

等离子体气动激励改善气膜冷却效率的数值研究

何立明¹, 苏建勇², 白晓峰³, 蒋永健¹, 梁华¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军飞行试验训练基地, 河北 沧州 061000; 3. 沈阳军区空军装备部, 辽宁 沈阳 110015)

摘要:为了获得等离子体气动激励改善气膜冷却效率的机理及影响规律,采用数值模拟方法研究了等离子体气动激励电极相对位置 x/L 分别为 0.3、0.4 和 0.5 时不同吹风比下的流动过程和冷却效率的分布情况,并通过与常规气膜孔冷却结构形式进行的对比,以揭示等离子体气动激励改善气膜冷却效率的作用机理。研究表明:等离子体气动激励产生的等离子体流能诱导冷却气流偏转,使冷却气流更好地贴覆壁面,改善了气膜冷却效率;等离子体气动激励电极位置离气膜孔出口距离越近,等离子体流诱导改善气膜冷却效率的作用越好,并且随着吹风比的减小,其作用效果越明显。

关键词:等离子体激励;气膜冷却;数值计算

中图分类号: V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)03-0001-05

气膜冷却是对燃气涡轮发动机燃烧室的火焰筒壁面和涡轮叶片等高温部件进行冷却保护的重要技术。为了提高气膜冷却效率,国内外对其进行了大量的研究^[1-6],主要包括以下两个方面:①气膜孔的几何参数,比如气膜孔的喷射角度(包括侧向倾角)、孔径的大小、孔长与孔径比、孔的间距、孔排数、孔的排列方式、孔的出口形状等;②气膜孔的气动参数,如主流速度、吹风比、射流与主流的密度比、主流湍流度、气膜孔前边界层发展情况、压力梯度等。

等离子体流动控制通过等离子体激励控制物体绕流边界层的流动,从而改变边界层的能量、结构和特性,起到气流定向移动的作用^[7-9]。通过在气膜孔出口处设置等离子体电极,利用激励所生成的等离子体流激励诱导冷却气膜更加贴近壁面,使冷却气膜覆盖壁面的效果更好,冷却效率更高。

1 等离子体气动激励的物理模型

1.1 等离子体流动控制改善气膜冷却效率的基本原理

图1为典型的介质阻挡表面放电等离子体气动激励器的布局形式。高压高频电源连接图中的电极,通电后等离子体激励器表面附近的空气在强电场的作用下被电离,离子在电场作用下,沿梯度方向做定向运动,并与周围的空气分子碰撞,诱导激励器表面的空气发生定向运动。在气膜孔出口位置设置电极(见图2),冷却气流流出气膜孔后,在等离子体流的激励诱导作用下,向壁面方向偏转,使冷却气膜能更好地覆盖壁面,从而提高了气膜冷却效率。带等离子体气动激励的气膜冷却结构其不足之处在于:在空气电离产生等离子体的过程中有少量的热量生成,导致在电极附近温度会有一个小波动,但是由于其热量较少,对气膜冷却效果的影响不大,所以带等离子体气动激励的气

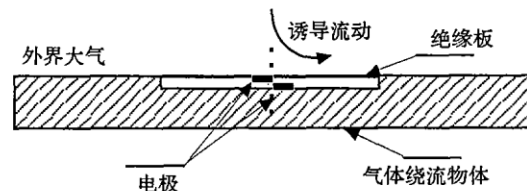


图1 一种典型的等离子体激励器布局形式

Fig. 1 One typical plasma actuator layout form

膜冷却效率。带等离子体气动激励的气膜冷却结构其不足之处在于:在空气电离产生等离子体的过程中有少量的热量生成,导致在电极附近温度会有一个小波动,但是由于其热量较少,对气膜冷却效果的影响不大,所以带等离子体气动激励的气

收稿日期:2008-01-25

作者简介:何立明(1959-),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,主要从事飞机推进系统气动热力理论与工程、燃烧室冷却技术和脉冲爆震发动机研究. E-mail: heliming369@163.com

膜冷却结构能较大地改善气膜冷却效率。

1.2 等离子体体力模型

等离子体体力由电子、离子与中性气体分子的碰撞引起,在忽略中性气体的速度时有:由电子和离子产生的作用于中性气体的等离子体体力可以表示成:

$$f_i = n_i m_i v_{im} u_i \quad f_e = n_e m_e v_{em} u_e \quad (1)$$

式中: n_i 、 n_e 为离子、电子数密度; m_i 、 m_e 为离子、电子质量; v_{im} 、 v_{em} 为离子-中性气体、电子-中性气体碰撞动量转换频率; u_i 、 u_e 为离子、电子的平均速度, E 为电场强度。

引入带电粒子迁移率 $\mu = e/m_e v_{em}$ 有

$$f = j_i/\mu_i - j_e/\mu_e \quad (2)$$

式中: j_i 、 j_e 为离子、电子电流密度。

碰撞等离子体中的电流密度由迁移-扩散方程决定:

$$j_i = en_i \mu_i E - eD_i \nabla n_i \quad j_e = en_e \mu_e E + eD_e \nabla n_e \quad (3)$$

式中: E 为电场强度, D_i 、 D_e 是带电粒子的扩散系数。

联立方程(2)和(3),利用扩散系数的爱因斯坦关系,可以得到单位体积力:

$$f = e(n_i - n_e)E - kT_i \nabla n_i - kT_e \nabla n_e \quad (4)$$

式中: k 为流体传热系数, T_i 、 T_e 是带电粒子温度。

1.3 等离子体源项的仿真模型

等离子体的宏观作用可等效为热量(Thermal Energy, E_T)和动量(Momentum Energy, E_M),其中动量又分为 X 方向的动量(X -Momentum, M_X)和 Y 方向的动量(Y -Momentum, M_Y),有

$$E_T \% + E_M \% = 1 \quad (5) \quad E_{M_X} \% + E_{M_Y} \% = 1 \quad (6)$$

采用有限体积法离散计算区域,利用 1.2 中模型得到的体力场分布函数 Cell_Weight(W_c),并进行归一化处理,得到单个计算网格的坐标信息,再根据坐标和归一化的体力分布函数,求出每个网格单元处热量项和动量项,然后通过相关变换将热量和动量项转化成源项的形式,最后与 Navier-Stokes 方程耦合求解。

热量源项(Thermal_Source, S_T , 单位: W/m^3)为

$$S_T = \frac{1}{V_c} W_c E_T \% \times P_T \quad (7)$$

式中: P_T 为 Total_Power; V_c 为 Cell_Volume 是网格的单元体积。

以 X 方向的动量项为例(Y 方向的类似)来确定动量源项。

在 Δt 的时间内加入 X 方向的动能为

$$\Delta W = W_c E_M \% \times M_X \% \times P_T \Delta t \quad (8)$$

设定网格流体初始速度为 V_1 ,末速度为 V_2 ,则由动能守恒,有: $mV_1^2/2 + \Delta W = mV_2^2/2$ 。 $m = \rho V_c$ 是网格内流体的质量, ρ 是流体密度。

由上可得: $V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2\Delta W/m}$ 。故流体所受的力为 $F = ma = m(V_2 - V_1)/\Delta t$ 。 X 方向的动量源项 S_{T_X} 为

$$S_{T_X} = F/V_c \quad (9)$$

将 ΔW 、 V_2 、 m 代入式(9),可得:

$$S_{T_X} = \rho [((V_1^2 + 2(W_c E_M \% \times M_X \% \times P_T) \Delta T) / \rho W_c)^{1/2} - V_1] / \Delta t \quad (10)$$

同理可得 Y 方向的动量源项为

$$S_{M_Y} = \rho [((V_1^2 + 2(W_c E_M \% \times M_Y \% \times P_T) \Delta T) / \rho W_c)^{1/2} - V_1] / \Delta t \quad (11)$$

动量项的单位为 N/m^3 。

1.4 热量和动量源项与流场的耦合求解

将热量源项加入能量守恒方程则能量方程可写为

$$\partial(\rho t) / \partial t + \text{div}(\rho ut) = \text{div}(k \text{grad } T / c_p) + S_T \quad (12)$$

式中: c_p 为定压比热容, T 为温度将动量源项加入动量守恒方程。

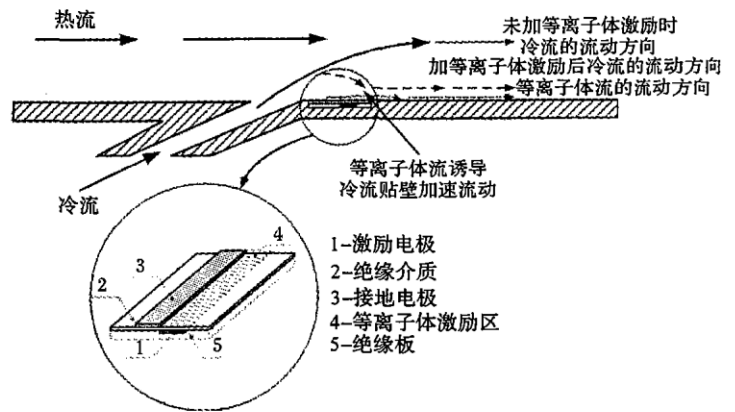


图2 等离子体气动激励改善气膜冷却效率的结构示意图
Fig.2 Schematic of plasma actuation improving film cooling

X方向的动量守恒方程:

$$\partial(\rho u)/\partial t + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{grad } au) - \partial p/\partial x + S_{M_x} \quad (13)$$

Y方向的动量守恒方程:

$$\partial(\rho v)/\partial t + \text{div}(\rho v v) = \text{div}(\mu \text{grad } av) - \partial p/\partial y + S_{M_y} \quad (14)$$

求解带源项的动量、能量守恒方程和质量守恒方程即可得出施加等离子体气动激励对冷却气流流动的影响。气膜冷却效率的定义式为

$$\eta = (T_g - T_{aw}) / (T_g - T_c) \quad (15)$$

式中: T_g 为燃气(主流)温度; T_{aw} 为绝热壁温; T_c 为冷气(次流)温度。

2 计算结果与分析

设电极的位置为坐标的原点,则由1.2节等离子体体力模型得到的等离子体体力分布函数为

$$\begin{cases} 163 \exp(-5|x| - 5|y|) & -0.0135 \text{ m} \leq x < -0.0045 \text{ m} \\ 3200 \times 10^{-275|x| - 275|y|} & -0.0045 \text{ m} \leq x < -0.004 \text{ m} \\ 100 \times 10^{-240|x| - 500|y|} & -0.004 \text{ m} < x \leq 0.0165 \text{ m}, -0.001 \text{ m} \leq y \leq 0.005 \text{ m} \end{cases}$$

采用CFD软件求解Navier-Stokes方程,通过C++编程实现1.3节中对热量项和动量项的处理。计算的等离子体激励器长 L 为0.32 m,电极厚度忽略不计,激励的位置位于气膜孔出口下游,依据其离气膜孔出口距离远近分别为激励电极位置坐标占总激励器长的30%、40%和50%处(分别对应 $x = 0.095 \text{ m}, 0.128 \text{ m}, 0.16 \text{ m}$)的气动激励对气膜冷却效果的影响进行了数值仿真计算,计算网格为5万个左右,如图3所示。主流入口为速度入口,其值为5 m/s,次流入口速度值根据吹风比 $M = 0.5, 1.0, 1.5$ 和 2.0 分别设置为2.5 m/s, 5 m/s, 7.5 m/s 和 10 m/s,次流入口方向与主流夹角为 35° 。激励强度根据等离子体实际情况设置为:热能占97.8%,动量占2.2%,X方向的动量占90%,Y方向的动量占10%。

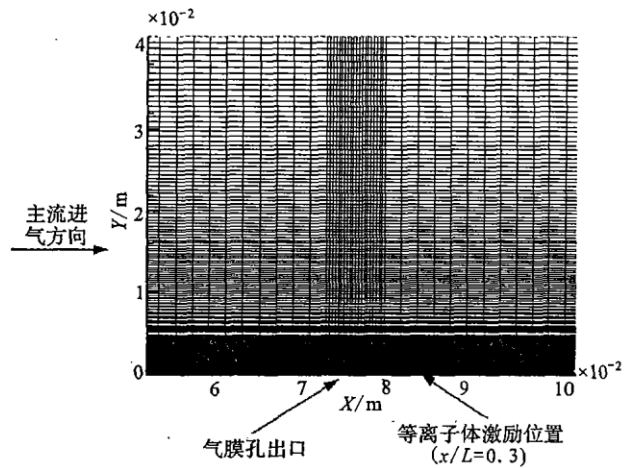


图3 计算网格

Fig. 3 Grid geometry for computation

2.1 等离子体激励各源项的分布

图4、图5、图6分别表示等离子体激励电极位置坐标位于总激励器长度的30%(即 $x/L = 0.3$)时,X、Y方向的动量源项分布图和热量源项分布图。由图可见,各源项的分布情况以及数值大小基本符合等离子体气动激励的物理特性,并与实验结果类似。

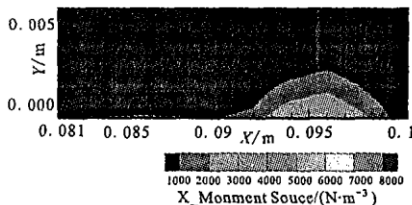


图4 X方向的动量源项分布图
Fig. 4 Contour of momentum source terms in X direction

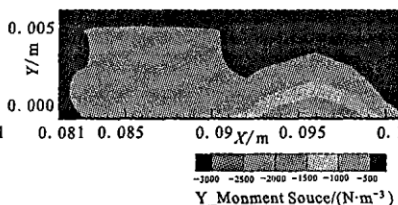


图5 Y方向的动量源项分布图
Fig. 5 Contour of momentum source terms in Y direction

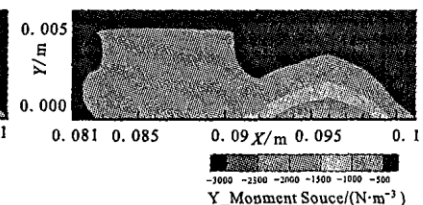


图6 热量源项分布图
Fig. 6 Contour of thermal energy source terms

2.2 等离子体激励对气膜冷却效率的影响

图7、图8、图9、图10分别为不同吹风比下,不同等离子体激励电极位置对气膜孔出口下游绝热壁面冷却效率分布的影响情况比较图。由图可见:①不同吹风比下,带等离子体气动激励的气膜冷却结构的冷却效率均优于常规气膜冷却结构,并且随着等离子体激励电极位置离气膜孔出口距离增大,冷却效率相对降低。这是因为电极离气膜孔出口位置越近,越多的较低温度的冷却气流会在等离子体激励诱导下发生偏转,并且

发生偏转的相对角度越大,冷却气膜覆盖壁面的效果越好,冷却效率越高。②在电极附近,冷却效率发生较小的突降,随后又上升并沿气流流动方向平稳下降。这是因为在空气电离产生等离子体时,有一部分能量转化为热量,降低了该部分的冷却效率,随后由于后面大量冷却气流将热量带走,冷却效率又有所上升,并且电离时产生的热量较少,对整个气膜冷却效果影响不大,仅产生局部温升及局部冷却效率下降。③随着吹风比的增大,功率一定的等离子体气动激励器改善气膜冷却效率的作用相对下降。这是因为冷却气流速度较高时,功率一定的等离子体气动激励器产生的等离子体流速度一定,其对冷却气流的诱导偏转作用相对减弱,气膜冷却效率的改善作用也相对降低。

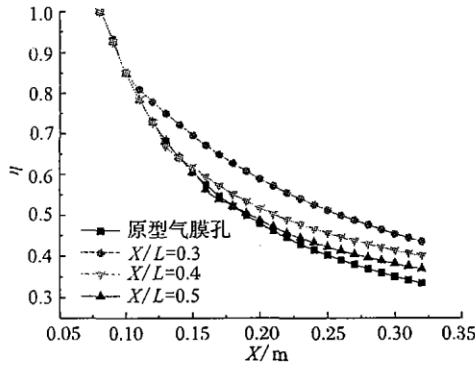


图7 不同等离子体激励电极位置对气膜孔出口下游绝热壁面冷却效率分布的影响($M = 0.5$)

Fig. 7 Effect of various placements of plasma actuation pole on film cooling effectiveness downstream ($M = 0.5$)

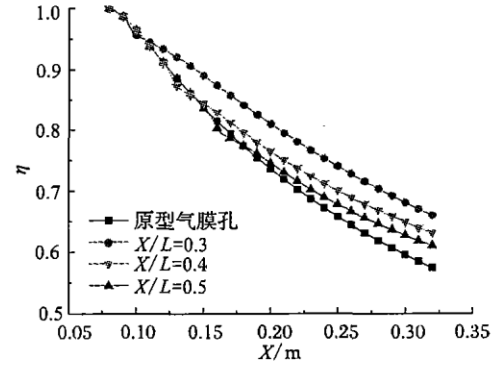


图8 不同等离子体激励电极位置对气膜孔出口下游绝热壁面冷却效率分布的影响($M = 1.0$)

Fig. 8 Effect of various placements of plasma actuation pole on film cooling effectiveness downstream ($M = 1.0$)

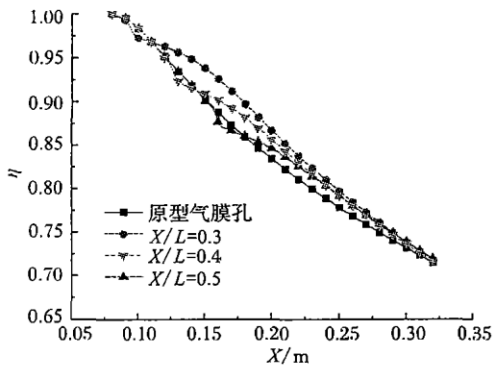


图9 不同等离子体激励电极位置对气膜孔出口下游绝热壁面冷却效率分布的影响($M = 1.5$)

Fig. 9 Effect of various placements of plasma actuation pole on film cooling effectiveness downstream ($M = 1.5$)

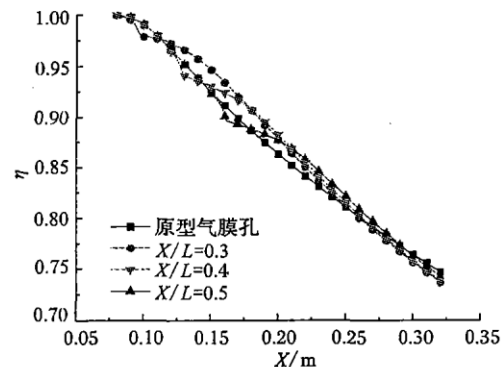


图10 不同等离子体激励电极位置对气膜孔出口下游绝热壁面冷却效率分布的影响($M = 2.0$)

Fig. 10 Effect of various placements of plasma actuation pole on film cooling effectiveness downstream ($M = 2.0$)

3 结论

本文将等离子体气动激励流动控制技术引入到气膜冷却中,将等离子体气动激励电极置于气膜孔出口下游,并将等离子体气动激励的作用,以热量项和动量项形式引入 NS 方程,对等离子体气动激励改善气膜冷却效率的作用进行了数值仿真研究,得出如下结论:

- 1) 等离子体气动激励产生的等离子体流能诱导冷却气流偏转,使冷却气流能更好地贴覆被冷却壁面,明显改善了气膜冷却效率;
- 2) 等离子体气动激励电极位置离气膜孔出口距离越近,等离子体流诱导改善气膜冷却效率的作用越好,并且随着吹风比的减少,其作用越明显;
- 3) 在电极附近,冷却效率出现较小的波谷,但对整个气膜冷却效果改善作用影响不大。

参考文献:

- [1] 蒋永健,何立明,于锦禄.上游斜坡对气膜孔换热特性影响的数值研究[J].中国电机工程学报,2008,28(5):69-73.
JIANG Yongjian, HE Liming, YU Jinlu. Numerical Investigation on Heat Transfer of Film Cooling with an Upstream Ramp[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 69-73. (in Chinese)
- [2] Lu Yiping, Hasan Nasir, Srinath V Ekkad. Film Cooling From a Row of Holes Embedded in Transverse Slots[R]. GT-2005-68598.
- [3] 李少华,宋东辉,刘建红,等.不同孔型平板气膜冷却的数值模拟[J].中国电机工程学报,2006,26(17):112-116.
LI Shaohua, SONG Donghui, LIU Jianhong, et al. Numerical Simulation of Flat Plate Film Cooling Using Respectively Different Shaped Jet Holes[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 112-116. (in Chinese)
- [4] Lu Yiping, Srinath V Ekkad. Predictions of Film Cooling From Cylindrical Holes Embedded in Trenches[R]. AIAA 2006-3401.
- [5] Nasir H, Acharya S, Ekkad S. Improved film Cooling From Cylindrical Angled Holes With Triangular Tabs: Effect of Tab Orientations [J]. International Journal of Heat and Fluid, 2003, 24: 657-668.
- [6] 李永康,张靖周,姚玉.利用三角形突片改善气膜冷却效率的数值研究[J].航空动力学报,2006,21(1):83-87.
LI Yongkang, ZHANG Jingzhou, YAO Yu. Numerical Investigation on Improvement of Film Cooling Effectiveness Using Delta-shaped Tabs[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 83-87. (in Chinese)
- [7] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration Using Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma[J]. Physics of Plasmas, 2004, 10(5): 2116-2126.
- [8] 李应红,吴云,宋慧敏,等.大气压等离子体流动控制实验[J].空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(3):1-3.
LI Yinghong, WU Yun, SONG Huimin, et al. Experiments of Atmospheric Plasma Actuation Flow Control[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(3): 1-3. (in Chinese)
- [9] 魏泮亭,宋慧敏,李应红,等.等离子体激励控制圆柱绕流的影响因素分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(3):1-3.
WEI Fengting, SONG Huimin, LI Yinghong, et al. Effects Analysis of Plasma Actuation Controlling Column flow[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(3): 1-3. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)

Numerical Investigation on Improvement of Film Cooling Efficiency with the plasma actuation

HE Li-ming¹, SU Jian-yong², BAI Xiao-feng³, JIANG Yong-jian¹, LIANG Hua¹

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force Flight Test Training Base, Cangzhou 061000 Hebei China; 3. SHENYANG Military Area Air Force Equipment Department, Shen'yang 110015, China)

Abstract: To investigate the influence of plasma actuation on film cooling efficiency, a numerical study of the distributions of the flow fields and cooling efficiency is employed with different placement of plasma actuation pole in several ratios. And their distributions are compared with the distributions of baseline holes to reveal the good effects of the plasma actuation on the film cooling performance. The results show that the plasma actuation can attract the cooling flow to form better coverage on the hot side, thus improving the film cooling efficiency. The improvement of the film cooling efficiency is significant at lower blowing ratio with shorter distance between the plasma actuation pole and the outlet of film hole.

Key words: plasma actuation; film cooling; numerical computation