

复合角及排列方式对平板气膜冷却效果影响的实验研究

谢 凯¹, 董若凌¹, 施红辉¹, 沈伟杰¹, 陈 伟^{1,2}

(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: 在回流风洞实验段中,以平板气膜冷却作为研究对象,运用红外热像技术监测沿主流流向不同横向截面的平板壁面温度分布,对比分析横向气膜冷却绝热效率。结果显示:采用 30° 流向倾角,普遍存在小吹风比工况较大吹风比工况有更优横向气膜冷却绝热效率的现象;复合角的存在可以改变射流流场,提高横向冷却绝热效率;排孔布置有利于提高平板整体冷却绝热效率,并且插排可以有效避免热应力集中。

关键词: 气膜冷却; 红外热像技术; 复合角; 排列方式; 吹风比

中图分类号: V233.5 **文献标志码:** A

0 引 言

现代燃气轮机^[1]不断提升入口工质温度,增强了循环热效率,但同时也导致了工作部件热负荷和机械负荷不断增加。为了确保设备性能,延长使用寿命,有效冷却燃气轮机内部高温部件就显得非常重要。目前,已开发的冷却措施主要有气膜冷却^[2-3]、对流冷却、发散冷却和复合冷却等,其中,气膜冷却技术的使用最为广泛,工业应用前景尤为广阔。国内外学者已从气膜孔的几何参数和冷却流场气动参数方面着手,研究影响气膜冷却效率的因素。例如:Pietrzyk等^[4]发现气膜孔的长径比对气膜冷却绝热效率有强烈的影响;Guo等^[5]采用大涡模拟方法分析了不同吹风比和气膜孔角度对气膜冷却效果的影响;Ligrani等^[6-8]研究了孔排的复合角及孔间距对气膜冷却效果的影响;刘捷等^[9-10]利用热敏液晶测温技术考察了气膜孔采用不同射流角度后的气膜冷却绝热效率;杨宽等^[11]则利用红外热成像技术,实验研究了单个圆柱孔和单排孔结构下平板的气膜冷却效果,论述了不同冷却空气量对其的影响。

本文主要运用红外热像仪,辅以热电偶,设定气膜冷却孔流向角为 30° ,对单孔无复合角、单孔有复合角(复合角度 30°)、单排孔无复合角、单排孔有复合角(复合角度 30°)和双排孔无复合角等5种孔型插排的圆柱形气膜孔,进行平板气膜冷却效果测试,在多种吹风比工况下,比较三个流向位置平板壁面温度数值的差异,以考察复合角和排列方式对平板气膜冷却绝热效率的影响规律。

1 实验装置

实验装置由供气系统、测试系统以及冷却平板构成,如图1所示。其中,供气系统由主流风洞装置、石英加热管、滤网、空气压缩机、储气罐、减压阀和低温恒温器构成;测试系统由涡街流量计、红外热像仪、热电偶和工控电脑构成。风洞主流气流由混流风机提供,通过变频调节风机转速,能够对风速和主流流量进行改变,实验过程中,保持射流速度不变,改变主流流速,使吹风比在0.3~2.0之间变化。冷却射流系统由空气压缩机、储气罐、减压阀、低温恒温器和涡街流量计组成。主流加热系统由多根定制的石英加热管组成,在风速为10 m/s的风洞中,

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y1090869);浙江省科技厅工艺技术研究工业项目(2012C2103);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)

作者简介: 谢 凯(1988—),男,湖南常宁人,硕士研究生,主要从事气膜冷却流场特性的高速纹影方面的研究。

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

可将实验段内的空气温度最大加热到 70℃,因而能够保持冷却射流与高温主流之间的温差达到 80℃左右。测速仪器采用的是热线风速仪和涡街流量计,测量主流风速和射流速度。测温仪器采用的是红外热像仪以及热电偶,测量主流和射流的温度,以及绝热平板壁面的温度。主要实验装置技术参数见表 1。

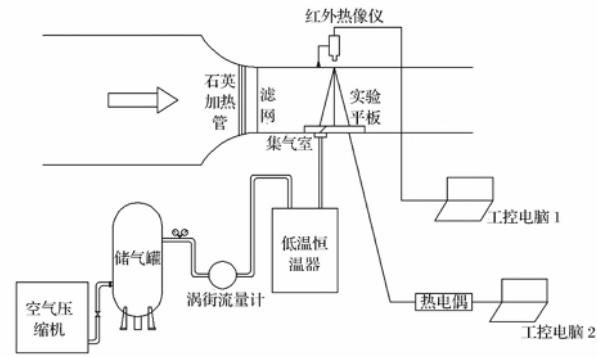


图 1 实验装置结构

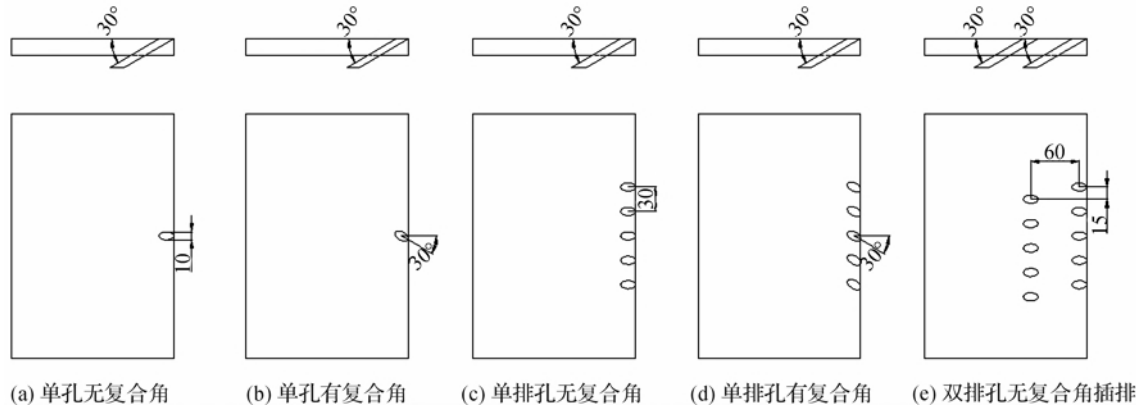


图 2 5 种孔型示意

注:图中尺寸单位 mm。

本文出现的主要符号的说明如表 2 所示。

表 2 主要符号及说明

符号	说明
M	吹风比(射流与主流的质量流量之比)
X	纵向坐标尺寸
Z	横向坐标尺寸
D	射流孔孔径尺寸
X/D	纵向坐标尺寸/射流孔孔径尺寸
Z/D	横向坐标尺寸/射流孔孔径尺寸

在气膜冷却实验中,气膜冷却绝热效率是研究冷却效果的重要无量纲参数之一,定义为:

$$\eta = \frac{T_f - T_m}{T_c - T_m}$$

假设平板表面为绝热壁面,无热交换,则: T_f 为绝热壁面局部温度, T_c 为冷却射流的温度, T_m 为主流来

表 1 主要实验装置技术参数

装置	速度 $V/(m/s)$	流量 $Q/(m^3/h)$	温度 $T/^\circ C$
混流风机	3~25	—	—
低温恒温器	—	—	-30~90
热线风速仪	0~20	—	—
涡街流量计	—	0~80	—
红外热像仪	—	—	-20~120
热电偶	—	—	0~55

冷却平板由透明亚克力板加工而成,整体尺寸大小为 500 mm×300 mm,实验段区域铺有一块方形 300 mm×300 mm 的薄铜板,铜板上方喷有黑漆,可以提高辐射率。在平板背面连接一个长形体集气室,集气室的作用是让冷却射流进入气膜孔前降低冷却气体的湍流度,能够较为均匀地进入气膜孔。

本实验工况的选择以 Yuen 等^[12-13]的实验为参考,其中孔型参数如图 2 所示:射流角为 30°,射流孔孔径 $D=10$ mm,孔间距为 $3D=30$ mm,排间距为 $6D=60$ mm;吹风比分别为 $M=0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5$ 和 2.0 。

流温度。

2 实验结果分析

2.1 单孔无复合角

图 3 所示为单孔无复合角时,射流孔出口下游不同截面的横向气膜冷却绝热效率分布情况,绝热效率沿孔中心线方向大致对称。在 $X/D=2.5$ 处,小吹风比时,冷却效率曲线呈中间较高的“拱形”分布,此现象在 $M=0.3$ 时最为明显,其原因为:当吹风较小,射流在垂直平板向上方向的动量不大,在气膜孔出口即可实现良好的平板表面贴附效果,形成有效保护气膜,从而在射流中心表现出较好的冷却效果;并且此位置射流主体尚未达到充分扩散,横向偏离中心线位置的气膜存在状况不佳,冷却效率随

之递减,故此冷却效率曲线呈中间较高的“拱形”分布。当吹风比增加,冷却效率曲线逐渐平缓,其原因为:射流刚度增强,一定程度克制主流压制,射流的壁面贴附效果变差,孔中心线上的冷却作用随即衰减;气膜冷却射流均具有肾形涡结构,其在中心位置呈远离壁面的运动形式,吹风比的增加造成涡强度提高将增强类似效果,导致平板上射流孔中心线所在纵向位置冷却效果变差。 $M=0.5$ 和 $M=0.7$ 在 $|Z/D|>0.5$ 处的冷却效率高于 $M=0.5$ 在此处的冷却效率,其原因为:类似涡结构的发展使射流边缘趋向于平板方向,较中心线位置,冷却气体在射流边缘(横向扩展方向)堆积,将增加相应位置的气膜厚度。 $M=1.0$ 时在一些位置的冷却表现相对突出,其原因为:虽然射流动量较强使其不易附壁,但尾迹涡和射流背风涡的充分发展将弥补上述不足,冷却气以附着涡的形式在壁面成膜,同样能够实现有效热保护。在 $X/D=5$ 处,冷却状况发展规律出现新的变化,在 $M=1.0$ 和 $M=0.7$ 工况下的冷却效果分别优于吹风比低一级时工况,其原因为:较高吹风比时的射流在向上扩散一定路程后,因主流的阻碍而转向平板,再次贴附壁面,增加其行进位置的气膜厚度,提高了冷却效率。在 $X/D=15$ 处,气膜射流已经完全扩散,故横向冷却效率分布较为平缓,此时

$M=1.0$ 和 $M=0.7$ 工况下的冷却效果高于其他工况,其原因为:低吹风比射流的动量已耗尽,难以维持有效气膜,冷却效率降至最低,高吹风比工况下的射流则因克服了主流的压迫,刺穿了主流层,难以有效附壁,导致冷却效果未见好转。总体上,低吹风比利用射流出口成膜,随吹风比增加,冷却效率可能下降,但一定情况时,射流涡结构的存在和“再附着”现象的作用,使高吹风比工况下的冷却效率高于低吹风比工况下的冷却效率。

2.2 单孔有复合角

图4所示为单孔有复合角时,射流孔出口下游不同截面的横向气膜冷却绝热效率分布情况,冷却中心受复合角影响发生偏移。在 $X/D=2.5$ 处,高吹风比具有较好的冷却效果,其原因为:复合角使射流在出口后获得对应方向的动量分量,其冷却中心发生偏移,高吹风比工况射流因动量在不同方向再分配,反而易于被主流压制,结果在出口位置呈现了较好的冷却效果。在 $X/D=2.5$ 和 $X/D=5.0$ 处,随着截面位置距离的增加,复合角带来的冷却中心偏移影响有所缓和,这时低吹风比工况冷却效率高于其他工况,其原因为:当低吹风比射流能较好附壁时,原来主流相对射流因类似圆柱绕流而具有的马蹄涡发展受到抑制,加上主流的携带,射流在X方

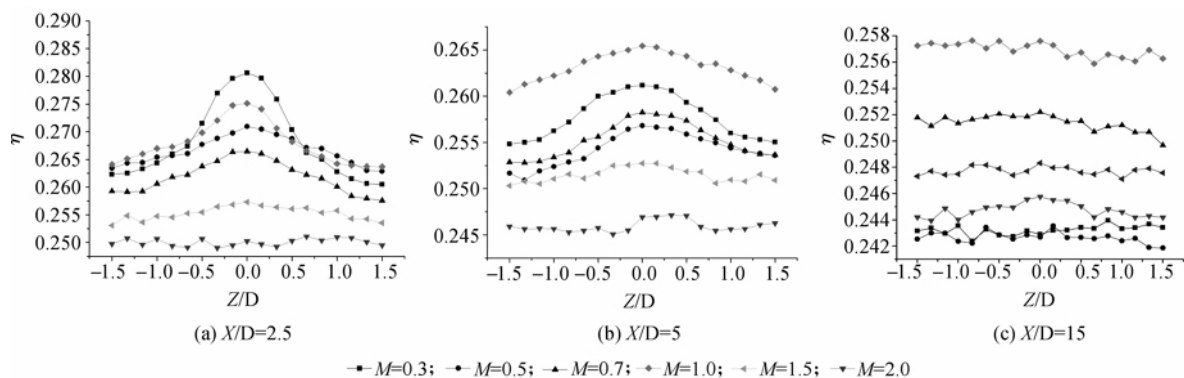


图3 单孔无复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

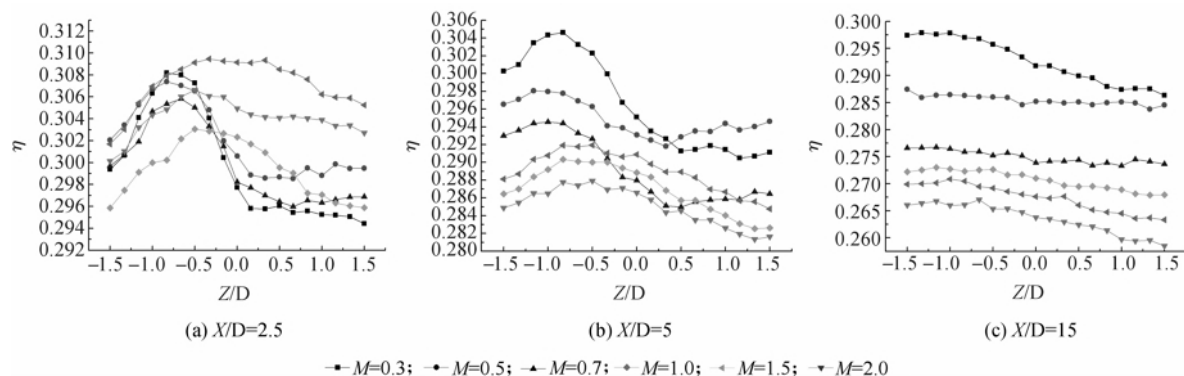


图4 单孔有复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

向的成膜和维持黏附更为有利,冷却削弱得到迟滞;高吹风比条件下的射流则因大动量形成的“抬离”效应,在离开出口不久,即有高温主流进入射流下层,冷却效率迅速下降。与图3比较:由于主、射流交错形式的变化,原有特征涡结构,如尾迹涡等的发展不同于无复合角工况,其在冷却中的参与受到抑制, $M=1.0$ 条件所拥有的高冷却效率现象未再出现。总体而言,复合角改变了单孔射流流场,由于易于成膜,其冷却绝热效率好于不具有复合角工况,且因为有横向动量分量,该工况在横向的冷却效果也得到改善。

2.3 单排孔无复合角

图5所示为单排孔无复合角时,射流孔出口下游不同截面的横向气膜冷却绝热效率分布情况,射流孔成排出现,冷却射流彼此间将互相影响。在三个截面位置上,低吹风比工况下的气膜绝热冷却效率都高于高吹风比工况,其原因为:低吹风比工况,射流在主流作用下能够很好的贴附壁面,且相邻射流边缘互相叠加,实现冷却补偿,提高了冷却效率;高吹风比工况,如 $M=1.5$ 和 $M=2.0$,因较大的射流刚度,不能很好贴附壁面,冷却效率不佳。单排孔冷却效率优于其对应单孔冷却效率,其原因为:当以孔排形式实现冷却时,冷却射流在向下游扩散的过程中,不仅像单孔工作时一样卷吸主流,而且还卷吸邻近射流冷气,从而对气膜实现了补偿;临近孔射流

肾形涡使孔间冷却介质均具有朝向平板的运动趋势,有增强孔间气膜附着的效果;排孔使主流因绕流射流而形成的马蹄涡结构在流向的发展受到抑制,削弱其对冷却的破坏,故孔排不论在孔中心线方向,还是横向,均实现了高效冷却。 $M=1.0$ 工况的冷却表现较其在单孔时差异较大,其原因为:由于尾迹涡等因排孔作用的抑制,使该条件下的射流冷却不再突出,尽管依然可见“再附着”引起的冷却改善(图5(c)中 $M=1.0$ 时的冷却效率近似或者高于图5(b)图相同位置的数值),但类似作用似乎不及单孔;排孔孔间肾形涡结构虽然有促进横向冷却的效果,但也起到了主流向平板运动的诱导作用:卷吸主流抑制气膜成型,故单孔时出现的高吹风比工况一定横向距离后冷却效率,高于低吹风比工况的现象未再出现。排孔布置后,气膜对平板的热保护整体得到了改善。

2.4 单排孔有复合角

图6所示为单排孔有复合角时,射流孔出口下游不同截面的横向气膜冷却绝热效率分布情况,冷却效率曲线分布特征类似单孔有复合角。如前所述,孔间射流的相互影响将增强平板整体的冷却效果,单排布置的作用效果也依然有效。射流动量分量的存在,孔中心线方向的冷却效率极值较无复合角时略显降低。在偏离射流沿复合角运动一侧,虽

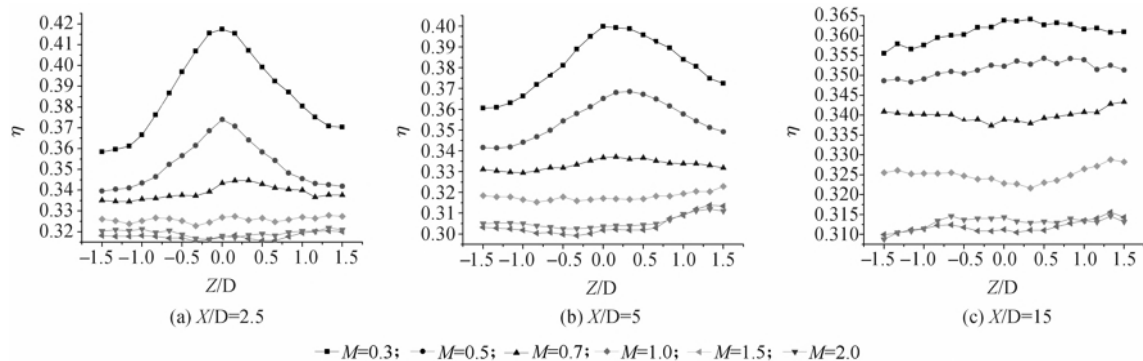


图5 单排孔无复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

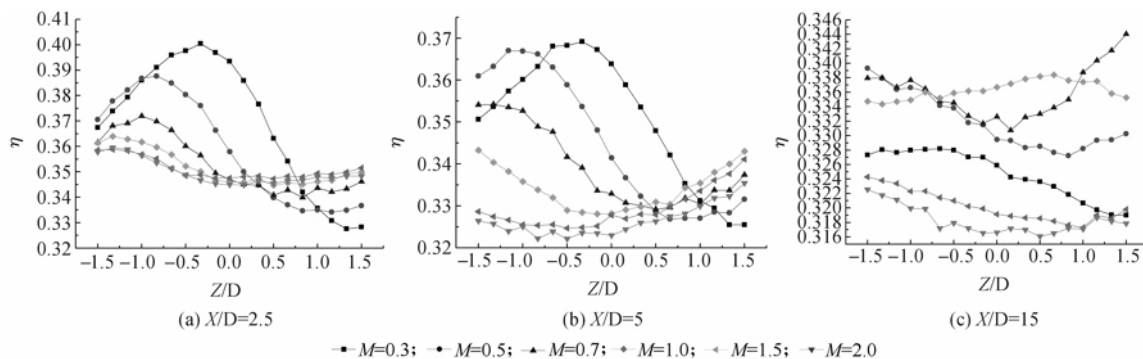


图6 单排孔有复合角横向气膜冷却绝热效率曲线

然高吹风比射流在复合角偏转的方向冷却表现一般,但对孔间壁面,却由卷吸和肾形涡的较强作用而获得好于低吹风比的冷却效果。低吹风比工况(如 $M=0.3$)和高吹风比工况(如 $M=1.5$, $M=2.0$)的冷却效率均不高,反而中等吹风比 $M=1.0$ 和 $M=0.7$ 获得了好的冷却效果,其原因为:高吹风比的射流抬离依然是造成类似工况冷却不佳的弊端所在;低吹风比时横向动量分量的存在使射流在孔中心线方向的耗散更为迅速,射流核心区在 $X/D=5$ 之后就很快封闭,气膜变薄,冷却距离不能持久;中等吹风比则因其“再附着”效应而再次获得了在下游远端的冷却优势。采用带复合角的单排布置后,孔间横向冷却有一定加强,孔中心线方向的冷却削弱负担不大,是一种较好的布局结构。

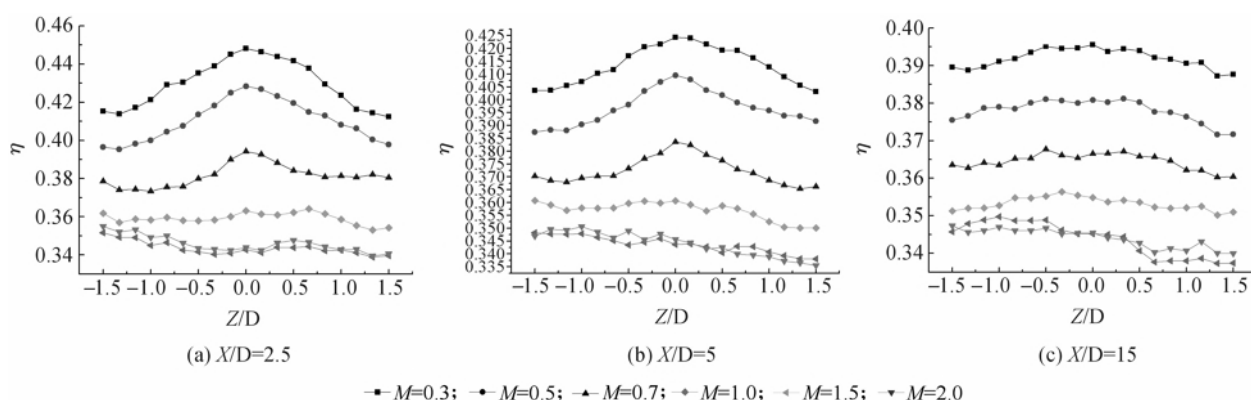


图7 双排孔无复合角插排横向气膜冷却绝热效率曲线

3 结论

根据上述实验结果和分析,可以得出以下结论:
a)单孔无复合角布置时,随着吹风比增加,存在冷却效率可能下降的现象,但一定情况下,射流涡结构和“再附着”可以改善冷却效果,使冷却效率高于低吹风比工况,如当 $M=1.0$ 时;b)单孔增加复合角后可使冷却中心发生偏移,改变射流流场,其冷却绝热效率好于不具有复合角工况,且因有横向动量分量,横向的冷却效果也会得到改善;c)排孔布置时,气膜对平板的热保护整体得到了改善;d)采用带复合角的单排布置时,孔间横向冷却有一定加强,孔中心线方向的冷却削弱负担不大;e)插排布置可以有效避免因热应力集中造成的材料失效;f)截面位置对冷却效率影响比较大,随截面位置距离的增加绝热效率曲线趋向平缓。

参考文献:

[1] 刘大易, 张宏鹏. 燃气轮机的发展前景及其发电技术

2.5 双排孔无复合角插排

图7所示为双排孔无复合角插排时,射流孔出口下游不同截面的横向气膜冷却绝热效率分布情况,冷却效率曲线分布特征类似单排孔无复合角,冷却效率随吹风比的增加呈递减规律变化。较之单排孔无复合角,在相同工况和截面条件下,双排孔无复合角插排有较高的冷却效率和较平缓的冷却曲线,其原因为:插排前排冷却射流发展方向刚好是后排的孔间,对类似位置的气膜有补偿作用,故孔间的冷却效率能够维持较高的数值,且单孔时因射流横向发展不足而形成的“拱形”冷却效率曲线也能够得到极大地改善,即表面温度场的梯度变化相对缓和,效率曲线趋于平缓,有效避免热应力集中造成的材料失效。

- [J]. 应用能源技术, 2008, 121(1): 5-8.
- [2] 倪萌, 朱惠人, 裘云, 等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术, 2006, 18(4): 25-33.
- [3] 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.
- [4] Pietrzyk J R, Bogard D G, Crawford M E. Effects of density ratio on the hydrodynamics of film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(3): 437-443.
- [5] Guo X, Schröder W, Meinke M. Large-eddy simulations of film cooling flows[J]. Computers & Fluids, 2006, 35(6): 587-606.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] Ligrani P M, Wigle J M, Jackson S W. Film-cooling from holes with compound angle orientations; Part 2—results downstream of a single row of holes with 6d spanwise spacing[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(2): 353-362.
- [9] 刘 捷, 韩振兴, 刘建军, 等. 射流注入角对平板气膜冷却特性影响的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(3): 409-411.
- [10] 刘 捷, 韩振兴, 蒋洪德, 等. 不同复合角对平板气膜冷却特性影响的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(8): 1311-1315.
- [11] 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.
- [12] Yuen C H N, Martinez-Botas R F. Film cooling characteristics of rows of round holes at various streamwise angles in a crossflow; Part I: effectiveness[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(23): 4995-5016.
- [13] Yuen C H N, Martinez-Botas R F. Film cooling characteristics of rows of round holes at various streamwise angles in a crossflow; Part II: Heat transfer coefficients[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(23): 5017-5035.

Experimental Investigations of Influence of Compound Angle and Arrangement Mode on Flat Air Film Cooling Effect

XIE Kai¹, DONG Ruo-ling¹, SHI Hong-hui¹, SHEN Wei-jie¹, CHEN Wei^{1,2}

- (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: In return wind tunnel experiment section, the flat air film cooling served as the research object, and infrared thermography technology was used to monitor flat wall temperature distribution of different transverse sections along the main flow. Contrastive analysis of adiabatic efficiency of transverse air film cooling was also conducted. The results show: at 30° direction angle, widespread small blowing ratio has a better adiabatic efficiency of transverse air film cooling than high blowing ratio; the presence of compound angle can change the jet flow field, and improve the adiabatic efficiency of transverse cooling; row hole arrangement is beneficial to improving overall cooling adiabatic efficiency of the flat; in addition, staggered arrangement can effectively avoid concentration of thermal stress.

Key words: air film cooling; infrared thermography; compound angle; arrangement mode; blowing ratio

(责任编辑: 康 锋)