

旋转衍生力在旋转受限层板中的分布规律

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: 采用数值模拟的方法,研究了旋转衍生力在旋转受限层板中的分布规律.研究表明:由于冷却流体被加热,离心力随着旋转半径的增加而降低,近壁面处离心力较低,远离壁面区域离心力较高. y 方向哥氏力在进出口区域影响较大,中间区域可以忽略. z 方向哥氏力在进出口区域影响较大,中间段随转速和旋转半径的增加而缓慢增加.离心力衍生的浮升力在冲击区域附近加速流体流动,在其他区域的近壁面处,离心力衍生的浮升力阻碍流体流动,在远离壁面区域,离心力衍生的浮升力加速流体流动.在中间段,离心力和离心力衍生的浮升力起主导作用.

关 键 词: 离心力; 哥氏力; 浮升力; 层板; 分布规律

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Distribution of forces induced by rotation 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 distribution of forces induced by rotating limited lamilloy was researched by numerical simulation. It was emphasized that because the cool fluid was heated, the centrifugal force was reduced with the increase of the radius, and became lower near the wall, but higher far from the wall. The Coriolis force directed y was evident in the areas of inlet and outlet, but it could be ignored in the middle of lamilloy. The Coriolis force directed z was evident in the areas of inlet and outlet, and increased slowly with the increase of the rotation speed and radius. The buoyancy force caused by centrifugal force increased the velocity of fluid near impact zoo, but in the other zoo and near the wall, it decreased the velocity of fluid, and far from the wall, it also increased the velocity of fluid. In the middle lamilloy, centrifugal force and buoyancy force caused by centrifugal force played a leading role.

Key words: centrifugal force; Coriolis force; buoyancy force; lamilloy; distribution

航空发动机涡轮旋转叶片中,旋转导致的旋转衍生力(离心力 F_{ce} 、哥氏力 F_{Co} 以及浮升力)对内部冷却通道中冷却流体的影响非常显著,从而显著影响了冷却流体的流动和换热状况.国内外学者对旋转通道中离心力、哥氏力及其衍生的浮升力进行了深入的研究. Hector 等^[1]研究了离心

力对旋转矩形通道中流体的影响,当流体从旋转中心向外流出时,离心力增加壁面处边界层的厚度,同时削弱近壁面处的湍流强度.当流体向旋转中心流动时,离心力作用形式相反. Taylor 等^[2]指出,在壁面处,径向速度很小,从而切向哥氏力很小.在管道中心处,切向哥氏力增大,将中心处

的流体推向壁面,然后沿壁面流动,形成回流. Wagner 等^[3-5]研究认为,由于哥氏力产生的二次流改变了壁面附近流体的流动,所以对近壁面流体的换热产生明显的影响. Murata 等^[6]、Pallares 等^[7]研究认为,旋转状态下,哥氏力产生的两个二次流流动方向是相反的,都是从稳定的壁面区流向中间的不稳定区.在通道高度较大时,哥氏力衍生的二次流的作用较为显著.白国强等^[8]认为,在带隔板的层板中,冲击射流产生的旋流会抑制哥氏力的影响. Murata 等^[9]对浮升力进行了必要的研究,研究认为主流的方向将决定哥氏力的作用方式,哥氏力的作用形式将造成二次流使壁面附近的流体温度发生变化,产生温差后将进一步造成浮升力的影响. Murata 等^[10]还认为主流方向不同,会导致浮升力对哥氏力形成的二次流的作用形式不同. Soong^[11]对旋转状态下非等温流体进行了研究,认为在冷侧壁面流体密度比较高,热侧壁面流体密度比较低,因此在冷侧壁面流体浮升力有利于流体流动而在热侧壁面流体浮升力阻碍流体流动. Prakash 等^[12]、Dutta 等^[13]、Ekkad 等^[14]、Hwang 等^[15]分别研究认为,高的浮升力的条件下,浮升力能够引起流体在近壁面处分离,从而影响流体的换热.层板冷却结构中既有冲击又有对流传热,而且层板结构通道高度相对于通道宽度较小,因此在动叶层板这种狭小的冷却结构中,旋转衍生力对流动换热的影响将更加复杂.

本文主要研究旋转受限层板中冷却流体受到的旋转衍生力的分布规律.

1 模型和边界

1.1 简化模型

计算模型见图 1. 流体从进口流入,到达靶面后,沿半径向出口流出.

相关参数:转速 $n=1000\sim10000\text{ r/min}$; 旋转半径 $R=0.5\text{ m}$; 冲击孔直径 $d=0.0008\text{ m}$; 间距比 $\delta/d=0.625$; 长度比 $l/d=12.5$; 宽高比 $R_a=w/\delta=12$.

1.2 参数定义

本文涉及的参数定义如下:

表面传热系数 h

$$h = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (1)$$

其中 q 为靶面热流密度 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); T_w 为靶面温度 (K); T_f 为流体平均温度 (K).

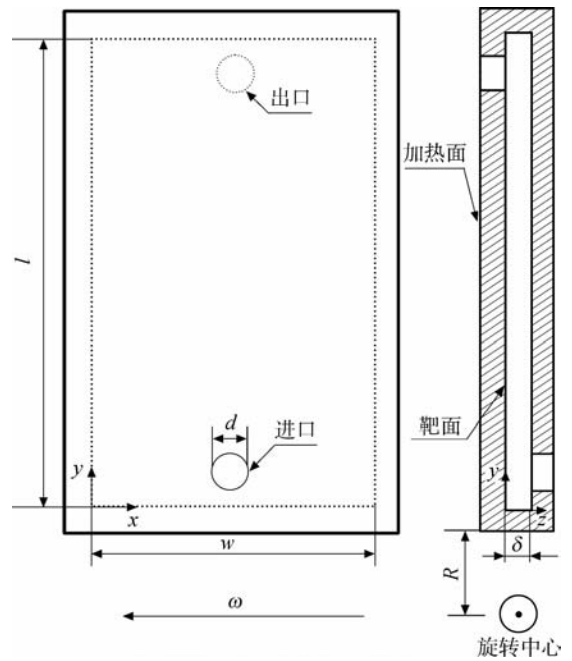


图 1 旋转受限层板模型图

Fig. 1 Model of rotating limited lamilloy

努塞尔数 Nu

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (2)$$

其中 λ 为流体导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

流体平均温度 T_f

$$T_f = (T_{in} - T_{out})/2 \quad (3)$$

其中 T_{in} 进口处流体温度 (K); T_{out} 为出口处流体温度 (K).

离心力 F_{ce}

$$F_{ce} = \rho\omega^2 R \quad (4)$$

其中 ρ 为流体密度 (kg/m^3); ω 为旋转角速度 (rad/s).

y 方向哥氏力 F_{Coy}

$$F_{Coy} = 2\rho\omega \times V_z \quad (5)$$

其中 ω 为旋转角速度矢量 (rad/s); V_z 为 z 方向相对速度矢量 (m/s).

z 方向哥氏力 F_{Coz}

$$F_{Coz} = 2\rho\omega \times V_y \quad (6)$$

其中 V_y 为 y 方向的相对速度矢量 (m/s).

离心力衍生的浮升力 F_{fce}

$$F_{fce} = -\rho_0\gamma\omega^2\Delta T \quad (7)$$

其中 ρ_0 为流体参考密度 (kg/m^3); γ 为流体膨胀系数; $\Delta T = T - T_0$ 为流体当地温度 T 与参考温度 T_0 之差 (K), 以所研究截面上流体平均密度和温度为参考密度和参考温度.

y 方向哥氏力衍生的浮升力 F_{fCoy}

$$F_{fCo_y} = -2\rho_0 \gamma \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_z \Delta T \tag{8}$$

z 方向哥氏力衍生的浮升力 F_{fCo_z}

$$F_{fCo_z} = -2\rho_0 \gamma \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_y \Delta T \tag{9}$$

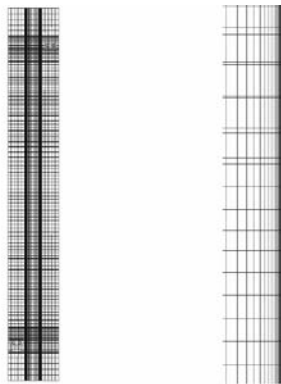
旋转数 N_{ro}

$$N_{ro} = \omega d / V \tag{10}$$

其中 V 为流体进口速度(m/s).

1.3 网格生成

网格采用 GAMBIT2.3 软件分块生成结构化和部分非结构化网格. 流体域和固体域交界面处进行网格加密处理, 网格见图 2.



(a) 层板网格分布 (b) 近壁面区网格加密

图 2 旋转受限层板网格

Fig. 2 Rotating limited lamilloy mesh

采用分离式求解方式求解雷诺控制方程, 同时采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法和 2 阶迎风格式, 计算残差要求小于 1×10^{-6} . 由于考虑到流体温度的不同导致密度不同, 密度的改变进而造成浮升力的改变, 对密度进行线性化处理

$$\rho = \rho_0 [1 - \gamma(T - T_0)] = \rho_0 (1 - \gamma \Delta T) \tag{11}$$

分别采用 5 万、10 万、15 万、20 万、25 万、30 万、35 万、40 万的 8 种网格数量验证网格的独立性. 计算结果表明, 靶面表面传热系数随网格数量的增加而减小, 并接近于一个恒定的数值, 可以认为, 此时网格数量对计算结果的影响已经不再显著. 从图 3 可以看出, 当网格数量达到 25 万以后, 表面传热系数的变化量非常小, 本文在计算中, 网格数量采用 30 万.

1.4 湍流模型

分别采用不同的湍流模型对文献[16]中旋转单孔冲击试验进行模拟, 计算结果与试验数据对比, 从而选出适合模拟旋转冲击冷却结构的湍流

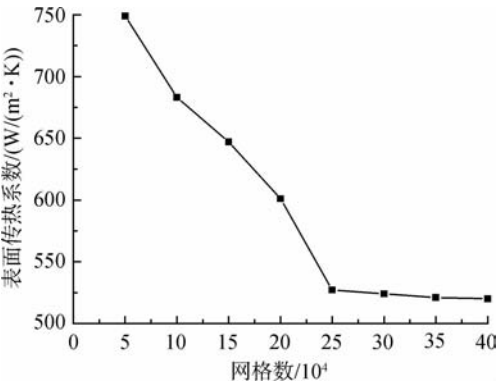


图 3 表面传热系数随网格数量的变化

Fig. 3 Diversification of surface heat transfer coefficient with mesh number

模型, 旋转单孔冲击试验模型如图 4 所示. 本文所采用的湍流模型分别为: 湍动能耗散率模型($k-\epsilon$)、 $k-\epsilon$ 重整化群模型(RNG)、雷诺应力模型(RSM)、剪切压力传输(SST)的 $k-\epsilon$ 模型. 分别采用标准壁面函数法和增强壁面函数法进行近壁面处理. 计算过程中, 分别将湍流模型和近壁面处理方法组合标记如下: 标准壁面 $k-\epsilon$ 模型(SKE)、增强壁面 $k-\epsilon$ 模型(EKE)、标准壁面 $k-\epsilon$ RNG 模型(SRNG)、增强壁面 $k-\epsilon$ RNG 模型(ERNG)、标准壁面 RSM 模型(SRSM)、增强壁面 RSM 模型(ERSM)、SST $k-\epsilon$ 模型(SSTKE).

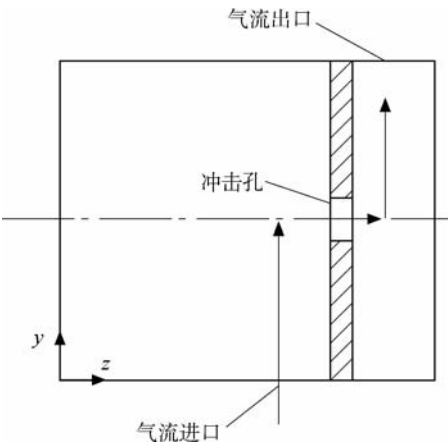


图 4 旋转单孔冲击试验模型

Fig. 4 Experiment model for rotating single-hole impingement

对比图 5 中计算结果和试验数据(Exp.)认为, 近壁面处理方法对计算结果的影响确实很大, 其中增强型壁面函数法结果比较可靠, 7 种计算模型中增强壁面 RSM 模型与试验值最吻合, 两者误差小于 10%, 因此增强壁面 RSM 湍流模型适合模拟旋转冲击出流模型, 这一结论与文

献[17-18]的结论一致. 本文采用增强型壁面 RSM 模型.

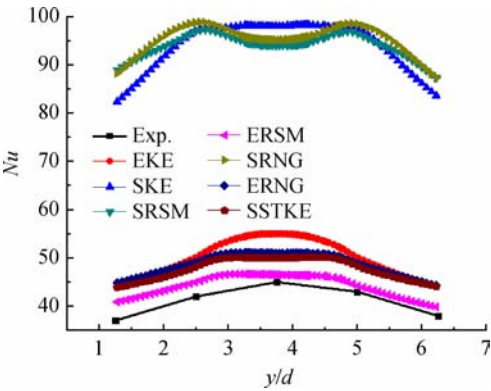


图 5 湍流模型验证结果

Fig. 5 Result of different turbulence models

1.5 边界条件

本文边界条件采用质量进口, 压力出口, 加热面为等热流加热, 靶板、冲击板和隔板均参与换热, 其余壁面绝热处理.

2 旋转衍生力在受限层板中的分布规律

以图 6 所示流体域中直线 m , n 上数据为研究对象, 研究离心力、哥氏力及其衍生的浮升力的分布规律.

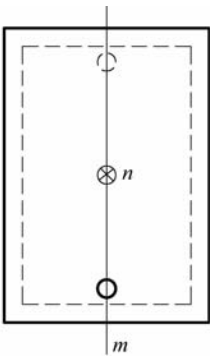


图 6 数据采集位置示意图

Fig. 6 Schematic of data acquisition regions

在旋转受限层板中, 各部分流体受到的旋转衍生力如图 7 所示. 冲击射流受到的离心力和哥氏力方向相同, 均沿旋转半径向外, 流体经过冲击射流到达靶面后, 开始向出口方向流动, 此时流体受到的离心力沿旋转半径向外, 由于流体冲击靶面后会产生剧烈的翻转, 所以哥氏力方向比较混乱, 可以将流体速度分解成平行于靶面和垂直于

靶面的速度分量, 平行于靶面沿 y 正方向流向出口的流体受到背离靶面指向冲击面的哥氏力, 垂直于靶面流动的流体受到平行于靶面的哥氏力. 离心力及哥氏力衍生的浮升力明显受到当地流体的密度和参考密度之差的影响.

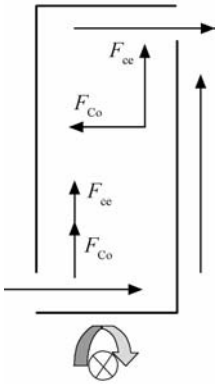


图 7 旋转受限层板中流体所受离心力和哥氏力示意图

Fig. 7 Sketch of centrifugal force and Coriolis force of fluid in rotating limited lamilloy

图 8 为直线 m 上离心力沿 y 方向的分布图. 在直线 m 上, 随着转速的增加, 离心力显著地增加. 而转速不变时, 离心力沿着旋转半径的增加而减小, 主要是由于随着旋转半径的增加, 流体不断被加热, 密度降低, 密度的降低导致的离心力降低程度比半径的增加导致的离心力增加程度大.

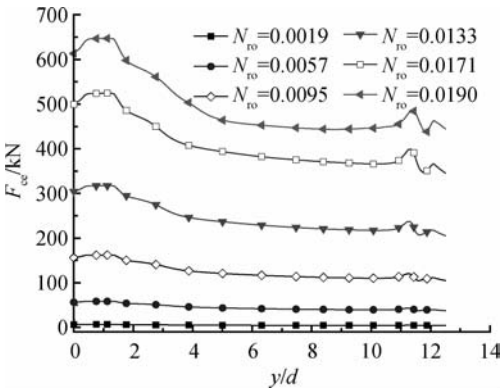


图 8 离心力沿 y 分布

Fig. 8 Distribution of centrifugal force in y direction

图 9 为直线 m 上 y 方向哥氏力沿 y 方向的分布图. y 方向哥氏力主要取决于旋转角速度矢量和 z 方向相对速度矢量. z 方向相对速度矢量不变时, 随着旋转角速度增加, y 方向哥氏力增加. 在进出口附近, z 方向相对速度较大, 在中间段 z 方向相对速度较小, 所以 y 方向哥氏力在进

出口附近影响较大,中间段影响较小.进出口处 z 方向相对速度为沿 z 的负方向, y 方向的哥氏力沿 y 的正方向,进口附近由于冲击靶面造成回流,流体速度为沿 z 的正方向,此处 y 方向哥氏力为沿 y 的负方向.

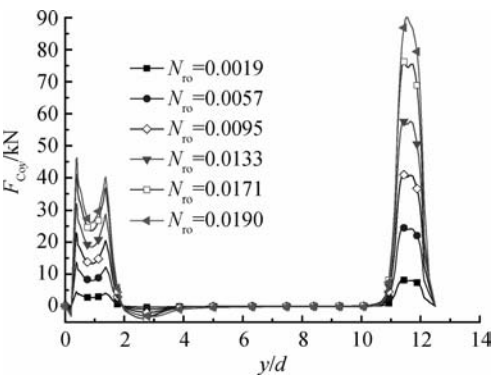


图 9 y 方向哥氏力沿 y 分布

Fig. 9 Distribution of Coriolis force directed y in y direction

图 10 为直线 m 上 z 方向哥氏力沿 y 方向的分布图. z 方向哥氏力主要取决于旋转角速度矢量和 y 方向相对速度矢量.在进口区域,冲击射流会在靶面附近造成滞止区,此处 y 方向相对速度为零,该处 z 方向哥氏力为零,出口区域也有对应 y 方向相对速度为零的点,对应 z 方向哥氏力为零.旋转角速度增加, z 方向哥氏力逐渐增加.流体在向下游流动过程中,由于出口加速作用, z 方向哥氏力也缓慢增加.进口靠近旋转中心一侧区域和出口远离旋转中心一侧区域,流体沿旋转半径向旋转中心(y 负方向)流动, z 方向哥氏力为负值,即 z 方向哥氏力指向靶面,在进口和出口之间,流体沿旋转半径向外侧(y 正方向)流动, z 方向哥氏力为正值,即 z 方向哥氏力背离靶面.

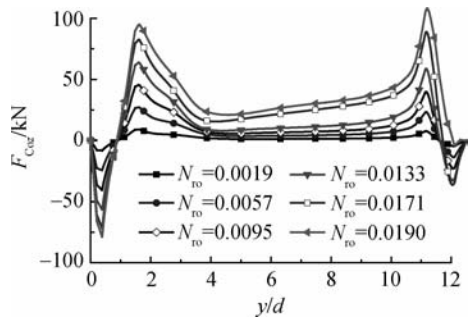


图 10 z 方向哥氏力沿 y 分布

Fig. 10 Distribution of Coriolis force directed z in y direction

直线 m 上离心力衍生的浮升力如图 11 所示.在冲击孔处,流体温度较低,流体温度与参考温度之间的温差较大,为负值,此处离心力衍生的浮升力沿旋转半径向外(y 正方向),加速流体流动.流体在向出口流动的过程中,温度逐渐提高,当温差为零时,离心力衍生的浮升力为零,流体继续被加热,温差为正值,此时离心力衍生的浮升力沿旋转半径向内(y 负方向)减弱流体流动.

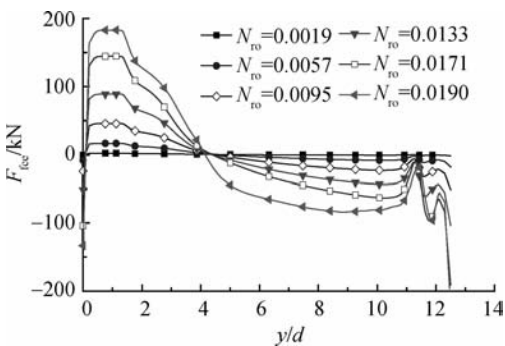


图 11 离心力衍生的浮升力沿 y 方向分布

Fig. 11 Distribution of buoyancy force caused by centrifugal force in y direction

直线 m 上 y 方向哥氏力衍生的浮升力沿 y 方向的分布见图 12.进口处流体 z 方向速度较大,方向为 z 的负方向,温度比参考温度低, y 方向哥氏力衍生的浮升力较大,方向为沿旋转半径向外(y 正方向).进口冲击区域附近,流体方向为 z 正方向,温度比参考温度低, y 方向哥氏力方向为沿旋转半径向外(y 正方向).出口处流体速度为 z 负方向,但是流体温度比参考温度高, y 方向哥氏力衍生的浮升力为沿旋转半径指向旋转中心(y 负方向),其他部分 y 方向衍生的浮升力较小.

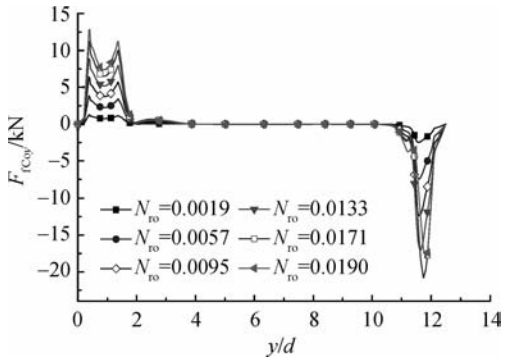


图 12 y 方向哥氏力衍生的浮升力沿 y 分布

Fig. 12 Distribution of buoyancy force caused by Coriolis force directed y in y direction

直线 m 上 z 方向哥氏力衍生的浮升力沿 y 方向的分布见图 13. 在冲击孔对应的靶面处, 滞止点处 y 方向速度为零, 导致该处 z 方向哥氏力衍生的浮升力为零. 在冲击孔附近, 流体温度较低, 流体温度与参考温度差值较大, 且为负值, 所以冲击孔附近 z 方向哥氏力衍生的浮升力与 z 方向哥氏力的方向相同. 随着流体向下游流动, 流体温度不断升高, 流体温度与参考温度差值减小, 浮升力降低, 当流体温度逐渐大于参考温度时, 浮升力方向与 z 方向哥氏力方向相反, 温差逐渐提高, 浮升力不断增加. 出口处流体被加速, 浮升力增加.

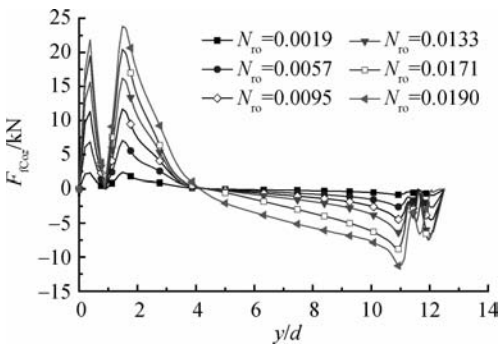


图 13 z 方向哥氏力衍生的浮升力沿 y 分布
Fig. 13 Distribution of buoyancy force caused by Coriolis force directed z in y direction

直线 n 上离心力分布见图 14. 旋转半径不变时, 离心力与旋转角速度和流体密度有关, 密度不变时, 离心力随着旋转角速度的增加而增加. 加热条件下, 流体密度会发生变化, 靠近壁面的区域温度较高, 密度较低, 所以靠近壁面区域的离心力较低, 中间区域的温度低密度高, 离心力较大. 但是靶面的温度比冲击面温度高, 所以靠近靶面的离心力比靠近冲击面的离心力低.

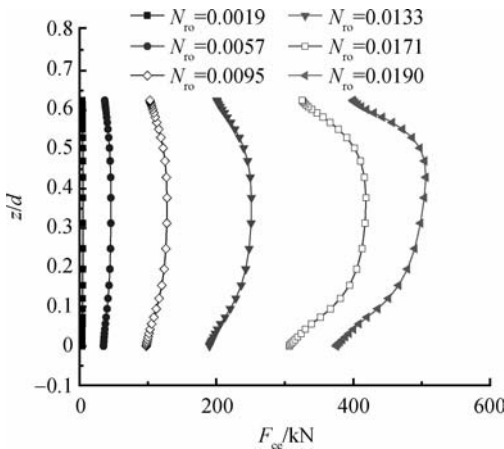


图 14 离心力沿 z 分布
Fig. 14 Distribution of centrifugal force in z direction

在直线 n 上, z 方向相对速度分量与 y 方向相对速度分量相比, 量级非常小, z 方向相对速度分量不到 y 方向相对速度分量的 1% (见图 15), 所以 z 方向相对速度分量可以忽略, 同时由于 z 方向相对速度分量产生的 y 方向哥氏力及其衍生的浮升力也可以忽略.

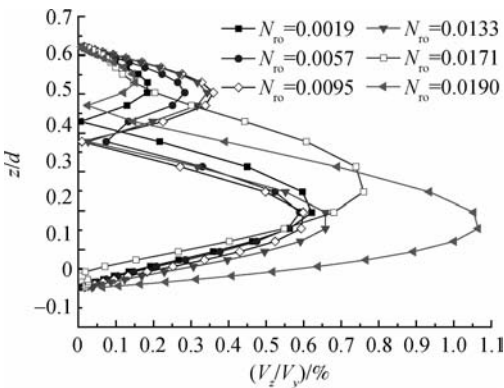


图 15 V_z/V_y 分布
Fig. 15 Distribution of V_z and V_y

直线 n 上, z 方向哥氏力沿 z 方向的分布见图 16. 旋转角速度一定时, z 方向的哥氏力主要受到 y 方向相对速度分量的影响, 呈现出中间大两边小的分布特点, 但是由于流体受到 z 方向哥氏力的影响, 所以速度峰值会向冲击面方向偏移, z 方向哥氏力的峰值也向冲击板方向偏移. 旋转角速度增加时, z 方向哥氏力显著的增加.

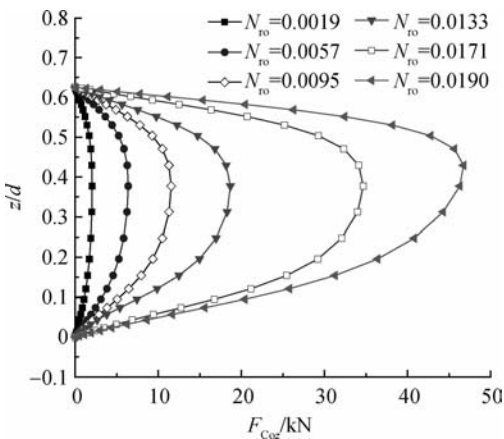


图 16 z 方向哥氏力沿 z 分布图
Fig. 16 Distribution of Coriolis force directed z in z direction

直线 n 上, 离心力衍生的浮升力沿 z 方向的分布见图 17. 离心力衍生的浮升力与旋转角速度、流体之间温度差有关. 随着旋转角速度的增加, 浮升力逐渐增加. 在近壁面处, 流体温度与参

考温度之差为正,所以浮升力与离心力方向相反,此时浮升力阻碍流体流动,在中间处流体温度小于参考温度,浮升力与离心力方向相同,加速流体流动.

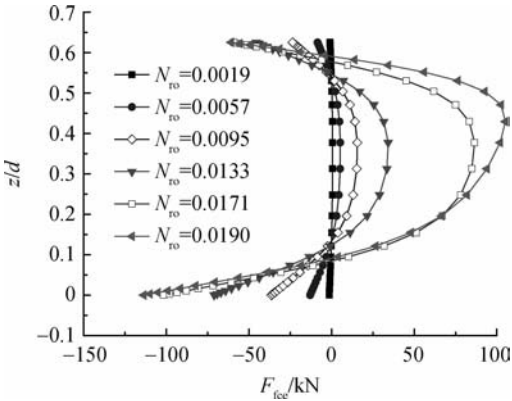


图 17 离心力衍生的浮升力沿 z 方向分布
Fig. 17 Distribution of buoyancy force caused by centrifugal force in z direction

图 18 为直线 n 上, z 方向哥氏力衍生的浮升力沿 z 方向的分布图. z 方向哥氏力衍生的浮升力与旋转角速度、 y 方向相对速度分量、流体间温度差有关. 旋转角速度增加, 浮升力增加. 在近壁面处, 流体温度大于参考温度, 浮升力与 z 方向哥氏力方向相反(指向靶面). 在中间处, 流体温度小于参考温度, 浮升力与 z 方向哥氏力方向相同(背离靶面).

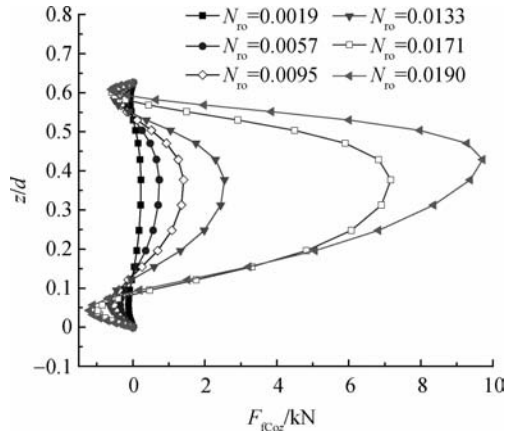


图 18 z 方向哥氏力衍生的浮升力沿 z 分布
Fig. 18 Distribution of buoyancy force caused by Coriolis force directed z in z direction

直线 m 上, z 方向哥氏力与离心力的对比见图 19. z 方向哥氏力与离心力相比, z 方向哥氏力在冲击孔和出口区域较大, 这些区域 y 方向相对速度分量最大. 随着旋转角速度的增加, z 方向哥

氏力相对于离心力逐渐减小, 主要是由于旋转角速度的增加, 离心力和哥氏力均增加, 但是离心力增加的程度比哥氏力增加的程度大, 离心力时旋转角速度的 2 次方, 哥氏力时旋转角速度的 1 次方.

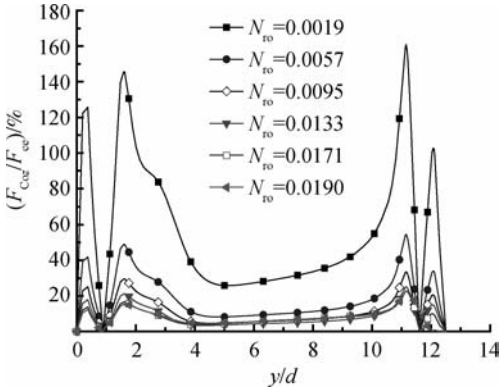


图 19 z 方向哥氏力与离心力比较
Fig. 19 Comparison between Coriolis force directed z and centrifugal force

3 结 论

针对本文研究的旋转受限层板冷却结构, 通过数值模拟, 得到以下结论:

- 1) 离心力随转速的增加而增加, 但是由于流体被加热, 离心力随着旋转半径的增加而降低. 在近壁面处离心力较低, 在远离壁面区域离心力较高.
- 2) y 方向哥氏力只是在进出口区域影响较大, 中间区域 y 方向哥氏力可以忽略, z 方向哥氏力在进出口区域影响较大, 中间段随转速的增加而缓慢增加, 随旋转半径增加而缓慢增加.
- 3) 离心力衍生的浮升力在冲击区域附近加速流体流动, 在其他区域阻碍流体流动. 在近壁面处, 离心力衍生的浮升力阻碍流体流动, 在远离壁面区域, 离心力衍生的浮升力加速流体流动.
- 4) 在中间段冲击面附近, z 方向哥氏力衍生的浮升力使流体分离, 靶面附近, z 方向哥氏力衍生的浮升力使流体作用向靶面.
- 5) 在中间段, 离心力和离心力衍生的浮升力起主导作用.

参考文献:

[1] Hector I, Brian E, Launder D C, et al. Development of flow field and surface heat-transfer measurement and visualisation techniques for internal rotating cooling flows in gas

turbine blades[R]. AIAA-2006-3443,2006.

[2] Taylor C,Xia J Y. A study of mixed geometrical and rotational effects on internal turbulent flow and heat transfer [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow,1992,2(1):37-53.

[3] Wagner J H,Johnson B V,Kopper F C. Heat transfer in rotating serpentine passages with smooth walls[J]. Journal of Turbomachinery,1991,113(3):321-330.

[4] 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.

[5] Wagner J H,Johnson B V,Graziani R A,et al. Heat transfer in rotating serpentine passages with trips normal to the flow[J]. Journal of Turbomachinery,1992,114(14):847-857.

[6] Murata A,Mochizuki S. Effect of cross sectional aspect ratio on turbulent heat transfer in an orthogonally rotating rectangular smooth duct[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1999,42(20):3803-3814.

[7] Pallares J,Davidson L. Large-eddy simulations of turbulent flow in a rotating square duct[J]. Physics of Fluids,2000,12(11):2878-2892.

[8] 白国强,常海萍. 旋流对旋转受限层板换热的影响[J]. 航空动力学报,2014,29(8):1789-1795.
BAI Guoqiang,CHANG Haiping. Effect of spirality flow on heat transfer in rotating limited lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(8):1789-1795. (in Chinese)

[9] Murata A,Mochizuki S. Centrifugal buoyancy effect on turbulent heat transfer in a rotating two-pass smooth square channel with sharp 180-deg turns[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47(14):3215-3231.

[10] Murata A,Mochizuki S. Effect of centrifugal buoyancy on turbulent heat transfer in an orthogonally rotating square duct with transverse or angled rib turbulators[J]. International Journal of Heat Mass Transfer,2001,44(14):2739-2750.

[11] Soong C Y. Thermal buoyancy effects in rotating non-isothermal flows[J]. International Journal of Rotating Machinery,2001,7(6):435-446.

[12] Prakash C,Zerkle R. Prediction of turbulent flow and heat transfer in a radially rotating duct[J]. Journal of Turbomachinery,1992,114(4):835-846.

[13] 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.

[14] Ekkad S V,Huang Y,Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass smooth and turbulated square channels with bleed holes[J]. Fundamentals of Augmented Single-Phase Convection,1996,330(8):133-140.

[15] Hwang J J,Lai D Y. Three-dimensional mixed convection in a rotating multiple-pass square channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1998,41(8):979-991.

[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 P S,Karki K C,Patankar S V. 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)

(编辑:陈 越)