通道流阻系数的影响.冷态工况下通道内加热模块未通电,实验在常温下进行;热态工况下通道内温比加热至0.17.具体实验工况参数如表1所示。

表1 旋转测压实验工况

Table 1 Experiment conditions of rotating pressure measurements

Re	冷态	热态
20 000	✓	✓
25 000	✓	✓
30 000	✓	✓
35 000	✓	✓
40 000	✓	✓
50 000	✓	✓
60 000	✓	✓
70 000	✓	✓

3.2.1 静止状态下流阻系数分布

图9为静止状态下各雷诺数工况的流阻系数.实验结果表明在低雷诺数时,流阻系数随着雷诺数的增加而增加,但是当雷诺数达到一定值时,流阻系数会出现减小趋势.冷态与热态实验均出现了这个现象,差别在于出现下降趋势的雷诺数值有所不同。

3.2.2 旋转效应对冷态及热态通道流阻系数的影响

图10为冷态实验及通道被加热到温度比为0.17时的部分雷诺数工况下的流阻系数动静比。

实验结果表明,冷态时旋转对流阻的影响较为明显,且不同雷诺数工况下的流阻系数动静比都较好的符合随着旋转数增大而增大的变化规律.当通道被加热到温度比为0.17时,流阻系数随旋转数的变化规律产生了变化,在较低旋转数工况下,流阻系数动静比随旋转数变化规律同冷态一样升高的不明显,但是在较高旋转数工况下,

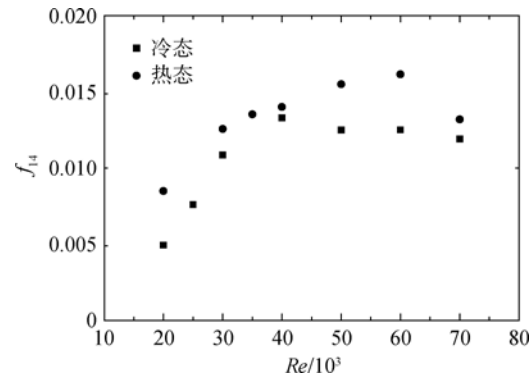


图9 静止状态下各雷诺数工况下的流阻系数
Fig. 9 Flow resistance coefficient at different Reynolds number

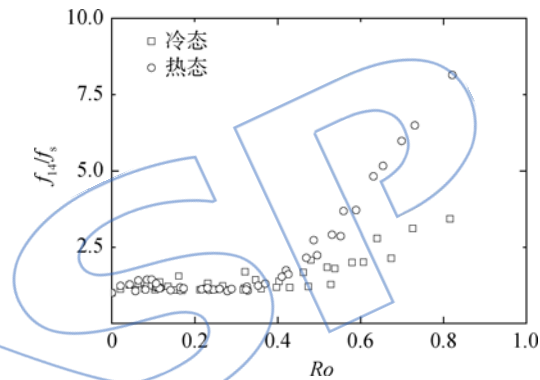


图10 旋转数对冷态及热态下各工况流阻系数的影响
Fig. 10 Relationship between flow resistance coefficient and Rotation number at different temperatures

其随旋转数增大而增大的幅度大幅增加。

4 结论

基于气路动静转换、保持高压实验系统等关键技术,本文设计了旋转测压系统.该旋转测压系统具有测量精度高、可靠性高、可拓展性好等优点。

实验系统成功实现了基于光滑方形截面U形通道的一系列验证实验,通过与国外研究机构的实验结果对比,证明了该实验技术的可靠性与优越性。

实验测量了 $Re=20\,000\sim 70\,000$, $Ro=0\sim 1.025$ 范围内,冷、热态下旋转对方形截面U形通道的流阻特性的影响。

静止时,通道流阻系数在低雷诺数工况下随着雷诺数的增加而增加,冷热工况均在雷诺数增大到某个值时出现了流阻系数随着雷诺数增大而减小的现象。

冷态时,旋转对流阻的影响较为明显,且不同雷诺数工况下的流阻系数动静比都较好的符合随

着旋转数增大而增大的变化规律. 而热态时, 在较低旋转数工况下, 流阻系数动静比随旋转数的变化规律同冷态一样升高的不明显, 但是在较高旋转数工况下, 其随旋转数增大而增大, 且幅度大幅增加.

综上所述, 本文实现并验证了旋转通道内流阻特性的测量实验, 为旋转测压提供了可靠的技术手段.

致谢:

本研究内容受到来自中国航空工业集团公司商用航空发动机有限责任公司的资助, 全体作者在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Liou T M, Chang S W, Hung J H, et al. High rotation number heat transfer of a 45 degrees rib-roughened rectangular duct with two channel orientations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50 (19/20): 4063-4078.
- [2] ZHOU Fuguo, Lagrone J, Acharya S. Internal cooling in 4 : 1 AR passages at high rotation numbers[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(12): 1666-1675.
- [3] Huh M, Jiang L, Han J C. Influence of channel orientation on heat transfer in a two-pass smooth and ribbed rectangular channel (AR = 2 : 1) under large rotation numbers [R]. ASME Paper GT2010-22190, 2010.
- [4] Chang V S W, Liou T M, Po Y. Coriolis and rotating buoyancy effect on detailed heat transfer distributions in a two-pass square channel roughened by 45° ribs at high rotation numbers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(7): 1349-1363.
- [5] Michael H, Liu Y H, Han J C. Effect of rib height on heat transfer in a two pass rectangular channel (AR = 1 : 4) with a sharp entrance at high rotation numbers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52 (19): 4635-4649.
- [6] Liou T M, Chang S W, Chen J S, et al. Influence of channel aspect ratio on heat transfer in rotating rectangular ducts with skewed ribs at high rotation numbers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(23): 5309-5322.
- [7] 王宝官, 王武, 吉洪湖. 模拟涡轮叶片内部冷却通道方管和收缩管换热的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 1997, 18 (5): 608-611.
WANG Baoguan, WANG Wu, JI Honghu. Experimental investigation of heat transfer simulation in the turbine blade with rotating square and taper tubes [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1997, 18(5): 608-611. (in Chinese)
- [8] 邓宏武, 陶智, 徐国强, 等. 旋转状态下有转角肋 U 形通道内换热实验研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41(1): 38-41.
DENG Hongwu, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. Experimental investigation on heat transfer within a rotating ribbed serpentine passage with stagger angles [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(1): 38-41. (in Chinese)
- [9] 邓宏武, 魏喆, 陶智, 等. 旋转状态下蛇形通道内流动与换热的机理研究 [J]. *航空学报*, 2005, 26(4): 411-416.
DENG Hongwu, WEI Zhe, TAO Zhi, et al. Study on mechanism of turbulent flow and heat transfer in rotating passages [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(4): 411-416. (in Chinese)
- [10] 刘传凯, 陶智, 丁水汀, 等. 旋转对光滑 U 形通道内换热的影响研究 [J]. *航空动力学报*, 2006, 21(3): 512-517.
LIU Chuankai, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Effect of rotation on heat transfer in a rotating U-shaped passage [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(3): 512-517. (in Chinese)
- [11] 刘传凯. 旋转回转通道内冷气流动与换热机理研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
LIU Chuankai. Study on fluid flow and heat transfer in rotating serpentine cooling channels [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [12] Huh M, Lei J, Liu Y H, et al. High rotation number effects on heat transfer in a rectangular (AR = 2 : 1) two-pass channel [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 133: 021001. 1-021001. 11.
- [13] Prabhu S V, Vedula R P. Pressure drop characteristics in a rotating smooth square channel with a sharp 180° bend [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 21 (4): 198-205.
- [14] 程俊华, 倪彬, 邓宏武, 等. 高旋转数通道换热实验技术及验证 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(8): 1817-1823.
CHEN Junhua, NI Bin, DENG Hongwu, et al. Experimental technique of heat transfer in rotating channels at high rotation numbers [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(8): 1817-1823. (in Chinese)
- [15] DENG Hongwu, QIU Lu, TAO Zhi. Heat transfer study in rotating smooth square U-duct at high rotation numbers [J]. *International Journal of Heat Transfer and Mass Transfer*, 2013, 66(11): 733-744.
- [16] QIU Lu, DENG Hongwu, SUN Jining, et al. Pressure drop and heat transfer in rotating smooth square U-duct under high rotation numbers [J]. *International Journal of Heat Transfer and Mass Transfer*, 2013, 66(6): 543-552.
- [17] ZHOU Fuguo, Lagrone J, Acharya S. Internal cooling in 4 : 1 AR passages at high rotation numbers [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(12): 1666-1675.
- [18] Fu W L, Wright L M, Han J C. Rotational buoyancy effects on heat transfer in five different aspect-ratio rectangular channels with smooth walls and 45 degree ribbed walls [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(11): 1130-1141.

(编辑: 叶 青)