

文章编号: 1000-8055(2005)03-0467-05

离心力场下热驱动换热准则 关系式的确定

杨 敏, 常海萍, 毛军逵, 白云峰

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 建立了旋转条件下细微封闭循环通道中流体热驱动流动规律和换热特性的基本控制方程, 并进行无量纲化, 得到了影响流体热驱动换热的主要准则参数; 在理论分析的基础上通过实验研究离心力场下以 H_2O 为热驱动介质时各准则参数对换热的影响, 拟合获得了离心力场下热驱动换热特性相似准则关系式。

关键词: 航空、航天推进系统; 热驱动; 离心力场; 相似准则; 换热

中图分类号: V 231.1; TK124

文献标识码: A

Determination of the Similarity Criteria for Thermally Driven Heat Transfer in Centrifugal Force Field

YANG Min, CHANG Hai-ping, MAO Jun-kui, BAI Yun-feng

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Basic governing equations were established to investigate flow and heat transfer characteristics of the thermally driven liquid flow in the enclosure circulation channels in centrifugal force field. From the dimensionless governing equations, the primary similarity criteria, which affect the thermally driven heat transfer were gained. Experiments based on theoretical analysis were carried out to investigate the details of heat transfer of water in centrifugal force field. Through curve fitting of the test data, the similarity criteria for thermally driven heat transfer in centrifugal force field were obtained.

Key words: aerospace propulsion system; thermally driven heat transfer; centrifugal force field; similar criteria; heat transfer

随着航空航天技术的不断发展, 对发动机性能也提出了越来越高的要求, 提高发动机的推动比是研制和开发高性能发动机始终不渝的追求目标之一, 其最有效的措施之一是增加涡轮前的燃气温度, 随之而来高效可靠的涡轮叶片冷却技术也就成为国内外倍受关注的问题, 已进行了大量

的研究工作。新型涡轮叶片超级冷却技术^[1]的构想是在高彻体力场下构造出细微封闭循环通道, 流体在通道中利用高彻体力产生强的热驱动力从而把热量带走。此新型冷却技术有望提高涡轮叶片的冷却效果, 具有很强的应用前景。

由常海萍、毛军逵等^[2~5]对新型冷却技术机

收稿日期: 2004-05-16; 修订日期: 2004-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276027); 国防基础科研基金资助项目(J1400D001)

作者简介: 杨敏(1979-), 女, 山东单县人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热与传质、涡轮叶片冷却及低温技术研究

理研究可知旋转条件下热驱动换热的主要影响因素有几何尺寸, 热流密度, 旋转速度以及热驱动介质等, 在此基础上本文通过理论和实验进一步研究旋转条件下热驱动流动规律和换热特性, 对控制方程进行无量纲化并得到了影响热驱动换热的准则参数, 在此理论指导的基础上通过实验研究建立了在离心力场下热驱动换热特性的准则关系式, 为新型冷却技术的进一步研究奠定了基础。本文准则关系式建立方法对今后相关问题的研究具有重要意义。

1 物理模型与控制方程

本文研究离心力场下流体热驱动物理模型如图1所示。图中矩形腔(宽1 mm)构成了离心力场下细微封闭循环通道, 矩形腔里充满液体介质, 一端放于高温区, 另一端放于低温区, 流体在彻体力(离心力)的作用下循环流动, 把热量从热端带到冷端, 从而达到冷却的效果, 这充分体现了涡轮叶连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho w_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho w_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_j w_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial w_k}{\partial x_k} \right] + \rho F_i \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho \frac{Dh^*}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T + \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi + \rho q \quad (3)$$

其中:

$$F_i = f_i - 2e_{ijk}\omega w_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{2} \omega^2 R^2 \right) \quad h^* = h + \frac{w w_i}{2} - \frac{1}{2} \omega^2 R^2$$

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right)^2$$

根据量纲分析和数量级分析原则对方程进行无量纲化。取 x_0 为特征尺寸, w_0 为特征速度, T_0 和 T_1 分别为流体热驱动过程中的最高和最低温度, 无因次量按下式组成:

$$x_i^* = \frac{x_i}{x_0} \quad w_i^* = \frac{w_i}{w_0} \quad \rho_i^* = \frac{\rho}{\rho_0} \quad \Theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}$$

同时定义以下准则参数^[6]:

$$Re = \frac{\rho_0 w_0 x_0}{\mu} \quad Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad Bu = \beta \Delta T \quad G = \frac{x_0}{R}$$

$$Ecr = \frac{(\omega R)^2}{c_p \Delta T} \quad Ec = \frac{w_0^2}{c_p \Delta T} \quad Re\omega = \frac{\omega x_0^2}{\nu}$$

由此得到无量纲化的方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j^*} (\rho^* w_j^*) = 0 \quad (4)$$

片超级冷却技术原理。

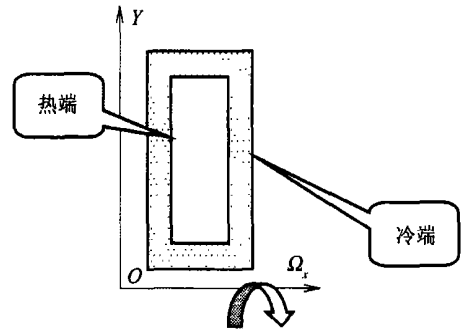


图1 离心力场下流体热驱动物理模型

Fig 1 Physical model of liquid thermal driving in centrifugal force field

为了便于研究旋转条件下流体的流动和换热, 通常采用相对坐标系, 在考虑流体的可压缩性后可以得到本模型在旋转相对坐标系下的基本控制方程组^[3]:

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^* w_i^* w_j^*) = \frac{1}{Re} \left[\left(\frac{\partial w_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j^*}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial w_k^*}{\partial x_k} \right] +$$
$$2 \frac{BuRe\omega}{Re} e_{ijk} w_k^* e_j - \frac{BuRe\omega^2}{Re^2 G} \frac{\partial 1}{\partial x_i}$$

(5)

能量方程:

$$w_j^* \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^* \Theta) = EcrGw_j^* \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^* G) - Ec \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho^* \frac{w_i^* w_j^*}{2} \right) +$$
$$\frac{1}{RePr} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j^2} + BuEc\Theta w_j^* \frac{\partial p^*}{\partial x_j} + \frac{Ec}{Re} \Phi^*$$

(6)

其中:

$$\Phi^* = 2 \left(\frac{\partial w_i^*}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_i^*}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j^*}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_i^*}{\partial x_i} \delta_{ij} \right)^2$$

以上准则参数中 Re 和 Pr 物理意义明确, 本文不再赘述; Bu 数表征了旋转条件下流体热驱动所具有的体积膨胀能力; $Re\omega$ 是旋转雷诺数, 反映了旋转条件下离心力对流体热驱动的影响; G 为相对坐标系中旋转半径和特征尺寸之比, 它表明不仅特征尺寸对流体热驱动有影响, 旋转半径也有影响; Ec 和 Ecr 分别表明相对运动动能对热驱动换热的影响和旋转切向速度动能对热驱动换热的影响。从无量纲控制方程可以分析出离心力场下流体换热特性的影响准则参数为:

$$Nu = f(Re, Pr, Bu, G, Re\omega, Ec, Ecr)$$

(7)

2 实验研究和准则关系式的建立

2.1 实验装置和试验件

实验在高速旋转台上进行, 高速旋转台和试验件的安装示意图如图 2 所示。试验件的结构如图 3 所示。实验中详细的安装、实验步骤、测试手

述。由此可以研究旋转条件下介质的热驱动换热特性。

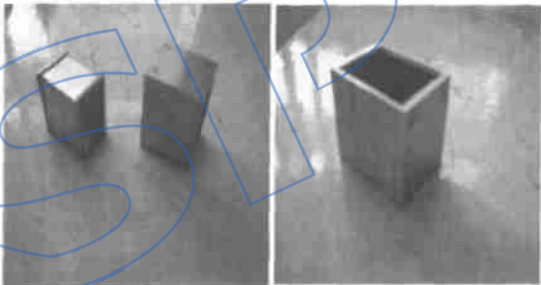


图3 试验件的结构照片

Fig 3 Photo of test section construction

2.2 实验结果分析

实验以 H_2O 为热驱动介质, 在试验件结构尺寸确定的条件下, 通过改变旋转台的转速(即改变离心力的大小)和加热面的热流密度进行研究 H_2O 的换热特性。实验中采用贴加热膜的方式, 通过可控硅提供的电流和电压可计算出热流密度, 利用热电偶测量温度值。驱动装置为一台 30 kW 的调速电机, 其转速由数字式调频器进行调节和控制。实验工况:

转台转速 n 变化范围: 540~ 1 500 r/min
热流密度 q 变化范围:

$$30\,000 \sim 100\,000\,W/m^2$$

对实验数据进行处理和分析结果如下:

图 4 和图 5 分别是热驱动介质 H_2O 当转速一定和热流密度一定时, 热端壁面温度变化曲线图。从图 4 可以看到, 相同转速条件下, 随着热流密度的增加, 热端壁面相同测点的温度不断增加, 壁面的平均温度也随之增加, 同时壁面上最高和最低

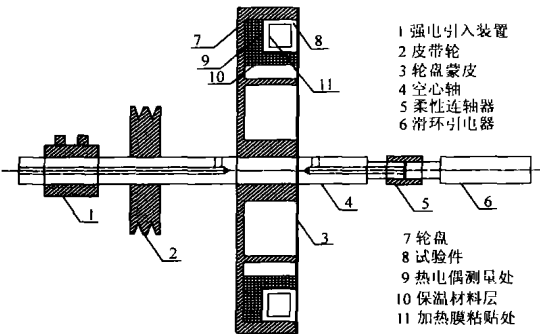


图2 旋转台和试验件安装示意图

Fig 2 Cross-section through the rotating test facility

段和试验件的具体结构参阅文献[5], 在此不再赘

温度之间的温差也不断增大;从图5可知,相同热流密度条件下,随着转速的增加,热端壁面相同位置测点的温度均有不同程度的降低,最高温度降低的尤为明显,而且最高和最低温差逐渐减小。综合两图可知,在转速和热流密度这两个因素

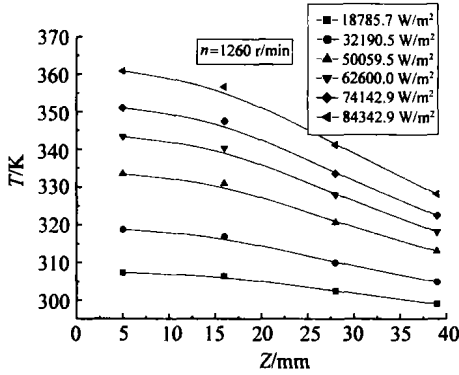


图4 热面温度随热流密度的变化

Fig 4 The curve of temperature varying with q

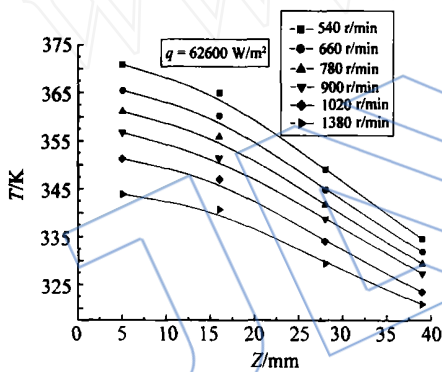


图5 热面温度随转速的变化曲线

Fig 5 The curve of temperature varying with n

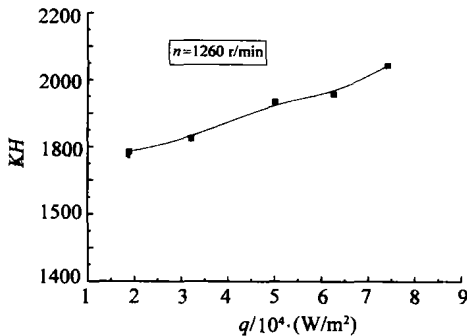


图6 KH 随热流密度的变化曲线图

Fig 6 The curve of KH varying with q

中,改变其一并使之增加都促使介质热驱动强度增大。

图6是当转速和热流密度一定时 H_2O 热驱动

换热能力参数 KH ($KH = q/(T_{MAX} - T_{MIN})$)随热流密度的变化曲线图。从图6中可以看出,当转速一定时,随着热流密度的增加热驱动介质的平均换热能力 KH 逐渐增大;由图7可知,热流密度一定时随着转速的增加 KH 也是逐渐增大的。由此可知当转速和热流密度任一值增加时,流体的热驱动强度都会增大,热驱动换热能力得到相应提高。同时也表明可以通过增加转速和热流密度提高流体的热驱动换热能力。

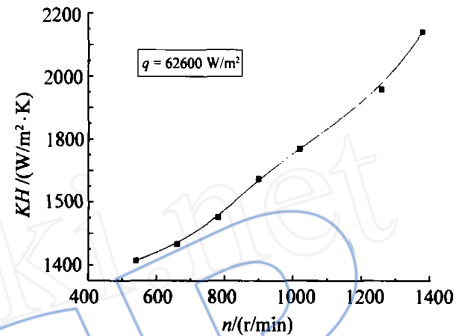


图7 KH 随转速的变化曲线图

Fig 7 The curve of KH varying with n

2.3 准则关系式的建立

由(7)式分析本实验条件下 H_2O 热驱动换热特性的主要影响因素。由实验知试验件的几何尺寸以及在旋转台上的安装位置一定,所以 G 的影响可以不予考虑;由于本实验是研究旋转条件下封闭微小通道中 H_2O 的热驱动换热特性,在此 Re 的影响也可以忽略;由实验数据计算可知本实验条件下 Ec 和 Ec_r 变化不太,在此也忽略它们的影响。但是在本实验条件下 H_2O 的温度变化范围较大,在此温度变化范围内 H_2O 的 Pr 的变化较大,所以不可忽略。由以上分析可知旋转条件下 H_2O 热驱动换热特性的主要影响因素可用以下函数式表示:

$$Nu = f(Bu, Re_{\omega}, Pr) \tag{8}$$

本文对40多种不同的工况进行了实验研究,由于在实验所有工况中准则参数 Bu, Re_{ω}, Pr 之间相互影响,所以很难确定每个参数与 Nu 的单独的影响关系,但是可以得出各准则参数对 Nu 的大致影响,例如图8就是 Bu 和 Pr 基本不变的条件下, Nu 随 Re_{ω} 的变化曲线图。从图中可以看出,当 Pr 在2~3变化范围很小, Bu 数为0.02,时, Nu 数随着 Re_{ω} 增加而增大,由此可知,当 Pr 和 Bu 基本不变时随着 Re_{ω} 数的增大 H_2O 热驱动换热能力逐渐增强。



经验表明, 相似准则之间的关系可以表示成指数函数的形式:

$$Nu = C B u^m R e_w^n P r^p \tag{9}$$

根据实验数据求得 C, m, n 和 p 的值, 最终得到相似准则关系式为:

$$Nu = 0.306 B u^{0.168} R e_w^{0.478} P r^{0.321} \tag{10}$$

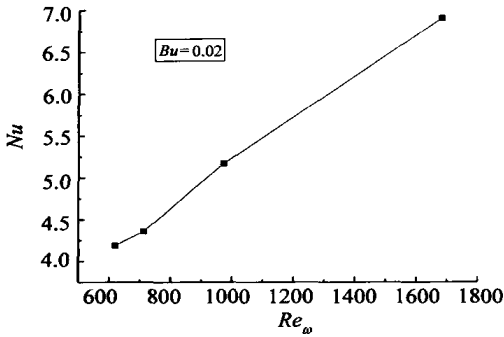


图8 Nu 数随着 Re_w 的变化曲线图
Fig 8 The curve of Nu varying with Re_w

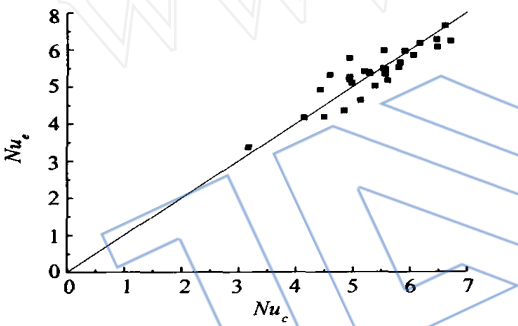


图9 精度分析图
Fig 9 Deviation between correlation and experiments

上式的适用条件:

$$Pr: 2 \sim 6 ; Re_w: 300 \sim 1500$$

由(10)式可以看出, Bu, Re_w 和 Pr 对 Nu 数的影响程度不同, Bu 数的影响较小, Re_w 的影响较大。此外热驱动介质的热物性对换热也有一定的影响。

2 4 精度分析

图4 为准则关系式精度分析图。由图4 可见, 图中大部分点都落在 $y = x$ 直线的附近, 表明由实验得到的 Nu 数与根据整理的准则关系式计算出的 Nu 数值比较接近, 同时也可知其精度较高。

3 结 论

- (1) 理论研究得到了旋转条件下封闭循环通道中流体流动和换热的无因次控制方程和影响流体热驱动换热特性的相似准则参数。
- (2) 通过实验研究了旋转条件下封闭微小循环通道中 H_2O 的热驱动流动规律和换热特性。
- (3) 建立了离心力场下 H_2O 热驱动换热特性的相似准则关系式, 并进行了精度分析, 由此可知精度较高。
- (4) 本文工作对新型冷却技术进一步理论和实验研究提供了一定的指导作用, 也对今后相关问题的研究, 提供了重要参考。

参考文献

[1] 常海萍, 过增元 一种燃气涡轮冷却技术[P] 中国专利: ZL 01108222 4

[2] 毛军逵, 常海萍 一种新型冷却循环通道内水的热驱动数值分析[J] 南京航空航天大学学报, 2002, 34(6): 522~ 526
MAO Jun-kui, CHANG Hai-ping Simulation of Thermal Driving Water in Circular Region Used in High Power Density Electronic Systems [J] Journal of Nanjing University of Aerospace and Astronautics, 2002, 34(6): 522 ~ 526

[3] 毛军逵, 常海萍, 方立 离心力场下细微封闭通道内R12 的热驱动换热研究[J] 航空动力学报, 2003, 18(4): 498~ 501
MAO Jun-kui, CHANG Hai-ping, FANG Li Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer About the Thermal Driving of R12 in Rotating Small-Size Circular Enclosures[J] Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 498~ 501.

[4] 毛军逵, 常海萍, 方立 离心力场流体热驱动液晶显现实验研究[J] 工程热物理学报, 2004, 25(2): 229~ 231
MAO Jun-kui, CHANG Hai-ping, FANG Li Investigation of Thermally Driven in Centrifugal Field with Liquid Crystal[J] Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 229~ 231.

[5] 杨敏, 常海萍, 毛军逵 离心力场下 H_2O 和R12 热驱动换热特性实验研究[J] 工程热物理学报, 2004, 25(2): 302~ 304
YANG Ming, CHANG Hai-ping, MAO Jun-kui Experimental Investigation of Thermally Driving Heat Transfer Characteristics of H_2O and R12 in a Centrifugal Force Field [J] Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 302~ 304

[6] Darryl E Metzger, Naim H Afgan Heat and Mass Transfer in Rotating Machinery [M] Hemisphere Publishing Corporation, 1984