

文章编号: 1000-8055(2007)10-1604-05

扰流柱对叶片尾缘对流换热特性的影响

宋双文^{1,2}, 胡好生^{1,2}, 杨卫华^{1,2}, 张靖周¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002)

摘 要: 为了研究扰流柱对涡轮叶片尾缘对流换热特性的影响规律, 设计了 4 种不同结构的扰流柱, 采用红外热像仪分别对不同形状和排列方式的扰流柱对叶片尾缘气膜冷却特性的影响规律进行了实验研究。研究表明, 在吹风比较低时, 水滴 I 型扰流柱叶片尾缘的对流换热特性较好; 吹风比较大时, 圆柱型扰流柱叶片尾缘的对流换热特性较好, 水滴 II 型扰流柱叶片尾缘的对流换热系数最小。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 气膜冷却; 实验研究; 扰流柱; 涡轮叶片

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influence of pin fin on the convective heat transfer characteristics of turbine blade trailing edge

SONG Shuang-wen^{1,2}, HU Hao-sheng^{1,2}, YANG Wei-hua^{1,2},
ZHANG Jing-zhou¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

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

2. China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In order to study the convective heat transfer characteristics of turbine blade trailing edge influenced by the pin fin, four kinds of pin fins were designed and the film cooling characteristics with pin fins of diverse shapes and alignments were studied by an experimental method using infrared cameras. The result shows that, when the blow ratio is low, the convective heat transfer performance of turbine blade trailing edge with water-drop-shaped pin fin I is better than others; and when the blow ratio is high, the convective heat transfer performance of turbine blade trailing edge with the column-shaped pin fin II is better, and the convective coefficient of turbine blade trailing edge with the water-drop-shaped pin fin II is the smallest. At the same position of the trailing edge, the convective coefficient increases with the increase of the blow ratio.

Key words: aerospace propulsion system; film cooling; experimental study; pin fin; turbine blade

随着航空科学技术的飞速发展, 航空发动机涡轮叶片的工作环境温度越来越高, 因此, 如何确保涡轮叶片安全可靠的工作是一个十分关键的问题。

为了对叶片进行有效的冷却, 一般在叶片内部安装有扰流柱。冷却气流流经扰流柱后, 从叶片尾缘流出, 在叶片尾缘处形成一层冷却气膜^[1-2]。目

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-08-05

作者简介: 宋双文(1966-), 男, 湖南双峰人, 中国航空动力机械研究所研究员, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机燃烧室设计与试验的研究。

前,国内外许多学者对叶片内部扰流柱的对流换热特性进行了详细的研究^[3-5],得出了扰流柱的结构、排列对叶片内部对流换热特性的影响规律.但是,对于扰流柱对叶片尾缘气膜冷却的影响规律,目前还未见报道.因此,本文设计了多种不同几何结构的扰流柱,并对不同扰流柱的几何形式对叶片尾缘气膜冷却对流换热特性影响规律进行了研究.

1 实验段和实验系统

1.1 实验段

实验设计了圆形、椭圆形、水滴形 I、水滴形 II 等 4 种不同几何形状的扰流柱,具体的几何尺寸和示意图分别见表 1 和图 1 所示.

表 1 不同扰流柱的几何结构
Table 1 Geumetry structures of pin fins

扰流柱类型	直径 (轴长)/ mm	周长/ mm	横截面 积/ mm ²
圆形	6	18.84	28.26
椭圆形	长轴 4.24 短轴 2.12	21.05	28.24
水滴形 I	—	21.7	27.99
水滴形 II	—	21.9	27.97

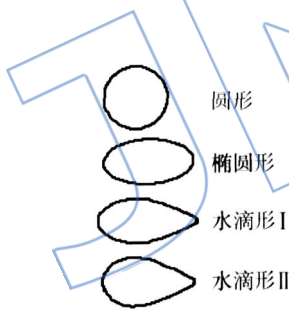


图 1 扰流柱示意图

Fig. 1 Schematic of pin fin

在涡轮叶片的尾缘位置,扰流柱的排列形式如图 2 所示.扰流柱在近似楔型的叶片尾缘排列分布,冷却空气在叶片内部流经扰流柱,然后由叶片的冷却气流出口流出,在叶片尾缘处形成气膜冷却.为了模拟涡轮叶片尾缘的气膜冷却过程,本文设计了图 3 所示的楔型通道.在楔形角 α 为 10° 的通道内布置了 5 排叉排布置的扰流柱,详细的扰流柱排列结构见表 2 所示.气膜冷却出口后部布置一加热片,冷却气流流经扰流柱后由出口流出,在加热片表面形成气膜层.

1.2 实验系统

试验系统参见文献[6],本文在此不再赘述.

表 2 实验件的具体布局
Table 2 Layouts of test piece

布置类型 叉排	横向间 距 S_x / mm	纵向间 距 S_y / mm	缝槽高 度 S / mm
类型 I	12	12	3 2
类型 II	9	12	3 2

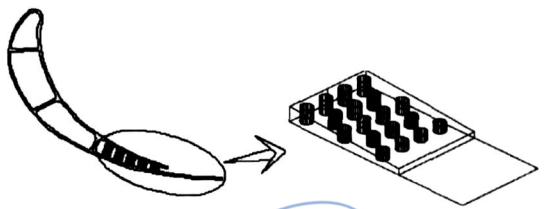


图 2 涡轮叶片尾缘扰流柱分布示意图

Fig. 2 Distribution of pin fins in turbine blade
trailing edge

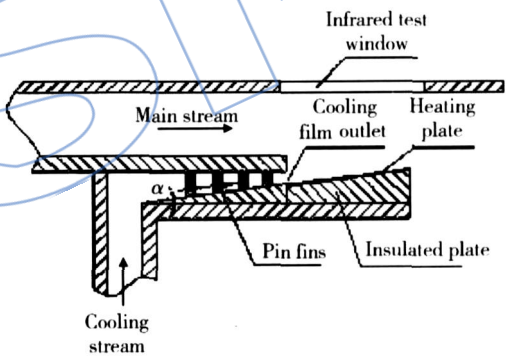


图 3 实验段示意图

Fig. 3 Schematic of test section

2 数据处理及误差分析

2.1 数据处理

对流换热系数的定义如下

$$h_t = \frac{q}{T_w - T_{aw}'} \quad (1)$$

上式中 T_w 为加热板通电时的壁温; T_{aw}' 为相同吹风比,相同位置处,加热板未通电时的壁面温度,此时加热板绝热,无热流向外流出,因此得到的温度即为绝热壁温. T_w 和 T_{aw}' 均由红外热像仪测得. q 为向实验板通电时产生的等热流密度,可由加热电流 I 和电压 U ,实验板加热膜面积 A 计算得出

$$q = UI/A \quad (2)$$

吹风比的定义如下

$$M = \frac{\rho u_c}{\rho_\infty u_\infty} \quad (3)$$

式中 ρ 和 ρ_∞ 分别为二次气流密度和主流密度; u_c 和 u_∞ 分别为二次气流速度和主流流向速度。

2.2 误差分析

误差传递公式为

$$\Delta Y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n}\right)^2 \Delta x_n^2} \quad (4)$$

式中 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别为独立变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 绝对误差。

由公式(1)和(4),根据测量仪器的精度,最后得出对流换热系数的误差范围为 $\pm 10\%$ 。

3 实验结果与分析

3.1 扰流柱形状对对流换热特性的影响

图4~图7分别示出了不同吹风比时,不同扰流柱对尾缘气膜冷却对流换热特性的影响规律。可以明显看出,当吹风比 $M \leq 1.05$ 时,在相同的叶片尾缘位置,水滴形 I 型叶片尾缘气膜冷却对流换热系数 h_t 最大,水滴形 I 型的对流换热系数最小,而椭圆和圆柱型的居于二者之间;而在吹风比 $M = 2.21$ 时,圆柱型扰流柱气膜冷却的对流换热系数最大,椭圆与水滴形 I 型的对流换热系数次之,水滴形 II 型的对流换热系数最小;在 $M = 1.63$ 时,水滴形 I 型和圆柱型扰流柱的叶片尾缘对流换热系数相差不大,而同样水滴形 II 型的换热系数 h_t 最低。造成以上诸现象的原因可能是:在低吹风比 ($M \leq 1.05$) 时,水滴形 I 型扰流柱良好的气动外形使得二次冷却气流在扰流柱与扰流柱的热交换减小,从而使得由狭缝流出的二次气流不仅均匀稳定,而且温度较低,从而使得紧贴叶片尾缘壁面的气膜层较其他扰流柱更为均匀,温度更为低,使得对流换热系数最大;而当吹风比较大 ($M = 2.21$) 时,二次气流流过圆柱型扰流柱时的扰动更小,使得其在叶片尾缘形成的气膜层温度低且稳定,从而使得对流换热系数增大,水滴形 I 型和椭圆的次之;而在吹风比 $M = 1.63$ 时,水滴形 I 型和圆柱型扰流柱对二次气流的作用相差不大,使得二者在叶片尾缘形成的气膜的温度与稳定水平相差不大,对流换热系数也没有很大的差异。而在整个吹风比范围内,水滴形 II 型的气动外形均较差,使得流过的二次气流的扰动增大,

二次气流与扰流柱的热交换增加,从而由狭缝流出的二次气流的温度不仅高,而且不稳定,在叶片尾缘不能很好地形成稳定且均匀的气膜层,使得叶片尾缘的对流换热系数减小。

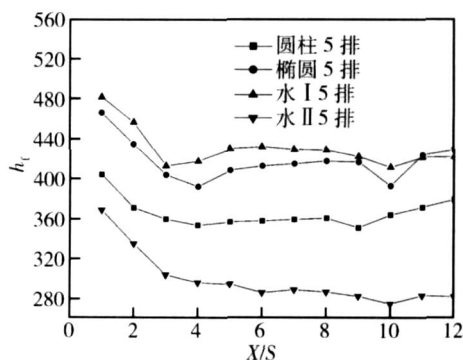


图4 扰流柱形状对换热系数的影响

($M = 0.39, S = 3 \text{ mm}$)

Fig. 4 Influence of pin fin on convective heat-transfer coefficient

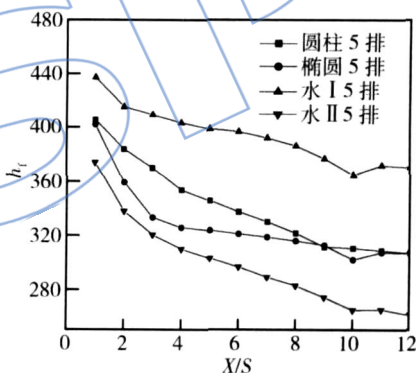


图5 扰流柱形状对换热系数的影响

($M = 1.0, S = 3 \text{ mm}$)

Fig. 5 Influence of pin fin on convective heat-transfer coefficient

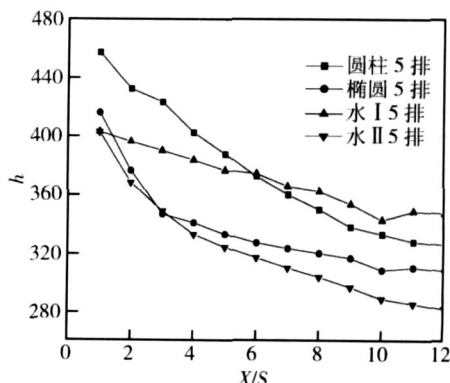


图6 扰流柱形状对换热系数的影响

($M = 1.63, S = 3 \text{ mm}$)

Fig. 6 Influence of pin fin on convective heat-transfer coefficient

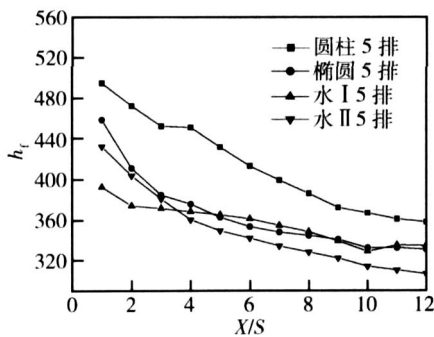


图 7 扰流柱形状对换热系数的影响

($M = 1.63, S = 3 \text{ mm}$)

Fig. 7 Influence of pin fin on convective heat-transfer coefficient

3.2 吹风比 M 对换热系数的影响

图 8~图 11 示出了不同扰流柱下吹风比 M 对叶片尾缘冷却结构对流换热系数 h_f 的影响规律。可以看出,在相同的叶片尾缘位置,对流换热系数 h_f 随吹风比 M 的增大而增大。原因是,随着吹风比的增大,冷却气流量不断增大,这样在叶片尾缘处形成的气膜层的流速增大,而且稳定,温度更加低,使得壁面温度愈来愈低,对流换热系数逐渐增大;同时还可以清楚的发现,随着叶片尾缘气膜冷却距离的增加,对流换热系数不断减小,分析原因,主要是由于在气膜冷却的起始阶段,由狭缝流出的冷却气流温度较低,从而使得壁面温度 T_w 较低,导致对流换热系数较高,随着气膜冷却距离的增大,冷却气流与主流掺混逐渐加剧,紧贴壁面的气膜层的温度也逐渐升高,壁面温度逐渐增大,使得对流换热系数逐渐减小。

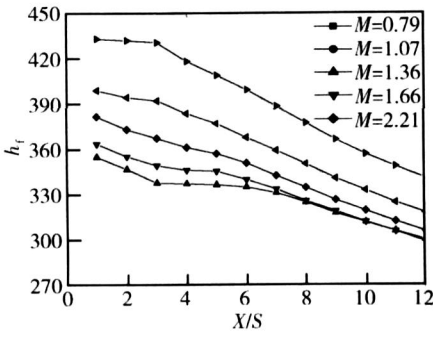


图 8 吹风比 M 对换热系数的影响

(水 I, $S = 2 \text{ mm}$, 4 排)

Fig. 8 Influence of M on convective heat-transfer coefficient

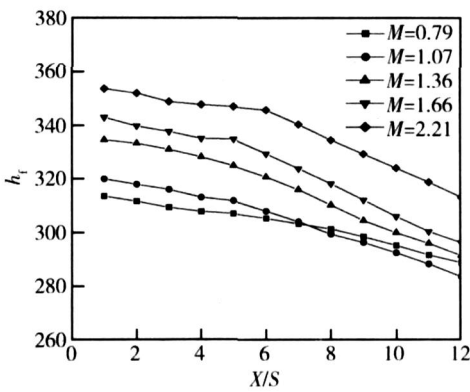


图 9 吹风比 M 对换热系数的影响

(水 II, $S = 2 \text{ mm}$, 5 排)

Fig. 9 Influence of M on convective heat-transfer coefficient

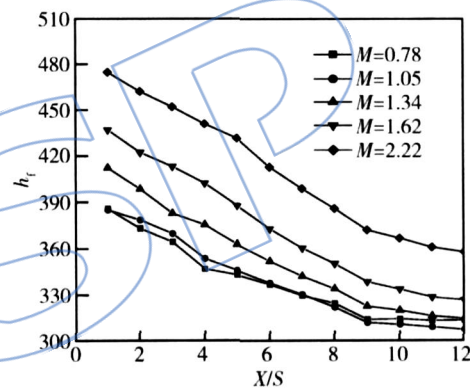


图 10 吹风比 M 对换热系数的影响

(圆柱, $S = 3 \text{ mm}$, 5 排)

Fig. 10 Influence of M on convective heat-transfer coefficient

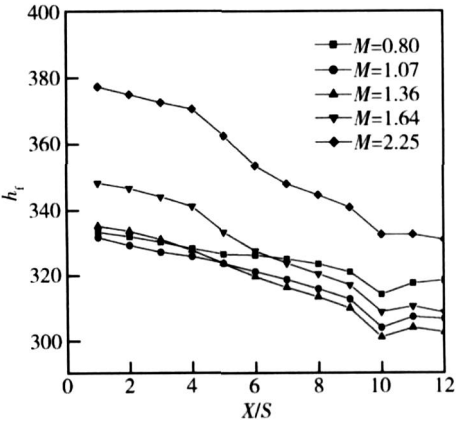


图 11 吹风比 M 对换热系数的影响

(椭圆, $S = 3 \text{ mm}$, 5 排)

Fig. 11 Influence of M on convective heat-transfer coefficient

4 结 论

通过以上对实验结果的分析,得出了如下结论:

(1) 在相同的叶片尾缘处,气膜冷却对流换热系数 h_t 随吹风比 M 的增大而增大;

(2) 在小吹风比时,水滴形 I 型扰流柱的叶片尾缘气膜冷却对流换热系数最大,椭圆型和圆柱型扰流柱的次之;在吹风比较大时,圆柱型扰流柱的叶片尾缘气膜冷却对流换热系数最大;在实验的整个吹风比范围内,水滴形 II 型扰流柱的叶片尾缘气膜冷却对流换热系数最小.

参考文献:

- [1] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [2] 林宏镇,汪火光,蒋章焰. 高性能航空发动机传热技术

[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

- [3] Chyu M K, Hsing Y C, Shih T I P, et al. Heat transfer contribution of pines and endwall in pin-fin arrays: Effects of thermal boundary condition modeling[R]. ASME 98-GT-175.
- [4] Van Fossen G J. Heat transfer coefficients for staggered arrays of short pin fins[J]. ASME Journal of Engineering for Power,1983,104(2):268-274.
- [5] Martini P, Schulz A, Bauer H J. Film cooling effectiveness and heat transfer on the trailing edge cutback of gas turbine airfoils with various internal cooling designs [J]. Transactions of the ASME, 2006,128:196-205.
- [6] 杨卫华,马国锋,张靖周. 突片作用下气膜冷却效率的实验研究[J]. 航空动力学报,2007,22(3):381-383.
YANG Weihua, MA Guofeng, ZHANG Jingzhou. The experimental study of cooling efficiency of film cooling with tab[J]. Journal of Aerospace Power, 2007,22(3):381-383.