轴向通流旋转盘腔内流动不稳定性研究

田淑青 陶 智 丁水汀 徐国强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究旋转腔内流动不稳定性问题,采用旋转坐标系稳态方程,用数值模拟的方法分析了轴向通流旋转盘腔内的流动,得到了旋转系下哥氏力和离心浮升力分别对流动不稳定的作用,以及这两个力的非线性综合作用对流动不稳定的影响. 结果表明:哥氏力是恢复力,不影响流动稳定性;离心浮升力是造成流动不稳定的主要因素,盘腔内的流动是离心力场下的 Rayleigh-Benard 对流和强迫对流的混合流,随着浮升力的增强流动由稳态发展为非稳态;哥氏力与离心浮升力的综合作用加剧了流动不稳定性,盘腔内 r-θ 面出现了明显的旋向相反的对涡.

关 键 词: 不稳定性;数值计算;浮力;哥氏力;旋转腔

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)04-0393-04

Investigation of flow instability in rotating cavity with axial throughflow of cooling air

Tian Shuqing Tao Zhi Ding Shuiting Xu Guoqiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the instability of flow in rotating cavities, the flow in a heated rotating cavity with cool air axial throughflow was numerically studied, based on the time-independent incompressible equations in rotating system, and low Reynolds K-ε turbulent model. The flows in the cavity, affected either by the Coriolis force, by the centrifugal-buoyancy force, or by both of these two forces were calculated. The results show that the Coriolis force acting as a resilience force does not lead to flow vibrating; the centrifugal-buoyancy force is the key factor causing flow instable, the Rayleigh_Benard convection flow induced by the centrifugal-buoyancy force is blended with the forced convection flow in the cavity, and it develops from stable to unstable as buoyancy force increases. With the coaction of these two forces the flow instability is enhanced, cyclonic and anti-cyclonic circulations can be observed circumferentially.

Key words: instability; numerical computation; buoyancy force; Coriolis force; rotary cavity

1 问题的提出

旋转系下的流动和换热现象普遍存在于燃气轮机、航空发动机等重要的能功转换设备内. 相关的研究对指导工程设计、提供设计方法具有重要意义. 文献[1,2]对图 1 所示的盘腔结构进行了流动与换热实验研究,发现:在等温场下中心通流经过腔产生漩涡,漩涡没有分离时,流动是稳定的三维轴对称结构;当盘加热时,流动变得不稳定,盘腔内出现了图 2 所示的旋转不对称涡,整个流动结构以角速度 ω 旋转;仅罩被加热时,能观察到与图 2 相似的流动结构,只不过有多对漩涡. 文献[3]对该问题进行了非定常数值模拟,研究了数值解随时间变化的过程,发现盘腔内有类似于图 2 的流动结构,而且整个流动结构随时间移动,但其形状基本保持不变. 本文通过理论分析及数值模拟的方法研究轴向通流旋转盘腔内流动不稳定性产生的原因.

以下各 r-z 面的图位置均等同于图 1 中由上

收稿日期: 2003-10-08

作者简介: 田淑青(1974-),女,山东德州人,博士生, tshuq@163.com.

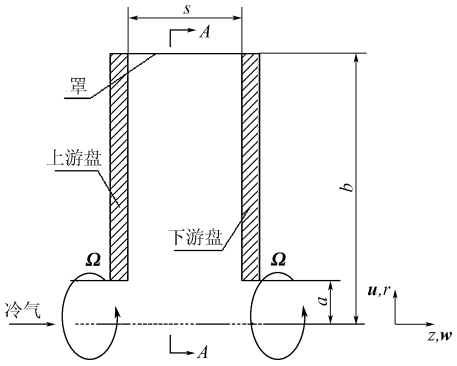


图 1 盘腔结构

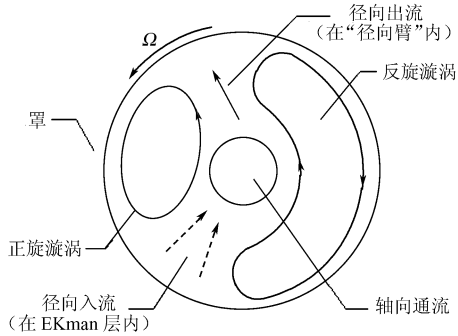


图 2 对应于图 1*A-A* 剖面的流动结构简图

下游盘和罩围成的腔,r-θ 面的图位置等同于图 2.

2 控制方程及离散

2.1 控制方程

计算模型见图 1,上下游盘和罩以角速度 Ω 旋转,冷气流以速度 w 从半径为 a 的中心孔进入腔内,然后通过同样半径的中心孔离开盘腔. 采用与壁面一起旋转的圆柱坐标系在稳态条件下求解. 流体在旋转系下相比于在惯性系多受离心力和哥氏力,其中离心力属于保守力,可归入压力项中. 因为本文研究的是非等温流动过程,密度变化的影响不可忽略,为此引入 Boussinesq 假设,即对动量方程的所有其它密度项都作常数处理,只保留一些特殊力场的密度随温度的变化,而且这个变化被假定为温度的线性关系,此处只考虑离心力场下密度变化的影响,即离心浮升力. 所以在旋转系下定常、不可压紊流控制方程的形式为

连续方程:

$$\nabla \cdot \overline{\boldsymbol{V}} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\rho(\overline{\boldsymbol{V}} \cdot \nabla)\overline{\boldsymbol{V}} = -\nabla p_{\text{eff}} + (\mu + \mu_t)\nabla^2 \overline{\boldsymbol{V}} - 2\rho\boldsymbol{\Omega} \times \overline{\boldsymbol{V}} + \rho\beta(\boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{r})\Delta\overline{T} \tag{2}$$

能量方程:

$$\rho c_p(\overline{\boldsymbol{V}} \cdot \nabla \overline{T}) = (\lambda + \lambda_t)\nabla^2 \overline{T} \tag{3}$$

式中,$\overline{\boldsymbol{V}}$ 为速度矢量,在 r,θ,z 坐标方向上分别表示为,$\overline{u},\overline{v},\overline{w}$;$p_{\text{eff}}$ 是包含离心力的有效压力;μ_t 为紊流粘性系数;λ_t 为紊流热扩散系数;β 是容积膨胀系数,对于完全气体,$\beta = 1/T$;T 是热力学温度. 紊流模型采用低雷诺数 K-ε 模型. 对上述方程无量纲化可得出几个无量纲准则数:进气雷诺数 $Re_z = \dfrac{2aw}{\nu}$,罗斯比数 $Ro = \dfrac{w}{\Omega a}$,瑞利数 $Ra = \dfrac{\Omega^2 b\beta(T_w - T_0)s^3 Pr}{\nu^2}$.

2.2 物性条件

因为采用的是共轭计算,流体、固体的物性参数要分别给定. 对于流体其物性参数取为进口处的值,对于固体其密度 $\rho = 7\ 840\ \text{kg/m}^3$,导热系数 $\lambda = 47\ \text{W/(m·K)}$,比热 $c_p = 473\ \text{J/(kg·K)}$.

2.3 边界条件

1) 进口边界条件

$$u = v = 0 \quad w = 20\ \text{m/s} \quad T = T_{\text{in}} = 291.5\ \text{K}$$

2) 出口边界条件

出口采用充分发展边界,即

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (\phi \text{ 可取为 } u,v,w,T)$$

3) 壁面边界条件

上下游盘外表面绝热,盘罩采用第一类边界 $T_w = 340.9\ \text{K}$,流动条件均采用无滑移边界,即 $u = v = w = 0$.

2.4 方程离散及计算方法简介

控制方程在网格系统上采用有限容积法离散,对流项采取 QUICK 差分格式,压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法.

3 数值模拟可靠性分析

为了验证数值模拟的可靠性,方程离散过程中对流项分别采用一阶迎风、二阶迎风及三阶精度的 QUICK 差分格式,湍流模型采用低雷诺数 K-ε 模型. 对图 1 所示的轴向通流旋转盘腔进行稳态求解并与文献[1]中的实验结果比较,发现计算值与实验值定性一致:在盘腔内均有旋转不对称涡出现,且整个流动结构随迭代步移动. 在 r,θ,z 方向网格均加密 50%,计算结果基本保持不变. 为了避免迭代发散,首先计算出零转速下的收敛解,然后以此为初场,将转速在某一迭代范围内从 0 逐渐增加至给定值. 通过以上分析可见数值模拟结果能够反应物理本质.

4 计算结果与分析

周向完全均匀的边界条件为何会得到非轴对

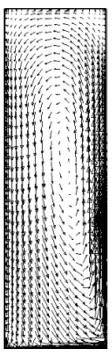
称的流动结构,流动的不稳定性是何原因造成,下面通过分析旋转系下气体所受的各个力的作用,研究其对流动的影响及各力的综合作用效果.

4.1 无哥氏力和离心浮升力时盘腔内流动结构

对应的动量方程

$$\rho(\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla)\overline{\boldsymbol{V}}=-\nabla p_{\mathrm{eff}}+(\mu+\mu_t)\nabla^2\overline{\boldsymbol{V}}$$

在等温场下,冷气轴向通过静止的盘腔,在盘腔内形成稳定的流动结构,*r-z* 面上有图 3 所示的漩涡. 因为轴向通流冲击下游盘,部分流体沿下游盘面进入盘腔,在上游盘附近回流形成漩涡.



($Re_z=1.08\times10^5$, $Ra=0$, $Ro=\infty$)

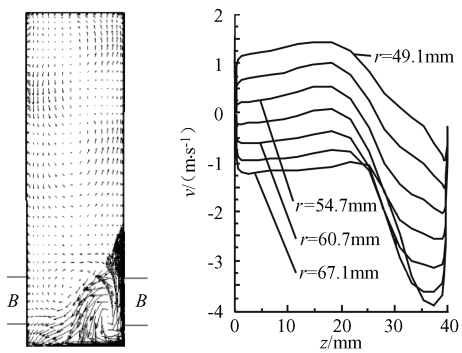
图 3　没有哥氏力和浮力作用下 *r-z* 面速度场

4.2 哥氏力对流动及不稳定性的影响

对应的动量方程

$$\rho(\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla)\overline{\boldsymbol{V}}=-\nabla p_{\mathrm{eff}}+(\mu+\mu_t)\nabla^2\overline{\boldsymbol{V}}-2\rho\boldsymbol{\Omega}\times\overline{\boldsymbol{V}}$$

在等温场下,保持进气雷诺数不变,改变罗斯比数,即只考虑哥氏力对流动的影响,在该模型的计算范围内($Re_z=1.08\times10^5$, $Ro=1\ 597.42\sim3.33$),流动基本上稳定,盘腔内的流动结构呈三维轴对称型,这与文献[1]的绝热实验一致. 图 4a 所示为 *r-z* 面的漩涡,与无哥氏力的流动相比(参见图 3),在哥氏力的作用下 *r-z* 面的漩涡被压扁.



a　*r-z* 面速度场　　b　对应于 a 图 *B-B* 范围的切向速度

($Re_z=1.08\times10^5$, $Ra=0$, $Ro=3.99$)

图 4　只有哥氏力作用下的数值模拟结果

哥氏力$-2\rho\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{V}$的切向分量$-2\Omega\bar{u}\rho$与径向速度$\bar{u}$成正比,对图 4a 的漩涡而言,在下游盘附近径向速度$\bar{u}>0$,因此哥氏力切向分量为负,由此导致靠近下游盘的流体切向速度$\bar{v}$为负,如图 4b;哥氏力径向分量$2\Omega\bar{v}\rho$与切向速度成正比,因此$\bar{v}<0$导致哥氏力径向分量为负,即哥氏力径向分量的方向指向圆心,与该处的径向速度方向相反,因此来流冲击下游盘形成的漩涡被压扁. 同理,分析上游盘附近流体所受哥氏力,此处的流体径向速度为负,相应的哥氏力径向分量为正,与流体运动方向相反. 由上述分析可见哥氏力对于作径向运动的流体微团而言,是一个与运动方向相反的恢复力,该力对流体的径向运动起抑制作用,流体有返回原有平衡位置的趋向,因此在哥氏力的作用下流动是稳定的.

4.3 离心浮升力对流动不稳定的影响

对应的动量方程

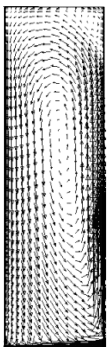
$$\rho(\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla)\overline{\boldsymbol{V}}=-\nabla p_{\mathrm{eff}}+(\mu+\mu_t)\nabla^2\overline{\boldsymbol{V}}+\rho\beta(\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{r})\Delta\overline{T}$$

这种工况在实际中是不存在的,为了分析问题方便,将其单独列出来讨论. 在离心浮升力的作用下,该流动可以看成是温度梯度与离心加速度同向的类 R-B(Rayleigh-Benard)对流和强迫对流的混合流.

R-B 对流[4]为温度梯度与重力加速度同向的腔内亚稳定自然对流过程,对应一确定的普朗特数和宽高比,存在一临界瑞利数 Ra_c. 当 $Ra<Ra_c$,没有对流发生,流体处于静止状态;当 $Ra>Ra_c$,对流开始在腔内形成对涡,随着 *Ra* 的增大,自然对流从稳定流态发展为非稳定流态.

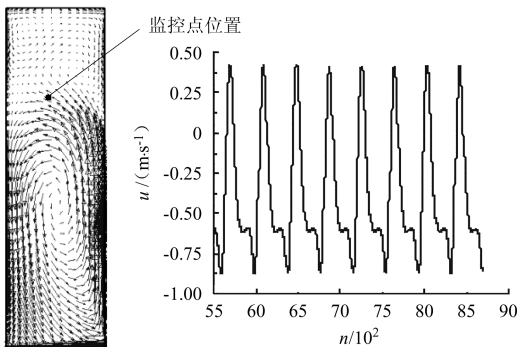
对比重力场下的 R-B 对流,在离心力场下的类 R-B 对流也应是腔内亚稳定对流过程,存在一临界离心瑞利数 $Ra_c=\dfrac{\Omega^2 b\beta(T_w-T_0)s^3Pr}{\nu^2}$,当 $Ra<Ra_c$,没有类 R-B 对流发生,盘腔内只有轴向贯通流引入的强迫对流,当 $Ra>Ra_c$,类 R-B 对流开始形成,盘腔内的流动成为类 R-B 对流与强迫对流的混合流,随着 *Ra* 的增大,类 R-B 对流从稳态发展为非稳态,由此盘腔内的混合流动也发展为非稳态. 本文只是分析流动不稳定产生的原因,对离心力场下的类 R-B 对流没有作详细研究,仅计算了几个不同的工况对上述理论分析进行验证,见图 5、图 6. 在低 *Ra* 下盘腔内的流动是稳定的轴对称结构,*r-z* 面上强迫对流形成一个大涡,对比图 3 和图 5,在离心浮升力的作用下图 5 盘腔右上角有一较大的漩涡,这表明类 R-B 对流已经形成,

且处于稳定状态. 增大 Ra,数值解不再收敛而随迭代步呈周期性波动,因此盘腔内的流动变得不稳定,如图 6 所示,盘腔顶部有明显的类 R-B 对流形成的对涡,整个流动场随迭代步呈周期性变化. 数值模拟结果与理论分析一致. 由此可见离心浮升力是导致流动不稳定的主要原因.



($Re_z=1.08\times10^5$, $Ra=2.37\times10^7$, $Ro=7.98$)

图 5 离心浮升力作用下 r-z($\theta=\pi$)面稳定流动速度场



a 速度场 b 监控点的速度随迭代步的波动

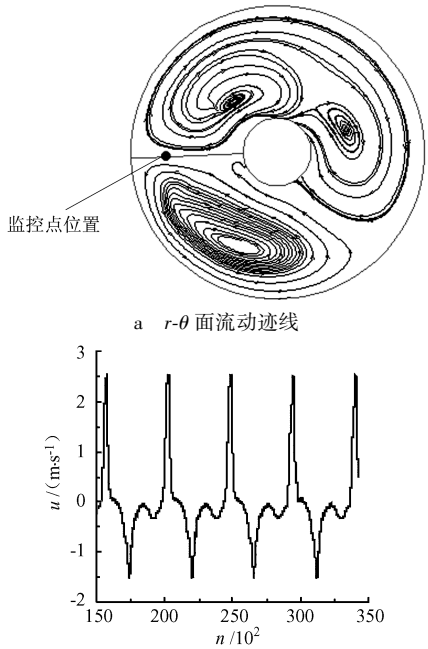
($Re_z=1.08\times10^5$, $Ra=9.48\times10^7$, $Ro=3.99$)

图 6 离心浮升力作用下不稳定流动

4.4 哥氏力与离心浮升力的综合作用对流动不稳定的影响

对应的动量方程即为式(2). 在哥氏力与离心浮升力共同作用下,数值解波动幅值增大,盘腔内流动不稳性加剧,如图 7 所示,在 r-θ 面上出现了明显的正、反漩涡,而且整个流动结构随迭代步相对于盘罩转动,但其形状基本保持不变,与文献[1]中非等温场的实验结果一致. 下面通过简要分析哥氏力的作用来解释上述现象.

哥氏力单独存在不会导致流动不稳定在前文已经作了解释,但是由于哥氏力 $-2\rho\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{V}$ 垂直于 $\boldsymbol{\Omega}$ 与 $\boldsymbol{V}$ 构成的平面,对径向速度导致切向作用力,对切向速度导致径向作用力,由于这一特性,该力成为一个典型二次流产生的根源,是一个导致流线偏转、将大涡切碎成小涡系的作用力. 类 R-B 对流导致径向流动振荡,在哥氏力的作用下该振荡被传递到切向,从而产生旋转不对称涡.



a r-θ 面流动迹线

b 监控点的速度随迭代步的波动

($Re_z=1.08\times10^5$, $Ra=9.48\times10^7$, $Ro=3.99$)

图 7 哥氏力与离心浮升力综合作用下的数值模拟结果

5 结束语

通过与实验的对比,采用旋转坐标系稳态方程求解非等温场下轴向通流旋转盘腔内的流动是可行的,能够反映实际现象. 经过理论分析及数值模拟,由离心力诱导的浮升力是导致流动不稳定产生的主要原因,哥氏力作为恢复力不会引起流场振荡,但是它与离心浮升力的共同作用加剧了流动不稳定性,导致流线偏转、在盘腔内产生非轴对称的正旋漩涡和反旋漩涡.

参考文献(References)

[1] Farthing P R, Long C A, Owen J M, *et al*. Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: flow structure [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1992b, 114:237 ~ 246

[2] Farthing P R, Long C A, Owen J M, *et al*. Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: heat transfer [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1992a, 114 :229 ~ 236

[3] Tucker P G, Long C A. CFD prediction of vortex breakdown in a rotating cavity with an axial throughflow of air [J]. Int Comm Heat Mass Transfer, 1995, 22(5):639 ~ 648

[4] Yanagita T, Kaneko K. Rayleigh-Benard convection patterns chaos spatiotemporal chaos and turbulence [J]. Physica D, 1995, 82 :288 ~ 313