

# 等离子体气动激励对二维气膜冷却效果影响的机理

何立明<sup>1</sup>, 赵子晨<sup>1</sup>, 肖阳<sup>1</sup>, 代胜吉<sup>1</sup>, 蒋永健<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038; 2. 陆军航空兵研究所, 北京, 101121)

**摘要** 为了研究等离子体气动激励对二维气膜冷却效果的影响规律, 基于等离子体气动激励唯象学模型, 将等离子体气动激励对冷却气流的宏观作用等效为体积力, 通过耦合求解体积力与 Navier-Stokes 方程, 得到了气膜冷却的流场和温度场特性。计算结果表明: 气膜缝出口壁面附近冷流经过等离子体气动激励作用后, 速度水平分量提高较大, 垂直分量提高较小; 随着吹风比的增大, 气膜缝出口冷流的流量和动量增加, 气膜冷却效率增加, 但等离子体气动激励对冷却气流的影响减弱, 气膜冷却效率增加量减小。施加等离子体气动激励后, 在各吹风比下, 随着气膜缝倾角的增加, 气膜冷却效率逐渐降低; 等离子体气动激励等效体积力大小对气膜冷却效果有较大影响, 气膜冷却效率随体积力的增大先升高后降低, 存在一个最佳等效体积力值。

**关键词** 二维气膜冷却; 等离子体气动激励; 唯象学模型; 体积力; 吹风比; 气膜缝倾角

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.05.001

**中图分类号** V231.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)05-0001-07

## A Mechanism Study of an Effect of Plasma Aerodynamic Actuation on 2D Film Cooling Effectiveness

HE Liming<sup>1</sup>, ZHAO Zichen<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>, DAI Shengji<sup>1</sup>, JIANG Yongjian<sup>2</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. General Staff Army Aviation Institute, Beijing 101121, China)

**Abstract:** Based on the phenomenology model of plasma aerodynamic actuation, a macroscopic effect of plasma aerodynamic actuation on fluid is equivalent to body force vector. Mechanism analysis of the effect rule of plasma aerodynamic actuation on 2D film cooling is studied by coupled solution of body force with Navier-Stokes equation. The results show that after the cool flow is subject to the plasma aerodynamic actuation near the wall at the exit of film slot, the horizontal velocity component increases greatly while the vertical velocity component gains a little. When the blow ratio increases, the momentum and flux of cool flow and the film cooling effectiveness increase, while the influence of plasma aerodynamic actuation on cooling flow and the increment of film cooling effectiveness decrease. Under the plasma aerodynamic actua-

**收稿日期:** 2016-01-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51276196)

**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、新型燃烧室冷却技术和等离子体点火助燃技术研究。E-mail: heliming369@163.com

**引用格式:** 何立明, 赵子晨, 肖阳, 等. 等离子体气动激励对二维气膜冷却效果的影响机理[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(5): 1-7. HE Liming, ZHAO Zichen, XIAO Yang, et al. A Mechanism Study of an Effect of Plasma Aerodynamic Actuation on 2D Film Cooling Effectiveness[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(5): 1-7.

tion, the film cooling effectiveness decreases when film slot inclination angle increases at each blow ratio. Plasma aerodynamic actuation body force has large impact on film cooling effectiveness, the film cooling effectiveness increases and then decreases with the increase of magnitude of body force, there exists an optimal body force magnitude.

**Key words:** 2D film cooling; plasma aerodynamic actuation; phenomenology model; body force; blow ratio; film slot inclination angle

为了有效保护燃烧室和涡轮等高温部件<sup>[1]</sup>,需要在燃烧室内壁和涡轮叶片中进行冷却。目前冷却方式主要有内部对流换热、冲击冷却、气膜冷却<sup>[2]</sup>等,其中气膜冷却方式需要利用大量的冷却气体附着在被保护部件的表面<sup>[3]</sup>。然而若发动机中大量冷却气体用于热端部件冷却,会使发动机的性能降低。为了解决这个矛盾,国内外针对冷却气体流量一定的情况下如何提高冷却壁面的冷却效率的问题展开了大量研究工作。目前主要包括3个方面:①气膜孔/缝的几何参数<sup>[4-6]</sup>,如孔/缝的倾斜角、长径比/长宽比、孔径/缝宽、排列形式、几何形状等;②气流-射流的气动参数<sup>[7-8]</sup>,如气流雷诺数、吹风比、密度比、湍流度等;③气膜孔/缝前、中、后的各种流场调节形式<sup>[9-11]</sup>,如上游设置斜坡、出口处设置凸片或横向槽、下游设置凸台等。

等离子体流动控制技术体积小、重量轻、响应快且可调<sup>[12]</sup>,广泛应用于控制平板附面层流动,减小压气机、翼型的失速分离,扩大压气机的稳定性等。Wang C-C等<sup>[13]</sup>将等离子体气动激励应用在三维气膜圆孔出口处,得到了较好的冷却效果。Yu Jin-lu等<sup>[14]</sup>将等离子体气动激励应用在二维气膜缝出口下游,发现等离子体气动激励可以改善气膜冷却效果,但关于等离子体气动激励对二维斜缝气膜冷却效果影响的规律和机理分析不完善。

本文采用表面介质阻挡放电(SDBD)等离子体激励方式,基于等离子体气动激励唯象学模型,通过耦合求解体积力和 Navier-Stokes 方程,得到了气膜冷却模型的流场、温度场特性,总结了吹风比、气膜缝倾角和等效体积力大小等3种因素对气膜冷却效果的影响规律。

## 1 计算模型及参数设定

### 1.1 气膜冷却计算模型

#### 1.1.1 几何结构和网格

图1为二维气膜冷却计算域示意图,主要由主流通道、射流通道和供气腔3部分组成。主流通道为热流,供气腔和射流通道为冷流,冷流通过倾角为

$\alpha$ 的斜缝射入主流通道,冷流覆盖在壁面上,起到保护壁面的作用。主流计算域长度为 $144D$ ,高度为 $32D$ ,供气腔计算域长度为 $70D$ ,高度为 $32D$ ,射流通道出口前缘距主流通道入口为 $20D$ ,射流通道入口前缘距供气腔进口为 $10D$ , $D$ 为斜缝的宽度。计算模型的网格为结构化网格,网格数约为 $5 \times 10^4$ 。在主流通道下壁面,供气腔上下壁面和气膜缝边界上加密网格设置了边界层,主流通道下壁面粘性底层 $y^+ \approx 1$ ,达到使用增强壁面处理方法的要求。

#### 1.1.2 边界条件和参数设定

主流通道采用速度入口和压力出口条件,供气腔采用速度入口条件。主流通道上壁面采用滑移壁面处理,其他壁面均采用无滑移绝热壁面处理方式。流体的比热、导热系数、粘性系数等参数为温度的四次多项式函数<sup>[15]</sup>。主流通道入口气流速度设定为 $10 \text{ m/s}$ ,温度为 $600 \text{ K}$ ;通过改变冷却气流出口速度来调节吹风比,冷流温度为 $300 \text{ K}$ 。主流和冷却气流掺混后由主流通道出口流出。吹风比定义为 $M = \rho_c v_c / \rho_\infty v_\infty$ ,其中 $\rho_c$ 和 $\rho_\infty$ 分别为冷却气流和主流的密度, $v_c$ 和 $v_\infty$ 分别为冷却气流和主流的速度。定义气膜冷却效率 $\eta = (T_\infty - T_{aw}) / (T_\infty - T_c)$ ,其中 $T_\infty$ , $T_c$ 分别表示主流和冷却气流的入口温度, $T_{aw}$ 表示绝热壁温。

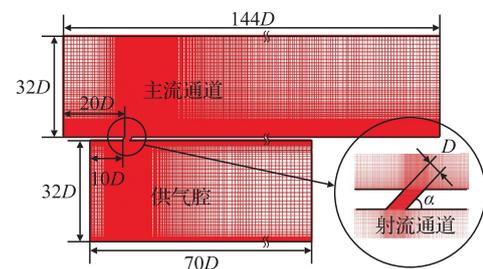


图1 二维气膜冷却计算域

Fig.1 2D film cooling computational domain

#### 1.1.3 湍流模型和计算方法

为准确计算二维气膜冷却效率,本文计算时采用了2D、稳态、不可压的 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型增强型壁面函数。使用增强壁面处理时要求粘性底层 $y^+ \approx 1$ 。数值仿真中控制方程的离散采用有限体积法,压力-速度耦合采用 Simplec 算法,各参数离散

采用二阶精度迎风格式,各项解的收敛精度相对残差均小于  $1 \times 10^{-6}$ 。

### 1.2 SDBD 唯象学计算模型

利用 SDBD 激励器实现流动控制是等离子体流动控制领域的一种重要应用途径。暴露电极和掩埋电极分布在绝缘介质两侧并与高压高频电源相连,掩埋电极表面附近的气体在强电场作用下被击穿,形成弱电离的低温等离子体。等离子体中的离子在电场力作用下,与电场中较大的粒子等碰撞产生动量交换,进而向边界层输入能量,最终诱导激励器表面附近的气体作加速运动<sup>[16]</sup>。

从唯象学角度看,等离子体气动激励的作用效果可以由作用于流体的局部体积力的效果来近似模拟。Shyy<sup>[17]</sup>等人提出不对称的电极分布、放电结构会诱导气流流动并给出了唯象学意义上的三角形体积力分布模型。本文采用该模型进行计算,模拟介质阻挡放电激励器对气流流动的影响。

三角形区域建立时均体积力分布规律为:

$$F_{avg} = \rho_{ch} e_{ch} \nu \Delta t E \delta \quad (1)$$

式中: $\rho_{ch}$  为电荷密度, $e_{ch}$  为电荷常数, $\nu$  为电源频率, $\Delta t$  激励电源电压的半周期, $E$  为空间内用场分布。 $\delta$  取值为 1 或 0,当  $\delta = 1$  时,表示在三角形区域内存在体积力;当  $\delta = 0$  时,表示在三角形区域外没有体积力。

本文中可将等效体积力分布区域设置在气膜斜缝出口后缘,用来研究等离子体气动激励对气膜冷却效果的影响。在求解体积力对气膜缝出口流场的影响中,将体积力分布  $F_{avg} = (F_{avgx}, F_{avgy})$  作为动量源项添加到二维不可压 Navier-Stokes 方程中,流场计算的控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p - \tau_{xx})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{xy})}{\partial y} = F_{avgx} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{xy})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 + p - \tau_{yy})}{\partial y} = F_{avgy} \quad (4)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(u(e - p) - \tau_{xx}u - \tau_{xy}v - k\partial_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v(e + p) - \tau_{xy}u - \tau_{yy}v - k\partial_y T)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

式中: $F_{avgx} = |F_{avg}| = \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}$ ;  $F_{avgy} = |F_{avg}| = \frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}$ 。

### 1.3 模型验证

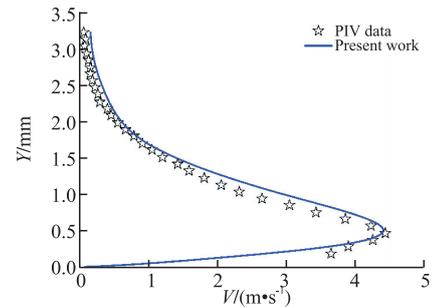
为了验证 SDBD 唯象学计算模型和气膜冷却

计算模型,本文分别选取文献[18]的 PIV 实验结果和文献[19~20]的实验仿真结果作为验证基准。气膜冷却计算模型的参数按照文献[19]实验数据进行设置,见表 1。

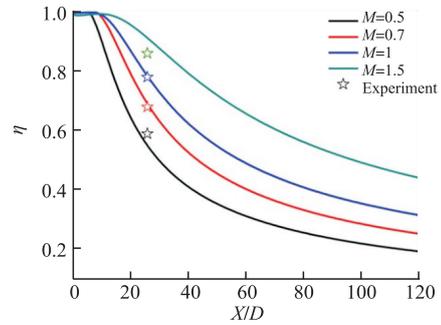
表 1 文献[19]的实验数据  
Tab.1 Experimental data of literature [19]

$\alpha / (^\circ)$	$T_\infty / K$	$T_c / K$	$M$
45	833	294~555	0.5, 0.7, 1.0, 1.5
90	833	294~555	0.5

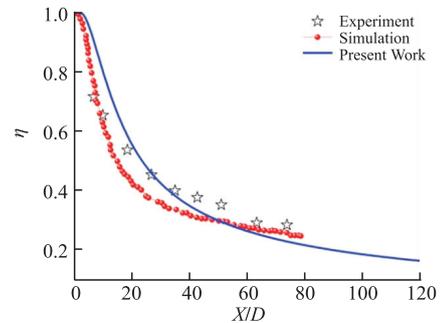
图 2(a)是 SDBD 计算模型的仿真结果与文献[18]的实验结果的对比如,可以发现计算得到的等离子体气动激励诱导的近壁面气流运动速度分布与 PIV 测得的气流速度分布吻合较好。气膜冷却计算结果与文献[19]实验结果和文献[20]的仿真结果对比见图 2(b)、(c)。发现在不同吹风比和气膜缝倾角下,计算结果和实验结果误差很小,说明该湍流模型和计算方法可行,可信度较高。



(a) 近壁面气流速度分布



(b)  $\alpha=45^\circ$ 时冷却效率分布



(c)  $\alpha=90^\circ, M=0.5$ 时冷却效率分布

图 2 计算和实验结果对比

Fig.2 Comparison between calculation result and experimental result

## 2 结果与分析

### 2.1 等离子体气动激励对气膜冷却效果影响的机理分析

为了研究等离子体气动激励对气膜冷却效果的影响,本节固定气膜缝倾角  $\alpha = 45^\circ$ 、吹风比  $M = 0.5$ 、施加的等离子体气动激励等效体积力、 $F_{\max} = 9.10 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 。图 3(a)、(b)是施加等离子体气动激励前后,在  $X/D = 1.0, 2.0, 4.0$  和  $7.0$  等 4 个位置处气流速度水平分量和竖直分量分布图。在壁面附近,施加等离子体气动激励使得速度水平分量有较大提高,随着  $X/D$  的增大,速度水平分量增加量逐渐减小;施加等离子体气动激励使得气流速度竖直分量有小幅增加。这是由于等离子体气动激励作用在壁面附近且靠近气膜缝出口处,等离子体激励器使通过激励作用范围内的气流水平向右、竖直向下加速,当冷却气流接触壁面后,气流向右、向上运动。等离子体激励器对于作用范围以外较远区域的流体影响较小,如图 3(a)、(b)所示,施加等离子体气动激励前后  $Y/D > 0.5$  的区域速度水平分量基本不变,速度竖直分量变化很小;施加等离子体气动激励前后  $X/D = 7$  的速度水平分量、竖直分量变化很小。

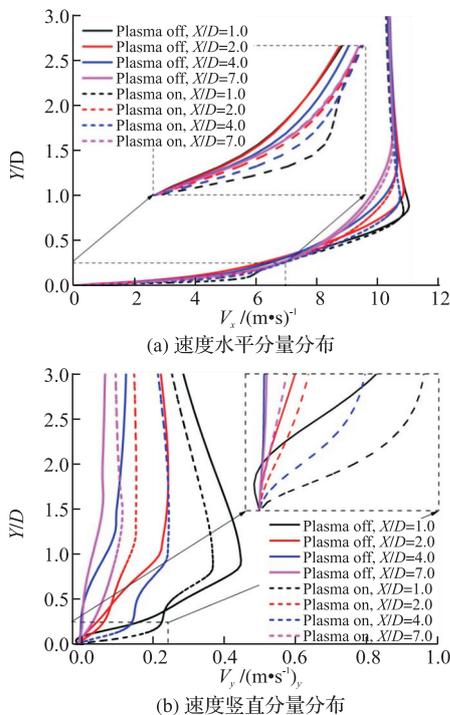


图 3 施加等离子体激励前后速度分布

Fig.3 Velocity distribution with and without plasma aerodynamic actuation

施加等离子体气动激励前后流线和温度分布见图 4。施加等离子体气动激励前,冷流在气膜缝出

口处脱离壁面,在缝口处形成低压区,进而产生回流;施加等离子体气动激励后,回流区基本消失,冷流竖直向下、水平向后加速流动,同时紧贴壁面。由图 4(a)、图 4(b)对比可以发现,施加等离子体气动激励后冷流在壁面覆盖的距离更长,壁面的冷却效果更好。

图 5 是吹风比为 0.5、1.0 和 1.5 时,施加等离子体气动激励前后气膜冷却效率流向分布图。由图 5 可知,施加等离子体气动激励后,气膜冷却效率明显提高,这是因为施加等离子体气动激励使近壁面气膜缝出口的回流区得到消除,冷却气流速度水平分量增加较大,冷流加速向下游流动;由图 3 分析可知,施加等离子体气动激励后,速度竖直分量的增加量相对于水平分量的增加量很小,与施加等离子体气动激励前相比,施加激励后的气流速度趋于水平,冷、热流掺混程度减小、换热减弱,因此可以降低壁面温度,提高冷却效率。随着吹风比的增大,冷流的流量和动量增加,气膜变厚、速度水平分量增大,壁面冷却效率提高<sup>[21]</sup>。但气膜冷却效率增加量随吹风比的增大而逐渐减小,这是因为吹风比增大时,等离子体气动激励对冷却气流的影响减弱,使冷流的速度水平分量增加量减小,气膜冷却效率增加量减小。

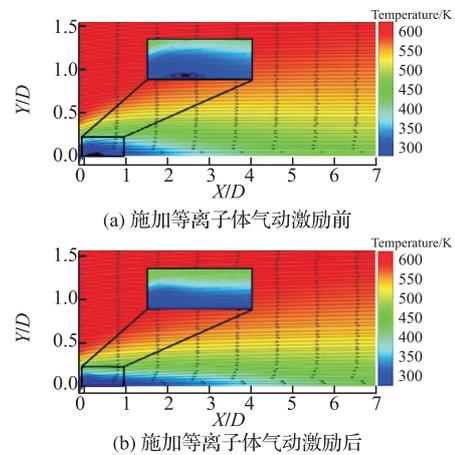


图 4 不同体积力下流线和温度分布

Fig.4 Streamline and temperature distribution

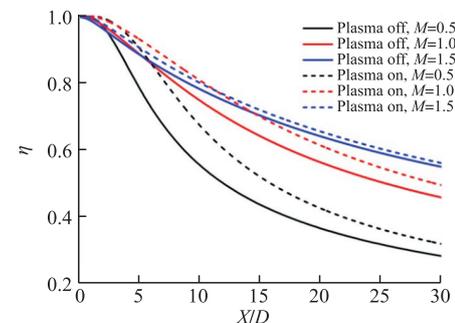


图 5 不同吹风比下气膜冷却效率分布沿流向分布

Fig.5 Film cooling effectiveness distribution along flow direction at different blow ratio

### 2.2 气膜缝倾角对气膜冷却效果影响

图 6 是吹风比  $M = 0.5$ 、气膜缝倾角  $\alpha = 30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  时,在  $X/D = 1.0$  处施加等效体积力  $F_{max} = 9.10 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  的等离子体气动激励前后的速度分布图。由图可知,施加等离子体气动激励前后,壁面附近冷却气流速度水平分量和垂直分量都随气膜缝倾角的增大逐渐减小。这是由于气膜缝倾角越大,冷却气流的速度水平分量越小、回流区越大。施加等离子体气动激励后,壁面附近冷流的速度水平分量和垂直分量与施加激励前相比有所增加,使回流区基本消失。

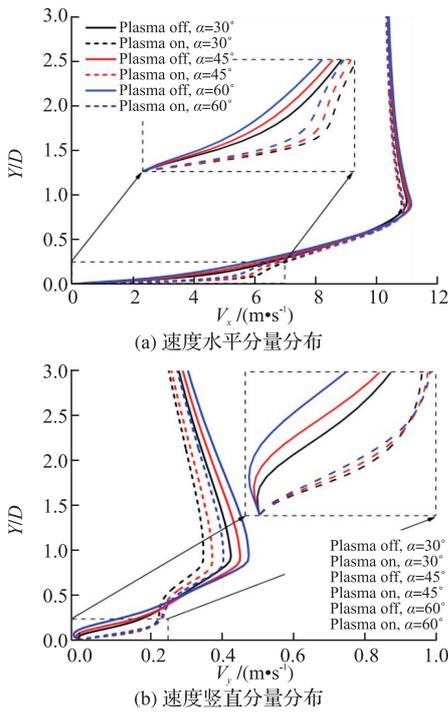


图 6 不同气膜缝倾角下速度分布

Fig.6 Velocity distribution at different film slot inclination angle

图 7 是 3 种气膜缝倾角  $\alpha$  下改变吹风比时沿程平均气膜冷却效率对比图。由图可知,施加等离子体气动激励时,在各吹风比下,随着气膜缝倾角  $\alpha$  的增大,气膜冷却效率逐渐降低。这是由于气膜缝倾角越大,冷流越易脱离壁面,在壁面附近形成回流区越大,冷、热流掺混、换热越强,使得气膜冷却效率越低。还可以发现,当吹风比较小 ( $M = 0.5$ ) 时,各气膜缝倾角下气膜冷却效率差别较小,这是因为气膜缝出流动量较低,不同气膜缝倾角下气膜缝出流都能够较好的贴壁,等离子体气动激励对气膜缝出流的影响基本相同;当吹风比较大 ( $M = 1.5$ ) 时,不同气膜缝倾角下气膜冷却效率差别不大,一方面由于气膜缝出流流量较大,当气膜缝倾角改变时,冷流对壁面的保护作用始终较好,另一方面由于气膜缝出流动量较大,不同气膜缝倾角下气膜缝出流穿透力强,而等离子体气动激励作用区域为气膜缝出口近

壁面附近,因此对气膜缝出流的影响较弱。

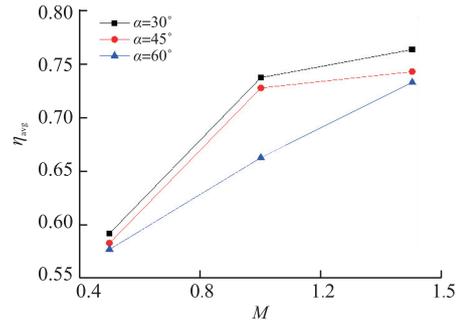


图 7 不同气膜缝倾角下平均气膜冷却效率分布

Fig.7 Average film cooling effectiveness distribution at different film slot inclination angle

### 2.3 等离子体气动激励等效体积力对气膜冷却效果的影响

图 8 是吹风比  $M = 0.5$ 、气膜缝倾角  $\alpha = 45^\circ$  时,  $F_1 = 2.27 \text{ kN/m}^2$ 、 $F_2 = 9.10 \text{ kN/m}^2$ 、 $F_3 = 54.6 \text{ kN/m}^2$ 、 $F_4 = 182 \text{ kN/m}^2$  等 4 种大小等离子体气动激励作用下距气膜缝出口下沿  $0.25D$  和  $0.75D$  处, 竖直方向为  $0 \sim 0.25D$  的观测线处气流速度竖直分量的比较图。可以发现当等离子体气动激励等效体积力  $F < F_2$  时,速度竖直分量逐渐减小,这是因为等效体积力对气流有下拉作用;当等离子体气动激励等效体积力  $F > F_3$  时,速度竖直分量逐渐增大,这是因为气流受到较大等效体积力作用,获得较大动量迅速向壁面运动,随后远离壁面运动。

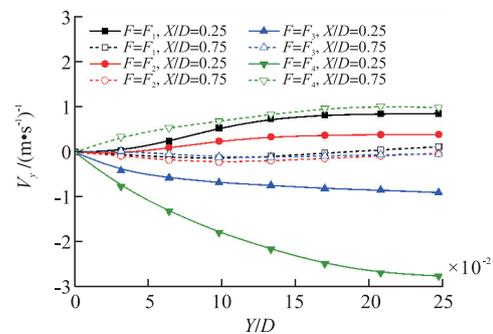


图 8 不同体积力下速度竖直分量

Fig.8 Vertical velocity component at different body force

图 9 是上述 4 种大小等离子体气动激励作用下气膜缝附近的流线和温度的分布。对比图 9(a)、(b)可见,当体积力增大时,气膜缝出口近壁面处冷流在等离子体气动激励的作用下,速度水平分量增大,速度竖直分量减小,速度方向由斜上方变为水平方向,使得冷、热气流换热减弱。随着体积力继续增大(图 9(c)、(d)),气膜缝出口近壁面处冷流速度水平分量继续增大,速度竖直分量反向逐渐增大,气膜缝出口附近冷流速度逐渐偏离水平方向,向斜下方运动,导致冷、热流的换热加强。

不同吹风比下,各等离子体气动激励作用下沿

程平均气膜冷却效率分布见图 10。吹风比越小,效率随体积力变化率越大,等离子体气动激励对气膜冷却效率影响程度越大。在各吹风比下,随着体积力的增加,气膜冷却效率先增大后减小。这是因为随着等离子体气动激励作用增强,壁面附近冷却气流速度水平分量逐渐增加,始终加速向下游运动;气膜缝出口附近冷流速度垂直分量先减小再反向增大,使得冷、热流换热先减弱后加强。在本文计算条件下,最佳等效体积力为  $9.10 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 。

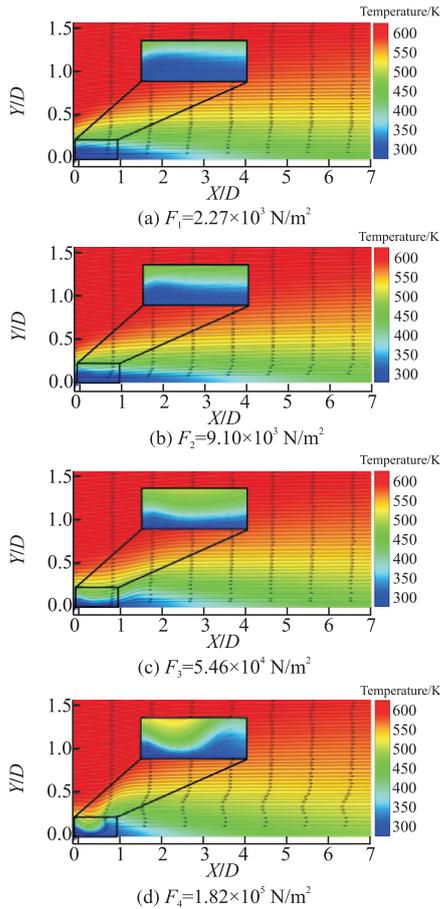


图 9 不同体积力下流线和温度分布

Fig.9 Streamline and temperature distribution at different body force

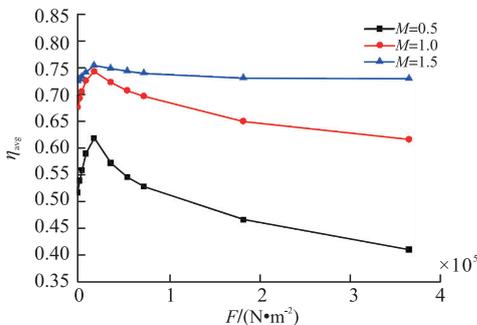


图 10 不同吹风比下改变体积力平均气膜冷却效率分布

Fig.10 The variation trend of average film cooling effectiveness distribution along with body force at different blow ratio

### 3 结论

本文利用 CFD 方法对等离子体气动激励作用下的二维气膜冷却模型进行了数值研究。采用唯象学方法将等离子体气动激励的作用简化为线性分布形式的动量源项,将其添加到 N-S 方程中耦合求解,计算在不同吹风比、气膜缝倾角和等效体积力大小等 3 种因素的影响下的二维气膜冷却速度场、温度场特性。结果表明:

1) 与未施加等离子体气动激励相比,施加等离子体气动激励后,气膜缝出口壁面附近冷流速度水平分量有较大提高,垂直分量有小幅提高;随着 X/D 的增大,壁面附近冷流速度水平分量和垂直分量增加量逐渐减小;

2) 随着吹风比的增大,冷流的流量和动量增加,等离子体气动激励对冷却气流的影响减弱,使冷流的速度水平分量增加量减小,从而气膜冷却效率增加量减小;

3) 施加等离子体气动激励后,气膜缝倾角越大,壁面附近冷却气流速度水平分量和垂直分量逐渐减小,气膜冷却效率越低;

4) 等离子体气动激励等效体积力大小对气膜冷却效果有较大影响,气膜冷却效率随体积力的增大先升高后降低,存在一个最佳等效体积力值。

### 参考文献(References):

[1] 葛绍岩,刘登瀛,徐靖中,等.气膜冷却[M].北京:科学出版社,1985.  
GE Shaoyan, LIU Dengying, XU Jingzhong, et al. Film Cooling [M], Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)

[2] YUSOP N M, ALI A H, ABDULLAH M Z. Computational Study of a New Scheme for a Film-Cooling Hole on Convex Surface of Turbine Blades[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 43:90-99.

[3] ZHANG Ling, WEN Guoliang. Large Eddy Simulation on Field of Film Cooling with Different Shaped Jet Holes[J]. Energy Procedia, 2011, 13:9411-9417.

[4] KALGHATGI P, ACHARYA S. Model Analysis of Inclined Film Cooling Jet Flow[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136, 081007.

[5] 王春娟,董若凌,施红辉,等.不同孔型平板气膜冷却特性的数值模拟[J].浙江理工大学学报,2012,29(2):225-229.  
WANG Chunjuan, DONG Ruoling, SHI Honghui, et al. Numerical Simulation of Flat Plate Film Cooling

- Field Using Different Shape Holes [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2012, 29(2): 225-229. (in Chinese)
- [6] 姜伟, 谢诞梅, 高尚, 等. 倾角孔对叶片前缘冷却效率影响的数值研究[J]. 推进技术, 2015, 36(7): 1062-1068.
- JIANG Wei, XIE Danmei, GAO Shang, et al. Numerical Study of Influence of Inclined Hole on Film-Cooling Effectiveness at Leading Edge of a Turbine Blade [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(7): 1062-1068. (in Chinese)
- [7] LIGRANI P M, BELL C M. Film Cooling Subject to Bulk Flow Pulsation: Effects of Density Ratio, Hole Length-to-Diameter Ratio, and Pulsation Frequency [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 2005-2009.
- [8] RAJAPPAN R, MAHALAKSHMI N V. Computational Study of Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling Using Two Different Models [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2011, 11(2): 96-104.
- [9] YANG C F, ZHANG J Z. Experimental Investigation on Film Cooling Characteristics From a Row of Holes with Ridge-Shaped Tabs [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 37: 113-120.
- [10] ABDALA A M M, ELWEKEEL F N M. An Influence of Novel Upstream Steps on Film Cooling Performance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 86-96.
- [11] LAWSON S A, THOLE K A. Simulation of Multi-phase Particle Deposition on Endwall Film-Cooling Holes in Transverse Trenches [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134: 051040.
- [12] NG J H, LI J, CUI Y D, et al. Active Flow Control on a Circular Cylinder via Streamwise oriented Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators [R]. AIAA 2013-0349.
- [13] WANG C C, ROY S. Electrodynamic Enhancement of Film Cooling of Turbine Blades [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104: 073305.
- [14] YU JinLu, HE Liming, ZHU Yifei, et al. Numerical Simulation of The Effect of Plasma Aerodynamic Actuation on Improving Film Hole Cooling Performance [J]. Heat Mass Transfer, 2013, 49: 897-906.
- [15] SINGH K, PREMACHANDRAN B, RAVI M R. A Numerical Study on the 2D Film Cooling of A Flat Surface [J]. Numerical Heat Transfer, 2015, Part A, 67: 673-695.
- [16] FONT G I, JUNG S, ENLOE C L, et al. Simulation of the Effects of Force and Heat Produced by a Plasma Actuator on Neutral Flow Evolution [R]. AIAA 2006-167.
- [17] SHYY W, JAYARAMAN B, ANDERSSON B A. Modeling of Glow Discharge-Induced Fluid Dynamics [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(11): 6434-6443.
- [18] MADEN I, MADUTA R, KRIEGSEIS J, et al. Experiment and Computational Study of the Flow Induced by a Plasma Actuator [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 41: 80-89.
- [19] PAPELL S S. Effect on Gaseous Film Cooling of Coolant Injection through Angled Slot and Normal Holes [R]. NASA TN-D-299.
- [20] SARKAR S, BOSE T K. Numerical Simulation of a 2-D Jet-Cross Flow Interaction Related to Film Cooling Applications: Effects of Blowing Rate, Injection Angle and Free-Stream Turbulence [J]. Sadhana, 1995(20): 915-935.
- [21] 代胜吉, 何立明, 丁未, 等. 利用等离子体气动激励提高气膜冷却效果的数值研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5234-5239.
- DAI Shengji, HE Liming, DING Wei, et al. Numerical Simulation of Improving Film Cooling Effectiveness by Plasma Aerodynamic Actuation [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5234-5239. (in Chinese)

(编辑:徐敏)