

轴向通流旋转盘腔换热特性

曹楠¹, 窦志伟^{1,3}, 罗翔^{1,2}, 徐国强^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;
3. 中国航空工业集团有限公司 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001)

摘 要: 针对航空发动机压气机盘腔中流动与换热现象,采用该实验的方法对等温轴向通流旋转盘腔进行研究。通过对比不同工况下局部努塞尔数和平均努塞尔数的变化情况分析旋转腔中各力对流动与换热的影响,并总结努塞尔数与各无量变参数的经验公式。结果表明:盘腔内流动与换热主要由哥氏力、惯性力与离心力控制。腔内流动区域可划分为低半径位置惯性力占主导地位的惯性对流区与高半径位置哥氏力占主导地位的旋转对流区。轴向通流流量增大使惯性力增大,转速增高使哥氏力增大。惯性力与哥氏力的增加都会增强换热,两个力对彼此对换热的影响有削弱作用,两个力的综合作用使不同工况中不同半径位置的换热变化情况不同。平均努塞尔数与局部努塞尔数随变量的变化情况基本一致。

关 键 词: 轴向通流; 旋转盘腔; 换热; 哥氏力; 惯性力

中图分类号: V213 **文献标志码:** A

Heat transfer characteristics of a rotating cavity with axial throughflow of cooling air

CAO Nan¹, DOU Zhiwei^{1,3}, LUO Xiang^{1,2}, XU Guoqiang^{1,2}

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;
3. China Helicopter Research and Development Institute,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Jingdezhen Jiangxi 333001, China)

Abstract: Targeting the flow structure and heat transfer of the aero-engine compressor rotating cavity, an isothermal rotating cavity with axial throughflow was investigated experimentally. By comparing the changes of the local Nusselt number and average Nusselt number in different working conditions, the effects of various forces in a rotating system on the flow structure and heat transfer were analyzed, and correlations of the Nusselt number and non-dimensional parameters were obtained. The results showed that the flow structure and heat transfer were mainly affected by the inertia force, centrifugal force and Coriolis force. The rotating cavity can be divided into two zones: the inertial convection zone located in the low radius cavity where the inertia force occupies the leading position and the rotational con-

收稿日期: 2016-11-08
作者简介: 曹楠(1991—),男,博士生,主要从事旋转盘腔换热的研究。

引用格式: 曹楠,窦志伟,罗翔,等. 轴向通流旋转盘腔换热特性[J]. 航空动力学报,2018,33(5):1178-1185. CAO Nan, DOU Zhiwei, LUO Xiang, et al. Heat transfer characteristics of a rotating cavity with axial throughflow of cooling air[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5): 1178-1185.

vection zone located in the high radius cavity where the Coriolis force occupies the leading position. The inertia force rises with the mainstream rate and the Coriolis force rises with the angular speed. Heat transfer is enhanced with increase of the inertia force and coriolis force respectively. These two forces' effects on heat transfer suppress each other. With the coaction of these two forces, heat transfer changes with various working conditions and radius. The changes of average Nusselt number and local Nusselt number are consistent with the variation of variables.

Key words: axial throughflow; rotating cavity; heat transfer; Coriolis force; inertia force

随着当代技术的发展,为了提高航空发动机的效率,涡轮部位所承受的温度越来越高,工作环境更加恶劣,为了保证发动机可以稳定的工作,需要从压气机抽取冷却气体对发动的部件进行冷却。当冷气流经压气机旋转盘腔的过程中会在旋转系中发生二次流动,复杂的流动与换热现象存在于旋转盘腔中。因此,对旋转盘腔的流动与换热研究对设计冷却系统、提高发动机性能有着重要的意义。

国内外研究人员对旋转盘腔的流动与换热问题做了相关的研究。Farthing 等人通过实验研究了轴向通流盘腔的流动与换热情况随间隙比、旋转雷诺数、轴向雷诺数等参数的变化,并给出了换热经验关系式^[1-2]。Bohn 等人通过采用可视化实验和数值模拟方法研究了盘罩加热条件下的轴向通流盘腔内流动与换热情况^[3-5]。Powell、Owen 等人针对不同加热位置的轴向通流盘腔着重分析了浮生力对流动与换热的影响并对下游盘加热的轴向通流盘腔的湍流状态进行了换热实验,研究各个因素对换热情况的影响^[6-9]。除实验方法外,研究人员使用数值模拟方法对该问题做了相关研究。Tucker、Long 等人采用数值模拟的方法对通流旋转腔中旋转雷诺数,间隙比等因素对流动与换热的影响,数值模拟的结果与以往实验得到的结果基本一致^[10-13]。田淑青等人采用了数值模拟的方法对轴向通流旋转盘腔内传热特性和流动不稳定性进行研究,分析了旋转系下各力对换热以及流动的影响,并给出了换热随各无量纲参数的变化规律^[14-16]。Peter 总结了前人在旋转流方面取得的主要成果,比较完备的描述了旋转腔内流动结构和换热特性^[17]。

以往的研究对流动结构与换热以及两者相互影响的机理研究还不够深入,本文在借鉴以往研究结果的基础上,将实际轴向通流高压压气机旋转盘腔结构简化,对腔内的流动结构进行了分

析并采用新型的表面传热系数传感器观察等温旋转腔内不同位置的表面传热系数,并分析流动结构与换热之间的关系。

1 实验装置及实验原理

1.1 实验装置

本实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室的多功能旋转实验台上进行。图 1 为实验台示意图,实验台主要包括动力系统、测量系统、供气系统以及实验段。图 2 为实验段剖面图,可以看出实验段主要由两个旋转盘、外罩、中心轴、中心轴支撑环以及中心轴圆锥端盖组成。通流气体由供气系统提供轴向进入实验段,沿着中心轴进入旋转腔,流出旋转腔后轴向流出实验段。上下游盘的间隙为 40 mm,旋转盘的半径为 205 mm,中心轴半径为 100 mm,轴向进气的宽度为 40 mm。在上游盘内侧布 12 个表面传热系数测点,分布在半径 145~195 mm 上,盘面

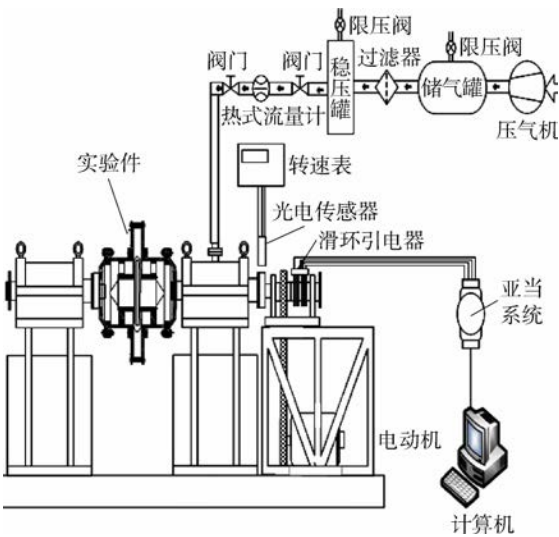


图 1 实验台示意图

Fig. 1 Schematic of experimental table

右半部分 6 个测点为实验测点,左半部分 6 个测点为实验备份。

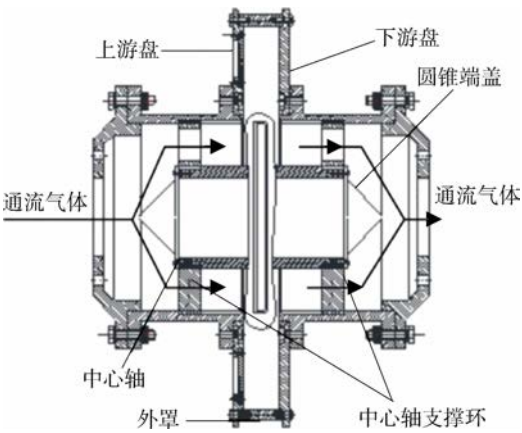


图 2 实验段装置示意图
Fig. 2 Schematic of test section

1.2 实验过程及原理

实验首先启动电动机。实验件和连接轴由电动机通过传送带带动旋转,并使用光电传感器以及数字转速表测量转速。转速稳定后开启压气机将空气压缩并经过供气系统后通入轴向通入实验段,使用手动阀门以及热式流量计控制并测量气体质量流量。当工况稳定后使用基于稳态方法的对流换热传感器测量表面传热系数。图 3 为传感器示意图^[18]。本次实验应用的传感器外形是直径为 10 mm,高为 7 mm 的圆柱体,主要由壳体、加热膜、铝箔、测温热电偶、2 号测温热电偶以及绝热材料组成。传感器的标定和使用方法在相关文献^[18]已有明确说明。实验在旋转台上对传感器进行标定,标定实验采用自由盘。经过标定,表面传热系数传感器的典型精度为 5%,最高精度优于

1%,可满足本文工况下表面传热系数的测量要求。

对转速、通流流量、表面传热系数以及无量纲径向位置按照下列方程进行无量纲处理,得到旋转雷诺数和流量系数

$$Re_{\Omega} = \frac{\rho \omega b^2}{\mu} \tag{1}$$

$$C_w = \frac{\dot{m}}{\mu b} \tag{2}$$

$$Nu = \frac{hr}{\lambda} \tag{3}$$

$$y = \frac{r - a - c}{b - a - c} \tag{4}$$

式中 b 为旋转盘半径($b=205\text{ mm}$), c 为中心轴半径($c=100\text{ mm}$), a 为轴向进气宽度($a=40\text{ mm}$), ω 为旋转盘旋转速度, C_w 为通流流量, ρ 为气体密度, μ 为气体动力黏度, λ 为导热系数, r 为测点所在位置半径, h 为测量的表面传热系数。实验以转速与通流流量为变量,共计 64 个工况,如表 1 所示。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

$\omega/(\text{r/min})$	Re_{Ω}	$\dot{m}/(\text{kg/h})$	C_w
500	142 100	75	5 538
750	213 100	100	7 384
1 000	284 200	125	9 231
1 250	355 200	150	11 080
1 500	426 300	175	12 920
1 750	497 300	200	14 770
2 000	568 400	225	16 610
2 250	639 400	250	18 460

分别绘制局部努塞尔数 Nu 和平均努塞尔数 Nu_{av} 与旋转雷诺数 Re_{Ω} 、流量系数 C_w 等变量的变化关系,结合腔内的流动以及以往的研究分析不同工况下努塞尔数发生变化的原因。最后根据测量得到的数据拟合出 Nu 以及 Nu_{av} 与 Re_{Ω} 、 C_w 以及 y 的实验关系式。

2 实验结果及分析

2.1 旋转腔局部换热特性分析

图 4 为不同工况下不同半径位置的努塞尔数随雷诺数的变化。可以看出在较高流量下($14770 \leq C_w \leq 18460$),局部努塞尔数随着旋转雷诺数的增加呈现先减小再增大的变化,这种现象

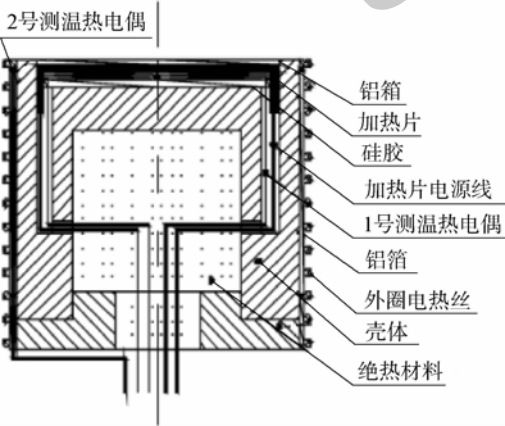
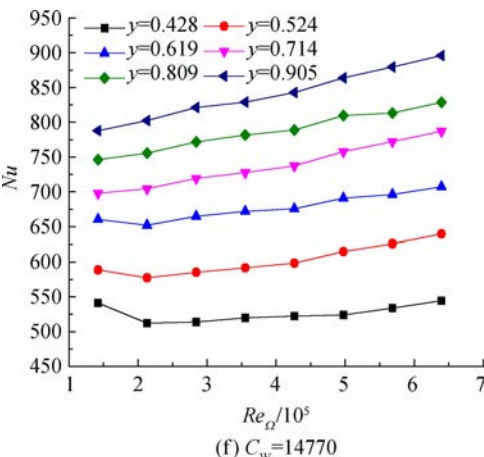
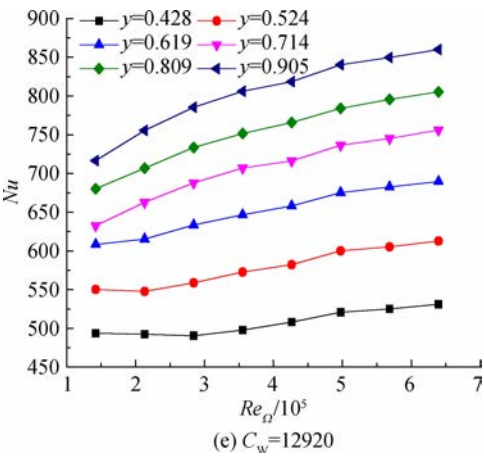
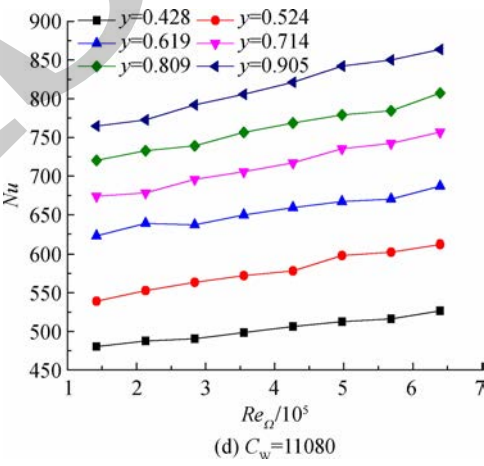
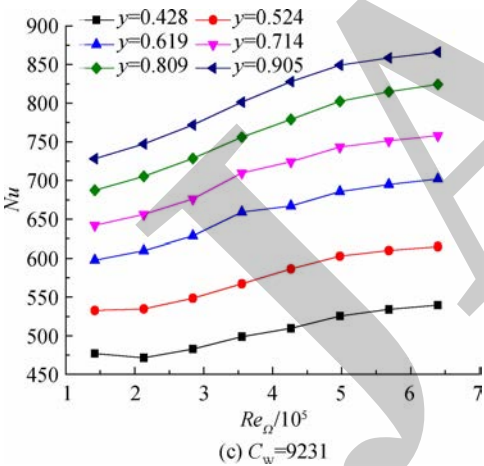
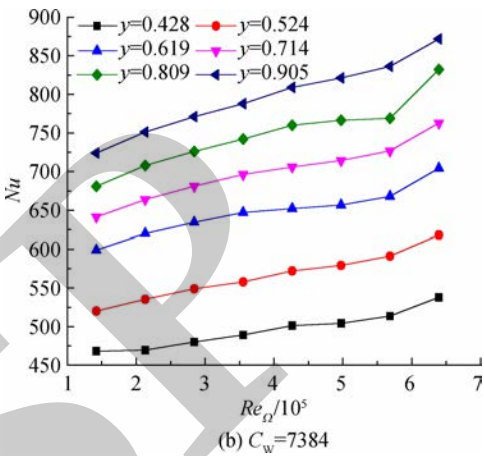
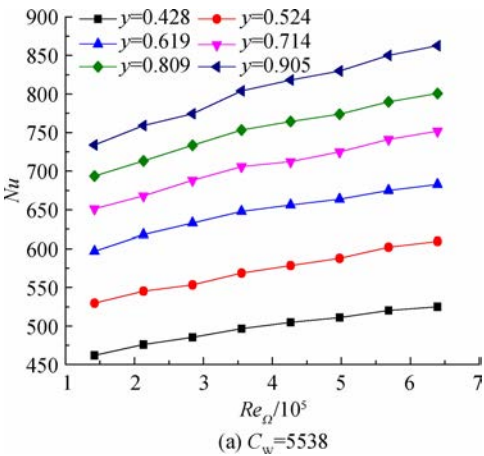


图 3 传感器示意图^[18]
Fig. 3 Schematic of sensor^[18]

在低半径处更加明显。解释腔内换热现象的变化应先分析腔内流动结构。在等温旋转腔内,流动结构主要是由惯性力、哥氏力、黏性力以及离心力控制。黏性力可以增加流体的切向速度;由于腔内流体的转速小于旋转腔的转速,故在任意半径处的流体都相对于盘有反向的切向速度,故哥氏力的径向分量指向低半径处,与切向相对速度以及旋转腔转速成正比。田淑青等人在研究中对轴

向通流旋转盘腔的流动情况进行了研究^[15-16]。冷气通过静止的等温盘,会冲击下游盘形成旋涡。盘腔开始旋转后,轴向通流产生的旋涡由于离心作用向高半径处流动时会受到哥氏力与压差力的作用。在高半径处会被切割为小旋涡,形成复杂的涡系;哥氏力与压差力会压迫轴向通流诱导的旋涡至更低的位置。当对盘罩进行加热,旋转腔内流体还会受到浮升力的作用,浮升力使流动更



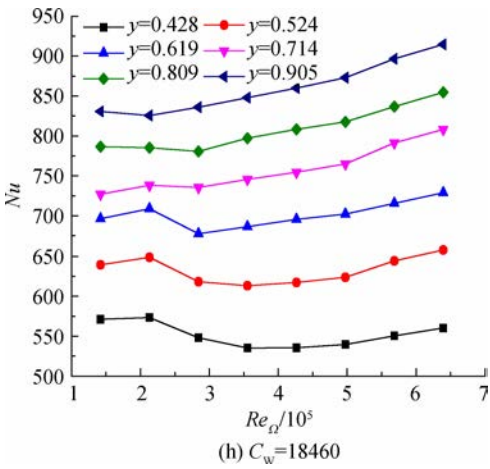
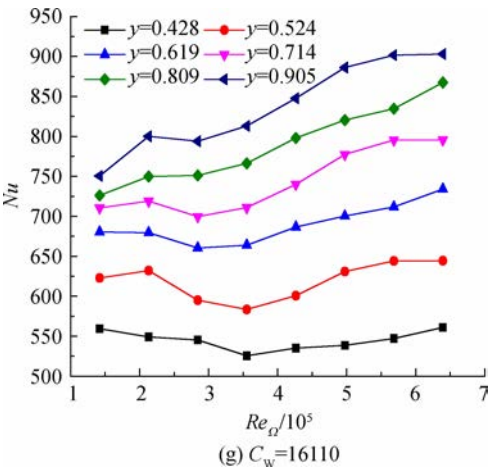


图 4 各工况下不同半径位置的努塞尔数随雷诺数的变化
Fig. 4 Variation of Nu with Re_Ω in different working conditions

加复杂,流动不对称。田淑青将腔内流动划分为两个区域,底部由惯性力为主要控制因素的强迫对流区,高半径处为自然对流控制为主的离心力场下的类 Rayleigh-Benard 对流^[19]的混合流动。

本文中研究的实验模型与田淑青等人研究的几何模型^[14-16]基本一致,故本文中的等温旋转腔的流动也可以划分为两个区域:位于低半径位置惯性力占据主导地位的惯性对流区;位性力占主导地位地位的旋转对流区。当转速继续增大时,旋转对流区区域增大。压差力与径向哥氏力是将气体挤出旋转腔的直接作用力。当工况改变时,哥氏力、离心力以及压差力的平衡会被打破,流动状态发生改变,并影响换热。低半径区域是惯性对流区,在该区域内,随着转速上升,径向哥氏力的增加会压迫通流引起的旋涡,惯性对流区范围减小,从而降低惯性力对换热的增强作用。但是此时旋转雷诺数较低,旋转雷诺数对换热的增强作用较小,旋转雷诺数升高对换热的增强作用不足以弥补惯性力受到抑制对换热减弱的影响,故低半径位置的局部努塞尔数降低。当旋转雷诺数继续增大,哥氏力增大,旋转对流区的范围扩大,加剧了流动的复杂程度,旋转对换热的增强作用继续增大,弥补惯性力受到抑制对换热减弱的影响,从而低半径位置的努塞尔数开始随旋转雷诺数增加而增加。而高半径位置为旋转对流区,所受到惯性力影响较小,故该区域的换热基本随旋转雷诺数增大而增强。在低流量系数工况下($5\,538 \leq C_w \leq 12\,920$)所有测点位置的局部努塞尔数随着旋转雷诺数的增大而增大,高半径位置的增大速率要高于低半径处的增大速率,而且增加速率是非线性的。这是因为随着盘腔转速的增大,旋转

对流增强,高半径位置的换热随之增强。在低半径区域,由于在低流量系数的工况下,惯性力的影响相对较弱,虽然盘腔旋转会削弱对惯性力对换热的增强作用,但是旋转对换热的增强作用会使换热效果也随着旋转雷诺数在提高。低半径位置的惯性力对换热的促进作用随着旋转雷诺数增大而减弱是低半径位置的增大速率略低于高半径位置增大速率的原因。局部努塞尔数的增大速率是非线性的原因是空气旋转数随盘腔速度的变化是非线性的。

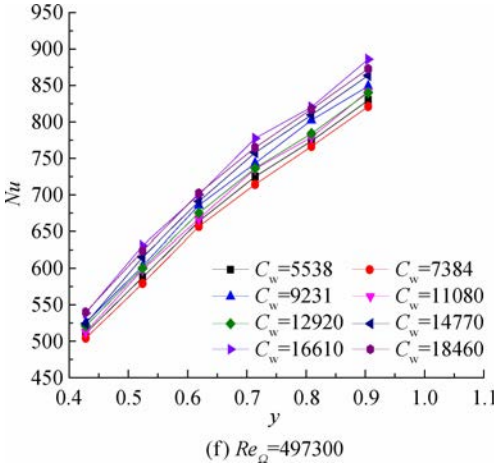
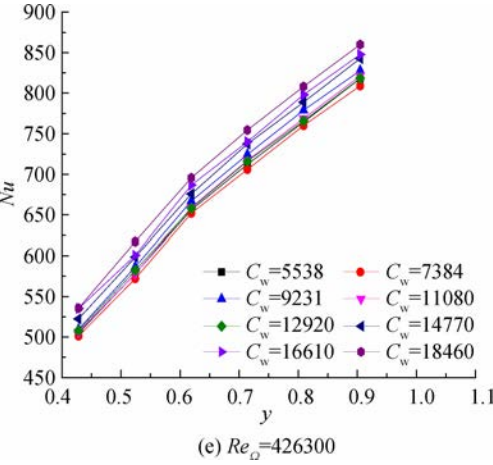
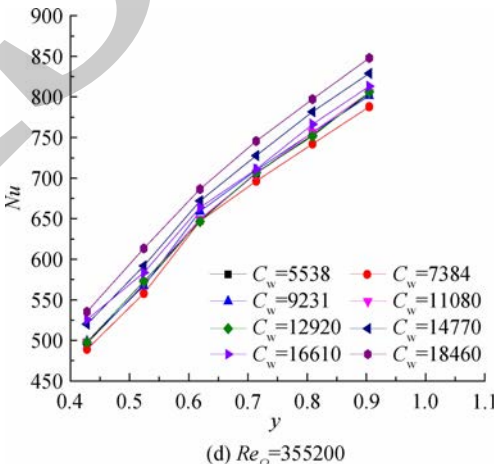
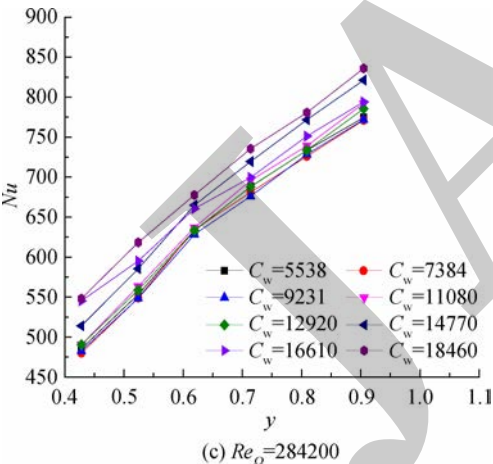
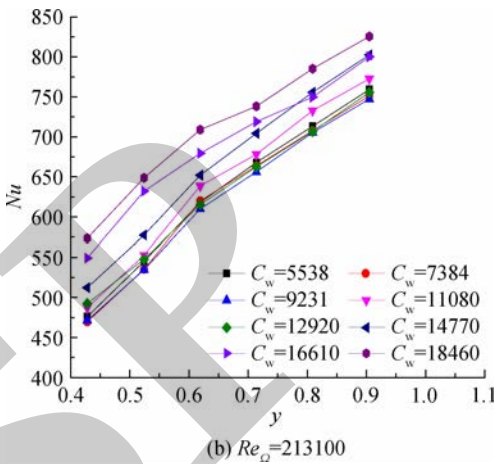
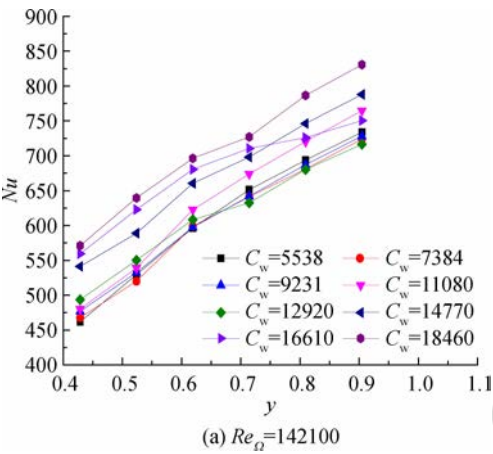
图 5 为各工况下努塞尔数随半径的变化关系。可以看出旋转雷诺数不变,任意位置的努塞尔数随着通流流量增大而增大。这是因为随着流量增大,惯性力增加,这会降低流体的旋转速度从而削弱旋转对换热的增强作用。但是流量增加会增强对盘腔的撞击,增强盘面流体的掺混,使对流换热整体效果有所增强。还可以看出当旋转雷诺数较低流量系数较大时,局部努塞尔数随着半径升高的速率降低,这是因为该工况下的惯性力对换热的增强作用较大,随着半径的升高,惯性作用对换热的促进效果减弱,故局部努塞尔数随着位置的升高而增加的速率低。在高旋转雷诺数下各曲线基本重合,这说明各流量系数下的换热效果很接近,通流流量对换热效果影响较小。

2.2 旋转盘的平均换热特性

对各个工况下的局部努塞尔数进行平均得到相应工况下的平均努塞尔数。图 6 为不同的流量系数下平均努塞尔数随着旋转雷诺数的变化关系。可以看出在固定流量系数的工况下,平均努塞尔与局部努塞尔数随着旋转雷诺数的变化基本

一致,在大部分工况下,平均努塞尔数随着旋转雷诺数增大而增大;主流流量越大,平均努塞尔数越大。流量系数较大的工况($C_w=14770$),平均努塞尔数先减小再增大,这是由于此时惯性力作用较强,旋转雷诺数增大会减小对惯性对流区的范围从而抑制惯性力对换热的增强作用,旋转雷诺数对换热的增强作用较小,由于旋转雷诺数升高对换热的增强作用不足以弥补惯性力受到抑制对

换热减弱的影响,故低半径位置的努塞尔数降低。平均努塞尔数先降低,随着旋转雷诺数继续增大,旋转对流的效果增强,平均努塞尔数增加。在相同的流量系数下,会出现平均努塞尔数在某一旋转雷诺数变化率突然增加,这是因为当盘腔转速增加,由于离心力增大,当离心力增加至临界值时,会远大于径向哥氏力以及压差力,发生较大规模的主流气体入侵现象,从而明显地提高了换热



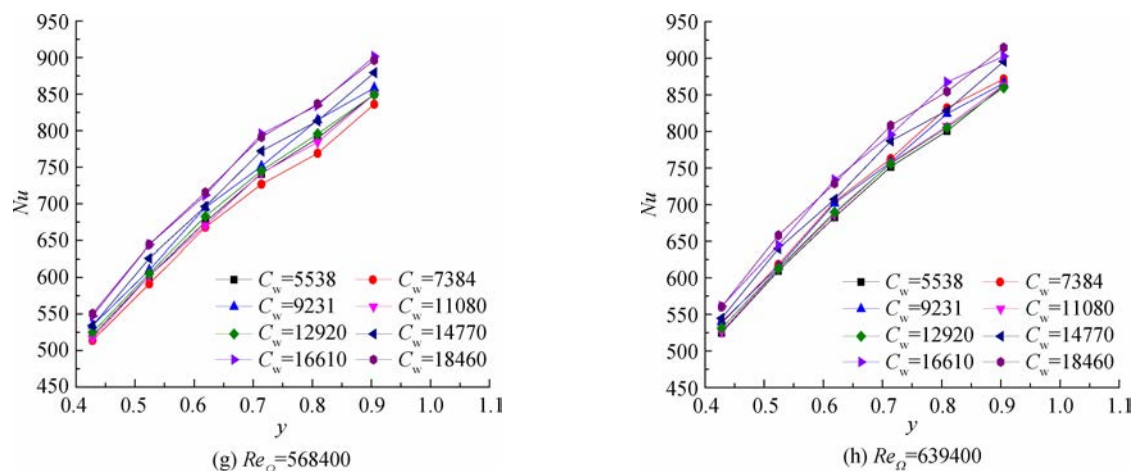


图 5 各工况下努塞尔数随径向位置的变化
Fig. 5 Variation of Nu with y in different working conditions

能力,平均努塞尔数也明显增加。

图 7 为不同旋转雷诺数下平均努塞尔数随流量系数变化的关系图。由图可以看出,惯性力、哥氏力的共同作用使平均努塞尔数随流量系数变化呈多峰值分布的趋势。

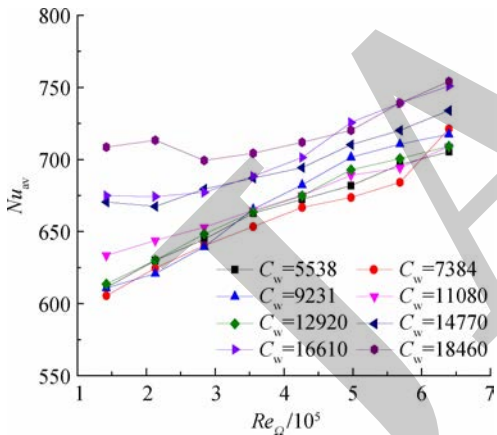


图 6 不同流量下 Nu_{av} 随旋转雷诺数变化的关系
Fig. 6 Variation of Nu_{av} with Re_{Ω} in different C_w

2.3 实验关系式

对实验数据进行拟合得到的 Nu 与 Re_{Ω} 、 C_w 以及 y 的经验关系式为

$$Nu = 161.956y^{0.611} \cdot Re_{\Omega}^{0.085} \cdot C_w^{0.065} \quad (1)$$

其适用范围

$$\begin{cases} 1477 \leq C_w \leq 18460 \\ 142100 \leq Re_{\Omega} \leq 639400 \\ 0.428 \leq y \leq 18460 \end{cases} \quad (2)$$

计算可以得到该拟合关系式的平均相对误差为 2.01%,拟合效果较好。

对实验数据拟合得到 Nu_{av} 与 Re_{Ω} 、 C_w 的经验

关系式为

$$Nu_{av} = 126.955 \cdot Re_{\Omega}^{0.083} \cdot C_w^{0.066} \quad (3)$$

其适用范围

$$\begin{cases} 1477 \leq C_w \leq 18460 \\ 142100 \leq Re_{\Omega} \leq 63940 \end{cases} \quad (4)$$

计算可以得到该拟合关系式的平均相对误差为 7.13%。可以看出拟合关系式与的符合度很高。

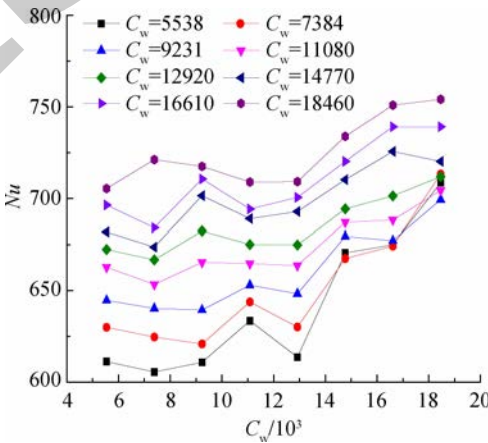


图 7 不同旋转雷诺数下 Nu_{av} 随流量系数变化的关系
Fig. 7 Variation of Nu_{av} with C_w in different Re_{Ω}

3 结 论

对等温轴向通流旋转盘腔进行表面传热系数测量,无量纲化处理后得到了努塞尔数与盘面无量纲半径位置、旋转雷诺数、流量系数的关系,对不同工况下的换热情况进行分析,得到以下结论:

- 1) 流体在旋转盘腔中的流动与换热现象是哥氏力、惯性力、离心力与压差力的共同作用的结果。
- 2) 在较高流量系数低旋转雷诺数工况下,低

半径的努塞尔数随着旋转雷诺数增加出现先减小再增大的现象。在该工况下,由于旋转对流对换热的增强作用无法弥补主流惯性力被抑制对换热的影响,努塞尔数随先降低,当旋转雷诺数继续增大,旋转对换热的增强作用继续增大,努塞尔数开始增加。

3) 在一定的转速下,流量增大,对盘面的冲击作用增强,增强了盘面的流体掺混,使换热增强,局部努塞尔数增大。在较低的主流流量下,旋转雷诺数的增大,局部努塞尔数与平均努塞尔数逐渐增大,增大速率非线性。

4) 平均努塞尔数与局部努塞尔数随变量变化基本一致。在固定的流量系数的工况下,平均努塞尔数在某一旋转雷诺数变化率突然增加,这是因为转速增加,离心力增大,当其增加至某一值时,发生大规模的主流气体入侵现象,提高了换热能力。

参考文献:

- [1] FARTHING P R, LONG C A, OWEN J M, et al. Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: flow structure [R]. Brussels: 35th International Gas Turbine and Aero-engine Congress and Exposition, 1990.
- [2] FARTHING P R, LONG C A, OWEN J M, et al. Rotating cavity with axial throughflow of cooling air: heat transfer [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(1): 229-236.
- [3] BOHN D E, DEUTSCH G N, SIMON B, et al. Flow visualisation in a rotating cavity with axial throughflow [R]. Munich, Germany: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2000.
- [4] BOHN D, REN J, TUEMMERS C. Investigation of the unstable flow structure in a rotating cavity [R]. ASME Paper GT2006-90494, 2006.
- [5] BOHN D, KRÜGER U, NITSCHKE K. Numerical investigations of flow pattern and heat transfer in a rotating cavity between two discs of the compressor of a siemens KWU V84.3 gas turbine [R]. ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, V001T01A035, 1995.
- [6] POWELL J, OWEN J M. Buoyancy-induced flow in a heated rotating cavity [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(1): 297-305.
- [7] OWEN J M, BILIMORIA E D. Heat transfer in rotating cylindrical cavities [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1977, 19(4): 175-187.
- [8] OWEN J M, ONUR H S. Convective heat transfer in a rotating cylindrical cavity [J]. *ASME Transactions Journal of Engineering Power*, 1983, 105(105): 265-271.
- [9] OWEN J M. Thermodynamic analysis of buoyancy-induced flow in rotating cavities [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 132(3): 1149-1158.
- [10] TUCKER P G, LONG C A. Numerical computation of laminar flow in a heated rotating cavity with an axial throughflow of air [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 1994, 4(4): 347-365.
- [11] LONG C A, MORSE A P, TUCKER P G. Measurement and computation of heat transfer in high-pressure compressor drum geometries with axial throughflow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(1): V001T01A044.
- [12] TUCKER P G. Numerical and experimental investigation of flow structure and heat transfer in a rotating cavity with an axial throughflow of cooling [D]. Brighton: University of Sussex, 1993.
- [13] TUCKER P G, LONG C A. Numerical investigation into influence of geometry on flow in a rotating cavity with an axial throughflow [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1996, 23(3): 335-344.
- [14] TIAN Shuqing, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Computation of buoyancy-induced flow in a heated rotating cavity with an axial throughflow of cooling air [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3/4): 960-968.
- [15] 田淑青, 陶智, 丁水汀, 等. 轴向通流旋转盘腔内类 Rayleigh-Bénard 对流稳定性研究 [J]. *热科学与技术*, 2003, 2(3): 260-265.
- TIAN Shuqing, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Investigation of Rayleigh-Bénard-like convection stabilities in rotating cavity with axial throughflow of cooling air [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2003, 2(3): 260-265. (in Chinese)
- [16] 田淑青, 陶智, 丁水汀, 等. 轴向通流旋转盘腔内流动不稳定性研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(4): 393-396.
- TIAN Shuqing, TAO Zhi, DING Shuiting, et al. Investigation of flow instability in rotating cavity with axial throughflow of cooling air [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(4): 393-396. (in Chinese)
- [17] PETER R N C. Rotating flow [M]. New York: Research Studies Press, 2011: 287-295.
- [18] 全永凯, 徐国强, 罗翔, 等. 基于稳态方法的表面传热系数传感器研制 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(12): 1413-1416.
- QUAN Yongkai, TAO Zhi, LUO Xiang, et al. Development of kind of heat transfer coefficient sensor based on steady method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(12): 1413-1416. (in Chinese)
- [19] YANAGITA T, KANEKO K. Rayleigh-Bénard convection patterns, chaos, spatiotemporal chaos and turbulence [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1995, 82(3): 288-313.