

高旋转数下带肋回转通道的换热特性

张 洪¹, 田淑青¹, 邓宏武², 李 洋²

(1. 中国航空工业集团公司

中航商用航空发动机有限责任公司 设计研发中心, 上海 201108;

2. 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)

摘 要: 为匹配真实发动机转子叶片的工作条件,将实验回转通道气体压力提高到 500 kPa 以上,使雷诺数和旋转数范围分别扩展到 10 000~70 000 和 0~2.08。在此基础上通过实验方法研究了高旋转数下带 45° 倾角斜肋的方形截面回转通道的换热特性。结果表明:回转通道的第 1 通道前缘面传热系数随旋转数的增大先减小,在达到临界旋转数后换热随旋转数增大而增强;低旋转数下,回转通道的第 2 通道前后缘面换热差异较小,随着旋转数的增大,前缘面换热始终强于后缘面,这种换热特性与光滑通道完全不同。

关 键 词: 雷诺数; 高旋转数; 斜肋; 回转通道; 换热特性

中图分类号: V235.1 **文献标志码:** A

Heat transfer characteristics in U-shaped rib-roughened channel at high rotation numbers

ZHANG Hong¹, TIAN Shu-qing¹, DENG Hong-wu², LI Yang²

(1. Research and Development Center,

Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 201108, China;

2. 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)

Abstract: To match the rotor blade of real engine operating condition, the Reynolds and rotation number range of current experiment were expanded from 10 000 to 70 000 and 0 to 2.08 by increasing the pressure of the air in the U-shaped channel to 500 kPa. Experiments were conducted to investigate the heat transfer characteristics in a square U-shaped channel with inclined 45 deg ribs. Results indicated that, in the first passage of the U-shaped channel, heat transfer coefficient of leading wall firstly decreased with the increase of the rotation number, then increased with the rotation number after reaching a critical value; in the second passage of the U-shaped channel, the difference of heat transfer coefficient between leading and trailing walls was not obvious at low rotation number, but kept increasing with the rotation number to a higher level; the heat transfer of leading wall behaved better than trailing wall, which was totally different from that of a smooth channel.

Key words: Reynolds number; high rotation number; inclined rib; U-shaped channel; heat transfer characteristics

现代航空发动机涡轮前温度不断提升,涡轮叶片的工作环境十分恶劣,其冷却结构的优化设计尤为为重要.带肋回转通道是应用于涡轮转子叶片中的一种常见冷却结构,与其他相同条件下的静止部件不同,高速旋转叶片内部流动特征存在明显差异,其换热机理和表现形态也有别于静止状态,因此开展旋转状态下带肋回转通道的流动和换热特性的研究十分必要.围绕这一课题,很多国内外专家学者设计了大量的实验对其开展研究^[1-6],但他们的实验设计思路大多为调节通过实验通道的气体质量流量(下文简称流量)或实验台自身的旋转速度,从而实验旋转数较低,实验条件无法完全覆盖真实发动机的工作状态.随着实验技术的发展,国外逐步发展出了通过提高通道中气体压力的方法来实现高旋转数下通道内换热特性的实验测量^[7-10].然而,国内科研工作者虽也开展了一些旋转通道换热特性实验,但实验参数范围小,实验旋转数低^[11-14],研究结果难以直接应用到工程设计当中.众所周知,真实发动机工作状态下,涡轮叶片内冷通道的雷诺数约为 50 000,旋转数达到 0.25,本文实现了完全覆盖真实发动机工

作参数的旋转通道换热特性实验测量^[15],在前期完成的光滑回转通道换热研究^[16-17]基础上,开展了高旋转数(最高可达 2.08)下带肋回转通道换热特性的实验研究工作,实验结果有助于深入了解真实转子叶片内冷通道的换热规律,为其优化设计提供指导.

1 实验设备及模型

1.1 旋转实验台

本实验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换热实验台上完成.实验台主要模块由供气系统、动力系统、实验模块和测试系统组成(见图 1).冷气由高压气源提供,冷气流量由热式流量计实时调节并采集,通道内的气体压力可以通过调节背压阀保持在 500 kPa 以上;实验台由一台大功率电动机带动,其旋转速度可通过程序控制;实验段由直流稳压电源加热,其温度数据经数据采集模块采集并传输至计算机中进行分析处理,实验段各个位置的压力通过多路选通旋转压力测量系统进行测量.

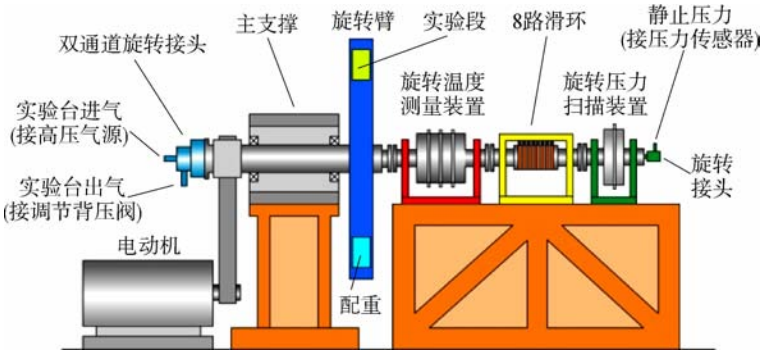


图 1 旋转实验台主要模块
Fig. 1 Configuration of the rotating facility

1.2 实验件几何模型

实验测试通道为方形 U 型通道,如图 2 所示,图中 P 为扰流肋间距.回转通道的前后缘面分别交错排布有 8 个 45° 角的倾斜肋片,内外侧面和转弯段均为光滑壁面.回转通道的水力直径为 24 mm,通道的平均旋转半径与水力直径的比值为 18.75,斜肋高度与通道水力直径之比为 0.1,扰流肋间距与斜肋高度之比为 9.58.

实验段由铜块、电加热膜和绝热板等组成.实验件由贴附在其背面的电阻丝加热膜进行加温,通过调节供电电源的电压来调整电加热膜的加热

功率.实验中除了铜块与通道内气体的换热之外,还存在向周围环境的热损失.为保证实验精度,需对这部分热损失进行定量测量.测量实验在气体流量为零,通道塞满绝热石棉的条件下开展,通过调节加热功率和实验台的转速,得到不同实验状态下实验段向环境的的热损失,并将所处理得到的热损失系数用于修正后续实验测量所得的数据.

2 数据处理和实验误差分析

本实验的数据处理方法如下:
局部传热系数定义为

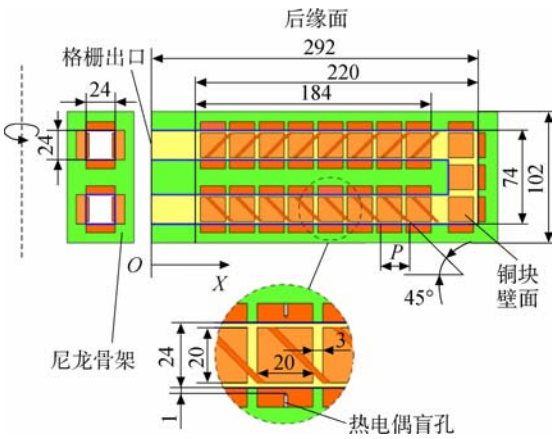


图 2 实验模型尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of experiment model (unit:mm)

$$h = \frac{Q_{\text{net}}}{A_{\text{cu}}(T_w - T_b)} \quad (1)$$

其中 Q_{net} 为铜块与通道内气体之间的换热量,该换热量由铜块所在测点位置的总加热量减去估算的铜块向周围环境的热损失得到; A_{cu} 为铜块与气体之间的换热面积; T_w 为铜块与气体接触壁面的温度; T_b 为当地主流的平均温度。

当地主流平均温度的定义为

$$T_b = T_o + \frac{\sum Q_{\text{net}}}{\frac{1}{2}mc_p} \quad (2)$$

其中 T_o 为气体的进口总温; $\sum Q_{\text{net}}$ 为进口位置到测试点之间的总加热量; m 为通道中的气体流量; c_p 为气体的比定压热容。

本实验保证了几何相似,实验状态下通道中气体的普朗特数 Pr 基本不变,旋转通道内当地努塞尔数 Nu_1 数可表示为

$$Nu_1 = f(Re, R_o, B_o, \frac{x}{D_h}) \quad (3)$$

其中 $Nu_1 = h \cdot D_h / \lambda$; 雷诺数 $Re = \rho_o \cdot V_o \cdot D_h / \mu$; 旋转数 $R_o = \omega \cdot D_h / V_o$; 浮力数 $B_o = (\Delta\rho / \rho_b) R_o^2 \cdot (R / D_h)$ 。

沿程无量纲位置 X/D_h 是实验段开始沿流动方向到测试点的距离 X 与通道水力直径 D_h 的比值; $\rho_o, \rho_b, V_o, \lambda$ 和 μ 分别为进口气体的密度、测点处主流气体密度、速度、热导率和动力黏度; ω 为旋转速度;密度比 $\Delta\rho / \rho_b = (T_w - T_b) / T_w$; R 为换热面径向位置。

对于旋转通道换热实验数据的处理,一般把实验所得的 Nu_1 与具有相同水力直径的静止状态下光滑圆管充分发展湍流的平均努塞尔数 Nu_o 进行比较,即

$$\frac{Nu_1}{Nu_o} = \frac{hD_h/\lambda}{0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}} \quad (4)$$

或者是通过将旋转状态下的 Nu_1 与其他实验参数相同的静止状态下的努塞尔数 Nu_s 之比 Nu_1/Nu_s 进行比较。

通过对实验误差进行分析后可得:不同实验测试条件下通道气体雷诺数的相对误差范围为 $-2.6\% \sim 2.6\%$,实验段旋转数相对误差范围为 $-3.33\% \sim 3.33\%$ 。在不同实验条件下,不同通道位置处当地努塞尔数相对误差有较明显的差异,在静止通道高实验雷诺数($Re=70\,000$)下通道当地努塞尔数相对误差范围为 $-3\% \sim 3\%$;而在高转速($n=1000\text{r/min}$)和低雷诺数($Re=10\,000$)条件下,除了通道进出口位置及转弯段的当地努塞尔数相对误差较大($-20\% \sim 20\%$)外,通道当地努塞尔数的相对误差范围为 $-10\% \sim 10\%$,而高实验雷诺数($Re=70\,000$)下旋转通道的平均努塞尔数最大相对误差为 5% 。

3 实验结果及结果分析

实验通道由 3 部分组成:第 1 部分为径向出流通道(第 1 通道, $X/D_h=3.5 \sim 10.5$)、第 2 部分为 U 型通道的转弯段($X/D_h=11.5 \sim 13.5$)、第 2 部分为径向入流通道(第 2 通道, $X/D_h=14.5 \sim 21.5$)。通道取向角为 0° ,即通道中心平面与转轴平行。本实验的雷诺数范围为 $10\,000 \sim 70\,000$,通道转速为 $0 \sim 1000\text{r/min}$,实验通道的进口压力大于 500kPa ,使得实验旋转数范围扩大至 $0 \sim 2.08$ 。

3.1 旋转条件下换热沿程分布规律

图 3 给出了旋转状态下 3 个不同通道转速下($n=200, 600, 1000\text{r/min}$),雷诺数分别为 $10\,000, 30\,000$ 和 $60\,000$ 时,带 45° 交错排列斜肋 U 形通道局部 Nu/Nu_o 的沿程分布,图注中第 1 组数为雷诺数,第 2 组数为旋转数,第 3 组数代表的是换热面位置(T 代表通道后缘面, L 代表通道前缘面, O 代表通道外侧面, I 代表通道内侧面)。

在第 1 通道中,受旋转产生的哥氏力影响,后缘面的沿程局部努塞尔数大于前缘面,且该差异随着旋转数的增大而增大。在 $Re=10\,000$ 时,从换热趋势上看,后缘面的沿程局部努塞尔数沿程先降低,经过一个临界拐点后再增大,且换热强度的临界拐点位置随着旋转数的增大而向通道入口移动。在第 1 通道中,肋片的导流方向朝外侧面,因此外侧面的换热比内侧面更强,且这种差异在高旋转数状态下更加明显。同时,在高旋转数下,

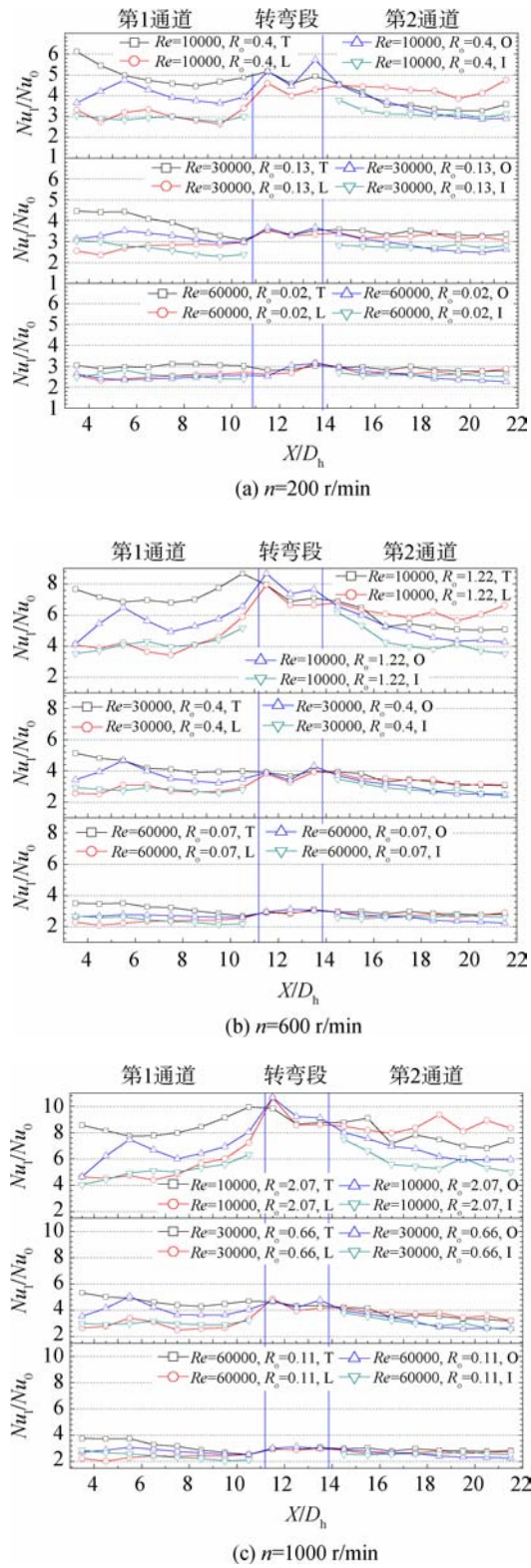


图 3 不同通道转速下 Nu_1/Nu_0 的沿程分布
Fig. 3 Nu_1/Nu_0 distribution with different channel speeds

外侧面的局部点 X/D_h 位置也出现了换热大幅增强的情况(如 $Ro > 0.4$ 时, $X/D_h = 5.5$ 处)。

在第 2 通道中,受弯道效应的影响,低旋转数下前后缘面的换热强度差异很小,内外侧面的换

热强度差异也很小.但是在高旋转数状态下,前缘面的沿程局部努塞尔数比后缘面大,其原因主要是旋转产生的哥氏力与浮升力交互作用的影响超过了弯道效应,并对回转通道的沿程换热起了更加主导的作用.在高旋转数状态下的前缘面换热分布中,也出现了平行肋常见的波浪形换热特性.

3.2 旋转数对通道换热的影响

前期的大量实验结果表明:在较大的旋转数范围($0 \sim 2.08$),不同实验雷诺数条件下($10\,000 \sim 70\,000$)通道的传热系数之比(文中用 Nu_1/Nu_s 表示)随 Ro 的变化关系与实验雷诺数无关^[15],为验证这一结论是否适用于带肋旋转通道,分析了相关实验数据,比较了 3 种不同旋转数(分别为 $0.4, 0.8, 1.0$),不同雷诺数条件下通道沿程 Nu_1/Nu_s 的变化趋势,如图 4 所示.图注中第 1 组数为雷诺数,第 2 组数为旋转数,第 3 组数代表的是换热面位置(T 代表通道后缘面,L 代表通道前缘面).分析结果显示:带肋旋转通道的 Nu_1/Nu_s 值随旋转数的变化趋势同样与雷诺数无关.这一结论使得后续的研究工作可以将雷诺数的影响从旋转通道局部换热特性中分离出来.下面将分别介绍雷诺数为 $20\,000$ 条件下,回转通道各面沿程位置在不同旋转数范围内的换热特性.

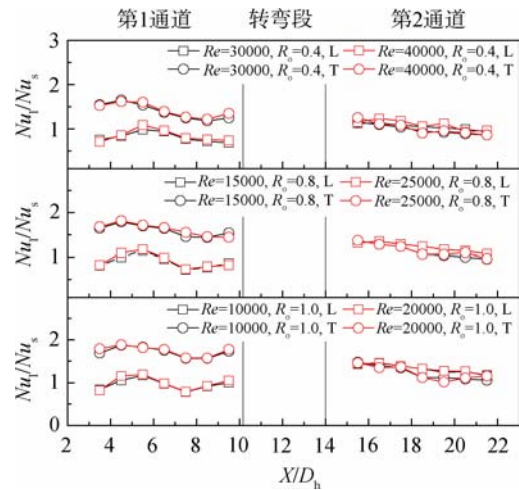


图 4 Ro 一致时 Re 对沿程 Nu_1/Nu_s 的影响
Fig. 4 Effect of Re to Nu_1/Nu_s at the same rotation number

3.2.1 第 1 通道

1) 前后缘面

如图 5 所示,在高旋转数下,第 1 通道后缘面各测量位置的 Nu_1/Nu_s 随旋转数的提高单调增大,这与低旋转数条件下的变化趋势基本一致.哥

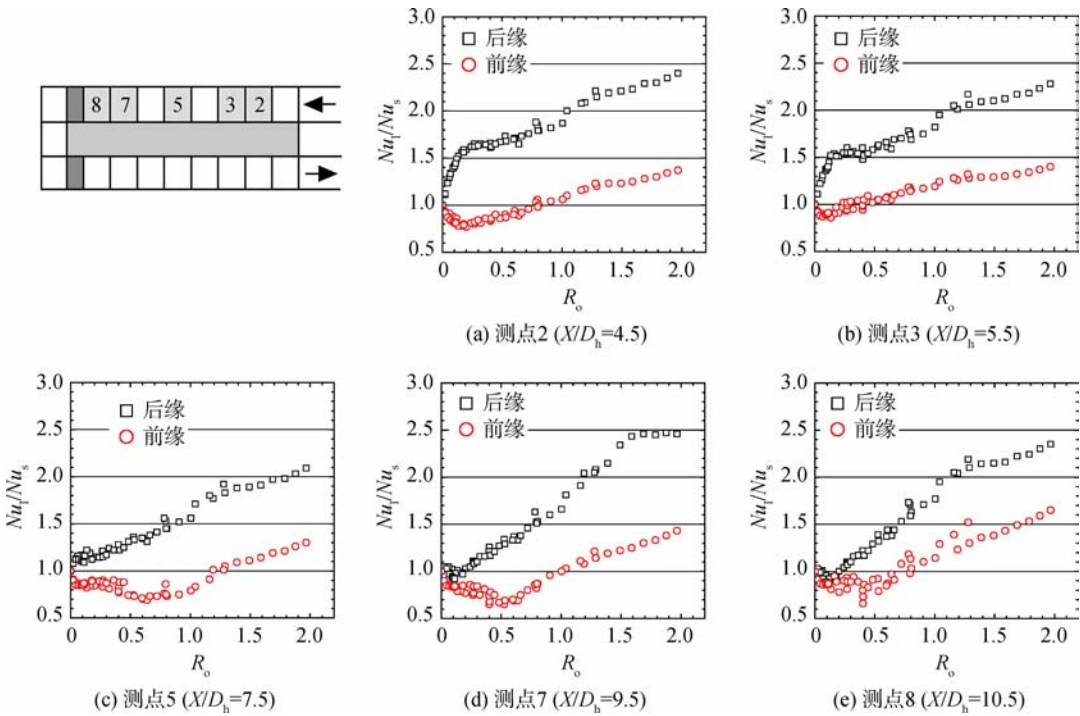


图 5 R_o 对第 1 通道不同沿程位置处前后缘 Nu_l/Nu_s 的影响

Fig. 5 Effect of rotation number on Nu_l/Nu_s of leading wall and trailing wall in the first channel

氏力的作用对第 1 通道后缘面换热的影响随旋转数增大而增强. 具体来看, 在低旋转数下, 第 1 通道的后半段($X/D_h=9.5\sim10.5$, 即点 7~点 8)的换热先随着旋转数增大而小幅减弱, 经过一个最低点之后再单调上升.

旋转效应对于前缘面的影响要比后缘面复杂: 对于低旋转数实验, 通道前缘面各测点位置的 Nu_l/Nu_s 随旋转数的提高而减小; 但当调节至某个旋转数之后, Nu_l/Nu_s 随旋转数的提高而增大. Dutta 等^[18] 对该现象的解释是: 旋转状态下, 对于径向出流通道, 在哥氏力的作用下主流向后缘面偏移, 导致前缘面的换热减弱, 浮升力对前缘面附近流动的影响作用更加明显; 当浮升力增大到一定值时前缘面附近发生流动分离, 前缘面换热增强. 与光滑通道中临界转速值随沿程位置变化呈现简单反比例关系^[16] 不同的是, 旋转带肋通道中的临界旋转数的变化分为两段: 在前面两个点($X/D_h=4.5\sim5.5$, 即点 2、点 3), 临界旋转数随着 X/D_h 的增大而减小且接近于 0; 在后面 3 个点($X/D_h=7.5\sim10.5$, 即点 5~点 8), 临界旋转数 $R_{o,c}$ 又从一个较大的旋转数($R_{o,c}\approx0.7$)开始减小, 减小至 0.4 左右. 这种分段临界旋转数现象也是带肋通道与光滑通道前缘面换热规律差异所在.

2) 内外侧面

在第 1 通道中, 肋片的导流是朝着外侧面的,

因此外侧面在换热上比内侧面更强. 外侧面换热保持了随着旋转数增大而单调上升的趋势, 且最强换热出现在 $X/D_h=5.5$ 处(即测点 3), 如图 6 所示. 内外侧面的传热在沿程位置基本上可以分为两段: 前半段换热分布各点差异较大, 后半段各点差异小. 内侧面传热系数随着旋转数的增大先小幅下降, 在达到一个换热拐点之后再单调上升. 内侧面换热分布在大旋转数下各点的换热差异逐渐增大, 最强换热点出现在第一流程的最后一个点 $X/D_h=10.5$ 位置(即点 8).

外侧面与内侧面的换热差异同样随着 X/D_h 位置的变化而发生变化. 沿着流动方向, 外侧面与内侧面的换热差异增大, 且在 $X/D_h=5.5$ 处达到最大, 随后两者差异减小, 但外侧面换热始终比内侧面强.

3. 2. 2 第 2 通道

1) 前后缘面

在第 2 通道(径向入流通道)中, 哥氏力方向与第 1 通道相反, 主流的偏移使前缘面换热强于后缘面. 图 7 所示为不同实验工况下第 2 通道各测点位置前后缘面的 Nu_l/Nu_s 与旋转数之间的关系. 从图中可以看出, 低旋转数下($R_o<0.8$)第 2 通道的前后缘面换热差异较小, 除了第 2 通道的上游, 前后缘面的 Nu_l/Nu_s 均接近 1. 随着旋转数增大, 前缘面换热强于后缘面, 且这种现象在

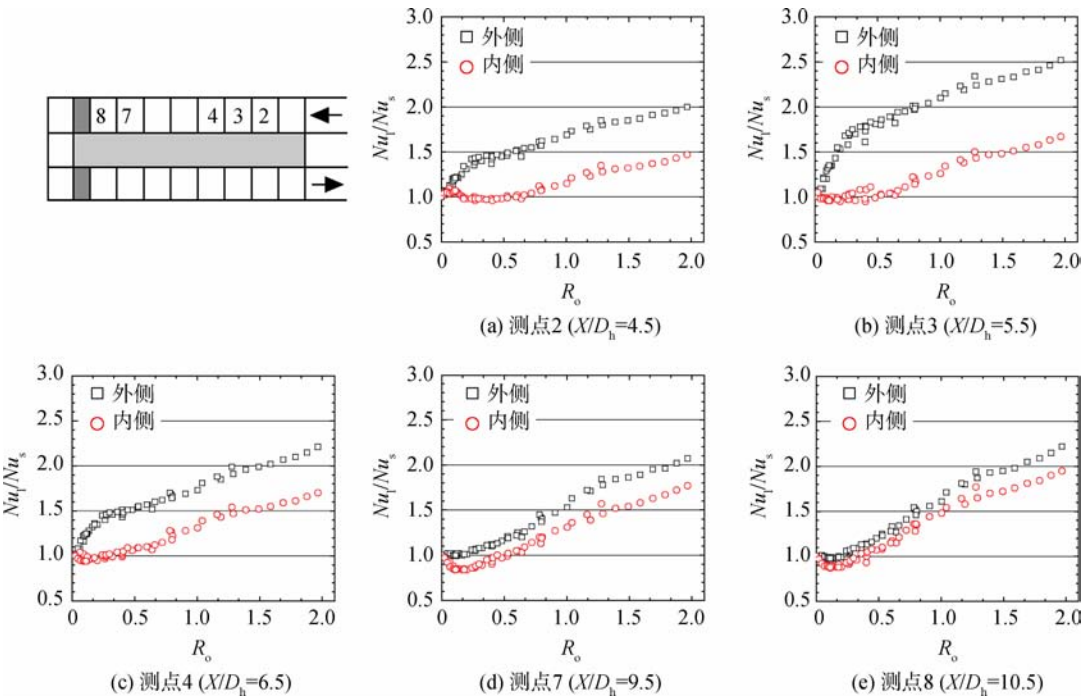


图 6 R_o 对第 1 通道不同沿程位置处内外侧面 Nu_t/Nu_s 的影响

Fig. 6 Effect of rotation number on Nu_t/Nu_s of inner wall and outer wall in the first channel

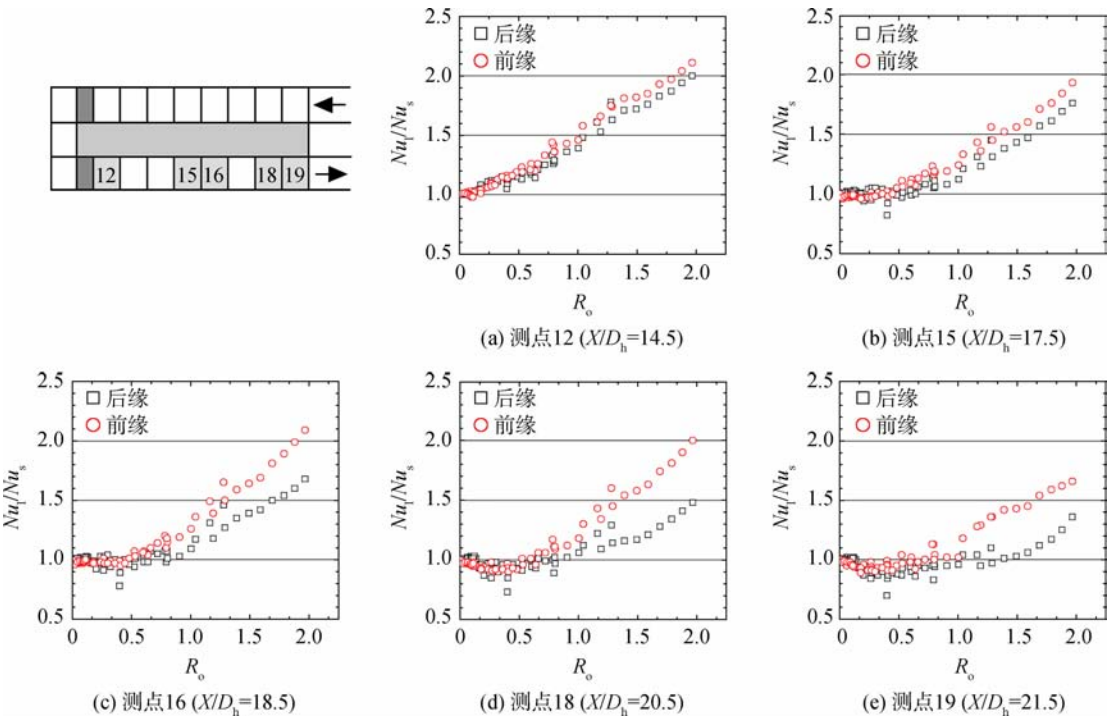


图 7 R_o 对第 2 通道不同沿程位置处前后缘面 Nu_t/Nu_s 的影响

Fig. 7 Effect of rotation number on Nu_t/Nu_s of leading wall and trailing wall in the second channel

第 2 通道的下游更加明显,这与光滑通道中的现象^[16]完全不同。由此可知,带肋通道对于边界层流动的破坏效果很明显,同时形成了新的更加复杂的换热形式。

由实验结果可分析得出以下结论:转弯段位置的弯道效应对第 2 通道上游区域的影响作用较旋转的影响更强,从而提高旋转数对前后缘面换热同步增强。而在第 2 通道下游弯道效应的影响

减弱,高旋转数实验条件下哥氏力作用造成主流的偏移,使得前缘面换热强于后缘面。

2) 内外侧面

图 8 给出了第 2 通道沿程位置内外侧面的 Nu_1/Nu_s 与 R_o 的关系。从图中可以看出,与前后缘面相似,第 2 通道的内外侧面换热在低旋转数下 Nu_1/Nu_s 接近 1,随着旋转数增大而一致单调增强,且随无量纲位置的增大同步减小。随着旋转数的增大,外侧面换热强于内侧面,且两个面之间的换热差异逐渐增大。与光滑通道中的换热规律不同的是,带斜肋的通道内侧面换热在大旋转数

下与外侧面的换热差异相对较小。

3.2.3 通道转弯段

在 U 型通道的转弯段,气体流动方向与旋转中心线平行,哥氏力对其流场的影响较弱,转弯段引起的二次流动是决定换热的主要因素。图 9 所示为 U 型通道转弯段前后缘面不同位置处的 Nu_1/Nu_s 与旋转数 R_o 的关系。从图中可看出,通道转弯段前后缘面各处换热随旋转数的增大而增强,且前后缘面几乎没有换热差异;同一旋转数下,转弯段沿流向的 Nu_1/Nu_s 逐渐减少,且第 2 个转角处相对较小。

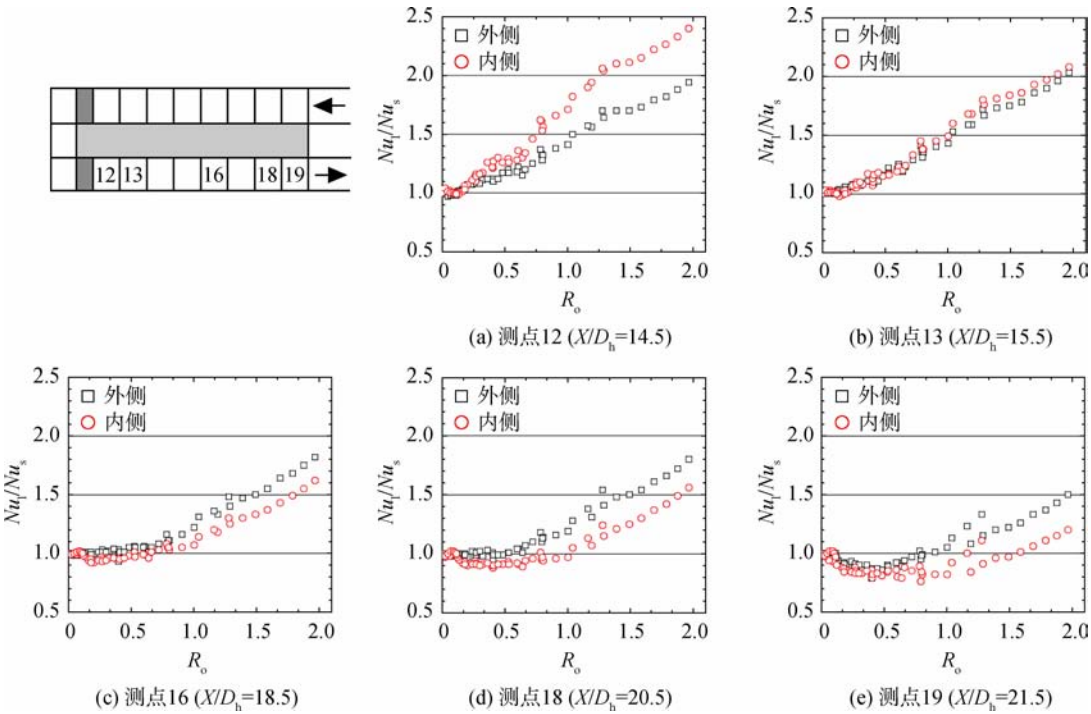


图 8 R_o 对第 2 通道不同沿程位置处内外侧面 Nu_1/Nu_s 的影响

Fig. 8 Effect of rotation number on Nu_1/Nu_s of inner wall and outer wall in the second channel

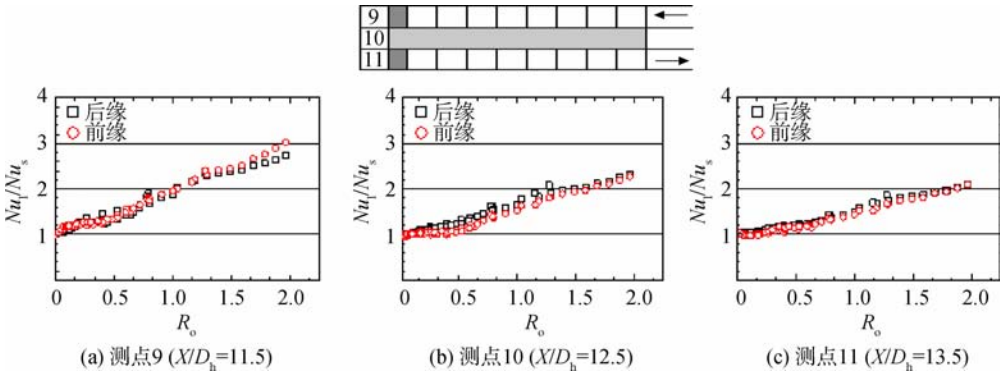


图 9 R_o 对转弯段前后缘局部 Nu_1/Nu_s 的影响

Fig. 9 Effect of rotation number on local Nu_1/Nu_s of leading wall and trailing wall in the turning sections

如图 10 所示,通道转弯段外侧面的 Nu_1/Nu_s 随着 R_o 的提高而增大,尤其转弯段前半段的 Nu_1/Nu_s 随 R_o 的变化趋势更为明显;在低旋转次数($R_o < 0.25$)实验条件下通道转弯段下游点 11 处($X/D_h = 13.5$)的顶面(图中用 o 表示)和外侧面(图中用 up 表示) Nu_1/Nu_s 随着 R_o 的提高缓慢增大,而高旋转数实验条件下该位置顶面的 Nu_1/Nu_s 随 R_o 的增大迅速增大,而该处外侧面的 Nu_1/Nu_s 随 R_o 的变化趋势则较缓慢.其原因可能是通道转弯段前半段受第 1 通道流体冲击作用的影响,该效应随旋转数的增大而增强,而转弯段下游则主要受弯道效应的影响.

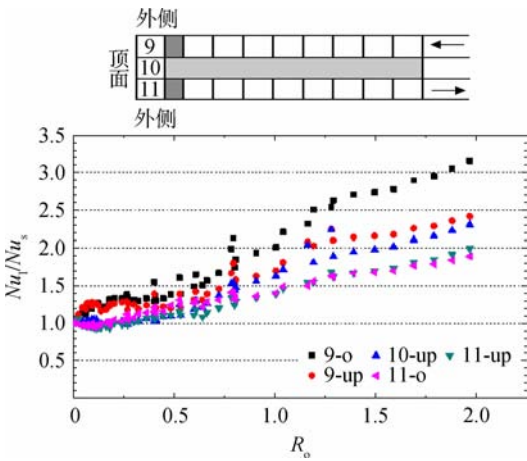


图 10 旋转数对转弯段外侧局部 Nu_1/Nu_s 的影响
Fig. 10 Effect of rotation number on local Nu_1/Nu_s of outer wall in the turning section

4 结 论

本文通过实验手段研究了高旋转数条件下带 45°角斜肋方形 U 型通道的换热特性,获取了高旋转数实验状态下带肋回转通道换热特性.本文主要结论如下:

- 1) 高旋转数下通道各换热面沿程换热强度的差异增大,局部位置换热大幅增强.
- 2) 随着旋转数增大,第 1 通道后缘面局部换热单调增加;前缘面局部换热先下降,经过一个临界旋转数后再上升,但临界旋转数与沿程位置 X/D_h 的关系不再是简单的反比例关系,而是分段反比例关系.
- 3) 第 1 通道内外侧面换热差异在通道的前半段较大,在后半段减小.
- 4) 低旋转数状态下,第 2 通道前后缘面换热差异较小,随着旋转数增大,前缘面换热强于后缘

- 面,这与光滑通道中的换热规律完全不同.
- 5) U 型通道转弯段的弯道效应对第 2 通道上游换热的影响占主导地位,旋转效应的影响次之,因此提高旋转数仅使得前后缘面换热同步增强.而在第 2 通道下游弯道效应的影响减弱,低旋转数实验条件下哥氏力的作用导致主流偏移,减弱了后缘面换热,增强了前缘面的换热.
 - 6) 第 2 通道的内外侧面换热随着旋转数增大而一致单调增强,且随无量纲位置的增大同步减小.随着旋转数的增大,外侧面换热强于内侧面,且两个面之间的换热差异逐渐增大.
 - 7) 通道转弯段的中上游区域内的换热受第 1 通道流体的冲击作用影响,该作用随旋转数的增大而增强,而转弯段下游则主要受弯道效应的影响,受旋转效应的影响不明显.

参考文献:

[1] Wanger J H, Johnson B V, Kopper F C. Heat transfer in rotating serpentine passage with smooth walls[R]. ASME Paper 90-GT-331, 1990.

[2] Wagner J H, Johnson B V, Hajek T J. Heat transfer in rotating passages with smooth walls and radial outward flow[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(1): 42-51.

[3] 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.

[4] Han J C, Zhang Y M. Effect of uneven wall temperature on local heat transfer in a rotating square channel with smooth walls and radial outward flow[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, 114(4): 850-858.

[5] 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 walls[J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115(4): 912-920.

[6] Hwang G J, Kuo C R. Experimental studies and correlations of convective heat transfer in a radically rotating serpentine passage[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119(3): 460-466.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Huh M, JIANG Lei, 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.

[10] Chang S W, Liou T M, Liou P 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(7/8): 1349-1363.

[11] 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)

[12] 邓宏武, 陶智, 徐国强, 等. 旋转状态下有转角带肋 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)

[13] 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)

[14] 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)

[15] 程俊华, 倪彬, 邓宏武, 等. 高旋转数内冷通道换热实验技术及验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(8): 1817-1823.

CHENG Junhua, NI Bing, DENG Hongwu, et al. Experimental technique and its validation for heat transfer in cooling channels at high rotation numbers[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(8): 1817-1823. (in Chinese)

[16] Deng H W, Qiu L, Tao Z, et al. 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.

[17] Qiu L, Deng H W, Sun J N, 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.

[18] Dutta S, Andrews M J, Han J C. Prediction of turbulent heat transfer in rotating smooth square ducts[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(12): 2505-2514.

(编辑: 王碧琚)