

# 旋转轴角度对受限层板换热能力的影响<sup>\*</sup>

白国强, 常海萍

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

**摘要:** 应用数值模拟的方法对旋转状态下受限层板在不同旋转角度下换热能力进行数值仿真研究。通过改变旋转轴和层板之间的角度, 得出了旋转轴角度对层板换热能力的影响规律。研究结果表明: 旋转轴与层板所成角度不同时, 对流换热系数呈现一定的相似性; 旋转轴与层板所成角为 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 时对流换热系数最高, 浮升力最小, 旋转轴与层板所成角度为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时, 对流换热系数最低, 浮升力最大; 最高对流换热系数和最低对流换热系数相差55%左右; 平行于层板的哥氏力比垂直于层板的哥氏力对流体的影响强烈。

**关键词:** 受限层板; 对流换热系数; 哥氏力; 浮升力; 旋转轴角度

中图分类号: V231.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 08-1063-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.08.008

## Effects of Rotation Axis Angle on Heat Transfer in Limited Lamilloy in Rotating State

BAI Guo-qiang, CHANG Hai-ping

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Systems, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The effects of the rotation angle on heat transfer in limited lamilloy in rotating state was researched by numerical simulation. The relation between lamilloy heat transfer and rotation angle was acquired by changing rotation axis angle. Results show that heat convection coefficients put up similar characteristic with different rotation axis angles. The heat transfer coefficient is the highest and the buoyancy force is the smallest when the rotation axis angles are  $90^\circ$  and  $270^\circ$ , respectively. The heat transfer coefficient is the lowest and the buoyancy is the highest when the rotation angles are  $0^\circ$  and  $180^\circ$ , respectively. The difference between maximum and minimum heat transfer coefficient is about 55%. The effect of coriolis force paralleling to the lamilloy on air is more remarkable than that of coriolis force perpendicular to the lamilloy.

**Key words:** Limited lamilloy; Heat transfer coefficient; Coriolis force; Buoyancy force; Rotation axis angle

### 1 引言

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、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。在动叶各个部位, 旋转轴与通道所成的角度各不相同。这就造成了哥氏力与离心力在不同旋转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<sup>[1]</sup>研究了旋转角对旋转通道压力侧和吸力侧的换热情

\* 收稿日期: 2013-06-14; 修订日期: 2013-10-20。

作者简介: 白国强 (1984—), 男, 博士生, 研究领域为航空发动机高温部件冷却技术。E-mail: sxbgqsxbgq@163.com

况,其认为旋转角 $\beta$ 从 $90^\circ$ 变化到 $45^\circ$ 时,压力侧和吸力侧换热能力均降低。Johnson<sup>[2]</sup>认为旋转角度会使通道压力侧和吸力侧之间换热系数的差距缩小。Todd<sup>[3]</sup>认为在宽高比 $AR=4$ 的旋转带肋通道中, $\beta=135^\circ$ 的工况比 $\beta=90^\circ$ 的工况换热能力强。Liou T M<sup>[4]</sup>试验研究了通道宽高比 $AR=1:2$ ,旋转角 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=45^\circ$ 的带肋旋转矩形通道。认为旋转数 $Ro < 0.5$ 时, $\beta=45^\circ$ 的 $Nu$ 比 $\beta=0^\circ$ 的 $Nu$ 大,当 $Ro \geq 1$ 时, $\beta=0^\circ$ 的 $Nu$ 比 $\beta=45^\circ$ 的 $Nu$ 大。Luai Al-Hadhrami<sup>[5]</sup>, Mohammad Al-Qahtani<sup>[6]</sup>试验研究了 $AR=1:1$ , $\beta=90^\circ$ 和 $135^\circ$ 的旋转带肋两通道模型,其认为 $Nu$ 从 $\beta=90^\circ$ 到 $\beta=135^\circ$ 降低。Guoguang Su<sup>[7]</sup>数值模拟研究了宽高比 $AR=1:1, 1:2, 1:4$ , $\beta=90^\circ$ 的旋转两通道模型,其认为 $AR$ 较大时,旋转对 $Nu$ 的影响较大。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,越来越受到重视<sup>[8,9]</sup>。在层板结构中, $AR$ 大于1。Michael Huh<sup>[10]</sup>采用试验的方法研究了 $AR=2:1$ , $\beta=90^\circ$ 和 $\beta=135^\circ$ 的旋转通道。研究表明, $\beta=135^\circ$ 可以减小通道压力面和吸力面之间的 $Nu$ 差异。BASHA M<sup>[11]</sup>数值模拟研究了 $\beta=120^\circ$ , $AR=10:1$ 的旋转通道的换热特点。研究表明哥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<sup>[12-14]</sup>对 $\beta=90^\circ$ 和 $\beta=180^\circ$ , $Ro=0\sim 0.003532$ , $AR=10:1$ 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,对流换热系数逐渐降低。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,会直接影响到哥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。所以研究不同旋转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,对不同角度下受限冲击出流层板结构的换热特性研究较少。本文采用数值模拟的方法,通过改变旋转角速度的方向,实现对旋转轴和层板所成角度的改变。

## 2 研究对象及模型选取

计算模型如图1所示。流体通过进口冲击靶板后,沿半径方向向外流动。层板转速 $10\text{kr}/\text{min}$ ,旋转半径 $0.5\text{m}$ 。本文中规定旋转轴平行于层板的靶面、

旋转角速度指向 $x$ 轴正方向(即进口射流方向与旋转方向相反)的角度为 $\beta=0^\circ$ ,旋转轴垂直于层板靶面、旋转角速度指向 $z$ 轴负方向的角度为 $\beta=90^\circ$ 。出口直径与冲击孔直径之比 $d_{\text{out}}/d=1$ ,板间距与冲击孔直径之比 $z/d=1$ ,受限层板长度与冲击孔直径之比 $l/d=10$ ,通道宽高比 $AR=w/z=15$ 。本文应用商业CFD软件FLUENT6.3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、冲击板与流体接触的表面参与换热,计算模型外侧面绝热处理,出口采用压力出口。由于要考虑密度导致的浮升力的影响,所以对密度进行线性化处理: $\rho=\rho_0[1-\gamma(T-T_0)]=\rho_0(1-\gamma\Delta T)$ , $\gamma$ 冷却空气膨胀系数, $\Delta T=T-T_0$ 为冷却空气温度与参考温度的温度差。

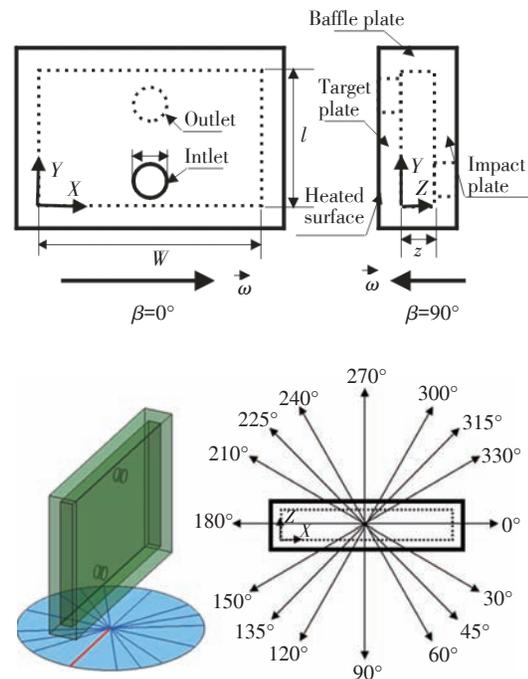


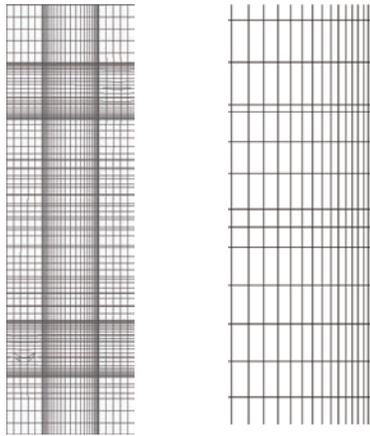
Fig. 1 Rotation limited lamilloy model

采用GAMBIT2.3软件分块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算法,对流项采用二阶迎风进行离散,解收敛的判断依据为相对残差小于 $1 \times 10^{-4}$ 。

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八种网格模型计算。网格独立性验证发现,随着网格数量的增加,靶面对流换热系数逐渐减小,并接近于一个恒定的数值,所以网格数量达到一定数量时,网格对靶面对流换热系数的影响已经不是十分明显。当网格数达到25万以后,靶面对流换热系数变化非常小(见图3),所以整个模型网格数目大致为30万。



(a) Overall grids (b) Dense grids near the wall

Fig. 2 Limited lamilloy grids

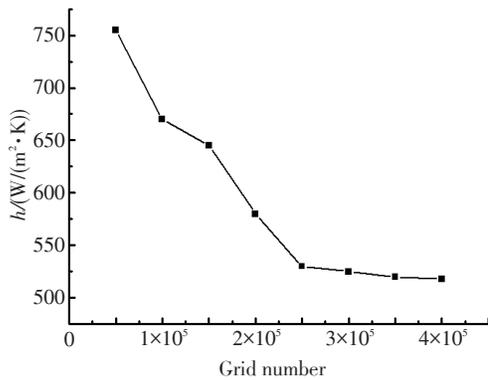


Fig. 3 Independence of the grids

通过与文献[15]所做的旋转单孔冲击试验数据对比,见图4合理选取湍流模型。采用标准  $k-\varepsilon$  模型(Ske)、增强  $k-\varepsilon$  模型(Eke)、标准壁面  $k-\varepsilon$ -RNG模型(SRNG)、增强壁面  $k-\varepsilon$ -RNG模型(ERNG)、标准壁面 RSM 模型(SRSM)、增强壁面 RSM 模型(ERSM)和 SST- $K-\omega$  (SSTKW)模型分别验证。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和增强型壁面函数法。

从图5中可以看出,增强型壁面函数处理方法的

计算结果接近试验值,增强型壁面函数的RSM模型最接近试验数值,计算值与实验值的误差在10%之内,所以本文采用增强型壁面函数的RSM模型。

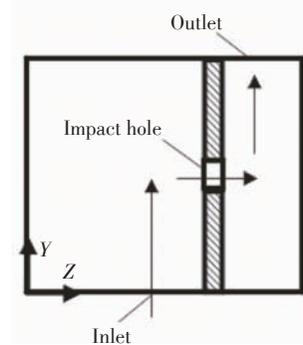


Fig. 4 Verification model for turbulence model

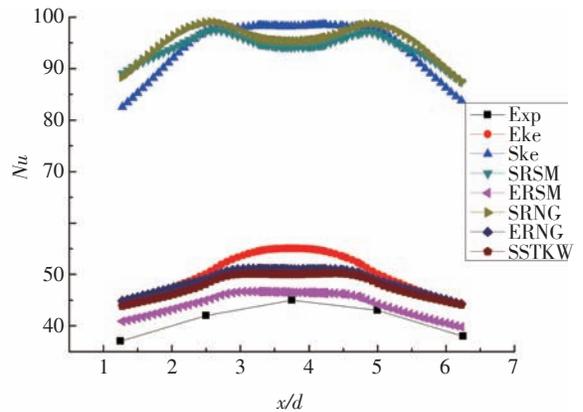


Fig. 5 Experimental and computational results comparison

### 3 计算参数定义

采用靶面对流换热系数  $h$  表征旋转受限层板的换热能力。靶面对流换热系数  $h$  定义为

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

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)。

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

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)。

靶面  $Nu$  定义为

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (3)$$

式中  $d$  是冲击孔直径,  $\lambda$  是冷却空气导热系数。

离心力  $F_{\omega}$  定义为

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

式中  $\rho$  为冷却空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\omega$  为旋转角速度 ( $\text{rad/s}$ ),  $r$  为旋转半径 ( $\text{m}$ )。

平行于靶面哥氏力  $F_{co//}$  定义为

$$F_{co//} = 2\rho\omega \times V_{\perp} \quad (5)$$

式中  $\omega$  为旋转角速度矢量 ( $\text{rad/s}$ ),  $V_{\perp}$  为垂直于靶面速度矢量 ( $\text{m/s}$ )。

垂直于靶面哥氏力  $F_{co\perp}$  定义为

$$F_{co\perp} = 2\rho\omega \times V_{//} \quad (6)$$

式中  $V_{//}$  为平行于靶面速度矢量。

离心力衍生的浮升力  $F_{cef}$  定义为

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

平行于靶面哥氏力衍生的浮升力  $F_{cof//}$  定义为

$$F_{cof//} = -2\Delta\rho\omega \times V_{\perp} = -2\rho_0\gamma\Delta T\omega \times V_{\perp} \quad (8)$$

垂直于靶面哥氏力  $F_{cof\perp}$  定义为

$$F_{cof\perp} = -2\Delta\rho\omega \times V_{//} = -2\rho_0\gamma\Delta T\omega \times V_{//} \quad (9)$$

采用温度比  $\Theta$  表征浮升力的大小。温度比  $\Theta$  定义为

$$\Theta = \frac{T_w - T_f}{T_w} \quad (10)$$

#### 4 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、哥氏力及其衍生的浮升力对层板内流体的作用形式。

在图6中的旋转状态下,流体受到离心力、哥氏力及其衍生的浮升力的共同作用。由于层板间距较小,流体冲击进入腔体以后,冲击射流冲击靶板,冲击靶板后的流体反射到冲击板对冲击板造成冲击,流体不断在层板内翻转,导致流体速度并不是平行于腔体壁面,所以哥氏力方向不确定。可以将哥氏力分解为垂直于靶面的哥氏力和平行于靶面的哥氏力,因此由哥氏力衍生的浮升力也是混乱的。

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,由离心力衍生浮升力计算公式可知,在温度较高的流体区域,温度差  $\Delta T > 0$ ,离心力衍生的浮升力与离心力方向相反,浮升力将阻碍流体流动,而在温度较低的流体区域,温度差  $\Delta T < 0$ ,离心力衍生的浮升力与离心力方向相同,浮升力将加速流体流动。哥氏力衍生的

浮力对流体作用,取决于哥氏力的作用形式以及流体温度差。

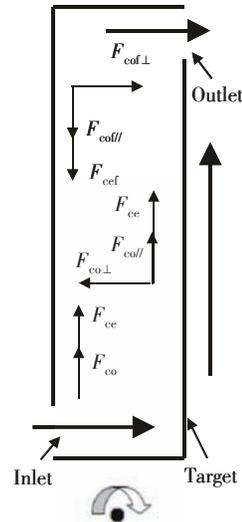


Fig. 6 Effects of centrifugal force, coriolis force and buoyancy force

图7是受限层板结构内热量传递情况。由于受限层板侧壁隔板的导热作用,所以冲击面温度也较高,导致通过靶面反射到冲击面的附近的流体温度升高,所以靠近冲击面和靶面附近的流体温度升高,中间流体温度较低。靠近壁面的流体温度较高,浮升力起到阻碍流体流动的作用,与静止相比流体流速减小,通道中间处流体温度较低,浮升力起到加速流动的作用,与静止相比流体流速较低(如图8所示)。综合评价浮升力对层板换热能力的影响,需要综合考虑浮升力增强换热和减弱换热这两部分因素所占的比重。

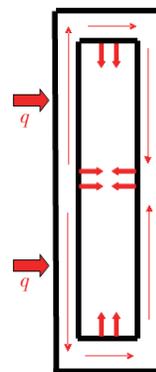


Fig. 7 Heat transfer in limited lamilloy

#### 5 数值模拟结果及分析

图9为转速 10kr/min 条件下,不同旋转角度靶面

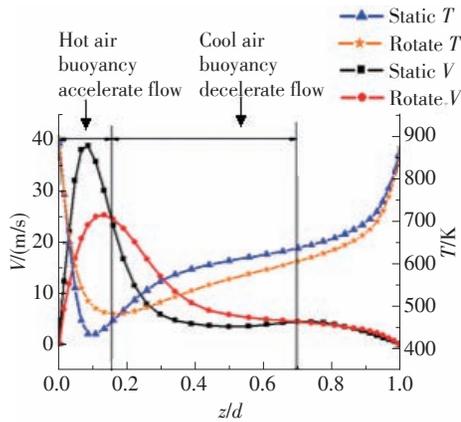


Fig. 8 Velocity and temperature of air with  $y/d=5$  and  $x/d=7.5$

对流换热系数随温度比分布图。由图9可以看出,在各角度下,对流换热系数均随温度比的增加而降低,说明浮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重比增强换热的比重大。同时对流换热系数在各旋转角度之间又表现出一些一致性。图中可以看出  $\beta$  为  $0^\circ$  与  $180^\circ$ ,  $30^\circ$  与  $210^\circ$ ,  $45^\circ$  与  $225^\circ$ ,  $60^\circ$  与  $240^\circ$ ,  $90^\circ$  与  $270^\circ$ ,  $120^\circ$  与  $300^\circ$ ,  $135^\circ$  与  $315^\circ$ ,  $150^\circ$  与  $330^\circ$  时,靶面对流换热系数基本一致,即旋转轴在同一直线的不同方向时,对流换热系数基本相同。在热流密度相同的条件下,  $\beta$  为  $0^\circ$  与  $180^\circ$  的温度比最大,  $90^\circ$  和  $270^\circ$  的温度比最小。  $\beta$  为  $90^\circ$  与  $270^\circ$  的对流换热系数最大,而  $\beta$  为  $0^\circ$  与  $180^\circ$  的对流换热系数最小,说明旋转角度的变化会导致哥氏力和浮升力的变化,从而影响层板的换热能力。旋转角度越靠近  $90^\circ$  和  $270^\circ$  对流换热系数越高,旋转角度越靠近  $0^\circ$  和  $180^\circ$  对流换热系数越低。还可以看出,在相同热流密度条件下,旋转角度从  $90^\circ$  和  $270^\circ$  逐渐转向  $180^\circ$  和  $0^\circ$  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,对流换热系数比较高,而温度比较大的情况下,对流换热系数比较低,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10为转速为  $5\text{kr}/\text{min}$  时对流换热系数分布图,与图9比较,二者对流换热系数随旋转角度变化分布规律基本一致。

从图9中还可以看出,在  $\beta = 90^\circ$  和  $270^\circ$  的情况下,最大温度比和最小温度比所对应的对流换热系数差值最大,在  $\beta = 0^\circ$  和  $180^\circ$  的情况下,最大温度比

和最小温度比所对应的对流换热系数差值最小,即浮升力在  $\beta = 90^\circ$  和  $270^\circ$  条件下对层板的换热影响最大,在  $\beta = 0^\circ$  和  $180^\circ$  条件下浮升力对层板的换热影响最小。各旋转角度中,对流换热系数最大相差  $55\%$  左右。

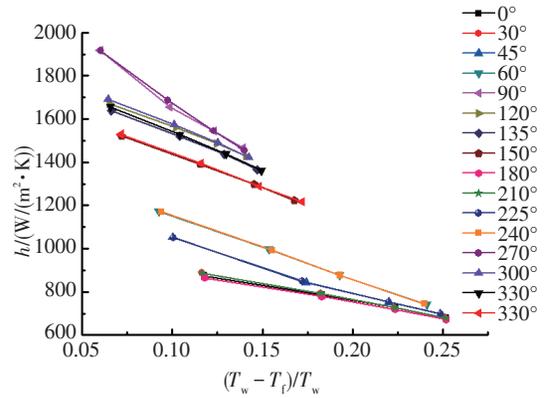


Fig. 9 Effects of temperature ratio and rotation axis angle on heat transfer coefficient (rotation speed  $10\text{kr}/\text{min}$ )

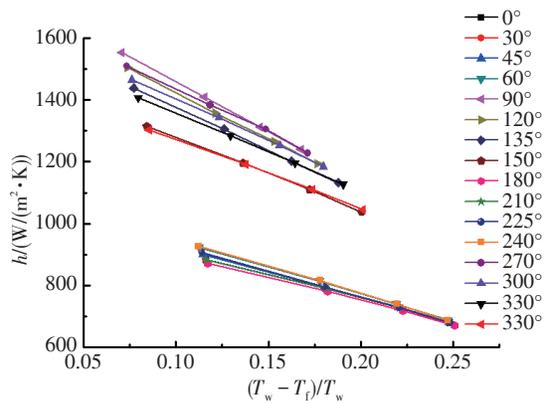


Fig. 10 Effects of temperature ratio and rotation axis angle on heat transfer coefficient (rotation speed  $5\text{kr}/\text{min}$ )

选用  $\beta = 0^\circ$  和  $270^\circ$  进行分析。对  $\beta = 0^\circ$  和  $270^\circ$  内部流场研究可以发现:当旋转角度为  $0^\circ$  时平行于靶面方向上,层板内流场关于层板中心线对称,流体不受到平行于靶面哥氏力的作用,靶面温度分布也比较对称。随着旋转角度的增加,平行于靶面的哥氏力的作用逐渐增大,将层板左侧流体逐渐推向层板右侧。  $\beta = 270^\circ$  时平行于靶面方向上的哥氏力作用效果最大,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哥氏力作用,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

旋转半径指向旋转中心的哥氏力作用,而在受限层板右侧流体的受力情况却完全相反,此时哥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哥氏力的共同挤压作用,流体向右侧偏移。所以270°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0°时靶面温度低(见图11)。

由于哥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,见图12。

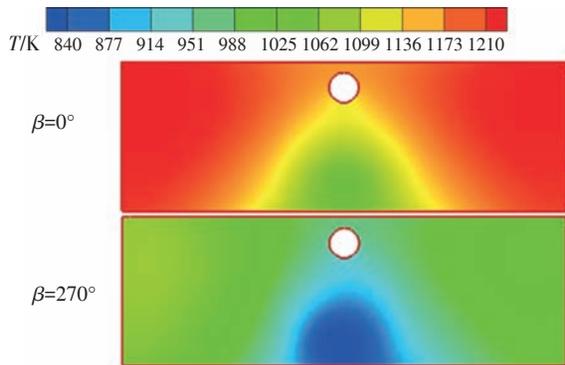


Fig. 11 Target surface temperature with  $\beta = 0^\circ$  and  $270^\circ$

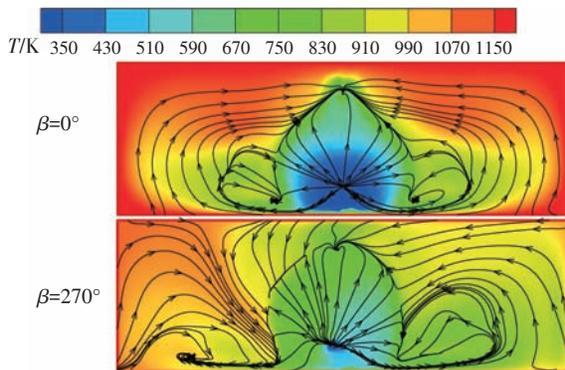


Fig. 12 Air temperature and streamline with  $\beta = 0^\circ$  and  $270^\circ$  in the plane of  $z/d=0.125$

在270°时,流体在哥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哥氏力作用造成的,可以认为平行于靶面的哥氏力比垂直于层板的哥氏力对流体的作用强。

图13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,密度比层板左侧较

高,此时受限层板右侧流体温度与参考温度之差 $\Delta T$ 降低,浮升力阻碍流动的影响减弱,右侧对流换热系数增加。

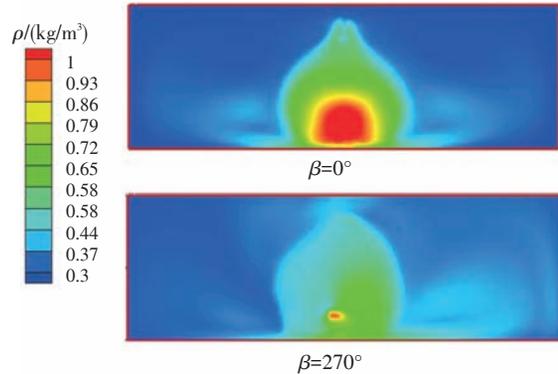


Fig. 13 Air density in the plane of  $z/d=0.125$

## 6 结论

动叶由于其旋转性,诱导出离心力、哥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)旋转轴与层板所成角度不同时,对流换热系数呈现一定的相似性,旋转轴在同一条直线上时,对流换热系数非常相似。

(2)旋转轴与层板所成角为90°和270°时对流换热系数最高,浮升力的影响最小,旋转轴与层板所成角度为0°和180°时,对流换热系数最低,浮升力的影响最大。两种极端条件下,对流换热系数会产生55%左右的差异。

(3)平行于受限层板靶面的哥氏力使层板内流体发生偏移,从而造成受限层板内各部分浮升力的影响不同,对对流换热系数造成影响。

## 参考文献:

[ 1 ] 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):1411-1420.

[ 2 ] 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 Turbomachinery*, 1994, (116):738-744.

[ 3 ] Griffith Todd S, Luai Al-Hadhrani, Je-Chin Han. Heat Transfer in Rotating Rectangular Cooling Channels ( $AR=4$ ) with Dimples [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, (125):555-563.

- [ 4 ] Guoguang Su, Hamn-Ching Chen, Je-Chin Han, et al. Computation of Flow and Heat Transfer in Rotating Two-Pass Rectangular Channels ( $AR = 1:1, 1:2, \text{ and } 1:4$ ) with Smooth Walls by a Reynolds Stress Turbulence Model [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, (47):5665-5683.
- [ 5 ] Luai Al-Hadhrami, Je-Chin Han. Effect of Rotation on Heat Transfer in Two-Pass Square Channels with Five Different Orientations of  $45^\circ$  Angled Rib Turbulators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, (46): 653-669.
- [ 6 ] Mohammad Al-Qahtani, Hamn-Ching, Chen Je-Chin Han. A Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Rotating Rectangular Channels ( $AR = 4$ ) with  $45^\circ$  Rib Turbulators by Reynolds Stress Turbulence Model [R]. *ASME 2002-GT-30216*.
- [ 7 ] Basha M, M AL-Qahtani, Yilbas B S. Entropy Generation in a Channel Resembling Gas Turbine Cooling Passage: Effect of Rotation Number and Density Ratio on Entropy generation [J]. *Sadhana*, 2009, (34): 439-454.
- [ 8 ] Nealy D A, Relder S B. Evaluation of Laminated Porous wall Material for Combustor Liner Cooling [R]. *ASME 1980-GT-102*.
- [ 9 ] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲等. 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
- [ 10 ] Michael Huh, Jiang Lei, Je-Chin Han. 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): 1-14.
- [ 11 ] Liou T M, Chang S W, Hung J H, et al. High Rotation Number Heat Transfer of a  $45^\circ$  Rib-Roughened Rectangular Duct with Two Channel Orientations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, (50): 4063-4078.
- [ 12 ] 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 Hai-ping, PAN Jin-dong. Heat Transfer of Impingement in Limited Room Configuration with Effusion in Rotating State [J]. *Journal of Proulsion Technology*, 2008, 29(2): 149-152.)
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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 Jing-yang, CHANG Hai-ping, 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.)
- [ 15 ] 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.

(编辑:朱立影)