

基于红外热像技术的不同复合角气膜冷却实验研究

刘岚菲¹, 董若凌¹, 施红辉¹, 沈伟杰¹, 陈伟^{1,2}, 谢凯¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 杭州职业技术学院金都管理学院, 杭州 310018)

摘要:以平板气膜冷却为研究对象,基于红外热像技术,实验研究了射流角度 $\alpha=30^\circ$ 时,不同复合角($\beta=15^\circ, 30^\circ, 90^\circ$)在吹风比 $M=1.0$ 时对平板气膜冷却效果的影响。单孔情况下,随着复合角的增大气膜冷却区域发生偏转,且复合角越大,偏转越明显; $\beta=90^\circ$ 时,射流平板冷却效果优于其他复合角,且其横向分布更为均匀;将不同复合角气膜孔单排布置时,平板绝热冷却效率相对于单孔有所提高,孔与孔之间的冷却死区随着复合角度的增大而减小, $\beta=90^\circ$ 时获得的气膜冷却效果更为理想。

关键词:平板气膜冷却; 红外热像技术; 复合角; 绝热效率

中图分类号: TH140.7 **文献标志码:** A

0 引言

燃气轮机是一种高效、清洁的先进动力机械,提高燃气轮机透平进口工质温度能提高其工作效率,但由于受燃气轮机叶片材料耐温性能限制,现阶段燃气轮机的能源利用程度远未达到碳氢燃料所具有的燃烧化学能极限。研发新材料固然可实现燃气轮机性能的整体提升,但现阶段更多得到工业应用的是燃机叶片冷却技术,气膜冷却是其中的一种。

现有研究表明,影响气膜冷却效率的因素众多。Goldstein等^[1]最先考察了射流孔长径比(L/D)与冷却效率之间关系。文献[2-6]随后分别研究了气膜孔几何特性对冷却效率的影响,发现带有扩展出口的气膜孔冷却效率在高吹风比时比没有扩展出口的气膜孔冷却效率高,而在低吹风比时两者相差不大。近年来,随着新技术在气膜冷却研究中的应用,越来越多的相关成果逐渐涌现,研究内容更为细化。韩昌等^[7]基于压力敏感漆技术(PSP),得出了不同吹风比对冷却效率的影响。Goldstein等^[8]利用蔡升华方法测定了气膜冷却传热/传质系数。Nasir

等^[9]利用液晶测温技术,对入射角为 55° 的射流平板进行了复合角的实验研究,发现复合角会影响冷却效率、增大传热系数。杨宽等^[10]利用红外热成像技术测试了平板上单个圆柱孔及排孔下游区域的气膜冷却效率,得到了不同冷却空气量对气膜冷却效率的影响关系,与压力敏感漆技术(PSP)、液晶测温技术试验结果相比,其结果信息量更大、精度更高。而在复合角研究方面,Ligrani等^[11-12]对 $\beta=30^\circ$ 和 $\beta=50.5^\circ$ 的情况下分别进行实验研究,发现复合角的存在更有利于冷气贴合壁面,避免了“吹离”现象发生。Reiss和Boelcs^[13]则得出复合角在较大吹风比时作用更明显,平均冷却效果可提高 $10\%\sim 20\%$ 。李国庆等^[14]采用 $k-\epsilon$ 标准湍流模型,对旋转状态下不同复合角工况进行了数值模拟,发现复合角可以有效地提高压力面气膜冷却效果,而对吸力面上的冷却效果影响不大。

本文通过红外热成像技术,依托回流风洞,利用可实现温度校准和温度监测采集的平板气膜冷却实验装置,通过实验考察了复合角对平板气膜冷却效果的影响。

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 浙江省重中之重学科和浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金(ZSTUMD2011B011);浙江理工大学流体工程技术创新团队(11132932611309)

作者简介: 刘岚菲(1989—),女,浙江龙泉人,硕士研究生,主要从事湍流与复杂流动以及可压缩性与瞬态流动方面的研究。

通信作者: 董若凌, E-mail: dongruoling@zstu.edu.cn

1 实验装置

实验装置由风洞本体系统、气膜冷却平板、冷却射流系统、主流加热系统和数据采集系统组成。实验装置结构如图1所示。

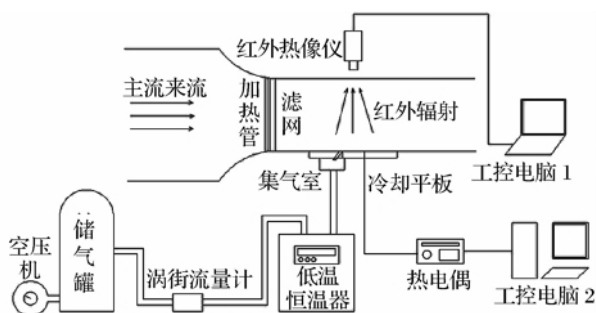


图1 实验装置结构

其中,风洞实验段尺寸为 $2\,000\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,顶部采用透明亚克力板,并设有氟化钙光学窗口。气膜冷却平板如图2所示,气流流向为 X 轴,气流展向为 Z 轴。平板由厚度为 16 mm 的透明亚克力板加工而成,整体尺寸为 $500\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。实验平板分为前后两个部分,前部为射流孔布置区,其下方连接一个长方体集气室,以降低入口冷却气体的湍流度,使其均匀进入气膜孔;后部是测试区,测试区内 $X/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 10$ 处开设6条可以布置热电偶的槽缝,用于校准红外热像仪数据。

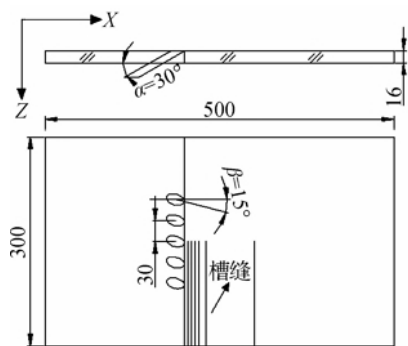


图2 气膜冷却平板

注:以 $\beta=15^\circ$ 为例;长度单位:mm。

气膜孔的射流角 α 是指气膜孔轴线与主流来流方向所成的夹角,是影响气膜冷却效果的重要参数;而本文所指复合角 β 是指气膜孔轴线在平板上的投影与主流来流方向所成的夹角。实验所用冷却平板的射流角 $\alpha=30^\circ$,复合角 β 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 90° ,气膜孔布局分别采用单孔和单排布置方式。单个气膜孔的内径 $D=10\text{ mm}$,长径比 $L/D=4$,单排布置的孔间距 $S=3D=30\text{ mm}$ 。实验中保持射流速

度和主流速度均为 5 m/s ,即吹风比 $M=1.0$ 。

冷却射流系统由空气压缩机、储气罐、减压阀、低温精密恒温液浴槽和涡街流量计组成。射流经过液浴槽后温度可维持在 -10°C 左右。主流加热系统置于风洞实验段前,由33根特制石英加热管组成,可使主流温度保持在 70°C 左右。

实验数据的采集和处理主要利用红外热像仪(FLIR A320,工作波段为 $7.5\sim 13\text{ mm}$,测温范围为 $-20\sim 120^\circ\text{C}$,分辨率为 0.1 ,测量精度为量程的 $\pm 2\%$)和FLIR R&D software软件完成。

2 数据处理方法

在气膜冷却实验中,红外测试技术获得的主要参数是冷却平板的表面温度场,为便于不同工况下测试结果的分析比较,本文对实验数据进行无量纲处理,采用气膜冷却绝热效率来研究冷却效果。

平板气膜冷却绝热效率的定义为:

$$\eta = \frac{T_f - T_m}{T_c - T_m} \quad (1)$$

式中: T_f 为冷却射流和主流来流混合后的流场局部温度,平板表面假设为绝热壁面,无热交换,此时绝热壁面局部温度 T_{aw} 和流体局部温度 T_f 相同,即: $T_f = T_{aw}$; T_c 为冷却射流的温度; T_m 为主流来流温度。则式(1)可以转化为:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_m}{T_c - T_m} \quad (2)$$

实验中,可认为平板表面的温度 T_w 即为绝热壁面局部温度,即 $T_{aw} = T_w$ 。

3 实验结果与分析

3.1 射流孔下游整体气膜冷却效果分析

3.1.1 单孔分析

图3和图4分别是各复合角情况下单孔平板下游区域的温度云图和气膜冷却绝热效率分布图。从温度云图看, $\beta=15^\circ$ 时的射流方向与 $\beta=0^\circ$ (无复合角)时相差不大,但是冷却平板表面温度的分布却存在差别。这是由于有复合角存在时,冷却射流将产生横向动量分量,射流内部结构较没有复合角时有了一定改变,流场的变化,导致了传热效果的变化,自然呈现出不同的温度分布特性。当 $\beta=30^\circ$ 时,冷却射流的横向动量分量会进一步增大,气膜覆盖区域发生明显的横向偏转。 $\beta=90^\circ$ 时,复合角完全横向布置,冷却射流与主流来流方向相互垂直,冷却区域的流向偏转效果进一步加强。

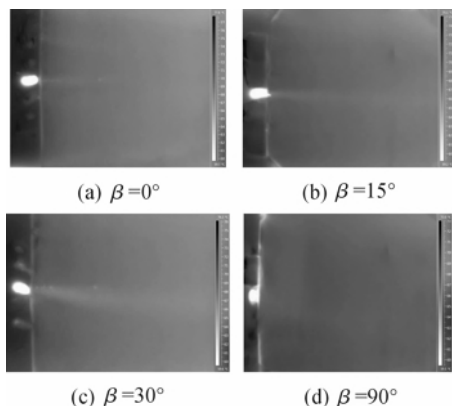


图3 单孔平板不同复合角实验温度云图

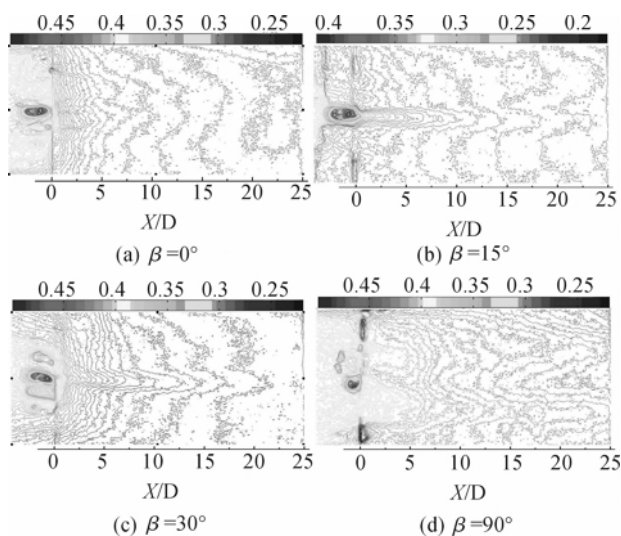


图4 单孔平板不同复合角实验绝热效率分布图

分析绝热效率分布图, $\beta=0^\circ$ 时, $X/D < 5$ 区域内绝热效率等值线较密, 显示了出口附近的强烈换热效果, 也说明此位置较剧烈的流动动量交换, 即流动结构较为复杂, 导致在此区域内气膜冷却绝热效率的变化梯度大; 在 $X/D > 5$ 的区域绝热效率等值线逐渐变稀, 绝热效率下降变得平缓。考虑到 $M=1$ 的运行条件, 此时射流的动量在出口位置和主流近似, 存在“穿透”效应, 即未能被主流完全压制于冷却平板, 仅在冷却孔出口位置, 因 Coanda 效应, 黏附有部分冷却流体, 确保一定的有效冷却, 但随着射流和主流的相互掺混均匀及流场结构发展的稳定, 其冷却效果恶化, 绝热冷却效率梯度变化减缓。 $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时, 因射流在主流方向的动量分量减小, 主流的压制效果, 其流体的附着范围较无复合角工况在流向上有一定拓展, 绝热效率等值线呈锥形分布。当 $\beta=90^\circ$ 时, 冷却射流动量的主流流向分量为 0, 更易被压制而形成冷却膜, 绝热效率等值线分布趋于均匀。

3.1.2 单排分析

图 5 和图 6 分别是各复合角情况下单排平板下游区域的温度红外效果图和气膜冷却绝热效率分布图。与复合角单孔布置时相比, 单排情况下具有与单孔射流时相似的气膜冷却特性, 但气膜孔下游区域的冷却气膜覆盖的范围明显扩大, 而且冷却效果得到了提高。当 $\beta=15^\circ$ 时, 气膜孔复合角的角度较小, 与无复合角气膜孔单排布置时相差不大, 气膜冷却范围略微出现了偏转。复合角增至 30° 时, 冷却气膜覆盖的范围横向倾斜变得明显。此时, 各射流横向的动量分量增大, 无复合角时的冷却死区(孔间射流不能覆盖的壁面范围)现象得到缓解。当复合角为 90° 时, 气膜孔复合角的横向方向完全与主流来流方向垂直, 冷却射流的横向覆盖面积达到最大, 另外, 由于相邻射流的彼此作用, 可能存在邻近气流的重叠, 增加了一些位置的冷却气量, 使气膜孔下游区域的冷却效果较单孔有所改善。

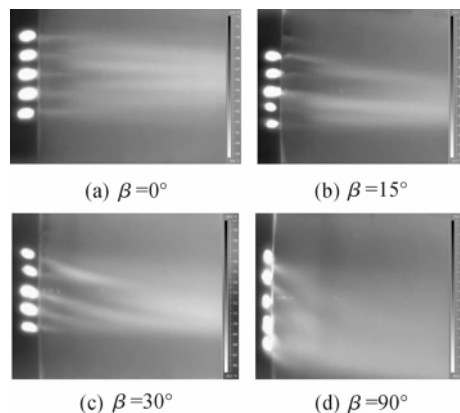


图5 单排平板不同复合角实验温度云图

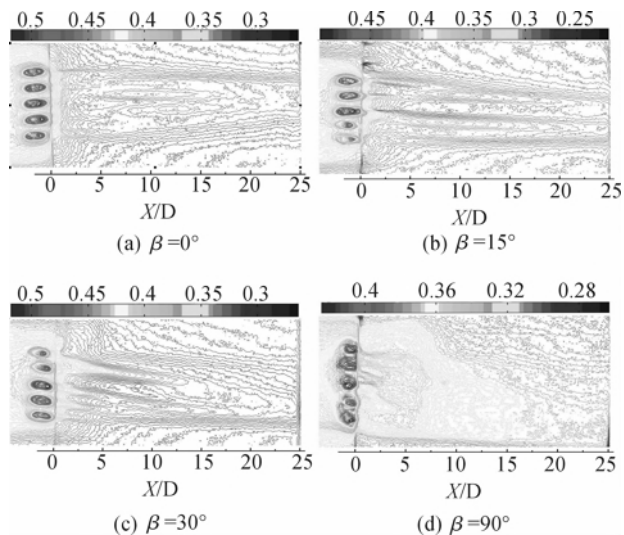


图6 单排平板不同复合角实验绝热效率分布图

观察绝热效率分布图, $\beta=0^\circ$ 时, 靠近气膜孔区域的冷却效果优于平板的远场区域, 因冷却射流不存在横向分量, 射流在出口发生“穿透”后, 在下游位置将因动量衰减而有“再附着”, 为此图中呈现了绝热效率在主流方向的极值区, 其云图中心即为“再附着”点。当 $\beta=15^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时, 冷却射流发生偏转, 整体的分布趋势与无复合角时相似, 但因为存在横向速度分量, 冷却射流彼此间有相互作用, 使得平板的最终冷却效果更加均匀。当 $\beta=90^\circ$ 时, 绝热效率等值线分布无明显疏密区分, 冷却效果非常均匀。

3.2 横向气膜冷却绝热效率分析

3.2.1 单孔分析

图7是单孔平板不同复合角沿流向不同位置的气膜冷却绝热效率曲线。从图中可以看出, 绝热效率在横向上的分布基本比较平缓, 显然, 复合角的存在增加了冷却气流的横向动量分量, 抑制了冷却死区的存在, 从而促成横向绝热效率的均匀分布。随

着流向距离 X/D 的增大, 因射流与主流间的掺混, 气膜隔热效果变差, 冷却效果逐渐减弱, 不过, 在 $X/D < 15$ 的范围内, 仍可维持高于 19% 的有效冷却效率。对于相同的流向位置, X/D 较大处, 气膜冷却绝热效率的分布较为均匀。在各个横截面上, 除 $\beta=15^\circ$ 外, $\beta=30^\circ$ 、 90° 时的气膜冷却绝热效率比无复合角的情况要高, 这主要还是缘于采用大复合角的条件下, 射流因横向动量分量存在而促使主流方向气膜更易贴附壁面的缘故。 $\beta=0^\circ$ 时, “再附着”现象将保证其下游一定冷却效果; 而 $\beta=15^\circ$, “再附着”效应的削弱, 使得射流整体难以贴附冷却壁面, 从而导致了冷却恶化, 其所表现的冷却效率低于其他条件。此外, 采用复合角后获得的最大气膜冷却绝热效率值均没有出现在 $Z/D=0$ 的轴线上, 而是随着复合角角度的方向往左边偏移。综合来说, $\beta=90^\circ$ 时, 气膜冷却区域各横向截面的绝热效率最高, 均匀性也最好。

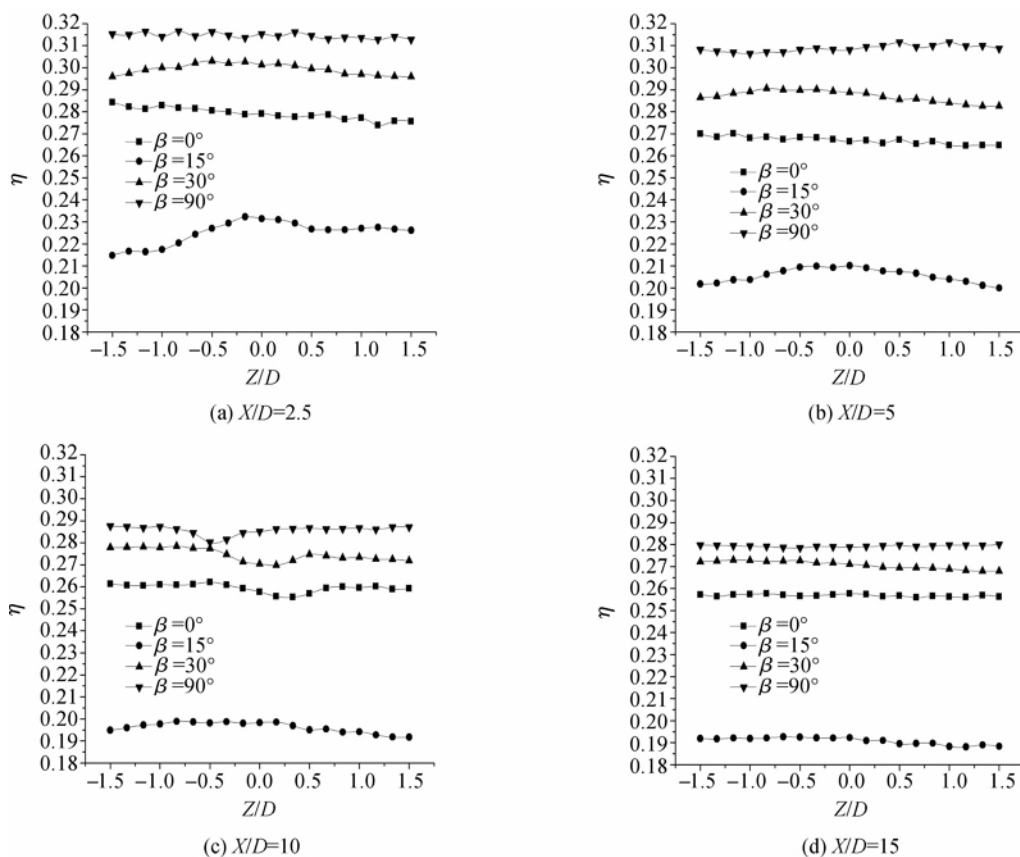


图7 单孔平板不同复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

3.2.2 单排分析

图8是单排平板不同复合角流向诸横截面气膜冷却绝热效率曲线。总体来说, 单排布置时的射流横向气膜冷却绝热效率曲线没有单孔时平稳, 其原因可能是气膜孔横向偏转使各射流间彼此影响的结

果。随着 X/D 的增大, 平板横向气膜冷却绝热效率的最大值向 $Z/D=0$ 轴的左侧偏移, 相同 X 处的绝热效率横向分布趋于一致。在各条件下, $\beta=15^\circ$ 的冷却效率虽然仍低于其他工况, 但是与其他工况的冷却效率差值有所减小, 说明 $\beta=15^\circ$ 时, 单排布置

时的气膜孔间作用增强了射流的“再附着”效应,使得绝热效果有所增强。 $\beta=30^\circ$ 工况的横向气膜冷却绝热效率曲线一度变得两端高中间低,本文认为除上述单孔实验中复合角引起的气流向一侧偏转效应外,还存在相邻气膜孔射流的碰撞偏转效应,一定程度增加了右侧的冷却气量,从而提高了相应位置的绝热效率。在单排布置时, $\beta=90^\circ$ 条件下的绝热效率不如单孔时突出,这是因为气膜孔的横向角度最

大,相邻气膜孔的冷却射流碰撞和偏转剧烈,掺混效果增强,使隔热恶化,导致绝热效率的表现弱于单孔,但是此时的绝热效率曲线更加平缓,冷却效果趋于均匀,冷却死区范围明显减小了。虽然除了在 $X/D=2.5$ 的左侧和 $X/D=5$ 的两端之外, $\beta=90^\circ$ 的绝热效率均低于 $\beta=30^\circ$,但是绝对数值相差不多,均匀性比 $\beta=30^\circ$ 好,综合而言,其冷却利用前景更为突出。

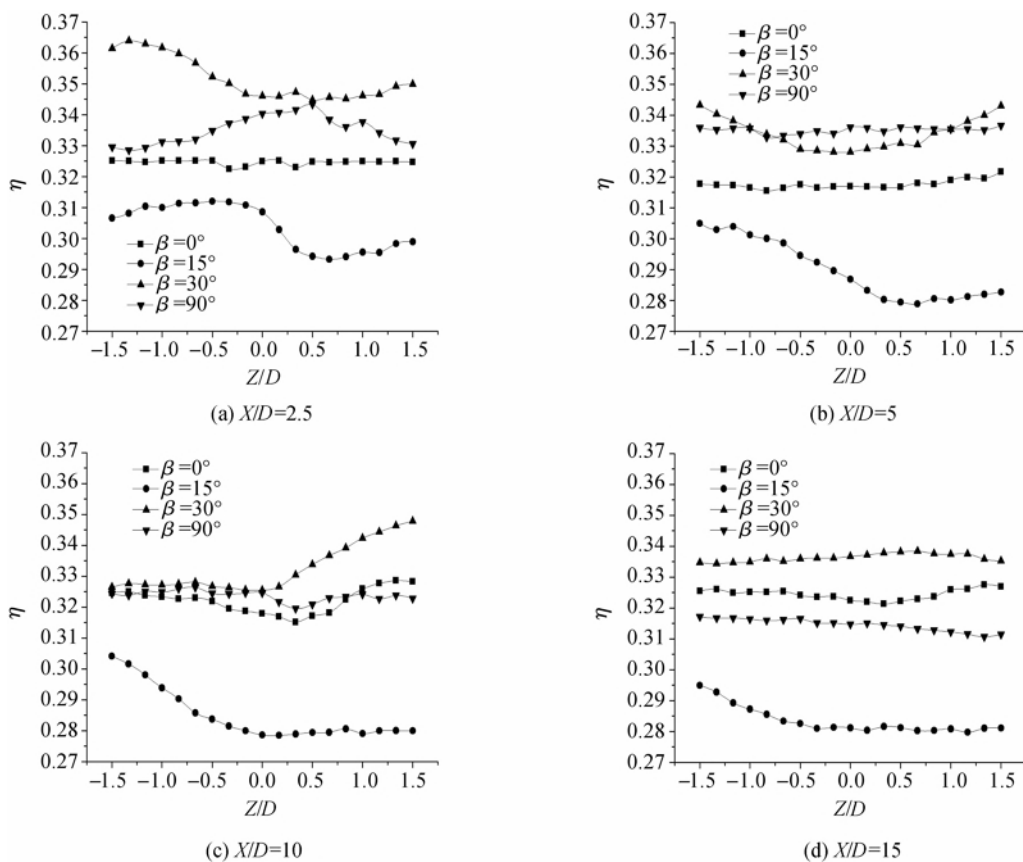


图8 单排平板不同复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

4 结论

本文基于红外热成像技术,比较了吹风比 $M=1$ 时不同复合角对气膜冷却绝热效率的影响,有如下结论:a)在不同复合角射流条件下,由于横向射流分量的存在,冷却射流随着复合角度的增大发生横向偏转,增大了冷却气体的横向覆盖面积,并且降低了沿主流来流方向的射流分量,使冷却气体具有更好的附壁性,与简单无复合角时相比,一定条件下获得的气膜冷却绝热效率要高;b)单孔时,随着复合角的增大,气膜冷却区域发生偏转。并且复合角越大,偏转越明显。当 $\beta=90^\circ$ 时,平板上流向 $X/D=15$ 范围内的绝热效率较其他复合角时要均匀;c)单排布置时,气膜冷却区域分布与单孔时相似,但绝热效率

整体提高,孔与孔之间的冷却死区随着复合角度的增大而减小, $\beta=90^\circ$ 时气膜冷却综合效果最好。

参考文献:

- [1] Goldstein R J, Eckert E R G, 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.
- [2] Walters D K, Leylek J H. A detailed analysis of film-cooling physics: part I: streamwise injection with cylindrical holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(1): 102-112.
- [3] Ligrani P M, Bell C M, Hamakawa H. Film cooling from shaped holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122(22): 224-232.

- [4] Sargison J E, Guo S M, Oldfield M L G, et al. A converging slot-hole film-cooling geometry: part 2: transonic nozzle guide vane heat transfer and loss[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(3): 461-471.
- [5] Han J C, Teng S. Effect of film-hole shape on turbine-blade film-cooling performance[J]. *ASME Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2001, 15(3): 257-265.
- [6] Kim Y J, Kim S M. Influence of shaped injection holes on turbine blade leading edge film cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(2): 245-256.
- [7] 韩 昌, 李 佳, 李雪英, 等. 基于 PSP 实验技术的双射流气膜冷却特性研究[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(12): 2770-2770.
- [8] Goldstein R J, Jin P, Olson R L. Film cooling effectiveness and mass/heat transfer coefficient downstream of one row of discrete holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(2): 225-232.
- [9] Nasir H, Ekkad S V, Acharya S. Effect of compound angle injection on flat surface film cooling with large streamwise injection angle[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2001, 25(1): 23-29.
- [10] 杨 宽, 赵志军, 戴 韧, 等. 基于红外热像技术的气膜冷却实验方法与应用[J]. *燃气轮机技术*, 2010, 23(4): 8-12.
- [11] Ligrani P M, Ciriello S, Bishop D T. Heat transfer, adiabatic effectiveness, and injectant distributions downstream of a single row and two staggered rows of compound angle film-cooling holes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(4): 687-700.
- [12] Ligrani P M, Wigle J M, Ciriello S, et al. Film-cooling from holes with compound angle orientations: part 1: results downstream of two staggered rows of holes with 3d spanwise spacing [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(2): 341-352.
- [13] Reiss H, Bolcs A. Experimental study of showerhead cooling on a cylinder comparing several configurations using cylindrical and shaped holes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(1): 161-169.
- [14] 李国庆, 邓宏武, 侠晖霞. 复合角对涡轮叶片旋转气膜冷却效果的影响[J]. *航空动力学报*, 2010(2): 308-313.

Experimental Research on Film Cooling of Different Compound Angles Based on Infrared Thermography Technology

LIU Lan-fei¹, DONG Ruo-ling¹, SHI Hong-hui¹, SHEN Wei-jie^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, XIE Kai¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018 China;
2. Jindu Management Institute, Hangzhou Vocational Technical College, Hangzhou, 310018, China)

Abstract: Flat plate film cooling serves as the research object. Based on infrared thermography technology, this experiment studies the influence of different compound angles ($\beta = 15^\circ, 30^\circ, 90^\circ$) on flat plate film cooling effect under such conditions as jet angle $\alpha = 30^\circ$ and the blowing ratio $M = 1.0$. Under single-hole case, film cooling area deflects with the rise in the compound angle. As the compound angle becomes bigger, the deflection becomes more obvious. when $\beta = 90^\circ$, cooling effect of jet flow plate is superior to other compound angles, and lateral distribution is more uniform; when film holes of different compound angles are arranged in single row, adiabatic cooling efficiency of flat plate improves, compared with single hole. The film cooling dead area between two adjacent holes decreases with the rise in compound angle. when $\beta = 90^\circ$, film cooling effect is ideal.

Key words: flat plate film cooling; infrared thermography technology; compound angle; adiabatic efficiency
(责任编辑: 康 锋)