

高旋转数下45°斜肋回转通道平均换热特性研究^{*}

陈 豪^{1,2}, 邓宏武^{1,2}, 李 洋^{1,2}, 田淑青³

(1. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室/能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中航商用航空发动机有限责任公司 设计研发中心, 上海 201108)

摘要: 为了更加深入地研究涡轮叶片回转通道的换热特性, 研究了高旋转数下带45°斜肋回转通道的平均换热特性。在通道进口雷诺数从10000~70000, 旋转数从0~2.07的范围内, 实验研究了旋转状态下, 方形截面带45°斜肋U型通道径向出流与径向入流两个流程四个侧面在0°, 22.5°和45°三个安装角下的平均换热系数。研究结果表明: 45°斜肋增强了通道换热, 减弱了旋转对换热的影响; 由于浮升力作用在肋间二次流上, 导致通道内外侧出现临界回流现象; 转角减弱了第一通道旋转对换热的影响, 增强了第二通道旋转对换热的影响, 其影响在低旋转数下并不显著, 在高旋转数下开始变得明显。

关键词: 旋转换热; 内冷通道; 高旋转数; 高雷诺数; 转角

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 09-1339-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.09.009

Heat Transfer in Rotating Two-Pass Square Duct with 45° Ribbed Walls under High Rotation Numbers

CHEN Hao^{1,2}, DENG Hong-wu^{1,2}, LI Yang^{1,2}, 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. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. R&D center, AVIC Commercial Aircraft Engine Corporation Ltd, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to get a more in-depth investigation of the heat transfer characteristics of the rotating channels, a new investigation of the average heat transfer characteristics of the rotating two-pass channel with 45° ribs was implemented. The Reynolds and Rotation numbers ranged from 10000 to 70000 and 0 to 2.07 respectively. Three different channel angles (0°, 22.5°, 45°) were selected to study the effects of channel orientation on average heat transfer of the four sides on the two-pass U channel. The results show that the 45° ribs enhance the heat transfer while weakening the effects of rotation on heat transfer. The angled rib induced secondary flow which touched off a critical inverse flow on outer and inter face caused a critical heat transfer phenomenon. The orientation enhanced the heat transfer in the first-pass and weakened it in the second pass. The effect of the orientation is not notable in the low Rotation numbers while becoming stronger in the high Rotation numbers.

Key words: Rotating heat transfer; Cooling channel; High rotation number; High reynolds number; Orientation

^{*} 收稿日期: 2014-06-04; 修订日期: 2014-09-03。

作者简介: 陈 豪 (1990—), 男, 硕士生, 研究领域为叶片内冷通道换热。E-mail: chen hao1789@sina.com

1 引言

现代航空发动机正在不断地发展,与航空发动机性能息息相关的涡轮前温度不断地在升高,这就使得涡轮叶片的工作环境愈发恶劣。为了保证航空发动机的正常运转,涡轮叶片的冷却设计是十分必要的。涡轮叶片内冷通道作为一种经典冷却结构,被广泛应用于叶片的冷却设计之中。然而由于涡轮叶片的高速旋转所引发的哥式力会在内冷通道中诱发二次流,使得其在旋转态下的换热特性与静止时产生了较大差异。

为了研究叶片内冷通道的旋转换热机理,国外学者们已经做了大量的研究,主要以U型通道实验为主。比较有代表性的有Liou^[1,2]等的旋转数达到了0.1~2,Zhou^[3]等为0.1~0.6,Chang^[4]等旋转数最大为0~0.8,Huh^[5~7]等的旋转数最大为0.65,其中高旋转数实验并不多见。为了深入研究航空发动机涡轮叶片内冷通道的换热机理,更大范围的实验参数十分必要,远超出真实发动机工况的高旋转数下的实验研究越来越受到研究者的重视。国内对于旋转内冷通道的换热特性也有了一些研究基础:王宝官等进行了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^[8],刘传凯等研究了旋转态下光滑U型通道的换热和流动特性^[9,10],邓宏武等研究了旋转状态下蛇形通道的流动与换热机理^[11~14],尤其是邓宏武等已经实现了完全覆盖真实发动机工作参数的光滑U型通道旋转换热实验^[14],李洋等研究了转角对光滑通道的换热影响^[15]。

为了进一步向真实叶片换热特性研究靠拢,本文通过对带45°斜肋U型通道的一系列高旋转数($Ro=0\sim 2.07$)换热实验,研究了其径向入流与径向出流两个流程四个侧面的平均换热特性。研究结果为涡轮叶片旋转换热更深入的研究打下了坚实的基础,为合理设计真实涡轮叶片提供了数据支撑,同时也可以为陆基的冷却结构提供参考。

2 实验技术与实验设备

2.1 旋转换热实验台

本换热实验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:实验台采用一台大功率电机提供旋转动力,实验转速范围为0~1000,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;冷气经过空气压缩机加压后过滤并稳压,经过气动阀实时调节后进入实验系统,冷气流量由热式质量流量计实时采集,通道内的压力通过调节出口处的背压阀保持在500kPa以上,从而可以在较低转速下获得高旋转数的实验工况;旋转实验模块中的加热电流和数据采集模块用电均由直流稳压电源提供,经滑环引电器接入;实验段的温度由热电偶采集,电压数据通过数据采集模块转换为数字信号,在由滑环引电器引出并传送到计算机中进行处理,避免了噪音影响;压力采集通过自主设计的多路选通旋转压力测量系统实现^[16]。

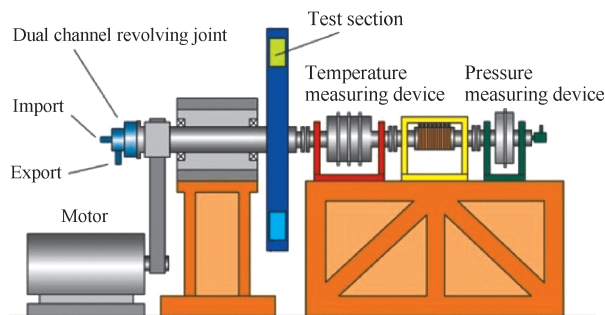


Fig. 1 Schematic of the rotating test facility

2.2 实验模型

用于验证测压实验系统的实验模型主体为方形截面U型通道,如图2所示。

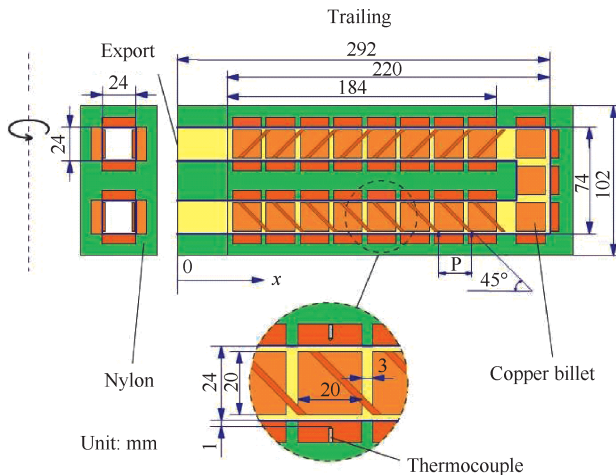


Fig. 2 Schematic of the test section

通道内截面是水力半径为24mm的正方形,单流程通道长度与水力直径的比值约为10.9,通道平均旋转半径与水力直径的比值为18.75。通道的前后缘面交错布置了8个与通道成45°倾角的斜肋片,内外侧面与转弯段均为光滑壁面。肋片高度与通道水力直

径之比为0.1,肋间距与肋高之比为9.58。

由于进口条件对第一通道的流动换热有着至关重要的影响,为使进口来流均匀一致,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。稳流段截面与通道截面一致,保证了良好的进口条件。同时将出口气流在引至旋转接头前经过一个冷却腔充分冷却,使得进口气流温度尽量不受到出口气流的影响。

通道沿程的每个加热测温模块由紫铜块、加热膜、美国 omega 高精度 T 型热电偶以及气凝胶保温材料、绝热隔板等构成。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阻值相同的电加热膜贴在铜块内部,通过控制加热电流来保证等热流壁面边界条件。加热膜完全贴合铜块内腔表面,有效的提高了加热的效率,减少了热损失。每一个铜块均在铜块内部中心布置一个热电偶测点来测量铜块的壁面温度。由于斜肋的存在,此时铜块内部温度会有微小差异,然而由于肋片材料为钛合金,且与铜块接触面积较小,所以本实验中由肋片导热引起的温度差异相较于铜块整体温度可以忽略不计,认为热电偶所测铜块中心温度为铜块的壁面温度^[16]。

由于实验中实验模型会向环境散失热量,本实验采用了国际上传统的解决方案,通过进行热损失实验对热量的损失进行修正。电加热膜的加热量可以分为铜块净换热量和向环境的热损失,由于铜块间的热量交换很小,本实验中忽略不计。热损失实验在通道内部塞满绝热棉的条件下测量不同转速下热稳定时的电加热膜加热量。此时铜块净换热量可以视为零,则电加热膜的加热量便是实验模型向环境散失的热量。依据不同转速下的热稳定实验数据,可以得到相应实验工况下各铜块的热损失系数,用于热损失修正。

3 实验数据处理及误差分析

实验定义局部换热系数^[18]为

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

式中 Q_{net} 为铜块净换热量,由铜块测点的电加热量减去估算的铜块热损失而得; A_{Cu} 为铜块换热面在通道缘面法向的投影面积; T_w 为热电偶所测铜块壁温; T_b 为局部主流平均温度。

局部主流平均温度定义为

$$T_b = T_0 + \frac{\sum Q_{\text{net}}}{mc_p} \quad (2)$$

式中 T_0 为气体进口温度; $\sum Q_{\text{net}}$ 为进口到计算点之间所有铜块的净加热量; m 为气体质量流量; c_p 为空气定压比热容。

实验通道尺寸为真实叶片内冷通道等比放大尺寸,具有几何相似,且实验中冷却空气的普朗特数基本为常数,则表示旋转条件下换热强度的局部努塞尔数可表示为

$$Nu = f(Re, Ro, Bo, X/D_h)$$

$$\text{努塞尔数 } Nu = h \cdot D_h / \lambda_0$$

$$\text{雷诺数 } Re = \rho_0 \cdot V_0 \cdot D_h / \mu_0$$

$$\text{旋转数 } Ro = \omega \cdot D_h / V_0$$

$$\text{浮力数 } Bo = (\Delta\rho/\rho_b) Ro^2 (R/D_h)$$

沿程无量纲位置 X/D_h 是通道进口整流段结束点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; ρ_0 , V_0 , λ_0 和 μ_0 分别为进口气流密度、速度、热导率和动力粘度; ω 为旋转角速度;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,一般把实验所得的努塞尔数与具有相同当量直径的静态光滑圆管充分发展湍流的平均努塞尔数进行比较,即

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{h D_h / \lambda}{0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}} \quad [18] \quad (3)$$

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

通过误差传递原理计算得,不同实验工况下雷诺数的相对误差介于 $\pm 1.64\%$ 和 $\pm 2.60\%$ 之间,旋转数最大相对误差为 $\pm 3.33\%$ 。局部努塞尔数误差在不同实验工况下和不同通道位置处有明显差异,在静止高雷诺数 ($Re=70000$) 下通道局部努塞尔数相对误差不超过 $\pm 3\%$;而在高转速 ($n=1000\text{r/min}$) 低雷诺数 ($Re=10000$) 下,除了通道进出口及转弯段的努塞尔数相对误差较大 (不超过 $\pm 20\%$) 外,通道局部努塞尔数的相对误差最大不超过 $\pm 10\%$,而高雷诺数 ($Re=70000$) 下通道总体的相对误差不超过 5% 。

4 实验结果及分析

实验带肋回转通道可分为:第一通道(径向出流, $X/D_h=3.5 \sim 10.5$)、转弯段 ($X/D_h=11.5 \sim 13.5$) 和第二通道(径向入流, $X/D_h=14.5 \sim 21.5$)。定义进口到出口连线与实验台转轴方向夹角为通道安装角,安装角工况为 0° , 22.5° 和 45° 三个工况。实验雷诺数工况为 $10000 \sim 70000$ 范围内的 9 个雷诺数工况,转

速范围为0~1000r/min,通道进口压力均通过出口背压阀维持在500kPa以上,旋转数范围为0~2.07。

4.1 静止状态下光滑与带肋通道的平均换热

图3为静止时各雷诺数工况下,光滑^[14]与带45°斜肋通道两个流程四个缘面的努赛尔数比光滑圆管努赛尔数 Nu/Nu_0 。从图中可以看出,斜肋对通道内换热的增强是显著的,带肋通道的换热强度较光滑通道,平均增强程度约为57.8%,其中局部最大增强程度达到了96.2%。

4.2 旋转状态下通道各缘面的平均换热

图4给出了旋转状态下,雷诺数为10000~70000时,第一通道与第二通道的四个侧面的平均转静努

赛尔数比 Nu/Nu_s 与旋转数 Ro 的关系。其中 Nu_s 为静止条件下通道的局部努赛尔数,九个雷诺数工况对应的旋转数范围为0~2.07。

从图4可以看出,0°工况下,由于哥式力的作用,第一通道后缘的换热随着旋转数的提高而增强,在旋转数2.07时最大,比静止工况增强了约228.9%,在真实发动机工况的旋转数0.25~0.3范围内,增强了约130%;而前缘则随着旋转数的提高出现了先减弱后增强的现象,在旋转数0.404时前缘换热减弱至最低点,约为静止时的80.6%,随后在旋转数2.07时增强至最大,约为静止时的139.7%,在真实发动机工况的旋转数0.25~0.3范围内,换热约为静止时的88%

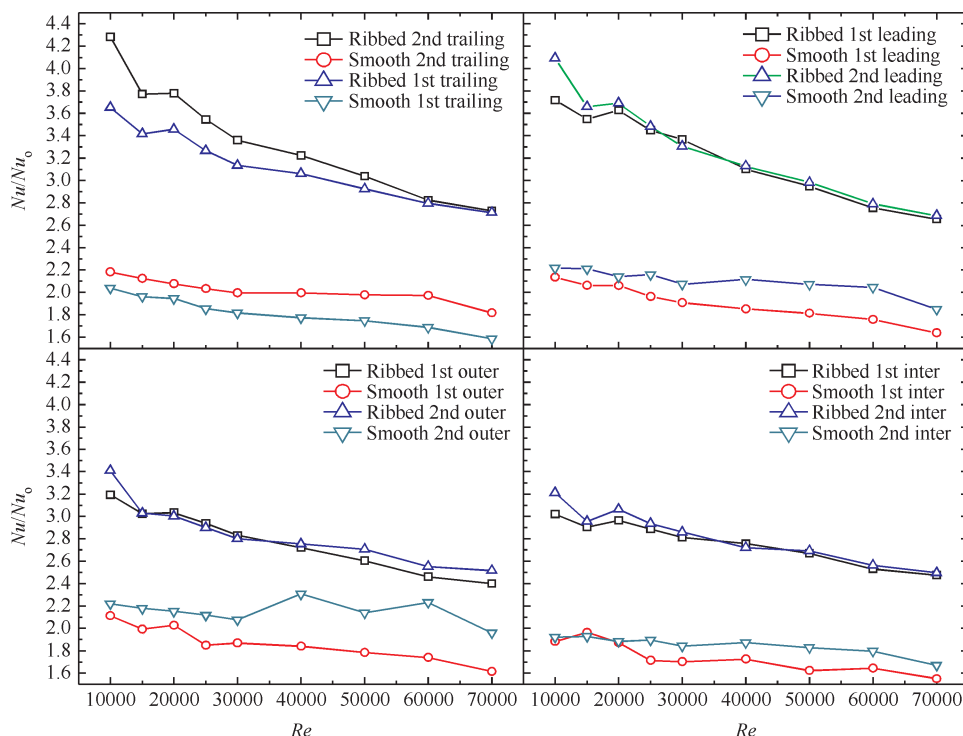


Fig. 3 Nu/Nu_0 of the smooth and ribbed two-pass channels^[14]

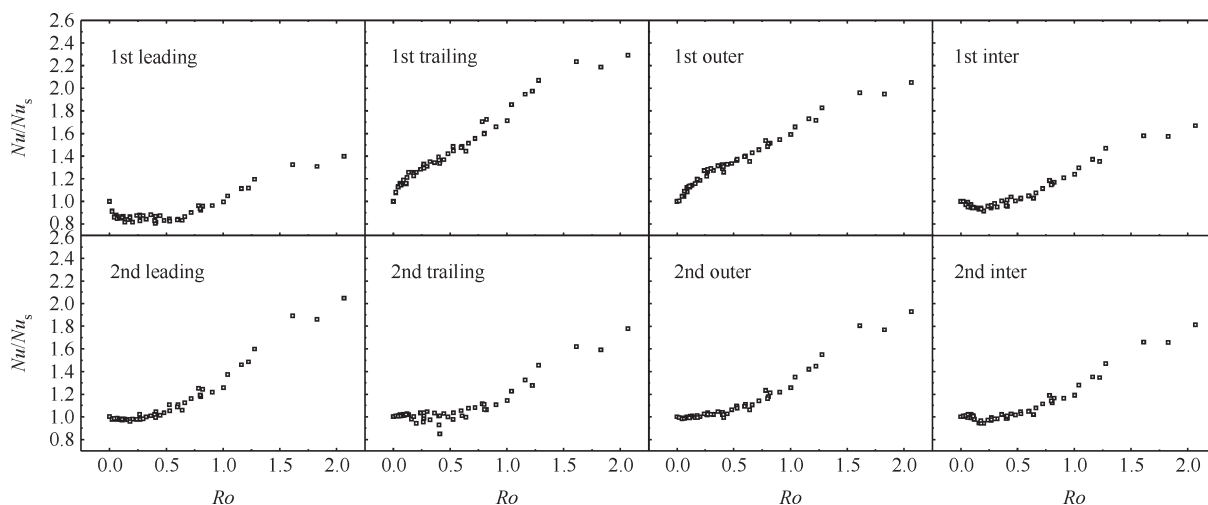


Fig. 4 Effects of the rotation on the average Nu/Nu_s of the ribbed two-pass channel

左右。这与文献[14]中的光滑通道换热研究有着类似的变化规律。由此可知在带肋通道内,亦会出现文献[14]中所提到的由浮升力引发的临界回流现象。文献[17,18]中的带45°斜肋换热通道的研究中也观察到了相似现象。

表1列出了两流程四个缘面的换热变化规律。

Table 1 Details of heat transfer of the four edge surfaces in the two-pass channel

Edge surface	$Ro=0.25\sim0.3$ (of Nu_s)	Peak value (of Nu_s)
1st leading	88%	80.6% ($Ro=0.404$) 139.7% ($Ro=2.07$)
1st trailing	130%	228.9% ($Ro=2.07$)
1st outer	126%	205% ($Ro=2.07$)
1st inter	94%	91.5% ($Ro=0.202$) 166.8% ($Ro=2.07$)
2nd leading	98%	97.3% ($Ro=0.162$) 204.8% ($Ro=2.07$)
2nd trailing	98%	84.8% ($Ro=0.411$) 178.1% ($Ro=2.07$)
2nd outer	101%	98.2% ($Ro=0.044$) 192.8% ($Ro=2.07$)
2nd inter	97%	94.3% ($Ro=0.202$) 181.3% ($Ro=2.07$)

Fu等在文献[17], Michael Huh等在文献[18]中指出,带45°斜肋的U型回转通道在肋间会产生方向介于主流方向与肋片的夹角之间的二次流动。类似于哥式力引发的二次流受到浮升力影响产生了临界回流现象,肋间的二次流同样也受到了浮升力的影响,从而也可能产生了类似的现象。从实验结果来看,通道内侧附近换热先随着旋转数增大而减弱,达到临界旋转数之后转为增强,这与文献[14]中临界

回流对前后缘换热产生的影响非常相似。第一通道外侧与后缘类似,换热随着旋转数的提高而增强,内侧与前缘类似,亦出现了先减弱后增强的现象。综上所述,本文推测肋间二次流会由于浮升力的影响产生临界回流的现象,导致了内外侧换热的特殊规律。

第二通道中,由于流向变为径向入流,哥式力方向与第一通道相反,由于经过了第一通道和转弯段,第二通道的流动已经十分混乱,导致其现象规律性不如第一通道明显。第二通道后缘和内侧换热随着旋转数的增大出现了先减弱后增强的现象。外侧随旋转数增大而增大,但是在低旋转数时与第一通道相比,变化趋势非常平缓。

4.3 旋转状态下光滑与带肋通道的平均换热

图5给出了旋转状态下,雷诺数为10000~70000时,光滑^[14]与带45°斜肋通道的两个流程四个侧面的平均转静努赛尔数比 Nu/Nu_s 与旋转数 Ro 的关系。其中 Nu_s 为静止条件下通道的局部努赛尔数,九个雷诺数工况对应的旋转数范围为0~2.07。

如图5所示,光滑通道中各缘面平均转静努赛尔数比受旋转影响均比带肋通道要强。可知45°斜肋虽然增强了通道的换热,但是削弱了旋转对通道换热的影响。

第一通道前后缘中,带肋通道与光滑通道平均换热随旋转数增强有着相似的变化规律。然而第一通道前缘的临界回流导致的 Nu/Nu_s 随旋转数的增大先减小后增大的趋势在光滑通道中较为明显, Nu/Nu_s 在临界旋转数下降低至静止工况的约70%。在带肋通道中, Nu/Nu_s 下降趋势较光滑通道平缓,临界旋转数下仅为静止工况时的约80%,同时在高旋转数工况下,带肋通道的 Nu/Nu_s 随旋转数增加而增

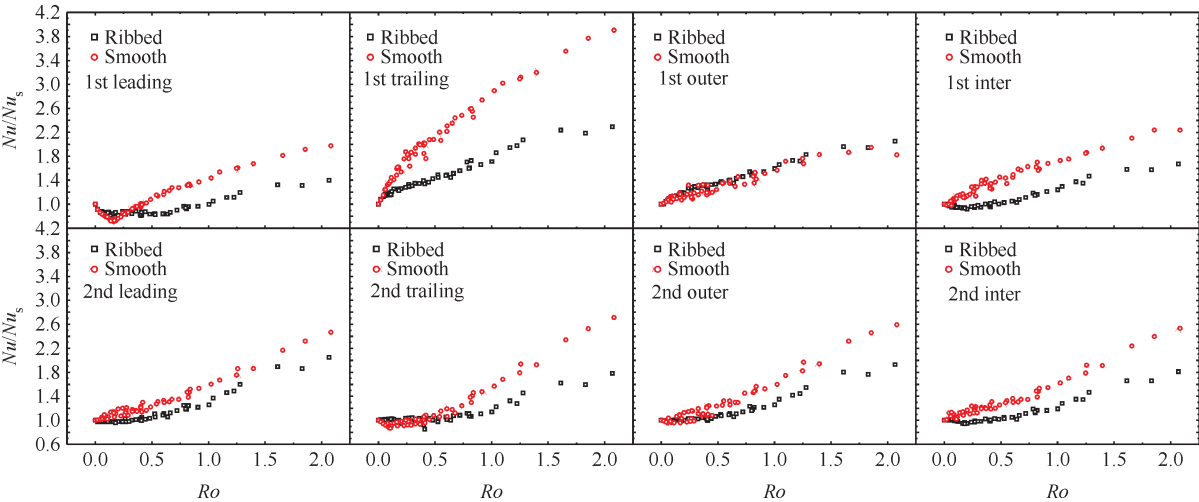


Fig. 5 Effects of the rotation on the average Nu/Nu_s of the smooth and ribbed two-pass channel

大的趋势亦比光滑通道平缓。

第一通道外侧的平均换热,两个通道并无太大差异,带肋通道略强于光环通道。而在第一通道内侧,带肋通道与光滑通道产生了截然不同的现象。光滑通道中,第一通道内侧的换热规律为 Nu/Nu_s 随着旋转数的增加而增大,然而带肋通道的第一通道内侧却出现了 Nu/Nu_s 先随旋转数增加而减小,直到到达临界点之后才转为增大。这也再一次证明内侧的特殊换热规律是由于 45° 斜肋引起的。

第二通道前后缘中,两个通道依然有着相同的变化规律,第二通道后缘的临界回流现象亦是在光滑通道中较为明显(临界旋转数降低至静止工况的 80%,且临界转折点非常明显),在带肋通道中下降趋势非常平缓,且没有明显的转折点。

第二通道内外侧换热,光滑通道受旋转的影响要强于带肋通道。且在低旋转数时,带肋通道的 Nu/Nu_s 随旋转数的变化趋势比光滑通道更为平缓。这说明 45° 斜肋在第一通道中对外侧影响甚微,而在第二通道中对外侧产生了一定影响,导致削弱了旋转对换热的影响,该影响在低旋转数时尤为显著。

4.4 旋转状态下不同安装角的平均换热

图 6 为部分安装角工况示意图。

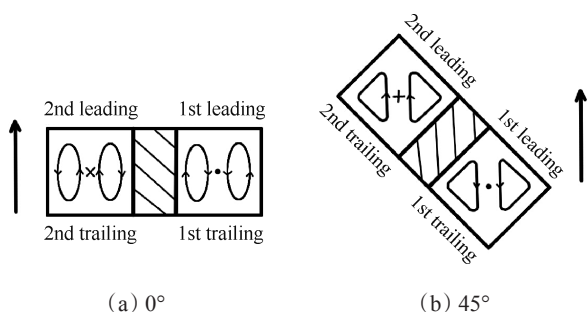


Fig. 6 Cross section of the two-pass channel on different orientations

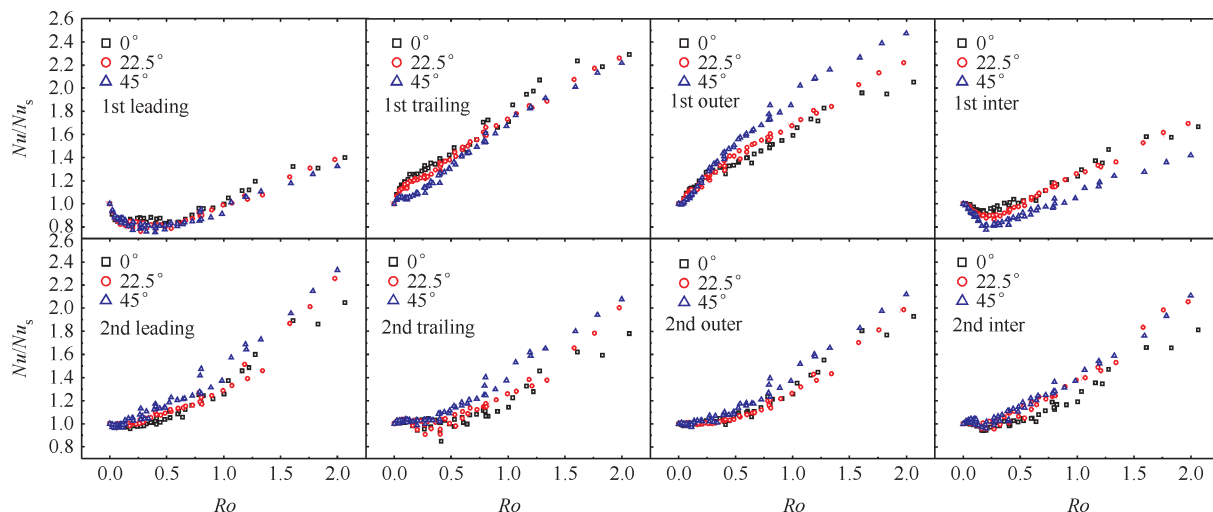


Fig. 7 Effect of the rotation on the average Nu/Nu_s of the ribbed two-pass channel on different orientations

图 7 给出了旋转状态下,雷诺数为 10000 ~ 70000,安装角工况为 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 时,第一通道与第二通道的四个侧面的平均转静努赛尔数比 Nu/Nu_s 与旋转数 Ro 的关系。

从图 7 可知,第一通道前缘、第一通道内侧、第二通道后缘的换热临界回流现象在三个安装角下均有出现,而三个安装角下的其余缘面的换热特性也大致一致。可知转角并没有完全改变旋转对各缘面换热的影响。其中三个转角下的第一通道前缘、第一通道后缘、第一通道内侧的 Nu/Nu_s 为 $0^\circ > 22.5^\circ > 45^\circ$,第二通道四个缘面与第一通道外侧则为 $0^\circ < 22.5^\circ < 45^\circ$ 。

不同转角下,哥式力指向方向也随之改变,第一通道中,在 22.5° 和 45° 时,哥式力二次流方向指向后缘与内侧。从第一通道前后缘与内侧的换热特性可以看出,转角的影响削弱了这些缘面中旋转对换热的影响,并且哥式力二次流方向与前缘面法线的夹角越大,削弱的程度越大。

第二通道中哥式力的指向与第一通道相反,在 22.5° 和 45° 时,哥式力二次流方向指向前缘与外侧。从第二通道前后缘与内外侧的换热特性可知,在第二通道中,转角的影响反而增强了旋转对换热的影响,并且哥式力二次流方向与后缘面法线的夹角越大,增强的程度越大。

从整体差异程度上看,在低旋转数下,安装角对换热的影响并不大;在高旋转数下,安装角对旋转换热的影响才开始变得相对明显。

4.5 内外侧换热临界旋转数

由图 8 所示,第一通道外侧和第二通道外侧换热在低旋转数时,三个转角下的 Nu/Nu_s 极为接近。当旋转数大于一个临界值(约为 0.2)之后, Nu/Nu_s 开始

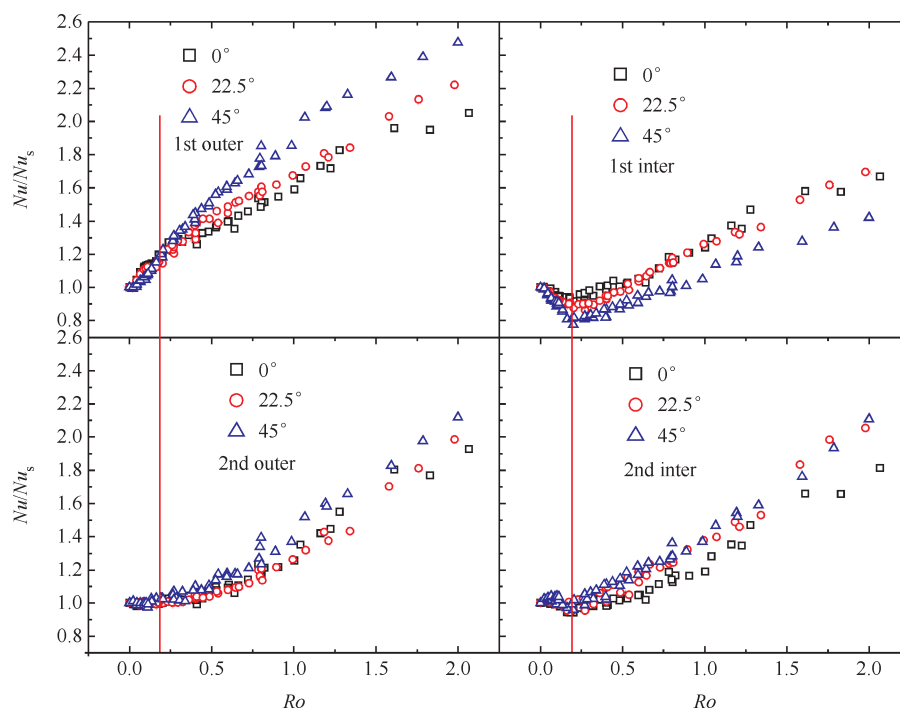


Fig. 8 Effects of the rotation on the average Nu/Nu_s of the outer and inter surfaces in the ribbed two-pass channel on different orientations

变为 $0^\circ < 22.5^\circ < 45^\circ$ 。而第一通道内侧与第二通道内侧的肋间临界回流现象,均出现在临界旋转数 $Ro_c \approx 0.2$ 处。

由此,本文推断由 45° 斜肋引发的肋间二次流在受到浮升力的影响后,产生的临界回流现象影响了 45° 斜肋通道的内外侧换热规律。并且该回流现象的临界旋转数为 $Ro_c \approx 0.2$ 。

5 结 论

本文研究了在旋转数 $0 \sim 2.07$ 的条件下,带 45° 角斜肋 U 型通道在通道安装角分别为 0° , 22.5° 和 45° 时的平均换热特性。主要结论如下:

(1) 本文实验所得带 45° 斜肋通道的旋转换热特性规律与国外研究相似,实验数据真实可靠。所得高旋转数 ($0 \sim 2.07$) 换热实验结果为合理设计真实涡轮叶片提供了数据支撑,同时也可以为陆基的冷却结构提供参考。

(2) 与光滑通道实验数据对比, 45° 斜肋对通道换热产生了增强作用,但是同时削弱了旋转对换热的影响。

(3) 由于浮升力对旋转通道内的肋间二次流产生了影响, 45° 斜肋通道的内外侧出现了与前后缘临界回流现象相似的换热现象。

(4) 本文实验安装角工况内,转角会减弱第一通道的旋转对换热的影响,增强第二通道的旋转对换

热的影响。

(5) 第一通道与第二通道内外侧发生的临界现象的临界旋转数一致,均约为 0.2 左右,该临界现象出现的旋转数与前后缘临界旋转数不同,是由于 45° 斜肋引起的特殊现象。

致 谢: 本研究内容受到来自中航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° Rib-Roughened Rectangular Duct with Two Channel Orientations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50 (19-20): 4063-4078.
- [2] 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.
- [3] Zhou Fuguo, Lagrone J, Acharya S. Internal Cooling in 4:1 AR Passages at High Rotation Numbers[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2007, 129: 1666-1675.
- [4] Chang S W, Liou T M, Po Yu. 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: 1349 - 1363.

- [5] Michael Huh, Yao-Hsein Liu, Je-Chin Han. 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] 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 2010-GT-22190*.
- [7] 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*, 2011, 133(2): 021001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邓宏武, 张 炜, 陶 智. 旋转状态下带肋U形通道内换热的实验研究[J]. *推进技术*, 2000, 21(1): 26-29. (Deng H W, Zhang W, Tao Z. Experimental Investigation on Heat Transfer within a Rotating Ribbed Serpentine Passage [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(1).)
- [14] 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.
- [15] Li Y, Deng H, Xu G, et al. Effect of Channel Orientation on Heat Transfer in Rotating Smooth Square U-Duct at High Rotation Number[R]. *ASME 2014 GT-25188*.
- [16] 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: 543-552.
- [17] Fu Wen-Lung, Lesley M Wright, Je-Chin Han. Rotational Buoyancy Effects on Heat Transfer in Five Different Aspect-Ratio Rectangular Channels with Smooth Walls and 45 Degree Ribbed Walls[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2006, 128: 1130-1141.
- [18] Huh M, 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.

(编辑:梅 瑛)