

DOI: 10.7652/xjtuxb201811010

喷嘴周向位置和旋流腔拔模斜度 对旋流冷却的影响

王杰枫^{1,2}, 杜长河^{1,2}, 吴凡^{1,2}, 范小军^{1,2}, 李亮^{1,2}

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 陕西省叶轮机械及动力装备工程实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究喷嘴周向位置及旋流腔拔模斜度对旋流冷却流动和传热特性的影响,探究综合性能更为优良的冷却结构,建立了适用于叶片前缘的旋流冷却模型。在验证了湍流模型的前提下,采用CFD方法对不同模型的流动换热特性进行了对比分析。结果表明:冷气从进口射入旋流腔,形成高速旋转运动;冷气的三维流线沿轴向先径向收缩后径向扩张。喷嘴周向位置改变时,高速旋流区和低速旋流区的相对位置改变,并且高 Nu 区域的周向位置改变。对于叶根进气的情况,拔模斜度增大时,高速旋流区面积增加,低速旋流区面积减小,并且压力系数减小;当拔模斜度为正值时,压力系数沿轴向降低;拔模斜度为负值时,压力系数沿轴向升高,高 Nu 区域面积随着拔模斜度的增加而增加。叶根进气时,以拔模斜度为 -1° 时为参考值,拔模斜度增大至 1° 时,换热强度提高了9.1%,靶面传热量增加了8.4%,摩擦因数减小了4.1%,综合换热因数提升了8.8%。本文研究分析了不同几何参数下的旋流冷却流动和换热特性,以期为实际叶片前缘冷却结构的设计提供一定的理论参考。

关键词: 旋流冷却;喷嘴周向位置;旋流腔拔模斜度;综合换热因数

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0065-08

Effects of Jet Nozzle Circumferential Position and Vortex Chamber Draft Angle on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Vortex Cooling

WANG Jiefeng^{1,2}, DU Changhe^{1,2}, WU Fan^{1,2}, FAN Xiaojun^{1,2}, LI Liang^{1,2}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery and Power Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of jet nozzle circumferential position and vortex chamber draft angle were numerically investigated based on the vortex cooling model suitable for blade leading edge. With the verified turbulence model, the CFD method was carried out to analyze and compare the flow and heat transfer behaviors of different cooling models. Results showed that high speed rotational flow is formed by the cooling air injected from the nozzles. The cooling air's three-dimensional streamlines first shrink and then expand radially along the axial direction. When the jet nozzle circumferential position changes, the relative position of high speed vortex region and low speed vortex region may also change, and the position of high Nusselt number region alters circumferentially. When inlet is on the shroud side, the area of high speed vortex region is enlarged and the area of low speed vortex region is contracted with the vortex chamber draft angle. Moreover, the pressure coefficient decreases as the vortex chamber draft angle increases. When the vortex chamber draft angle is positive, the pressure coefficient increases along the axial

direction; when the vortex chamber draft angle is negative, the pressure coefficient decreases along the axial direction. If the vortex chamber draft angle is set -1° as the reference, when the vortex chamber draft angle is increased to 1° , the heat transfer intensity is increased by 9.1%, the wall heat flux is increased by 8.4%, the friction factor is decreased by 4.1% and the comprehensive thermal performance coefficient is increased by 8.8% compared with their corresponding reference values. The flow and heat transfer characteristics of the vortex cooling under different geometrical parameters investigated in this paper, and aims to provide references for designing practical blade tip cooling structures.

Keywords: vortex cooling; jet nozzle circumferential position; vortex chamber draft angle; comprehensive thermal performance coefficient

随着军用和民用飞机性能的不断提高,航空发动机的输出功率不断提高,这使得涡轮进口燃气温度不断提高,目前已达到 2 000 K 的高温,远远超过了叶片材料的耐热极限^[1],尤其是叶片前缘,承受着最高的热负荷。为保护叶片不受高温燃气的破坏,必须采用高效的冷却方式,叶片前缘的旋流冷却技术具有换热分布均匀、受横流冲击影响小等特点。研究不同条件下旋流冷却的流动换热特性已成为叶轮机械领域的重要课题。

Ligrani 等建立了带有双进口及单出口的圆管通道模型,通过实验对圆管内的 Gortler 涡系进行了研究,并首次应用了流动可视化技术^[2]。Qian 等通过透平尾缘冷却实验研究了 Gortler 涡系和轴向横流对旋流冷却换热的影响^[3]。Glezer 等通过叶片前缘单进口切向射流实验发现,旋流冷却的换热效果优于带气膜孔的冲击冷却^[4]。Hwang 等实验研究了三棱柱旋流腔内的旋流冷却特性^[5]。Ling 等实验研究了切向射流条件下圆管内的流动换热情况,并与典型的冲击射流进行了对比^[6]。Kusterer 等研究了双旋流冷却的换热机理,相关实验在双圆管结合的改型旋流腔内进行^[7]。Liu 等通过数值模拟方法研究了喷嘴长宽比和射流角度对圆管内旋流冷却换热和流动的影响^[8]。Du 等通过数值模拟研究了喷嘴长宽比对旋流冷却流动与换热特性的影响,发现冷气速度和湍流动能在长宽比为 1 时达到峰值^[9]。Du 等分析了雷诺数和温比对旋流冷却换热和流动的影响^[10]。Fan 等对比分析了冲击冷却、旋流和双旋流结构的流动特性和换热效果^[11]。Fan 等研究了气膜孔几何位置对旋流冷却流动与换热特性的影响,结果表明气膜孔的存在增加了整体换热强度并均衡了整体压力分布^[12]。Du 等采用数值模拟方法,探究了旋转半径和叶片安装角对动叶旋流冷却的影响,发现哥氏力显著降低了传热强度^[13]。

Rao 等应用瞬态液晶显示技术研究了单喷嘴和五喷嘴圆管通道内的换热特性,发现五喷嘴冷却结构具有更加均匀的换热分布,但换热强度峰值低于单喷嘴的^[14]。Luan 等通过数值方法研究了进气腔几何参数及喷嘴数目对旋流冷却流动结构的影响^[15]。

目前,对于旋流冷却的研究主要集中于气动参数及喷嘴几何参数对流动、换热特性的影响,而对喷嘴周向位置影响的研究鲜有发表。以往研究的旋流冷却结构中,喷嘴位于旋流腔同侧,而在实际的涡轮叶片中,由于喷嘴周向位置发生变化,会对旋流冷却的流动和换热特性造成影响,研究喷嘴周向位置对旋流冷却特性的影响具有重要工程应用参考价值。以往研究大多基于等截面旋流腔模型,在实际大功率涡轮中,进口导叶存在变截面的情况,研究变截面条件下旋流冷却的流动和传热特性有着重要的科研和工程意义。因此,本文参考文献[6]的实验结构,建立了喷嘴不同周向位置 and 不同拔模斜度的冷却结构模型,通过数值方法研究了喷嘴周向位置和拔模斜度对旋流冷却影响。研究分析不同几何参数下的旋流冷却流动和换热特性,以期为实际叶片前缘冷却结构的设计提供参考。

1 计算模型和数值方法

为探究冷却结构的几何参数对旋流冷却的影响,本文参考文献[11],分别建立了喷嘴不同周向位置 and 不同旋流腔拔模斜度(下文称拔模斜度)的冷却结构模型。定义不同周向位置下喷嘴所成几何角度为 α ,定义拔模斜度

$$\beta = \arctan \frac{X}{H} \quad (1)$$

式中: X 为旋流腔两端面半径之差; H 为旋流腔的轴向长度。

拔模斜度和 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置的模型

结构示意图如图 1、图 2 所示。当旋流腔的截面积从叶根至叶顶增加时,拔模斜度 β 为负值;当旋流腔的截面积从叶根至叶顶减小时,拔模斜度 β 为正值。保持进口 1 处喷嘴的周向位置 α 不变,通过改变进口 2 处喷嘴的周向位置,获得了 $\alpha=0^\circ、90^\circ、180^\circ、270^\circ$ 这 4 种不同工况下的条件。

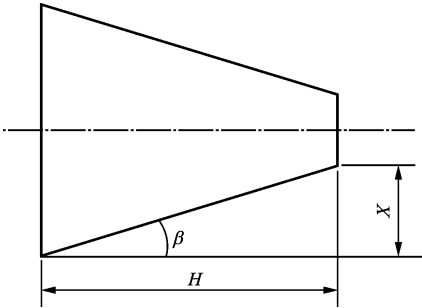
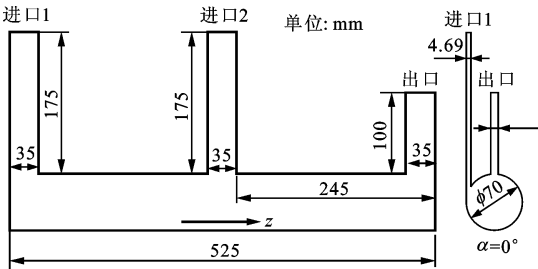


图 1 拔模斜度示意图



(a) $\alpha=0^\circ$

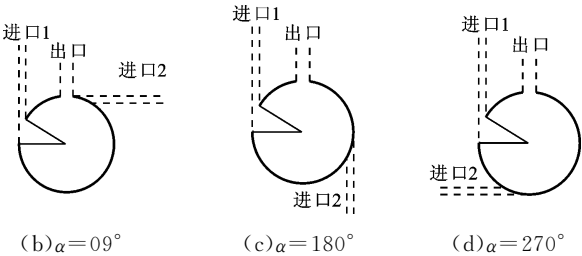
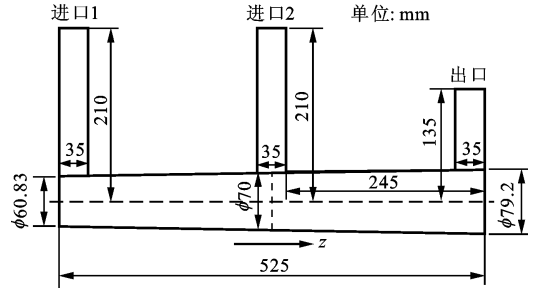


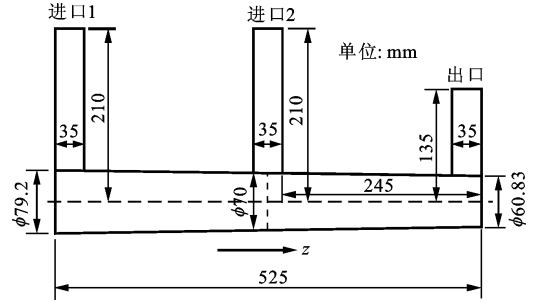
图 2 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置的模型结构

不同拔模斜度条件下旋流腔中部截面积保持不变,即不同模型在 $Z=262.5\text{ mm}$ 处的截面直径皆为 70 mm ,以保证对比研究的准确性。对 $\beta=-1^\circ、-0.5^\circ、0^\circ、0.5^\circ$ 和 1° 这 5 种工况进行研究,并保证所有工况条件下 $\alpha=0^\circ$ 。以拔模斜度 $\beta=-1^\circ、1^\circ$ 为例,图 3 给出了 2 种工况下拔模斜度的模型结构示意图。

图 4 给出了 $\alpha=0^\circ、\beta=0^\circ$ 时的网格划分示意图,使用商用软件 ICEM 对不同几何参数的冷却结构进行了网格划分,并应用了 H 型、O 型和 Y 型网格划分技术。在壁面边界层处进行加密处理,保证计算过程中 y^+ 接近 1。使用商用软件 ANSYS 12.1 进行求解,求解的控制方程为稳态 RANS 方程和标



(a) $\beta=-1^\circ$



(b) $\beta=1^\circ$

图 3 $\alpha=0^\circ$ 时不同拔模斜度 β 的模型结构

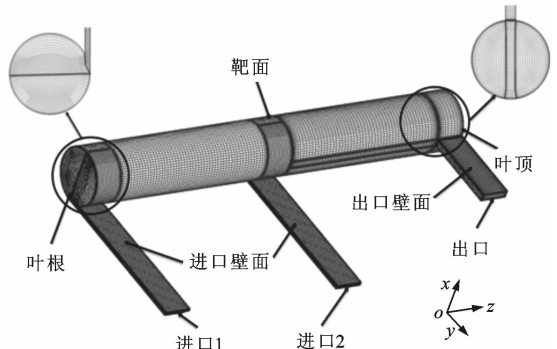


图 4 $\alpha=0^\circ、\beta=0^\circ$ 时的网格划分示意图

准 $k-\omega$ 湍流模型方程。设置求解精度为二阶,收敛条件为残差下降至 1×10^{-6} 以下。工质采用理想气体,设定边界条件是:靶面温度为 500 K ,其他壁面均为绝热壁面,所有壁面光滑无滑移;进口总温为 350 K ,湍流强度为 5% ;出口静压力为 0.11 MPa 。为表征进口冷气状态,定义进口雷诺数为

$$Re_{in} = \rho V_{in} D_{in} / \mu \tag{2}$$

式中: V_{in} 为进口冷气速度; D_{in} 为进口截面水力直径; ρ 为进口冷气平均密度; μ 为进口冷气平均动力黏度。

对于不同的喷嘴周向位置工况和不同的拔模斜度工况,给定所有工况下 $Re_{in}=20\ 000$ 。

为表征换热强度,定义努塞耳数

$$Nu = \frac{q_w D}{\lambda (T_w - T_{in})} \tag{3}$$

式中: q_w 为热流密度; λ 为导热系数; T_w 为靶面温度; T_{in} 为冷气进口温度; D 为冷却结构的特征尺度。为便于分析比较, 所有工况条件下 $D=70\text{ mm}$ 。

为表征压力变化规律, 定义冷气的压力系数

$$C_p = \frac{P - P_{out}}{P_{in} - P_{out}} \quad (4)$$

式中: P 为冷气静压力; P_{in} 为进口总压; P_{out} 为出口静压力。

为保证数值模拟的准确性, 本文进行了网格无关性分析, 结果如图5所示, 横坐标为无量纲轴向长度 $Z \cdot D^{-1}$ 。由图5可知, 网格数量大于404万时, 计算结果不再受网格数量的影响, 最终确定数值计算所采用的网格数为404万。

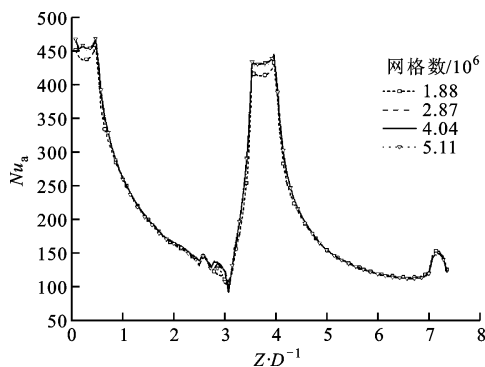


图5 网格无关性分析

数值模拟方法能可靠地对待研究问题并进行模拟分析, 可再现极端工况条件, 但数值模拟方法建立在理论分析基础上, 要与实验相结合才能得到最为真实可信的结论。旋流冷却模型基于文献[6]的实验模型而建立, 本文参考文献[10]并对文献[6]的数值进行验证, 结果如图6所示, 横轴为无量纲轴向长度 $X \cdot r^{-1}$ 。由图6可知, 标准 $k-\omega$ 湍流模型下的数值模拟结果与实验结果吻合得最好, 因此采用标准 $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟计算。

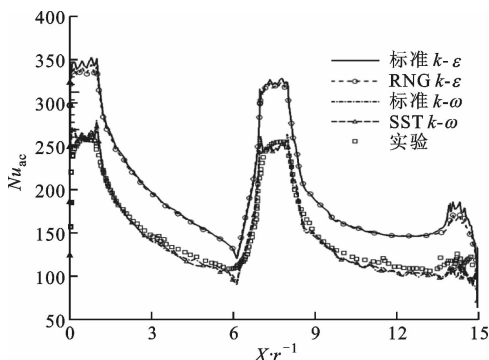


图6 数值模拟验证结果

2 结果分析

2.1 喷嘴周向位置的影响

本节选取了 $\beta=0^\circ$ 时, 喷嘴周向位置 $\alpha=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 这4种工况进行分析。图7给出了 $\beta=0^\circ$ 时, $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时的三维流线图。由图7可知, 冷气由进口1射入旋流腔后形成了大尺度的旋转运动, 而后冷气向下游运动, 由于摩擦损失导致冷气的周向速度降低, 使得冷气所受离心力减小, 三维流线径向收缩。经过进口2后, 冷气周向速度增加, 使得流线的径向收缩现象受到抑制, 并且冷气轴向速度增加, 横流冲击作用增强, 使得流线在进口2后沿轴向拉伸。随着冷气接近出口, 压力梯度升高, 使得冷气流动速度增加, 三维流线径向扩张。 $\alpha=180^\circ$ 时三维流线的轴向拉伸现象比 $\alpha=0^\circ$ 时更明显, 这说明 $\alpha=180^\circ$ 时冷气受到的横流冲击作用更强。

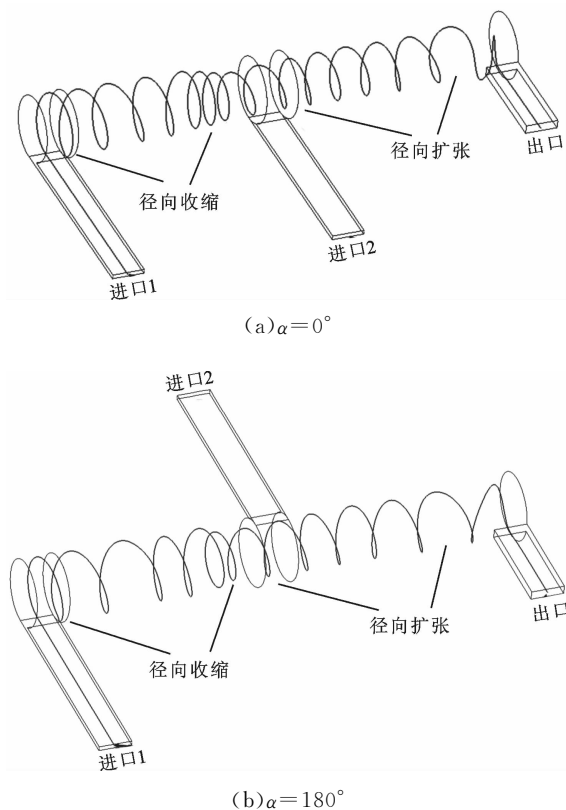


图7 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置 α 的三维流线图

图8给出了 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置的 XY 截面流线和速度云图。由图8可知, 在相同轴向位置, α 发生变化时, 高速和低速旋流区的位置发生了改变, 高速和低速旋流区的区域面积几乎不随 α 变化, 这是由冷气入射角度改变造成的。表1给出了 α 的 XY 截面平均周向速度, 可知截面平均周向速度大小几乎不随 α 变化。

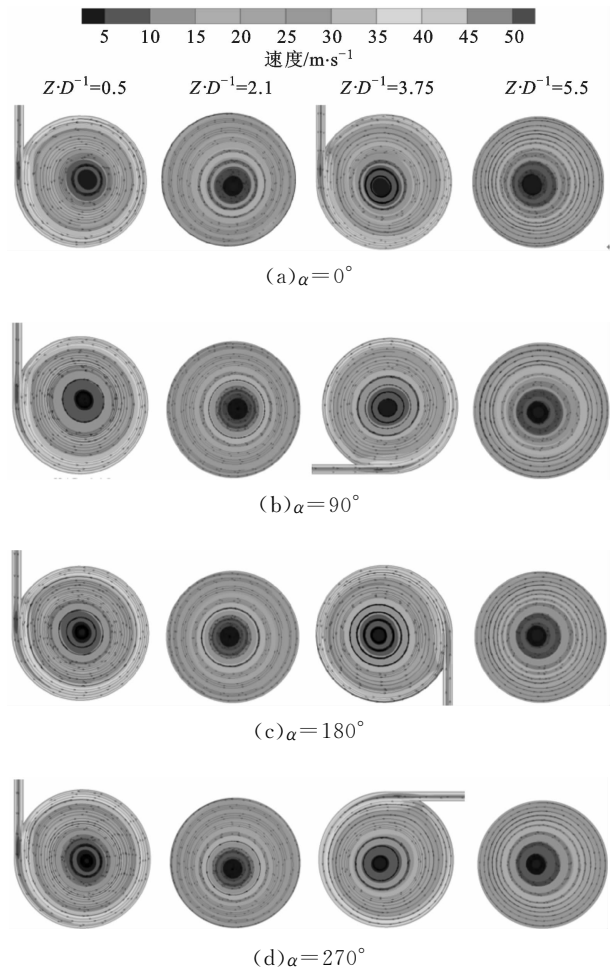


图 8 $\beta=0^\circ$ 时不同 α 的 XY 截面流线和速度云图

参数	$\alpha/(^\circ)$			
	0	90	180	270
$\overline{Nu}$	209.31	210.67	210.15	209.96
Nu_0	32.43	32.45	32.46	32.46
f	0.146	0.143	0.145	0.146
f_0	0.007 85	0.007 85	0.007 85	0.007 85
φ	2.436	2.465	2.420	2.440

图 9 给出了 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置 α 下的周向平均压力系数轴向分布曲线。由图 9 可知,压力系数沿轴向平缓下降,这是由流动过程中存在的摩擦损失引起的。在进口段,由于进口压力较高,使得压力系数曲线出现突跃;相同轴向位置处,冷气压力随 α 的增大而减小。因此,在不同 α 下保持冷气压力相同时, α 越大所需进口压力越低。

图 10 给出了 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置 α 下的靶面 Nu 分布云图。由图 10 可知:在进口段出现了高 Nu 分布区域,这是由于进口段的冷气流速较高,

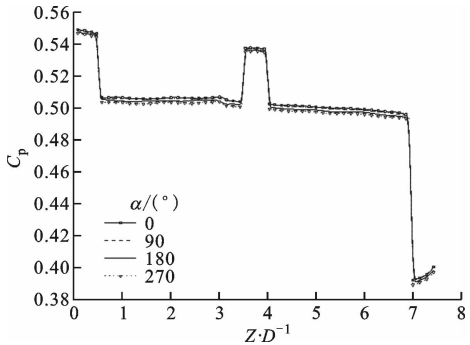


图 9 喷嘴不同周向位置 α 的压力系数分布

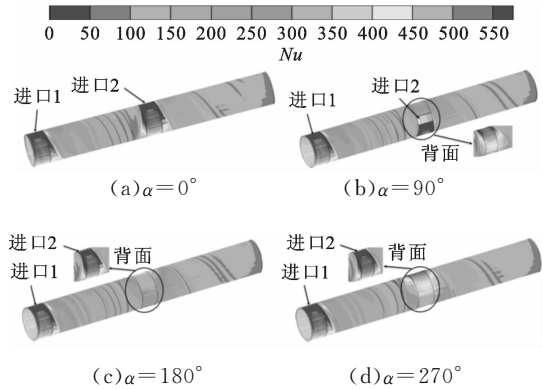


图 10 $\beta=0^\circ$ 时喷嘴不同周向位置 α 的 Nu 分布云图

导致热边界层减薄,使得对流换热增强;在圆管段出现了低 Nu 区域,这是由于冷气流速降低,热边界层增厚,使得对流换热减弱。随着 α 变化, Nu 的周向分布发生改变,而高 Nu 区域的周向位置变化最为明显。

在叶片冷却中,换热强度越高,流动损失越小的冷却结构,综合性能越优良。为更加准确合理地描述综合冷却性能,评价不同的冷却结构,定义综合换热因数

$$\varphi = \frac{\overline{Nu}/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}}$$

(5)

式中: $\overline{Nu}$ 为全场平均努塞尔数; $Nu_0 = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$ 为 Dittus-Boelter 努塞尔数, $Re = \rho u_m D / \mu$ 为旋流腔雷诺数,其中 u_m 为冷气的平均轴向速度; $f_0 = 0.0791Re^{-0.25}$ 为布拉修斯摩擦因数; $f = (P_{in} - P_{out})D / (2\rho LV_{in}^2)$ 为摩擦因数,其中 L 为旋流腔轴向长度。

表 2 给出了 $\beta=0^\circ$ 时不同工况下的各项参数值。由表 2 可知,和 $\alpha=0^\circ$ 相比, $\alpha=90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时的全场平均努塞尔数和摩擦因数几乎不变,综合换热因数分别提高了 1.2%、0.7% 和 0.2%。因此,改变喷嘴周向位置 α ,对冷却性能产生的影响较小,而局部高换热区的周向位置发生了明显变化。

表 2 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同拔模斜度 β 值

参数	$\beta/(^\circ)$				
	-1	-0.5	0	0.5	1
$\overline{Nu}$	200.814	203.761	209.313	214.188	218.990
Nu_0	32.01	32.29	32.43	32.57	32.51
f	0.147	0.146	0.146	0.143	0.141
f_0	0.007 89	0.007 86	0.007 85	0.007 84	0.007 84
φ	2.363	2.383	2.436	2.496	2.571
Φ	1 206.82	1 229.80	1 259.11	1 283.03	1 307.87

因此,设计实际的叶片前缘旋流冷却结构时,可根据实际的燃气温度场,通过改变喷嘴周向位置来改变局部高换热区的位置,从而更好地对叶片前缘局部高温区域实施冷却,而且不会削弱冷却性能。

2.2 拔模斜度的影响

选取 $\alpha=0^\circ$ 时, $\beta=-1^\circ, -0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$ 这 5 种工况进行分析。图 11 给出了 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时,拔模斜度 β 为 $-1^\circ, 1^\circ$ 时的三维流线图。由图 11 可知:当拔模斜度 β 为 1° 时,三维流线沿轴向先径向收缩,后径向扩张; β 为 -1° 时,在进口 1 和进口 2 之间的圆管段,三维流线先径向扩张后径向收缩,这与冷气所受离心力有关。在 $\alpha=0^\circ$ 时的圆管段相同轴向位置处, $\beta=-1^\circ$ 的旋流腔截面直径比 $\beta=0^\circ$ 的小。而冷气进口速度相差不大,导致 $\beta=-1^\circ$ 时冷气所受离心力比 $\beta=0^\circ$ 时大,使得 $\beta=-1^\circ$ 的三维流线在进口 1 附近出现了径向扩张的现象。

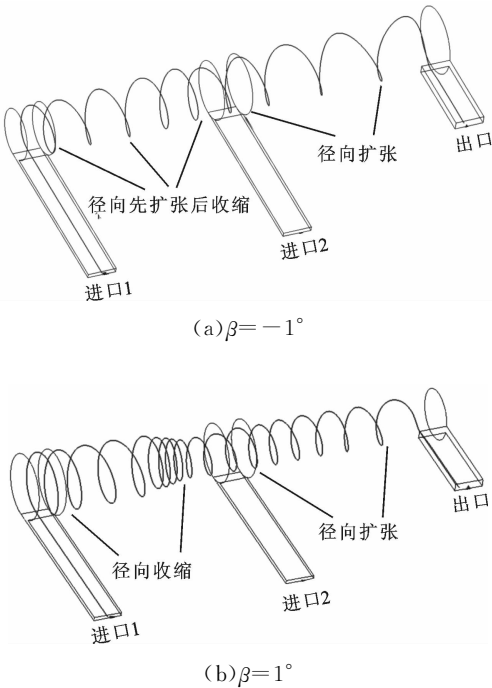


图 11 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同 β 的三维流线图

图 12 给出了 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同拔模斜度 β 的 XY 截面速度云图和流线图,设定 β 从 -1° 变化至 1° 时,拔模斜度是逐渐增加的。由图 12 可知,在相同轴向位置,随着 β 的增加,高速旋流区的面积增加,低速旋流区的面积减小。因此,截面周向平均速度增加,这有利于增强靶面换热,产生该现象的原因与 β 有关。流量不变,当 β 为正值时,旋流腔截面积沿轴向减小,导致冷气流速升高, β 越大,相同轴向位置处冷气流速越高;当 β 为负值时,旋流腔截面积沿轴向增大,导致冷气流速降低。随着 β 增加,截面周向平均速度增加, β 变化时,高速旋流区与低速旋流区的位置几乎不变,这说明 β 对流动结构的影响很小。

图 13 给出了叶根进气时,不同拔模斜度 β 下的压力系数分布曲线。由图 13 可知;压力系数曲线在

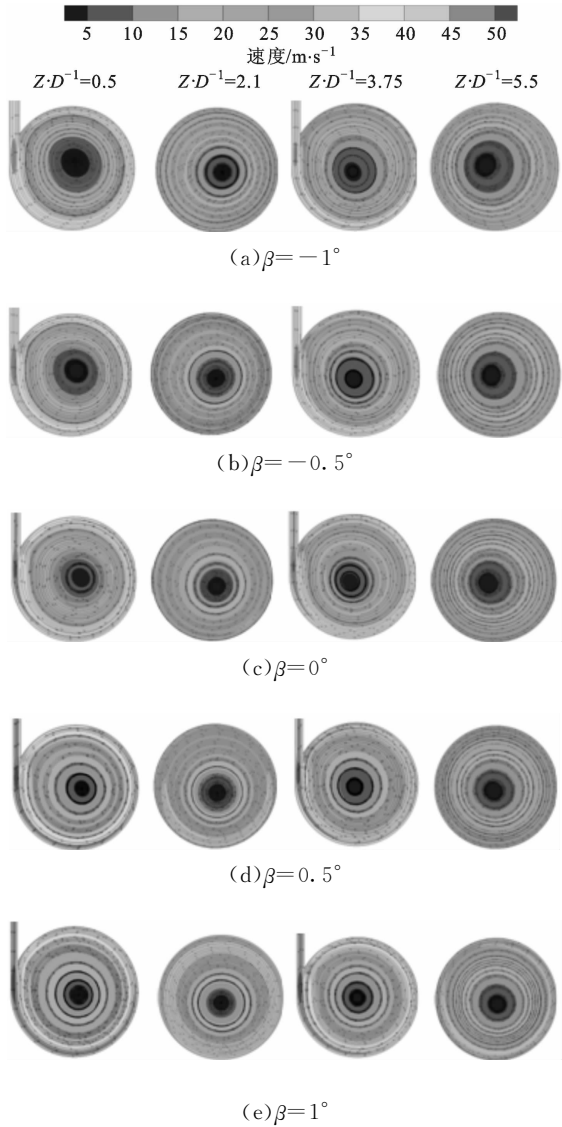


图 12 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同 β 的 XY 截面流线和速度云图

进口段突跃,在出口段骤降;在圆管段,当 β 为正值时,压力系数沿轴向降低,冷气沿轴向加速;当 β 为负值时,压力系数沿轴向升高,冷气沿轴向减速。不考虑黏性引起的摩擦损失,根据伯努利原理,同一流线上总压相等,动压越大,静压就越小,压力系数也就越低,同一轴向位置处压力系数随 β 的增大而减小,这是由于同一轴向位置处,冷气速度随 β 的增大而增加。

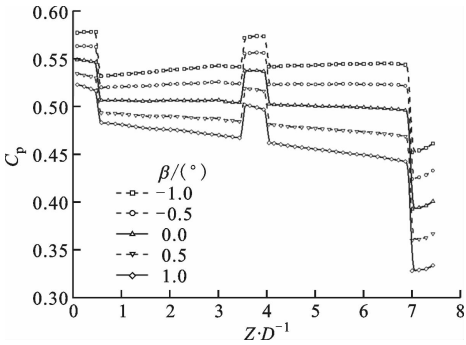


图 13 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同 β 的压力系数分布

图 14 给出了 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同拔模斜度 β 的靶面 Nu 分布云图。由图 14 可知,随着 β 增加,进口段的高 Nu 区域面积增加,换热强度增强。冷气冲刷靶面的速度更高,使得热边界层更薄,换热强度更高, Nu 的分布规律几乎不受 β 的影响。

由于不同拔模斜度 β 下旋流腔靶面面积不同,仅有换热强度不能更全面地描述冷却结构的换热性能,因此加入靶面传热量 Φ 来表征通过靶面的总传热量。叶根进气时,参照 $\beta=-1^\circ$ 工况下的各项参数,当 β 增加至 1° 时, $\overline{Nu}$ 最多提高了 9.1%,摩擦因

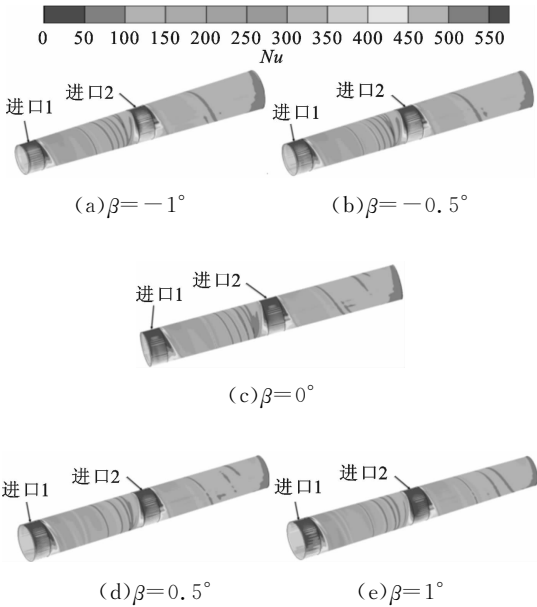


图 14 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时不同 β 的 Nu 分布云图

数 f 下降了 4.1%。可知叶根进气时, β 越大换热强度越高,由摩擦损失造成的压力损失越小,因而综合换热因数 φ 提升了 8.8%, Φ 增加了 8.4%。在 $\alpha=0^\circ$ 且叶根进气时的圆管旋流冷却模型中,旋流腔拔模斜度 β 越大,冷却结构的综合性能越优良。

综上所述,对于实际涡轮中的变截面叶片,可以设计变截面的旋流腔以更好地与叶片前缘形状相匹配;另一方面,根据叶顶进气和叶根进气的不同,调节拔模斜度 β ,使得旋流腔截面积从进口到出口位置逐渐缩小,冷却结构达到最好性能。在等截面叶片前缘中,也可采用有一定拔模斜度的旋流腔,从而达到提高前缘冷却效果的目的。

3 结 论

本文建立了不同几何参数的叶片前缘旋流冷却模型,在验证了网格无关性和湍流模型的基础上,使用数值计算方法,分析了喷嘴周向位置和拔模斜度对旋流冷却的影响,得到如下结论。

(1)冷气从进口射入旋流腔,形成大尺度高速旋流。流动过程中,受到横流冲击、摩擦损失或者截面积变化的影响,冷气周向速度衰减,三维流线路径向收缩。在出口段由于压力梯度升高,冷气速度增加,流线径向扩张。

(2)喷嘴周向位置 α 发生变化时,高速旋流区和低速旋流区的位置发生改变。 α 增大时,相同轴向位置处的冷气压力减小。喷嘴周向位置 α 对冷却结构综合性能的影响较小。不同参数的燃气轮机中,涡轮进口燃气温度场分布存在较大差异,使得叶片前缘的局部高温区域位置不同。在设计实际的叶片前缘旋流冷却结构时,可以通过改变 α 来改变旋流腔局部高换热区位置,从而在不削弱综合冷却性能的同时,更好地对叶片前缘局部高温区域实施冷却。

(3)叶根进气时,拔模斜度 β 增大时,高速旋流区面积增大,低速旋流区面积减小,截面平均流动速度升高,出口段的高 Nu 区域面积增大,而 Nu 的分布规律几乎不受 β 的影响。相同的轴向位置处,压力系数随 β 增大而减小。在圆管段,当 β 为正值时,压力系数沿轴向降低;当 β 为负值时,压力系数沿轴向升高。

叶根进气时,以拔模斜度 β 是 -1° 的工况为参照, β 增大时,换热强度可最大提高 9.1%,摩擦损失最多减小 4.1%,靶面传热量最多增大 8.4%,综合换热因数最多提高 8.8%。因此,叶根进气时, β 越大综合换热性能越优良,在实际的叶片前缘中,可以

通过综合考虑拔模斜度和进出口的相对位置,从而设计出综合换热性能最优良的冷却结构,该冷却结构不仅与变截面叶片前缘更加匹配,还能应用于等截面叶片中,从而提高冷却效率。

参考文献:

- [1] LIAO Gaoliang, WANG Xinjun, LI Jun, et al. A numerical comparison of thermal performance of in-line pin-fins in a wedge duct with three kinds of coolant [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 77(2): 1033-1042.
- [2] LIGRANI P M, HEDLUND C R, THAMBU R, et al. Flow phenomena in swirl chambers [C]// ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York, USA: ASME, 1997: V003T09A087.
- [3] QIAN C, FLANNERY K, SAITO K, et al. Innovative vortex cooling concept and its application to turbine airfoil trailing edge cooling design [C]// The 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. New York, USA: ASME, 1997: 3013.
- [4] GLEZER B, MOON H K, O'CONNELL T. A novel technique for the internal blade cooling [C]// 1996 ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York, USA: ASME, 1996: V004T09A015.
- [5] HWANG J J, CHENG C S. Augmented heat transfer in a triangular duct by using multiple swirling jets [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1999, 121(2): 683-690.
- [6] LING J P, IRELAND P T, HARVEY N W. Measurement of heat transfer coefficient distributions and flow field in a model of a turbine blade cooling passage with tangential injection [C]// ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2006: 325-334.
- [7] KUSTERER K, LIN G, BOHN D, et al. Heat transfer enhancement for gas turbine internal cooling by application of double swirl cooling chambers [C]// ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2013: V03AT12A027.
- [8] LIU Zhao, LI Jun, FENG Zhenping, et al. Numerical study on the effect of jet nozzle aspect ratio and jet angle on swirl cooling in a model of a turbine blade leading edge cooling passage [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 90: 986-1000.
- [9] 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动与传热特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(12): 124-129.
- [10] DU Changhe, LI Liang, LI Sen, et al. Effects of aerodynamic parameters on steam vortex cooling behavior for gas turbine blade leading edge [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2016, 230(3): 354-365.
- [11] 范小军, 杜长河, 李亮, 等. 4种冷却结构对叶片前缘流动换热影响的比较研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 37-43.
- [12] 范小军, 杜长河, 李亮, 等. 气膜孔几何位置对旋流冷却流动与传热特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(7): 32-38.
- [13] 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 旋转半径和叶片安装角对动叶旋流冷却流动和传热特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(4): 37-42.
- [14] RAO Y, BIEGGER C, WEIGAND B. Heat transfer and pressure loss in swirl tubes with one and multiple tangential jets pertinent to gas turbine internal cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 1356-1367.
- [15] LUAN Yuxuan, DU Changhe, FAN Xiaojun, et al. Investigations of flow structures and heat transfer in a swirl chamber with different inlet chambers and various aerodynamic parameters [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 551-561.

(编辑 赵炜)