文章编号:1001-2060(2025)06-0011-12

电极构型对等离子体激励改善气膜冷却特性 影响的数值模拟研究

张华磊1,赵子晨2,崔连柱1,李 赫3

(1. 空军航空大学, 吉林 长春 130012; 2.94106 部队, 陕西 西安 710000; 3.93427 部队, 北京 102206)

摘 要:为优化等离子体气动激励器电极构型布局形式,在保持激励强度不变(电压为16 kV,频率为14 kHz)的情况下,采用数值模拟的方法,对比分析了吹风比为0.4,0.7,1.0和1.3 时直条形、波浪形和直角形3 种电极构型激励器对平板气膜冷却特性的影响。研究结果表明:在裸露电极和掩埋电极交界线的垂直截面上,3 种电极构型等离子体激励器产生的电势和电动体积力分布类似;在诱导静止空气流动方面,直条形电极构型激励器仅具有流向诱导能力,流场展向方向上不存在对涡结构,直角形和波浪形电极构型激励器具有流向和展向诱导能力,其中直角形电极构型激励器流场展向方向上涡对的涡核间距小、涡结构尺寸大;与典型气膜冷却流场相比,直条形电极仅对肾形涡对起到流向方向的下洗诱导作用,提高气膜冷却效果最差,其他两种类型电极均对气膜冷却流场展向两侧形成逆反向旋转涡对起到诱导作用,抑制了肾形涡对的发展,改善气膜冷却效果显著;提高冷却效率方面,3 种电极构型等离子体激励器下气膜冷却效率提高百分比均随着吹风比的增大而降低,吹风比为0.4 时直条形、波浪形和直角形电极构型面平均气膜冷却效率分别提高了5.52%,42.56%和92.47%。

关键 词:等离子体气动激励;气膜冷却效率;电极构型;吹风比;体积力

中图分类号:V231.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.002

[引用本文格式]张华磊,赵子晨,崔连柱,等. 电极构型对等离子体激励改善气膜冷却特性影响的数值模拟研究[J]. 热能动力工程,2025,40(6):11-22. ZHANG Hualei, ZHAO Zichen, CUI Lianzhu, et al. Numerical simulation study on the influence of plasma aerodynamic actuator electrode configuration on improved film cooling characteristics [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025,40(6):11-22.

Numerical Simulation Study on the Influence of Plasma Aerodynamic Actuator Electrode Configuration on Improved Film Cooling Characteristics

ZHANG Hualei¹, ZHAO Zichen², CUI Lianzhu¹, LI He³

(1. Aviation University of Air Force, Changchun, China, Post Code: 130012; 2.94106 Army, Xi'an, China, Post Code: 710000;3.93427 Army, Beijing, China, Post Code: 102206)

Abstract: To optimize the electrode configuration of the plasma aerodynamic actuator, by keeping the exicition intensity unchanged (voltage of 16 kV and frequency of 14 kHz), the numerical simulation method was used to compare and analyze the effects of three kinds of stripe, wave, and rectangular-shaped actuator electrode configurations on the plate film cooling characteristics at blowing ratios of 0.4, 0.7, 1.0 and 1.3. The results indicate that on the vertical interface at the boundary line of bare electrode and buried electrode, the distributions of electrical potential and electrohydrodynamic volume forces generated by three electrode configurations of plasma aerodynamic actuator exhibit similarities. However, in terms of quiescent air flow field, the stripe-shaped actuator solely induces flow, without generating any

收稿日期:2024-10-31; 修订日期:2025-01-13

基金项目:吉林省教育厅项目(JJKH20201209KJ)

pair vortex structures in the spanwise direction of the flow field. In contrast, both the rectangular-shaped and wave-shaped actuators are capable of inducing flow in both the streamwise and spanwise directions. Significantly, the rectangular-shaped actuator forms a vortex pair structure characterized by smaller core spacing and larger size in the spanwise direction of the flow field. Compared with the typical film cooling flow field, the stripe-shaped actuator only exerts a downstream induction effect on the kidney-shaped vortex pair in the streamwise direction, resulting in the worst improvement in the film cooling effect. The other two types of electrodes induce the formation of anti-counter rotating vortex pairs on both sides of the spanwise film cooling flow field, which suppresses the development of kidney-shaped vortex pairs and significantly enhances the film cooling effect. For improving the cooling effectiveness, the percentage of film cooling effectiveness enhancement with three electrode configurations of plasma actuator decreases with the increase of blowing ratios. At a blowing ratio of 0.4, the average film cooling effectiveness are increased by 5.52%, 42.56% and 92.47% when stripe, wave and rectangular-shaped electrode configurations are employed, respectively.

Key words: plasma aerodynamic actuation, film cooling effectiveness, electrode configuration, blowing ratio, volume force

引 言

开展高效冷却技术研究是延长航空发动机使用 寿命、提高涡轮前燃气温度、增大发动机推力及提高 其工作可靠性的重要技术途径之一^[1]。等离子体 主动流动控制技术通过等离子体气动激励控制物体 绕流边界层内的流动,从而改变边界层的能量、结构 和特性,起到流动控制的作用。等离子体流动控制 技术已在激波控制、翼型减阻、压气机扩稳增效等方 面得到了广泛研究,表现出潜在的广泛应用前景,也 为提高发动机热端部件的气膜冷却技术提供了新思 路、新方法^[2-3]。

Roy 等人^[4]提出了利用等离子体流动控制提高 燃气涡轮叶片气膜冷却效果的方法。目前,等离子 体流动控制提高气膜冷却效果的相关研究中,放电 形式主要采用正弦波激励的介质阻挡放电。等离子 体气动激励模型主要包括基于电场线性化的等离子 体激励模型^[5]和基于静电场方程组的电动激励力 模型^[6]。在此基础上,研究人员开展了不同激励条 件下等离子体气动激励对气膜冷却效果影响的数值 模拟^[7-9]和实验研究工作^[10-12]。作用机制上,Dai 等人^[8]研究发现,激励器的流向和展向动量注入效 应产生的逆反向旋转涡对结构,抑制了肾形涡对的 发展,使得气膜的贴壁效果增强,进而提高了冷却效 果。因此,某种程度上看等离子体气动激励属于一

种主动涡发生器。

不同的等离子体激励器构型会使得激励器产生 的空间电势、带电粒子分布等差别较大,进而影响等 效电动体积力分布,相应地,激励器的诱导流场特性 也会有较大区别。史志伟等人[13]测量了3种结构 介质阻挡激励器的诱导速度场,结果表明3种电极 都产生了壁面射流,H型和O型激励器射流速度受 两侧电极间距和电极直径影响较大,随着 L 型激励 器电极夹角的增大,射流从法向射流向平面射流转 化。张兴等人^[14]提出了三电极共面介质阻挡放电 等离子体激励器,该激励器诱导的气流速度小于沿 面介质阻挡放电激励器,但高于传统共面介质阻挡 放电激励器。张鑫等人[15]研究了非对称/对称式布 局介质阻挡放电等离子体激励器诱导启动涡演化过 程的研究,结果表明,对称式布局激励器兼有掺混与 射流效应两种能力,可提高较高风速或较高雷诺数 下等离子体流动控制效果。Wang 等人^[16]研究了4 种形状介质阻挡放电等离子体激励器诱导静止流场 的特性,结果表明,条形激励器诱导产生的流向涡强 度弱于三角形、蛇形和方形激励器。Durscher 等 人^[17]采用 PIV 技术,在静止空气中测量了蛇形等离 子体激励器的三维诱导速度场,结果表明,蛇形激励 器诱导的流场成螺旋状结构,有助于局部流体的快 速混合。

在等离子体激励器参数优化方面,Li等 人^[18-19]提出了一种锯齿形等离子体激励器,并将其

应用到平板和涡轮叶片气膜冷却中,结果表明,激励 器敷设方式对气膜冷却效果会产生截然相反影响, 齿尖激励器的气膜冷却效率较齿根激励器提高了 65.5%,齿根激励器的气膜冷却效率较无等离子时 降低了 28.1%。Xiao 等人^[20]研究了圆弧形电极激 励器位置、电极弧度对气膜冷却特性的影响,结果表 明,激励器位置越靠近气膜孔,改善气膜冷却效果越 好,弧度越大,展向壁面温度分布均匀性和气膜冷却 改善效果越强。黄悦峰等人[21]研究了归一化激励 器强度和激励频率以及不同吹风比下的气膜冷却性 能,结果表明,增大激励强度和频率,气膜冷却效率 提升程度明显提高,展向平均气膜冷却效率极值提 升达200%,最佳激励强度和频率分别为140和6.25。 Sun 等人^[22]以气膜冷却效率和压力损失系数为目标 函数,对等离子体激励器参数如电极位置、间距、长度 和激励强度进行了优化,优化前气膜冷却效率提高了 64.3%,压力损失系数降低了3.9%,优化后气膜冷却 效率比优化前的等离子体激励下的气膜冷却效率又 提高了 30.7%, 压力损失系数降低了 7.7%。

虽然目前部分研究者开展了等离子体激励器参数对改善气膜冷却效果影响的研究,但主要集中于激励电压、频率、敷设方式等参数上,对电极构型的研究偏少且不系统,也没有得到统一的结论。基于此,本文以3种电极构型的等离子体气动激励器为研究对象,采用数值模拟方法,在不同吹风比条件下开展了电极构型对等离子体气动激励改善气膜冷却效果的研究。基于流场结构分析,揭示了不同电极构型等离子体激励器改善气膜冷却效果的作用机制,获得了冷却效率的变化规律。

1 数值模拟及可行性验证

1.1 物理模型及边界条件

气膜冷却计算物理模型如图 1 所示。物理模型 由高温主流通道、冷却气流供气腔和连接两个腔体 的圆形气膜孔通道组成。主流通道宽 3D、高 10D, 冷却气流供气腔的长×宽×高 = 5D×3D×5D。其 中气膜孔直径 D = 0.006 m,倾角 α = 30°, 气膜孔长 径比 L/D = 4, 波浪形等离子体气动激励器裸露电极 宽 1.5 mm, 掩埋电极宽 6.5 mm, 电极厚度均为 100 µm, 绝缘介质厚 1.0 mm, 裸露电极为椭圆形, 中心 点距离气膜孔中心距离为 2 mm, 张角为 90°。原点 建立在气膜孔中心,沿流向、垂直壁面方向和展向分 别为 x、y 和 z 轴。





等离子体气动激励模型采用文献[6]中基于静 电场方程组的电动激励力模型。通过 Ansys Fluent 中用户自定义标量方程,给定边界条件,联合求解电 势方程和净电荷方程,并根据电动体积力与电势、电 荷的关系式获得体积力分布,将体积力分布以动量 源项的形式加入到 N - S 方程进行耦合求解,获得 等离子体激励下气膜冷却流场特性。详细的边界条 件和参数、求解方法设置参考文献[6]和文献[8]。 本研究对所建立的体积力模型与公开文献的仿真结 果和实验结果均做了对比,验证了所建模型的可行 性。电势和电荷密度方程、体积力计算公式为:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \phi) = 0$$
(1)
$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \rho_{c}) = \rho_{c} / \lambda_{d}^{2}$$
(2)

 $F_{\rm b} = \rho_{\rm c}(-\nabla\phi)$ (3) 式中: ϕ —外加电场所产生的电势, V; $\rho_{\rm c}$ —电荷密 度, C/m³; ε —相对介电常数, 空气和绝缘介质的相 对介电常数分别为1和2.7; $\lambda_{\rm d}$ —德拜长度, m; $F_{\rm b}$ — 电动体积力, N/m³。

在气膜冷却中,主流入口为速度入口边界条件, 主流雷诺数约为3200,温度为343K,湍流度为3%, 主流通道出口为压力出口,出口静压为101325Pa, 待冷却壁面为绝热、无滑移壁面条件,上壁面为滑移 壁面边界条件,左右两侧壁面设置为周期性边界条件。冷却气流供气腔进口设置为速度进口,其速度 值根据吹风比和气流温度计算得到,冷却气流温度 为293K,湍流度为1%,供气腔左右两侧为周期性 边界条件,其余面设置为无滑移绝热壁面。

采用 ANSYS ICEM 前处理器对气膜冷却物理模 型进行网格划分。采用六面体网格对计算区域进行 剖分,根据增强壁面处理方法对计算网格的要求,对 气膜孔壁和主流通道近壁面处的网格进行加密处 理,保证第一层网格节点的y⁺ ≈1.0,沿气膜孔轴向 网格节点间距比例和垂直于壁面方向网格节点间距 比例不大于1.04,主流通道沿气膜孔前缘向主流入 口方向的网格节点间距和沿气膜孔后缘向主流出口 方向的网格节点间距增长比例不大于1.12,计算网 格模型剖分如图 2 所示。



图 2 计算模型网格剖分 Fig. 2 Mesh division of calculation model

划分了不同网格数量的结构化网格, 网格数约 为 240 万、380 万和 510 万, 并对这 3 种网格进行数 值计算。计算工况吹风比 *M* 为 1.0, 图 3 给出了不 同网格数下中心线气膜冷却效率 η 的分布曲线。 由图 3 可知, 网格数为 240 万时, 在气膜孔附近下游 气膜冷却效率偏低, 随着网格数量增加, 中心线气膜 冷却效率逐渐接近, 380 万和 510 万时基本一样, 选 取的最终网格数量为 380 万。





Fig. 3 Centerline film cooling effectiveness with different mesh numbers at M = 1.0

1.2 数值计算方法与验证

采用分离隐式求解器对气膜冷却进行数值模拟 研究,湍流模型采用 Realizable *k* - *s* 湍流模型,壁面 函数采用增强壁面函数,压力插值为 Standard 格式, 压力 - 速度耦合采用 SIMPLE 算法,各控制方程对 流项的离散格式为二阶迎风格式,解的收敛标准是 各参量的计算残差小于 10⁻⁶,扩散项采用基于单元 体的最小二乘法插值。

为验证数值计算方法的可行性,对吹风比为 0.6和1.25下的气膜冷却壁面展向平均冷却效率 分布与文献[23]的实验结果进行了对比,其中密度 比为1.6,结果如图4所示。



图 4 展向平均气膜冷却效率仿真结果与 文献[23]实验结果对比



由图 4 可知,仿真计算获得的气膜冷却效率沿 流向的变化趋势与文献[23]的实验结果基本吻合, 说明使用本研究数值计算方法可以较好地模拟气膜 冷却流动和冷却特性,存在的差距主要是雷诺时均 计算方法及 Realizable *k* - *ε* 湍流模型的模拟精度造 成的。总体来看,采用的数值模拟计算方法能够满 足平板气膜冷却特性研究的需求。

1.3 激励器电极构型

选取波浪形、直条形和直角形 3 种电极构型等 离子体激励器作为研究对象,分析电极构型对带等 离子体激励器气膜孔冷却结构冷却效果的影响。3 种电极构型等离子体激励器结构示意图如图 5 所 示,裸露电极位置距气膜孔下游边缘均为4 mm。波 浪形电极等离子体激励器结构参数见图 1(c)。对 于直条形和直角形电极等离子体激励器,除了电 极敷设形状改变外,其结构参数与波浪形电极等离 子体激励器保持一致。激励电压为 16 kV,频率为 14 kHz,在不同电极结构中均保持不变。



图 5 3 种电极构型等离子体激励器结构示意图 Fig. 5 Structual diagrams of plasma aerodynamic actuators with three electrode configurations

1.4 参数定义

吹风比 *M* 是气膜冷却的重要流动参数之一,定 义为密度比和速度比的乘积,表达式为:

$$M = \frac{\rho_{j} u_{j}}{\rho_{\infty} u_{\infty}} \tag{4}$$

式中: ρ_{∞} , ρ_{j} 一高温主流和低温射流的密度,kg/m³; u_{∞} , u_{j} 一高温主流和低温射流的速度,m/s。

气膜冷却效率是衡量壁面处气膜对壁面的冷却 程度,无量纲表达式如下:

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{aw}}{T_{\infty} - T_{j}}$$
(5)

式中:η-绝热气膜冷却效率;T。一高温主流温度,K;

 T_j —低温射流温度,K; T_{aw} —有气膜情况下的绝热壁面温度,K。

展向平均冷却效率 η_{ave} 定义为:

$$\eta_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \eta_i \tag{6}$$

式中:η_i—展向第 *i* 个节点的气膜冷却效率; n—总 节点数。

面平均冷却效率 $\eta_{\text{area ave}}$ 定义为:

$$\eta_{\text{area, ave}} = \frac{1}{A} \int \eta_{xy} dA \tag{7}$$

式中: η_{xy} 一坐标 x, y 处微元点的气膜冷却效率;A 为 所选取面的面积, m^2 。

无量纲温度 θ 用于表示温度分布,其定义为:

$$\theta = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_{j}} \tag{8}$$

式中:T-掺混区域内的气流温度,K。

2 结果与讨论

2.1 等离子体激励器产生的等效电动体积力分布 特征

等离子体激励器产生的电势分布决定了等效 电动体积力的空间分布特征.3种电极构型等离子 体激励器工作产生的空间电势分布情况如图 6 所 示,其中截面1为中心截面,截面2为裸露电极和 掩埋电极交界线的垂直截面,截面3为电极周期性 交接面。由图6(a)可知,任意电极构型下激励器 产生电势的下降梯度方向(即电场矢量)均基本垂 直于裸露电极和掩埋电极的交界线。对于直条形 电极等离子体激励器,沿电极交界线方向激励器剖 面的结构参数和激励器放电参数具有高度的二维分 布特征,因此沿 z 轴展向方向的电势分布未发生改变 (见图6(b1))。对于波浪形电极等离子体激励器, 由图 6(a2) 和图 6(b2) 可见, 在离电极周期性交接 面(图中截面3)较远区域,波浪形电极周向切面上 的电势分布非常接近(截面1和截面2),电势空间 分布类似于在二维电势分布基础上进行的三维旋转 变换:在电极周期性交接面(截面3)附近区域,裸露 电极和掩埋电极交错位置的电势下降梯度稍小于其 他区域,表明此处的电场强度稍弱。直角形电极等 离子体激励器中,电极的直角边部分可以认为是直 条形电极构型,相应地该区域产生的电势分布与直 条形电极构型等离子体激励器的类似:对于电极的 两个直角区域,截面1处电势的下降梯度略高于直 角边区域,而截面3处的则略低于直角边区域。



(a3) 直角形电极(a) 不同电极构型激励器y/D = 0平面上的电势分布



⁽b) 不同电极构型不同截面位置处产生的电势空间分布

图 6 3 种电极构型等离子体激励器产生的 电势分布

Fig. 6 Electric potential distributions induced by plasma aerodynamic actuators with three electrode configurations

由于在截面 2 上 3 种电极构型等离子体激励器 产生的空间电势呈二维分布,因此在截面 2 上 3 种 电极构型等离子体激励器产生的电动体积力分布也 类似,因此着重给出 y/D = 0 截面上不同电极构型 等离子体激励器产生的等效电动体积力分布,如图 7 所示。从 y/D=0 截面上的体积力矢量分布可知, 波浪形和直角形电极构型等离子体激励器截面 3 附 近的电动体积力分布密度略小于其他区域,这主要 是由于该区域的电场强度略小导致的。直角形电极 构型等离子体激励器中,虽然截面 1 处的电场强度 最高,但由于该区域放电类似于"点 – 面"介质阻挡 放电,产生的微放电通道数很少,因此带电粒子的空 间分布密度低,相应地激励器产生的等效电动体积 力分布密度很小(见图7(c))。



(a) 直条形电极



(b) 波浪形电极



(c) 直角形电极

图 7 y/D=0 截面上不同电极构型激励器产生的 等效电动体积力矢量分布

Fig. 7 Equivelant electric volume force vector distributions induced by plasma aerodynamic actuators with different electrode configurations on section y/D = 0

2.2 等离子体激励器诱导静止空气流场分析

不同电极构型等离子体激励器产生的电动体积 力分布不同,激励器诱导静止空气流动产生的流场 差别会较大。

图 8 给出了距离壁面 1.0 mm 水平剖面处激励 器诱导静止空气流场的速度云图分布。从图中可以 看出,直条形电极等离子体激励器诱导近壁面气体 向下游流动,速度矢量与展向截面(垂直于z轴)的 夹角基本为零,流场没有展向流动特征。对于波浪 形电极等离子体激励器,其产生的等离子体电动体 积力呈波浪形分布,因而会诱导近壁面气流向展向 两侧下游方向流动;虽然在电极周期性交接面区域 的体积力值略小,但在该区域附近的诱导速度值较 大,这归结于该区域展向两侧激励器诱导速度的合 成效果。3种电极构型等离子体激励器中,直角形 电极等离子体激励器诱导近壁面流场的展向流动特 征最为明显,诱导速度最大值出现在周期性电极交 接面处,其原因与波浪形电极等离子体气动激励器 的情况相类似。



图 8 不同电极构型等离子体激励器诱导 静止空气流场速度分布

Fig. 8 Velocity distributions in quiescent air flow field induced by plasma aerodynamic actuators with different electrode configurations

图9给出了不同电极构型激励器掩埋电极后缘 处流向截面的速度矢量分布。可以发现,波浪形和 直角形电极等离子体激励器诱导流场产生了一对涡 结构,直条形的则不存在;与波浪形电极等离子体激 励器相比,直角形电极等离子体激励器诱导流场产 生的涡对的涡核间距小、涡结构尺寸大,表明直角形 电极等离子体激励器对流场的展向诱导能力要强于 波浪形电极等离子体激励器。不同电极构型等离子 体激励器对静止空气流场诱导效果的差异预示着电 极构型对气膜冷却效果的影响差异较大。

· 17 ·



- 图 9 不同吹风比时不同电极构型等离子体激励器掩埋电极 后缘流向截面的速度矢量分布
- Fig. 9 Velocity vector distributions on streamwise interface of trailing edge of embedded electrodes in plasma aerodynamic actuators with different electrode configurations at different blowing ratios

2.3 激励器电极构型对气膜冷却效果的影响

2.3.1 气膜冷却流场涡结构分析

图 10 给出的是吹风比 *M* = 0.4 和 *M* = 1.0 时 3 种电极构型等离子体激励器诱导气膜冷却流场产生 的涡结构空间分布,为方便对比,图 10 给出了典型 圆形气膜孔冷却结构的计算结果。对于直条形电极 等离子体激励器,与典型圆形气膜孔冷却结构相比, 2 种吹风比下等离子体激励器对反向旋转涡对 (Counter-Rotating Vortex Pairs,简称 CRVP)结构形 态的影响很小。



图 10 不同吹风比时不同电极构型等离子体 激励器下气膜孔下游流向涡量分布

Fig. 10 Downstream streamwise vorticity distributions in film hole of plasma aerodynamic actuators with different electrode configurations at different blowing ratios 结合图 7 所示的等效电动体积力分布可知,由 于直条形电极等离子体激励器仅对 CRVP 具有流向 方向的下洗诱导作用,因而并未对 CRVP 结构的形 成及发展造成本质的改变。与直条形电极等离子体 激励器相比,波浪形和直角形电极等离子体激励器 产生的等效电动体积力分布对流场展向方向的激励 作用显著,激励器的定向激励作用会削弱近壁面流 场的 CRVP 结构,诱导气膜冷却流场展向两侧形成 的逆反向旋转涡对 (Anti Counter Rotating Vortex Pairs, ACRVP) 结构进一步抑制了 CRVP 结构的发 展,气膜被抬离壁面的趋势减缓,进而改善壁面被气 膜覆盖的效果。

吹风比 M = 0.4 时,直角形电极等离子体激励 器在气膜孔出口附近基本消除了 CRVP 结构,这归 结于该激励器具备更强的展向诱导能力。吹风比 M = 1.0时,冷却射流的出流动量较大,CRVP的结 构尺寸及强度较高,激励器的诱导作用相对下降。 波浪形和直角形电极等离子体激励器诱导气膜冷却 流场产生的 ACRVP 结构强度较小、耗散快, CRVP 结构在流场中占主导地位,但与典型气膜冷却结构 相比,在等离子体激励器产生的等离子体气动激励 作用下,气膜冷却流场中的 CRVP 结构仍受到了不 同程度的削弱。直角形电极等离子体激励器对 CRVP 结构的削弱最显著,波浪形电极等离子体激励 器次之,直条形电极等离子体激励器对 CRVP 结构的 削弱程度最低。针对在大吹风比下等离子体气动激 励对 CRVP 削弱不显著,可以考虑通过提高激励电压 等来提高激励器的气动激励效果以增强其对 CRVP 结构的削弱能力,从而进一步提高气膜冷却效率。

2.3.2 气膜冷却效率分析

不同电极构型等离子体激励器作用下的壁面展 向平均冷却效率分布和局部展向冷却效率分布分别 如图 11、图 12 所示。为深入理解电极构型改变对 冷却效率分布的影响机理,结合图 13 壁面冷却效率 和空间无量纲温度 – 速度分布展开讨论。

在气膜孔出口敷设直条形电极等离子体激励器 的气膜冷却结构中,由于气膜冷却流场的 CRVP 结 构受等离子体气动激励的影响很弱,因此气膜出流 分布的形态变化不大,从图 11(a)~图 11(d)可知, 直条形电极构型下展向平均气膜冷却效率提高幅度 非常有限。直条形电极等离子体激励器对气膜沿流 向方向的诱导作用会导致气膜的展向扩散效果略微 变差,因此在气膜孔远下游区域的展向平均冷却效 率值变化很小,由图 11(c)和图 11(d)可知,吹风比 较高时甚至会出现气膜冷却效果变差的情况。







图 12 不同吹风比时不同电极构型下局部 展向冷却效率分布 Fig. 12 Local lateral film cooling effectiveness distributions with different electrode configurations

at different blowing ratios





图 13 不同吹风比时不同电极构型等离子体激励器下的 壁面冷却效率和空间无量纲温度 – 速度分布 Fig. 13 Wall cooling effectiveness, spacial dimensionless temperature-velocity distributions of plasma aerodynamic actuator with different electrode configurations at different blowing ratios

结合图 10(a),从图 13(a2)和 13(a3)可以看 出,M=0.4 时波浪形和直角形电极等离子体激励 器诱导气膜冷却流场产生的 ACRVP 结构主导气膜 冷却流场,该涡结构有利于提高气膜的贴壁性及展 向覆盖效果。从图 12(a) 可知, 吹风比 M = 0.4 时, 在气膜孔下游敷设直角形电极等离子体激励器的气 膜冷却结构中,气膜孔下游靠近气膜孔中心线区域 的壁面冷却效率偏低,结合图 13(a4)可知,这主要 是由于直角形电极等离子体激励器产生的等效电动 体积力在小吹风比下对冷却气膜的展向诱导显著. 相应地降低了气膜沿流向的延伸能力导致的,与之 相比气膜的展向覆盖效果提高得更为明显。因此在 直角形电极等离子体激励器的气动激励作用下的展 向平均气膜冷却效率值为最高。从图 12 可知,小吹 风比下电极构型的改变对整个展向区域(尤其是在 气膜孔间区域)气膜冷却效率分布的影响较大,随 着吹风比的增大电极构型改变对展向区域气膜冷却 效率的影响幅度逐渐降低,这与等离子体激励器在 高吹风比下的激励诱导能力相对下降有关。从图 11(b)~图11(d)、图12(b)~图12(d)和图13(b) 可以看出,在其他吹风比条件下,波浪形和直角形电

极等离子体激励器诱导气膜冷却流场产生的 AC-RVP 结构虽然没有主导整个流场,但气膜两侧的高 温主流向其底部的侵入趋势仍得到了减缓,因此壁 面的冷却效率高于直条形电极等离子体激励器的。

表1为不同电极构型下的面平均气膜冷却效 率。由表1可知,3种电极构型等离子体激励器下 的气膜冷却效率提高百分比均随着吹风比的增大而 降低;直条形电极等离子体激励器对气膜冷却效率 的提高幅度很有限,较高吹风比时甚至会出现负效 应,带直角形电极等离子体激励器的气膜冷却结 构的冷却效率最高,带波浪形电极等离子体激励器 的气膜冷却结构的冷却效率介于直角形和直条形 电极等离子体激励器之间。相对于常规圆形孔气膜 冷却,吹风比为0.4时直条形、波浪形和直角形电极 构型面平均气膜冷却效率分别提高了5.52%, 42.56%和92.47%。

表1	不同時	电极构	型	下的面平均	均气	膜冷却	效	率[直	
 •	~		~~			1100		-		~

Tab.	Average	surface	film cooli	ng effecti	iveness wi	ith different	electrode	configurations	

吹风比	不同电极构型									
	圆形孔	直条形	提高率/%	波浪形	提高率/%	直角形	提高率/%			
0.4	0.1647	0.173 8	5.52	0.234 8	42.56	0.317 0	92.47			
0.7	0.130 9	0.130 6	-0.23	0.1727	31.93	0.243 2	85.79			
1.0	0.092 6	0.089 6	-3.24	0.1090	17.71	0.131 6	42.12			
1.3	0.068 3	0.065 9	-3.51	0.075 6	10.69	0.083 6	22.40			

3 结 论

本文采用数值模拟的方法,开展了不同吹风比 条件下波浪形、直条形、直角形3种电极构型等离子 体气动激励器诱导静止空气流场特性以及对气膜冷 却特性影响的研究,对比分析了流场的冷却效率和 流动结构,得到以下结论:

(1)不同电极构型下激励器诱导静止空气流场中,直条形电极构型激励器仅具有流向诱导能力,流场展向方向上不存在对涡结构,直角形和波浪形电极构型激励器具有流向和展向诱导能力,其中直角形电极构型激励器流场展向方向上涡对的涡核间距小、涡结构尺寸大。

(2)与典型气膜冷却流场相比,直条形电极仅 对肾形涡对起到流向方向的下洗诱导作用,波浪形 和直角形电极的展向诱导能力所产生逆反向旋转涡 对,抑制了肾形涡对的发展,气膜被抬离壁面的趋势 减缓。

(3)3种电极构型等离子体激励器下气膜冷却 效率提高百分比均随着吹风比的增大而降低,吹风 比为0.4时直条形、波浪形和直角形电极构型面平 均气膜冷却效率提高比例分别为5.52%,42.56% 和92.47%。

参考文献:

 [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.

- [2] CORKE T C, ENLOE C L, WILKINSON S P. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42:505 – 529.
- [3] 李应红,吴 云.等离子体激励调控流动与燃烧的研究进展与展望[J].中国科学:技术科学,2020,50(10):1252-1273.
 LI Yinghong, WU Yun. Research progress and outlook of flow control and combustion using plasma actuation [J]. Scientia Sinica (Technologica),2020,50(10):1252-1273.
- [4] ROY S, WANG C C. Plasma actuated heat transfer [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(23):231501.
- [5] SHYY W, JAYARAMAN B, ANDERSSON A. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics[J]. Journal of Applied Physics, 2002,92(11):6434-6443.
- [6] SUZEN Y B, HUANG P G. Simuations of flow seperation control using plasma actuators[J]. AIAA Paper, 2006, 2006:877.
- [7] WANG C C, ROY S. Electrodynamic enhancement of film cooling of turbine blades [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(7):073305.
- [8] DAI S J, XIAO Y, HE L M, et al. Computational study of plasma actuator on film cooling performance for different shaped holes[J]. AIP Advances, 2015, 5(6):067104.
- [9] LI G Z, CHEN F, LI L X, et al. Large eddy simulation of the effects

of plasma actuation strength on film cooling efficiency[J]. Plasma Science and Technology,2016,18(11):1101-1109.

- [10] AUDIER P, FENOT M, BENARD N, et al. Film cooling effectiveness enhancement using surface dielectric barrier discharge plasma actuator [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016,62(12):247-257.
- [11] KIM Y J,KIM G M,SHIN Y,et al. Experimental investigation on the effects of DBD plasma on the film cooling effectiveness of a 30-degree slot[J]. Applied Science,2017,7(6):633.
- [12] DAI S J,XIAO Y, HE L M, et al. An experimental study of plasma aerodynamic actuation on a round jet in cross flow [J]. AIP Advances, 2015, 5(3):037143.
- [13] 史志伟,范本根.不同结构等离子体激励器的流场特性实验 研究[J]. 航空学报,2011,32(9):1583-1589.
 SHI Zhiwei, FAN Bengen. Experimental study on flow field characteristics of different plasma actuators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(9):1583-1589.
- [14] 张 兴,黄国旺,吴淑群,等. 三电极共面介质阻挡放电的放电特性及诱导气流实验研究[J]. 气体物理,2021,6(2): 28-37.

ZHANG Xing, HUANG Guowang, WU Shuqun, et al. Experimental study on discharge characteristics and induced airflow of threeelectrode coplanar dielectric barrier discharge[J]. Physics of Gases, 2021, 6(2):28 – 37.

[15] 张 鑫,黄 勇,王万波,等.对称式布局介质阻挡放电等离
 子体激励器 诱导启动涡[J].物理学报,2016,65(17):
 174701.

ZHANG Xin, HUANG Yong, WANG Wanbo, et al. Experimental investigation on the starting vortex induced by symmetrical dielectric barrier discharge plasma actuator [J]. Acta Physica Sinica, 2016,65(17):174701.

[16] WANG C C, DURSCHER R, ROY S. Three-dimensional effects of

curved plasma actuators in quiescent air[J]. Journal of Applied Physics ,2011 ,109(8) :083305.

- [17] DURSCHER R, ROY S. Three-dimensional flow measurements induced from serpentine plasma actuators in quiescent air [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(3):035202.
- [18] LI G Z, HUANG Y J, ZHANG H J, et al. Numerical comparison of saw-tooth plasma actuators for film cooling flow control over a flat plate [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 163(5):106807.
- [19] LI G Z, WANG Q Q, HUANG Y J, et al. Large eddy simulations of the turbine vane pressure side film cooling flows of cylindrical and fan-shaped holes with a saw-tooth plasma actuator[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112(5);106615.
- [20] XIAO Y, DAI S J, HE L M, et al. Investigation of film cooling from cylindrical hole with plasma actuator on flat plate[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(9):1571-1583.
- [21] 黄悦峰,张子寒,何 坤,等. 单介质阻挡等离子体激励对平板气膜冷却性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11):26-36.
 HUANG Yuefeng, ZHANG Zihan, HE Kun, et al. Influence of signal dielectric barrier discharge plasma actuation on film cooling effect at plain surface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,
- [22] SUN J, XIE G N. Mechanisms of characteristic parameters of plasma actuator on film cooling and turbulent transport based on multi-objective optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2024,240(3):122295.

2020,54(11):26-36.

[23] SCHMIDT D, SEN B, BOGARD D. Film cooling with compound angle holes: Adiabatic effectiveness [J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(4):807-813.

(姜雪梅 编辑)