

旋流对旋转受限层板换热的影响

白国强, 常海萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 应用数值模拟的方法,模拟了旋转受限层板内旋流对层板换热的影响.研究表明:在冲击受限层板内,由于侧壁面会产生对称的旋流,对哥氏力产生的二次流具有抑制作用,有利于旋转受限层板换热;旋转导致的离心力和哥氏力显著地影响旋流的作用,旋流的作用区域随着转速的增加而减小.合理设计旋转受限层板的长度可以增加旋转受限层板的换热.

关 键 词: 离心力; 哥氏力; 受限层板; 旋流; 换热

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of spirality flow on heat transfer in rotating limited lamilloy

BAI Guo-qiang, CHANG Hai-ping

(Jiangsu Province Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The effect of spirality flow on heat transfer in limited lamilloy was researched by numerical simulation in rotation state. It is found that because of the side wall, the symmetric spirality flow was encased in the rotating limited lamilloy, which can restrain secondary flow produced by Coriolis force, contributing to the heat transfer in rotating limited lamilloy. The centrifugal force and Coriolis force have a significant impact on spirality flow. The impact field of spirality flow decreases with the increasing rotation speed. The heat transfer of rotating limited lamilloy can be increased by designing the length of rotating limited lamilloy reasonably.

Key words: centrifugal force; Coriolis force; limited lamilloy; spirality flow; heat transfer

现代航空发动机对冷却效果的要求越来越高,层板冷却方式集冲击冷却、对流冷却、气膜冷却为一体,越来越受到广泛的重视^[1].在旋转叶片中,流体由于受到离心力、哥氏力及其衍生的浮升力的作用,其流场分布和换热特性将不同于静止状态.国内外学者已经对旋转状态下叶片的换热进行了一定的研究. Mattern 等^[2]、Parsons 等^[3-6]、吴宏等^[7]、袁锋等^[8]、Akella 等^[9]对旋转冲击通道进行了详细的研究,研究结果表明,旋转降低了通道的换热能力. Chen 等^[10]、Chang 等^[11]、Xun 等^[12]研究认为哥氏力导致的二次流是导致

旋转影响通道换热的主要原因.旋转受限层板(以下简称受限层板)能够有效地抑制旋转状态下离心力、哥氏力及其衍生的浮升力对层板换热能力的影响. Wang^[13]、徐磊等^[14]、张镜洋等^[15]对受限层板进行了数值和试验研究,研究表明,旋转导致的离心力和哥氏力以及冲击雷诺数显著地影响受限层板的换热能力.

以往对受限层板的研究,主要关注离心力、哥氏力以及受限隔板的导热对层板换热能力的影响,对在受限层板中由于冲击和受限层板造成的旋流以及旋流与离心力、哥氏力之间的作用研究

较少.在旋转叶片中,了解离心力对旋流之间的作用规律,有利于指导设计旋转叶片冷却结构.本文主要采用数值模拟的方式,揭示出在受限层板中旋流对层板换热的影响机理,以及在旋转状态下离心力对旋流的影响规律.

1 计算模型与边界条件

1.1 计算模型

在受限层板中,冷却流体通过冲击孔到达靶面后,形成壁面射流,壁面射流到达侧壁面后,由于受到侧壁面的阻挡,对侧壁面冲击,形成冲击旋涡,在压力梯度的作用下,流体向下游流动,所以形成了旋流.

受限层板中旋流如图 1 所示,通道由冲击孔、出流孔、冲击板、靶板和四周侧壁组成.具体坐标定义如下:通道垂直于流向的横截面方向为 x 方向,射流孔向出流孔流动方向为 y 方向,板间距方向为 z 方向.其中通道板间距 $h=6d$,通道宽度 $w=10d$,通道长度 $L=20d$, d 为进口孔直径.

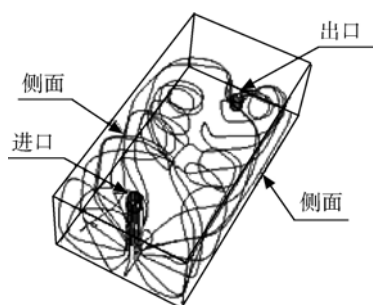


图 1 受限层板中旋流示意图

Fig. 1 Spirality flow sketch in limited lamilloy

1.2 参数定义

本文涉及的参数定义如下:

冲击雷诺数

$$Re_j = \frac{V_j d_i}{\nu}$$

其中 V_j 为冲击孔进口速度, d_i 为冲击孔直径, ν 为流体运动黏度.本文中冲击雷诺数 $Re_j=5000$.

努塞尔数

$$Nu = \frac{q d_i}{(T_w - T_f) \lambda}$$

其中 q 为壁面热流密度, T_w 为壁面平均温度, T_f 为冷气平均温度, λ 为空气导热系数.

冷气平均温度

$$T_f = \frac{T_{in} - T_{out}}{2}$$

其中 T_{in} 为冷气进口温度, T_{out} 为冷气出口温度.

旋转数 Ro

$$Ro = \frac{\omega d_i}{V_j}$$

其中 ω 为旋转角速度.

1.3 网格划分及网格独立性验证

采用商业软件 Fluent 6.3 来模拟受限层板内部流场.网格采用软件 Gambit 划分.大部分网格采用结构化网格,通道壁面附近进行网格加密(见图 2).网格独立性验证发现,当网格数达到 60 万以后,靶面 Nu 变化非常小(见图 3),所以整个模型网格数目大致为 65 万.

本文三维雷诺平均控制方程采用控制容积法进行离散,分离式求解,压力、速度耦合采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法,对流项采用 2 阶迎风进行离散,收敛的判断依据为相对残差小于 10^{-6} .

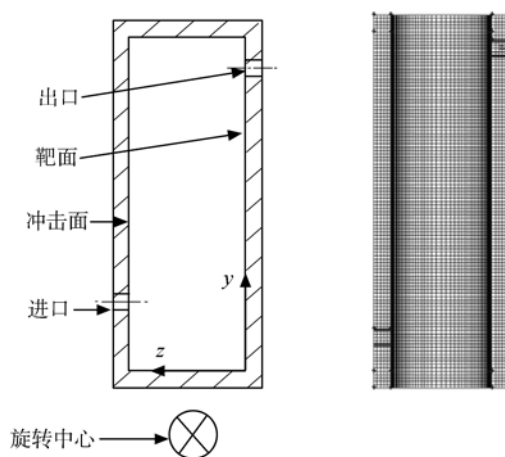


图 2 受限层板模型和网格

Fig. 2 Model and mesh of limited lamilloy

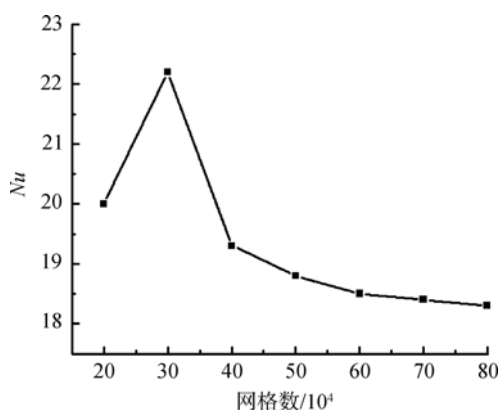


图 3 网格独立性验证

Fig. 3 Test for grid independence

1.4 湍流模型选取

通过与文献[16]所做的旋转单孔冲击试验数据对比,合理选取湍流模型.采用标准 $k-\epsilon$ 模型(SKE)、增强 $k-\epsilon$ 模型(EKE)、标准壁面 $k-\epsilon$ -重整化群模型(SRNG)、增强壁面 $k-\epsilon$ -重整化群模型(ERNG)、标准壁面方均根模型(SRSM)、增强壁面方均根模型(ERSM)和切应力输运- $k-\omega$ 模型(SSTKW)分别验证.计算过程中,近壁面的处理方式对计算准确性影响很大,本文在近壁面处理方法分别采用标准壁面函数法和增强型壁面函数法.验证模型和结果见图4和图5.

从图5中可以看出,增强型壁面函数法的计算结果接近试验值,ERSM最接近试验值,计算值与试验值的误差在10%之内,所以认为在模拟旋转条件下冲击出流模型时,采用增强壁面方均根模型是可靠的,这与 Sathyamurthy^[17]、徐磊^[18]的结论一致.本文采用增强壁面方均根模型.

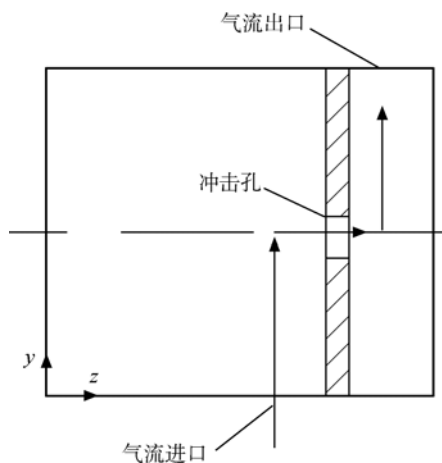


图4 湍流模型验证模型

Fig.4 Verification model for turbulence model

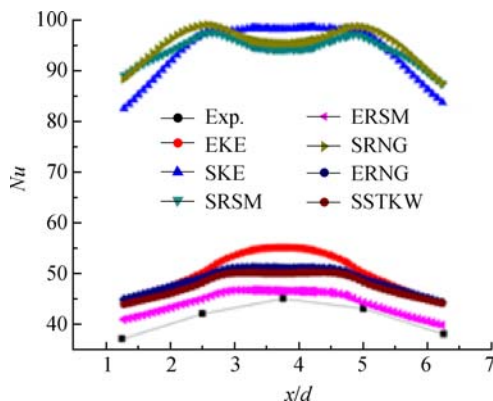


图5 湍流模型计算结果与试验结果对比

Fig.5 Computational and experimental results comparison of turbulent models

1.5 边界条件

进口采用速度进口,保证冲击雷诺数 $Re_i = 5000$,设置进口的湍流强度为2%.出流孔设置为压力出口.靶板外侧采用等热流密度加热,侧壁参与导热.

2 计算结果与分析

采用图6所示结构,通过流体流过矩形管道的方式来模拟无旋流的状态.在这种结构中,流体通过进口流过通道,而不是采用冲击靶面的形式进入通道,这样可以避免由于冲击的作用产生旋流,从而达到无旋流的状态.图7是旋转状态下无旋流和有旋流的流场速度矢量图.旋转状态无旋流时,通道中流体受到哥氏力的作用,流体产生背离加热面的二次流.采用冲击射流加出流孔的结构后,由于冲击和侧壁面的阻挡产生旋流.在旋流的作用下,流体在通道中产生由冲击面指向靶面的二次流,该二次流与哥氏力产生的二次流作用方向相反,抑制哥氏力产生的二次流.相对于无旋流的通道,由于旋流产生的二次流对靶面有冲击的作用,所以有利于受限层板的换热.

图8是冲击雷诺数 $Re_i = 5000$,转速分别为0, 5 000, 10 000 r/min (对应的 Ro 分别为0,

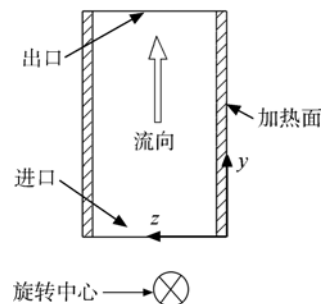
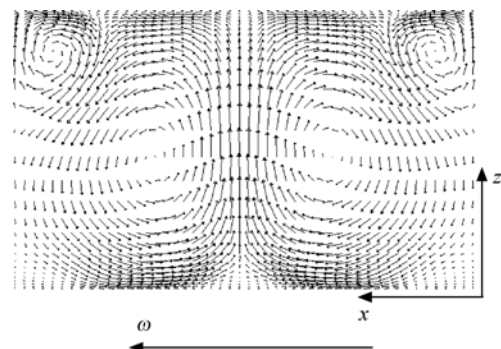


图6 无旋流模型

Fig.6 Model without spirality flow



(a) 无旋流

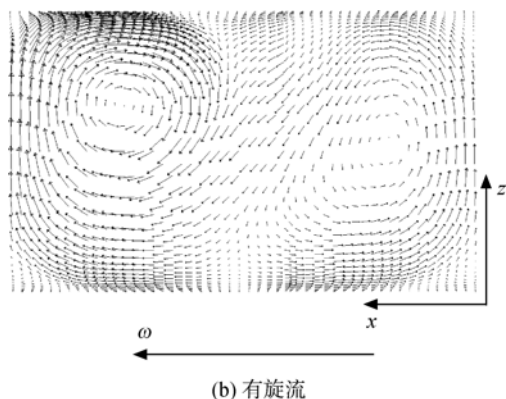


图 7 旋转状态下有无旋流的流场速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector diagram of flow field with and without spirality flow in rotation

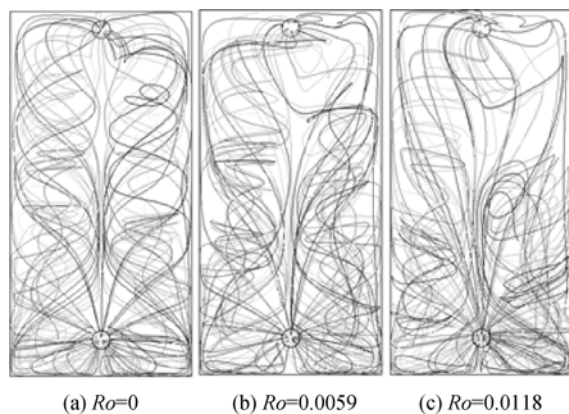
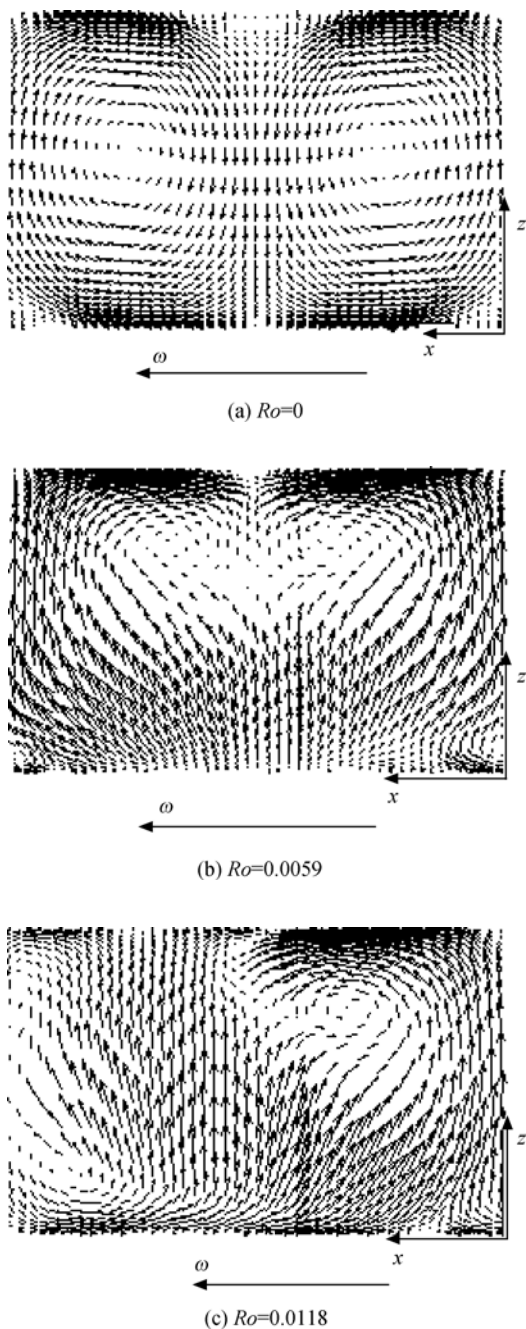


图 8 不同旋转数的流动迹线

Fig. 8 Airflow lines with different rotation numbers

0.0059, 0.0118) 时受限层板内流体的流动迹线。从图中可以看出, 流体通过冲击孔冲击到靶板后, 由于靶板的作用, 形成滞止区, 然后形成壁面射流, 当射流到达侧壁面后, 由于侧壁的阻碍作用, 以及压力梯度的作用, 在通道中形成比较对称的旋流, 正是由于旋流不断对靶面进行冲击, 从而强化了壁面的换热。对比图 8 中不同旋转数的 3 幅图还可以发现, 在冲击雷诺数不变的条件下, 随着旋转数的增加, 在靠近出流孔的下游区域, 旋流的影响程度逐渐降低。旋转数为 0.0059 时, 旋流在距离出流孔大约 $L/3$ 的区域消失, 而在旋转数为 0.0118 时, 旋流在距离出流孔大约 $L/2$ 的区域消失。

取 $L/2$ 处流场速度矢量图 (图 9) 观察发现, 静止时通道内形成非常对称的旋流, 旋流依次对靶面、侧壁面、冲击面造成冲击, 强化换热。随着旋转数的增加, 离心力和哥氏力逐渐增加, 哥氏力的作用逐渐显现出来, 哥氏力导致的背离靶面指向

图 9 不同旋转数 $L/2$ 处流场速度矢量图Fig. 9 Velocity vector diagram of flow field at $L/2$ with different rotation numbers

冲击面的二次流影响越来越显著, 旋流的作用受到抑制, 换热能力减弱。

图 10 是 $L/2$ 处流场温度图。可以看到, 随着旋转数的增加, 近壁面处温度梯度逐渐减小, 换热能力逐渐降低。

旋转数的增加, 导致离心力和哥氏力逐渐增加, 旋流的作用逐渐减弱, 近壁面处流体温度梯度减小, 换热能力降低, 壁面温度升高 (图 11)。

图 12 为层板内流体在不同位置时受到哥氏

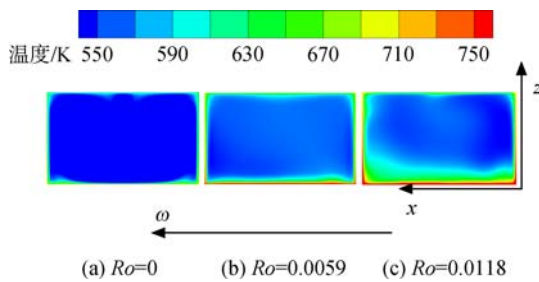
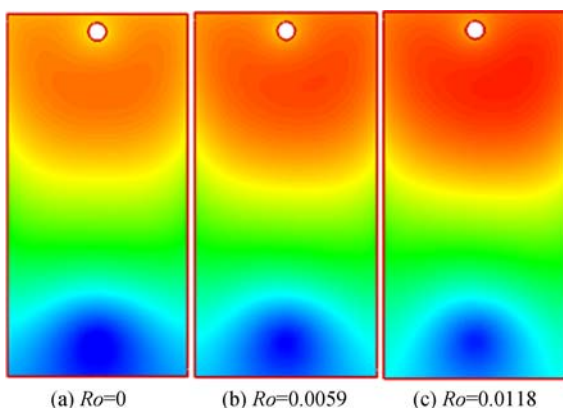
图 10 不同旋转数 $L/2$ 处流场温度图Fig. 10 Temperature diagram of flow field at $L/2$ with different rotation numbers

图 11 不同旋转数流场迹线及靶面温度

Fig. 11 Flow track and temperature of target surface with different rotation numbers

力和离心力的示意图. 在射流区域, 哥氏力 (F_{Co}) 和离心力 (F_{ce}) 的方向均指向下游, 在平行于层板流动区域, 离心力指向下游出口方向, 哥氏力背离靶面指向冲击面方向. 由于离心力始终指向沿半径向出口方向 (y 正方向), 转速越大, 旋转半径越大, 离心力越大, 流体在向出口流动的过程中, 离心力逐渐增加, 使流体在 y 方向的速度分量增大, 从而抑制了旋流的继续发展, 旋流流动减弱直至消失. 由于旋流对哥氏力具有抑制作用, 旋流增强流体换热, 哥氏力产生的二次流减弱流体换热, 所以旋流减弱后, 层板靶面的换热会逐渐减弱.

图 13 是靶面平均 Nu 随旋转数的变化. 随着旋转数的增加, 靶面平均 Nu 降低, 所以可以认为旋转数的增加导致离心力增加, 削弱了旋流的影响, 降低了靶面的换热能力.

对于冲击面, 冲击射流到达靶面后, 沿靶面到达侧壁面, 流体再沿侧面到达冲击面, 对冲击面造成冲击 (图 14). 同样, 旋流也沿着侧壁面到达冲击面对冲击面冲击. 所以造成冲击面在靠近侧壁面附近的 Nu 较高. 转速增加, 离心力增加, 旋流

作用减弱, 冲击面的 Nu 降低.

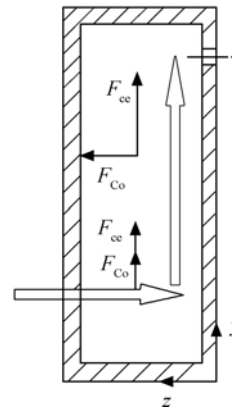
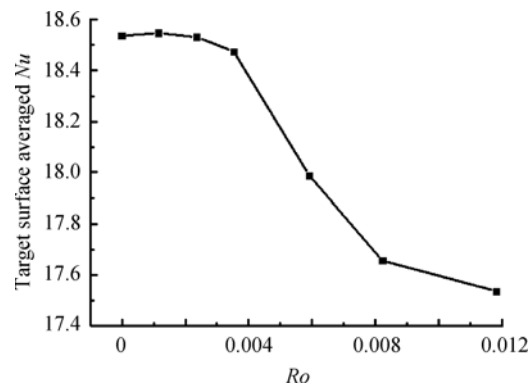
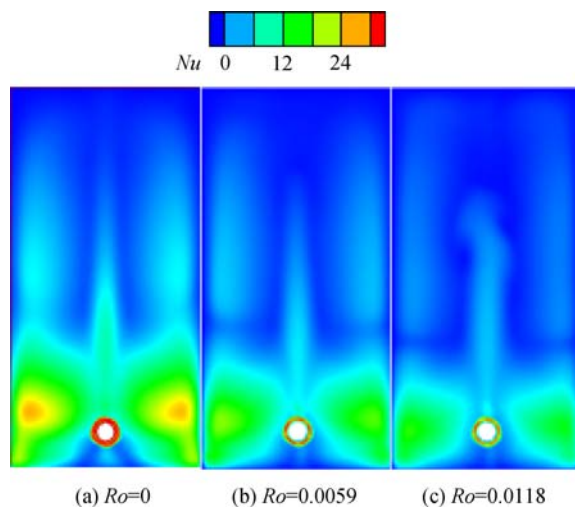


图 12 离心力和哥氏力在受限层板中的作用

Fig. 12 Effect of centrifugal force and Coriolis force in limited lamolloy

图 13 靶面平均 Nu 随旋转数的变化Fig. 13 Target surface averaged Nu varying with rotation number图 14 冲击面 Nu 随旋转数的变化Fig. 14 Nu at impact face varying with rotation number

由前侧壁面 Nu 分布图(图 15)看出,前侧壁面 Nu 随着旋转数的增加而不断减小. 由于旋转数的增加,离心力增加,离心力指向下游,抑制流体向上游流动,流体速度降低,使射流造成漩涡的能力降低,冲击射流造成的射流上游冲击涡逐渐减小,换热能力降低(图 16、图 17).

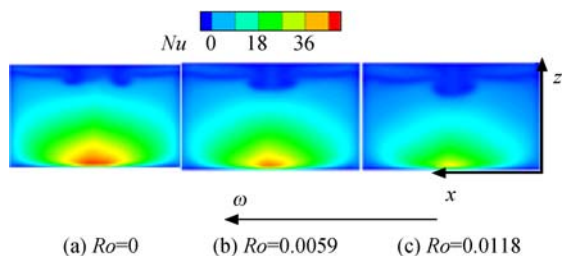


图 15 前侧壁面 Nu 随旋转数的变化

Fig. 15 Nu at front side wall varying with rotation number

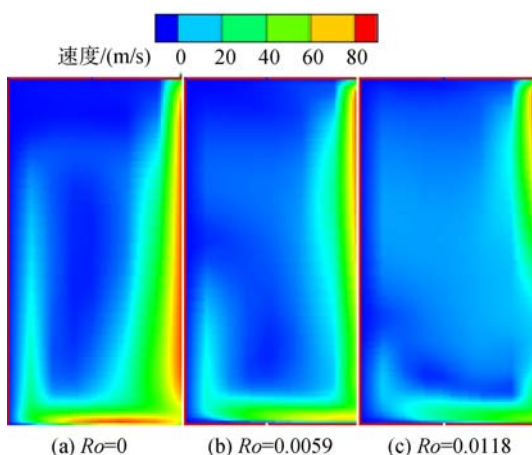


图 16 不同旋转数冲击射流上游流体速度分布

Fig. 16 Velocity profile at upstream of jet flow with different rotation numbers

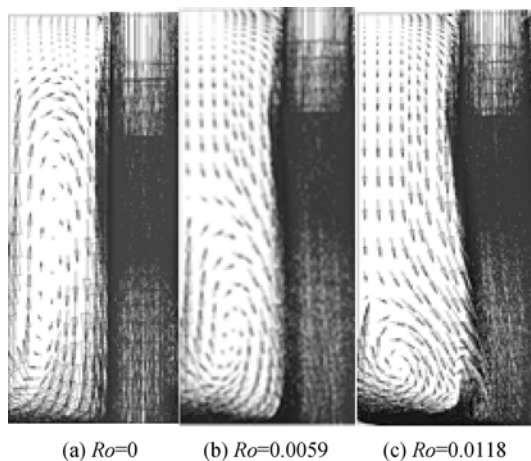


图 17 不同旋转数冲击射流上游流体速度矢量图

Fig. 17 Velocity vector diagram at upstream of jet flow with different rotation numbers

3 结 论

本文通过数值模拟研究旋转受限层板结构中旋流对受限层板换热的影响,在本文研究的模型中,得出如下结论:

1) 在冲击受限层板中,产生对称的旋流,旋流抑制旋转导致的哥氏力,有利于受限层板换热.

2) 转速会显著地影响受限层板内旋流的流动,随着转速的增加,受限层板内旋流会被逐渐减弱,从而降低受限层板的平均传热系数.

3) 根据转速,合理设计受限层板的长度,可以有效利用旋流对受限层板换热能力的增加.

参考文献:

- [1] Nealy D A, Relder S B. Evaluation of laminated porous wall material for combustor liner cooling[J]. Journal of Engineering for Power, 1980, 102(2): 268-276.
- [2] Mattern C, Hennecke D K. Influence of rotation on impingement cooling[R]. ASME Paper 96-GT-161, 1996.
- [3] Parsons J A, Han J C. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with heated target walls and radially outward cross flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(13): 2059-2071.
- [4] Parsons J A, Han J C, Lee C P. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with four heated walls and radially outward cross flow[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 20(1): 79-85.
- [5] Parsons J A, Han J C. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with film coolant extraction[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2001, 7(2): 87-103.
- [6] Parsons J A, Han J C. Jet-impingement heat transfer in rotating channels with staggered extraction flow[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19(2): 156-162.
- [7] 吴宏,陶智,徐国强,等.带气膜出流的旋转叶片冲击冷却的实验研究[J].航空动力学报,2000,15(4):375-380.
WU Hong, TAO Zhi, XU Guoqiang, et al. Experiments of impinging cooling in leading edge of rotating blades with outflow film[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 375-380. (in Chinese)
- [8] 袁锋,吴亚东,竺晓程.旋转对涡轮叶片气膜冷却影响的数值模拟[J].动力工程,2007,27(2):161-164.
YUAN Feng, WU Yadong, ZHU Xiaocheng. Numerical simulation study on the effect of rotation on film cooling of turbine blades[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(2): 161-164. (in Chinese)
- [9] Akella K V, Han J C. Impingement cooling in rotating two-pass[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(4): 475-491.

- [10] Chen H C, Jang Y J, Han J C. Computation of heat transfer in rotating two-pass square channels by a second-moment closure model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(9): 1603-1616.
- [11] Chang S W, Morris W D. Heat transfer in a radially rotating square duct fitted with in-line transverse ribs[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42(3): 267-282.
- [12] Xun Q Q, Wang B C, Yee E. Large-eddy simulation of turbulent heat convection in a spanwise rotating channel flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(1): 698-716.
- [13] Wang K. Rotation effect on jet impingement heat transfer in a narrow cavity with film extraction flow[R]. Chengdu: 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, 2010.
- [14] 徐磊, 常海萍, 潘金栋. 旋转条件下带出流孔的受限空间内冲击换热[J]. *推进技术*, 2008, 29(2): 149-152.
XU Lei, CHANG Haiping, PAN Jindong. Heat transfer of impingement in limited room configuration with effusion in rotating state[J]. *Journal of Proulsion Technology*, 2008, 29(2): 149-152. (in Chinese)
- [15] 张镜洋, 常海萍, 徐磊. 转子叶片径向受限的“冲击-气膜出流”冷却结构流动与换热[J]. *推进技术*, 2011, 32(1): 125-139.
ZHANG Jingyang, CHANG Haiping, XU Lei. Flow and heat transfer characteristics of “impingement-film cooling” configuration in limited space of rotating blade[J]. *Journal of Proulsion Technology*, 2011, 32(1): 125-139. (in Chinese)
- [16] 白云峰. 旋转条件下冲击冷却数值模拟及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
BAI Yunfeng. Numerical simulation and experiment research on the effect of rotation on jet impingement cooling [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [17] Sathyamurthy K P. Prediction of turbulent flow and heat transfer in a rotating square duct with a 180 degree bend [R]. ASME Paper 94-GT-197, 1994.
- [18] 徐磊. 静止和旋转条件下“冲击/稀疏气膜”双层壁换热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
XU Lei. Heat transfer of “impingement/sparse film holes” double plant in static and rotating state[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)