

文章编号: 1000-8055(2005) 04-0656-06

轴向通流旋转盘腔内换热的数值模拟

田淑青, 陶 智, 丁汀, 徐国强

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以数值模拟的方法, 采用旋转坐标系稳态方程, 研究了轴向通流旋转盘腔内的换热。主要讨论了流动对换热的作用以及旋转系下各力对换热的影响, 给出了盘腔内的换热随各无量纲参数的变化规律。研究结果表明: 哥氏力的增大削弱了轴向通流旋转盘腔内的换热, 惯性力和浮升力的增大增强了换热; 反映在无量纲参数上, 随着进口雷诺数的提高, 盘腔内的换热增强; 随着瑞利数的提高(提高转速), 盘腔内的换热经历一个缓慢变化-突增-缓慢变化的过程, 换热的突然增强是冷气流穿透盘腔所致。

关键词: 航空、航天推进系统; 数值计算; 传热; 旋转; 浮力; 哥氏力

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Numerical Investigation on Heat Transfer in a Rotating Cavity with Axial Throughflow Cooling Air

TIAN Shu-qing, TAO Zhi, DING Shui-ting, XU Guo-qiang

(National Key Laboratory of Aircraft Engine,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the heat transfer in heated rotating cavities with axial through-flow cooling air, numerical simulations have been carried out based on the time-independent incompressible equations in rotating system. The effects of unstable flow and various forces on heat transfer were studied, and the heat transfer coefficient variations with Reynolds number and Rayleigh number were calculated. The results show that the heat transfer in a rotating cavity with axial throughflow cooling air is enhanced with the increase of the inertia force and buoyancy force, and is weakened with the increase of the Coriolis force. The heat transfer coefficient rises with Reynolds number, and varies slightly with the increase of Rayleigh number. The sudden enhancement of heat transfer is caused by the penetration of cooling air through the disc cavity.

Key words: aerospace propulsion system; numerical computation; heat transfer; rotating cavity; buoyancy force; Coriolis force

旋转盘腔内的流动和换热现象普遍存在于航空发动机、燃气轮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所示的轴向通流旋转盘腔进行了换热实验研究, 分析了盘腔内的换热随

进口雷诺数和旋转雷诺数的变化, 并给出了换热经验关系式。文献[3]则对该模型的盘罩换热进行了实验研究。文献[4, 5]分别对该模型进行了流动实验和数值模拟。本文在借鉴上述结果的基础上, 通过理论分析及数值模拟的方法研究了轴向通流

收稿日期: 2004-06-07; 修订日期: 2004-09-27

作者简介: 田淑青(1974-), 女, 山东德州人, 北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室博士生, 主要从事旋转换热研究。

旋转盘腔内的换热。

1 控制方程及定解条件

1.1 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。本文采用与壁面一起旋转的圆柱坐标系在稳态条件下求解。相比于惯性坐标系, 流体在旋转系下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。考虑密度变化对流动与换热的影响, 本文为简化计算引入 Boussinesq 假设, 即对动量方程的所有其它密度项都作常数处理, 而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函数, 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如下:

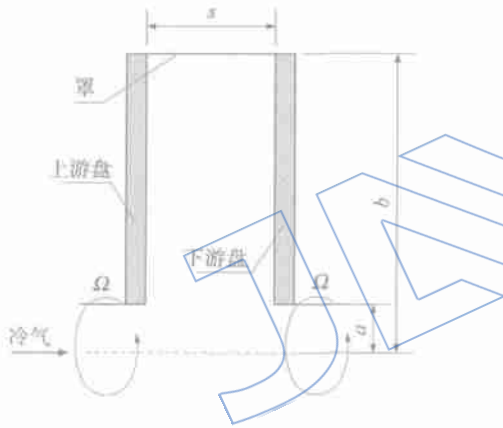


图 1 盘腔结构

Fig. 1 Rotating cavity with cool air axial through-flow

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = - \nabla p_{\text{eff}} + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \mathbf{V} -$$

$$2\rho\Omega \times \mathbf{V} + \rho\beta(\Omega \times \Omega \times \mathbf{r})\Delta T \tag{2}$$

能量方程:

$$\rho C_p(\mathbf{V} \cdot \nabla T) = (\lambda + \lambda_t) \nabla^2 \Delta T \tag{3}$$

式中: $\mathbf{V}$ 为速度矢量, 在 r, θ, z 坐标方向上分别表示为 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$, p_{eff} 是包含离心力的有效压力, μ_t 为紊流粘性系数, λ 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 $k-\epsilon$ 模型。对上述方程组

无量纲化可得出几个无量纲准则数以及几何无量纲参数: 进气雷诺数 $Re_z = \rho_w b / \mu$, 罗斯比数 $Ro = w / \Omega b = Re_z / Re_\varphi$, 其中 $Re_\varphi = \rho \Omega b^2 / \mu$ 是旋转雷诺数, 瑞利数 $Ra = Gr \cdot Pr$, 其中 $Gr = [\Omega^2 b \beta (T_w - T_o)(s/2)^3] / \nu^2$ 为葛拉晓夫数, Pr 为普朗特数; 间隙比 $G = s/b$, 进气半径与转盘外半径之比 a/b 。

1.2 物性条件

因为采用的是共轭计算的方法, 在计算区域内有流体和固体两种性质完全不同的介质, 因此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 $\lambda = 47\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 比热 $C_p = 473\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

1.3 边界条件

(1) 进口边界条件

$u = v = 0$, 轴向速度 w 根据流量求得, 采用进口处的平均速度。

进口处的温度 $T_m = 291.5\text{ K}$

(2) 出口边界条件

出口采用充分发展边界, 即:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$

(φ 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, 规定不同工况下的壁面温度值; 流动条件均采用无滑移边界, 即: $u = v = w = 0$

1.4 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。计算区域被划分为 $46 \times 72 \times 44$ (径向 $\times$ 周向 $\times$ 轴向), 其中径向和轴向网格在壁面附近加密, 周向均匀分布。

2 数值模拟可靠性分析

对文献[1]中的模型进行稳态求解并与实验结果对比, 如图 2 所示。因为缺乏具体的实验数据, 边界条件与实际实验有一定的差距, 因此计算值与实验值符合得不是很好, 尤其是在小 Re_φ 下, 但是计算值与实验值的变化趋势是一致的。在 r, θ, z 方向网格分别加密 30%, 45%, 30%, 计算结果基本保持不变, 这说明网格基本上不影响计算解。

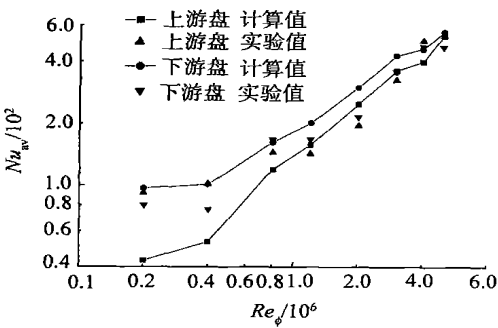


图 2 计算结果与实验结果对比

Fig. 2 Results comparison between calculations and experiments

3 计算结果与分析

平均努塞尔特数:

$$Nu_{av} = \alpha b / \lambda_0$$

式中: $\alpha = [\sum \Delta F_i q_i] / [F (T_{wi} - T_c)_{av}]$
 $q_i = - \lambda_l (\partial t / \partial Z)_w$ 为盘面局部热流密度, λ_l 为盘的导热系数, T_{wi} 为盘面温度, T_c 为冷气进口温度。 ΔF_i 为微元体的对流换热面积。

局部努塞尔特数 Nu_w 的定义为:

$$Nu_w = \alpha_{av} r / \lambda$$

其中: $\alpha_{av} = [\sum \Delta F_i q_i] / [F_r (T_{wi} - T_c)_{rav}]$, 即半径为 r 的圆周上的平均换热系数。

旋转盘腔内的气体受多个力的作用, 各个

力对换热有何影响, 下面通过数值模拟对其进行分析。

3.1 离心浮升力对换热的影响

3.1.1 离心浮升力的有无对换热的影响

固定盘罩加热温度 $T_w = 341\text{ K}$, 计算不同旋转雷诺数下的流动与换热。

不考虑离心浮升力对应的无量纲动量方程:

$$(\nabla \cdot \nabla) \mathbf{V} = - \nabla \tilde{p} + \frac{1}{Re} \tilde{\mu}_{eff} \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{1}{Ro} (2\mathbf{k} \times \mathbf{V})$$

盘腔内的流动基本上是稳定的三维轴对称结构。

考虑离心浮升力对应的无量纲动量方程:

$$(\nabla \cdot \nabla) \mathbf{V} = - \nabla \tilde{p} + \frac{1}{Re} \tilde{\mu}_{eff} \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{1}{Ro} (2\mathbf{k} \times \mathbf{V}) + \frac{Gr}{Re^2} \left(\frac{s/2}{b} \right)^{-3} \Delta T (\mathbf{k} \times \mathbf{k} \times \mathbf{r})$$

在小的旋转雷诺数下盘腔内的流动是稳定的, 随着 Re_ϕ 的增大流动开始变得不稳定, 流动结构不再是轴对称的。对比两种情况下的换热, 由表 1 发现: 在小 Re_ϕ 下流场稳定时浮升力对换热的影响不明显, 可以忽略; 在大 Re_ϕ 下由离心浮升力导致的流场不稳定大大增强了盘腔内的换热, 此时的离心浮升力对流动与换热都有很大的影响, 不能忽略。

表 1 有无离心浮升力时 Nu_m 对比

Table 1 Comparison between two Nu_{av} with buoyancy and without buoyancy

Re_z	Re_ϕ	$Nu_{av}(\text{上游盘})$		$Nu_{av}(\text{下游盘})$		$Nu_{av}(\text{盘罩})$		流动状态
		无浮力	有浮力	无浮力	有浮力	无浮力	有浮力	
5.875×10 ⁴	6.436×10 ³	9.697	9.764	33.634	33.594	1.055	1.136	稳定
1.175×10 ⁵	1.716×10 ⁴	20.495	20.522	56.637	56.551	3.185	3.469	
2.35×10 ⁵	4.291×10 ⁴	43.714	43.738	100.97	101.109	9.828	10.543	
1.175×10 ⁵	1.03×10 ⁵	18.505	22.371	41.965	46.774	4.283	17.056	不稳定
2.35×10 ⁵	2.577×10 ⁵	33.941	123.685	61.85	154.669	13.412	100.667	
5.875×10 ⁵	7.72×10 ⁵	8.544	34.5	21.835	49.121	2.098	24.87	
1.175×10 ⁶	1.544×10 ⁶	17.996	68.994	37.786	91.199	5.718	54.663	
2.35×10 ⁶	3.088×10 ⁶	34.312	125.907	59.194	154.626	16.906	107.835	

3. 1. 2 离心浮升力的变化对换热的影响

固定进气雷诺数 $Re_z=4.725\times10^5$ 和旋转雷诺数 $Re_{\varphi}=9.66\times10^4$, 改变盘罩加热温度 ($\Delta T=60\sim240\text{ K}$), 即保持惯性力和哥氏力不变, 改变浮升力。

由图 3 可见随着瑞利数的增加, 盘腔内的换热增强, 即浮升力的增大增强了换热。图中最后一个点对应于不稳定流场的换热, 由图可见流场的不稳定对上游盘和盘罩的换热影响明显, 而对下游盘换热的影响不明显, 这主要是因为强迫对流对下游盘的换热起主导作用。

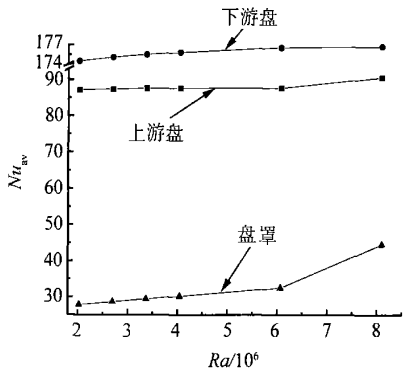


图 3 Nu_{av} 随瑞利数的变化
($Re_z=4.725\times10^5, Re_{\varphi}=9.66\times10^4$)

Fig. 3 The variation of Nu_{av} with Rayleigh number

总结上述分析可得到: 离心浮升力的作用增强了盘腔内的换热。

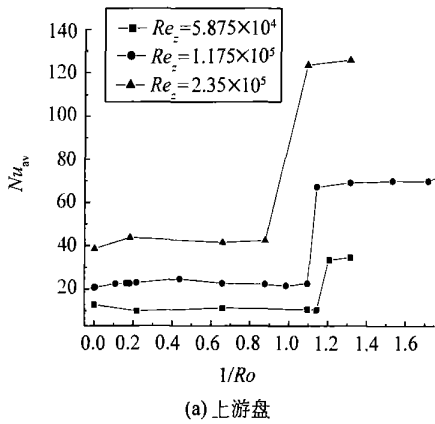
3. 2 各力的综合作用对换热的影响

固定盘罩加热温度 $T_w=341\text{ K}$, 选取几个不同的进口雷诺数工况, 改变转速。对每一个工况, 即保持惯性力不变, 增大哥氏力和离心浮升力。

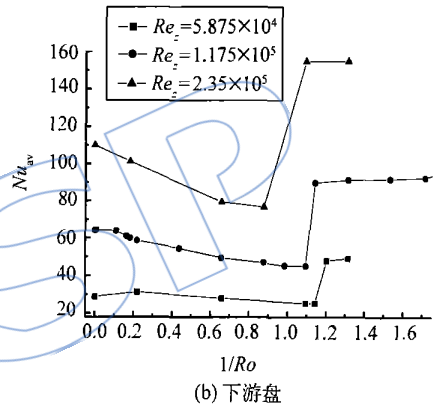
由图 4(定义 $1/Ro$ 为旋转数) 可见随着进口雷诺数的增加盘腔内的换热增强, 从受力方面分析, 惯性力的增大加剧了强迫对流, 从而增强了换热。在旋转数不大的情况下, 尽管盘腔内的流动已经发展为非稳态, 但是随旋转数的增加上游盘面的换热变化不明显, 下游盘面的换热有轻微的下降, 盘罩的换热在低旋转数下有一个快速的下降, 此后随着旋转数的增加换热缓慢增强。这一现象可通过分析哥氏力和离心浮升力的作用加以解释。

哥氏力 $-2\rho\Omega\times V$ 的切向分量 $-2\Omega\bar{u}\rho$ 与径向速度 $\bar{u}$ 成正比, 对图 5r-z 面的旋涡而言, 在下游盘附近径向速度 $\bar{u}>0$, 因此哥氏力切向分量为

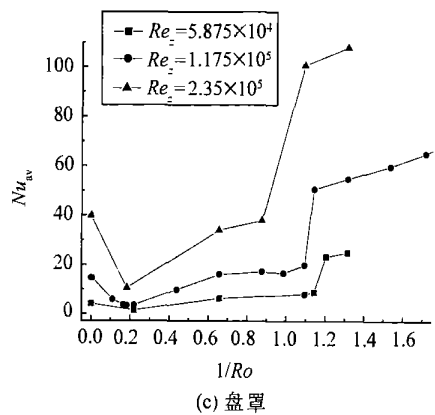
负, 由此导致靠近下游盘的流体切向速度 $\bar{v}$ 为负, 见图 5r- θ 面速度矢量图(图中细线表示剖面位置); 哥氏力径向分量 $2\Omega\bar{v}\rho$ 与切向速度成正比,



(a) 上游盘



(b) 下游盘



(c) 盘罩

图 4 Nu_{av} 随葛拉晓夫数和进口雷诺数的变化

Fig. 4 The variation of Nu_{av} with Gr and Re_z

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旋转轴心, 与该处的径向速度方向相反, 阻碍了冷流体向高半径处的流动, 从而削弱了盘腔内的换热。浮升力 $\rho\beta(\Omega\times\Omega\times r)\Delta T$ 对换热的增强作用在前面已经得出。在旋转数不大的情况下, 对上游盘而言, 哥氏力和浮力对换热

的影响基本抵消;对下游盘而言,因为该区域的径向速度较大,哥氏力的作用比较强,因此随着旋转数的增加换热减弱;盘罩的换热在小旋转数下的快速下降主要受流动的影响:盘腔内的流动是位于低半径处的强迫对流和位于高半径处的离心力场下的类 Rayleigh-Benard 对流的混合流。R-B

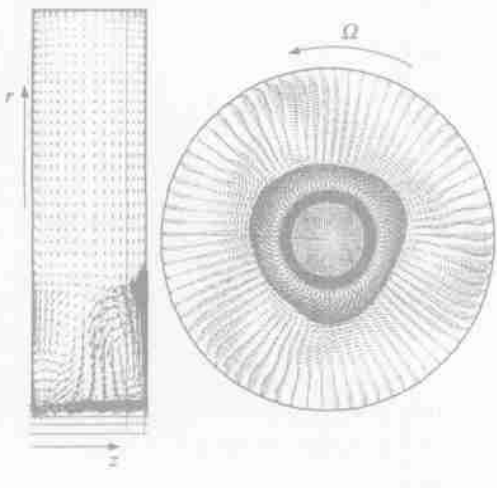


图 5 在某一迭代步下盘腔内速度矢量图
($Re_z = 1.175 \times 10^5, Ro = 0.657$)

Fig.5 Velocity field at an iteration step

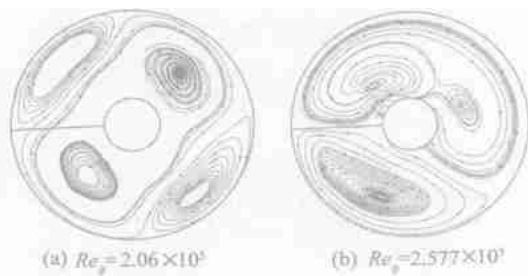
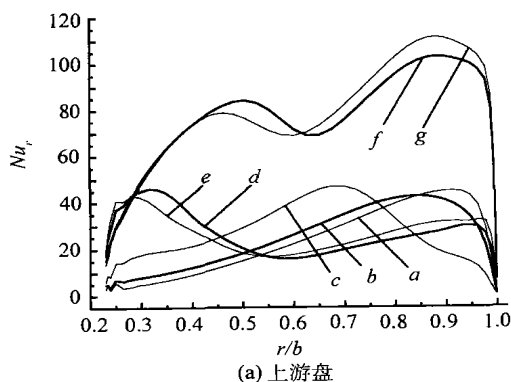


图 6 $r-\theta$ 面流线图 ($Re_z = 2.577 \times 10^5$)

Fig.6 Streamlines on plane $r-\theta$



对流^[6]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,自然对流从稳态发展为非稳态。针对本文的研究,在小旋转数下,瑞利数很小,类 R-B 对流尚未发生,而哥氏力对流动的抑制作用已经发生,阻止冷流体向高半径处流动,导致盘罩换热减弱。此后随着类 R-B 对流的发生和流动不稳定的发展,浮力的作用越来越明显,换热随旋转数的增加而增强。观察图 4 还可以发现,随着旋转数的继续增加,壁面上的换热有一个突然的增强,此后缓慢变化,该现象可以从流场进行分析。随着旋转数的上升,流动越来越不稳定,当旋转数超过某一值后,轴向通流的冷气穿透盘腔进入高半径区域,如图 6 所示,盘腔内的换热随之突增。

3.3 局部换热分析

图 7 中局部努赛尔特数曲线 a, b, c 对应稳定流动, d, e, f, g 对应不稳定流动。由图 7(a)可见,流场稳定时上游盘局部努赛尔特数沿径向只有一个峰值,而且峰值随瑞利数的增加向低半径处移动,这是哥氏力作用的结果。在稳定流动时,类 R-B 对流较弱,强迫对流占主导地位,随着 Ra 的上升,哥氏力压迫强迫对流区域向低半径处移动,努赛尔特数峰值随之移动。当流动不稳定以后,上游盘局部努赛尔特数沿径向出现了两个峰值,这是因为盘腔顶部的 R-B 对流和其下方的强迫对流均比较紊乱,导致换热增强,局部努赛尔特数在两个区域均出现峰值,曲线 f, g 的局部努赛尔特数较高,这是冷气流穿透盘腔所致。由 f, g 还可以发现瑞利数越大自然对流换热越强,而强迫对流

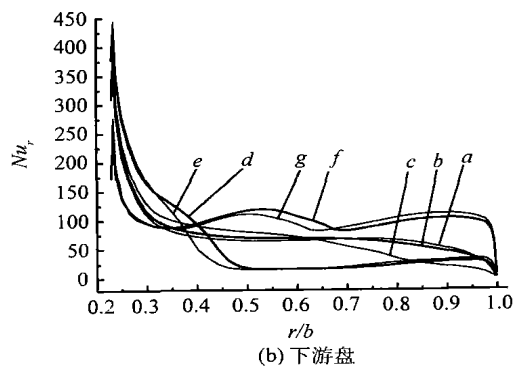


图 7 局部努赛尔特数沿径向的分布 ($Re_z = 2.35 \times 10^5$)

Fig.7 Radial variation of local Nusselt numbers

换热减弱。这是因为自然对流区域浮力起主导作用, 强迫对流区域哥氏力和惯性力起主导作用。图 7(b) 显示下游盘低半径处的强迫对流换热强于高半径处的自然对流换热, 冷气流穿透盘腔削弱了低半径处的换热, 但是增强了高半径处的换热。

4 结 论

本文运用数值模拟的方法, 研究了轴向通流旋转盘腔内的换热, 分析了旋转系下各力对换热的影响, 给出了壁面上的换热随无量纲参数的变化。

(1) 随着哥氏力的增大轴向通流旋转盘腔内的换热减弱; 随着惯性力和浮升力的增大, 盘腔内的换热增强。

(2) 壁面平均努赛尔特数随进口雷诺数 Re_z 的增加而增大; 在瑞利数不大的情况下, 壁面平均努赛尔特数变化不明显, 当瑞利数超过某一临界值后, 冷气流穿透盘腔导致平均努赛尔特数突然增大, 此后随瑞利数的增加平均努赛尔特数变化缓慢。

(3) 随瑞利数的增加, 流场从稳态发展到非

稳态, 局部努赛尔特数分布随之变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kim S Y, Han J C, Morrison G L, et al. Local Heat Transfer in Enclosed Co-Rotating Disks with Axial Throughflow[J]. *Journal of heat transfer*, 1994, 116: 66~72.
- [3] Long C A, Tucker P G. Shroud Heat Transfer Measurements from a Rotating Cavity with an Axial Throughflow of Air[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1994, 116: 525~534.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Yanagita T, Kaneko K. Rayleigh-Benard Convection Patterns Chaos Spatiotemporal Chaos and Turbulence[J]. *Physica D*, 1995, 82: 288~313.