

文章编号: 1000-8055(2007)05-0704-05

液晶测温法对平板气膜冷却的实验研究

徐国强, 田 宁, 陶 智, 冼汀, 罗 翔, 邓宏武
(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: 采用热色液晶测温法, 对沿流向倾角 30° 的圆孔排平板气膜冷却进行了实验研究. 测量了绝热壁温、壁温等温度场. 研究了吹风比、孔排等因素对气膜冷却效果和换热系数的影响. 结果表明: 吹风比对气膜冷却效果的影响很大, 冷却效果随吹风比的增大而降低; 圆孔气膜冷却效果沿横向位置波动较大, 孔之间容易形成冷却死区. 利用液晶测温技术可以很好地反映气膜冷却区域及冷却效果等.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 平板气膜冷却; 吹风比; 热色液晶; 冷却效果

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental research on flat surface film cooling by TLC

XU Guo qing, TIAN Ning, TAO Zhi, DING Shu ting, LUO Xiang, DENG Hong wu

(National Key Laboratory on Aeroengines, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The performance of flat surface film cooling with 30° film cooling holes along streamwise was experimentally investigated using thermal liquid crystal. The temperature fields of adiabatic wall and conductive wall were measured. The effects of blow ratio and rows on film cooling effectiveness and heat transfer coefficient was studied. The results show that: blow ratio is a main influential factor to the film cooling effectiveness, the film cooling effectiveness decreases with the increasing of blow ratio; the film cooling effectiveness of discrete holes fluctuate dramatically across the transverse section, and dead zone is prone to occur between two discrete holes. TLC technique can be successfully applied to reflect film cooling effectual area and cooling effect.

Key words: aerospace propulsion system; film cooling; blow ratio; TLC (thermal liquid crystal); effectiveness

气膜冷却是目前广泛应用于航空发动机高温部件的一种有效的热防护技术. 早在上世纪六七十年代, 国际上就对气膜冷却进行了深入的研究. Eriksen 等人^[1] 利用热电偶测温方法对单孔和孔排三维气膜冷却的换热系数进行了研究, 结果表明在气膜孔下游, 换热系数比无气膜时显著增加; 国内葛绍岩, 刘登瀛等人^[2] 总结了以前气膜冷却方面实验和数值模拟的研究成果, 并结合他们的研究结果, 提出了不同情况下的经验公式, 为气膜

冷却的应用起到了很好的作用. 但由于他们在实验研究中采用的热电偶测温方法不能获得全场的温度信息, 所以无法获得全场的换热情况. 近年来随着液晶测温技术的发展应用, 液晶测温被越来越多地用在气膜冷却研究领域. 液晶测温技术与传统热电偶测温方法相比, 最大的优点是改点测量为面测量, 可以得到被测表面的温度场, 并且对流动不会产生影响. Nasir N, Ekkad S V 等人^[3]

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-12-05

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-05-0189), 博士点基金资助(200604114)

作者简介: 徐国强, (1964), 男, 河北承德人, 教授, 主要从事旋转换热研究.

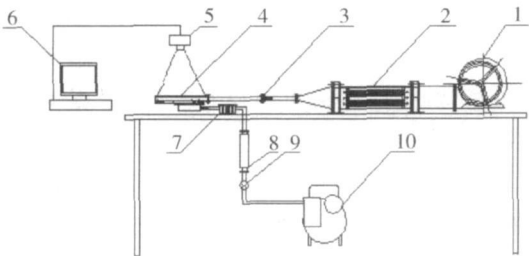
利用热色液晶测温技术研究了复合角度气膜孔的换热特性, 研究表明复合角度的气膜孔可以提高孔下游的冷却效果.

本文利用液晶测温技术, 对沿流向倾角 30° 的单排气膜孔进行了实验研究, 主要研究了吹风比、横向位置、流向位置等对气膜冷却效果和换热系数的影响, 为气膜冷却的应用提供更为详细的基础数据.

1 实验装置及测试方法

1.1 实验装置

实验是在平板气膜冷却实验台上进行的. 实验台简图如图 1 所示, 由主流风机、主流加热段、整流段、实验段、空气压缩机、二次流加热器及流量测量系统等组成. 主流风机用来提供主流气源, 使主流达到要求的雷诺数. 连接在风机之后的主流加热段, 利用 5 kW 的加热器将主流加热到 80°C . 主流在经过加热段之后通过一个收缩比 6:1 的收缩段进入整流段. 布置在整流段中的整流网栅使得主流流场更均匀. 经过整流后的主流气体进入横截面为 80 mm 宽 $\times$ 20 mm 高的实验段, 此段由上下两个腔体组成, 上腔体为主流流动通道, 下腔体为二次流通道, 中间由实验件隔开. 实验件由绝热性能较好的优质木材制成, 以降低主流和二次流温度之间的相互影响. 由空气压缩机提供的二次流冷空气经过流量调节阀门, 浮子流量计和二次流加热器进入实验段下腔体, 然后通过实验件上的气膜孔喷出对实验件表面进行冷却. 二次流在到达实验面之前流经一个电加热器被加热到 55°C , 实验段上下腔体入口处各布置了一个热电偶, 用以监测主流和二次流温度. 热电偶的测量数值通过 ADAM4018 数采模块传输到计算机中.



1 主流风机; 2 主流加热; 3. 主流整流; 4 实验段
5 数码相机; 6 电脑; 7 二次流加热; 8 浮子流量计
9 阀门; 10 二次流气源

图 1 平板气膜冷却实验台

Fig. 1 Experimental table for flat surface film cooling

实验件简图如图 2(a) 所示, 实验件前端开有一排孔数为 3 孔径为 4 mm, 沿流向倾角为 30° 的气膜孔, 孔间距为 12 mm. 气膜孔下游的实验件表面上布置有 0.03 mm 厚的不锈钢加热片, 通过大电流加热器获得均匀热流. 实验件上坐标设置如图 2(b) 所示, 本文中所有图表数据均按此坐标系给出.

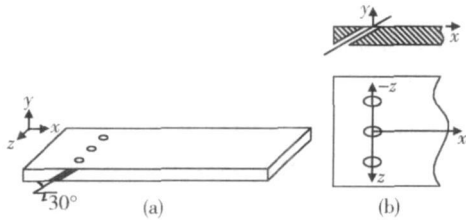


图 2 实验件
Fig. 2 Tester

1.2 测试方法

本实验中试件表面温度场测量通过液晶测温来实现. 液晶测温范围为 60°C 到 90°C . 实验件被测表面上首先被均匀喷涂了一层黑漆, 然后再将宽幅热色液晶喷涂在黑色底漆上. 实验时液晶的颜色场被布置在实验段上方的数码相机采集并传输到计算机中, 并通过对比标定得到的色度-温度曲线将颜色场转换为温度场.

主流流量由安装在整流段的笛形管测量, 笛形管测得的压差值通过压力传感器和 ADAM 4017 模块传输到计算机里, 以实现流量的实时监测. 二次流流量由浮子流量计测量.

实验在主流雷诺数为 3 600 的条件下进行. 主流雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho_g u_g d}{\mu_g} \tag{1}$$

其中 ρ_g 、 u_g 、 d 和 μ_g 分别代表主流密度、主流速度、气膜孔径和主流动力粘性系数. 主流加热到 81°C , 二次流加热到 55°C , 调节二次流流量, 分别测量吹风比为 1.52, 1.91, 2.13, 2.35, 2.53 下的主流、二次流温度值, 绝热壁温温度场和壁温温度场. 用来计算各个吹风比下的气膜冷却效果和换热系数分布. 吹风比即气膜冷却二次流与主流的密流比, 其定义为

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_g u_g} \tag{2}$$

其中 ρ_c 、 u_c 、 ρ_g 、 u_g 分别代表二次流密度、二次流速度和主流密度、主流速度. 气膜冷却效果 η 定义为:

$$\eta = \frac{t_g - t_{aw}}{t_g - t_c} \tag{3}$$

其中 t_g 、 t_{aw} 和 t_c 分别为主流气体温度、绝热壁温和二次流气体温度. 换热系数 h 定义为

$$h = \frac{q}{t_w - t_{aw}} \tag{4}$$

其中 q 、 t_w 和 t_{aw} 分别为试件表面热流密度、壁温和绝热壁温.

1.3 液晶标定

热色液晶通过标定实验获得液晶色度值与温度值的对应关系. 在实验件表面上布置标准热电偶作为标定的基准温度. 标定时加热主流气体, 通过主流气体来加热试件. 调整主流加热功率, 在 60 ℃到 90 ℃的区间内, 每隔 2~ 3 ℃采集壁面上热电偶的温度值和液晶的颜色值. 液晶色度值与温度的对应关系曲线如图 3 所示, 图中 H 为色度值.

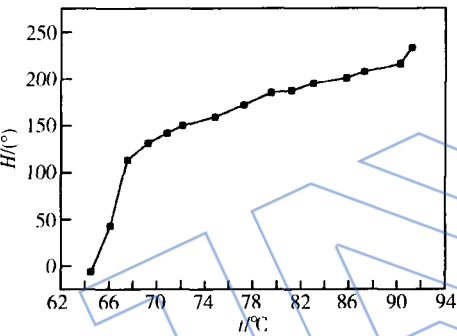


图 3 液晶标定曲线
Fig. 3 Calibrated curves of liquid crystal

2 实验结果与分析

2.1 冷却效果分布

实验得到吹风比为 1.523 时的气膜冷却效果分布云图如图 4 所示. 由图可知, 冷却气膜可以覆盖到气膜孔下游约 30 倍孔径的范围, 其中射流核心区可以达到 5~ 6 倍孔径的范围.

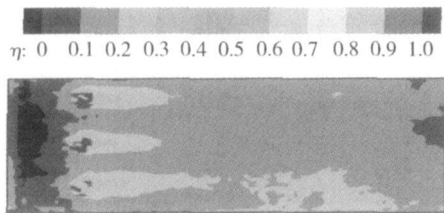


图 4 冷却效果分布云图
Fig.4 Nephogram of film cooling effectiveness distribution

图 5 给出了 $z = 0$ 处五种不同吹风比下气膜冷却效果沿 x/d 的分布. 由图可知, 冷却效果随着吹风比的增大是下降的, 吹风比越大, 冷却效果越小; 在气膜孔下游, 随着 x/d 的增大, 冷却效果先急剧下降, 再平缓回升, 然后再以较大幅度下降.

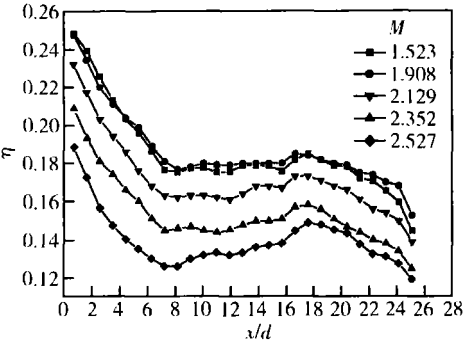


图 5 气膜冷却效果与 x/d 的关系
Fig. 5 Relationship between η and x/d

气膜孔下游 x/d 小于 8 时, 冷却效果沿着 x 方向急剧下降, 这一方面是由于沿 x 方向气流温度上升造成. 另一方面, 与缝射流不同, 气膜孔沿横向离散分布, 当吹风比 M 增大时, 二次流冷气的穿透性增强, 贴壁性变差, 导致该区域冷却效果降低. 当 x/d 在 8 与 18 之间时, 冷却效果随着 x/d 的增大而平缓上升, 这是由于在此段距离大部分脱离壁面的冷气受主流压制而重新贴壁所致. 当 x/d 大于 18 时, 冷却效果再次随着 x/d 的增大而迅速降低, 这是因为二次流沿程与主流不断掺混, 气膜的阻隔作用消失所致.

图 6 给出了不同 z/d 处的冷却效果沿 x 向的变化曲线, 图(a)、(b)、(c)分别为三个不同的吹风比下的曲线. 气膜孔之间间距为 3 倍孔径, 由于气膜孔布置的几何对称性, 取一个气膜孔下游的冷却效果进行分析, 即取 z/d 范围为 0~ 1.5.

由图可见, 冷却效果随着 x/d 的增大先减小, 再略微回升, 然后再下降; 随着 z/d 的增大冷却效果减小.

对比三幅图可见, 当 x/d 小于 8 时, 冷却效果随 z/d 增大的下降幅度在吹风比 M 为 1.908 时最大, M 为 1.523 时次之, M 为 2.527 时最小, 即随着吹风比的增大, z/d 对冷却效果的影响幅度先增大, 后减小. 因为当吹风比较小, 冷气的贴壁性较好, 孔下游冷气覆盖面积较大, 而当吹风比增大时, 冷气穿透力增强, 使得贴壁性变差, 孔下游冷气覆盖面减小. 当吹风比足够大时,

二次流冷气需要经历一个先脱离再贴壁的过程, 所以在 z/d 小于 1.0 的时候, 冷却效果几乎不会受 z/d 的影响, 见图 6(c) 在 z/d 为 0.0, 0.3, 0.5 时三条曲线基本一致.

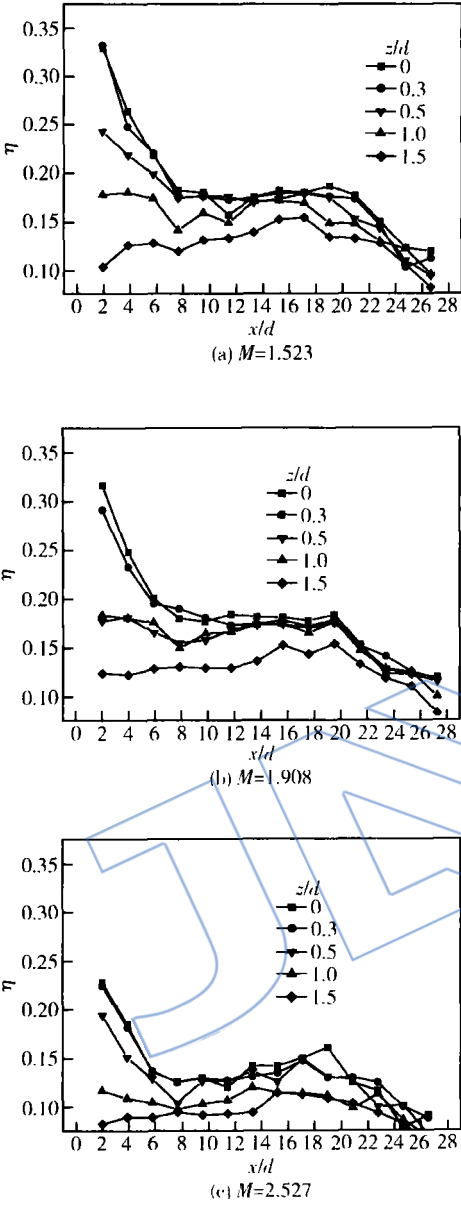


图 6 不同 M 不同 z/d 处冷却效果沿 x 向分布
Fig.6 Distribution of film cooling effectiveness along x in different z/d and different M

当 z/d 大于 1.0 时, 冷却效果明显降低, 特别是在 x/d 小于 8 的时候, 两股冷气流还没有汇合, 因此在两气膜孔之间, 容易形成冷却死区. 当 x/d 大于 8 时, 由于冷气流影响范围扩大, 两股冷气汇合, 使得此区域的冷却效果逐渐达到跟其他区域相当的水平.

图 7 给出了四种不同 x/d 处气膜冷却效果沿气膜孔两侧不同 z/d 处的实验结果. 由图可

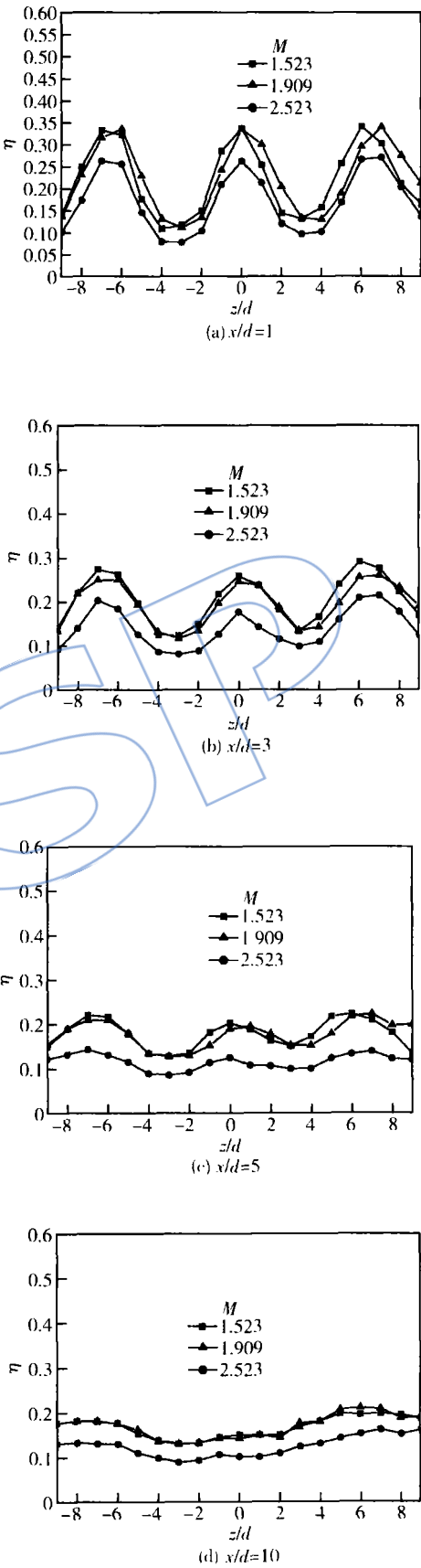


图 7 不同 z/d 处不同 M 下冷却效果沿 z 向分布
Fig.7 Distribution of film cooling effectiveness along z in different z/d and different M

知,在气膜孔下游 x/d 较小处,随着偏离气膜孔中心的距离增大,气膜冷却效果明显下降,两气膜孔之间易形成冷却死区;到孔下游足够远处(x/d 足够大时),气膜冷却效果受 z/d 的影响逐渐减弱直至消失;在本实验范围内,吹风比增大使得冷却效果整体降低.

在 x/d 较小处冷却效果随 z/d 变化剧烈,是由于在气膜孔附近,二次流处于射流核心区,影响范围较窄,只有中心线附近一小股气流可以贴壁.从射流中心线起,随着 z/d 的增加,冷气密流减少,这些因素都导致了在孔下游 x/d 较小处,冷却效果随 z/d 的增大而显著降低.而到 x/d 足够大时,二次流进入射流混合区,影响范围变宽,而且与主流广泛掺混,导致沿 z 向影响逐渐消失.

2.2 换热系数分布

不同吹风比下换热系数沿 x/d 的分布如图 8 所示.由图可见,吹风比 M 对气膜孔附近下游的换热系数影响较大,随着 x/d 的增大,吹风比的影响逐渐减弱;在 x/d 较小处,换热系数沿 x 方向下降较剧烈,在下游较远处变得平缓.

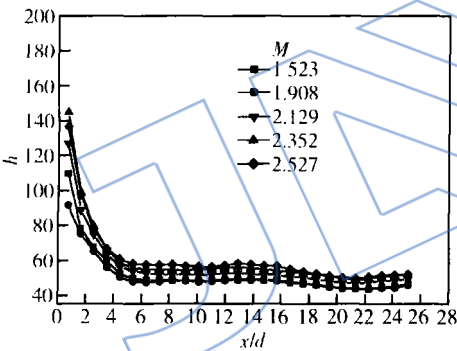


图 8 换热系数与 x/d 的关系

Fig. 8 The relationship between h and x/d

换热系数下降剧烈的区域反映的是射流核心区的流动特点,因为该区域壁面与冷气流直接换

热,随着 x/d 的增加,且气流逐渐散开,导致换热系数随 x/d 下降剧烈.在较远方下游的平缓区域,为射流混合区,在此区域是二次流与主流高温气体掺混之后和壁面换热,由于主流与二次流混合后的速度变化不大,所以使得换热系数变化较为平缓.

3 结 论

(1) 吹风比是影响气膜冷却效果的主要因素之一,在本实验范围内,随着吹风比的增大,冷却效果降低.

(2) 圆孔气膜冷却的冷却效果沿横向位置波动较大,在气膜孔附近,两孔之间未被冷气覆盖,容易形成冷却死区.

(3) 在 5 倍直径的范围内,对流换热系数随 x/d 的增大迅速减小;与 x/d 大于 5 以后,对流换热系数几乎不随 x/d 变化,且各种吹风比时的对流换热系数差别不太大.

(4) 液晶测温技术可以很好地用于气膜冷却的研究,可以直观地反映出气膜冷却的冷却区域及冷却效果等.

参考文献:

[1] Eriksen V L. Film cooling effectiveness and heat transfer with injection through holes[R]. NASA, CR-72991, 1971.

[2] 刘登瀛,葛绍岩,杨雅贤,等.气膜冷却平板换热系数的实验研究[J].工程热物理学报,1980,1(4):16-20.

LIU Dengying, GE Shaoyan, YANG Yaxian, et al. Experimental study of heat transfer coefficient of flat surface film cooling[J]. Journal of Thermal Engineering, 1980, 1(4): 16-20.

[3] Nasir H, Ekkad S V, Acharya S. Effect of compound angle injection on flat surface film cooling with large streamwise injection angle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25: 23-29.