旋转方位角对斜肋通道内部流动与换热的影响

刘传凯 丁水汀 邱 天 陶 智

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191) (北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100191)

摘 要：数值模拟了静止及旋转状态下径向出流 60°斜肋通道的内流动与换热分布，研究了 3 种旋转方位角：0°，－45°及＋45°. 分析了哥氏力与肋片对旋转通道内流及换热的耦合作用机理. 计算结果表明：旋转方位角对通道的内流与换热影响显著. 在 0°旋转方位角下，通道前后缘的换热差异最大；在－45°方位角下，通道整体换热性能最差；在＋45°方位角下，通道具有最佳的整体换热性能.

关 键 词：燃气轮机；冷却叶片；对流传热；数值模拟；旋转

中图分类号：V 235.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)10-1188-04

Effects of channel orientation on fluid flow and heat transfer in a channel with angled ribs

Liu Chuankai Ding Shuiting

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Qiu Tian Tao Zhi

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical simulations of turbulent flow and heat transfer in a rotating radial outward flow passage with 60° ribs were performed. Three channel orientations were studied, that is, 0°, −45° and +45°. Effects of Coriolis and rib induced secondary flows were analyzed with the three dimensional simulations and the following conclusions were drawn: the combined effects of Coriolis and rib induced secondary flows largely depend on channel orientation. The 0° channel orientation produces largest heat transfer variation between leading and trailing edges, the −45° channel orientation gives the lowest overall heat transfer augmentation, while the +45° channel orientation has the highest overall heat transfer enhancement.

Key words: gas turbines; cooling blades; convective heat transfer; numerical simulation; rotating

现代航空发动机高压涡轮叶片中部内冷系统大部分采用内流场为径向流动的带肋冷却通道. 因此，相关研究对指导工程设计具有重要意义.

冷却通道在旋转状态下，其内流场中增加了旋转附加力的作用，这些附加力主要是哥氏力、离心力以及在非均匀温度场下衍生的浮升力[1−3]. 在实际的涡轮转子叶片中，受叶片型面的影响，叶片内冷通道往往与旋转轴成一定的方位角，使得旋转附加力与通道各表面的相对夹角发生变化，进而影响流动与换热过程. 已有研究[4−5]表明，随方位角的增大，光滑通道内的旋转效应在一定程度上会被削弱.

为了满足高性能航空发动机燃烧室出口总温不断提高的需求，涡轮转子叶片内冷通道大多采用了肋片以强化换热. 相对于直肋而言，斜肋不但能诱发肋间二次流，加强换热通道中心冷流体和壁面热流体之间的掺混，而且具有增大换热表面和破坏边界层的作用[6]. 当斜肋通道处于旋转状态下，肋片与旋转附加力对通道内流动与换热过程会产生复杂的耦合影响，这种耦合影响与旋转

收稿日期：2008-10-08

作者简介：刘传凯(1979－)，男，黑龙江桦南人，博士后，liuchuankai@buaa.edu.cn.

方位角密切相关,是转子叶片内冷系统设计中必须考虑的问题.

目前,涉及冷却通道旋转方位角的研究并不多,国内只针对光滑通道[5]做了实验研究,尚未见对斜肋通道的研究报道.国外针对旋转斜肋通道方位角的有限研究[7-8]一般只给出通道换热表象的定性描述,而对肋片二次流与旋转二次流之间的耦合作用机理缺乏针对性的分析.

本文采用数值方法,对比分析了 60°斜肋通道在静止及 3 种不同旋转方位角下的流动与换热过程,探讨肋片诱发的二次流与哥氏力诱发的二次流的耦合作用机理,为转子叶片内冷系统的设计提供参考.

1　数值计算模型

数值计算的几何模型参考了文献[7]所研究的 U 形通道径向出流段.如图 1 所示,截面为方形,水力直径 D_h 为 12.7 mm.进出口处各有 2.0D_h 的绝热段,中部等温段长度为 12.5D_h.通道最小旋转半径 R_0 为 21.75D_h.通道前缘和后缘各布置 10 个肋片.肋高 $e=0.125\,D_h$;肋间距 $p=1.25\,D_h$.

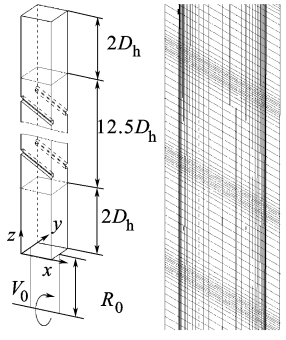


图 1　通道模型及计算网格简图

计算模拟了斜肋通道在静止及 3 种不同旋转方位角下的流动及换热分布.图 2 给出了静止状态下肋片二次流的示意图以及 0°,−45°,+45°旋转方位角下肋片二次流与哥氏力二次流的耦合作用示意图.

计算网格沿坐标轴的 x 方向、y 方向、z 方向的数目分别为 40,43,280.当网格数沿坐标轴各方向分别增加 50%时,努赛尔数的计算结果变化幅度在 2%以内.

控制方程采用经过时均化的定常可压缩流 N-S 方程.在旋转坐标系下,动量方程中引入了表示哥氏力和离心力的源项,分别表示如下:

$$S_{cor}=-2\rho[\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{V}] \tag{1}$$

$$S_{cfg}=-\rho[\boldsymbol{\Omega}\times(\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{r})] \tag{2}$$

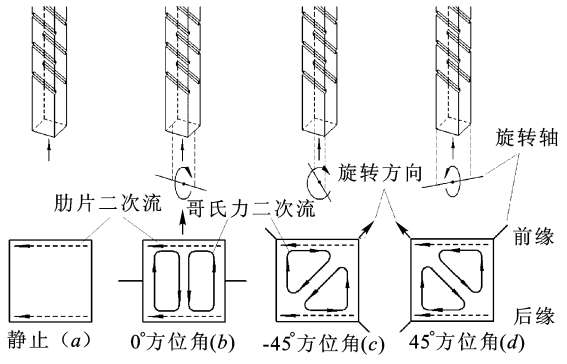


图 2　不同旋转方位角下肋片二次流与哥氏力二次流示意图

式中,ρ 为流体密度;$\boldsymbol{\Omega}$ 为旋转矢量;$\boldsymbol{V}$ 为流体相对于通道的速度;$\boldsymbol{r}$ 为旋转半径.

湍流模型采用 Wilcox 低雷诺数 k-ω 模型[9].这是因为 Wilcox k-ω 模型为积分到壁面的湍流两方程涡粘模式,它不像 k-ε 或其他两方程模型,不需要显式的壁面衰减函数.相对而言 k-ω 模型在旋转管流的计算中比其他两方程模型更能体现近壁区旋转附加力的递变规律[10].

气流进口温度为 300 K,均匀分布;出口压力 $1.013\,25\times10^5$ Pa.计算工况如表 1 所示.

表 1　计算工况

通道状态	编号	Re	Ro	Dr	方位角/(°)
静止	a	5 000	0	0.1	
旋转	b	5 000	0.176	0.1	0
旋转	c	5 000	0.176	0.1	−45
旋转	d	5 000	0.176	0.1	+45

通过对控制方程的无因次分析[11],在几何相似的基础上控制旋转系对流换热过程的无因次准则数为雷诺数 Re,旋转数 Ro,温度比 $\dfrac{\Delta T}{\overline{T}_w}$ 以及沿流向无因次位置 z/D_h.局部努塞尔数可表示为

$$Nu=f\left(Re,Ro,\frac{\Delta T}{\overline{T}_w},z/D_h\right) \tag{3}$$

式中,$Re=\rho_0 V_0 D_h/\mu_0$,表示流体惯性力与粘性力之比;$Ro=\Omega D_h/V_0$,表示哥氏力与流体惯性力之比;$\dfrac{\Delta T}{\overline{T}_w}=(\overline{T}_w-T_0)/\overline{T}_w$,表示特征换热温差与壁面平均温度的比值;$\overline{T}_w$ 为通道壁面平均温度;T_0 为进口温度;V_0 为进口平均速度.

2　计算结果分析

2.1　静止状态

图 3 给出了静止条件下 $z/D_h=11$ 的截面上的 u-v 速度场和无量纲过余温度 θ 的分布图($\theta=(T_f-T_0)/(T_w-T_0)$).静止状态下,由于通道几

何结构的对称性，其内部流场和温度也呈现出对称分布.在带肋侧壁附近，流体在肋片的作用下发生侧移，在左侧壁遇阻后汇集到中心区形成回流，形成了涡心偏向左侧的双涡二次流.该二次流在带肋面附近的强度较高，最大可达通道进口平均速度 V_0 的50%，而中心区相对较弱，不超过 V_0 的30%.肋片二次流的输运作用使得近壁面热流体汇集到右侧壁面，而中心冷流体则向左侧偏移.

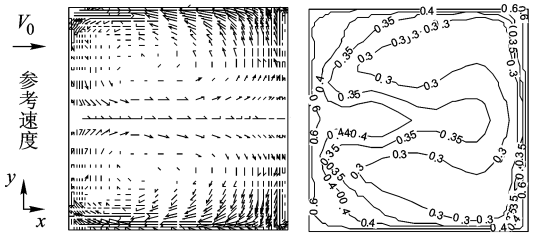


图3 静止状态下通道截面的流场和温度场分布

2.2 0°旋转方位角

图4给出了0°旋转方位角下 $z/D_h=11$ 截面上的 u-v 速度场和 θ 的分布图.在该旋转方位角下，哥氏力推动核心区流体向后缘偏移(y 轴负方向)，后缘面附近的流体被加速，肋片诱发的二次流强度被增强；前缘表面(y 轴正方向)的近壁流体被减速，肋片诱发的二次流强度也大幅度减弱.后缘肋片诱发的二次流成为影响通道内流场的主导因素.

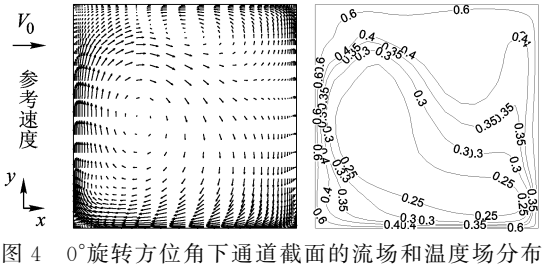


图4 0°旋转方位角下通道截面的流场和温度场分布

在通道左侧壁面，后缘诱发的肋片二次流遇阻后沿侧壁向前缘折转，而在通道右侧壁面，该肋片二次流的抽吸作用使得近壁流体由前缘流向后缘.哥氏力加速了左侧壁流体向前缘的流动，抑制了右侧壁流体向后缘的流动.因此，通道内的截面二次流由静止状态的对称双涡演变成0°旋转方位角下主次分明的非对称双涡.通道截面内温度场的变化反映了流场的变化规律：温度较低的流体在哥氏力与肋片的共同作用下，偏向了通道截面的左下侧.

2.3 −45°旋转方位角

图5给出了−45°旋转方位角下 $z/D_h=11$ 截面上的 u-v 速度场和 θ 的分布图.在该旋转方位角下，哥氏力指向图中通道截面的左下侧，哥氏力推动的二次流在前、后缘带肋表面都将是自左向右流动的，与肋片对截面二次流的作用方向正好相反.两者对通道内截面二次流的作用相互抑制，二次流的整体强度被大幅度削弱.从通道截面 θ 分布的情况看，截面二次流对通道内流体掺混作用被削弱，使得通道中心流体与近壁热流体之间的温差也显著增加.

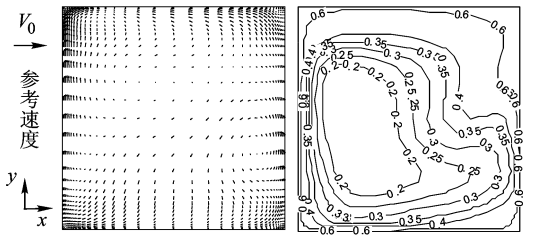


图5 −45°旋转方位角下通道截面的流场和温度场分布

2.4 +45°旋转方位角

图6给出了+45°旋转方位角下 $z/D_h=11$ 截面上的 u-v 速度场和 θ 的分布图.在该旋转方位角下，哥氏力指向图中通道截面的右下侧，哥氏力诱发的二次流在前、后缘带肋表面都将是自右向左流动的，与肋片对截面二次流的作用方向正好相同，两者对通道内截面二次流的作用相互叠加.因此，相对于静止状态，前、后缘带肋面的二次流强度都被显著加强.由于存在指向后缘面的哥氏力分量，后缘表面的二次流强度增长幅度略大.整体而言，通道内的截面二次流仍然呈现与静态相似的双涡结构，但其强度有所增加，并存在一定的非对称性.对比通道截面的 θ 分布，+45°旋转方位角下截面二次流对通道内流体的掺混作用最强烈，通道截面内流体的温差显著减小.

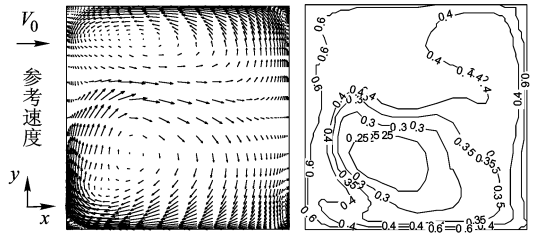


图6 +45°旋转方位角下通道截面的流场和温度场分布

2.5 对换热的影响

图7给出了不同旋转方位角下，通道 $z/D_h=7$ 的位置处，前后缘表面平均努赛尔数比 $\overline{Nu}/Nu_0$ 的计算结果与文献[7]实验结果.其中 Nu_0 为Dittus-Boelter经验公式的计算值，即

$$\overline{Nu}/Nu_0=(hD_h/\lambda)/(0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}) \quad (4)$$

在0°和+45°方位角下(目前缺乏−45°方位角的实验数据)，计算结果整体上比实验结果[7]略

低,但趋势是一致的.考虑到数值仿真与实验研究在几何和边界条件上不可避免的差异,计算结果能够反映旋转附加力与肋片对通道内部流动与换热的耦合作用规律.

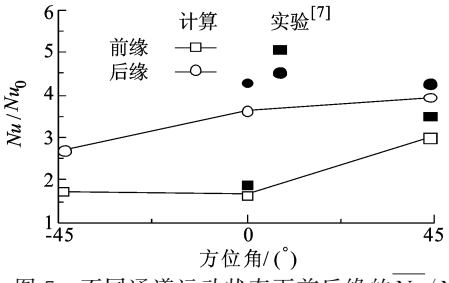


图 7　不同通道运动状态下前后缘的$\overline{Nu}/Nu_0$

从图 7 还可以看出,在 0°旋转方位角下,由于哥氏力的作用,前后缘表面呈现显著的换热差异,前缘$\overline{Nu}/Nu_0$ 不足后缘的 50%;在+45°旋转方位角下,通道后缘的换热相对于 0°旋转方位角的状态变化不大,而前缘换热则增加约 80%,前后缘的换热差异显著减小,通道的整体换热能力也得到增强.在−45°旋转方位角下,通道前缘的换热相对于 0°旋转方位角的状态没有明显变化,但后缘换热却下降约 20%.前后缘的换热差异减小,通道的整体换热被削弱,这是由于哥氏力与肋片二次流相互抑制的结果.

3　结 束 语

数值模拟了静止及不同旋转方位角下 60°斜肋通道的内流动与换热,分析了哥氏力与肋片的耦合作用对通道内流动与换热的影响机理.

在本文研究的参数范围内,计算表明:①静止状态下,肋片诱发了通道横截面内的双涡二次流,该二次流强度在中心区较小,两侧壁附近较高,最大可达进口平均速度的 50%;②在 0°旋转方位角下,哥氏力推动主流型向后缘偏移,使得前后缘带肋表面呈现显著的换热差异,前缘 Nu 不足后缘 Nu 的 50%;③哥氏力与肋片对流动与换热的耦合作用与旋转方位角密切相关,当哥氏力推动的二次流与肋片二次流方向趋于一致时(+45°方位角),通道的换热性能被增强;二者方向相反时(−45°方位角),通道的换热被削弱;④无论是在+45°旋转方位角还是−45°旋转方位角下,通道前后缘的换热差异均小于 0°旋转方位角的情况.

参考文献(References)

[1] 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, 1991,113:42−51

[2] Fu W L, Wright L M, Han J C. Heat tranfer in two-pass rotating rectangular channels (AR=1:2 AND AR=1:4) with smooth walls[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127:265−277

[3] Iacovides H, Kounadis D, Launder B E. Experimental study of thermal development in a rotating square-ended U-bend [R]. ASME Paper No. 2006-GT-90846,2006

[4] Willett F T, Bergles A E. Heat transfer in totating narrow rectangular ducts with heated walls at 60 to the *R-Z* plane [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123:288−295

[5] 刘传凯, 陶智, 丁水汀,等. 3 种转角下旋转 U 形方通道的局部换热[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(3):284−287

Liu Chuankai, Tao Zhi, Ding Shuiting, et al. Local heat transfer in a rotating *U*-shaped square channel with three channel orientations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(3):284−287(in Chinese)

[6] Han J C, Park J S, Lei C K. Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters[J]. Journal of Engineering for Gas turbines and Power, 1985, 107:628−635

[7] Parsons J A, Han J C. Zhang Y M. Effect of model orientation and wall heating condition on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38: 1151−1159

[8] Fu W L, Wright L M, Han J C. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels (AR=1:2 and AR=1:4) with 45 deg angled rib turbulators[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127:164−174

[9] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD[M]. California: DCW Industries Inc, 1993

[10] Sleiti A, Kapat J S. Effect of Coriolis and centrifugal forces at high rotation and density ratios[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(1):67−79

[11] 刘传凯. 旋转蛇形通道内冷气的流动与换热机理研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院, 2006

Liu Chuankai. Study on fluid flow and heat transfer in rotating serpentine cooling channels[D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

(编　辑:张　嵘)