

文章编号: 1000-8055(2003)04-0515-04

密集型气膜出流内部冷气侧换热特性 实验研究

张净玉, 常海萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 航空发动机涡轮叶片前缘大多采用密集型气膜冷却技术。针对这种复合冷却方式中密集型气膜出流的无冲击冷却内部换热特性进行了大量实验研究, 得出了气膜出流与来流密流比、来流雷诺数以及出流开孔面积比对换热特性的影响, 并在实验参数范围内整理出了换热准则关系式。其结果及准则关系式对叶片的结构设计具有直接的指导意义。

关键词: 航空、航天推进系统; 换热特性; 气膜冷却; 溢流效应; 涡轮叶片; 航空发动机

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

The Interior Heat Transfer Characteristics of Gas Turbine Blade Due to Dense Film Cooling Holes

ZHANG Jing-yun, CHANG Hairping

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

Abstract: The film cooling technique is one of the useful cooling methods. At present, the leading edge of gas turbine blade in aeroengine often utilizes dense film cooling technique. So the interior heat transfer characteristics about an inner side of blade due to dense film cooling hole have become an interesting problem. In this paper, the heat transfer characteristics have been investigated experimentally. Through lots of experimental data, the effect of flow parameters ($Re_c = 7000 \sim 15000$, $G_f/G_c = 3.2 \sim 6.4$) and geometric parameters ($A_{01} = 8.0 \sim 11.5$) on heat transfer characteristics has been studied. Besides that, the correlation equation for the interior heat transfer characteristics to the parameters is finally formulated, and the comparison shows that the correlation results are in good agreement with the experimental data.

Key words: aerospace propulsion system; film cooling; heat transfer; turbine blade; aircraft engine

1 前言

随着科学技术的不断进步, 一方面航空发动机涡轮前温度不断提升, 另一方面涡轮叶片材料又无法承受如此高温(2000 K 左右), 因而涡轮

叶片冷却技术的研究一直是航空发动机中一个至关重要的研究方向。

本文研究的密集型气膜冷却技术就是当前应用于航空发动机涡轮叶片上的一种高效冷却技术。其结构原理如图 1。冷却气流由涡轮叶片底部

收稿日期: 2002-07-28; 修订日期: 2002-10-28

作者简介: 张净玉(1973-), 女, 贵州平坝人, 南京航空航天大学能源与动力学院讲师, 硕士, 主要从事传热传质研究

进入,其中大部分由叶片前缘气膜孔排出。叶片前缘的这些气膜孔的孔间距非常小,冷却空气通过这些气膜孔不断流出,在叶片外壁形成气膜,以保护叶片表面;在叶片内部,由于冷却气流的流出,在小孔周围产生扰动,壁面边界层减薄,从而强化换热,这种强化换热的效应称为溢流效应。

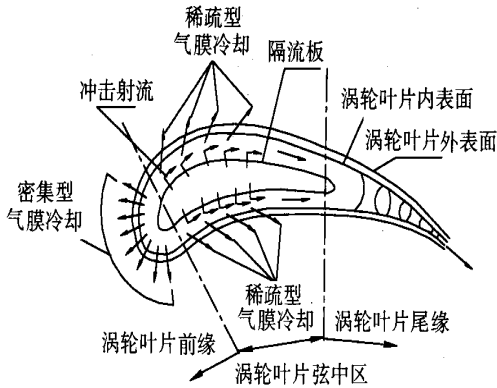


图 1 涡轮叶片内部冷却示意图

Fig 1 The scheme of blade cooling

以往研究气膜冷却的学者大多致力于研究气膜对叶片外表面(即燃气侧)的保护冷却作用,而对溢流效应引起的内表面(即冷气侧)强化换热作用的研究甚少。已发表文献显示,仅 J-R Shen^[1]就单孔气膜出流强化换热机理进行了一些基本的探讨。

通过理论分析及推导,可以得出影响其换热特性的有三个主要因素(气膜出流与冷气来流密流比、来流雷诺数以及出流开孔面积比),通过实验分别研究它们对换热特性的影响规律,并整理出准则关系式,以供设计参考。

2 实验装置及方案

实验中采用直平面模拟涡轮叶片前缘。为了便于测量气膜孔的出流量,实验中冷却气流全部由气膜孔流出,图 2 是实验模型示意图。图 3 是气膜孔板平面示意图。采用康铜膜作为发热元件,贴于气膜孔板内表面的每两排孔之间。温度的测量采用通过气膜孔板粘在康铜膜上的热电偶测量,考虑对称性及边界影响,在孔板上敷设了 8 对热电偶。另外在孔板外测也敷设了一个热电偶,以测量气膜孔板的散热损失。

通过理论分析及推导不难得出:

$$Nu = f(Re_c, G_f/G_c, A_0^{-1}) \quad (1)$$

各参数定义如下:

来流雷诺数: $Re_c = (u \cdot dc)/\nu$

(u 为来流流速, dc 为来流当量直径);
气膜出流与来流密流比:

$$G_f/G_c = (\rho u)_f / (\rho u)_c$$

(下标 f 为出流,下标 c 为来流);

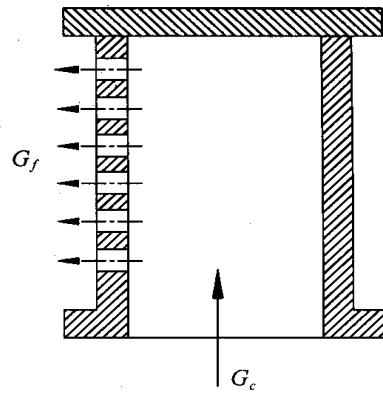


图 2 实验模型示意图

Fig 2 The scheme of experimental model

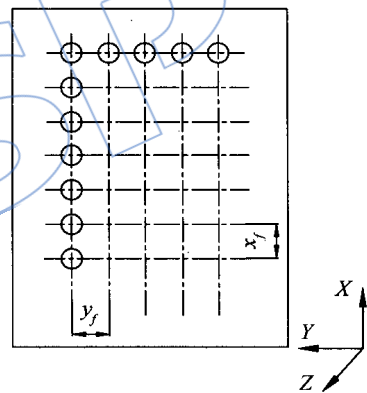


图 3 气膜孔板平面示意图

Fig 3 The scheme of film plate

出流开孔面积比: $A_0^{-1} = 4X_f Y_f / \pi$

其中: $X_f = x_f/d_f$, $Y_f = y_f/d_f$

(x_f 为气膜孔横向间距, y_f 为气膜孔纵向间距, d_f 为气膜孔径)。

根据实际涡轮叶片物理模型及实验条件,选定以下的实验参数范围: Re_c 为 7000~15000; G_f/G_c 为 3.2~6.4; A_0^{-1} 为 8~11.5。

3 实验数据处理

气膜孔板内表面的平均努塞尔数的定义:

$$Nu = \frac{(Q - Q_{bss})d}{A_i(T_w - T_f)\lambda} \quad (2)$$

式中: Q 为总加热量/W; Q_{bss} 为总散热量/W; A_i 为康铜膜换热面积/ m^2 ; λ 为空气导热系数/(W/m·s); T_w 为康铜膜上所有热电偶平均温度/K; d

为出流截面当量直径/ m ; T_f 为流体温度/ K 。

散热损失的计算:

$$Q_{\text{loss}} = \frac{\Delta T_{\text{loss}} \cdot A_s}{\delta_s / \lambda_s} \quad (3)$$

其中: ΔT_{loss} 为被测冲击靶板两面的温差/ K ; λ_s 为有机玻璃的导热系数/ $(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$; δ_s 为冲击靶板有机玻璃的厚度/ m ; A_s 为冲击靶板的表面面积/ m^2 。

来流雷诺数的定义:

$$Re_c = (G_c \cdot d) / \mu \quad (4)$$

式中: d 为出流截面当量直径/ m 。

4 实验结果与分析

实际工程应用中, 人们一般关心的是气膜孔板上的整体冷却效果, 故本文采用气膜孔板上的平均努塞尔数对换热特性进行分析和讨论。

4.1 雷诺数

图 4 是不同来流雷诺数下, 有气膜出流时冷气侧表面换热特性的变化曲线。由曲线可知, 平均换热特性随着 Re_c 增加而增加。其实增加 Re_c , 即增加了冷却流量, 冷却效果变好。

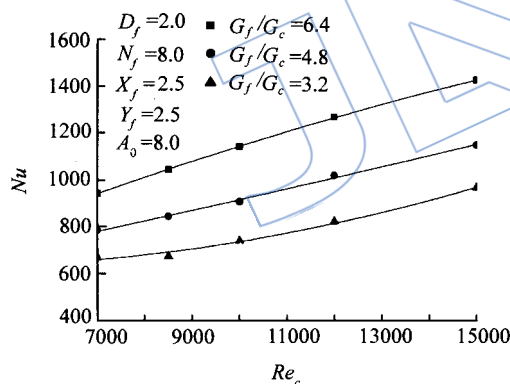


图 4 来流雷诺数对气膜出流换热的影响

Fig 4 The effect of Re_c on Nu

4.2 气膜出流与来流密流比

图 4 同时还显示, 平均换热特性随气膜出流与来流密流比 G_f/G_c 的增加而增大。实验中, 冷却气流只能从气膜孔流出, 故 $m_f = m_c$, 即 $G_f/G_c = A_c/A_f$ 。因而, 其它参数不变时, G_f/G_c 增大, 则 A_f 减小 (来流进口面积 A_c 不变), 流体出流速度增加, 扰动增强, 换热效果增强。

4.3 气膜孔板开孔面积比 A_0^{-1}

图 5 是平均努塞尔数在不同来流雷诺数下, 随开孔面积比变化的一组曲线。实验曲线非常清

楚地显示, 在任一雷诺数下, 平均努塞尔数随 A_0^{-1} 的增大而逐渐下降。实验中定义:

$$A_0^{-1} = \frac{4}{\pi} \cdot X_f \cdot Y_f = \frac{X_f \cdot Y_f}{\pi \cdot d_f^2}$$

即换热面积与开孔面积之比。另外实验中气膜孔板的单位开孔面积不变 (d_f 不变), A_0^{-1} 增大, 即单位换热面积增大, 则单位面积上的气膜出流量减少, 扰动减弱, 因此换热效果变差。

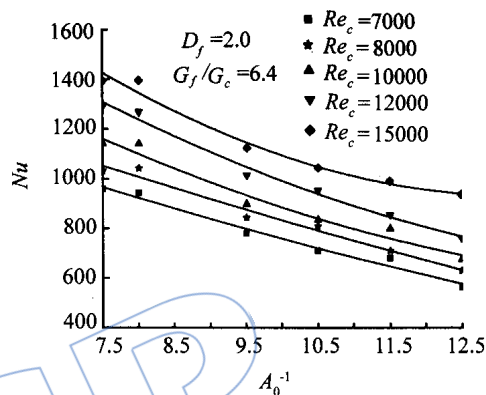


图 5 开孔面积对气膜出流换热的影响

Fig 5 The effect of A_0^{-1} on Nu

5 热准则关系式

采用最小二乘法对实验数据进行拟合, 从而在实验范围内, 整理出如下密集型气膜出流换热准则关系式:

$$Nu = 34.536 Re_c^{0.482} \left(\frac{G_f}{G_c} \right)^{0.625} (A_0^{-1})^{-1.038}$$

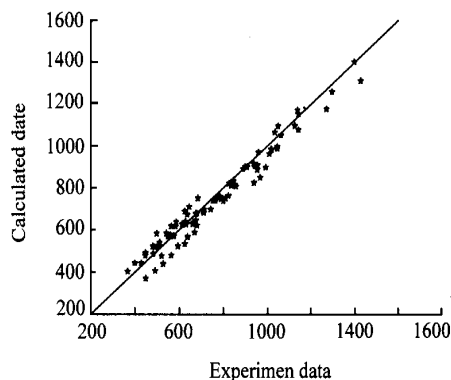


图 6 准则关系式与实验测量值误差对比

Fig 6 Deviation between correlation and experiments

图 6 为相同工况下, 实验值和所整理的准则关系式的计算值的误差分析图。图中参数基本集中在 45 附近, 通过计算得出准则关系式误差为 2.6%, 对于工程设计具有一定指导价值。

6 结 论

本文对密集型有气膜出流内部换热特性(溢流效应)进行了实验研究,通过对大量的实验数据进行分析,得出以下主要结论:

- (1) 换热特性随来流雷诺数的增加, 换热效果明显变好。
- (2) 换热特性随气膜出流与来流密流比的增加而增加。
- (3) 来流流量一定, 气膜孔板的开孔面积比增大, 换热效果显著增强。
- (4) 建立了密集型气膜出流内部换热准则关

系式, 拟合误差仅为 2.6%, 具有实际工程应用价值。

参考文献

[1] Shen J R, Ireland P T, Wang Z, et al Heat Transfer Coefficient Enhancement in a Gas Turbine Blade Cooling Passage Due to Film Cooling Holes[R]. MechE 1991: 219- 226

[2] 常海萍, 张净玉 密集型气膜出流溢流效应换热特性研究 [A] 第五届学术会议论文集[C] 南京: 南京工程热物理学会, 2000: 76- 80

[3] 常海萍, 张净玉 稀疏型气膜出流溢流效应换热特性研究 [A] 第五届学术会议论文集[C] 南京: 南京工程热物理学会, 2000: 81- 86