

DOI: 10.7652/xjtuxb201703004

涡发生器高度对气膜冷却性能影响的实验研究

张超, 宋英杰, 宋立明, 李军, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了研究涡发生器高度对气膜冷却性能影响的规律, 搭建了气膜冷却实验台, 利用热电偶测温获得气膜有效度, 采用粒子成像测速(PIV)技术拍摄了流场结构。实验中采用 20° 单孔射流结构, 在主流湍流度为 0.4% 、吹风比 $M=1.5$ 的条件下, 完成了5种不同高度涡发生器的气膜冷却效果以及流场结构的测量。气膜有效度的测量结果表明, 涡发生器能显著提高气膜冷却性能, 其高度对气膜冷却性能的影响显著, 该影响随着高度的增加先增大后减小, 最优高度下平均气膜有效度相对不带涡发生器情况提高了 81% 。结合 PIV 流场结果分析可知: 反肾形涡对将冷气卷向壁面是涡发生器提高气膜冷却性能的根本原因, 但涡发生器高度过低时产生的反肾形涡对强度较弱, 不能有效地将射流牵引至壁面; 当涡发生器高度过高时则会穿透射流, 将部分主流卷入到反肾形涡对中, 从而削弱冷却效果。

关键词: 涡发生器高度; 气膜冷却; 实验研究

中图分类号: TK474 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0020-07

Experimental Investigation for Effects of Vortex Generator Height on Film Cooling Property

ZHANG Chao, SONG Yingjie, SONG Liming, LI Jun, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A test rig is constructed to investigate the effects of vortex generator height on film cooling property. The thermocouples and the technology of Particle Image Velocimetry (PIV) are used to measure the wall temperature and visualize the flow distribution. The experiment is carried out in a single-jet structure with an inclination angle of 20° degrees. The scale of turbulence and the blowing ratio are set to be 0.4% and 1.5 respectively. The film cooling effectiveness and the flow structure in the vortex generators of five different heights are measured. It indicates that the film cooling performance can be significantly improved by the vortex generator, and the performance of the vortex generator is obviously affected by the height. With the increasing height of the vortex generator, the performance of the vortex generator is first enhanced and then deteriorated. At the optimal height, the average film cooling effectiveness of the plate equipped with vortex generator is increased by 81% compared with the case without vortex generator. Analyzing the PIV flow, the enhancement of film cooling is found owing to the formation of anti-kidney pair of vortices. However, in the shortest height model the anti-kidney vortices generated is too weak to effectively transport the jet toward the wall, while in the highest height model the vortex generator penetrates into the hot gas entrained into the strong anti-kidney

收稿日期: 2016-07-01。 作者简介: 张超(1993—), 男, 博士生; 宋立明(通信作者), 男, 副教授。

网络出版时间: 2016-12-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161207.1622.014.html>

vortices to decline the cooling effectiveness.

Keywords: vortex generator height; film cooling; experimental study

燃气轮机效率的提高主要依靠透平进口温度的提升,而当代先进燃机透平进口温度已经远远超过透平叶片材料的熔点,因此必须采取高效的冷却技术对叶片进行保护,其中气膜冷却是一种重要的冷却技术^[1]。Fric 等研究发现,涡系的基本特征包括主流边界层剪切射流产生的反向旋转涡对(CRVP, 肾形涡对)、射流底部周围的马蹄涡和射流下游的尾迹涡等^[2],其中 CRVP 对冷却射流有“上洗”作用,导致射流有脱离叶片壁面的趋势,成为限制气膜冷却技术发展的关键问题。

Goldstein 等研究发现,造型孔可以降低射流动量,弱化冷却射流与主流的掺混作用,能明显提高冷却射流的附着和横向发展趋势^[3]。Heidmann 等提出了带两支副孔的气膜冷却结构^[4],Dhungel 等通过实验验证了该结构对气膜冷却性能的改善作用^[5]。除此之外,通过在射流孔周围布置扰流装置来控制流场的涡系结构,也可以对气膜冷却效率产生显著影响。Sangkwon 等提出了在气膜孔上游放置斜坡的新型结构^[6],Barigozzi 等研究得出这种结构能够消除冷却射流底部的马蹄涡,有利于气膜冷却射流的横向发展,但同时斜坡在下游会造成大面积的分离区,导致气动损失增大^[7]。Sakai 等尝试在气膜孔出口下游放置半圆形、半球形及圆柱形等不同的凸起结构,并通过数值计算说明凸起结构通过在结构下游形成纵向涡来改善气膜冷却性能^[8]。Kawabata 等通过激光多普勒测速仪(LDV)等实验手段测量了在气膜孔上游放置凸起结构的流场结构,验证了凸起结构对 CRVP 的改善作用^[9]。Rigby 等将倒三角状的涡发生器(VG)放置于气膜冷却孔下游来增强气膜冷却性能,数值分析结果表明,涡发生器的引入能有效改善冷气膜覆盖范围^[10]。Za-

man 等通过实验研究了涡发生器的高度、位置和边缘曲率等对流场结构的影响^[11]。Shinn 等揭示涡发生器通过产生与肾形涡对旋向相反的反肾形涡对来增强气膜冷却性能的机理^[12]。宋英杰等通过总变差分析发现,涡发生器高度对气膜冷却性能影响显著^[13]。

本文在文献[13]优化结果的基础上,通过搭建气膜冷却实验台、利用热电偶和粒子成像测速(PIV)等测量技术系统地开展了温度场和流场的测量,验证了涡发生器在增强气膜冷却性能上的作用,研究了涡发生器的高度对气膜冷却性能影响的规律。

1 实验系统

1.1 气膜冷却实验台和实验工况

实验中采用了如图 1 所示的开放吸入式风洞,主流经过入口段的滤网过滤及整流,再通过收缩段及稳流段进入实验段。采用热线风速仪及热电偶测量了来流速度、湍流度及来流静温,测得来流速度为 8.8 m/s,湍流度为 0.4%,来流静温为 20℃。

射流由鼓风机从环境中引入,利用涡街流量计测量射流流量,通过调节入口球阀控制射流流量,保证实验所需吹风比。吹风比定义为

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \tag{1}$$

式中: ρ_∞ 、 ρ_c 分别为来流、射流的密度; U_∞ 、 U_c 分别为来流、射流的速度。本实验中吹风比 M 保持在 1.5。射流由电加热器加热后经气室、通过单气膜冷却孔注入至实验段的通道内。射流管道和气室等外表面覆盖了一层厚绝热棉以减小热量损失,射流的温度控制在 80℃。实验中密度比为 0.8。

1.2 实验段

实验段的一侧壁面上贴附了一块 20 mm 厚的

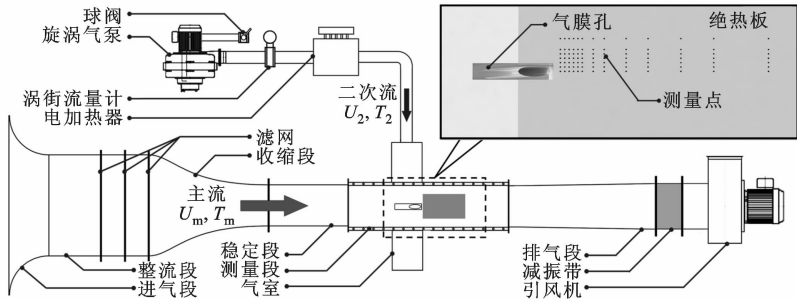


图 1 实验装置示意图

导热率为 0.018 W/(m·K)的聚氨酯绝热板,并按照图 1 右上所示开设测量孔。为保证梯度的空间测量精度、提高测量效率,在上游温度变化剧烈的区域集中布置测点,并沿流动方向逐渐增加测量间距。考虑到几何结构和温度分布的对称性,只对上半部分进行测量,对下半部分进行对称处理。为满足 PIV 流场测量的要求、便于观察实验情况,实验段的其他 3 个侧面均采用透光性良好的光学玻璃。

气膜冷却孔孔径 $D=20\text{ mm}$,射流注入角 $\alpha=20^\circ$,气膜冷却孔的长径比 $L/D=6$ 。图 2 为涡发生器的位置及几何尺寸。本实验选取了 5 组不同高度 H/D 涡发生器模型,命名为 Model Orig、Model A、Model B、Model C、Model Opt,对应模型编号 1~5,见表 1,其中模型 1~4 参照 Zaman 的实验^[11]选取,模型 5 根据优化设计结果^[13]确定。

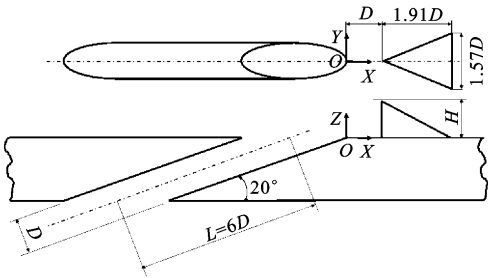


图 2 涡发生器位置及几何尺寸示意图

表 1 涡发生器高度参数

模型编号	$H \cdot D^{-1}$
1	0.00
2	0.37
3	0.75
4	1.50
5	1.27

1.3 数据测量和采集系统

实验中需要测量主流温度、射流温度和射流孔下游壁面的温度分布。为保证测量精度,采用 1 级精度的 K 型铠装热电偶,其测量范围为 $-200\sim1\,200\text{ }^\circ\text{C}$,精度 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。主流温度通过在稳流段上开设的小孔测得,射流温度通过热电偶深入气室测得。温度的采集使用 DEWESoft 公司生产的温采模块,精度为 0.05%,每个通道最高采样率可达 200 kHz。主流速度和湍流度采用热线风速仪测量,由于引风机阀门保持不变,所以各工况下主流的流动参数基本相等。射流流量由涡街流量计直接读取。

图 3 为 PIV 测量系统,包括双 YAG 激光器、

CCD 相机和 Lavision 数据采集系统等,其中:YAG 激光器由 NEWWAVE 公司生产,其产生的可见绿色激光的波长为 532 nm,脉冲的能量为 200 mJ; CCD 相机分辨率为 $2\,048\times 2\,048$ 像素,帧速率为 15 帧/s。采用烟雾作为示踪粒子添加在射流气体中,其直径为 $0.3\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

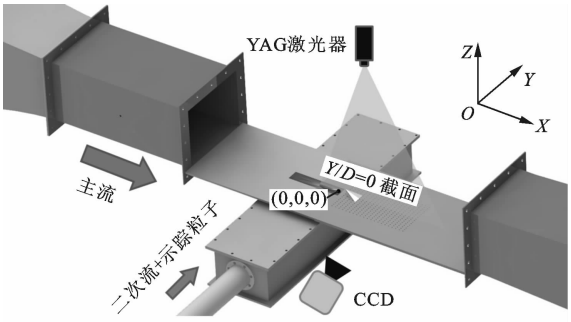


图 3 PIV 测量系统图

1.4 实验误差分析

气膜有效度定义为

$$\eta = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_j} \tag{2}$$

式中: T_∞ 、 T_w 、 T_j 分别为主流、壁面和射流的温度,三者均可通过热电偶测量,经温度采集模块直接得到结果,由多次测量求取平均获得误差。

在涡发生器高度 $H=0.75D$ 的工况下,对 3 种温度参数连续测量 6 次,分析误差得:壁面温度误差为 2.71%,主流温度误差为 0.48%,射流温度误差 3.75%。由于气室内温度波动较大,所以误差偏大。采用式(2)误差传递公式

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{1}{T_\infty - T_w} \Delta T_w + \frac{1}{T_\infty - T_j} \Delta T_j + \left(\frac{1}{T_\infty - T_w} - \frac{1}{T_\infty - T_j} \right) \Delta T_\infty \tag{3}$$

得到实验中气膜有效度测量误差为 5.73%。

2 实验结果与分析

2.1 流场测量结果及分析

本文采用了 PIV 测量技术对 5 种不同高度的涡发生器的流动结构进行了拍摄,对涡发生器强化冷却作用的机理进行了较为细致的分析。

由 Shin 和宋英杰等的大涡模拟数值分析结果^[12-13]可知,涡发生器可通过产生反肾形涡对来增强气膜冷却性能。为确认涡发生器的作用机理,实验中采用 PIV 测量技术对模型 1 和模型 5 两种结构下 $X/D=3$ 位置处的近壁面 YZ 截面进行拍摄,经过后处理得到图 4 所示的涡系结构图。由图 4a

中近壁面处可以明显观察到一对外旋的肾形涡对,该涡对对射流有“上洗”作用,使得射流有脱离壁面的趋势,不利于气膜冷却性能。由图 4b 中涡系结构图明显观察到一对内旋的涡对,该涡对旋向与肾形涡对相反,以下称为“反肾形涡对”,该涡对能将射流向下卷吸并向两侧发展,将射流牵引至壁面,由此提高了气膜的覆盖范围。

2.1.1 XZ 截面的 PIV 拍摄结果 图 5 为 $Y/D=0$ (中心线)截面的射流流场分布,流场时间平均分布为 100 张照片的时间平均分布。图 5 的所有 PIV 照片均在同一拍摄环境下得到,明暗程度表示粒子的数量浓度,具有可对比性。

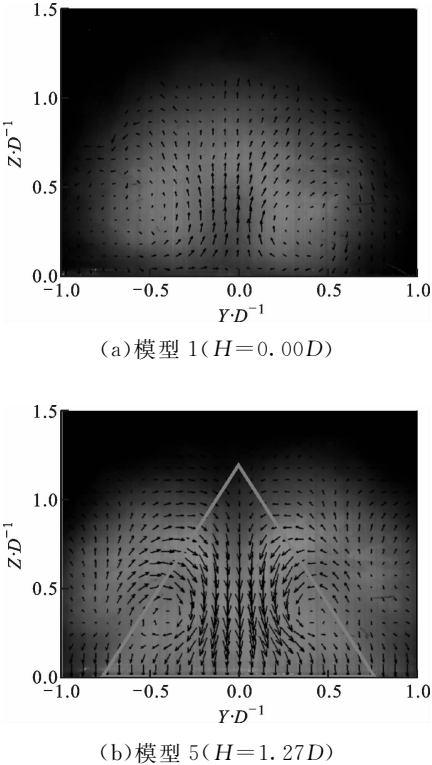


图 4 $X/D=3$ 位置处经 PIV 处理后得到的涡系图

从 $H=0.00D$,即原始不带涡发生器的气膜冷却结构的流场图中可以看到,气膜孔下游壁面附近出现了明显的射流覆盖较少的阴影区域,以下称为“吹离区”。该区域出现的原因是,射流从气膜孔喷出后由于向上的速度分量使得射流形成被吹离壁面的趋势。另外,由于肾形涡对的外旋作用会将两侧的主流从下方卷入射流中,并在中心线汇聚后再向上发展,使得中心线截面上的吹离效果看起来更加明显。 $H=0.37D$ 时射流高度略微降低,涡发生器的顶部正好处在吹离区的上缘,涡发生器产生的反肾形涡对的强度较低且作用有限,下游吹离区范围减小但依然存在。 $H=0.75D$ 时射流高度进一步降

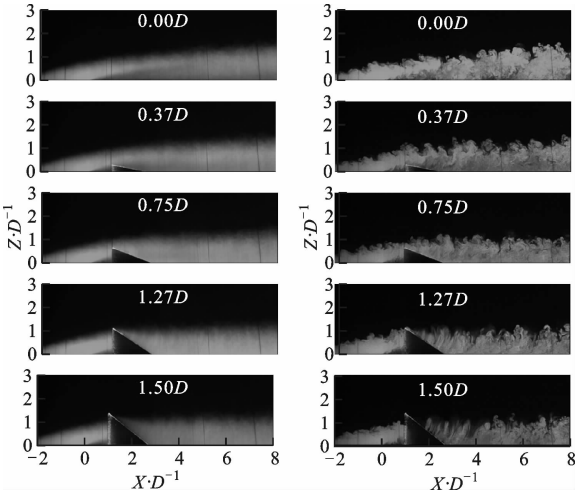


图 5 $Y/D=0$ 截面 PIV 拍摄的射流流场分布

低,涡发生器背后的射流在近壁面上方分布十分均匀,没有出现明显的吹离区,说明此时近壁面得到了更加充分的冷却。

$H=1.27D$ 时涡发生器顶部的尖端刚好位于射流的上缘,此时射流整体会受到涡发生器的直接影响,被卷入到反肾形涡对中的射流流量大,涡发生器也没有与主流直接接触,卷入的主流流量很少。从瞬时图中可以看到,涡发生器背后的射流高度沿流向不再呈上升趋势,表明涡发生器所形成的反肾形涡对已经能够将大量射流牵引至壁面,射流向两侧充分发展,从而对壁面形成了有效的保护。

$H=1.50D$ 时涡发生器顶端已经部分穿入主流,此时还有射流被卷入反肾形涡对之中,也有一定的主流被卷入涡对,主流的混入稀释了反肾形涡对,从而严重影响射流的冷却能力。

2.1.2 XY 截面的 PIV 拍摄结果及分析 下面从 XY 截面上的流场分布角度对不同高度涡发生器气膜冷却结构中的流动特性进行了分析。XY 截面的流场分布图虽然不能直接反映气膜有效度的大小,但却直观地看到气膜所能到达的位置,以及主流与射流的一些掺混现象。

图 6 为 $Z/D=0.25$ 截面上的 PIV 拍摄的射流流场分布。可以看到,不带涡发生器时气膜对壁面的覆盖宽度沿流向基本保持在 $2D$ 水平。在气膜上游从 $X/D=1.0$ 到 $X/D=5.0$ 之间的中心线附近出现了狭长、气膜覆盖较少的区域,对应图 5 的吹离区。

带涡发生器的情况下,当 $H=0.37D$ 时,气膜覆盖宽度有所增大,壁面附近的射流密度增大,只是

横向扩张趋势不明显。当 $H=0.75D$ 时,气膜覆盖宽度明显增大,且在观测范围内始终呈现增大趋势,在 $X/D=12$ 处覆盖宽度达到了 $3D$,且在气膜覆盖区域有两条阴影将整个区域分成了3个部分,其中上下两个部分即是涡发生器产生的反肾形涡对,中间则是未被卷入反肾形涡对中的冷气,其受涡发生器背部低压的作用被牵引至壁面。当 $H=1.27D$ 时,气膜覆盖宽度进一步增大,在 $X/D=12$ 处覆盖范围达到了 $4D$,即达到了最佳冷却效果。当 $H=1.50D$ 时,气膜的覆盖范围不再变化,但由于较多主流被卷入,稀释射流造成射流分布很不均匀,导致射流的冷却能力快速下降。

图6明显反映出, H 越高,反肾形涡对越强,气膜覆盖范围随 H 的增大而增大,但 H 过高,涡发生器会卷吸主流,不利于气膜冷却性能。

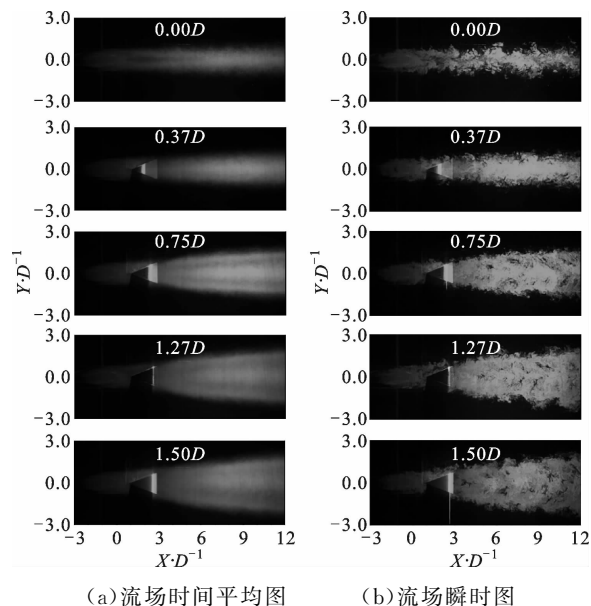


图6 $Z/D=0.25$ 截面 PIV 拍摄的射流流场分布

2.2 温度场测量结果及分析

图7为 H 对气膜有效度分布的影响。不带涡发生器时,沿流向气膜有效度先增大后减小,具有典型的气膜冷却特征。在上游初始位置气膜有效度较小,这是射流刚从气膜孔喷出,向上的分动量较大加之肾形涡的“上洗”作用产生了一段吹离区的缘故,这与图5是对应的;流向中段由于主流对射流具有较强的压制作用,使得射流被压向壁面,从而气膜有效度得到了提升;流向后段肾形涡对对射流的持续作用及射流与主流的掺混作用,导致冷却能力逐渐降低,气膜有效度下降,气膜覆盖范围逐渐变窄。

相较于不带涡发生器情况,带有涡发生器的气膜有效度均显著提高,射流覆盖范围明显增大。当

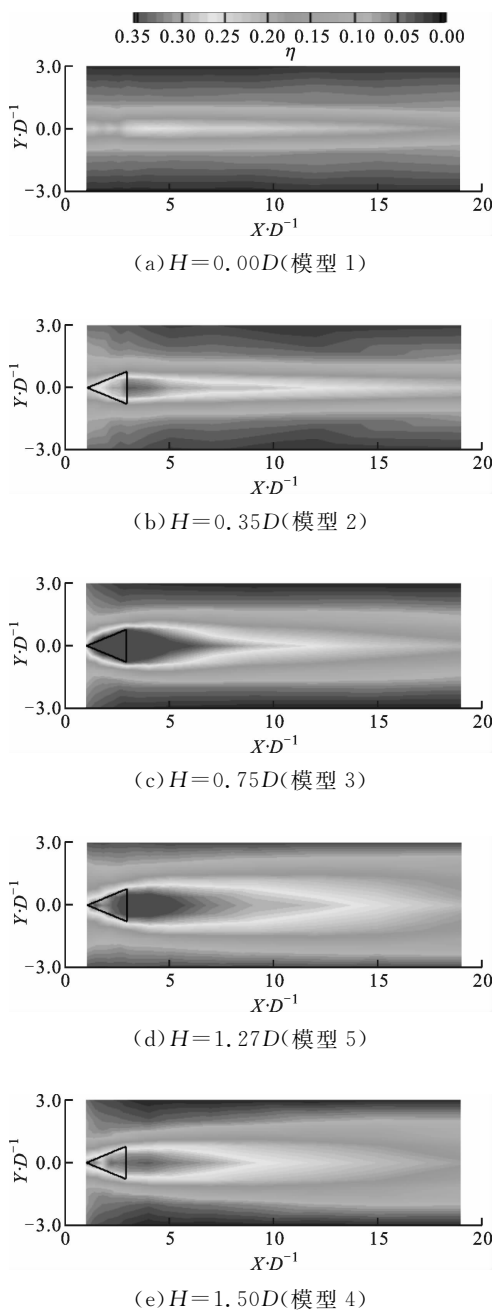


图7 涡发生器高度对壁面绝热气膜有效度分布的影响

$H=0.37D$ 时,较模型1情况气膜覆盖范围有所提升,但由于产生的反肾形涡对强度较弱,使得气膜横向扩张趋势不明显,这与图6是一致的,同时在涡发生器下游中心线处气膜有效度均有所提高。当 $H=0.75D$ 时,气膜有效度显著增强,尤其在涡发生器周围及下游区域达到了0.35以上,气膜覆盖范围进一步增大。当 $H=1.27D$ 时,气膜覆盖范围较模型3进一步提升,且横向扩张趋势增强,这是涡发生器顶端刚好位于射流与主流的交界处(见图5), H 已到达临界高度,会将更多的射流卷向壁面的缘故。值得注意的是,涡发生器周围的气膜有效度较模型

3 有所下降,原因是在临界高度下,会有一小部分主流沿涡发生器背部卷入气膜,受到这部分主流的影响,在涡发生器周围的壁面气膜有效度有所降低。当 $H=1.50D$ 时,气膜有效度的分布整体上呈现出了下降的趋势,其覆盖宽度和强度在上游区域明显降低,该原因与模型 5 中涡发生器周围温度降低的原理是相同的,但是由于卷入了更多的主流,与射流掺混后严重消耗了射流的冷却能力,因此不但在涡发生器周围的气膜有效度进一步降低,而且在下游壁面的冷却效果明显减弱。不过,由于 H 较高,产生的反肾形涡对较强,因此虽然气膜冷却强度有限,但横向扩张效果仍比较显著。

图 8 为不同 H 下在 $-3\leq Y/D\leq 3$ 范围内的横向平均气膜有效度 $\bar{\eta}_1$ 沿流向的变化。可以看到,不带涡发生器情况的横向平均气膜有效度分布最低,且沿流线呈缓慢下降趋势。当 $H=0.37D$ 时,平均气膜有效度整体略高于不带涡发生器的情况,但较其他 H 的低。当 $H=0.75D$ 时,涡发生器附近的气膜有效度得到了明显提升,但之后亦下降很快。前半段是该高度下涡发生器完全浸没在射流中,且射流还未与主流发生过多掺混,因此冷却能力很强,加上反肾形涡对的强化换热效果,所以涡发生器周围的壁面具有较高的气膜有效度;后半段由于高度有限,无法将全部射流卷向壁面,加上反肾形涡向两侧扩散的角度较大,从而不断地与主流发生强烈的热交换,使得冷却能力很快耗散,因此气膜有效度快速下降。对于优化高度 $H=1.27D$,涡发生器卷入的冷气流极为充足,又不至于将主流卷入反肾形涡对中,因此在发展过程中气膜有效度能够始终保持最高。当 $H=1.5D$ 时,因卷入了大量的主流,影响了冷却效果,但由于卷入的冷气也很充分,因此持续效果较好。

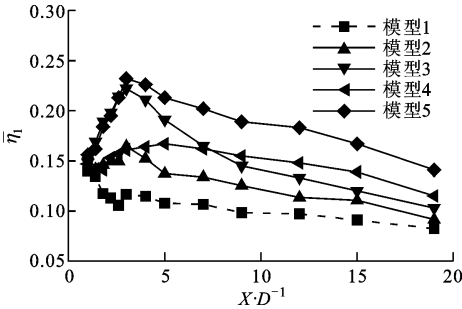


图 8 横向平均气膜有效度沿流向的变化

图 9 为不同 H 下中心线处气膜有效度 η_c 沿流向的变化。可以看到,在涡发生器之前的部分气膜有效度变化趋势与图 8 横向平均气膜有效度的结果

类似,在下游区域中心线处气膜有效度差异并不显著,这间接地反映出涡发生器强化冷却的效果主要在气膜覆盖范围的扩大上。

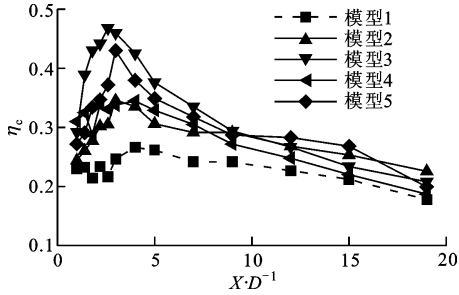


图 9 中心线气膜有效度沿流向的变化

图 10 为 $1\leq X/D\leq 19$ 范围内流向平均气膜有效度 $\bar{\eta}_2$ 沿横向的变化。可以看到,在气膜有效度为 0.1 以上的区域,模型 1 结构的平均覆盖宽度约为 $1.6D$,模型 3、4 均为 $3.0D$ 左右,是模型 1 的 2 倍,模型 5 的平均覆盖宽度为 $4.0D$,比模型 1 覆盖宽度增加了 2.5 倍。

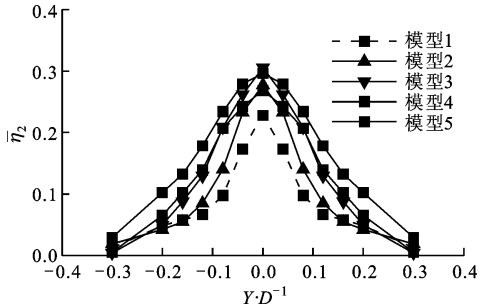


图 10 流向平均气膜有效度沿横向的分布

图 11 为 5 种模型下整个测量区域内的面平均气膜有效度 $\bar{\eta}$ 比较,这是对各种情况下整体气膜冷却性能的评估。可以看到,优化高度的涡发生器明显优于其他高度情况,其面平均气膜有效度相对不带涡发生器情况提高了 81%。另外,还可以看到,随着涡发生器高度的增加,整体面平均气膜有效度明显呈现先增大后减小的趋势。

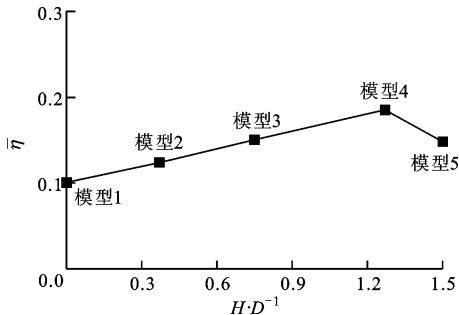


图 11 面平均气膜有效度

3 结 论

本文搭建了气膜冷却实验台,采用热电偶和PIV等测量技术得到5种不同涡发生器高度下壁面的绝热气膜有效度及XZ、XY截面的流场结构,通过对比分析气膜有效度及流场分布得到以下结论。

(1)采用涡发生器能够提高气膜冷却性能,结合PIV拍摄得到的涡系结构图,验证了反肾形涡对将冷气卷向壁面是涡发生器提高气膜冷却效率的根本原因。

(2)涡发生器高度对气膜冷却性能影响显著,气膜冷却性能随涡发生器高度的增大呈现先增大后减小的趋势,且优化涡发生器高度的气膜冷却效果最佳,较不带涡发生器的提高了81%。

(3)结合PIV所拍摄的流场结构分析可知,当涡发生器高度增加时,反肾形涡对强度增强,冷却效果随之提升,但当涡发生器高度过高时部分主流卷入到反肾形涡对中,从而使得冷却效果减弱。

参考文献:

- [1] HAN J, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Abingdon, UK: CRC Press, 2012: 159-160.
- [2] FRIC T F, ROSHKO A. Vortical structure in the wake of a transverse jet [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 279: 1-47.
- [3] GOLDSTEIN R J, ECKERT E, BURGGRAF F. Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1974, 17(5): 595-607.
- [4] HEIDMANN J D, EKKAD S. A novel antivortex turbine film-cooling hole concept [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130(3): 31020.
- [5] DHUNGEL S, PHILLIPS A, EKKAD S V, et al. Experimental investigation of a novel anti-vortex film cooling hole design: GT2007-27419 [R]. New York, USA: ASME, 2007.
- [6] NA S, SHIH T I. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2007, 129(4): 464-471.
- [7] BARIGOZZI G, FRANCHINI G, PERDICHIZZI A. The effect of an upstream ramp on cylindrical and fan-shaped hole film cooling: part I Aerodynamic results [C]// ASME Turbo Expo 2007. New York, USA: ASME, 2007: 105-113.
- [8] SAKAI E, TAKAHASHI T, AGATA Y. Experi-

mental Study on effects of internal ribs and rear bumps on film cooling effectiveness [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2013, 135(3): 031025.

- [9] KFYS H K. Improvement of turbine vane film cooling performance by double flow control devices [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2016, 138(11): 111005.
- [10] RIGBY D L, HEIDMANN J D. Improved film cooling effectiveness by placing a vortex generator downstream of each hole [C]// ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2008: 1161-1174.
- [11] ZAMAN K B M Q, RIGBY D L, HEIDMANN J D. Experimental study of an inclined jet-in-cross-flow interacting with a vortex generator [C]// 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 2010: 4-7.
- [12] SHINN A F, VANKA S P. Large eddy simulations of film-cooling flows with a micro-ramp vortex generator [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2013, 135: 0110041.
- [13] 宋英杰, 郭振东, 宋立明, 等. 基于代理模型的带微涡发生器强化换热结构的气膜冷却优化设计 [C]// 2015年工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集. 北京: 工程热物理学会, 2015: 152082.

[本刊相关文献链接]

- 杜长河, 范小军, 李亮, 等. 抽吸孔对旋流和冲击冷却流动传热特性的影响. 2017, 51(1): 19-24. [doi: 10.7652/xjtuxb201701004]
- 范小军, 李亮, 李森, 等. 平板和静叶表面气流-水膜耦合流动特性的数值研究. 2016, 50(11): 7-13. [doi: 10.7652/xjtuxb201611002]
- 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. 2016, 50(7): 32-38. [doi: 10.7652/xjtuxb201607006]
- 高炎, 晏鑫, 李军. 燃气透平叶片尾缘开缝结构冷却性能的数值研究. 2016, 50(3): 29-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201603005]
- 周骏飞, 王新军, 张峰. 连续收缩扩张气膜孔排冷却特性的数值模拟. 2016, 50(3): 38-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201603006]
- 李志刚, 李军, 丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响. 2016, 50(1): 16-21. [doi: 10.7652/xjtuxb201601003]
- 周俊安, 刘立军, 肖萍, 等. 带叶片扩压器离心压缩机模型级内流研究. 2015, 49(9): 30-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201509006]

(编辑 苗凌)