

## 旋转状态下方形通道内部流场特性热线实验

魏 宽<sup>1</sup>, 陶 智<sup>1,2</sup>, 邓宏武<sup>1,2</sup>, 李海旺<sup>1,2</sup>

(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. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

**摘 要:** 为了解决旋转条件下热线技术应用问题并且在此基础上精确测量旋转方形通道内部流场特性, 搭建了用于旋转通道流场测试实验平台, 采用了两种连线方式对热线进行了标定实验, 获得了热线测量旋转通道内部平均速度的相对误差为 $\pm 6\%$ , 对雷诺数和旋转数范围分别是 $5000 \sim 10000$ 和 $0 \sim 0.222$ 的旋转通道流场进行了测量, 结果表明: 旋转导致速度型整体向后缘面( $Y/D = -0.5$ )偏转,  $X/D$ 和旋转数越大, 速度型偏转越明显; 旋转数为 $0.222$ 时, 后缘面附近边界层速度型出现了一个拐点, 可能与由哥氏力不稳定性引起的二次流有关。

**关 键 词:** 旋转通道; 热线; 接线方式; 标定误差; 平均速度

**中图分类号:** V231.1

**文献标志码:** A

## Hot wire test on the flow fields in a rotating square channel

WEI Kuan<sup>1</sup>, TAO Zhi<sup>1,2</sup>, DENG Hong-wu<sup>1,2</sup>, LI Hai-wang<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine  
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,  
Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China;  
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine,  
Beijing 100191, China)

**Abstract:** To apply the hot wire technique in rotation condition and accurately measure the flow fields in a rotating square channel, a rotating test rig was built. Two connection modes were applied in the hot wire calibration tests, and the relative error in measuring the averaged velocity was estimated to be  $\pm 6\%$ . The measurements were conducted in a rotating channel with the Reynolds number and rotation number varying in the range of  $5\,000 \sim 10\,000$ , and  $0 \sim 0.222$ , respectively. The results show that there is a shift of the velocity profile to the trailing side ( $Y/D = -0.5$ ), the drift of velocity profile increases with the bigger  $X/D$  and rotation number. When the rotation number is  $0.222$ , there is a velocity profile inflection point near the trailing side that likely is related to the secondary flow induced by Coriolis force instability.

**Key words:** rotating channel; hot wire; connection mode; calibration error; averaged velocity

随着现代航空燃气涡轮发动机的涡轮前温度不断提高, 涡轮叶片的冷却问题越来越受到普遍

关注。国内外针对涡轮叶片转子内部冷却通道的传热问题已经开展了大量的研究<sup>[1-3]</sup>。由于传热特

收稿日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51541605)

作者简介: 魏宽(1987—), 男, 湖南长沙人, 博士生, 主要从事涡轮叶片内冷通道流动与换热研究。

性大多数与流动特性耦合在一起进行变化,忽略流场信息而单纯研究传热特性将在很大程度上影响对传热特性的研究.为了更深入地理解旋转冷却通道的传热,有必要获得旋转状态下详细的通道流场信息.

自从 Johnston 等人<sup>[4]</sup>最早通过实验测量旋转通道内部流场,学者们已经采用多种实验技术对旋转通道流场进行测量,比如 PIV (particle image velocimetry), LDV (laser Doppler velocimeter), 热线等等.但是,PIV 和 LDV 测量旋转通道流场存在两个问题:一是由于这两种方法都采用了激光,因此在壁面附近都会存在激光反光,从而导致了壁面附近流场无法准确测量;二是由于 PIV 和 LDV 设备体积较大,不能跟随实验通道旋转,因此只能通过测量旋转通道内流体的绝对速度减去被测位置处的迁移速度算出流体的相对运动速度. Di Sante 等人<sup>[5]</sup>指出这种方式测量相对运动速度将会导致不确定度远远高于直接测量相对运动速度,尤其是测量边界层内相对速度较低的流动.由于热线测量不需要采用激光,而且可以直接测量相对运动速度,所以具有能够准确测量壁面附近流动以及准确测量旋转通道内相对运动速度的优点. Nakabayashi 和 Kitoh<sup>[6]</sup>采用热线测量了旋转状态下大高宽比矩形截面光滑直通道的湍流特征参数分布,并进行了分层分析. Macfarlane 和 Joubert<sup>[7]</sup>采用热线测量了旋转状态下矩形光滑直通道的边界层速度分布,他们分别测量了高宽比为 4, 2, 1 的矩形截面通道,并且选取了 4 个流向位置作为测量位置. Nickels 和 Joubert<sup>[8]</sup>对文献[7]中数据进行整理,修正了旋转通道边界层对数律.国内对旋转矩形截面通道的内部传热的研究已经开展得比较充分<sup>[9-11]</sup>,但相关的流场研究开展得比较少.吉洪湖等人<sup>[12-13]</sup>采用 LDV 方法测量了方形截面的旋转 U 形通道内的速度分布以及分离流的 2 阶相关分量.

本文采用热线测量旋转光滑通道内部流场,在测量旋转通道内部流场的同时,还解决了热线跟随通道旋转引起的技术问题,并且对旋转所引起的平均速度型偏斜进行了分析.

## 1 实验装置与测试技术

### 1.1 实验装置

图 1 为实验台结构示意图.实验气流是经过稳压罐 12 后的压缩空气,其流量由热式流量计

10 (FCI ST98 插入式)测量,经过旋转进气接头 7 之后实现静动转换.气流在进入实验段之前先经过蜂窝结构 3 破坏二次流,然后经过多层阻尼网 4 对气流进行整流并且降低来流湍流度.实验段 2 的入口截面中心半径为 187 mm,实验段长度为 250 mm,通道截面尺寸为 40 mm × 40 mm,如图 2 所示.

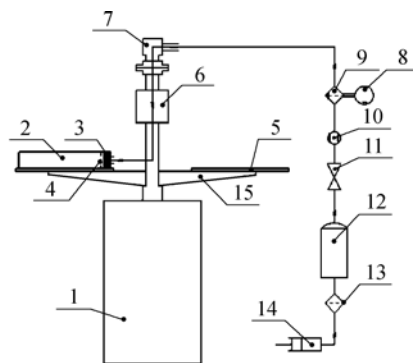


图 1 旋转实验台结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of rotating test rig

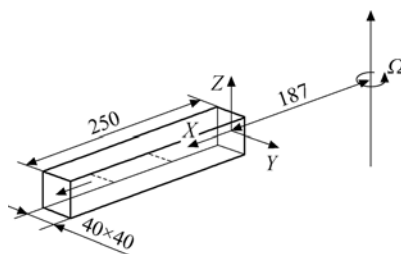


图 2 实验段几何结构图(单位:mm)  
Fig. 2 Geometry of the test section (unit:mm)

### 1.2 测试技术

实验采用了 Dantec 公司一维边界层热线探头,这种探头能够测到边界层内速度分布.探头丝径为 5  $\mu\text{m}$ ,丝长为 1.25 mm,热丝沿 Z 方向放置在展向中心线上(即  $Z=0\text{ mm}$  处).热线测量属于接触式测量,考虑到通道截面比较小,为了减小探头对流动的干扰,采用了带 90° 拐角的探头支架,将探头从下游伸入通道进行测量.热线探头随着实验段旋转,因此测试信号必须先通过导电滑环实现动静转换才能连到静止的热线电桥电路上,然后才能通过 A/D(analog/digital)转换传给计算机.探头在实验段内的移动通过位移机构实现,

位移机构能够精确地实现每次 0.1 mm 的位移。通过投影放大法测量探头与壁面之间的距离<sup>[14]</sup>, 利用探头在有机玻璃壁面上产生投影, 通过测量探头与其投影之间距离就能算出探头与壁面之间的距离。然而, 实际测量过程中探头与其投影之间的实际距离太小(0.1 mm), 直接测量十分困难。本实验中先采用数码相机与投影仪放大所测距离, 并且标定出放大倍数, 然后通过测量放大之后的距离, 就能算出实际距离。

## 2 误差分析

对旋转坐标系不可压缩流动 N-S(Navier-Stokes)方程进行无量纲化, 可以得到只有旋转数  $N_{ro}$  和雷诺数  $Re$  两个无量纲参数的无量纲方程。旋转数定义为  $N_{ro} = \Omega D / U_0$ , 雷诺数定义为  $Re = \rho U_0 D / \mu$ , 其中  $\Omega$  为转速,  $D$  为通道水力直径,  $U_0$  为通道截面平均速度,  $\rho$  为空气密度,  $\mu$  为空气动力黏度。旋转数和雷诺数的精确测量, 除了与来流空气物性以及通道几何尺寸有关之外, 还与质量流量以及转速的测量精度有关。质量流量由热式流量计(FCI ST98 插入式)测量, 相对误差为  $\pm 3.5\%$ 。转速通过光电转速表(深蓝 SB3-40A)测定, 绝对误差为  $\pm 1 \text{ r/min}$ , 相对误差为  $\pm 1\%$ 。

热线测量速度是通过所测电压对比在完全相同测试电路条件下的电压-速度标定曲线获得的。由于在本文中热线探头工作在旋转状态下, 因此, 严格来说必须将标定风洞和探头同时置于旋转状态下进行标定。但是, 由于旋转对标定风洞本身速度精确度会产生不良影响, 因此本文没有采用这种标定方式。本文采用了与真实的测量情况基本相同的测试电路(如图 3(a)所示)进行标定, 唯一的区别是在真实的测量情况下滑环旋转, 而标定时滑环静止。由于滑环在旋转状态下存在动态接触电阻, 而静止时没有, 这就导致标定电路与真实的测量电路并不完全相同。为了估算出引入动态接触电阻所导致的误差, 本文采用了如图 3(b)所示的连线方式对热线进行标定。之所以采用这种连线方式, 是因为这种连线方式可以在滑环旋转和静止两种情况下实现热线探头在静止端标定。这意味着只要对比如图 3(b)所示的连线方式进行滑环旋转和静止两种情况下的标定, 就可以估计出连线方式 b 中引入的动态接触电阻所导致的误差。由于在连线方式 b 中热线电路两次经过滑环, 而连线方式 a 中热线电路仅仅经过一次滑环, 所以针对于滑环动态接触电阻引起的误差, 连线

方式 b 大于连线方式 a。因此, 采用连线方式 b 替代连线方式 a 偏保守地估计由于旋转引入的误差是可行的。图 4 展示了不同标定通道速度( $U$ )、不同转速( $\Omega$ )条件下, 连线方式 b 在滑环静止和旋转条件下标定电压相对误差  $e_v$ 。其中

$$e_v = \left| \frac{E - E_0}{E_0} \right| \quad (1)$$

式中  $E_0$  是滑环静止条件下标定电压,  $E$  是滑环旋转条件下标定电压。从图 4 中可以看出, 在所有工况下标定误差均在  $\pm 5\%$  以内。

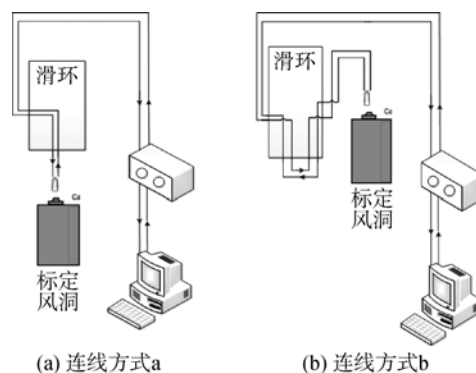


图 3 两种标定连线方式示意图

Fig. 3 Diagram of two connection modes

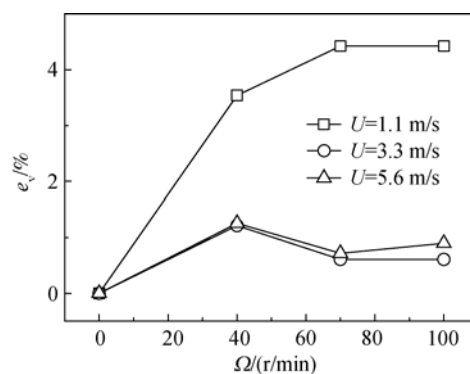


图 4 滑环旋转引起的标定误差

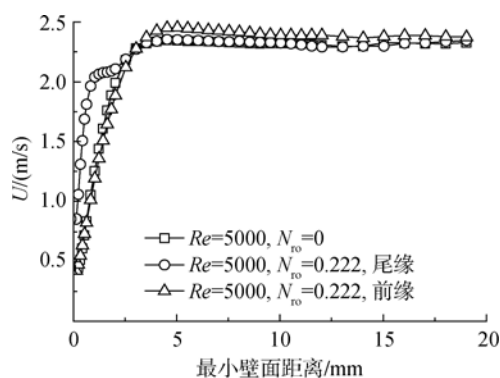
Fig. 4 Calibration error induced by the rotation of slipring

当然, 上述误差仅仅是热线标定误差, 除此之外, 热线测量还存在测量环境温度与标定环境温度不同引起的误差约为  $\pm 1\%$ 。因此, 热线测量误差约为  $\pm 6\%$ 。这一误差水平较之静止条件下采用热线测量通道内部平均流场的情况要大, 因此得到的湍流脉动数据由于误差太大而变得不可信。基于此, 下文中将仅仅讨论旋转通道内部平均流场。

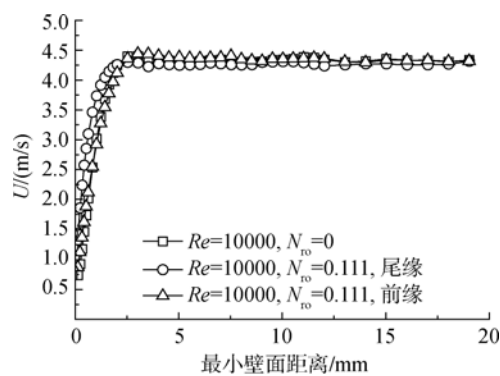
### 3 实验结果与分析

由于一维边界层探头安装方式决定了实验仅能测量  $Y=0\sim 20\text{ mm}$  范围内的速度分布. 因此, 静止条件下, 假定通道速度  $U$  分布对称; 旋转条件下, 先正转 ( $\Omega=100\text{ r/min}$ ) 测量前缘壁面速度分布, 然后反转 ( $\Omega=-100\text{ r/min}$ ) 测量后缘壁面速度分布<sup>[6-7]</sup>. 图5和图6分别给出了  $Z=0\text{ mm}$ ,  $X/D=2.5$  和  $X/D=4.5$  处 (如图2中虚线所示),  $Re=5000$  和  $Re=10000$  时, 转速  $\Omega$  为  $0\text{ r/min}$  和  $100\text{ r/min}$  (分别对应  $N_{ro}=0.222$  和  $N_{ro}=0.111$ ) 条件下的无量纲速度 ( $U/U_0$ ) 分布. 对于一维边界层探头而言,  $U=\sqrt{U_x^2+U_y^2}$ ,  $Y/D=0.5$  为前缘壁面,  $Y/D=-0.5$  为后缘壁面.

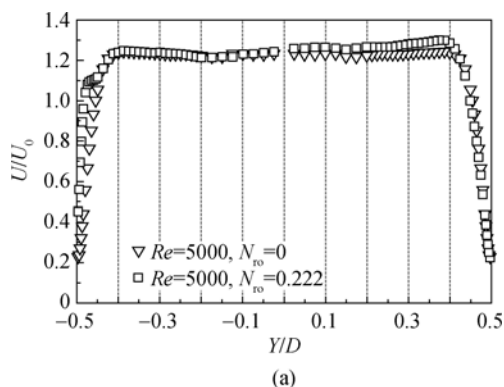
从图5和图6中可以看出,  $N_{ro}=0$  时中心区域速度分布比较平坦, 说明整流效果很好, 同时也说明流动还远没有充分发展. 对比通道静止时, 同一  $X/D$  位置处不同  $Re$  条件下边界层厚度, 可以看出  $Re=10000$  时对应的速度型边界层厚度小于  $Re=5000$  时对应的速度型边界层厚度, 说明  $Re$  增大时, 边界层厚度变薄. 对比通道静止时  $X/D=4.5$  和  $X/D=2.5$  处相同  $Re$  的速度型发现,  $X/D=4.5$  处中心主流的无量纲速度均大于  $X/D=2.5$  处对应的值, 同时边界层厚度也变厚了.



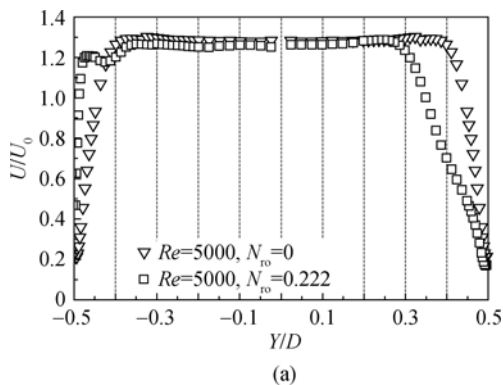
(c)



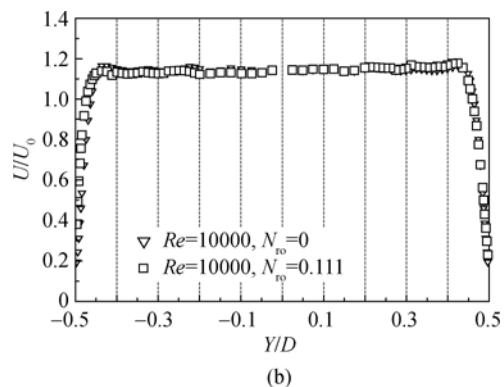
(d)

图5  $X/D=2.5$  处速度分布Fig. 5 Velocity profiles at  $X/D=2.5$ 

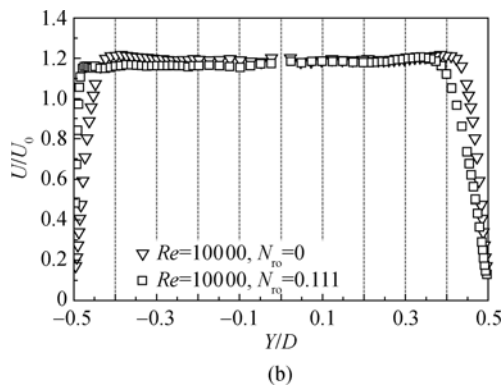
(a)



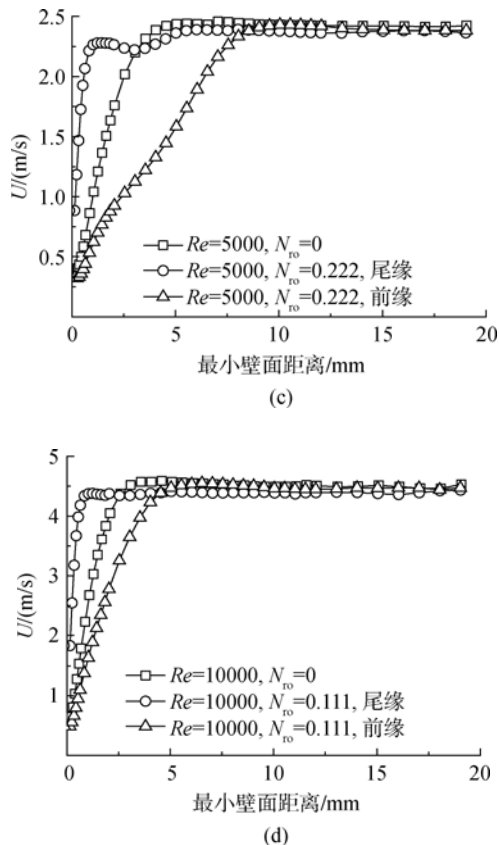
(b)



(b)



(b)

图 6  $X/D=4.5$  处速度分布Fig. 6 Velocity profiles at  $X/D=4.5$ 

显然,这些现象符合层流入口段速度型分布仅与  $X, Re$  有关且随  $X, Re$  减小边界层变薄的规律<sup>[15]</sup>.

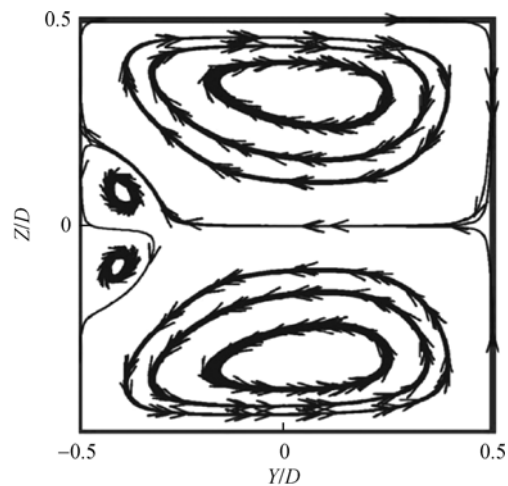
对比图 5 和图 6 中  $N_{ro} \neq 0$  时不同  $X/D$  的速度型,可以发现相比于  $X/D=2.5$  处旋转条件下的速度型,  $X/D=4.5$  处的速度型偏转更加显著,同时这种偏转随着  $N_{ro}$  的增大变得更加明显. 速度型偏转是因为存在由  $-Y$  方向哥氏力引起的  $-Y$  方向二次流速度. 然而,旋转通道二次流强度符合以下估计<sup>[16]</sup>:

$$\frac{U_Y}{U_X} \approx \left[ \frac{\Delta U_X}{2 U_X} \right] N_{ro} \frac{X}{D} \quad (2)$$

从上式可以看出,二次流速度强度随着  $X$  和  $N_{ro}$  的增加而增加.

图 5(a)和图 6(a)同时显示出在  $N_{ro}=0.222$  的工况下,后缘附近边界层速度型出现了一个拐点,而且随着流动从  $X/D=2.5$  向  $X/D=4.5$  处发展,这个拐点更加明显,说明这种现象沿流向在发展. 然而,这种现象在图 5(b)和图 6(b)中  $N_{ro}=0.111$  的工况下没有出现. Visscher 等人<sup>[17]</sup>提出对于三维的旋转方形通道流动,存在 3 种二次流:第 1 种是由于存在垂直于转轴的两个侧壁而引起

的大尺度二次流;第 2 种是由于存在哥氏力不稳定而引起的后缘附近的一系列的反转涡对;第 3 种是由方形截面引起的角涡. 其中,第 1 种二次流结构一直占据大部分的通道截面,第 3 种二次流结构对主流影响不大. 值得注意的是,哥氏力不稳定性一方面可以引起后缘面附近湍流强度增大,另一方面还可以改变后缘面附近的二次流涡系结构,从而改变通道内部稳态平均流场,这种二次流并非时刻存在,而且强度会随着  $N_{ro}$  发生变化. Kristoffersen 和 Andersson<sup>[18]</sup>通过直接数值模拟发现  $N_{ro}=0.2$  时,这种二次流的强度将会达到峰值. 因此猜想  $N_{ro}=0.222$  时,在后缘面附近出现的速度型拐点是由于 Visscher 等人<sup>[17]</sup>提到的第 2 种二次流引起的. 对于方形截面通道, Qin 和 Pletcher<sup>[19]</sup>采用数值计算得到了  $Re=500, N_{ro}=0.2$  时充分发展流动二次流,如图 7 所示. 显而易见,除了占据大部分通道截面的第 1 种涡系以外,后缘面(即图 7 中  $Y/D=-0.5$  处)附近存在一对小涡,这对小涡即是第 2 种二次流涡系. 在展向中心线上(即图 7 中  $Z/D=0$  处),由于这对小涡的存在,使得后缘面附近流动指向前缘面,从而导致了后缘面附近速度型局部亏损,也就是图 5、图 6 中展现的速度型拐点.

图 7 充分发展旋转方形截面通道二次流<sup>[19]</sup>Fig. 7 Fully developed secondary flow in a rotating square channel<sup>[19]</sup>

## 4 结 论

本文采用热线测量了径向出流旋转方形通道内部平均速度分布,同时还解决了热线跟随通道旋转引起的技术问题,并且对旋转所引起的平均速度型偏斜进行了分析. 通过分析实验结果,得到

了以下几点结论:

1) 采用热线测量径向出流旋转方形通道内部平均速度可以把相对误差控制在 $\pm 6\%$ 的范围内.

2) 旋转条件下,  $X/D$  和  $N_{ro}$  越大, 速度型偏转越大.

3)  $N_{ro}=0.222$  时, 后缘附近边界层速度型出现了一个拐点, 可能与由哥氏力不稳定性引起的二次流有关.

## 参考文献:

- [1] Yang W J, Zhang N, Chiou J. Local heat transfer in a rotating serpentine flow passage[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, 114(2): 354-361.
- [2] Han J C, Zhang Y M, Kalkuehler K. Uneven wall temperature effect on local heat transfer in a rotating two pass square channel with smooth wall[J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115(4): 912-920.
- [3] Parsons J A, Han J C, Zhang Y M. Effects of model orientation and wall heating condition on local heat transfer in a rotating two pass square channel with  $90^\circ$  rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(7): 1151-1159.
- [4] Johnston J P, Halleen R M, Lezius D K. Effect of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 56(3): 535-557.
- [5] Di Sante A, Theunissen R, van den Braembussche R A. A new facility for time-resolved PIV measurements in rotating channels[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44(2): 179-188.
- [6] Nakabayashi K, Kitoh O. Turbulence characteristics of two-dimensional channel flow with system rotation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 528: 355-377.
- [7] Macfarlane I, Joubert P N. Effects of secondary flows on developing, turbulent, rotating boundary layers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 17(1/2): 79-89.
- [8] Nickels T B, Joubert P N. The mean velocity profile of turbulent boundary layers with system rotation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 408: 323-345.
- [9] Deng H, Qiu L, Tao Z, et al. Heat transfer study in rotating smooth square U-duct at high rotation numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 733-744.
- [10] 赵曙, 朱惠人, 郭涛, 等. 旋转带肋回转通道流动换热数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 125-130.  
ZHAO Shu, ZHU Huiren, GUO Tao, et al. Numerical predictions of flow and heat transfer for rotating internal cooling channels with rib turbulators[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 125-130. (in Chinese)
- [11] 刘传凯, 陶智, 丁水汀, 等. 旋转光滑及带肋 U 形通道的局部换热特性[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 751-755.  
LIU Chuankai, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Local heat transfer in a rotating smooth and ribbed U-shaped channels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 751-755. (in Chinese)
- [12] 吉洪湖, Launder B E, Jackson D C. LDA 测量方截面 U 型旋转通道速度分布[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 261-264.  
JI Honghu, Launder B E, Jackson D C. Velocity measurement of rotating square U-bend duct with LDA[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 261-264. (in Chinese)
- [13] 吉洪湖, Launder B E, Jackson D C. 旋转方截面 U 型通道分离流二阶相关分量测量[J]. 推进技术, 2001, 22(4): 299-302.  
JI Honghu, Launder B E, Jackson D C. Double correlations measurement of turbulent separated flow through rotating square U-bend duct[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(4): 299-302. (in Chinese)
- [14] Nakabayashi K, Kitoh O. Low Reynolds number fully developed two-dimensional turbulent channel flow with system rotation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 315(1): 1-29.
- [15] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [16] Greitzer E M, Tan C S, Graf M B. Internal flow concepts and applications[M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [17] Visscher J, Andersson H, Barri M. A new set-up for PIV measurements in rotating turbulent duct flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011, 22(1): 71-80.
- [18] Kristoffersen R, Andersson H. Direct simulations of low-Reynolds-number turbulent flow in a rotating channel[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 256(1): 163-197.
- [19] Qin Z, Pletcher R H. The velocity field and instability of rotating duct flow[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(10): 363-371.

(编辑: 陈 越)