

文章编号: 1000-8055(2003) 04-0498-04

离心力场下细微封闭通道内 $R12$ 的热驱动换热研究

毛军逵, 常海萍, 方 立

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 本文以试验的方法, 研究了一种利用彻体力场下封闭通道内流体的热驱动循环流动来强化换热的新型冷却技术。主要讨论了封闭循环通道宽度 d 为 1 mm, 氟利昂 $R12$ 为工质的热驱动流动和换热特性, 重点分析了随转速(即离心加速度)的变化, $R12$ 的热驱动流动和换热变化规律, 以及热端壁面的温度分布及变化规律。研究结果表明: 离心力场下流体热驱动流动和换热特点同重力场下基本相似; 随着转速的提高, $R12$ 的热驱动强度不断增加, 热端壁面温度逐步下降, 同时热端壁面的温度梯度也逐渐降低; 在转速为 1140 r/min 时, 总平均传热系数达到了 $1550 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

关键词: 航空、航天推进系统; 传热; 热驱动; 微小通道; 旋转

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer About the Thermal Driving of $R12$ in Rotating Small-Size Circular Enclosures

MAO Jun-kui, CHANG Hai-ping, FANG Li

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

Abstract: With the development of the aero-engine, the temperature before turbine is increasing greatly and it becomes more and more important to study new cooling technology and equipment. Experiments have been carried out to investigate a new cooling technology which used the thermal driving of fluid in small-size circular enclosure to enhance the heat transfer rate. In this paper, the characteristics of flow and heat transfer of the thermal driving of $R12$ varying with the rotating speed were investigated. All the results show that the characteristics are similar with those in gravity; and the average temperature, the gradients of temperature of the heated wall decrease when the rotating speed increases; and at the same time, the average heat transfer rate is enhanced greatly. When the rotating speed reaches 1140 r/min, the rate will go to $1550 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Key words: aerospace propulsion; heat transfer; thermal driving; small-size circular; rotating

收稿日期: 2002- 08- 01; 修订日期: 2002- 12- 05

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(J1400D001)

作者简介: 毛军逵(1976-), 男, 浙江杭州人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事发动机高温部件冷却设计、传热与传质研究。

1 引言

提高涡轮前温度是军用高性能航空燃气轮机提高推重比最基本的技术途径。目前许多燃气涡轮中的燃气温度已超过耐热金属的熔点 600 多度, 下一代的军用燃气涡轮温度将会更高。研究冷却新概念和新的高效冷却方式, 已经成为发展下一代燃气涡轮的紧迫需求。常海萍教授和过增元院士提出了一种新型的冷却方式(专利号: ZL 01 2 17525.0), 即利用彻体力场下封闭循环通道内流体的热驱动流动来强化换热^[1]。本文通过试验研究, 分析讨论了在离心力场下此新型冷却技术的换热规律和运用效果。

2 试验装置

整套试验装置如图 1 所示。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

方式。加热膜为康铜膜, 厚度 0.01 mm。考虑到本实验的特点, 采用可控硅提供的大电流、低电压的加热方式, 加热电流 0~100 A, 加热电压 0~15 V。在空心转轴的外面套有强电引入装置—碳刷, 可以将可控硅提供的电流引入到试验件的加热膜上。试验中采用空气为冷却介质。在轮盘蒙皮表面开有窗口, 将试验件的冷端表面暴露在环境空气中。当轮盘旋转时, 空气不断吹过试验件的冷端表面, 从而将热量不断带走^[2~4]。

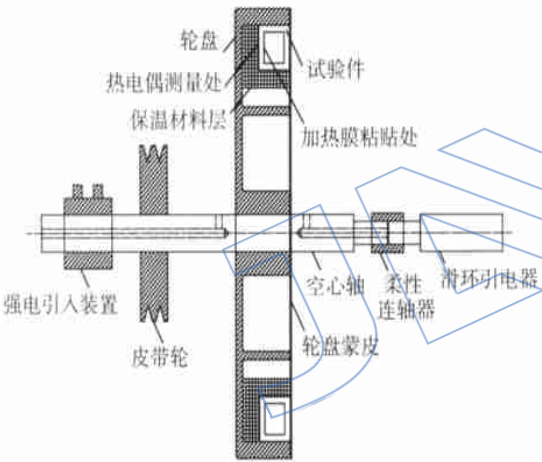


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experiment's system

调节和控制。试验中电机轴的转速可以在 0~3000 r/min 内连续变化, 从而带动直径 800 mm 的旋转轮盘以 0~3000 r/min 的速度旋转。为了实现对试验件的加热, 试验中采用了贴加热膜的

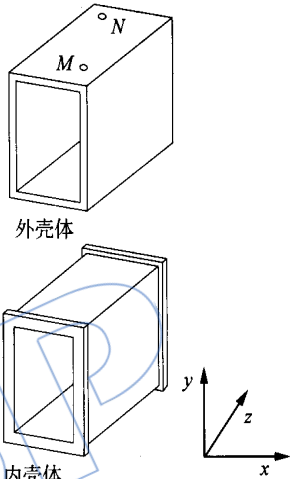


图 2 试验件示意图

Fig. 2 Scheme of test rig

试验件如图 2 所示。为了构造封闭的微细循环通道, 设计、加工了内外两个壳体, 材料均为不锈钢。在内壳体周边加工了高度为 1 mm 的凸台, 当内壳体放置在外壳体中, 并通过氩弧焊连接起来后, 就由内、外壳体构成了宽度为 1 mm 的微细循环通道。为了灌装工质氟利昂 R12, 在外壳体上开有直径为 3 mm 的通孔。在灌装液体之前, 用银焊分别将两根内径 1 mm、外径 3 mm 的紫铜管焊接在 M、N 处。通过这两个紫铜管将氟利昂 R12 灌装到循环通道后, 将其封死。灌装结束后, 将试验件放置在天平上, 隔 48 小时后检测试验件质量

表 1 试验参数

Table 1 Parameters in experiments

试验工况	1	2	3	4	5
加热电压/V	0.53	0.80	1.06	1.34	1.64
加热电流/A	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
热流密度/(W/m ²)	6369	14107	25238	39880	58678
转速/(r/min)	每种工况下, 转速从 180 r/min 增加到 1140 r/min, 增加幅度 120 r/min				

是否发生改变。试验中温度测量采用了铜—康铜热电偶。试验开始前,在旋转和静止条件下对数据测量进行了校准。试验中主要测量了热端壁面温度分布以及随转速(即离心加速度)、加热量的变化规律,从而来分析在离心力场下封闭通道内R12热驱动流动随转速及加热量的变化规律和特点。具体的试验参数如表1所示。

3 试验结果和分析

图3为相同加热量、同一试验件的热端壁面温度分别在重力场、离心力场下分布曲线比较图。图4为在某一特定加热量条件($q=39880\text{ W/m}^2$)下,加热面温度分布随转速(即离心加速度)的变化曲线。图5为相同转速条件下($\Omega=1140\text{ r/min}$),热端壁面温度随加热量的变化曲线。图6为加热量为 39880 W/m^2 时,总平均传热系数随转速的变化曲线图。

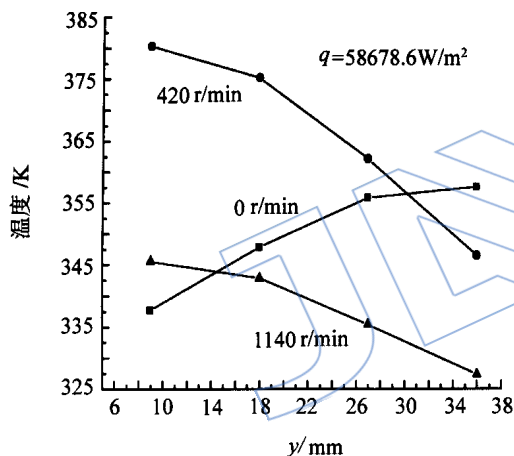


图3 重力场和离心力场下加热面温度分布比较
Fig.3 Temperature in heated wall under centrifugal and gravitation respective

从图3中可见,重力场下和离心力场下热端壁面温度分布有着明显的区别。在重力场的条件下,热端壁面温度沿Y方向逐步增加,而在离心力场下,热端壁面温度沿Y方向逐步减小。造成温度分布曲线明显不同的主要原因是彻体力场中的彻体力方向发生了改变。在重力场下,彻体力方向为负Y方向。当热量不断加入后,热端流体温度升高,密度减小,在重力的作用下,流体将沿Y方向运动,达到冷端后(重力场下采用水冷)释放热量,温度降低,密度增加,在重力的作用下,流体沿负Y方向运动,从而形成循环流动,不断的将热量从热端带走,在冷端释放。所以在重力场下热

端壁面温度沿Y方向不断增加。

在旋转试验中,即当试验件处于离心力场下时,由于离心力的方向为Y方向,正好同重力场下彻体力方向相反(在旋转条件下,文章中图所示坐标设定为相对坐标,Y方向同离心力方向相同)。故而当热量加入后,流体温度升高,密度降低,在离心力的作用下,流体将会向负Y方向运动,同样流体运动到冷端(旋转条件下,空气为冷却介质)释放热量,温度降低,密度增加,在离心力作用下,流体沿Y方向运动,形成循环流动。所以热端壁面温度沿Y方向降低。

图3中曲线的变化清楚的说明了彻体力场中彻体力方向对流体热驱动流动的影响,同时我们还可以看到,当转速从420 r/min增加到1140 r/min后,热端壁面的最高温度从380 K降低到345 K,而且热端壁面温差也有一定的减小。从图4中我们能够更清楚地看到这个规律:随着转速的不断提高,热端壁面的最高温度、平均温度以及温差均降低。

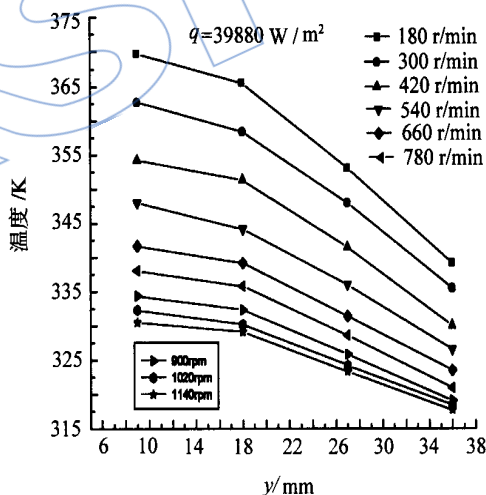


图4 加热面温度分布随转速变化曲线
Fig.4 Temperature in heated wall varying with rotating speed and gravitation respective

温差变化的主要原因是彻体力场下彻体力加速度大小发生了改变。在封闭通道内流体的相对运动同时受到热驱动力和通道阻力的影响,其中流体的热驱动力主要是离心力,还有哥氏力共同作用的结果(重力场下重力加速度为 9.8 m/s^2 ,在离心力场下当转速为180 r/min时,离心加速度为 142.1 m/s^2 ,当转速为1140 r/min时,离心加速度达到了 5700.7 m/s^2 。由此可以看到,在本实验的条件下,重力加速度和离心加速度相比可以

忽略不计)。在试验中, 保持其他试验条件不变, 改变旋转速度, 即改变了离心加速度的大小。当离心加速度增加后, 封闭通道内 R12 的热驱动力增加, 运动速度随之提高, 和热端壁面的换热增强, 因而热端壁面的温度也随之降低。由于最终 R12 在封闭通道内稳定流动时, 热驱动力和流动阻力应该平衡, 所以当转速提高, 即离心加速度提高后, 通道内流体的温度差会相应的降低, 来维持稳定运动中的力平衡。表征在热端壁面上即为温差的降低。

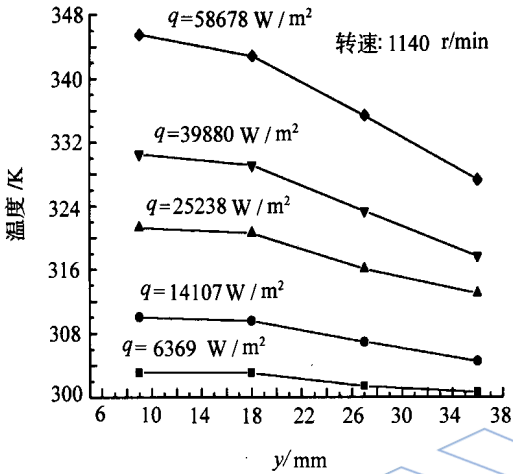


图 5 相同转速下, 热端壁面温度随加热量变化曲线
Fig. 5 Temperature in heated w all varying with q

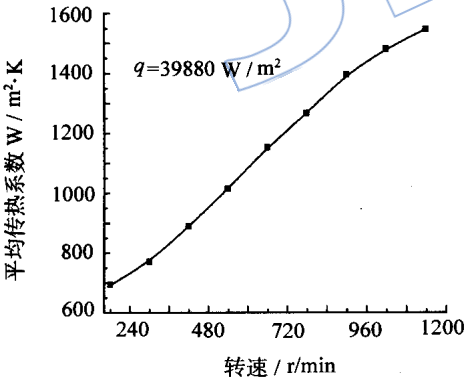


图 6 总平均传热系数随转速变化曲线
Fig. 6 Average heat transfer coef. varying with rotating speed

从图 5 中可以发现随热端加热强度的不断加强, 热端壁面温度逐步增加, 同时温度梯度在不断变大, 温度的变化规律同重力场下基本一致。温度分布变化的主要原因是, 在转速一定的条件下, 即离心加速度一定时, 当热端加热量增加后, 热端同冷端之间的温差必然上升。影响流体热驱动强度

的一个主要因素即为冷热端温度差, 当温度差增加后, R12 的热驱动强度增加, 反映在壁面温度上即为温度梯度的增加。

图 6 为总平均传热系数随转速的变化曲线。为了进一步研究改新型冷却技术和结构的换热效果, 本文研究了总平均传热系数 K 。具体定义为: $K = q/(T_w - T_l)$ 。 q 为热端的加热热流密度, T_w 为热端壁面的平均温度, T_l 为冷端冷却介质温度 (取试验中大气温度)。从图中发现随着转速的不断加大, 总平均传热系数逐步增加。当转速为 1140 r/min 时, 总平均传热系数达到了 1550 W/m² · K, 大大地高于一般的冷却方式。从上面对离心力场下 R12 流动和换热的分析, 不难发现总平均传热系数增加的主要原因就是离心加速度的增加, 即彻体力场下彻体力加速度的增加。由于转速不断提高, 离心加速度随之增加, 作用在封闭循环通道内的 R12 上, 使得 R12 的热驱动强度不断增强, 从而流体的运动速度逐步增加, 同时和热端壁面之间换热增强, 所以总的平均传热系数也随着不断增加。

4 结 论

- (1) 本文通过试验, 研究了一种利用封闭通道内流体热驱动来强化换热的新型冷却技术在离心力场下的运用效果。在本实验中, 当转速为 1140 r/min 时, 总平均换热系数达到了 1550 W/m² · K。换热效果远远高于一般现有的冷却方式。
- (2) 在热流密度不变的情况下, 随着转速的提高, 热驱动强度增加, 热端壁面最高温度、平均温度和温差均逐步降低。
- (3) 试验中, 随着转速的提高, 总平均换热系数明显增加。可以预计在涡轮叶片、大型发动机组等高速旋转部件的冷却设计中, 此新型冷却技术将会有着广阔的运用前景。

参考文献:

[1] 过增元. 热流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
[2] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 277- 280.
[3] 徐国强, 陶智, 丁水汀, 等. 高位垂直进气旋转盘流动和换热的实验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 164- 168.
[4] Owen J M, Hayance C M, Bayler F J. Heat Transfer from an Air-Cooled Rotating Disk[R]. Proc Roy Soc, London, 1974, A388.