

层板与旋转轴所成角度对受限层板 换热能力的影响

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: 采用数值模拟的方法对旋转状态下受限层板在不同层板与旋转轴所成角度条件下的换热特性进行研究, 得出了层板与旋转轴所成角度对层板换热能力的影响规律。结果表明: 层板与旋转轴所成角度不同时, 表面传热系数呈现一定的相似性; 层板与旋转轴所成角为 90° 和 270° 时表面传热系数最高, 浮升力的影响最小, 层板与旋转轴所成角度为 0° 和 180° 时, 表面传热系数最低, 浮升力的影响最大; 将科氏力和浮升力对换热能力的影响单独研究, 平行于层板的科氏力比垂直于层板的科氏力对流体的影响强烈。

关 键 词: 受限层板; 表面传热系数; 科氏力; 浮升力; 层板与旋转轴所成角度

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of angle between lamilloy and rotation axis on heat transfer capability of limited lamilloy

BAI Guo-qiang, CHANG Hai-ping

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

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

Abstract: Heat transfer characteristics in condition of different angles between lamilloy and rotation axis in limited lamilloy under rotating state was researched by numerical simulation. The relation between lamilloy heat transfer capacity and angle between lamilloy and rotation axis was acquired. Results show that surface heat transfer coefficients present similar characteristic with different angles between lamilloy and rotation axis. The surface heat transfer coefficient is highest and the effect of buoyancy force is smallest when the angles between lamilloy and rotation axis are 90° and 270° . The surface heat transfer coefficient is lowest and the effect of buoyancy force is biggest when the angles between lamilloy and rotation axis are 0° and 180° . The effects of Coriolis force and buoyancy force are researched separately. The effect of Coriolis force in parallel to the lamilloy on flow is more remarkable than that perpendicular to the lamilloy.

Key words: limited lamilloy; surface heat transfer coefficient; Coriolis force; buoyancy force; angle between lamilloy and rotation axis

航空发动机的不断发展要求对涡轮叶片有更高的冷却效果。在旋转叶片中, 流体由于受到离心力(F_{∞})、科氏力(F_{Co})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。Chen

等^[1]、Chang 等^[2]、Xun 等^[3]研究认为旋转衍生力导致的二次流是旋转影响通道换热的主要原因。在动叶各个部位, 层板与旋转轴所成的角度各不相同。这就造成了科氏力与离心力在不同层板与

旋转轴所成角度下对壁面换热的影响规律不同. 国内外学者对此做了大量的研究. Parsons 等^[4]研究了层板与旋转轴所成角度对通道压力侧和吸力侧的换热情况, 其认为层板与旋转轴所成角度 β 从 90° 到 45° 时, 压力侧和吸力侧换热能力均降低. Johnson 等^[5]认为层板与旋转轴所成角度不等于 90° 时, 会使通道压力侧和吸力侧之间表面传热系数的差距缩小. Liou 等^[6]试验研究了通道宽高比 (AR, 量符号记为 R_a) $R_a = 1:2$ 、层板与旋转轴所成角度 $\beta = 0^\circ$ 和 45° 的带肋旋转矩形通道. 认为旋转数 $N_{ro} < 0.5$ 时, $\beta = 45^\circ$ 的努塞尔数 Nu 比 $\beta = 0^\circ$ 的 Nu 大, 当 $N_{ro} \geq 1$ 时, $\beta = 0^\circ$ 的 Nu 比 $\beta = 45^\circ$ 的 Nu 大. Luai 等^[7]、Mohammad 等^[8]试验研究了 $R_a = 1:1$, $\beta = 90^\circ$ 和 135° 的带肋旋转两通道模型, 其认为 Nu 从 $\beta = 90^\circ$ 到 $\beta = 135^\circ$ 降低. Su 等^[9]数值模拟研究了宽高比 $R_a = 1:1, 1:2, 1:4$, $\beta = 90^\circ$ 的旋转两通道模型, 其认为 R_a 较大时, 旋转对 Nu 的影响不大. 层板冷却方式集冲击冷却、对流冷却、气膜冷却为一体, 具有冷气利用量少、冷却效率高的优点, 越来越受到广泛的重视^[10-11]. 在层板结构中, $R_a > 1$. Huh 等^[12]采用试验的方法研究了 $R_a = 2:1$, $\beta = 90^\circ$ 和 $\beta = 135^\circ$ 的旋转通道. 研究表明, 与 $\beta = 90^\circ$ 相比, $\beta = 135^\circ$ 可以减小压力面和吸力面之间的 Nu 差异. Basha 等^[13]数值模拟研究了 $\beta = 120^\circ$, $R_a = 10:1$ 的旋转通道的换热特点. 研究表明科氏力会改变壁面附近的温度梯度, 从 $\beta = 90^\circ$ 到 $\beta = 120^\circ$, 通道的换热能力逐渐降低, 但是降低的幅度比较小. 国内徐磊等^[14-16]对 $\beta = 90^\circ, 180^\circ$, $N_{ro} = 0 \sim 0.003532$, $R_a = 10:1$ 的多孔冲击受限层板模型进行了深入研究, 研究认为随着旋转数的增加, 表面传热系数逐渐降低. 由于在涡轮动叶表面具有非常复杂的扭曲性, 造成层板与旋转轴所成角度不同, 会直接影响到科氏力及其衍生浮升力对流体的作用形式, 从而对层板换热能力产生显著的影响. 所以研究不同的层板与旋转轴所成角度下受限层板的换热特性具有非常重要的意义.

目前, 国内外主要聚焦于矩形通道在某些特定角度的研究或单独的旋转对冲击换热的影响, 对不同角度下受限层板的换热特性研究较少. 本文采用数值模拟的方法, 研究层板与旋转轴所成角度对受限层板换热能力的影响.

1 研究对象及模型选取

计算模型如图 1 所示. 流体通过进口冲击后,

沿半径方向向外流动. 层板转速为 $10\,000\text{ r/min}$, 旋转半径为 0.5 m . 本文中规定旋转轴平行于层板靶面时层板与旋转轴所成角度 $\beta = 0^\circ$; 旋转轴垂直于层板靶面时 $\beta = 90^\circ$. 冲击孔直径 (即进口直径) 与出口直径之比 $d/d_{out} = 1$, 板间距与冲击孔直径之比 $\delta/d = 1$, 受限层板长度与冲击孔直径之比 $l/d = 10$, 通道宽高比 $R_a = w/\delta = 15$. 本文应用商业 CFD 软件 FLUENT 6.3 对旋转叶片受限层板的流动换热进行仿真计算. 流体进口采用质量进口, 靶板采用等热流加热, 靶板与冲击板之间的隔板参与导热, 隔板与流体接触的表面参与换热, 隔板外侧面绝热处理, 出口采用压力出口.

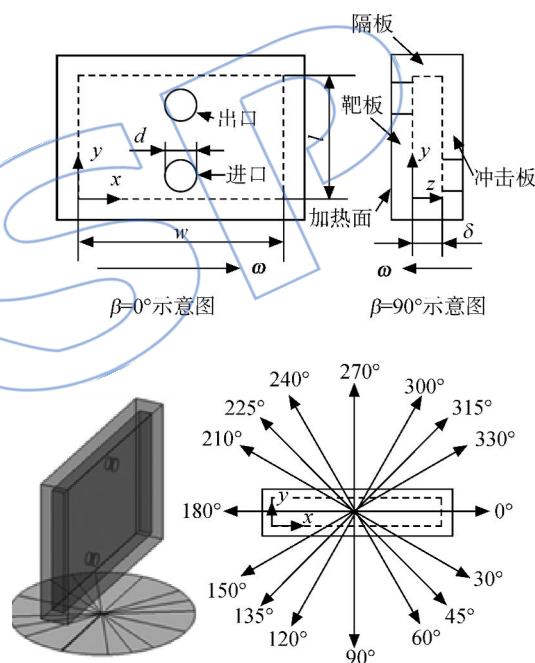


图 1 受限层板模型

Fig. 1 Limited lamilloy model

采用 GAMBIT 2.3 软件分块整体生成非均匀的结构化网格和部分非结构化网格. 在流体域和固体域接触面之间进行网格加密处理, 网格划分如图 2 所示.

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), 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} .

分别划分不同数量的网格, 验证网格独立性. 主要进行了网格数量分别为 5 万、10 万、15 万、20 万、25 万、30 万、35 万、40 万的 8 种网格模型计算. 网格独立性验证发现, 随着网格数量的增加,

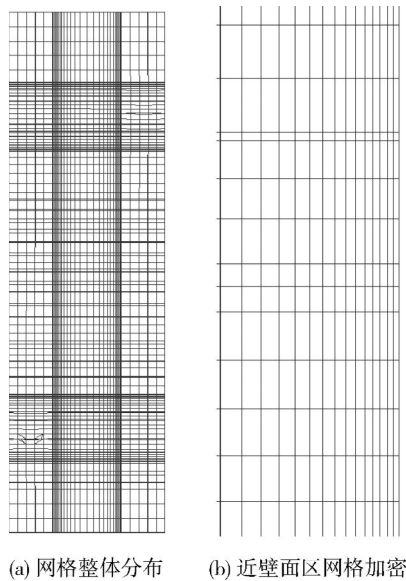


图2 受限层板网格
Fig. 2 Limited lamilloy grid

靶面的表面传热系数逐渐减小,并接近于一个恒定的数值,所以网格达到一定数量时,网格对靶面的表面传热系数的影响已经不是十分明显.当网格数量达到25万以后,靶面的表面传热系数 h 变化非常小(见图3),所以整个模型网格数量大致为30万.

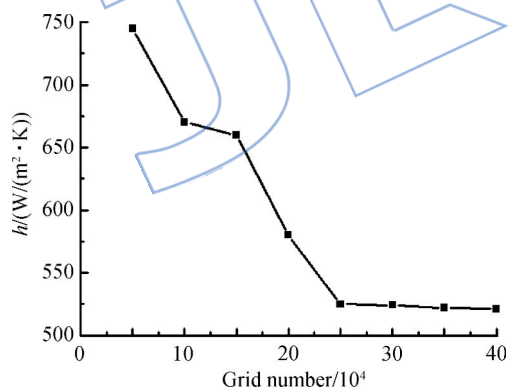


图3 网格独立性验证
Fig. 3 Independence verification of grids

通过与文献[17]所做的旋转单孔冲击试验结果对比(模型见图4),合理选取湍流模型和近壁面处理方法.采用湍流动能和耗散率模型($k-\epsilon$)、 $k-\epsilon$ 重整化群模型(RNG)、雷诺应力模型(RSM)、shear stress transport(SST)的 $k-\omega$ 模型分别验证.近壁面处理方法分别采用标准壁面函数法和增强壁面函数法处理.标记标准 $k-\epsilon$ 模型为Ske、增强 $k-\epsilon$ 模型为Eke、标准壁面 $k-\epsilon$ RNG模型为SRNG、增强壁面 $k-\epsilon$ RNG模型为ERNR、标准

壁面 RSM 模型为 SRSM、增强壁面 RSM 模型为 ERSR 和 SST $k-\epsilon$ 为模型 SSTKW.

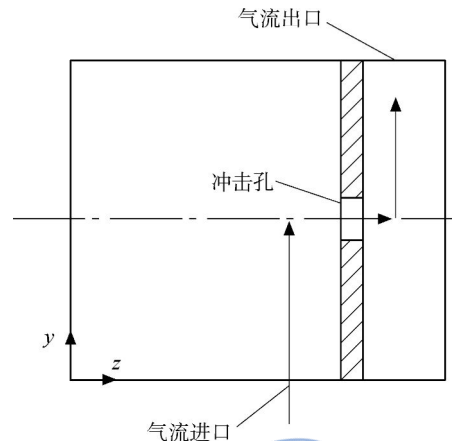


图4 湍流模型验证计算模型
Fig. 4 Verification computational model for turbulence model

从图5中可以看出,增强壁面函数法计算结果接近试验结果,增强壁面 RSM 模型最接近试验结果,计算结果与试验结果的误差在10%之内,所以本文采用增强壁面 RSM 模型.

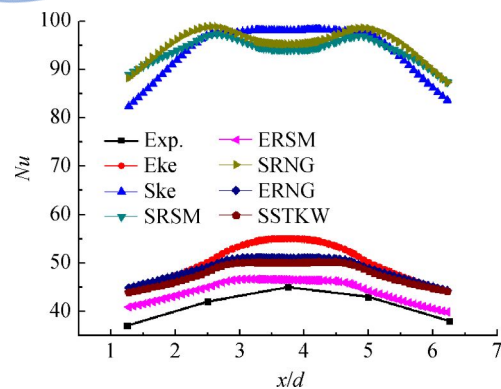


图5 计算结果与试验结果对比
Fig. 5 Comparison of experimental results and computational results

2 计算参数

采用靶面表面传热系数 h 表征受限层板的换热能力.靶面表面传热系数 h 定义如下:

$$h = \frac{q}{T_w - T_f}$$

式中 q 为靶面热流密度(W/m^2), T_w 为靶面壁温(K), T_f 为冷却气体温度(K).

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

式中 T_{in} 为冷却气体进口温度(K), T_{out} 为冷却气体出口温度(K).

采用温度比 Θ 表征浮升力的大小, 温度比 Θ 定义如下:

$$\Theta = \frac{T_w - T_f}{T_w}$$

3 旋转对层板中流体流动换热的影响

以本文计算模型为例, 分析离心力、科氏力及其衍生的浮升力对层板内流体的作用形式.

旋转状态下, 流体受到离心力、科氏力及其衍生的浮升力的共同作用(见图 6). 由于层板间距较小, 流体冲击进入腔体以后, 会不断在层板内产生翻转. 但是由于通道的限制, 流体沿着通道流动, 流体的平均流动沿着腔体流动, 流体平均流动所受到的科氏力方向为背离靶面, 指向冲击面.

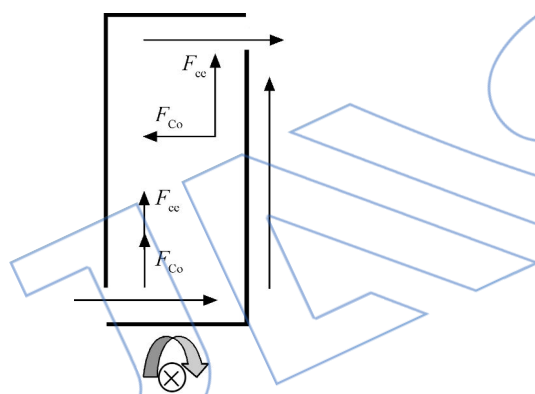


图 6 离心力、科氏力在层板中的作用形式
Fig. 6 Effect form of centrifugal force and Coriolis force in lamilloy

离心力方向为沿旋转半径指向出口, 加速流体流动. 离心力衍生的浮升力由于密度差的不同, 可能会阻碍流体流动, 也可能会加速流体流动, 在温度较高的流体区域, 浮升力将阻碍流体流动; 而在温度较低的流体区域, 浮升力将加速流体流动. 科氏力衍生的浮升力对流体作用, 取决于科氏力的作用形式以及密度差.

图 7 是受限层板中的热传递情况. 由于受限层板侧壁隔板的导热作用, 致使层板冲击面也参与换热, 板间距 δ 与冲击孔直径 d 之比较大的冲击面和板间距与冲击孔直径之比较小的靶面附近的流体温度 T 升高, 中间流体温度较低(见图 8). 科氏力会造成冲击射流能量的衰减^[18], 所以在旋转状态下, 冲击造成的壁面射流的速度 V 均低于静止状态下壁面射流的速度. 沿靶面流动的流体

由于受到科氏力的作用而偏离靶面, 所以图中旋转状态速度峰值与静止状态相比, 均偏离靶面. 旋转状态下, 流体均温状态时速度都低于非均温状态时速度, 主要是由于在旋转状态下, 流体的温度差异造成流体受到浮升力的影响. 在本文研究模型中, 浮升力均加速流体流动.

与静止状态相比, 层板旋转非均温状态的流体在近靶面处速度较低, 温度较高. 在远离靶面的区域, 由于浮升力的作用, 加速流体流动, 流体温度降低.

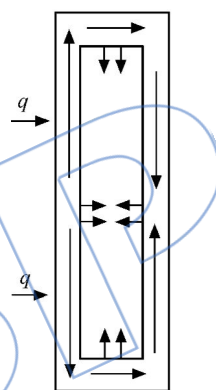


图 7 在受限层板中的热传递
Fig. 7 Heat transfer in limited lamilloy

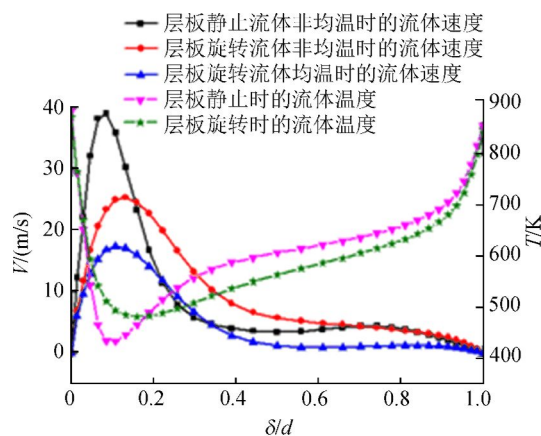


图 8 层板中流体速度和温度
Fig. 8 Velocity and temperature of flow in lamilloy

4 数值模拟结果及分析

图 9 是在科氏力和浮升力共同作用下, 表面传热系数随温度比 Θ 的变化规律. 由图 9 可以看出, 在各角度下, 表面传热系数均随温度比的增加而降低, 说明浮升力在本文研究的各种工况下均起到削弱换热能力的作用, 也说明在受限层板中, 浮升力削弱换热的比例比增强换热的比例大. 同

时表面传热系数在各角度之间又表现出一些一致性. 图中可以看出 β 为 0° 与 180° , 30° 与 210° , 45° 与 225° , 60° 与 240° , 90° 与 270° , 120° 与 300° , 135° 与 315° , 150° 与 330° 时, 表面传热系数基本一致, 即旋转轴在同一直线的不同方向时, 表面传热系数基本相同. 在等热流边界条件下, β 为 0° 与 180° 的温度比最大, 90° 和 270° 的温度比最小. β 为 90° 与 270° 的表面传热系数最大, 0° 与 180° 的表面传热系数最小, 说明层板与旋转轴所成角度的变化会导致科氏力和浮升力的变化, 从而影响层板的换热能力. 层板与旋转轴所成角度越靠近 90° 和 270° 表面传热系数越高; 层板与旋转轴所成角度越靠近 0° 和 180° 表面传热系数越低. 还可以看出, 在等热流边界条件下, 层板与旋转轴所成角度从 90° 和 270° 逐渐转向 180° 和 0° 的过程中, 温度比逐渐增加, 即在此过程中浮升力的影响越来越显著. 综合观察图 9 可以看出, 在温度比较小的情况下, 表面传热系数比较高, 而温度比较大的情况下, 表面传热系数比较低, 从而可以认为, 在受限层板结构中, 浮升力降低受限层板的换热能力.

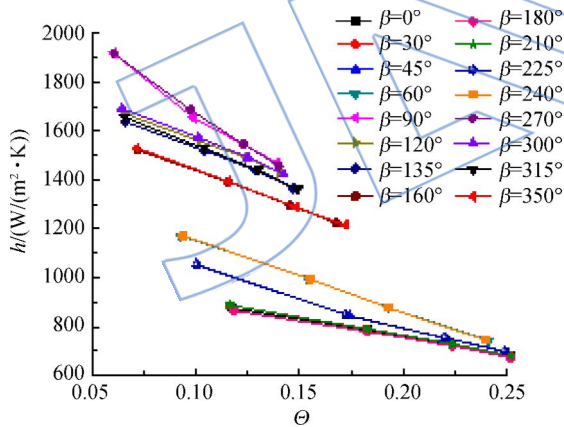


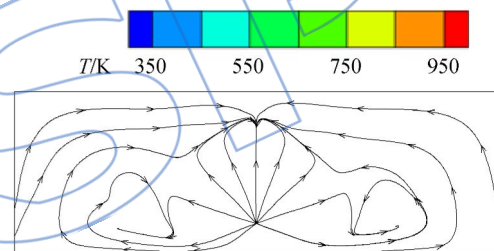
图9 不同角度、不同温度比对表面传热系数的影响

Fig. 9 Effect of different temperature ratios and different angles on surface heat transfer coefficient

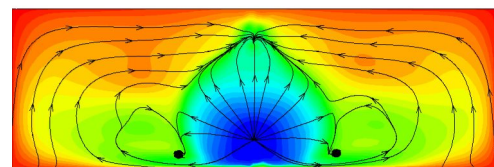
从图 9 中还可以看出, 在 $\beta=90^\circ$ 和 270° 的情况下, 最大温度比和最小温度比所对应的表面传热系数差值最大, 在 $\beta=0^\circ$ 和 180° 的情况下, 最大温度比和最小温度比所对应的表面传热系数差值最小, 即浮升力在 $\beta=90^\circ$ 和 270° 条件下对层板的换热影响最大, 在 $\beta=0^\circ$ 和 180° 条件下浮升力对层板的换热影响最小. 各角度中, 表面传热系数最大相差 55% 左右.

选用 $\beta=0^\circ$ 和 270° 进行分析. 从图 10 中可以

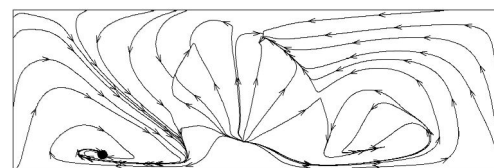
看出, 流体均温流场与流体非均温流场非常相似, 所以可以认为在平行于靶面的截面上, 浮升力的影响较小, 主要是科氏力导致了流体的偏转. 对 $\beta=0^\circ$ 和 270° 内部流场研究可以发现: 当层板与旋转轴所成角度为 0° 时, 平行于靶面方向上, 层板内流场关于层板中心线对称 (见图 10), 流体不受到平行于靶面科氏力的作用, 靶面温度分布也比较对称 (见图 11). 随着层板与旋转轴所成角度的增加, 平行于靶面的科氏力的作用逐渐增大, 将层板左侧流体逐渐推向层板右侧. $\beta=270^\circ$ 时, 在平行于靶面方向上的科氏力作用效果最大, 层板中心线左侧的流体在流向出口的过程中, 沿旋转半径方向向外流动的流体受到指向层板中心线的科氏力作用, 靠近出口的侧壁面附近流体由于受到该侧壁面的阻挡作用, 流体沿着该侧壁面垂直于旋转半径流向出口, 在流动过程中受到沿旋转半



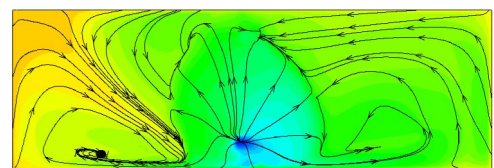
(a) $\beta=0^\circ$ 流体均温流场



(b) $\beta=0^\circ$ 流体非均温流场温度



(c) $\beta=270^\circ$ 流体均温流场



(d) $\beta=270^\circ$ 流体非均温流场温度

图 10 $\beta=0^\circ$ 和 270° 平行于靶面流体温度和流线图 ($\delta/d=0.125$)

Fig. 10 Flow temperature and streamline with $\beta=0^\circ$ and 270° paralleling with target surface ($\delta/d=0.125$)

径指向旋转中心的科氏力作用,而在层板右侧流体的受力情况却完全相反,此时科氏力对左侧流体的推挤作用达到最大.流体在层板左侧受到向层板中心线和向旋转中心方向科氏力的共同挤压作用,流体向右侧偏移.所以 $\beta=270^\circ$ 时,层板内流体流动非常混乱,增强了换热能力,导致靶面温度比 $\beta=0^\circ$ 时靶面温度低(见图 11).

由于科氏力对流体的推挤作用,导致流体在层板内分布不均匀,层板左侧流体向右侧偏移,而且流动混乱,导致层板靶面温度分布不均匀,流体偏向的一侧靶面温度较低,而流体偏离的一侧靶面温度较高.

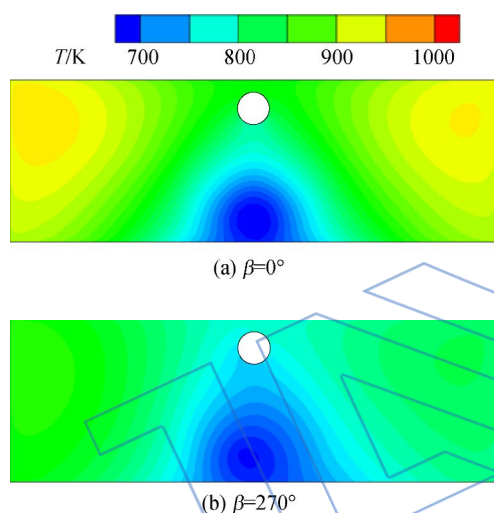
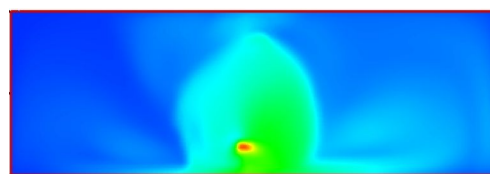
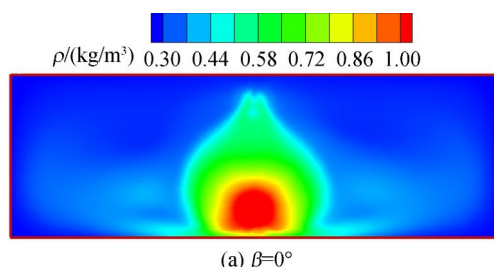


图 11 $\beta=0^\circ$ 和 270° 靶面温度图
Fig. 11 Target surface temperature with $\beta=0^\circ$ and 270°

在 $\beta=270^\circ$ 时,流体在科氏力的作用下向一侧偏移,新鲜流体不断加入,使该侧流体温度比另一侧流体温度低.流体的偏移主要是受到平行于靶面的科氏力作用造成的,可以认为平行于靶面的科氏力比垂直于层板的科氏力对流体的作用强.

图 12 中, $\beta=0^\circ$ 时层板中流体密度分布也比较对称,但是 $\beta=270^\circ$ 时由于流体的偏移作用,流体偏向层板右侧,右侧流体温度较低,流体密度比层板左侧较高,此时受限层板右侧温度比降低,浮



(b) $\beta=270^\circ$

图 12 层板流体密度 ($\delta/d=0.125$)

Fig. 12 Flow density in lamilloy ($\delta/d=0.125$)

升力的影响减弱,右侧表面传热系数增加.

5 结 论

动叶由于其旋转性,诱导出离心力、科氏力及其衍生的浮升力,对层板换热能力的影响将起到显著的作用.在本文的研究范围内,得到如下结论:

- 1) 层板与旋转轴所成角度不同时,表面传热系数呈现一定的相似性,层板与旋转轴所成角度之差为平角的两个角度条件下,表面传热系数非常相似.
- 2) 层板与旋转轴所成角为 90° 和 270° 时表面传热系数最高,浮升力的影响最小;层板与旋转轴所成角度为 0° 和 180° 时,表面传热系数最低,浮升力的影响最大.两种极端条件下,表面传热系数会产生 55% 左右的差异.
- 3) 平行于层板靶面的科氏力使层板内流体发生偏移,对表面传热系数造成影响.
- 4) 平行于层板的科氏力比垂直于层板的科氏力对流体的影响强烈.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Parsons J A, Han J C, Zhang Y M. Wall heating effect on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with 90-degree rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(9): 1411-1420.
- [5] Johnson B V, Wagner J H, Steuber G D. Heat transfer in rotating serpentine passages with selected model orientations for smooth or skewed trip walls[J]. Journal of Tur-

- bomachinery, 1994, 116(4): 738-744.
- [6] Liou T M, Chang S W, Hung J H. 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): 4063-4078.
- [7] Luai A, Han J C. Effect of rotation on heat transfer in two-pass square channels with five different orientations of 45° angled rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(4): 653-669.
- [8] Mohammad A Q, Chen H C, Han J C. A numerical study of flow and heat transfer in rotating rectangular channels ($AR=4$) with 45° rib turbulators by Reynolds stress turbulence model[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(1): 19-26.
- [9] Su G G, Chen H C, Han J C. Computation of flow and heat transfer in rotating two-pass rectangular channels ($AR=1:1, 1:2$ and $1:4$) with smooth walls by a Reynolds stress turbulence model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(26): 5665-5683.
- [10] 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.
- [11] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. 航空工程与维修, 1998(2): 11-13.
GUI Zhonglou, ZHANG Xinhua, ZHONG Zhengang. Development of manufacturing technology for single crystal turbine blades and vanes with high cooling effect[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 1998(2): 11-13. (in Chinese)
- [12] Huh M, Jiang L, 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[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(1): 22-32.
- [13] Basha A, Qahtant Y. Entropy generation in a channel resembling gas turbine cooling passage: effect of rotation number and density ratio on entropy generation[J]. Sadhana, 2009, 34(2): 439-454.
- [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] 徐磊, 常海萍, 潘金栋. 旋转条件下“冲击/出流”双层壁内部换热试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1658-1662.
XU Lei, CHANG Haiping, PAN Jindong. Experimental research on heat transfer of ‘impingement/effusion’ double-plate configuration in rotating state[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1658-1662. (in Chinese)
- [16] 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 Prolusion Technology, 2011, 32(1): 125-139. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] Sung K H, Dong H L, Hyung H C. Effect of jet direction on heat/mass transfer of rotating impingement jet[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14): 2914-2920.