

# 带侧向出流孔的梯形通道内部换热特性实验

杨 祺, 朱惠人, 周雷声, 李春林  
(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:**为深入了解带侧向出流通道内部换热特性,采用热色液晶瞬态测量技术对带侧向出流孔的梯形通道内表面换热进行了测量,重点分析侧流孔孔间距、通道进口雷诺数及侧流比对梯形通道内表面换热特性的影响。实验结果表明:侧流孔孔间距的增大使努塞尔数沿整个面的分布趋于均匀;进口雷诺数的增加会明显加强通道内的换热;随着侧流比的增大,通道沿主流方向同一位置处的换热明显减弱,整个通道内表面的平均努塞尔数亦有所下降。

**关键词:**侧流孔;液晶;瞬态;内流通道;换热系数

**中图分类号:** V231.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009 - 3516(2009)02 - 0014 - 05

当飞机穿过有冷水珠的云层,其发动机和进气道前部容易形成结冰,会大大限制通过发动机的空气流量而导致发动机性能损失、功率降低并容易使发动机发生故障。Mason Jeanne G 等人<sup>[1]</sup>对此进行过详细分析,因此必须对航空发动机进口进行防冰处理。发动机基本防冰系统分为电热和气热<sup>[2]</sup>。目前有关气热防冰系统中带侧向流通道内表面换热的研究主要针对涡轮叶片内腔,如文献[3]、[4]针对涡轮导向叶片尾缘带绕流的柱梯形通道的换热研究,实验测量了梯形通道、横向出流、径向出流(出流比为0或1)和绕流柱顺叉排等情况下的压力损失系数和换热系数。文献[5]则主要研究涡轮导向叶片中弦区带气膜孔出流内流通道中的流场特征。本文研究的是气热防冰在航空发动机整流罩支板中的应用,所研究的支板内腔结构与上述文献研究对象的几何结构均有很大不同。

## 1 实验模型和实验原理

图1所示为某种发动机进气道支板加热防冰结构示意图,其中中腔内流动可简化为带有侧向出流的通道的流动。实验时,由离心风机提供的气流依次经过储气罐、进气阀、稳压腔、收缩段、快速加热器,最后流入实验段,实验段由侧流腔实验件、主流收集腔、侧流孔板、侧流收集腔组成。

实验中一部分气体由侧流腔流至主流收集腔,另一部分经由侧流孔板流至侧流收集腔,由流量计组控制进入主流腔和侧流腔的流量。利用热电偶和温度采集模块采集气流的进口温度,使用摄像机对主流腔板面进行拍摄,使用线光源对其进行照明,实验过程中保持光源不变。

实验段由透明的有机玻璃加工而成,见图2。实验过程中选取主流腔梯形通道板面为研究对象,研究侧流的存在以及变化对该面换热产生的影响。

实验参数定义:侧流孔板开有单排小孔,定义孔间距与孔径之比为 $s/D$ (变化范围为2.71 - 10.87); $c$ 为侧流比,即主流流量与侧流流量之比(变化范围0.0 - 1.0);侧流腔进口雷诺数 $Re = 4\dot{m}/\pi\mu d_e$ , (变化范围为20 000 - 40 000), $\dot{m}$ 为气流总质量流量, $d_e$ 为主流进口当量直径。定义板面换热参数为 $Nu = hd_f/\lambda$ , $h$ 为局

\* 收稿日期:2008 - 12 - 11

基金项目:国家“973”计划资助项目(2007CB707701)

作者简介:杨 祺(1983 -),女,甘肃兰州人,硕士生,主要从事航空发动机传热、冷却技术研究;

E-mail:qiqi94520@qq.com

朱惠人(1958 -),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事航空发动机传热、冷却技术研究。

部换热系数,  $d_i$  为侧流孔孔径,  $\lambda$  为进口气流的导热系数。

实验采用热色液晶瞬态测量技术对各换热面进行全表面换热系数测量。文献[6-11]的实验采用的是窄带液晶, 变色温度范围小于  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , 其特定的色调代表特定的温度值, 不同测量区域达到特定温度值的快慢程度反应换热的强弱。测量壁面厚度满足半无限大固体要求。具体采用快速加热器对不同几何和气动工况下的气流进行快速加热, 使来流温度  $T_g(t)$  迅速上升。另外模型的初温  $T_0$ , 密度  $\rho$ , 比热  $c$ , 导热系数  $k$  均为已知常量。实验过程中, 记录气流温度  $T_g(t)$  的变化过程, 并用摄像机记录液晶的颜色变化过程, 从 3 者的对应关系中可以得到每个时刻的壁面温度  $T_w(t)$  分布。其计算关系公式可表示为:  $T_w(t) = T_0 + \sum_{i=1}^n (T_{g_i} - T_{g_{i-1}}) U(t - \tau_i) [1 - \exp(\beta^2(t - \tau_i)) \operatorname{erf} c(\beta \sqrt{t - \tau_i})]$ , 式中  $\beta = \frac{ha}{k} = \frac{h}{k} \sqrt{\frac{k}{\rho c}} = \frac{h}{\sqrt{\rho ck}}$ ,  $h$  为局部换热系数。将  $T_g(t)$ 、 $T_w(t)$  代入上式, 就可以求出测量面的换热系数分布, 再经换算得到  $Nu$  数分布。

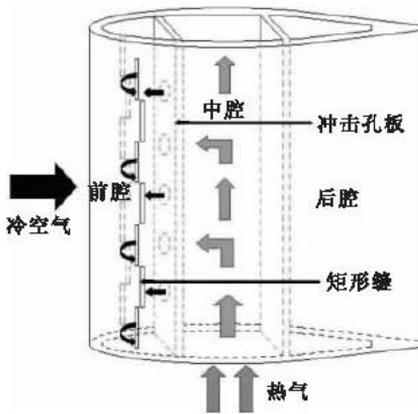


图1 发动机整流罩支板结构示意图

Fig.1 Sketch of crutching board in engine inlet

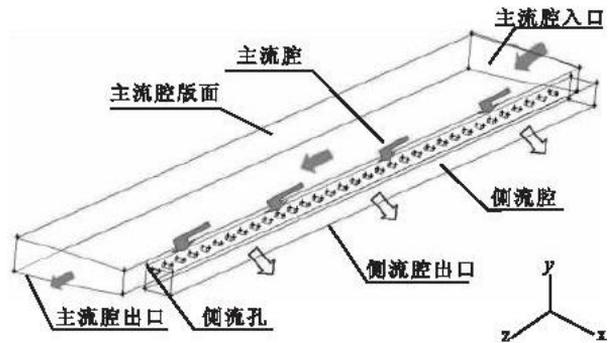


图2 侧流腔实验件内流通道示意图

Fig.2 Sketch of inner face in Test model

本实验中气流温度采用热电偶测量, 采集频率为  $10\text{ Hz}$ 。测量板表面各点的  $T_w(t)$  及  $t$  通过 3CCD 数码相机以  $25\text{ 帧/s}$  的速率拍摄测量板表面窄带热色液晶的变色过程测得。液晶测温原理及图像处理技术参见文献[11]。

瞬态传热测量误差主要包括温度测量误差  $\Delta T$ , 时间测量误差  $\Delta t$ , 以及测量板物性参数误差  $\Delta \sqrt{\rho c \lambda}$ 。在本实验中热色液晶变色温度测量误差  $\Delta T_{gb} = \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 主流温度测量误差  $\Delta T_{gz} = \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 液晶变色时间测量误差  $\Delta t = \pm 0.5\text{ s}$ , 测量板物性参数误差  $\Delta \sqrt{\rho c \lambda} = \pm 20$ 。根据文献[12]中的误差计算方法可以估计出换热系数测量结果的相对误差约为  $6\% - 8\%$ 。在大部分传热试验中, 测量板表面的换热系数都存在空间梯度, 由此带来的测量板内侧向导热引起的误差也是不可避免的。实验中测得的流量为体积流量, 实际数据处理过程中使用的为质量流量, 在本测量系统中, 质量流量的不确定度为  $2.55\%$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 孔间距 $s/D$ 对板面换热的影响

当  $Re = 30\ 000$ , 侧流比  $c = 0.2$ , 不同孔间距  $s/D$  ( $10.87 - 2.72$ ) 时, 板面  $Nu$  数分布见图 3。图中右侧所示为侧流孔所在位置, 且横纵坐标均无量纲化, 以下均相同。由图 3 可以看出, 在  $s/D = 10.67$  时, 即孔数较少的几何工况下, 从横向来看, 靠近侧流孔一侧(以下称为近孔侧)的板面  $Nu$  数要高于远离侧流孔一侧(以下称为远孔侧)的  $Nu$  数。分析其原因, 是由于侧流孔对主流气体有一定的抽吸作用, 使得气体在侧流孔附近堆积, 气流的速度要高于其他位置, 所以换热也要剧烈一些。当  $s/D$  变化为  $5.43$  时, 板面  $Nu$  数的横向分布更加均匀, 甚至在主流出口段远孔侧的换热效果要略强于近孔侧。其原因为孔间距的减小和孔板上侧流孔数目的增加使得孔密度增加, 同样  $20\%$  进口质量流量的气体流经侧流孔板时, 近孔侧速度下降, 且沿主流

方向的速度梯度越来越低。这种速度的降低,使得靠近主流出口处近孔侧速度低于远孔侧,换热效果也相应改变。当  $s/D$  进一步减小至 2.72,孔数目为  $s/D = 10.87$  的 3 倍时,随着孔对主流气体的抽吸作用进一步加剧,气流在整个侧流腔的分布更加均匀,板面横向速度的变化减小,但也使得主流平均速度下降,造成板面平均  $Nu$  数的减小。

综上所述,侧流孔间距  $s/D$  的变化对板面  $Nu$  数沿横向的分布有较强的影响,但是由于流经侧流孔板的气流质量流量不变,平均  $Nu$  数较其他因素的影响而言变化不大(见图 7)。

## 2.2 进口 $Re$ 数对板面换热系数的影响

当侧流比  $c = 0.2$ ,孔间距  $s/D = 5.43$ ,  $Re = 20\ 000 - 40\ 000$  时,板面  $Nu$  数分布见图 4。可以看出,随着进口雷诺数的增加,板面的换热强度明显增强。这是由于进口雷诺数越大即气流总质量流量越大,气体流经主流腔冲刷板面的速度加快,使其换热效果加剧。由对实验件几何工况的研究可知,当  $s/D = 5.43$  时,侧流孔对主流气体的抽吸作用最为明显,近孔侧的气体流速低于远孔侧,这在  $Re = 40\ 000$  时表现的尤为突出,导致近孔侧较远孔侧换热系数降低。同时,随  $Re$  数的增加,侧流腔板面平均  $Nu$  数也快速上升(见图 7)。

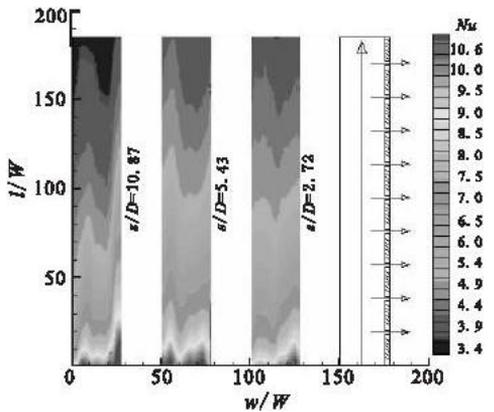


图3  $Re = 30\ 000, c = 0.2$ ,不同孔间距板面  $Nu$  数分布  
Fig. 3 Contours of Nusselt number at  $Re = 30\ 000, c = 0.2$

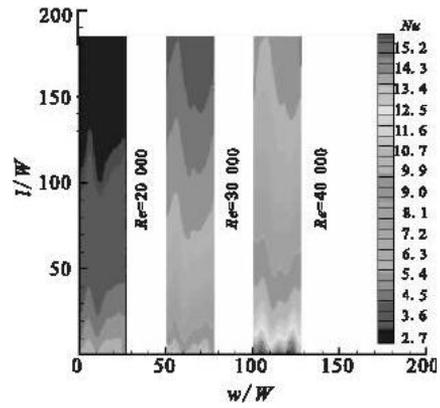


图4  $s/D = 5.43, c = 0.2$  时板面  $Nu$  数分布  
Fig. 4 Contours of Nusselt number at  $s/D = 5.43, c = 0.2$

## 2.3 侧流比 $c$ 对板面换热系数的影响

当  $Re = 20\ 000$ ,孔间距  $s/D = 5.43, c = 0.0 - 1.0$  时,板面  $Nu$  数分布见图 5。可以看出,随着侧流比  $c$  的增大,在侧流腔板面同一位置处, $Nu$  数是逐渐减小的,对于整个面来说,平均  $Nu$  数也呈明显下降趋势。其原因为当  $c = 0$  时,没有气体经由侧流孔流入侧腔,所以整个侧流腔板面的横向换热比较均匀。同时,在沿程流阻的影响下,流速在主流方向上逐渐减小, $Nu$  数逐渐降低。侧流比增加,流经侧流孔板的气体流量增加,主流气体质量流量减少,使得沿主流方向流速进一步降低。同时,由于沿主流方向各侧流孔附近气流速度逐渐降低,其抽吸作用依次增强,通道内气流流速加速下降,最终导致  $Nu$  数沿主流方向的下降,侧流比越大,其降幅也越明显。当侧流比  $c$  增加到 1 时,靠近通道出口远孔侧几乎没有气流经过,气体的流速和流量较  $c = 0$  时都有很大程度的下降,所以换热剧烈强度相应降低。

## 2.4 沿流动方向换热系数的变化及平均换热系数分布

当  $Re = 30\ 000$ ,孔间距  $s/D = 5.43, c = 0.0 - 0.3$  时,板面  $Nu$  数沿流向平均值分布见图 6。可以看出,各侧流比下,通道沿主流方向的平均  $Nu$  数是逐渐降低的。随着侧流比的递增,通道流向相同位置处的  $Nu$  数平均值依次下降,且越靠近主流出口,该下降趋势越明显,综合前面的讨论可以知道这是沿主流方向侧流孔的抽吸作用依次增加造成的。

图 7 为各种工况下侧流腔板面的平均换热系数比较图。从图中可以看出,对于有侧流的梯形通道板面换热而言, $Re$  变化的影响最为明显;而在同一  $Re$  数下,孔间距  $s/D$  的变化对平均  $Nu$  数的影响最小。侧流比  $c$  的增加使得板面平均  $Nu$  的下降也较为明显。

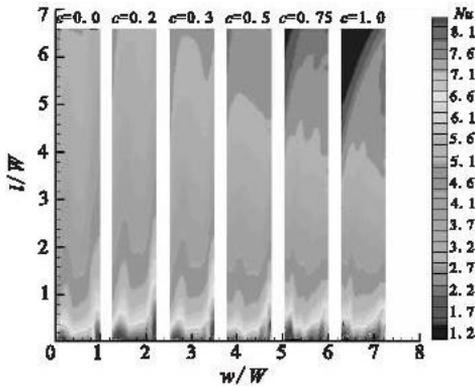


图5  $s/D = 5.43$ ,  $Re = 20\ 000$  板面  $Nu$  数分布

Fig.5 Contours of Nusselt number at  $s/D = 5.43, Re = 20\ 000$

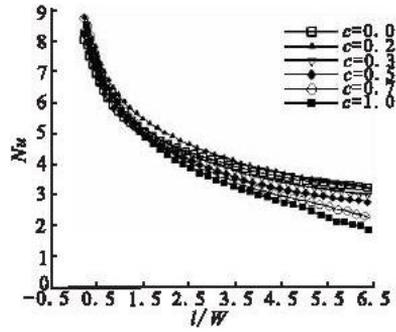
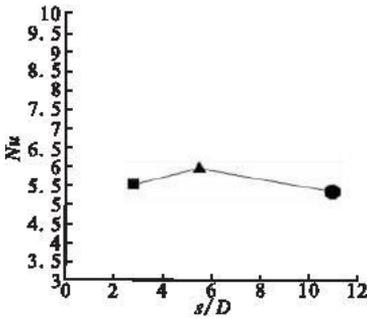
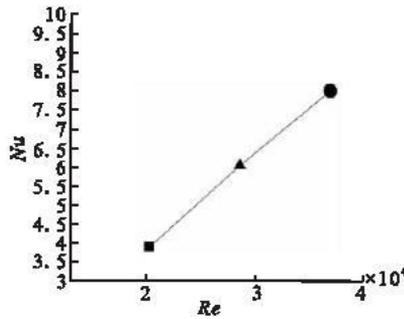


图6  $s/D = 5.43$ ,  $Re = 20\ 000$  板面平均  $Nu$  数沿流向分布

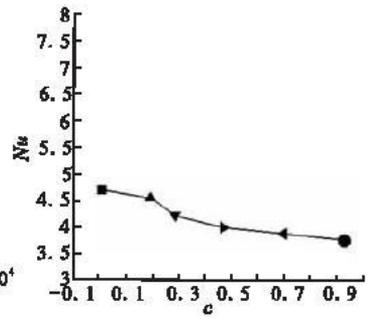
Fig.6 Contours of average Nusselt number at  $s/D = 5.43, Re = 20\ 000$



(a)  $Re = 30\ 000, c = 0.2$   
 $s/D$  影响下平均  $Nu$  分布



(b)  $s/D = 5.43, c = 0.2$   
 $Re$  影响下平均  $Nu$  分布



(c)  $s/D = 10.87, Re = 20\ 000$   
 $c$  影响下平均  $Nu$  数分布

图7 不同工况下板面平均  $Nu$  数对比

Fig.7 The comparison of virous Nusselt numbers of board

### 3 结论

- 1) 孔间距  $s/D$  的增加使得板面局部换热系数在垂直主流方向上的分布趋于均匀,而对平均换热系数的影响不大,总体呈现先增大后减小的趋势。
- 2) 进口雷诺数的增加使得板面平均  $Nu$  明显增大。
- 3) 随着侧流比由 0 增大到 1,板面平均  $Nu$  数逐渐下降,尤其是在大侧流比下,板面靠近侧流孔出口侧的  $Nu$  数明显降低。
- 4)  $Re$  数、侧流比和孔间距对板面平均  $Nu$  数的影响依次递减。
- 5) 通道沿流动方向平均  $Nu$  数逐渐降低,并且随着侧流比的增加,其下降趋势更为明显。

### 参考文献:

[1] Mason Jeanne G, Walter Strapp J, Philip Chow . The Ice Particle Threat to Engines in Flight [R]. AIAA 2006 – 206.

[2] Burkett Brian, Mitrovic Milian. Development and Test Results on A High Efficiency Ice Protection System [R]. AIAA 2006 – 863,2006.

[3] Hwang Jenn – Jiang, Lui chau – chin. Detailed Heat Transfer Characteristic Comparison in Straight and 90 – degree Turned Trapezoidal Ducts with Pin – fin Arrays [J]. Int J Heat Mass Transfer,1999,42(21) :4005 – 4016.

[4] Hwang Jenn – Jiang, Lui chau – chin. Lateral – flow Effect on Endwall Heat Transfer and Pressure Drop in A Pin – fin Trapezoidal Ducts of Various Pin Shapes [J]. Journal ASME of Turbomachiney,2001,123(1) :133 – 139.

[5] 蔡卫军,宋晓伟,刘高文,等. 侧壁有出流孔的通道流场实验研究[J]. 推进技术, 2003,24(4) :337 – 340.  
CAI Weijun, SONG Xiaowei, LIU Gaowen, et al. Aerodynamic Investigation of Flow Fields in the Channel with Ejection through the Holes on the Wall [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003,24(4) :337 – 340. (in Chinese)

[6] Funazaki K, Tarukawa Y. Systematic Numerical Studies on Heat Transfer and Aerodynamic Characteristics of Impingement Cool-

- ing Devices Combined with Pins [R]. ASME 2003 - GT - 38256.
- [7] Funazaki K, Tarukawa Y, Kudo T, et al. Heat Transfer Characteristics of An Integrated Cooling Configuration for Ultra - high Temperature Turbine Blades; Experimental and Numerical Investigations [R]. ASME 2001 - GT - 0148.
- [8] Funazaki K, Tarukawa Y, Yamawaki, et al. Surface Heat Transfer Measurements of A Scaled Rib - roughened Serpentine Cooling Passage by Use of A Transient Liquid Crystal Technique [R]. ASME 1998 - GT - 515.
- [9] Newton P J, Yan Y, Stevens N E, et al. Transient Heat Transfer Measurements Using Thermochromic Liquid Crystal. Part 1: An Improved Technique [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(1): 14 - 22.
- [10] Kingsley J R, Lock G D, Owen J M. Transient Heat Transfer Measurements Using Thermochromic Liquid Crystal: Lateral - conduction Error [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(2): 256 - 263.
- [11] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面换热系数的技术研究[J]. 测控技术, 2006, 25(9): 67 - 71.  
GUO Tao, ZHU Hui ren, XU Duchun, et al. Research on Transient Measurement of Heat Transfer Coefficient Distribution with Liquid Crystal Technique [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(9): 67 - 71. (in Chinese)
- [12] Drost U, Bolcs A, Hoffs A. Utilization of the Transient Liquid Crystal Technique for Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Investigations on A Flat Plane and A Turbine Airfoil [R]. ASME 1997 - GT - 026.

(编辑:姚树峰,徐敏)

## Heat Transfer Investigation of Internal Passage in Trapezoidal Ducts with Ejection Through the Suction Holes

YANG Qi, ZHU Hui - ren, ZHOU Lei - sheng, LI Chun - lin

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to deeply understand the heat transfer mechanism of the channel with side - outflow, a transient measurement technique of using narrow - band thermochromic liquid crystal is employed to determine heat transfer characteristics on the inner surfaces of trapezium channel with ejection through the suction holes. Experimental studies are carried out to investigate inner surface Nusselt numbers under various spaces between holes, Reynolds numbers and suction - holes - flow ratios. The result indicates that the increase of space between holes has weak influence on surface average Nusselt numbers, but makes the Nusselt numbers distribute more uniformly and the heat transfer intensity is enhanced with the increase in inlet Reynolds numbers. With the increase of the suction - holes - flow ratio, heat transfer are declined obviously in the same position along the main flow, and the surface average Nusselt number is also declined.

**Key words:** suction hole; liquid crystal; transients; internal passage; heat transfer coefficient

### 论文保密审查

本刊为国内外公开发行人期刊,全部论文均可在互联网上查阅。因此,本刊拟发表的论文必须由论文作者所在单位出具保密审查证明后方能刊登。请作者及时办理保密审查事务,以免延误文章按时发表。