

等离子体激励下的凹槽叶顶气膜冷却性能

徐柯文, 何坤, 晏鑫

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过将等离子体激励力耦合至雷诺时均 NS 方程组的动量方程中, 数值研究了等离子体控制下的燃气透平凹槽叶顶的气膜冷却性能, 分析等离子体激励强度、激励频率对凹槽叶顶气膜冷却效率和总压损失的影响, 提出了一种改善凹槽底部冷却气膜覆盖的非均匀等离子体控制策略, 阐明了等离子体激励对叶顶间隙内冷热气流的作用机制。研究结果表明: 凹槽下游等离子体激励可有效抑制上游冷气对下游冷气的卷吸, 且抑制作用随着激励强度、激励频率的增加而增强。激励强度较小时, 上游冷气未对下游冷气造成卷吸, 尾缘处气膜冷却性能较好; 随着激励强度增大, 尾缘冷气被上游冷气吹离凹槽底部, 但中部气膜冷却性能较好。激励强度 D_s 为 204 时, 凹槽底部平均气膜冷却效率相比无激励时提升了 25.11%。激励频率与激励强度对叶顶气膜冷却性能的影响规律类似。当激励强度 D_s 为 156, 激励频率 D_0 为 6.25 和 D_0 为 8.75 时, 凹槽底部平均气膜冷却效率相比无激励时分别提升了 28.71% 和 29.27%。施加非均匀等离子体控制时, 凹槽底部平均气膜冷却效率比无激励时提升了 39.12%。施加等离子体激励后, 叶栅总压损失几乎不变。

关键词: 燃气透平; 凹槽叶顶; 等离子体激励; 气膜冷却

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401004 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0042-12

Investigations of Film Cooling Effect on Squealer Tip with Plasma Actuation

XU Kewen, HE Kun, YAN Xin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Film cooling performance on a gas turbine squealer tip was numerically investigated by incorporating plasma actuation forces into the momentum equations of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The objective was to analyze the impact of plasma actuation strength and actuation frequency on the film cooling effectiveness and total pressure loss in tip region. Furthermore, a plasma control strategy was proposed to improve the coolant coverage on the cavity floor of squealer tip, and the mechanism of plasma actuation on the coolant and mainstream in the tip gap was elucidated. The results showed that the downstream plasma actuation within the squealer cavity effectively counteracts the swirling effect provided by the upstream coolant to the downstream coolant. Such resistant effect is increased with increasing the actuation strength and actuation frequency. When the plasma actuation is minimal, the upstream coolant provides little swirling effect to the downstream coolant in squealer cavity, resulting in effective film cooling effect on the cavity floor near trailing edge. As the actuation strength increases, the coolant near the

trailing edge is blown away from the cavity floor by the upstream coolant, but the film cooling effect on the central part of cavity floor becomes better. Compared to the no actuation case, the area-averaged film cooling effectiveness on the cavity floor of squealer tip is increased by 25.11% for actuation strength $D_s=204$. The actuation frequency displays a similar effect on the film cooling at squealer tip as the actuation strength. If the actuation strength is fixed at $D_s=156$, the area-averaged film cooling effectiveness on the cavity floor is increased by 28.71% for actuation frequency $D_\theta=6.25$ and actuation frequency 29.27% respectively as compared to the no actuation case. Additionally, non-uniform plasma actuation on the squealer tip leads to a 39.12% increase in the area-averaged film cooling effectiveness on the cavity floor compared to the no actuation case. Notably, the total pressure loss in the rotor blade is almost unchanged with the specified plasma excitation.

Keywords: gas turbine; squealer tip; plasma actuation; film cooling

现代燃气透平动叶叶顶区域由于存在复杂的泄漏流和二次流结构,因此热负荷较高。相对于平叶顶,凹槽叶顶结构具有良好的气热性能,在现代燃气透平叶片中应用广泛^[1]。为降低凹槽叶顶的热负荷,采用有效的气膜冷却技术是确保燃气透平安全有效运行的关键途径^[2]。

目前已有较多的研究者开展了凹槽叶顶的冷却传热性能研究,通过对叶顶几何结构、气膜孔布置和形状以及射流条件的改进,提升叶顶区域的气热性能。于金杏等^[3]采用数值方法研究了气膜孔形状对凹槽叶顶气膜冷却性能的影响,研究发现,将压力面侧圆孔更换为扩张孔后,使叶顶压力面侧气膜冷却效率增大了 43.3%;此外,于金杏等^[4]研究了叶顶和压力面侧气膜孔在吹风比为 2.0 条件下相比于单排气膜孔叶顶,凹槽肩壁处平均传热系数下降了 13.89%,平均气膜冷却效率上升了 61.45%。Cheng 等^[5]通过实验和数值方法对叶顶气膜孔位置分布进行了研究,发现改变气膜孔的位置可以有效改善叶顶尾缘处的气膜冷却性能。黄琰等^[6]采用数值方法求解了不同叶顶间隙下的凹槽叶顶的气膜冷却性能,发现增大叶顶间隙会导致凹槽底部近压力面侧和尾缘处气膜冷却性能变差。Jeong 等^[7]采用瞬态传热技术测量了叶顶局部传热系数,发现叶顶形状对叶顶传热系数影响剧烈,吸力侧尾缘越长,叶顶传热系数越低。吴琛琦等^[8]采用数值方法计算了发动机工况下带不同压力侧小翼结构的凹槽叶顶冷却传热性能,发现带圆角扭曲型小翼相比于传统凹槽叶顶平均传热系数下降了 16.45%。Wang 等^[9]利用数值模拟方法研究了旋转工况下不同叶顶结构下凹槽叶顶吸力侧气膜冷却性能,结果表明,吸力侧气膜冷却性能主要受叶顶泄漏涡和通道涡的影响。

随着等离子体流动控制技术的进步,采用等离子体激励增强壁面气膜冷却性能的方法日益受到燃气透平研究者的青睐。早期等离子体流动控制技术广泛应用于翼型流动分离控制^[10]和边界层减阻^[11]等领域。Shyy 等^[12]提出了关于介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体线性化电动体体积力的模型,并与实验结果进行对比,发现两者吻合良好。Sujar-Garrido 等^[13]采用实验和数值方法研究了 Suzen 等^[14]所提出的等离子体激励 SHM 模型,在此模型基础上提出了考虑等离子体激励装置功率的改进模型。黄悦峰等^[15-16]研究了单介质阻挡放电等离子体激励和介质阻挡放电涡发生器等等离子体激励对平板气膜冷却性能的影响,结果表明,等离子体激励能有效提高平板气膜冷却效率,单介质阻挡放电等离子体激励强度为 100 时,中心线气膜冷却效率极值相比于无激励时提高了 105%;介质阻挡放电涡发生器等等离子体激励强度为 40 时,中心线气膜冷却效率极值相比于无激励时提高了 60%。近年来,等离子体流动控制技术逐渐应用于燃气透平叶片中,以提升壁面的气膜冷却性能。Kumar 和 Singh^[17]采用数值方法研究了等离子体流动控制技术对涡轮气膜冷却性能的影响,发现涡轮进口温度为 1 900 K 时,应用等离子体激励技术使气膜冷却效率提高了 0.5%。Douville 等^[18]采用实验和数值相结合的方法研究了等离子体激励对叶顶总压损失的影响,结果表明,等离子体激励控制流动的效果很大程度上取决于外加电压的频率,而施加等离子体激励对叶栅通道中的总压损失几乎没有影响。

目前,对于等离子体流动控制研究主要集中于边界层减阻和分离控制方面。在等离子体激励控制气膜冷却方面,研究者主要针对简单的平板气膜冷

却流动控制开展研究^[19-22]。仅有较少的研究者针对叶顶区域复杂的流动进行控制^[17]。整体而言,目前针对等离子体激励下的凹槽叶顶冷热气流作用机理掌握得尚不清晰,对影响凹槽叶顶冷却性能的激励因素认识并不完善。因此,本文将等离子体激励应用于凹槽叶顶,用以提升凹槽底部的气膜冷却性能,研究不同激励参数条件下等离子体激励对凹槽叶顶气膜冷却性能的影响规律,在此基础上探索改善凹槽底部冷却气膜覆盖的非均匀等离子体控制方法。

1 数值计算方法

1.1 计算模型与边界条件

本文采用的叶片模型来源于 GE-E³ 航空发动机高压透平的第一级动叶叶片^[23]。针对该叶片,Kwak 和 Han^[24]开展了大量的实验研究,因此本文的计算条件与实验条件保持一致;实验叶片型线相对于原始叶片放大了 3 倍,计算模型的几何参数见表 1。图 1 给出了 GE-E³ 叶片凹槽叶顶计算模型。由于流动的周期性,流道两侧设置为平移周期性边界条件,进出口均为压力边界,气膜孔沿流向分别命名为 H1~H13。

表 1 计算模型的几何参数

Table 1 Model geometric parameters in numerical simulations

参数	数值
进口气流角/(°)	32
叶片高度/mm	122
叶顶间隙/mm	1.97
凹槽深度/mm	5.00
肩壁宽度/mm	2.26
气膜孔直径/mm	1.27

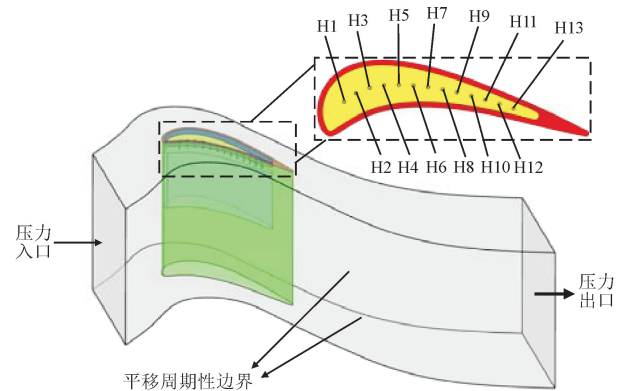


图 1 GE-E³ 叶片凹槽叶顶计算模型

Fig. 1 Computational model of GE-E³ blade squealer tip

设置等离子体激励作用的位置如图 2 所示。将作用于 H1、H2 气膜孔后等离子体激励装置的中心点 A 与 H1 和 H2 两气膜孔连线中点取相同 Z 轴坐标值,H3~H11 气膜孔等离子体激励装置中心位置 Z 轴坐标值与各气膜孔中心点 Z 轴坐标相同。由于不施加等离子体激励时,H12、H13 气膜孔附近的气膜冷却性能已经足够良好,因此本文不再在其附近设置等离子体激励。

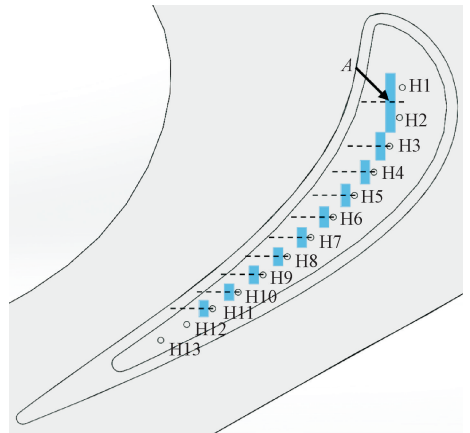


图 2 等离子体激励作用位置

Fig. 2 Position of plasma actuation

采用 ANSYS Workbench Meshing 生成四面体非结构化网格,图 3 给出了无激励工况下的叶片数值计算网格。在划分网格时为了保证网格质量,将最大网格体积设置为 1.2 mm。为了满足湍流模型和气膜冷却效率计算精度要求,对近壁面区域进行网格加密,近壁面第一层网格厚度为 0.001 mm,保证近壁面 $y^+ < 1.0$,总网格数为 1 460 万。

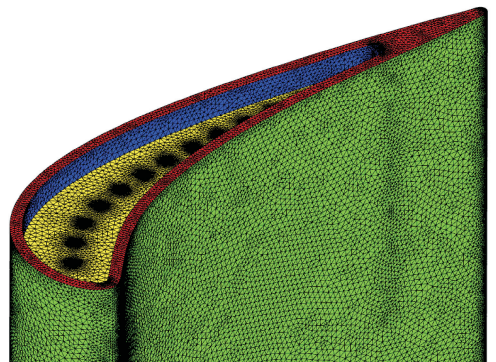


图 3 无激励工况下叶片数值计算网格示意图

Fig. 3 Numerical simulation meshes for the blade in the no-actuation condition

数值计算边界条件与 Kwak 和 Han 的实验边界条件^[24]保持一致,表 2 给出了具体的数值计算的

边界条件,主流进出口边界均为压力边界,冷气进口为质量流量入口边界,以保证吹风比为 1.0。计算气膜冷却效率时,壁面设置为绝热壁面边界,工质为理想气体。

表 2 数值计算的边界条件

边界条件	数值
主流进口总温/K	298
主流进口总压/kPa	126.9
主流进口湍流强度/%	9.7
主流进口湍流尺度/m	0.015
出口静压/kPa	102.7
冷却气流进口总温/K	328
冷却气流进口流量/(10 ⁻³ kg·s ⁻¹)	1.656

1.2 等离子体激励模型

图 4 为等离子体激励模型示意图。当外加电源给上下极板施加足够强度的电压后,两极板之间的空气被电离产生带电粒子,如图 3(a)中等离子体区域所示,采用线性近似的方法^[12,15]将非均匀电场简化为规则电场,如图 3(b)所示。近似后的等离子体区域呈三角形,其特征长度有等离子体区域沿法向高度 a 和沿流向长度 b 、上极板流向长度 L_{UE} ,两极板之间的距离 L 和下极板流向长度 L_{LE} 。本文所使用的等离子体线性激励模型参数取值见表 3。

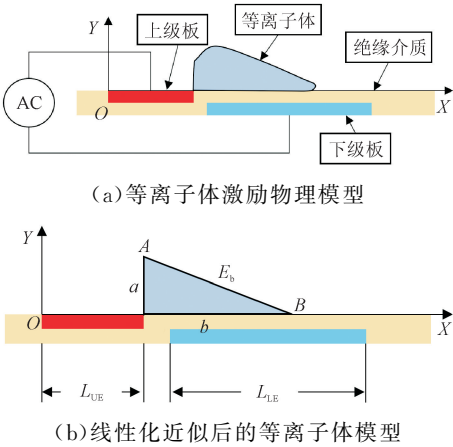


图 4 等离子体激励模型
Fig.4 Model of plasma actuation

从等离子体激励模型中可以看出,影响等离子体激励的主要参数有交变电压 U_a 、交变频率 f 、电极流向间距 L 、等离子体区域沿法向高度 a 和沿流向长度 b 。本文采用 Shyy 等^[12]所建立的等离子体线性激励模型,将等离子体激励力以动量源项形式耦

合至 RANS 方程组中,动量守恒方程表达式如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\sigma}_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + \bar{F}_i \tag{1}$$

式中: $\bar{F}_i$ 为定常平均等离子体激励力在 $i(i = X,Y,Z)$ 方向的分量。

表 3 等离子体线性激励模型参数

Table 3 Parameters of linearized plasma actuation model	
单位:mm	
模型参数	数值
上极板流向长度 L_{UE}	2.5
两极板之间的距离 L	1.0
下极板流向长度 L_{LE}	5
等离子体区域法向高度 a	2
等离子体区域流向长度 b	2

1.3 参数定义

吹风比定义为

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \tag{2}$$

式中: ρ_c 和 U_c 分别为冷却气流进口密度和速度; ρ_∞ 和 U_∞ 分别为主流进口密度和速度,计算过程中保持 $M=1.0$ 。

绝热气膜冷却效率定义为

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \tag{3}$$

式中: T_{aw} 为壁面的绝热温度; T_∞ 为主流进口温度; T_c 为冷却气流进口温度。

总压损失 P_L 定义如下

$$P_L = \frac{P_{t,s} - P_{t,local}}{P_{t,s} - P_{s,local}} \tag{4}$$

$$P_{t,s} = \frac{m_{in} P_{t,in} + m_{cooling} P_{t,cooling}}{m_{in} + m_{cooling}} \tag{5}$$

式中: m_{in} 和 $m_{cooling}$ 分别为主流和冷气进口流量; $P_{t,in}$ 和 $P_{t,cooling}$ 分别为主流和冷气进口总压; $P_{t,local}$ 和 $P_{s,local}$ 分别为当地总压和当地静压。

引入以气膜孔直径 D 为特征长度的无量纲参数激励强度 D_s 和激励频率 D_θ ^[12,15-16]表征激励参数

$$D_s = 2\,000 \times \frac{\rho_c e_c E_0 D}{\rho_\infty U_\infty^2} \tag{6}$$

$$D_\theta = \frac{40 f D}{U_\infty} \tag{7}$$

式中: ρ_c 为等离子体区域电荷密度; e_c 为元电荷带电量; E_0 为电场中最大场强; f 为电源频率。

1.4 湍流模型考核

图 5 给出了不同湍流模型下凹槽叶顶气膜冷却效率分布与实验结果^[24]对比,从图 5 中可以看出, $k-\epsilon$ 湍流模型计算结果在凹槽前缘区域 A 处气膜冷却效率与实验结果相比偏大, SST $k-\omega$ 湍流模型计算结果相比于实验结果在叶片吸力侧尾缘肩壁区域 B 处气膜冷却效率偏大, realizable $k-\epsilon$ 湍流模型计算结果在尾缘凹槽底部区域 C 处气膜冷却效率偏大, $k-\omega$ 湍流模型计算结果与实验结果相对吻合较好,因此最终选取 $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。

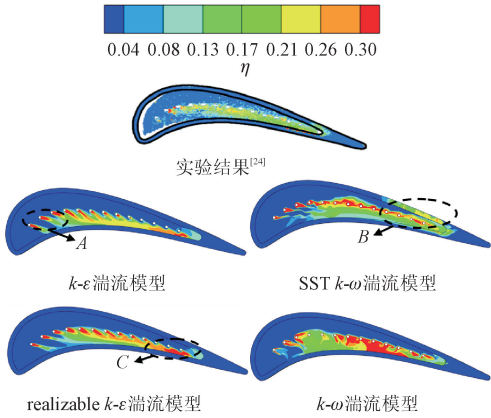


图 5 不同湍流模型下凹槽叶顶气膜冷却效率分布与实验结果^[24]对比
Fig. 5 Comparison of film cooling effectiveness contours on squealer tip in different turbulence models with experimental results^[24]

1.5 等离子体线性激励模型验证

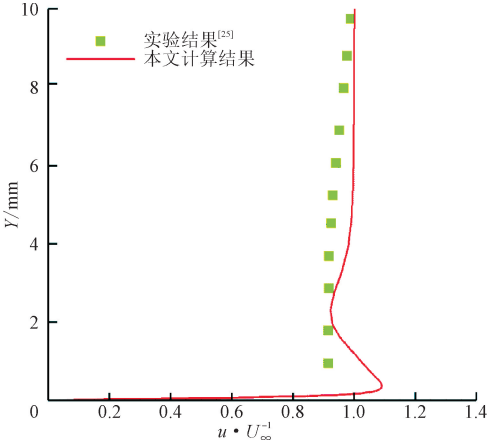
利用实验数据^[25]和公开发表的数值结果^[12]对本文所建立的等离子体线性激励模型的有效性进行验证。验证模型的主要参数见表 4。

表 4 验证模型的主要参数

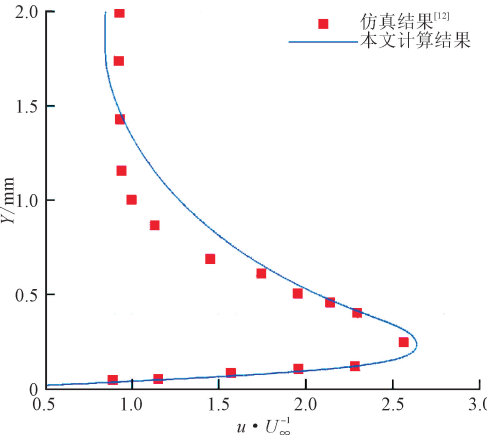
参数	数值	
	实验结果 ^[25]	文献结果 ^[12]
交变电压 U_a /KV	11.0	4.0
交变频率 f /kHz	3.0	3.0
电极流向间距 L /mm	5.0	0.5
等离子体区域沿法向高度 a /mm	1.5	1.5
等离子体区域沿流向长度 b /mm	3.0	3.0

图 6 给出了本文计算结果与实验结果^[25]、公开发表的仿真结果^[12]的对比。从图 6(a)可以看出, 等离子体激励在近壁面产生流向的诱导射流, 表现为近壁面流向速度增大, 在流向 $X=4.5\text{ mm}$ 处等离子体激励对流体扰动的法向范围为 $0\sim 2.1\text{ mm}$, 流

体的无量纲速度 u/U_∞ 峰值约为 1.1。从图 6(b)可以看出, 在流向处 $X=17.3\text{ mm}$ 等离子体激励扰动流体法向范围为 $0\sim 1.4\text{ mm}$, 流体的无量纲速度 u/U_∞ 峰值约为 2.6, 与参考文献^[12]数据吻合良好, 在流向 $0\sim 0.7\text{ mm}$ 范围内两者基本吻合, 因此所建立的等离子体线性激励模型具有较好的精度。



(a) $X=4.5\text{ mm}$ 处流向速度分布对比



(b) $X=17.3\text{ mm}$ 处流向速度分布对比

图 6 计算结果与实验结果^[25]和仿真结果^[12]对比
Fig. 6 Comparison of calculated results with experimental data^[25] and simulation data^[12]

2 结果与讨论

2.1 激励强度对叶顶气膜冷却性能的影响

本节在吹风比 M 为 1、激励频率 D_0 为 7.5 的条件下, 通过分析凹槽叶顶气膜冷却效率、叶顶三维流线图、叶顶速度截面图和流线图比较激励强度 $D_s = 132, 156, 180$ 和 204 工况下的凹槽叶顶气膜冷却性能。

2.1.1 凹槽叶顶气膜冷却效率分布

图 7 为不同激励强度下凹槽叶顶气膜冷却效率云图, 从图 7 中可以看出, 在无激励工况时气膜冷却效率较高的区域在凹槽叶顶中部偏后区域 A, 凹槽底部除前缘区域外整体气膜冷却效率较高。在加

入等离子体激励且激励强度逐渐增大时,凹槽中部区域 B 冷气覆盖面积也随着激励强度的增大而明显增大。在激励强度 $D_s = 132$ 时尾缘处存在高气膜冷却效率区域 C ,这是因为前缘和中部的冷气在低激励强度时还未对尾缘冷气造成吹离;随着激励强度逐渐增大,前缘和中部的冷气在较大的激励力作用下将尾缘处的冷气卷吸吹离凹槽底部,区域 C 消失。值得注意的是,在激励强度 D_s 为 204 时,在凹槽中部形成了面积较大的高气膜冷却效率区域 D ,同时凹槽底部整体气膜冷却性能较好,在该激励条件下凹槽底部气膜冷却性能得到了明显改善。

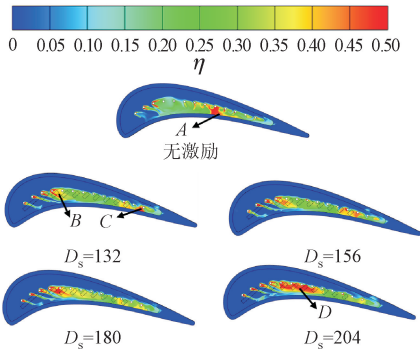


图 7 不同激励强度下凹槽叶顶气膜冷却效率云图
Fig. 7 Film cooling effectiveness contours on squealer tip with different plasma actuation strength

图 8 为不同激励强度下凹槽节距平均气膜冷却效率。从图 8 中可以看出,相对于无等离子体激励工况,施加等离子体激励后尾缘处气膜冷却效率显著增大。随着激励强度逐渐增加,中部的气膜冷却效率逐渐提升。在激励强度 D_s 为 204 时,凹槽中部的气膜冷却效率最大,整体气膜冷却性能得到了提升。

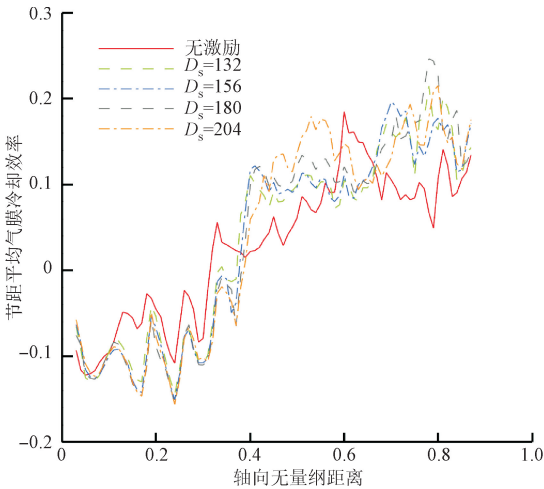


图 8 不同激励强度下凹槽底部节距平均气膜冷却效率
Fig. 8 Pitch-averaged film cooling effectiveness on the cavity floor with different plasma actuation strength

表 5 给出了不同激励强度下凹槽底部平均气膜冷却效率 $\bar{\eta}$ 及其相对无激励工况提升值。当激励强度 D_s 为 132 时,凹槽底部平均气膜冷却效率相比于无激励工况提升了 10.02%;激励强度 D_s 为 204 时,中部高气膜冷却效率区域面积明显增大,凹槽底部面积平均气膜冷却效率相比于无激励工况提升了 25.11%。

表 5 不同激励强度下凹槽底部平均气膜冷却效率及其相对无激励工况提升值

Table 5 The $\bar{\eta}$ on the cavity floor and its improvement relative to the no-actuation condition for different plasma actuation strength

D_s	$\bar{\eta}/\%$	相对无激励工况 $\bar{\eta}$ 提升值/%
无激励	3.115	
132	3.427	10.02
156	3.523	13.11
180	3.615	16.07
204	3.897	25.11

2.1.2 凹槽叶顶三维流线图

图 9 为不同激励强度下凹槽叶顶三维流线图,在无激励工况时凹槽底部区域 A 处冷气汇集,在 A 处形成了高气膜冷却效率区。在激励强度 D_s 为 132 时在凹槽底部尾缘处形成高气膜冷却效率区域 B ,此时中部冷气在较低激励强度下还未对尾缘冷气造成卷吸吹离作用,尾缘区域得到了较好的气膜冷却性能。

随着激励强度逐渐增大,中部冷气与尾缘冷气发生掺混,将尾缘冷气带离凹槽底部区域,造成凹槽底部尾缘高气膜冷却效率区域 B 消失;同时,激励强度的增大也使得中部气膜冷却性能改善,冷气在等离子体激励力作用下在中部汇集。在激励强度 D_s 为 204 时,中部冷气汇集在凹槽底部区域 C ,在凹槽中部形成了很好的冷气覆盖,极大地改善了凹槽中部区域的气膜冷却性能。

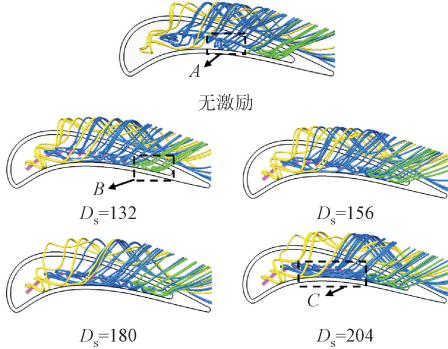


图 9 不同激励强度下凹槽叶顶的三维流线
Fig. 9 Three-dimensional streamlines in squealer tip with different plasma actuation strength

2.1.3 凹槽叶顶速度截面图和流线图

图 10 为不同激励强度下各流向截面上的速度云图和流线图。在 H1、H3、H5、H7 和 H11 气膜孔下游分别设置截面,沿流向分别命名为截面 1~5。对于无激励工况,在截面 1 处形成了两个小尺寸漩涡,漩涡位置靠近腔室压力面侧附近,但漩涡并未接触凹槽底部;截面 2 处在整个凹槽区域内有大尺度漩涡分布,与凹槽底部接触面积较大,气膜冷却性能较好;截面 3、4 和 5 处漩涡均在凹槽压力面侧内壁面处汇集,与凹槽底部接触面积进一步扩大,冷气在压力面侧凹槽底部形成了良好覆盖。

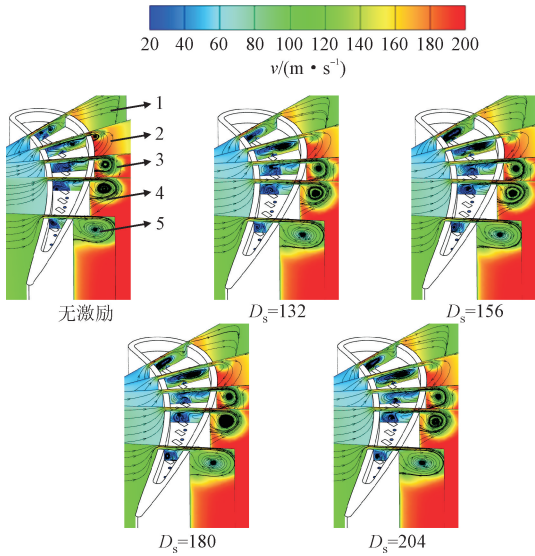


图 10 不同激励强度下各流向截面上的速度云图和流线图
Fig. 10 Velocity contours and streamlines on streamwise cutplanes with different plasma actuation strength

在加入等离子体激励作用后,在截面 1 处漩涡汇集并且尺寸明显增大,漩涡与凹槽底部接触长度相比于无激励工况显著增大;但随着激励强度的增大,漩涡大小与凹槽底部接触长度无明显变化,说明增大激励强度不能有效改善 H1 气膜孔的气膜冷却性能。在截面 3 处,与无激励工况相比,随着激励强度逐渐增大,漩涡尺寸逐渐减小,与凹槽底部接触长度也逐渐减小,在压力面侧凹槽底部区域气膜冷却效果较差。在截面 4 处,随着激励强度逐渐增大,涡系远离凹槽内壁面的趋势愈加明显,说明激励强度增大会导致上游冷气卷吸吹离下游冷气,但漩涡与凹槽底部的接触长度几乎没有变化,在凹槽底部中部的气膜冷却性能均较好。

2.2 激励频率对凹槽叶顶气膜冷却性能的影响

文献[18]研究结果表明,外加电压的频率是影响等离子体激励的重要因素。因此本节在激励强度

$D_s = 156$ 、吹风比 $M = 1$ 的条件下,研究激励频率 D_0 为 6.25、7.5 和 8.75 工况下的凹槽叶顶气膜冷却性能。

2.2.1 凹槽叶顶气膜冷却效率分布

图 11 为不同激励频率下凹槽叶顶气膜冷却效率云图,在激励频率 $D_0 = 6.25$ 时在凹槽底部尾缘存在高气膜冷却效率区域 C,这是因为前缘和中部的冷气均未对尾缘冷气造成卷吸吹离作用,尾缘冷气从气膜孔中流出后覆盖在凹槽底部,形成了较高气膜冷却效率区域。随着激励频率逐渐增大,凹槽中部高气膜冷却效率区域 B 面积逐渐增大,尾缘处高气膜冷却效率区域 C 面积逐渐减小,这与激励强度增大时凹槽底部气膜冷却性能变化规律一致。在激励强度 $D_0 = 8.75$ 时,在凹槽中部形成了面积较大的高气膜冷却效率区域 D,同时凹槽底部整体气膜冷却性能较好。

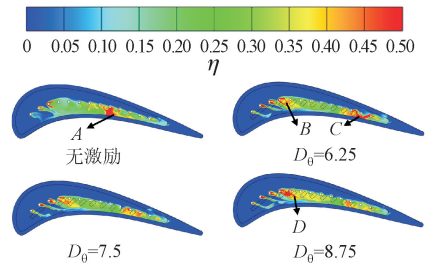


图 11 不同激励频率下凹槽叶顶气膜冷却效率云图
Fig. 11 Film cooling effectiveness contours on squealer tip with different plasma actuation frequency

图 12 为不同激励频率下凹槽底部节距平均气膜冷却效率,增大激励频率,凹槽中部气膜冷却效率上升,凹槽底部整体气膜冷却性能改善。

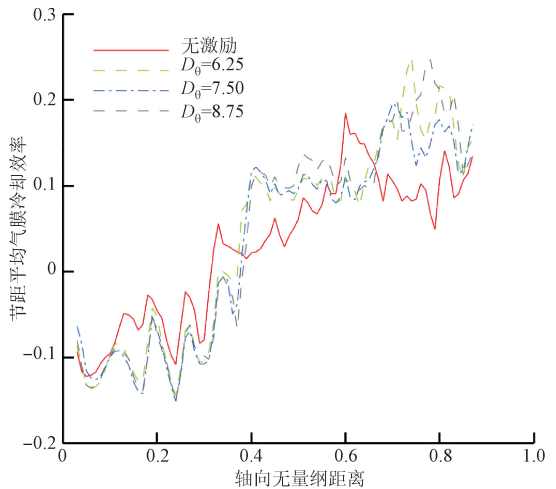


图 12 不同激励频率下凹槽底部节距平均气膜冷却效率
Fig. 12 Pitch-averaged film cooling effectiveness on the cavity floor with different plasma actuation frequency

表 6 为不同激励频率下凹槽底部平均气膜冷却效率及其相对无激励工况提升值,从表 6 中可以看出,激励频率 $D_0=6.25$ 时凹槽底部平均气膜冷却效率相比于无激励工况提升了 28.71%。激励频率 $D_0=8.75$ 时,凹槽底部平均气膜冷却效率相比于无激励工况提升了 29.27%。

表 6 不同激励频率下凹槽底部平均气膜冷却效率及其相对无激励工况提升值

Table 6 The $\bar{\eta}$ on the cavity floor and its improvement relative to the no-actuation condition for different plasma actuation frequency

D_0	$\bar{\eta}/\%$	相对无激励工况 $\bar{\eta}$ 提升值/%
无激励	3.115	
6.25	4.009	28.71
8.75	4.026	29.27

2.2.2 凹槽叶顶三维流线图

图 13 为不同激励频率下凹槽叶顶三维流线图,在无激励工况下凹槽中部冷气在区域 A 处汇集,形成高气膜冷却效率区域,在激励频率 $D_0=6.25$ 时,等离子体激励力较小,前缘和中部的冷气还未对尾缘处冷气造成影响,尾缘区域冷气流出气膜孔后覆盖在凹槽底部区域 B,在 B 区域形成了高气膜冷却效率区,随着激励频率增大上游冷气与尾缘处冷气发生掺混,尾缘冷气还未在凹槽底部展开便流出凹槽区域,高气膜冷却效率区域 B 消失。

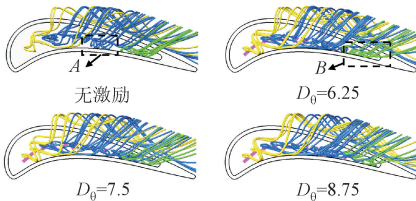


图 13 不同激励频率下凹槽叶顶三维流线图
Fig. 13 Three-dimensional streamlines in squealer tip with different plasma actuation frequency

2.2.3 凹槽叶顶速度截面图和流线图

图 14 为不同激励频率下各流向截面上的速度云图和流线图,沿流向截面的位置和命名规则与 2.1.3 节中保持一致。增大激励频率对凹槽内涡系位置和大小影响与激励强度相类似,增大激励频率会导致截面 1 处的漩涡向压力面侧靠拢,增加漩涡与凹槽底部的接触长度,截面 4 处漩涡逐渐远离压力面侧,上游冷气对中部冷气的卷吸吹离作用随激励频率的增大而增强。

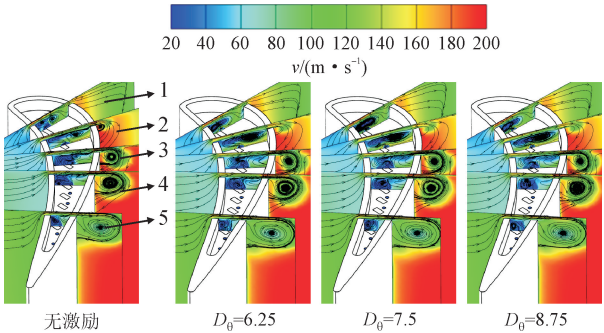


图 14 不同激励频率下各流向截面上的速度云图和流线图
Fig. 14 Velocity contours and streamlines on streamwise cutplanes with different plasma actuation frequency

2.3 等离子体控制策略的改进

在不同等离子体激励强度下凹槽叶顶气膜冷却性能的研究中发现:不同激励强度对凹槽底部前缘、中部和尾缘区域的气膜冷却性能影响不同。本节提出一种改进的等离子体控制策略:将凹槽底部 H1~H4 气膜孔、H5~H8 气膜孔和 H9~H11 气膜孔附近区域划分为前缘区域、中部区域和尾缘区域,分别对 3 个区域施加不同激励强度的等离子激励,命名为改进组。改进组的前缘区域施加激励强度 $D_s=180$ 、中部区域施加激励强度 $D_s=204$ 、尾缘区域施加激励强度 $D_s=228$ 。激励频率与吹风比保持为 $D_0=7.5$ 和 $M=1$ 不变。选取无激励工况和 2.1 节中凹槽底部激励强度 $D_s=204$ 工况作为参考对象,对改进组提升气膜冷却性能效果进行分析。

2.3.1 凹槽叶顶气膜冷却效率分布

图 15 为改进组与无激励和 $D_s=204$ 工况凹槽叶顶气膜冷却效率云图对比。从图 15 中可以看出,

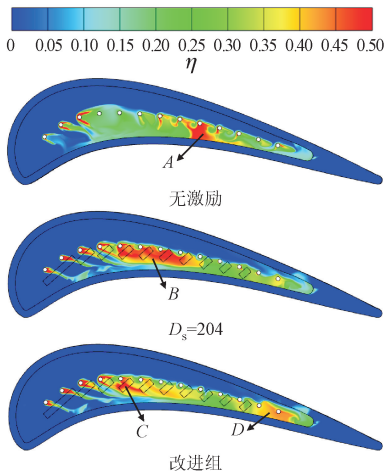


图 15 改进组与无激励和 $D_s=204$ 工况凹槽叶顶气膜冷却效率云图对比
Fig. 15 Comparison of film cooling effectiveness contours on squealer tip in improvement group with no-actuation condition and $D_s=204$ condition

在无激励时,凹槽底部高气膜冷却效率区域 A 位于中部偏尾缘位置;激励强度 $D_s = 204$ 时高气膜冷却效率区域 B 位于凹槽中部位置,且覆盖面积较大;改进组的高气膜冷却效率区域 C 和 D 分别位于中部偏前缘和尾缘位置,相比于其他两组工况,改进组的高气膜冷却效率区域位置变化,面积也相应增大。图 16 为改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况凹槽叶顶节距平均气膜冷却效率对比。从图 16 中可以看出,改进组与 $D_s = 204$ 工况在凹槽中部的气膜冷却效率相近,中部气膜冷却效率相比于无激励工况均显著增大;而在尾缘处改进组的气膜冷却效率相比 $D_s = 204$ 工况得到了极大提升,整体气膜冷却性能最好。

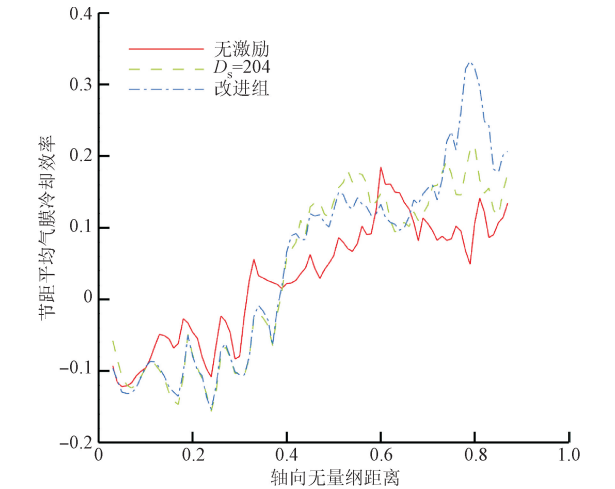


图 16 改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况凹槽叶顶节距平均气膜冷却效率对比

Fig. 16 Comparison of pitch-averaged film cooling effectiveness on squealer tip in improvement group with no-actuation condition and $D_s = 204$ condition

表 7 为改进组凹槽底部平均气膜冷却效率及其相对无激励工况提升值,从表 7 中可以看出,改进组相比无激励工况和 $D_s = 204$ 工况凹槽底部平均气膜冷却效率分别提升了 39.12% 和 11.20%。

表 7 改进组凹槽底部平均气膜冷却效率及其相对无激励工况提升值

Table 7 The $\bar{\eta}$ on the cavity floor and its improvement relative to the no-actuation condition for improvement group

工况	$\bar{\eta}/\%$	相对无激励工况 $\bar{\eta}$ 提升值/ $\%$
无激励	3.115	
$D_s = 204$	3.897	25.11
改进组	4.333	39.12

2.3.2 凹槽叶顶三维流线和速度截面图

图 17 为改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况凹槽

叶顶三维流线图对比。从图 17 中可以看出,无激励工况下在区域 A 处形成了较好的气膜覆盖区域;激励强度均为 $D_s = 204$ 时在凹槽中部区域 B 形成了较好的冷气覆盖区域,而改进组冷气既在凹槽中部区域 B 处形成了良好的气膜覆盖,尾缘区域 C 处也几乎没有受到上游冷气入侵导致的卷吸吹离,改善了凹槽底部整体的气膜冷却性能。

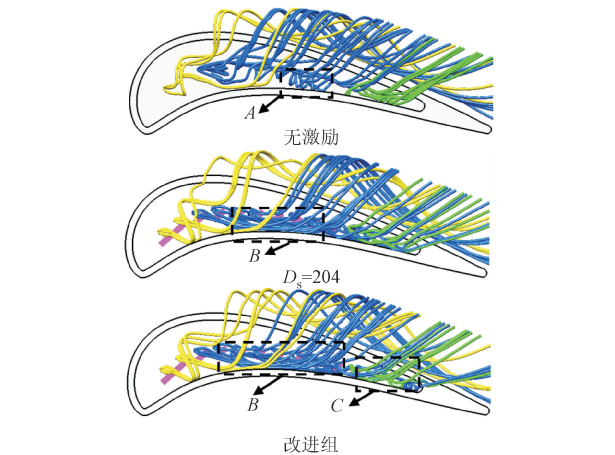


图 17 改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况凹槽叶顶三维流线图对比

Fig. 17 Comparison of three-dimensional streamlines in squealer tip in improvement group with no-actuation condition and $D_s = 204$ condition

图 18 为改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况各流向截面上速度云图和流线图对比,沿流向截面的位置和命名规则与 2.1.3 节中保持一致。从图 18 中可以看出,改进组与整体激励强度均为 $D_s = 204$ 的工况截面 1、2、3 和 4 处涡系结构和位置基本相同,在截面 5 处改进组漩涡尺寸略微缩小,更加靠近凹槽压力面侧内壁面。

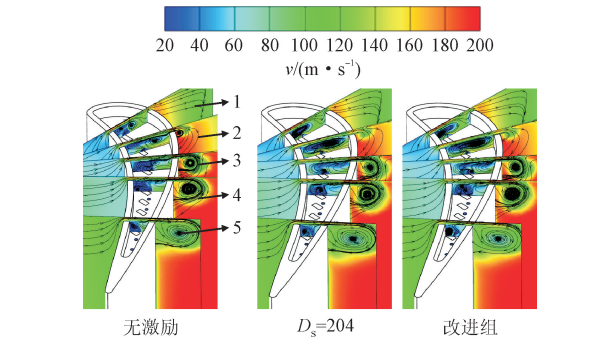


图 18 改进组与无激励和 $D_s = 204$ 工况各流向截面上速度云图和流线图对比

Fig. 18 Comparison of velocity contours and streamlines on streamwise cutplanes in improvement group with no-actuation condition and $D_s = 204$ condition

2.4 总压损失分析

叶栅气动性能是决定叶片工作效率的关键物理量,本节通过分析轴向截面处的总压损失 P_L 来探究等离子体激励对叶栅的气动性能是否有影响。轴向切面所在位置如图 19 所示,轴向截面位于叶片尾缘下游 $Z=10\text{ mm}$ 处。

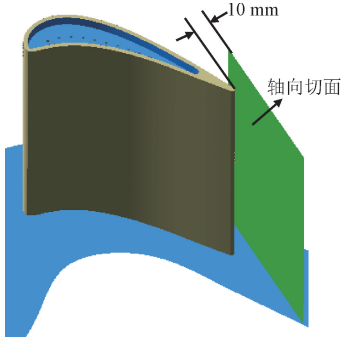


图 19 轴向切面所在位置
Fig. 19 Position of special axial section

表 8 为不同工况下轴向截面平均总压损失对比,各工况相比于无激励工况总压损失 P_L 变化均较小,激励频率 $D_0=8.75$ 时达到最大相对变化量 2.81%。各工况总压损失相比无激励工况均略有上升,总体上认为总压损失不随等离子体激励的激励强度和激励频率的变化而变化,等离子体激励对叶栅的气动性能几乎无影响。

表 8 不同工况下轴向截面平均总压损失对比
Table 8 Comparison of average total pressure loss of section under different operating conditions

工况	总压损失 P_L	相对无激励工况 P_L 提升值/%
无激励	0.092 94	
$D_s=132$	0.094 09	1.24
$D_s=180$	0.094 80	2.00
$D_0=6.25$	0.094 26	1.42
$D_0=8.75$	0.095 55	2.81
改进组	0.094 03	1.17

图 20 为不同激励参数轴向截面的总压损失对比云图,可以看出泄漏涡、上通道涡和下通道涡的大小和位置均无明显变化,可以认为等离子体激励对叶栅的气动性能基本无影响。

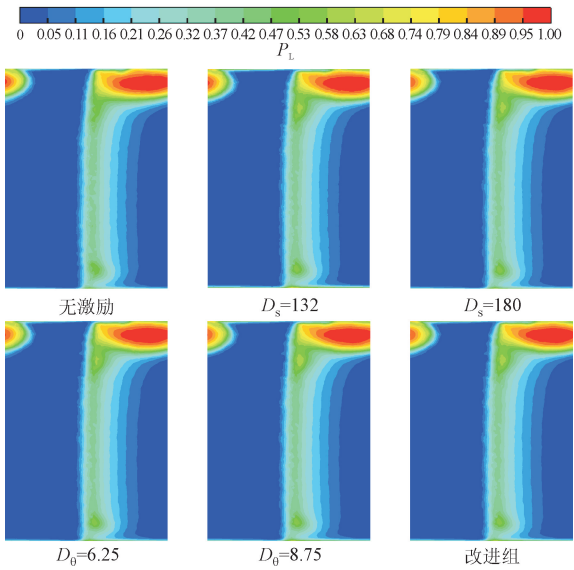


图 20 不同激励参数轴向截面的总压损失对比云图
Fig. 20 Total pressure loss contours of axial section with different plasma actuation parameters

3 结 论

本文采用数值方法研究了等离子体激励作用于凹槽叶顶时,激励参数对凹槽叶顶的气膜冷却性能和叶栅气动性能的影响机制,探索了一种改善凹槽底部冷却气膜覆盖的非均匀等离子体控制策略,分析了等离子体激励对叶顶间隙内冷热气流的影响规律,主要结论如下。

(1)激励强度显著影响凹槽底部的气膜冷却性能。激励强度较小时,前缘和中部冷气未对尾缘冷气造成卷吸吹离作用,尾缘处气膜冷却效果较好,激励强度 $D_s=132$ 时凹槽底部平均气膜冷却效率相比于无激励工况提升了 10.02%;随着激励强度逐渐增大,尾缘冷气被上游冷气卷吸吹离凹槽区域,但中部冷气在等离子体激励作用下较好地覆盖在凹槽底部,在凹槽中部形成了高气膜冷却效率区,激励强度 $D_s=204$ 时,凹槽底部平均气膜冷却效率相比无激励工况提升了 25.11%。

(2)激励频率对凹槽底部气膜冷却性能影响剧烈。与激励强度对流场的影响规律类似,增大激励频率也会使尾缘高气膜冷却效率区域面积减小,中部高气膜冷却效率区域面积增大,激励频率 $D_0=6.25$ 和 $D_0=8.75$ 时凹槽底部平均气膜冷却效率相比于无激励工况分别提升了 28.71%和 29.27%。

(3)在改变激励强度时发现,施加不同大小的均匀激励强度不能同时改善凹槽底部前缘、中部和尾缘

区域的气膜冷却性能,因此提出分区域施加非均匀激励强度的改进方法。研究发现改进后非均匀激励强度的工况相比无激励工况下,凹槽底部平均气膜冷却效率提升了 39.12%,获得了更好的气膜冷却性能。施加等离子体激励对叶栅总压损失基本无影响。

参考文献:

- [1] BUNKER R S. Axial turbine blade tips: function, design, and durability [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 271-285.
- [2] 戴萍, 林枫. 燃气轮机叶片气膜冷却研究进展 [J]. *热能动力工程*, 2009, 24(1): 1-6.
DAI Ping, LIN Feng. Recent advances in the study of air-film-cooled gas turbine blades [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2009, 24(1): 1-6.
- [3] 于金杏, 叶明亮, 何坤, 等. 压力侧冷却流对凹槽叶顶气膜冷却与传热性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 160-172.
YU Jinxing, YE Mingliang, HE Kun, et al. Effect of pressure-side cooling flow on film cooling and heat transfer performance at squealer tip [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 160-172.
- [4] 于金杏, 叶明亮, 晏鑫. 发动机工况下透平级凹槽叶顶冷却传热性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(7): 106-116.
YU Jinxing, YE Mingliang, YAN Xin. Investigations on the heat transfer and film cooling effect at squealer tip of a turbine stage under engine conditions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(7): 106-116.
- [5] CHENG Fengna, ZHANG Jingzhou, CHANG Haiping, et al. Investigations of film-cooling effectiveness on the squealer tip with various film-hole configurations in a linear cascade [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117: 344-357.
- [6] 黄琰, 晏鑫, 何坤, 等. 气膜孔分布对凹槽叶顶传热和冷却性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(5): 101-107.
HUANG Yan, YAN Xin, HE Kun, et al. Effect of cooling-hole distributions on heat transfer and cooling effectiveness on turbine blade tip [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(5): 101-107.
- [7] JEONG J Y, KIM W, KWAK J S, et al. Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on the partial cavity tip of a gas turbine blade [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(7): 071007.
- [8] 吴琛琦, 何坤, 晏鑫. 透平级带压力侧小翼凹槽叶顶的传热与气膜冷却性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 147-159.
WU Chenqi, HE Kun, YAN Xin. Investigation into heat transfer and film cooling performance at pressure-side winglet-squealer tip in a turbine stage [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 147-159.
- [9] WANG Haichao, TAO Zhi, ZHOU Zhiyu, et al. A study for the film cooling performance on the turbine blade suction side tip region under rotating conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138: 483-495.
- [10] PATEL M P, SOWLE Z H, CORKE T C, et al. Autonomous sensing and control of wing stall using a smart plasma slat [J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 516-527.
- [11] CHOI K S, JUKES T, WHALLEY R. Turbulent boundary-layer control with plasma actuators [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1940): 1443-1458.
- [12] SHYY W, JAYARAMAN B, ANDERSSON A. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(11): 6434-6443.
- [13] SUJAR-GARRIDO P, BECERRA M, ÖRLÜ R. Efficiency assessment of a single surface dielectric barrier discharge plasma actuator with an optimized Suzen-Huang model [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(4): 047110.
- [14] SUZEN Y B, HUANG P G, JACOB J D, et al. Numerical simulations of plasma based flow control applications [C]//35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: AIAA 2005-4633.
- [15] 黄悦峰, 张子寒, 何坤, 等. 单介阻挡放电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 single dielectric barrier discharge plasma actuation on film cooling effect at plain surface [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(11): 26-36.
- [16] 黄悦峰, 张子寒, 何坤, 等. 介质阻挡放电涡发生器等离子体激励条件下壁面气膜冷却性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(3): 37-45.
HUANG Yuefeng, ZHANG Zihan, HE Kun, et al. Investigations of the film cooling characteristics on the wall surface with dielectric barrier discharge-vortex generators plasma actuation [J]. *Journal of Xi'an Jiao-*

- tong University, 2021, 55(3): 37-45.
- [17] KUMAR S, SINGH O. Thermodynamic evaluation of gas/steam combined cycle performance with active controlled film cooling [J]. Distributed Generation & Alternative Energy Journal, 2014, 29(1): 49-60.
- [18] DOUVILLE T, STEPHENS J, CORKE T, et al. Turbine blade tip leakage flow control by partial squealer tip and plasma actuators [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-20.
- [19] LI Guozhan, YU Jianyang, CHEN Fu, et al. Large eddy simulation of saw tooth plasma actuator for improving film cooling efficiency [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2017, 231(5): 357-370.
- [20] 李国占, 刘华坪, 陈浮, 等. 不同射流角下等离子体激励对平板气膜冷却影响的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2088-2094.
- LI Guozhan, LIU Huaping, CHEN Fu, et al. Numerical analysis of flat plate film cooling characteristics at various streamwise angles based on plasma actuation [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2088-2094.
- [21] 张倩, 何立明, 肖阳, 等. 等离子体激励器对气膜冷却效率的影响 [J]. 实验流体力学, 2015, 29(6): 28-34.
- ZHANG Qian, HE Liming, XIAO Yang, et al. Numerical simulation of film cooling effectiveness with plasma actuator [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(6): 28-34.
- [22] DAI Shengji, XIAO Yang, HE Liming, et al. Computational study of plasma actuator on film cooling performance for different shaped holes [J]. AIP Advances, 2015, 5(6): 067104.
- [23] HALILA E E, THOMSD L D. High pressure turbine test hardware detailed design report; CR-167955[R]. Ohio, USA: NASA, 1985.
- [24] KWAK J S, HAN J C. Heat transfer coefficients and film cooling effectiveness on the squealer tip of a gas turbine blade [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(4): 648-657.
- [25] 俞建阳. DBD 等离子体诱导涡结构控制附面层流动研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 29-31.

(编辑 武红江)