

文章编号:1674-8190(2014)03-320-06

# 旋转作用对带肋回转内通道换热特性影响

赵曙,朱惠人,郭涛,许都纯

(西北工业大学 动力与能源学院,西安 710072)

**摘要:** 为了深入了解旋转作用对回转内通道换热特征的影响,采用三维数值模拟方法研究旋转数、旋转半径对带肋内通道模型的流动换热影响。通道入口雷诺数为  $1.7 \times 10^4$ 、旋转数范围为  $0 \sim 0.09$ ,出口1、出口2、出口3的质量流量分配比为  $1:2:1$ ,旋转半径与水力直径之比的范围为  $0 \sim 69.6$ 。结果表明:旋转作用力使径向出流通道的压力系数逐渐增大,径向入流通道的压力系数迅速减小;径向出流通道后缘面的努赛尔数( $Nu$ )随旋转数增加而增大,径向入流通道后缘面的  $Nu$  随旋转数增加而减小,前缘面  $Nu$  随旋转数变化情况相反;前、后缘面  $Nu$  沿流向均随旋转半径与水力直径比的增加略有增大,旋转半径变化对壁面换热影响较小。

**关键词:** 带肋通道;旋转;对流传热;压力系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## Effects of Force on Heat Transfer for Rotating Internal Cooling Channels with Rib Turbulators

Zhao Shu, Zhu Huiren, Guo Tao, Xu Duchun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To better understand the effects of rotation on the internal channel heat transfer characteristics, the flow and heat transfer condition in an internal channel with  $90^\circ$  ribs are investigated using three-dimensional numerical simulation method. The inlet Reynolds number is  $1.7 \times 10^4$  and three outlets mass flow discharge ratio is  $1:2:1$ . The Rotating number and the hydraulic diameter divided by radius of gyration range from 0 to 0.09 and 0 to 69.6, respectively. The influence of Rotation number and Radius of gyration on heat transfer coefficient were achieved. Results show that the pressure coefficient increases along radial outflow and decreases along radial inflow due to rotational force; in the trailing surface, Nusselt number( $Nu$ ) in radial outflow passages increases and the  $Nu$  in radial inflow passage decreases with the augment of the rotation number, the variation of  $Nu$  in the leading surface contrary to that of the trailing surface; the  $Nu$  along the flow direction in trailing and leading surface are slightly enhanced when gyration radius to hydraulic diameter ratio increase, the surface heat transfer coefficient is affected on the variable radius of gyration.

**Key words:** ribbed channel; rotating; convective heat transfer; pressure coefficient

## 0 引言

现代航空发动机涡轮前燃气温度已远高于金属的熔点温度,合理的涡轮叶片冷却手段对提高发

动机热效率和保证发动机安全、稳定地提供推力起着至关重要的作用。目前,涡轮叶片冷却方式主要有内通道的强化吸热和外表面的良好隔热。内通道作为一种有效冷却手段,是在叶片内通道壁面布置强化换热肋,肋增加内通道换热面积,同时对冷气的扰流作用使边界层脱离而形成强度和尺度不同的漩涡,这些漩涡改变流体的流动结构,从而增加近壁流体湍流度以及流动涡与主流之间周期的质量交换,强化与壁面换热而降低叶片的温度。

收稿日期:2014-03-24; 修回日期:2014-05-04

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2013CB035702)

通信作者:赵曙,zhaoshu0312@163.com

国内外学者已对内通道冷却进行了大量的研究。Su Guogang 等<sup>[1]</sup>、Kyung Min Kim 等<sup>[2]</sup>、Han Jechin 等<sup>[3]</sup>采用数值及实验方法研究了旋转矩形通道在不同宽高比( $AR$ )、通道偏角( $\beta$ )时对流动特性的影响,揭示了旋转内通道壁面换热分布的影响因素;H. H. Cho 等<sup>[4]</sup>、T. Hagari 等<sup>[5]</sup>研究了矩形单通道中肋间距、肋排布等几何因素对通道流动损失及壁面换热影响,并揭示了肋分布方式对流动的影响机理;E. Sethuraman 等<sup>[6]</sup>、J. S. Park 等<sup>[7]</sup>、M. Huh 等<sup>[8]</sup>、F. Coletti 等<sup>[9]</sup>分别研究了旋转偏角、转弯导叶、旋转数、哥氏力及浮升力对旋转内通道流场的作用特征,得出旋转条件及附加作用力对内通道换热的影响;M. Schroll 等<sup>[10]</sup>、B. Nouri 等<sup>[11]</sup>、R. Poser 等<sup>[12]</sup>通过 PIV、TLC 等先进实验方法研究了旋转 U 型通道的流场分布及壁面换热系数,揭示了带肋内通道中的流动和换热机理;郑杰等<sup>[13]</sup>、付猛等<sup>[14]</sup>、刘传凯等<sup>[15]</sup>、邓宏武等<sup>[16]</sup>分别采用数值和实验方法研究了涡轮叶片回转内冷通道换热特性,得到了静止和旋转状态下内通道换热分布情况,以及旋转附加力对光滑及带肋通道流动换热的影响机理。

以上研究多数为单元体通道内部流动换热机理,单元体组合结构的流动换热及组合结构之间相互影响的研究较少,未考虑实际叶片内通道的多段通道连接关系和各段通道的截面形状变化。本文采用数值模拟方法研究叶片完整内通道模型的换热特性,考虑旋转作用力对回转通道换热分布的影响,得出回转通道压力分布、换热系数与旋转数、旋转半径的关系,为实际叶片内通道设计提供参考。

## 1 物理模型和计算方法

### 1.1 物理模型

带肋回转内通道模型(如图 1 所示)由三个带肋通道和两个  $180^\circ$ 转弯段组成,流体由入口沿径向出流方向进入第 1 通道,经过第 1 次转弯和出口 1 的分流后进入径向入流第 2 通道,再经过第 2 次转弯后进入径向出流第 3 通道,最后分别从第 3 通道顶部出口 2 和侧壁出口 3 排出;第 1、2 通道的前、后缘面交错分布着矩形直肋,第 3 通道的前、后缘面交错分布着楔形直肋;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,内通道总高度和总宽度分别为  $H=15.62d$ 、 $L=10.38d$ ;通道的旋转轴为  $x$  轴,旋转半径为  $R$ ,旋转方向是由通道的后缘面向前缘面。

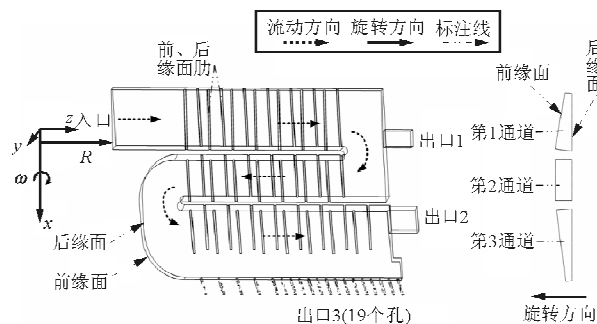


图 1 回转内通道几何模型

Fig. 1 Geometric model of internal cooling channel

### 1.2 网格划分

计算网格如图 2 所示。因通道截面形状变化、通道与出口交接面积变化、肋高度变化,将计算域划分为非结构混合网格;旋转作用力影响壁面附近的流动,因而对壁面附近的网格加密划分;肋的扰流作用使肋周围流场复杂化,采用密度核对肋附近区域的网格局部加密,对换热的壁面采用近壁处理函数,因此在前、后缘面上各添加 10 层边界层,并保证近壁面的第一层网格  $Y_{plus}<1$ ;经过网格无关性验证后,选取的计算网格总数约  $9.45 \times 10^6$ 。

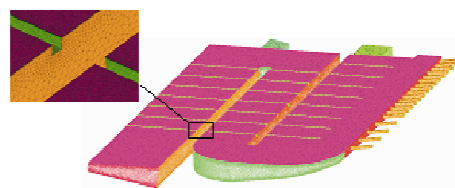


图 2 计算域网格

Fig. 2 Computing mesh

### 1.3 边界条件

使用商业软件 Fluent13.0 进行数值计算,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<sup>[19]</sup>。数值计算的边界条件为:入口给定质量流量进口条件,出口给定压力出口条件,壁面采用无滑移条件,给定壁面热流密度为  $2000\text{ W/m}^2$ ,湍流脉动能和耗散率均采用默认值。调整出口压力使得出口流量分配比例满足要求,计算中通过调整出口压力达到流量分配比例要求,求解器选用基于雷诺时均方程的压力分离隐式稳态

求解器,压力速度耦合采用 SIMPLE 方法,参数离散格式为二阶迎风格式,压力修正方程、连续方程、动量方程、 $k-\epsilon$  方程均实施亚松弛因子,求解收敛的判断标准为相对残差小于  $10^{-5}$  且不再减小。

## 1.4 参数定义

本文采用的主要参数有雷诺数( $Re$ )、旋转数( $Ro$ )、壁面换热系数( $h$ )、努塞尔数( $Nu$ )和沿程压力系数( $C_p$ ),其定义如下:

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

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

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

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

$$C_p = 2(p_i - p_{in}) / (\rho v_{in}^2) \quad (5)$$

式中: $\rho$ 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; $\mu$ 为动力黏度; $\omega$ 为旋转角速度; $q_w$ 为表面热流密度; $T_i$ 为内壁面节点温度; $T_{min}$ 为沿程流体温度; $\lambda$ 为理想气体导热系数; $p_i$ 截面上测点压力; $p_{in}$ 为通道入口压力。

数值计算模型选取与实际叶片内通道相同的气动工况、出口流量分配比例和旋转条件: $Re$ 为  $1.7 \times 10^4$ ,出口 1、2、3 的质量流量比为 1:2:1, $Ro$  范围为 0、0.03、0.06、0.09,旋转半径与水力直径比  $R/d$  为 0、23.2、46.4、69.6。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 旋转内通道传热分布云图

气动工况条件下,静止( $Ro=0$ )和旋转( $Ro=0.09$ )时带肋回转通道前、后缘面的  $Nu$  分布如图 3 所示。

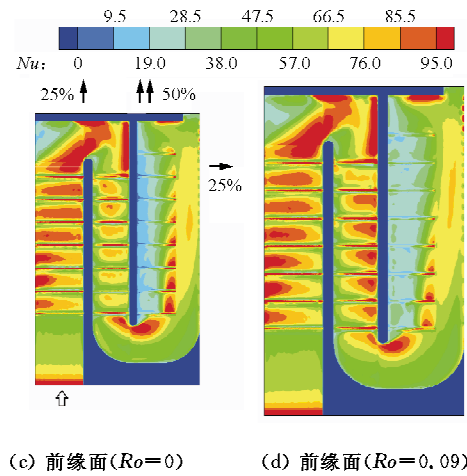
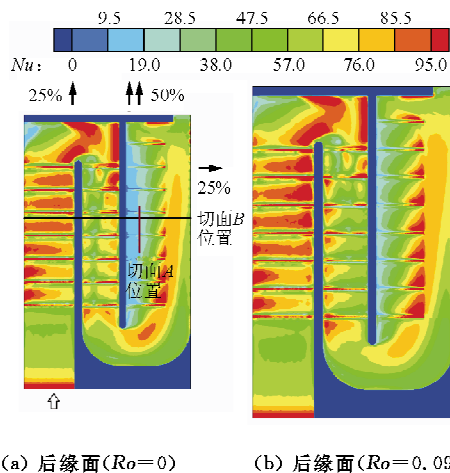


图 3 回转通道壁面  $Nu$  分布

Fig. 3 The  $Nu$  distribution of turning channels surface

静止回转通道的前、后缘面  $Nu$  分布与文献 [14,17] 中实验结果相似,主流受肋周期扰动形成肋间强化换热区,截面形状和转弯效应影响肋间换热分布,使三段带肋通道壁面  $Nu$  均不对称分布。旋转回转通道的前、后缘面换热受旋转哥氏力和浮升力影响,壁面局部  $Nu$  分布发生变化;图 3(b) 和图 3(d) 中带肋通道、转弯段的  $Nu$  分布受旋转数和旋转半径的影响规律不尽相同,第 1 通道后缘面的右侧靠近隔墙区域  $Nu$  略有增加,第 2 通道后缘面的右侧冲击区  $Nu$  减小,第 3 通道后缘面的右侧冲击区域  $Nu$  增大;3 段带肋通道的前缘面  $Nu$  增减情况与后缘面相反。这是由于哥氏力产生的截面二次流将流体推向哥氏力指向壁面<sup>[16]</sup>,使哥氏力指向壁面的流速增加,前、后缘面肋间的  $Nu$  增大;径向出流通道哥氏力指向后缘面,第 1、3 通道后缘面肋间换热系数增加,第 3 通道后缘面肋间换热增加幅度较大,旋转作用力对换热的影响沿流向逐渐增强;径向入流通道哥氏力指向前缘面,旋转使第 2 通道前缘面肋间的换热系数增加。旋转使第 1 转弯段后缘面和第 2 转弯段前缘面的换热系数稍有增加,这是由于转弯对涡与旋转作用力共同影响的结果,转弯作用使前、后缘面换热系数差别增加。旋转离心浮升力主要受流体与壁面温差影响,沿主流方向壁面与流体的温差逐渐减小,浮升力对壁面换热影响逐渐减弱。

图 3(a) 中切面 A、B 位置的速度场如图 4 所示。

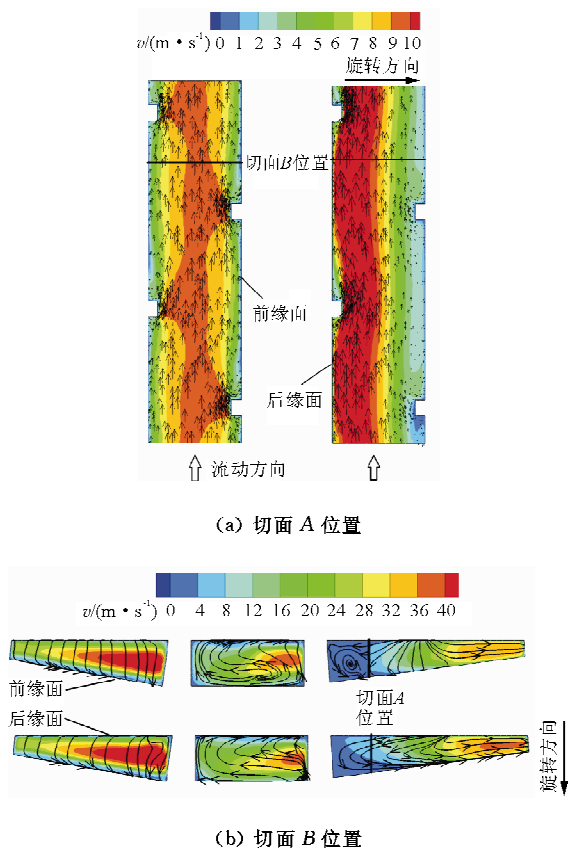


图 4 回转通道截面速度场分布  
Fig. 4 Velocity distribution of serpentine cooling channel cross-section

从图 4(a)可以看出: 静止带肋通道内主流受到肋的周期扰动分离和再附着增加了壁面附近的流速, 使壁面换热增强, 主流的速度场分布基本对称; 而旋转作用力使得主流明显偏向一侧壁面, 增大了偏向侧壁面附近的流速, 使偏向侧壁面的换热增强, 同时减小了主流偏离侧壁面附近的流速, 使偏离侧壁面的换热减弱。

从图 4(b)可以看出: 静止通道的速度分布不均匀是受到几何结构影响, 旋转作用力改变了横截面的流动方向, 使通道壁面附近的速度变化, 从而影响壁面的换热分布, 因此第 3 通道后缘面附近速度增加, 壁面的换热增强。

## 2.2 回转通道沿程展向平均换热

$Re=1.7 \times 10^4$ 、 $R/d=46.4$  时, 沿主流方向沿程展向的平均努赛尔数 ( $Nu_{av}$ ) 随  $Ro$  变化如图 5 所示,  $1/d$  为无量纲长度。

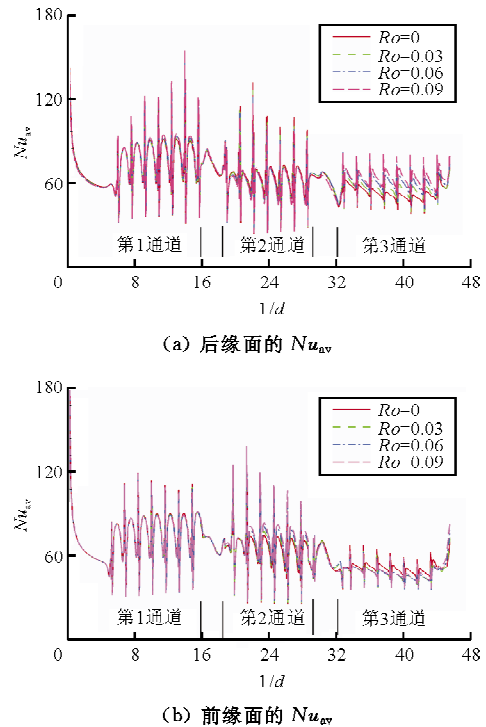
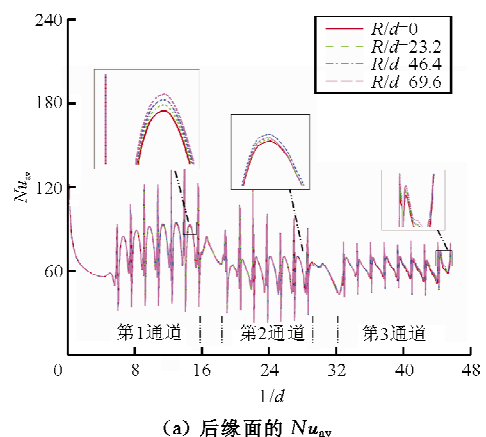


图 5 不同旋转数下的沿程展向平均努赛尔数  
Fig. 5 Spanwise average  $Nu$  variation with rotation number

从图 5 可以看出: 前、后缘面的  $Nu_{av}$  沿流向均呈多波峰状分布, 且流向肋的扰流作用逐渐减弱, 肋间高换热区域逐渐靠近肋下游背风面; 第 1、3 通道后缘面的  $Nu_{av}$  随  $Ro$  增大而增加, 前缘面的  $Nu_{av}$  随  $Ro$  增大而减小; 第 2 通道后缘面的  $Nu_{av}$  随  $Ro$  增大而略有减小, 前缘面的  $Nu_{av}$  随  $Ro$  增大而增加; 转弯段前、后缘面的  $Nu_{av}$  随  $Ro$  增大基本不变。随着旋转数增加, 哥氏力作用对哥氏力指向壁面换热增强效果较明显, 且沿流向影响的效果略有增大; 对哥氏力背向壁面的换热影响较弱。

$Re=1.7 \times 10^4$ 、 $R/d=0.9$  时, 沿主流方向沿程展向  $Nu_{av}$  随  $R/d$  变化, 如图 6 所示。



(a) 后缘面的  $Nu_{av}$

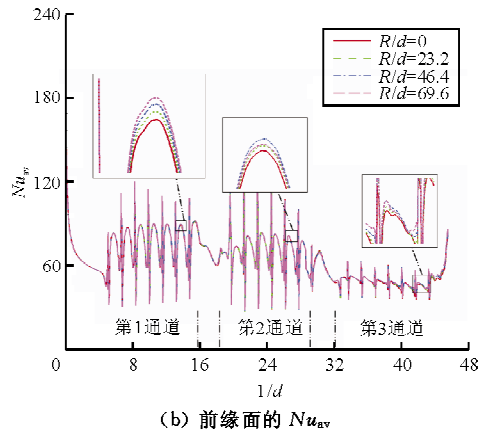
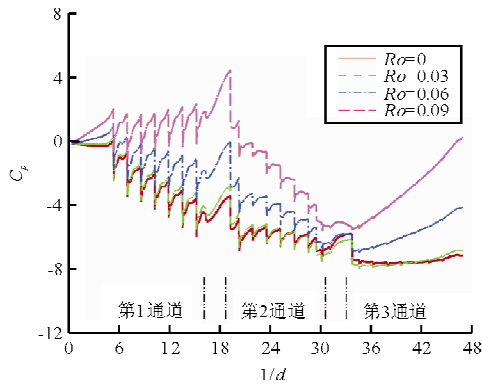


图6 不同旋转半径下的沿程展向平均努赛尔数  
Fig. 6 Spanwise average  $Nu$  variation with radius of gyration

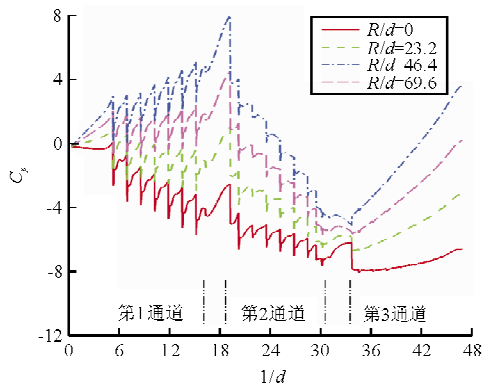
从图6可以看出:前、后缘面的 $Nu_{av}$ 随旋转半径增加而略有增大;在两肋间的高换热区,换热增加幅度极小,表明离心浮升力作用对旋转内通道换热增强不明显。

### 2.3 旋转回转通道压力系数分布

不同旋转数、旋转半径比时回转通道压力系数( $C_p$ )随流向位置的变化如图7所示。



(a) 旋转数对 $C_p$ 的影响( $R/d=46.4, Re=1.7 \times 10^4$ )



(b) 旋转半径对 $C_p$ 的影响( $Ro=0.09, Re=1.7 \times 10^4$ )

图7 回转通道压力系数分布

Fig. 7 Pressure coefficient distribution along turning channel

从图7可以看出:受通道肋的影响使压力系数呈多波峰状分布,且沿主流方向扰动逐渐减弱;两肋之间压力系数沿流向位置逐渐上升,这是由于肋使主流分离后在肋后形成回流低压区域,沿流向壁面的压力缓慢升高;静止工况( $Ro=0$ )时第1通道的 $C_p$ 沿流向位置降低幅度最大,第2通道的 $C_p$ 沿流向位置的降低幅度较小,受出口3沿程分流使第3通道 $C_p$ 沿流向位置略有增加,转弯段压力系数逐渐升高后迅速降低,转弯引起的 $C_p$ 降幅明显;随旋转数、旋转半径的增加使第1、3通道 $C_p$ 沿流向位置的减小幅度逐渐降低,第2通道 $C_p$ 沿流向位置的减小幅度加大,旋转半径增加的影响更为明显,由于旋转产生的离心力减小了径向出流通道的压力随位置的变化,同时增加了径向入流通道的压力随位置的变化;随旋转数、旋转半径的增大第1、2转弯段的压力系数差距逐渐增加;旋转使第1转弯段压力随位置减小幅度增大,使第2转弯段的压力随位置减小幅度降低。

## 3 结论

(1) 由于受到通道截面形状的影响,使第1通道的换热增强区域沿主流方向逐渐向第1转弯段的内侧隔墙偏移;第2、3通道的壁面换热分布受转弯分离形成的冲击射流和回流涡的影响,使下游通道远离转弯段的壁面换热较高,靠近转弯段的壁面换热较低。

(2) 旋转哥氏力、离心力的叠加作用使回转通道前、后缘面的换热分布发生了变化,径向出流通道的后缘面的 $Nu$ 随 $Ro$ 的增加而逐渐增大,径向入流通道的后缘面的 $Nu$ 随 $Ro$ 的增加而略有减小,且沿主流方向 $Nu$ 的变化幅度增大,转弯段后缘面的低换热区域减小;前缘面的 $Nu$ 增减情况与后缘面的相反。

(3) 带肋回转通壁面的沿程展向 $Nu_{av}$ 呈多波峰状分布,沿流向肋的扰流作用逐渐减弱,而且两肋之间高换热区域逐渐靠近肋的背风面;随着旋转数的增加,径向外流通道后缘面、径向内流通道前缘面的沿程展向 $Nu_{av}$ 均明显增大;随着旋转半径与水力直径比的增加,回转通道壁面换热均略有增大,旋转半径增大对换热增强的幅度不明显。

(4) 旋转作用使径向出流通道的压力系数沿流向位置的降低幅度减小,使径向入流通道的压力

系数沿流向位置的降低幅度增大,旋转半径增加对压力系数增减幅度的影响更明显。

### 参考文献

- [1] Su Guogang, 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]. ASME 2004-GT-53662, 2004.
- [2] Kyung Min Kim, Yun Young Kim, Dong Ilo Rhee. An investigation of duct aspect ratio effects on heat/mass transfer in a rotating duct with 90° ribs [C]. ASME 2011-GT-53533, 2011.
- [3] Han Jechin, Lei Jiang, Huh M. Effect of rib spacing on heat transfer in a two pass rectangular channel( $ar=2:1$ ) at high rotation numbers [C]. ASME 2011-GT-45926, 2011.
- [4] Cho H H, Lee S Y, Wu S J. 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.
- [5] Hagari T, Ishida K, Takeishi K I. Investigation on heat transfer characteristics of a cooling channel with dense array of angled rib turbulators [C]. ASME 2012-GT-68949, 2012.
- [6] Sethuraman E, Nikitopoulos D, Acharya S. Heat/mass transfer in rotating, smooth, high aspect-ratio( $4:1$ ) coolant channels with curved walls in 90 and 45 orientation[C]. ASME 2008-GT-50247, 2008.
- [7] Park J S, Lee D M, Lee D H, et al. Effect of guide vanes in the tip turn region on heat/mass transfer of rotating two-pass channel[C]. ASME 2012-GT-69521, 2012.
- [8] Huh M, Lei Jiang, Han Jechin. Influence of channel orientation on heat transfer in a two-pass smooth and ribbed rectangular channel( $ar=2:1$ ) under large rotation numbers [C]. ASME 2010-GT-22190, 2010.
- [9] Coletti F, Cresci I, Aers T. Time-resolved piv measurements of turbulent flow in rotating rib-roughened channel with coriolis and buoyancy forces [C]. ASME 2012-GT-69406, 2012.
- [10] Schroll M, Lange L, Elfert M. Investigation of the effect of rotation on the flow in a two-pass cooling system with smooth and ribbed walls using PIV[C]. ASME 2011-GT-46427, 2011.
- [11] Nouri B, Lehmann K, Kühborn A. Investigations on nusselt number enhancement in ribbed rectangular turbine blade cooling channels of different aspect ratios and rotation numbers[C]. ASME 2013-GT-94710, 2013.
- [12] 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]. ASME 2008-GT-331, 2008.
- [13] 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, 3(9): 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, 3(9): 2090-2095. (in Chinese)
- [14] 付猛, 郭涛, 赵曙. 涡轮带肋通道换热实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 4(12): 3276-3280.  
Fu Meng, Guo Tao, Zhao Shu. Heat transfer experiments of the whole channel with ribs of a turbine blade[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 4(12): 3276-3280. (in Chinese)
- [15] 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, 9(5): 751-755.  
Liu Chuankai, Tao Zhi, Ding Shuting, et al. Local heat transfer in a rotating smooth and ribbed U-shaped channels [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 9(5): 751-755. (in Chinese)
- [16] 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, 7(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, 7(4): 411-416. (in Chinese)
- [17] 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, 2(48): 125-130.  
Zhao Shu, Zhu Hui ren, 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, 2(48): 125-130. (in Chinese)

### 作者简介:

赵曙(1984—),男,博士研究生。主要研究方向:航空发动机热端部件冷却技术。

朱惠人(1958—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:航空发动机热端部件冷却技术。

郭涛(1976—),男,博士,副教授。主要研究方向:航空发动机热端部件冷却技术。

许都纯(1960—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机热端部件冷却技术。

(编辑:赵毓梅)