旋转附加力对方通道内流动与换热的影响机理

刘传凯 丁水汀 陶 智

(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：在雷诺数为 25 000，旋转数为 0～0.24，温度比为 0～0.22 的范围内，数值模拟了旋转光滑径向出流通道的内流动与换热分布，分析了哥氏力与离心浮升力对旋转管流的耦合作用机理. 计算结果表明，切向哥氏力推动了通道截面内的双涡二次流，径向哥氏力则使得近侧壁流体加速和中心流体减速. 离心浮升力对流动与换热的作用效果与哥氏力场的分布密切相关. 换热计算结果从定性趋势上吻合公开文献中的实验现象，反映了旋转附加力的基本影响规律.

关 键 词：燃气轮机；冷却叶片；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)03-0276-04

Effects of rotating induced forces on fluid flow and heat transfer in square channel

Liu Chuankai Ding Shuiting 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 smooth radial outward flow passage were performed with rotation number from 0 to 0.24, density ratio from 0 to 0.22, and fixed Reynolds number of 25 000. Effects of Coriolis force and Centrifugal force were analyzed with the three dimensional simulations and the following conclusions were drawn: the tangential component of Coriolis force induces cross stream secondary flow in the form of two-cell pattern, while the radial component of Coriolis force decelerates and accelerates the center bulk flow and the flow in the vicinity of the side wall, respectively. The influence of buoyancy force on flow and heat transfer shows marked dependency on the intensity of the Coriolis force. The predictions reproduce correct physics and show qualitative agreement with the published experimental observations.

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

现代航空发动机高压涡轮叶片内冷系统一般是由蛇形通道构成. 与静止通道相比，旋转通道内部主要是增加了哥氏力、离心力以及在非均匀温度场下衍生的浮升力作用. 这些旋转附加力交互作用本质上是非线性的，其宏观表象也是非单调的. 因此，仅从旋转换热实验的宏观表象[1-3]并不能精确反映出这种复杂的耦合关系. 近些年来，虽然旋转通道内流场显示实验[4-5]也得到一定程度的发展，但由于该实验技术的高难度和高复杂性，目前仍无法获得足够清晰的流场数据. 数值模拟是进行机理分析的重要手段，而已有的研究报道[6-8]并没有给出旋转附加力场的分布及其与流体速度场、温度场的作用与反作用关系，忽略了对旋转附加力之间相互耦合作用关系的分析. 本文数值模拟了旋转径向出流方通道内部的力场、流场及其换热分布，在深入分析旋转附加力的基础之上，探讨其对旋转通道内流动与换热的耦合作用机理.

收稿日期：2008-03-11

作者简介：刘传凯(1979－)，男，黑龙江桦南人，博士后，lckww@sina.com.

1　数值计算模型

如图 1 所示,计算模型为文献[2]研究的 U 形通道径向出流段.截面为方形,水力直径 D_h 为 12.7 mm.进出口处各有 $1.5D_h$ 的绝热段,中部为等温壁面.由于结构的对称性,计算域只取实验模型的一半,中间面定义为对称边界条件.计算网格沿图 1 所示坐标轴的 x 方向、y 方向、z 方向的数目分别为 22,44,204.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.

基于图 1 所示的旋转坐标系,旋转附加力可以分解为:切向哥氏力分量 $2\rho\Omega w$ 和径向哥氏力分量 $2\rho\Omega v$,切向离心力分量 $\rho\Omega^2 y$ 和径向离心力分量 $\rho\Omega^2(R+z)$.一般情况下,通道水力直径远小于其旋转半径($y<D_h<<R$),因此,切向离心力的影响可以忽略不计.本文所述的离心力和离心浮升力仅表示其径向分量.

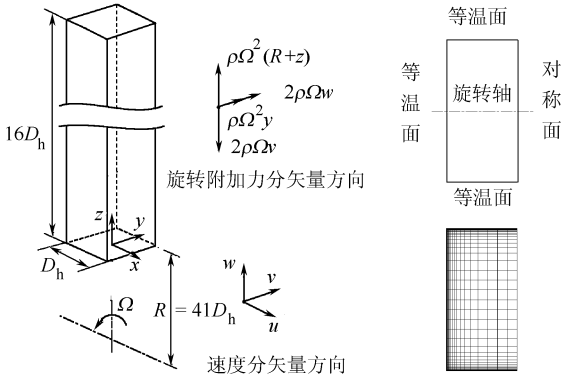


图 1　通道模型及其计算网格

数值计算使用 Star-CD 商业软件,采用经过时均化的定常可压缩流 N-S 方程.需要指出的是,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:

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

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

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[7]

通过对控制方程的无因次分析[10],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 θ 以及沿流向无因次位置 z/D_h.局部努塞尔数可表示为

$$Nu=f(Re,Ro,\theta,z/D_h) \tag{3}$$

式中,雷诺数 $Re=\rho_0 V_0 D_h/\mu_0$;旋转数 $Ro=\Omega D_h/V_0$;温度比(或密度比)$\theta=(\rho_0-\bar{\rho}_w)/\rho_0=(\bar{T}_w-T_0)/\bar{T}_w$.$D_h$ 为冷却通道的水力直径;T_0 为进口温度;V_0 为进口平均速度.

数值计算进口温度为 300 K,为均匀速度分布;出口压力 $1.013\,25\times10^6$ Pa.数值计算的 Re 为 25 000,Ro 的范围是 0～0.24,θ 的范围是 0～0.22.

2　计算结果分析

2.1　哥氏力的影响

保持壁面绝热,计算 Ro 分别为 0,0.12,0.24 时通道内流场的变化规律.此时,离心力作为质量力,在相同径向位置处为恒定值,只对通道内的径向压力分布施加影响,对流动基本没有作用.哥氏力是影响通道内流场的主导因素.

图 2 示出了不同 Ro 下切向哥氏力分量沿 x 方向的分布.对于绝热通道,切向哥氏力的平均强度基本与 Ro 成正比,但其分布形式取决于径向速度 w 的分布.在中心主流区,由于 w 较大,其切向哥氏力的强度也比较大.在近侧壁处,流体粘性作用使得 w 迅速减小,切向哥氏力的强度也随之迅速衰减.

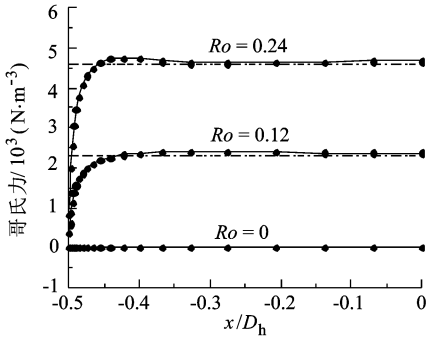
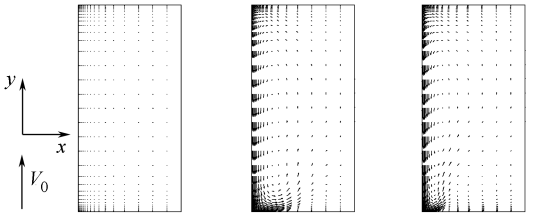


图 2　旋转数对切向哥氏力的影响
($y/D_h=0.5$,$z/D_h=10$)

图 3 给出了切向哥氏力对通道内的截面二次流的影响.在静止条件下($Ro=0$)通道内的二次流非常微弱,这种微弱的二次流仅是由于流场未充分发展所致,由于对称性,二次流的速度矢量均是由四壁指向中心.在旋转条件下,切向哥氏力推动中心流体流向后缘并沿两侧壁形成回流,形成了涡心偏向侧壁的双涡结构.随着 Ro 的增加,切向哥氏力所诱发的双涡二次流强度也在不断增加.由于侧面近壁区哥氏力梯度很大,该区域切向速度分量变化剧烈.切向速度分量在距侧壁很小

的尺度内即形成了反向极大值，最大达到进口平均速度V_0的20%以上，中心区的切向速度分量较小.

旋转通道内切向平面内的二次流衍生了与切向速度相垂直的径向哥氏力. 如图4所示，在近侧壁处，径向哥氏力指向z轴正方向，加快近侧壁流体径向速度；在中心主流区指向z轴负方向，减小流体径向速度. 随着Ro的增加，径向哥氏力峰值随之增长，但径向哥氏力平均值基本始终保持在0左右.



a $Ro=0$ b $Ro=0.12$ c $Ro=0.24$

图3 旋转数对截面二次流的影响($z/D_h=10$)

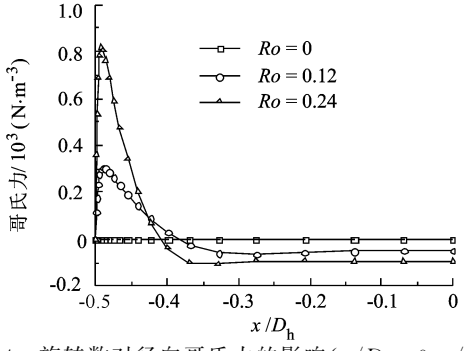
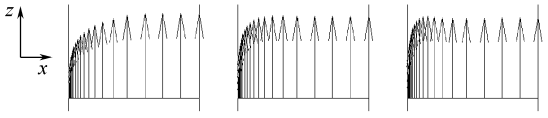


图4 旋转数对径向哥氏力的影响($y/D_h=0$，$z/D_h=10$)

图5示出了通道内径向速度w沿x轴方向的分布趋势与Ro的关系. 可以看出，在高旋转数($Ro=0.24$)时，w呈现出双峰分布：其峰值并不在中心区，而是在侧壁附近. 这种双峰分布与文献[4]通过流场显示实验观测到的现象趋势一致，该文献将w的这种双峰分布主要归结为哥氏力的径向分量的推动作用. 为验证上述解释，本文在数值计算中将动量方程中的哥氏力径向分量去掉后，仍然得到了双峰分布的径向流场. 这说明，导致这种流动现象的根本原因在于，不断增强的切向哥氏力所推动的二次流将后缘附近具有较高径向速度分量的流体输运至侧壁附近所致，而径向哥氏力的存在只是加剧了这种趋势.

2.2 离心力浮升力的影响

在旋转加热通道中，离心浮升力不仅仅体现在近壁边界层与主流区的离心力强度的差异. 同时，由于哥氏力推动的二次流导致通道内部温度场呈现出宏观尺度的非均衡分布，离心力在相同



a $Ro=0$ b $Ro=0.12$ c $Ro=0.24$

图5 旋转数对径向速度型的影响($y/D_h=0$，$z/D_h=10$)

径向位置处不再是对称分布，而是沿切向哥氏力所指方向发生偏移. 图6示出了哥氏力对离心浮升力分布的这种影响：靠近前缘的一侧温度较高，离心力强度相对较低；靠近后缘的一侧温度较低，离心力强度相对较高.

图6还给出了上述非均衡离心力场对主流速度型(y方向)的影响. 可以看出，不断增长的离心浮升力通过与哥氏力的交互作用使得主流型的偏移被迅速加剧. 在θ较高的条件下，前缘附近甚至出现了局部逆流. 有文献[2]认为，旋转通道内主流型的偏移是由哥氏力所主导的. 实际上，这个说法可能并不十分准确：单纯的哥氏力对主流速度型的影响毕竟有限，而对称分布的离心力场也不可能导致主流型的偏移. 在加热径向出流通道中，主流型发生的如此强烈的偏移是两种旋转附加力的非线性耦合作用的结果，两者缺一不可.

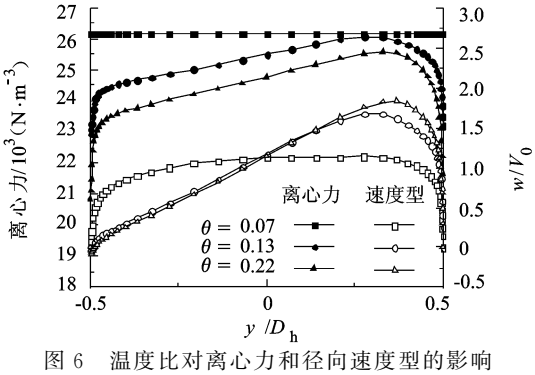


图6 温度比对离心力和径向速度型的影响
($x/D_h=0$，$z/D_h=10$)

图7给出不同θ下相对离心力($(\rho\Omega^2(R+z)-\overline{\rho\Omega^2(R+z)})$)、相对径向哥氏力($(2\rho\Omega v-\overline{2\rho\Omega v})$)沿$x$轴方向的分布. 对比两图可以发现，相对离心力与相对径向哥氏力对流场的作用方向是相反的. 相对径向哥氏力的强度基本不受θ的影响，相对离心力对近壁流体峰值速度的抑制作用却随θ的增加而不断增大.

图8给出了温度比对径向速度型的影响，与离心力场的变化趋势恰恰相反，加热通道中近侧壁径向速度的峰值随θ的增加先迅速增长，只是在较高θ的条件下才略有下降. 这是由于离心浮升力加剧了主流型的偏移，在截面二次流的进一步作用下，靠近后缘面具有较高径向速度分量的

流体被输运至侧壁附近;同时,靠近前缘面具有较低径向速度分量的主流体被输运至中心区.这进一步说明,主流型的偏移和切平面内二次流的输运作用是诱发径向速度分量沿 x 方向呈现的双峰结构的主导因素.只有在 θ 比较高的情况下,离心浮升力对侧壁流场峰值速度的抑制作用才有所显现.

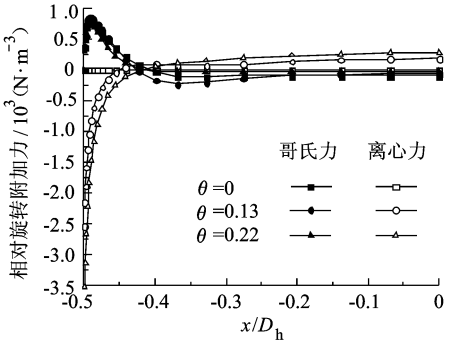


图 7　温度比对离心力及径向哥氏力影响 ($y/D_h=0, z/D_h=10$)

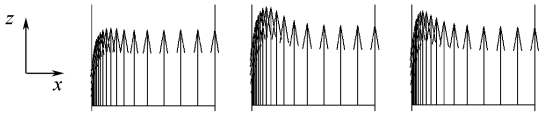


图 8　温度比对径向速度型的影响($y/D_h=0, z/D_h=10$)

图 9 给出了进口附近($z/D_h=3$)θ 对离心浮升力和径向速度分布的影响.可以看出,在进口附近,哥氏力所推动的二次流尚未充分发展,通道截面上的温度场也未呈现明显的宏观尺度差异.离心浮升力主要体现在近壁边界层与中心主流区的差异,其分布基本上是轴对称的.因此,随 θ 的增加,各表面的近壁流体均被小幅度减速.

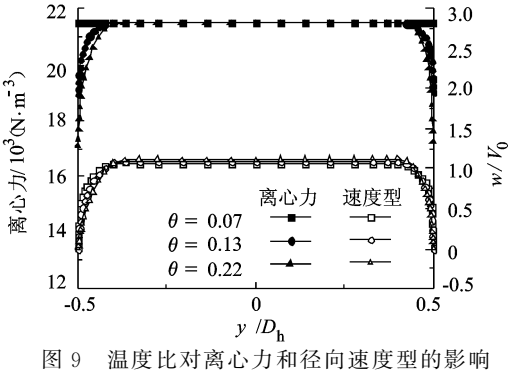


图 9　温度比对离心力和径向速度型的影响 ($x/D_h=0, z/D_h=3$)

2.3　旋转附加力对换热的影响

图 10 给出了前后缘换热随密度比变化的数值模拟结果以及文献[2]的实验结果.需要指出的是,本文数值计算中的均匀进口条件与文献[2]实验研究的突缩进口条件并不完全相同,但是,旋转推动的二次流由进口向下游都将同样经历一个由弱到强的发展过程.因此,两者虽然存在一定程度的定量差异,但定性趋势上完全吻合.整体上看,前缘与后缘的换热都随 θ 的增加而增加.通道的中部和尾部前后缘换热增幅都比较大.进口附近前缘换热随温度比的增加出现小幅度下降,与整体变化趋势相反.可见,通道不同沿程位置处受 θ 的影响并不相同.

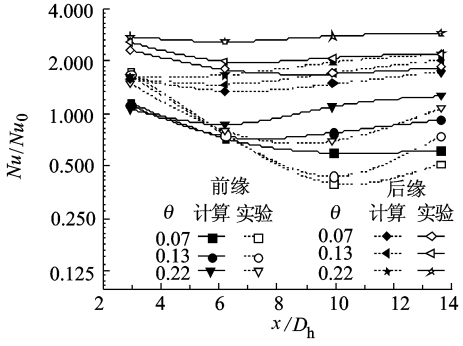


图 10　温度比对前缘和后缘换热影响

浮升力对换热的上述影响可以根据其对流场的影响中找到原因.如前所述,在进口附近($z/D_h=3$),哥氏力诱发的截面二次流比较微弱,流场也尚未充分发展.离心浮升力使得近壁流速减小.因此,换热也随 θ 的增加而小幅下降.当流场向下游继续发展以后,高温度比的通道内形成了高强度截面二次流和剧烈的主流型偏移.截面二次流的增强有利于整个流场的掺混和通道整体换热的增强;主流型的偏移直接增加了后缘表面的速度梯度和换热能力.离心浮升力在通道前缘附近诱发的流体分离增加了湍流输运[6],同时也使得逆流区的局部哥氏力指向前缘面.因此,前后缘的换热均随 θ 的增加而增加.

3　结　论

本文数值模拟了旋转状态下光滑通道[2]内流动与换热,分析了旋转附加力对通道内流动与换热的影响.努赛尔数的计算结果从定性趋势上吻合相关实验现象,能够反映旋转附加力对通道内部流动与换热的基本影响规律.

计算表明,在旋转径向出流通道中:切向哥氏力推动了通道横截面内的双涡二次流,该二次流诱发的切向速度绝对值在中心区较小,两侧壁附近较高.在高旋转数下($Ro=0.24$),切向速度绝

(下转第 321 页)