

DOI: 10.7652/xjtuxb201402021

旋转带肋回转通道流动换热数值模拟

赵曙¹, 朱惠人¹, 郭涛¹, 张丽¹, 孙瑞嘉²

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安; 2. 中国航空动力机械研究所, 412002, 湖南株洲)

摘要: 为进一步了解涡轮动叶旋转内冷通道的流动换热规律,选取动叶内通道的相似放大模型进行实验和数值模拟研究。通道进口雷诺数为 17 000, 3 个出口的流量分配比为 1 : 2 : 1, 旋转半径与水力直径比为 46.4, 旋转数分别为 0 和 0.09。静止实验测量了沿程静压系数和努赛尔数(Nu)分布, 三维数值模拟了旋转通道内部涡结构对流动换热的影响。结果表明: 旋转造成通道涡偏移, 改变了速度场分布, 使哥氏力指向的壁面附近流速增加; 旋转离心力使径向出流沿程静压系数逐渐增加, 径向入流沿程静压系数迅速降低; 肋扰流涡使沿程展向平均 Nu 呈多波峰状分布; 转弯回流涡使得转弯下游通道的 Nu 不对称分布; 旋转促使内通道的流体偏向哥氏力指向的壁面, 增加了径向出流压力面和径向入流吸力面的 Nu 。

关键词: 涡轮叶片; 带肋通道; 旋转; 对流传热; 数值计算

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)02-0125-06

Numerical Predictions of Flow and Heat Transfer for Rotating Internal Cooling Channels with Rib Turbulators

ZHAO Shu¹, ZHU Huiren¹, GUO Tao¹, ZHANG Li¹, SUN Ruijia²

(1. College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China)

Abstract: To investigate flow and heat transfer in a rotating internal channel of the moving blade, experiments and numerical simulations for a similarly amplified channel model with 90° ribs are conducted. The inlet Reynolds number, flow rate distribution ratio and geometric dimensionless ratio are taken as 17 000, 1 : 2 : 1 and 46.4 respectively, the rotating number is considered as 0 and 0.09. The heat transfer coefficient distribution and static pressure coefficient are examined by experiments. The effects of vortex on flow and heat transfer in rotating internal cooling passage are achieved with 3-D numerical simulation. The results show that vortex shift in rotating channel changes velocity field, and the static pressure coefficient increases along radial outflow and decreases along radial inflow due to centrifugal force. The laterally averaged Nu distributes in multiple-peak form as the result of secondary flow induced by rib turbulators. The Nu distribution down stream of turning area gets asymmetric due to turning eddy. The fluid shift tends toward the wall that the Coriolis force points to. Consequently, the Nu on the radial outflow pressure surface and radial inflow suction surface increases.

Keywords: turbine blade; ribbed channel; rotating; convective heat transfer; numerical simulation

收稿日期: 2013-09-07。 作者简介: 赵曙(1984—),男,博士生;朱惠人(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035702)。

网络出版时间: 2014-01-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140122.1023.002.html>

由于航空发动机的燃气温度已远高于金属材料的耐热极限,因此为保证发动机安全稳定地提供推力,就要求对涡轮叶片采取有效的冷却措施。典型的内通道冷却是在叶片冷却通道内壁面添加扰流肋,肋引起的二次流强化了冷气与壁面换热,冷气带走热量来降低叶片的工作温度。

国内外学者对内通道冷却技术开展了广泛研究^[1-14]。对内通道冷却的研究一方面集中在矩形通道的冷却机理的研究,主要包括通道宽高比、偏角等通道尺寸参数^[1-4]和肋高、肋宽、肋角度、肋间距、及肋排布等几何参数^[5-7]对通道流动损失及壁面换热的影响;另一方面集中于内通道冷却方法的应用研究,主要采用大涡模拟、三维速度场瞬态测量技术以及瞬态热色液晶技术测量复杂带肋通道的详细流场分布和壁面换热系数^[8-11],得到了不同气动参数和几何结构下的流场分布及努赛尔数(Nu)分布,以便准确预测通道内壁面温度,进而预估涡轮叶片强度和寿命。

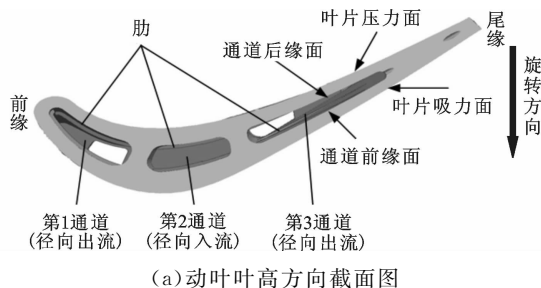
以上研究多集中于矩形单通道、U形通道等单元结构的冷却机理研究,没有考虑到实际叶片内通道的连接关系、各通道截面形状、气动参数等因素,不能反映完整内通道的流动特征。本文针对真实动叶全通道模型,研究了各通道的截面形状及连接关系,实验测量了静止全通道的沿程静压系数和 Nu 分布,三维数值模拟研究了旋转内通道涡结构对流场及壁面 Nu 分布影响,得到旋转回转通道壁面的换热系数,可为转子叶片回转通道设计提供参考数据。

1 计算物理模型

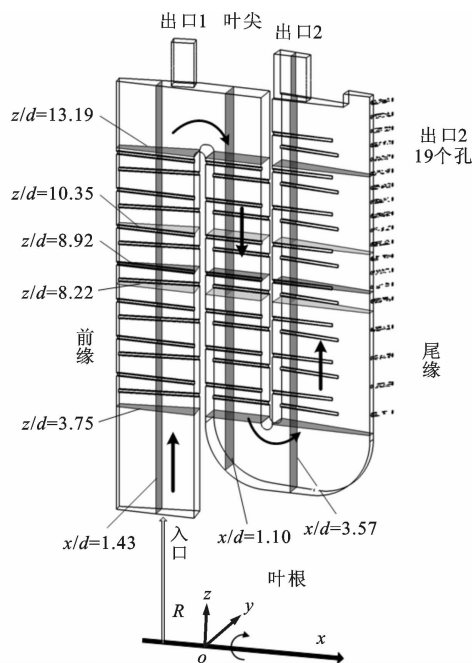
1.1 物理模型

本文采用的涡轮动叶回转内通道模型如图1所示。图1a中外部高温燃气将热量由外表面传给叶片,由叶根提供的冷却气体与内通道壁面对流换热将导入叶片的热量带走,从而降低了叶片的壁面温度;在动叶片绕轴由压力面向吸力面方向旋转时,压力面侧内通道壁面称为后缘面,吸力面侧内通道壁面称为前缘面,在叶片内部包含了径向出流的第1、3通道和径向入流的第2通道,并且各通道前、后缘面上均有交错布置的横肋。图1b、1c模型有2个梯形截面的径向出流通道的1个矩形截面的径向入流通道,且每个通道壁面上分布有交错横肋,模型中的3个通道由叶尖和叶根位置的2个转弯段相连;入口位于叶根,出口1、2位于叶尖,出口3位于尾缘;入口水力直径 $d=11.2\text{ mm}$,肋宽 $e=0.107d$,肋间

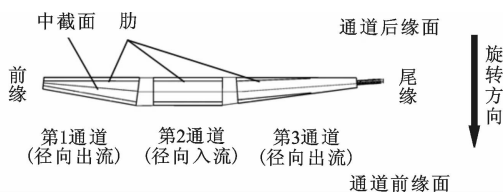
距与肋宽比 $p/e=12.58$,叶根至叶尖总高度 $H=15.62d$,前缘至尾缘总长度 $L=10.38d$;文中采用 z/d 表示内通道高度(叶高)方向的截面,用 y/d 表示通道厚度方向的截面,用 x/d 表示通道宽度(叶弦)方向的截面;通道模型绕 x 轴旋转,旋转半径为 R ,旋转半径与水力直径比 $R/d=46.4$ 。



(a) 动叶叶高方向截面图



(b) 回转通道形状



(c) 叶片内通道几何模型截面图

图1 涡轮动叶回转内通道及数值模拟几何模型

1.2 计算网格及边界条件

本文采用的计算网格如图2所示。计算模型的截面形状、肋高尺寸、通道与出口交接面积的变化,需将流体域划分为非结构混合网格,而通道的高速旋转可能会影响到壁面附近的流动变化,所以需对

壁面附近的网格加密划分;肋周围的流动情况比较复杂,因此对肋附近区域的网格采用密度核加密划分,由于考虑了壁面换热及壁面处理函数,因而对前、后缘面各增添 10 层边界层,并保证壁面第一层网格厚度,经过网格无关性分析后,选取计算网格总数约 9.45×10^{-4} 。

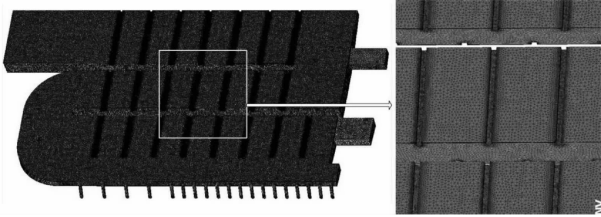


图 2 数值计算网格

文中使用商业软件 Fluent 13.0 进行数值计算研究,流体选用理想气体,并选取 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型及增强壁面函数^[12]。数值模拟的边界条件分别为:通道的入口给定质量流量进口条件,各出口给定压力出口条件,壁面选择无滑移条件同时给定相应的湍流脉动能和耗散率,并使壁面热边界为第二类边界条件。对雷诺时均湍流微分控制方程的求解采用压力分离隐式稳态求解器,并采用 SIMPLE 压力速度耦合方法求解各参数。压力修正方程、连续方程、动量方程、 k 和 ϵ 方程均采用亚松弛因子。求解收敛的判断标准为相对残差小于 10^{-5} 。

1.3 参数定义及计算工况

本文研究中的主要参数定义如下

$$Re = \rho V_{in} d / \mu \quad (1)$$

$$r_o = \omega d / V_{in} \quad (2)$$

$$h = q_w / (T_i - T_{main}) \quad (3)$$

$$Nu = hd / \lambda \quad (4)$$

$$C_p = 2(P_i - P_{in}) / (\rho V_{in}^2) \quad (5)$$

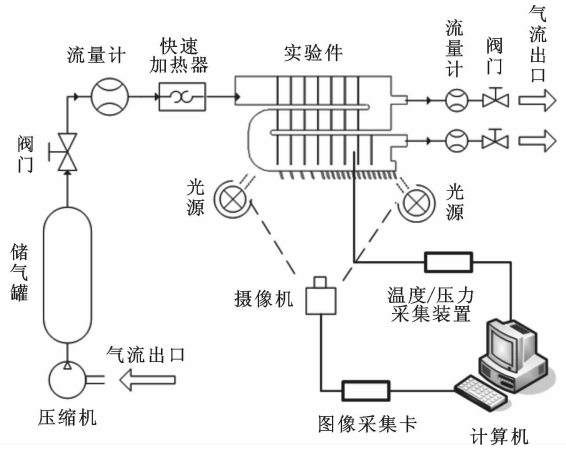
式中: Re 为雷诺数; r_o 为旋转数; h 为壁面局部换热系数; Nu 为壁面局部努赛尔数; C_p 为沿程静压系数; ρ 为入口气流密度; V_{in} 为入口气流速度; d 为通道入口水力直径; μ 为动力黏度; ω 为旋转角速度; q_w 为表面热流密度; T_i 为通道内壁面节点温度; T_{main} 为通道沿程气流温度; λ 为理想气体导热系数; P_i 表示测点截面上静压; P_{in} 表示通道入口静压。

研究工况选取 $Re=17\ 000$, $r_o=0.0, 0.09$, 出口 1、2、3 的流量分配比为 1:2:1。

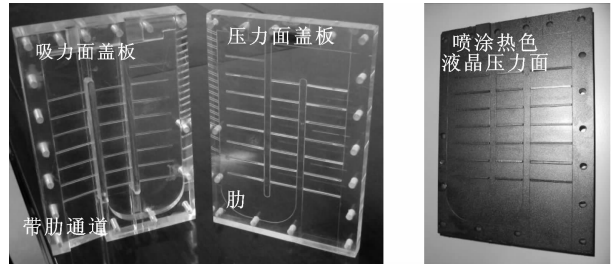
2 实验装置及方法

本文研究的实验系统如图 3 所示。图 3a 中空气压缩机将气体压缩至储气罐,稳定后气体由快速

加热器加热后进入实验通道,在实验通道前后用阀门和流量计调节和测量入口和各出口质量流量,流量计精度为 2.5 级。通道沿程布置有 15 支直径为 0.2 mm 的热电偶测量主流温度,热电偶标定精度为 $0.2\ ^\circ\text{C}$,通道内壁面喷涂 $35\ ^\circ\text{C}$ 窄带热色液晶(带宽 $1\ ^\circ\text{C}$),采用 JAI CV-M71CL 型摄像机拍摄液晶变色图像,液晶标定精度为 $0.1\ ^\circ\text{C}$,通道沿程布置有 15 个静压测点(静压孔直径为 1.5 mm),使用 NetScanner Model 98RK 型压力扫描阀测量沿程压力,压力扫描阀精度为 0.1 级。图 3b 的实物模型包含前、后缘面两块盖板,两块盖板组合形成带肋内通道。



(a) 实验系统示意图



(b) 实验件模型照片

图 3 实验系统

目前,对热色液晶瞬态测量技术已经发展得比较成熟^[13],本文采用热色液晶瞬态测量技术对回转内通道全表面进行换热测量。

3 结果与分析

3.1 静止与旋转速度场比较分析

内通道流动的涡结构如图 4 所示。图 4a 中流体在静止带肋内通道中受到肋的周期扰动而产生的流动分离与再附着,会在肋的迎风面形成较小的低速回流涡,在肋的背风面形成较大的回流涡,流体在两肋间的后半段形成再附着,将增加壁面附近的流

速;流体在旋转带肋内通道中受肋的扰流强度与静止时情况相同,旋转附加力会影响到壁面附近边界层厚度变化。图4b中静止通道的流体受到截面形状和转弯效应的影响,会在转弯段下游通道形成由近壁至远端的对涡结构,而旋转通道的流体则受通道截面形状、流动方向、旋转方向、转弯效应等因素的影响,会在径向出流通道内形成指向后缘面的横向对涡,在径向入流通道内形成指向前缘面的横向偏涡。

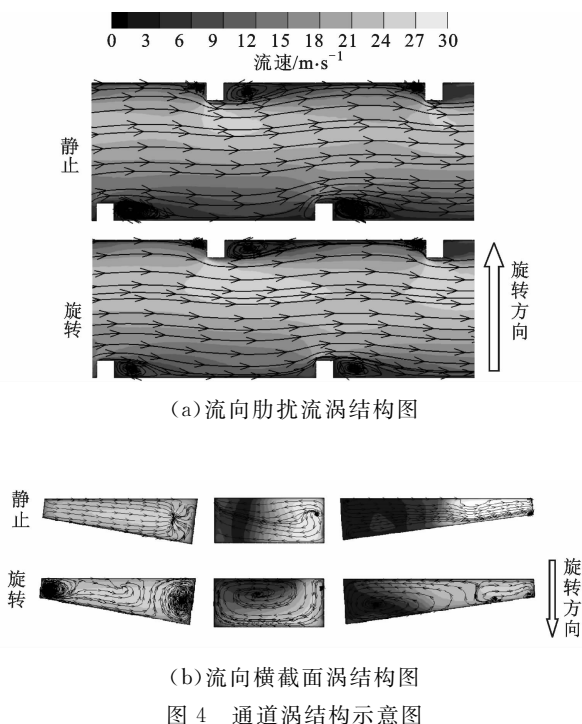


图4 通道涡结构示意图

比较静止内通道宽度方向的速度矢量,3个通道沿流向截面位置如图1b所示。在沿流向的截面 $x/d=-1.43$ 、 $x/d=1.1$ 、 $x/d=3.57$ 上的速度矢量中,主流分离与再附着形成肋上游近壁流速,增大边界层变薄,肋下游近壁流速减小,边界层变厚,肋顶下游流速增大。这是由于在肋上游形成的二次流涡冲向壁面,肋下游再附着形成回流涡使主流不易靠近壁面。通道壁面上交错肋引起的二次流涡有利于主流产生分离和再附着,从而增加了近壁流速,肋顶下游会形成回流涡使主流速度增加,有利于通道中心主流速度增加,增强了主流与二次流的掺混作用。转弯效应使径向入流吸力面肋顶下游流速增加明显,使径向出流压力面肋顶下游流速增加明显。

旋转内通道 $x/d=-1.43$ 截面的速度场受旋转作用力影响较小, $x/d=1.1$ 、 $x/d=3.57$ 截面的速度场受旋转作用影响较大。旋转使主流向哥氏力

所指方向偏移,即径向出流第1、3通道向压力面偏移,径向入流第2通道向吸力面偏移,这是哥氏力压扁了指向壁面的二次流涡(增加了近壁区域流速),同时拉宽了背向壁面的二次流涡(减小了近壁区域流速)。

沿流向截面位置如图1b所示。在截面 z/d 为 3.75、8.92、13.19 上的截面速度矢量径向出流第1通道速度分布主要受几何结构影响,截面横向涡影响相对较弱;径向入流第2通道受转弯和旋转的叠加作用,切面低速横向涡由吸力面向压力面偏移,横向涡在哥氏力作用下被压扁;径向出流第3通道切面横向涡向靠近转弯隔墙和吸力面附近偏移,压力面近壁速度增加。旋转作用对主流截面上速度分布的影响沿流向逐渐增强。

3.2 静止与旋转静压系数结果比较分析

本文采用 l/d 表示沿流向测点距入口的长度与入口的水力直径之比。图5为内通道沿程压力系数分布图,可见静止通道沿流向压力逐渐降低,降低幅度逐渐减小,旋转通道径向出流通道沿程压力逐渐增加,径向入流通道沿程压力快速降低,第1转弯段压力最高,第2转弯段压力最低。静止($r_o=0.0$)实验和数值模拟的沿程静压系数曲线基本重合,第1通道沿程静压系数降低最快,沿程肋的扰流作用逐渐减弱,受出口分流和转弯损失影响,转弯段静压系数先增加后减小;旋转($r_o=0.09$)数值模拟沿程静压系数在径向出流时逐渐增加,在径向入流时迅速减小,这是由于流动方向与离心力作用方向有关,径向出流时离心力抵消了沿程扰流涡引起的阻力,流动阻力减小,径向入流时增加了沿程扰流涡引起的阻力,使沿程流动阻力增加。

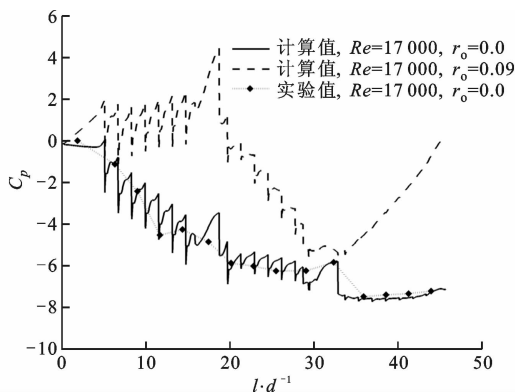


图5 带肋通道沿程静压系数分布

3.3 静止与旋转换热结果比较分析

当3个出口的流量分配比为1:2:1时,静止实验和数值计算的带肋通道压力面换热分布如图6

所示。由图 6 可知:静止内通道实验与数值计算的后缘面 Nu 分布规律相同;第 1 通道的 Nu 最高,第 2 通道的 Nu 次之,第 3 通道的 Nu 最小;受梯形截面形状影响使第 1 通道换热不对称分布,入口段靠近前缘换热较强,转弯段使得沿流向靠近隔墙换热增强;转弯效应会影响下游第 2、3 通道的 Nu 分布,转弯下游远离转弯壁面的 Nu 较高,靠近转弯近壁面的 Nu 较低,沿流向转弯效应影响逐渐减弱;在转弯段在叶尖前缘处,转弯下游第 2、3 通道靠近隔墙区域低速回流涡,壁面的 Nu 相对较低。

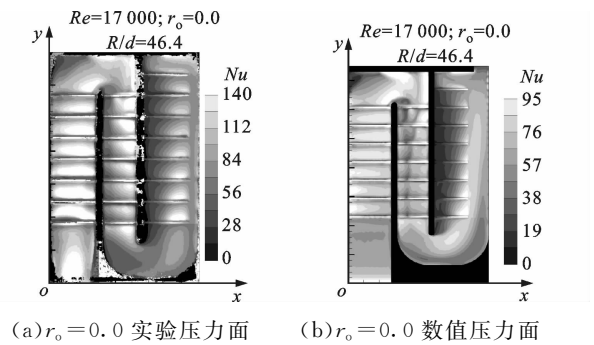


图 6 静止内通道压力面 Nu 分布

图 7 为旋转数值计算压力面和吸力面换热分布,出口 1、2、3 的流量分配比为 1 : 2 : 1,可知压力面的径向出流第 1、3 通道 Nu 沿流向逐渐增大,径向入流第 2 通道 Nu 略有减弱,这是由于旋转使主流向哥氏力所指方向偏移,径向出流哥氏力将通道中心流体推向压力面,使得压力面近壁速度增加引起 Nu 增大,径向入流哥氏力将通道中心推向吸力面,使得压力面近壁速度减小引起 Nu 降低。哥氏力对于转弯段作用不明显,第 1 转弯段 Nu 略有增加,第 2 转弯段 Nu 略有减小。吸力面 Nu 增强与减弱区域与压力面情况相反,旋转作用力使二次流涡结构偏移,使第 1、3 通道吸力面 Nu 略有减小,第 2 通道吸力面 Nu 明显增加,吸力面转弯段 Nu 基本相同。

图 8 为回转通道沿程展向平均 Nu 分布,受肋的周期扰流作用沿程展向平均 Nu 均呈多波峰状分布,沿流向两肋间的高换热逐渐靠近肋后缘,沿肋间 Nu 逐渐降低;随旋转数增加,径向出流第 1、3 通道压力面平均 Nu 均有增加,第 3 通道增幅明显,径向入流第 2 通道压力面 Nu 降低;随旋转数增加时,吸力面平均 Nu 变化与压力面情况相反。旋转对主流涡偏移沿流向逐渐加强,对第 1 通道壁面 Nu 影响最弱、第 2 通道壁面 Nu 影响次之、第 3 通道壁面 Nu 影响最强。涡偏移方向与流动方向有关,对径

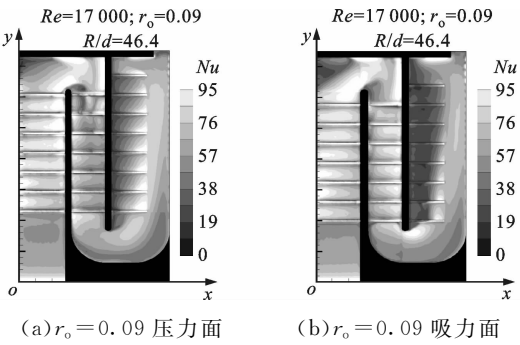


图 7 数值模拟旋转内通道压力面 Nu 分布

向出流通道压力面增强幅度比吸力面减弱幅度大,对径向入流通道吸力面增强幅度比压力面减弱幅度大。

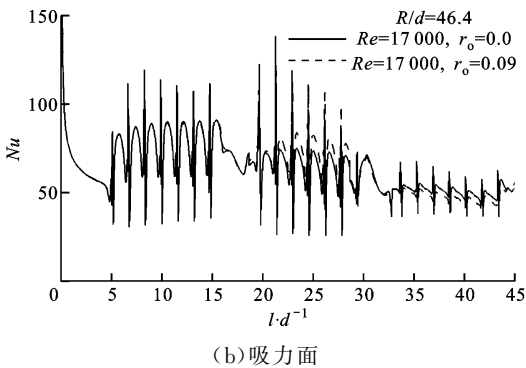
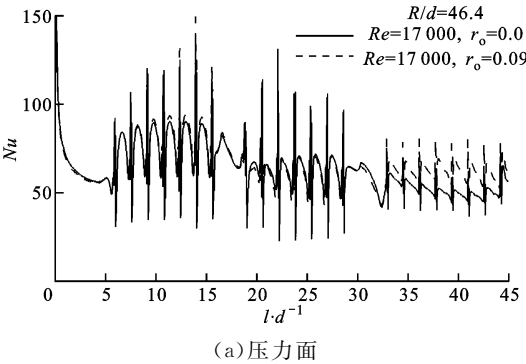


图 8 回转通道沿程展向平均 Nu 分布

4 结 论

本文针对涡轮叶片带肋全通道模型流动换热特性进行研究,在 $Re=17\ 000$ 、 $r_o=0.0, 0.09$ 、 $R/d=46.4$ 的工况下,采用实验与数值模拟结合方法研究了全通道的流动和换热规律,得出以下几点结论:

(1)旋转使主流向哥氏力指向壁面偏移,增加了指向壁面附近的流速,减小了背向壁面附近的流速,哥氏力指向壁面流速增大明显;

(2)旋转离心力影响沿程静压系数分布,径向出

流第1、3通道沿程静压系数逐渐增加,径向入流第2通道沿程静压系数迅速降低;

(3)沿程展向平均 Nu 逐渐降低,肋扰流产生二次流涡使沿程展向平均 Nu 呈多波峰状分布,转弯效应产生低速回流涡引起转弯下游 Nu 分布不对称;

(4)旋转使径向出流压力面 Nu 增大,径向入流吸力面 Nu 增大,使背向壁面换热略有减弱,径向出流吸力面换热减小,径向入流压力面换热减小,哥氏力指向壁面换热增加幅度比背向壁面减小幅度明显。

参考文献:

- [1] JANG Yongjun, CHEN Hamnching, HAN Jechin. Flow and heat transfer in a rotating square channel with 45-deg angled ribs by Reynolds stress turbulence model [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 124-132.
- [2] SU Guoguang, CHEN Hamnching, HAN Jechin. Computation of flow and heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ($AR=1:1$, $AR=1:2$, $AR=1:4$) with 45-deg angled ribs by a Reynolds stress turbulence model [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 603-612.
- [3] FU Wenlong, WRIGHT L M, HAN Jechin. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels ($AR=1:2$ and $AR=1:4$) with 45° angled rib turbulators [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 305-315.
- [4] ACHARYA S, AGARWAL P. Heat/mass transfer in a 4:1 AR smooth and ribbed coolant passage with rotation in 90-degree and 45-degree orientations [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 813-824.
- [5] CHO H H, KIM Y Y, RHEE D H. The effects of gap position in discrete ribs on local heat/mass transfer in a square duct [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2003, 10(7/9): 287-300.
- [6] LIU Yaohsien, HUH M, HAN Jechin. High rotation number effect on heat transfer in a triangular channel with 45°, inverted 45°, and 90° ribs [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2010, 132(7): 1-10.
- [7] MAURER M, VON WOLFERSDORF J, GRITSCH M. An experimental and numerical study of heat trans-

fer and pressure losses of V- and W-shaped ribs at high Reynolds numbers [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 219-228.

- [8] ABDEL W S, TAFTI D K. Large eddy simulation of flow and heat transfer in a 90° ribbed duct with rotation effect of Coriolis and centrifugal buoyancy forces [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 711-721.
- [9] AHN J, LEE J S. Large eddy simulation of flow and heat transfer in a channel with a detached rib array [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1): 445-452.
- [10] SCHROLL M, LANGE L, WLDWER M. Investigation of the effect of rotation on the flow in a two-pass cooling system with smooth and ribbed walls using PIV [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 1653-1664.
- [11] POSER R, WOLFERSDORF J V, LUTUM E, et al. Performing heat transfer experiments in blade cooling circuits using a transient technique with thermochromic liquid crystals [C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008. Norcross, GA, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 331-340.
- [12] 郑杰, 朱惠人, 赵曙, 等. 湍流模型对旋转状态下S型带肋回转通道内部换热特性的影响 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(3): 2090-2095.
ZHENG Jie, ZHU Hui ren, ZHAO Shu, et al. Influences of turbulence models on heat transfer of rotating ribbed S-bend passage [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(3): 2090-2095.
- [13] 苏福斌, 朱惠人, 郭涛, 等. 内冷通道带肋和出流孔壁面的换热研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1500-1506.
SU Fubin, ZHU Hui ren, GUO Tao, et al. Heat transfer enhancement within an internal passage by combinations of ribs and suction holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1500-1506.
- [14] 刘传凯, 丁水汀, 陶智. 旋转附加力对方通道内流动与换热的影响机理 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(3): 276-280.
LIU Chuankai, DING Shuiting, TAO Zhi. Effect of rotating induced forces on fluid flow and heat transfer in square channel [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(3): 276-280.

(编辑 刘杨 荆树蓉)