

DOI: 10.7652/xjtuxb201707003

高主流湍流度下大倾角异型气膜孔 冷却特性实验研究

翟颖妮¹, 刘存良²

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 710055, 西安; 2. 西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 为了研究高主流湍流度下大倾斜角异型气膜孔的冷却特性,在主流湍流度为 11.82% 的流动工况下,采用瞬态液晶传热测量技术对倾斜角均为 60° 的圆柱孔、水滴孔以及曲面簸箕孔进行了研究。在吹风比为 0.5 的工况下,3 种孔型的气膜贴壁性都较好,上游冷却效率高于下游;在吹风比为 1.0 的工况下,圆柱孔和水滴孔出现气膜脱离壁面再附着现象,上游冷却效率低于下游;在更大吹风比下,曲面簸箕孔气膜也出现脱离再附着现象。吹风比的增加会显著增强各个气膜孔的对流换热强度,曲面簸箕孔的换热系数比在各个吹风比下都低于圆柱孔和水滴孔,圆柱孔和水滴孔的换热系数比在上游区域较高,而曲面簸箕孔的换热系数比在大吹风比下呈现出先上升后下降的分布特征。实验结果表明,在高主流湍流度条件下,大倾斜角水滴孔和圆柱孔的气膜冷却效果相近,曲面簸箕孔的气膜冷却效果优于这两种孔型。

关键词: 气膜冷却;异型气膜孔;高主流湍流度;冷却效率;换热系数比

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)07-0016-08

Experimental Study on the Film Cooling Performance of Odd-Shaped Film Holes with Large Inclination Angle under High Turbulence Intensity

ZHAI Yingni¹, LIU Cunliang²

(1. Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to obtain the film cooling characteristics of odd-shaped film holes with large inclination angle under high mainstream turbulence intensity, three film hole configurations with an inclination angle of 60°, including cylindrical hole, water-drop hole and curved dustpan hole, were studied under the mainstream turbulence intensity of 11.82% using transient liquid crystal measurement technique. At a blowing ratio of 0.5, the film attachment behavior on the wall is good for all the three hole configurations, and the film cooling efficiency in upstream region is higher than that in downstream region. At a blowing ratio of 1.0, the film jets lift off from the wall for the cylindrical hole and water-drop hole, resulting in lower film cooling efficiency in upstream region. With further increase of blowing ratio, the film jets of the curved dustpan hole also lift off from the wall. The increase of blowing ratio will obviously enhance the heat transfer intensity for all the three hole configurations. The heat transfer coefficient ratio of the cylindrical hole and water-drop hole decreases gradually along the streamwise direction. And the heat

收稿日期: 2017-01-23。 作者简介: 翟颖妮(1983—),女,博士,讲师。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ5056);国家自然科学基金资助项目(51306152)。

网络出版时间: 2017-04-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170418.1119.006.html>

transfer coefficient ratio of the curved dustpan hole is lower than that of the cylindrical hole and water-drop hole under all blowing ratios, and has an undulation feature at large blowing ratios. The above results indicate that the film cooling performance of the curved dustpan hole is better than that of the cylindrical hole and water-drop hole under all blowing ratios, but the film cooling performance of the cylindrical hole and water-drop hole with large inclination angles is close to each other.

Keywords: film cooling; shaped film holes; high mainstream turbulence intensity; cooling effectiveness; heat transfer coefficient ratio

现代高性能航空发动机为了满足日益增加的推力需求,必须进一步提高涡轮前温度。在目前的涡轮前温度下,为了保证热端部件的正常工作,必须使用高效的冷却方式。气膜冷却就是目前涡轮热端部件重要的冷却形式。

目前应用中圆柱气膜孔是最常用的结构,但是文献[1-2]研究表明,圆柱孔射流在大动量比下易脱离壁面,冷却效果有限。为了改善气膜冷却效果,国内外研究人员对异型气膜孔进行了研究,结果表明异型气膜孔冷却效果要优于圆柱气膜孔冷却效果^[3]。目前,国内外关于异形气膜孔的研究主要集中在孔型^[4-10]、主流湍流度^[11-13]、二次流进气方式^[14]等。文献[4-7]对扇形孔进行了详细的研究,表明扇形孔的扩张结构使气膜冷却效果更好;Liu 等研究了收缩扩张孔,结果表明这种结构的气膜覆盖均匀^[8-9];吴阿塞等利用液晶进行了圆柱孔、水滴孔以及簸箕孔的气膜分布可视化试验,研究结果表明水滴孔和簸箕孔提高了气膜的覆盖效果^[10]。以往关于异型气膜孔的研究多集中在小倾斜角结构,文献[15-16]研究的是不同倾斜角下圆柱孔的冷却特性,研究表明倾斜角对圆柱孔的气膜冷却效果有显著影响;李广超等研究了双扇形孔在不同倾斜角下的冷却特性,结果表明倾斜角对气膜冷却的换热系数影响复杂,同时倾斜角增大会降低冷却效率^[17]。李广超等对涡轮叶片前缘气膜冷却的研究表明,主流湍流度对气膜冷却效果有显著影响,同时主流湍流度对气膜覆盖效果的影响与动量比有关^[18];周志翔等对于涡轮叶片气膜冷却的研究表明,小湍流度有助于气膜贴附,但是较大主流湍流度会使气膜覆盖效果变差^[19]。

针对目前国内外对于大倾斜角下异型气膜孔研究较少的现状,本文实验研究了水滴孔和曲面簸箕孔两种异型气膜孔在大倾角下的冷却效果,并以圆柱孔的结果作为对比。相比于圆柱孔,水滴孔有流向扩张结构,而曲面簸箕孔有流向和展向扩张结构,

通过对比 3 种气膜孔冷却效果来研究不同扩张结构的影响。实际发动机中主流湍流度较大,为了得到高主流湍流度下异型孔气膜冷却特性,本实验在高主流湍流度下进行,丰富了相关研究内容。

1 实验装置与测试方法

1.1 实验装置

实验风洞如图 1 所示,实验系统可划分为主流系统和二次流系统。

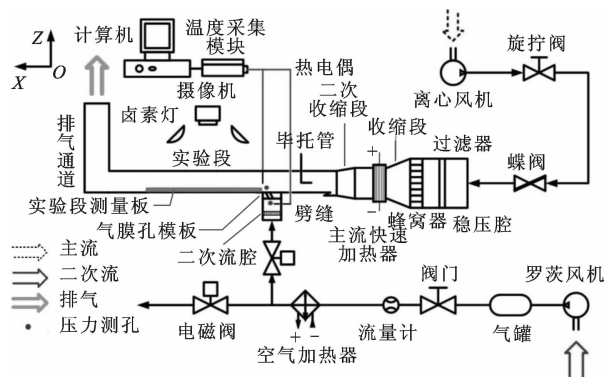


图 1 实验系统示意图

实验研究的 3 种气膜孔模型如图 2 所示,图中给出了各孔型尺寸参数,3 种气膜孔轴线与壁面夹角均为 60° ,基准圆柱孔直径 D 为 10 mm。实验段由气膜孔模块和测量区域组成,气膜孔模块使用 3D 打印制造,由 7 个相同孔型气膜孔组成单排孔,孔间距 $P=2.5D$,以中间孔中心轴对称,气膜孔模块以及测量区域位置如图 3 所示。实验需要测量高主流

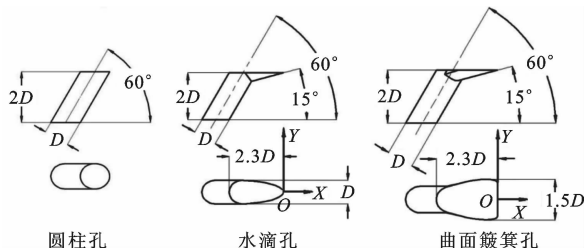


图 2 气膜孔示意图

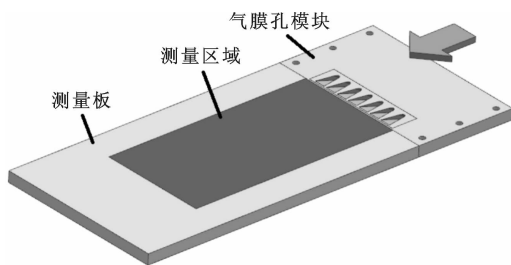


图3 实验段示意图

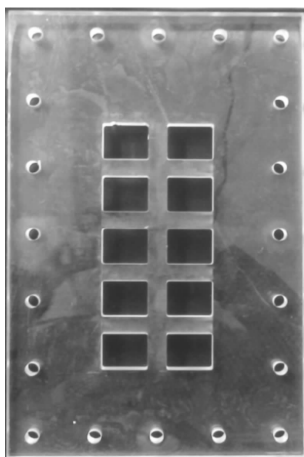


图4 湍流发生器示意图

湍流度下的冷却特性参数,因此在实验段入口和二次收缩段出口之间安装有湍流发生器,其结构如图4所示,主流湍流度通过安放在气膜孔前缘的热线风速仪测量。

1.2 测量方法

实验采用基于瞬态导热理论的热色液晶测量技术进行,文献[20-21]的瞬态传热测量理论是本文换热特性实验中测量气膜冷却效率以及换热系数的理论依据。瞬态传热测量是在流场达到稳定但温度场未稳定的情况下,通过测出测量区域表面温度的变化过程以及气流温度的变化过程来得到测量区域全表面的冷却特性。测量原理和计算公式在文献[20]中有详细说明,这里不作重复说明。实验温度采集模块将热电偶测量采集得到的温度数据记录保存在计算机中,以实现主流和二次流温度的监测记录。彩色摄像机以25帧/s的速率对实验段测量板进行测量区域温度记录。

1.3 误差分析

本实验中测量主流和二次流的热电偶测温误差以及热色液晶测温误差均为 ± 0.2 K,时间测量误差 $\Delta t = \pm 0.1$ s,测量平板物性参数误差 $\Delta(\rho c \lambda)^{1/2} = \pm 20$ 。根据误差计算方法^[22],可算出冷却效率 η 测量结果的相对误差约为8%。

2 实验结果及分析

2.1 实验工况

实验主流湍流度为11.82%,实验研究了3种 60° 倾斜角气膜孔在不同吹风比 M 下的气膜换热特性。实验过程中基于气膜孔直径 D 定义的主流雷诺数 $Re_d = \rho_g U_g D / \mu_g = 10\ 000$,吹风比的定义为

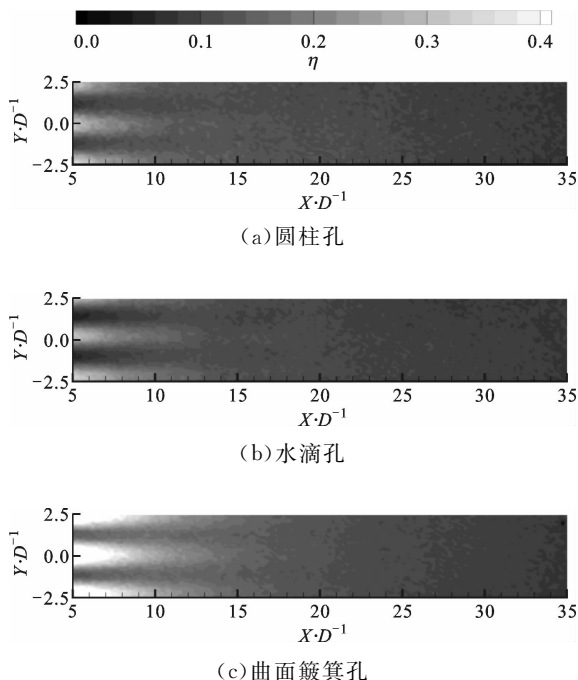
$$M = \rho_c U_c / \rho_g U_g$$

式中: U_g 、 ρ_g 、 U_c 、 ρ_c 分别为主流速度、主流密度、气膜孔入口平均速度以及二次流密度; μ_g 为主流黏性系数。实验测量了 M 为0.5、1.0、1.5和2.0的冷却特性。

2.2 冷却效率结果与讨论

本节以及后续的云图分析均以中间孔出口中心为原点、以中间孔的一个周期范围进行展示,即中间孔和两个半孔的范围。

图5展示了吹风比为0.5时3种孔型的冷却效率分布云图。由图可见,3种气膜孔的冷却效率分布都呈现靠近气膜孔的上游区域高、远离气膜孔的下游区域低、孔中心线处冷却效率高、孔间区域低的特点。这是因为小吹风比工况下射流动能相比主流较小,射流流出后贴附壁面效果较好。对比3种孔型可以看出,水滴孔与圆柱孔的冷却效果相差较小,这说明小吹风比下大倾斜角水滴孔的流向扩张结构对冷却性能并没有提升。从图5还可以看出,曲面簸箕孔的气膜覆盖效果最好,簸箕孔上游的冷却效

图5 $M=0.5$ 时的气膜冷却效率分布云图

率远高于另外两种孔的结果,簸箕孔的展向分布范围也较大,孔间低冷却效率范围相对较小。图 5c 中簸箕孔的气膜射流在 $X/D=15$ 处才混合在一起,冷却效率展向趋于均匀,而另外两种气膜孔射流约在 $X/D=10$ 后就可混合均匀。

图 6 展示了吹风比为 1.0 时的冷却效率分布云图。从图中可以看出,圆柱孔和水滴孔冷却效率分布相似,沿流向的分布没有明显差异,而且上游区域孔间低冷却效率区域进一步扩大。对比图 6a 和 6b 还可以发现,水滴孔的整体冷却效率要低于圆柱孔的结果。这说明随着吹风比增大,大倾斜角圆柱孔和水滴孔射流贴附壁面效果变差,射流流出后与主流掺混加剧,射流直接被主流打散,气膜贴壁效果较差。从图 6c 中曲面簸箕孔的冷却效率分布可以看出,相比于另外两种孔,簸箕孔依然具有较好的气膜覆盖效果,上游区域有明显的射流轮廓,冷却效率较高,表明射流仍然具有较好的贴壁性。比较图 5c 和图 6c 可以发现,随着吹风比增大,簸箕孔冷却效率有所下降,孔间低冷却效率区域扩大,射流轮廓距离缩短。

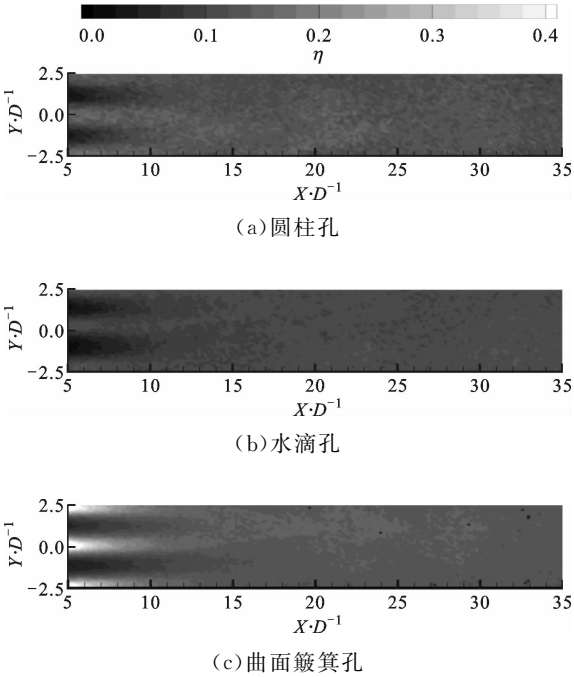


图 6 $M=1.0$ 时的气膜冷却效率分布云图

图 7 给出了吹风比为 1.5 时的冷却效率分布云图。从图中可以看出,相比于吹风比为 1.0 的工况,3 种孔上游冷却效率继续下降,而下游区域冷却效率有所上升。这是因为大吹风比下射流动量大以及射流角度大导致射流贴壁性变差,而吹风比增大冷气增加,下游冷却效率有所提升。从图 7a、7b 中可

以看出,圆柱孔和水滴孔的整体冷却效率在数值和分布上很相近,上游气膜轮廓十分模糊,孔间的低冷却效率区域进一步扩大。这进一步说明大倾角下水滴孔的射流在出流后贴壁效果较差,流向扩张结构作用有限,冷却效果与圆柱孔没有明显差异。如图 7c 所示,在曲面簸箕孔的上游依然可以看出明显的射流轮廓,孔中心线处冷却效率高于孔间区域,但是孔间低冷却效率区域扩大了。在吹风比为 1.5 时,已经可以观察到曲面簸箕孔在 $X/D=10\sim15$ 之间出现低冷却效率区域,射流在这段区域发生了脱离再附着的现象。

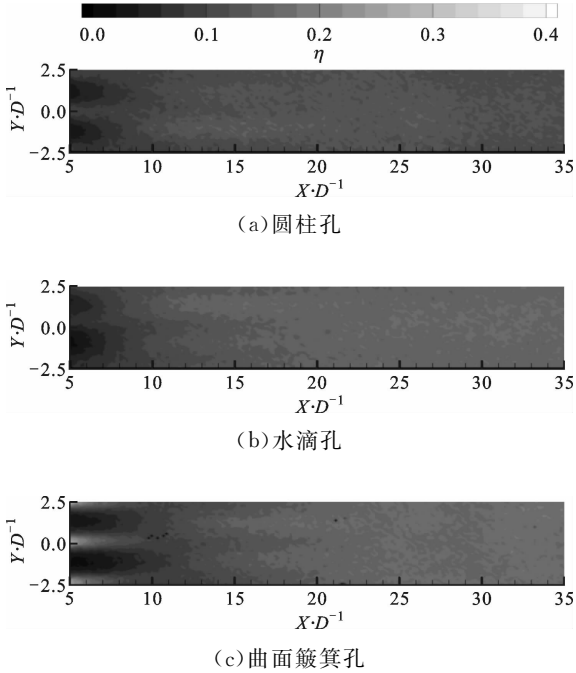


图 7 $M=1.5$ 时的气膜冷却效率分布云图

图 8 展示了吹风比为 2.0 时的冷却效率分布云图。从图中可看出,3 种气膜孔上游低冷却效率区域展向范围进一步扩大,且均有射流先脱离壁面再贴附的现象发生。从 3 种气膜孔下游区域可以看出,射流贴附壁面后的冷却效率相近,且其数值在较长的流向范围内维持不变。从图 8a、8b 可以看出,圆柱孔和水滴孔的冷却效率不论在分布结构还是数值上都很相近,同时对比图 7a、7b 可以发现,上游低冷却效率区域流向范围变小,这是因为大吹风比下射流流出后受主流作用增大,再附着区域提前。图 8c 中气膜孔附近存在少量的气膜覆盖,说明射流流出后没有直接脱离壁面。

图 9 是 3 种气膜孔展向平均冷却效率曲线图。从图中可以看出,圆柱孔和水滴孔的展向平均冷却效率变化规律基本一致,而曲面簸箕孔与前两种孔

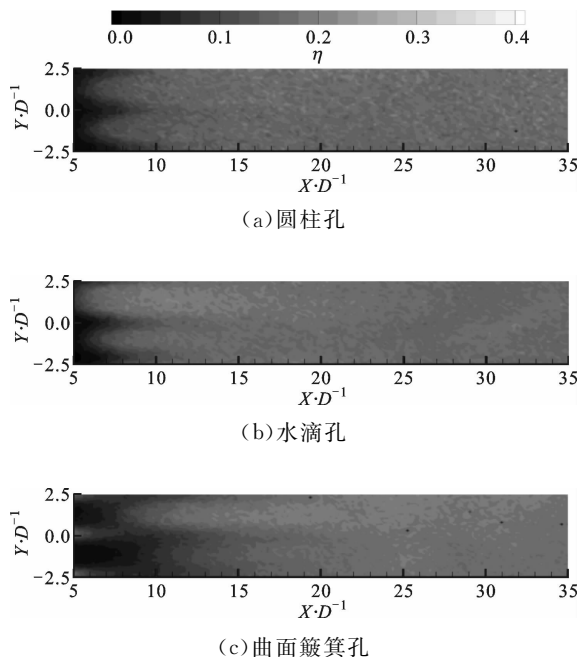
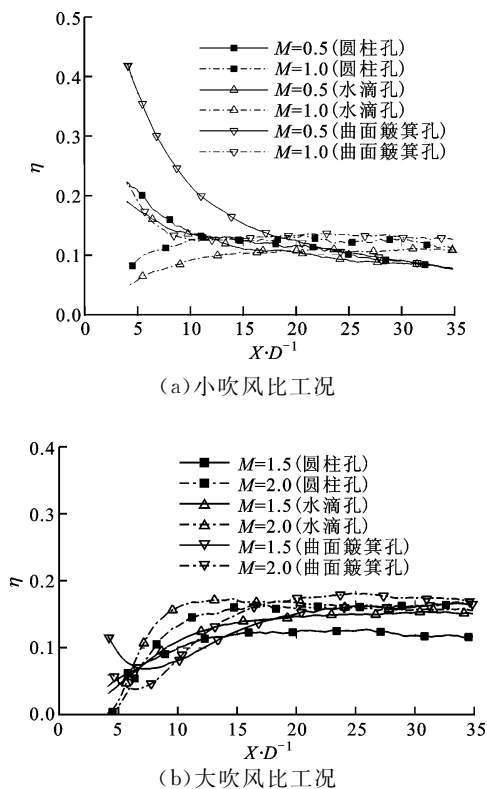
图8 $M=2.0$ 时的气膜冷却效率分布云图

图9 3种气膜孔展向平均冷却效率曲线

表现的规律并不完全相同。吹风比为0.5时,3种气膜孔的展向冷却效率均沿着流向逐渐减小,上游区域冷却效率较高,射流比较好地覆盖在壁面上,而且曲面簸箕孔的冷却效率远大于另外两种孔,说明簸箕孔的展向扩张结构使射流流出后更好地附着于壁面。当吹风比增大到1.0时,圆柱孔和水滴孔平

均冷却效率变为沿流向逐渐上升,上游区域冷却效果明显下降,说明气膜出流后有脱离壁面的趋势,且水滴孔的气膜覆盖效果恶化更明显,而簸箕孔的冷却效率依然沿流下降,且上游冷却效果较好,说明气膜流出后贴附效果依然不错。下游由于在大吹风比下射流流量增加,使得冷却效率有所提高。

图9中还显示出当吹风比增大到1.5时,3种气膜孔附近的平均冷却效率沿流向保持较低值,圆柱孔和水滴孔平均冷却效率沿流向逐渐上升,但是簸箕孔冷却效率则是先下降后上升,说明簸箕孔的射流刚流出时并没有完全脱离壁面,之后发生脱离壁面再附着的过程,这与冷却效率云图的分析是一致的。当吹风比继续增大到2.0后可以明显看出,圆柱孔和水滴孔附近的冷却效率接近0,之后冷却效率又快速上升。这说明射流流出气膜孔后直接进入主流,之后在主流作用下附着到壁面。同工况下,曲面簸箕孔冷却效率依然按照先下降后上升的趋势变化,而且相比另外两种孔上升趋势要缓慢一些,这主要和簸箕孔展向扩张结构削弱了射流动量有关,因此射流脱离壁面后受到主流作用相对较弱,再附着位置靠后且冷却效率上升平缓。在下游区域,3种气膜孔冷却效果相近,说明在大吹风比下孔型对下游远场区域的冷却效果影响有限。

2.3 换热系数比结果与讨论

由于部分吹风比下3种气膜孔各自的换热系数比 $h \cdot h_0^{-1}$ 规律相似,因此本文仅选取吹风比为1.0和2.0两种工况下的换热系数比进行分析。

图10给出了吹风比为1.0时3种孔的换热系数比云图。从图中可看出,3种孔的换热规律相似,均为上游换热系数比高、下游低,并可大致看出下游孔间换热系数比高。对比3种孔型的换热系数比分布可以发现,曲面簸箕孔上游的高换热区域明显小于另外两种孔,说明簸箕孔的扩张结构降低了射流动量,射流与主流掺混较快达到均匀,因此扰动区域相对较小。

图11展示了在吹风比2.0下3种孔的换热系数比云图。图11a、11b表明:圆柱孔和水滴孔的换热系数比在数值和分布上都都很类似,表现出上游换热强度高、下游低的规律;同时,气膜孔附近中心线处换热系数比高,而直到 $X/D=5$ 附近孔间换热系数才大于孔中心线上的值。图11c的云图显示了不同的规律,曲面簸箕孔处换热系数比明显小于另外两种孔,只在 $X/D=7 \sim 15$ 的区域孔间换热系数比出现极大值,之后沿流向逐渐降低。

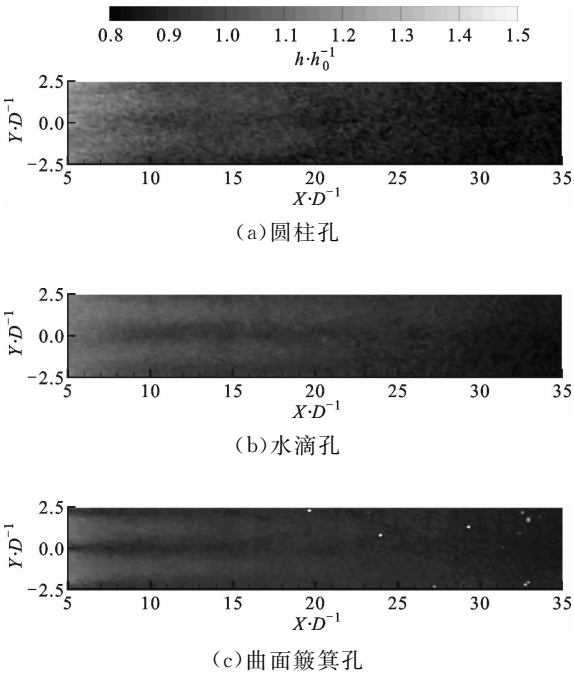


图 10 $M=1.0$ 时的换热系数比分布云图

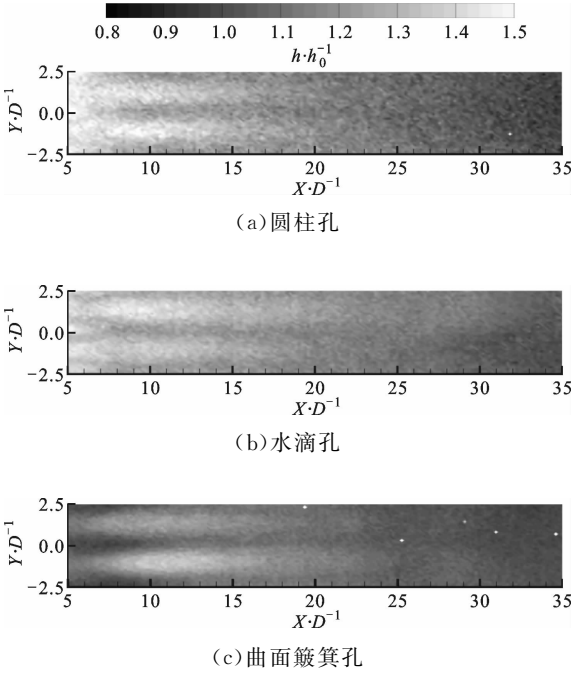


图 11 $M=2.0$ 时的换热系数比分布云图

图 12 是作者利用数值模拟方法得到的气膜孔下游流场归一化速度云图和速度矢量图,本文数值方法与文献[23]相同。从图 12 中可以看出,3 种孔的射流出流后均有沿流向发展的对涡存在,对涡的流动结构增强了孔间换热强度。图 12 还表明,圆柱孔和水滴孔在 $X/D=5$ 处的流场结构类似,说明水滴孔的流向扩张结构在大倾斜角下的作用有限,而对比图 12c 和图 12a、12b 可以明显看出,簸箕孔的

扩张结构降低了孔间壁面附近速度梯度,射流形成的对涡强度也有所下降,这导致了曲面簸箕孔下游壁面对流换热强化效果小于另外两种孔。

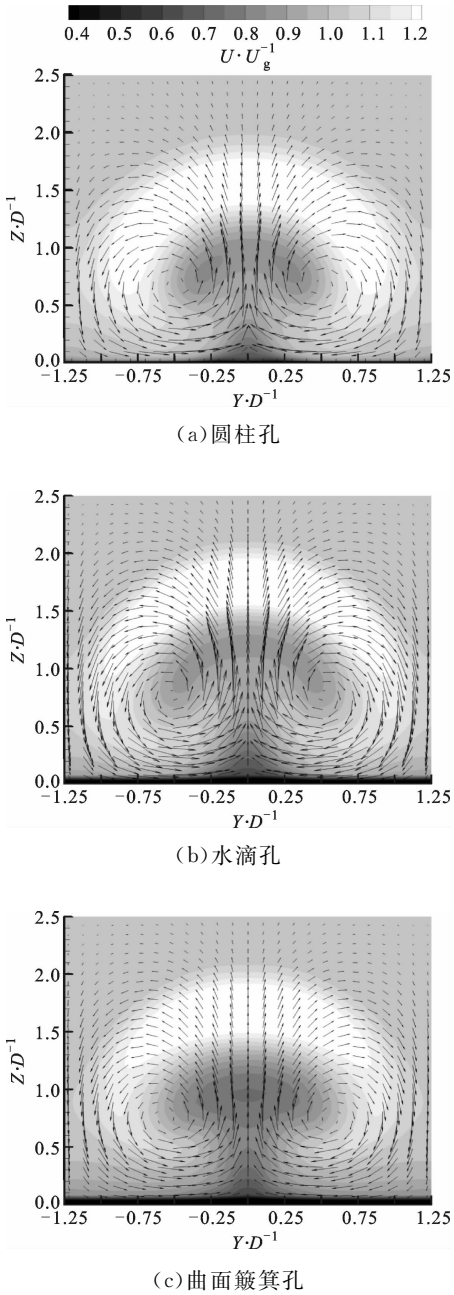


图 12 气膜孔下游 $X/D=5$ 截面上归一化速度云图和速度矢量图

图 13 展示了各个孔的展向平均换热系数比曲线图。当吹风比为 1.0 时,3 种孔的展向平均换热系数比沿着流动方向逐渐下降。在上游区域,簸箕孔的展向平均换热系数比小于另外两种孔的值,这和换热系数比云图分析是一致的;在下游区域,3 种孔的换热系数比相近。当吹风比增大到 2.0 时,圆柱孔和水滴孔的展向换热系数比在数值和分布上都

很相近,均呈现上游高、下游低的规律,但是相对于小吹风比工况换热强度大幅增加,簸箕孔的换热系数比曲线先下降后上升,与云图分析结果是一致的,这主要和簸箕孔的展向扩张结构有关。相比于小吹风比工况,簸箕孔上游的换热系数比没有明显变化,但是在 $X/D=6$ 之后,换热系数比有上升后又下降的过程,并且在下游区域的换热系数比数值上与另外两种孔的结果相近。

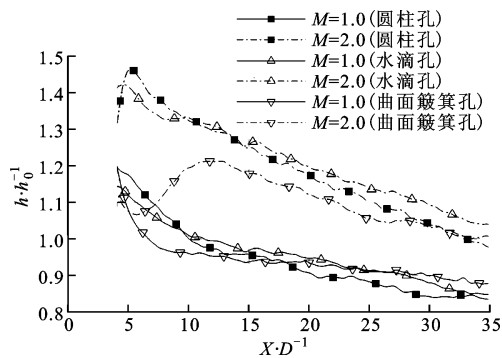


图 13 3 种气膜孔展向平均换热系数比曲线

3 结 论

本文采用基于瞬态导热理论的热色液晶测量技术,获取了高主流湍流度下大倾斜角异型气膜孔的冷却效率数据,研究了主流湍流度为 11.82% 的工况下 60° 倾斜角圆柱孔、水滴孔以及曲面簸箕孔的气膜冷却特性,得到如下结论。

(1) 吹风比提高会使 3 种气膜孔附近冷却效率下降,下游冷却效率上升。小吹风比下,3 种孔型的冷却效率分布一致,气膜覆盖效果较好。当吹风比增大到 1.0 后,圆柱孔和水滴孔开始出现明显的射流脱离现象,而簸箕孔后依然有少量冷气覆盖,但是上游冷却效率也有明显下降。当吹风比增大到 2.0 时,3 种气膜孔上游低冷却效率区域继续增大,射流脱离再附着现象明显,簸箕孔附近依然有少量气膜覆盖。

(2) 吹风比提高会增加 3 种气膜孔的换热强度。小吹风比下,3 种孔的换热系数比规律基本一致,换热系数沿着流向下降。大吹风比下,圆柱孔和水滴孔的换热系数比依然是上游高、下游低;孔后中心线处换热系数比高,射流产生的对涡进一步发展使下游孔间换热系数比增大,而大吹风比下簸箕孔也会出现明显的射流脱离壁面再附着现象,但气膜孔附近换热系数较小。

(3) 通过比较异型孔实验结果可以看出,高主流湍流度大倾斜角下 3 种气膜孔的冷却效果都不好。

水滴孔的流向扩张结构作用有限,但是簸箕孔的展向和流向扩张结构对于提升气膜冷却效果有明显作用。

参考文献:

- [1] PETERSEN D R, ECKERT E R G, GOLDSTEIN R J. Filming cooling with large density differences between the mainstream and secondary fluid measured by heat-mass transfer analogy [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1977, 99(4): 620-627.
- [2] SINHA A K, BOGARD D G, CRAWFORD M E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 441-449.
- [3] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.
- [4] DITTMAR J, SCHULZ A, WITTIG S. Assessment of various film-cooling configurations including shaped and compound angle holes based on large-scale experiments [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 57-64.
- [5] GRITSCH M, COLBAN W, SCHAR H. Effect of hole geometry on the thermal performance of fan-shaped film cooling holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(4): 718-725.
- [6] YU Y, YEN C H, SHIH T I P, et al. Film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions around diffusion shaped holes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124(5): 820-827.
- [7] BAI J T, ZHU H R, LIU C L. Film cooling characteristic of double-fan shaped film cooling holes [C]// ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, & Air. New York, USA: ASME, 2009: 185-198.
- [8] LIU C L, ZHU H R, BAI J T, et al. Film cooling performance of converging-slot holes with different exit-entry area ratios [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011020.
- [9] LIU C L, ZHU H R, BAI J T, et al. Experimental and numerical investigation on the film cooling of waist-shaped slot holes comparing with converging slot holes [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(1): 011021.
- [10] 吴阿赛, 朱惠人, 刘存良, 等. 基于热色液晶的异型气膜孔气膜分布特征的可视化实验 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(2): 376-383.

WU Asai, ZHU Hui ren, LIU Cun liang, et al. Visualization experiment on film distribution characteristics

- of shaped film holes based on thermochromic liquid crystal [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(2): 376-383.
- [11] SAUMWEBER C, SCHULZ A, WITTIG S. Free-stream turbulence effects on film cooling with shaped holes [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2002, 125(1): 41-49.
- [12] SAUMWEBER C, SCHULZ A. Free-stream effects on the cooling performance of cylindrical and fan-shaped cooling holes [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6): 061007.
- [13] WRIGHT L M, MCCLAIN S T, CLEMENSON M D. PIV investigation of the effect of freestream turbulence intensity on film cooling from fanshaped holes [C]// AMSE Turbo Expo 2011: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2011: 493-507.
- [14] DITTMAR J, SCHULZ A, WITTIG S. Assessment of various film-cooling configurations including Shaped and compound angle holes based on large-scale experiments [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(1): 109-118.
- [15] YUEN C H N, MARTINEZ-BOTAS R F. Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angles in a crossflow: part I Effectiveness [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(2): 221-235.
- [16] YUEN C H N, MARTINEZ-BOTAS R F. Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angles in a crossflow: part II Heat transfer effectiveness [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(2): 237-249.
- [17] 李广超, 朱惠人, 樊慧明. 双向扩张型孔射流角度对气膜冷却特性影响的实验 [J]. *航空动力学报*, 2009, 24(5): 1000-1005.
LI Guangchao, ZHU Huiren, FAN Huiming. Experimental investigation on film cooling of expanded hole at both inlet and outlet with various injection angles [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(5): 1000-1005.
- [18] 李广超, 朱惠人, 廖乃冰, 等. 气动参数对前缘气膜冷却效率影响的实验 [J]. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 215-220.
LI Guangchao, ZHU Huiren, LIAO Naibing, et al. Influence of aerodynamic parameters on film cooling effectiveness on the vane leading edge [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 215-220.
- [19] 周志翔, 刘存良, 张宗卫, 等. 主流湍流度对涡轮导向叶片气膜冷却特性影响的实验 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(6): 1279-1286.
ZHOU Zhixiang, LIU Cunliang, ZHANG Zhongwei, et al. Experiment on effects of mainstream turbulence intensity on film cooling characteristics of turbine vane [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(6): 1279-1286.
- [20] 刘存良, 朱惠人, 白江涛, 等. 基于瞬态液晶全表面测量技术的圆柱形孔气膜冷却特性研究 [J]. *航空动力学报*, 2009, 24(9): 1959-1965.
LIU Cunliang, ZHU Huiren, BAI Jiangtao, et al. Experimental research on film cooling characteristics of cylindrical hole with transient liquid crystal measurement technique [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(9): 1959-1965.
- [21] 刘存良. 新型高效气膜孔冷却特性研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- [22] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3-17.
- [23] LIU C L, LIU J L, ZHU H R, et al. Film cooling sensitivity of laidback fanshape holes to variations in exit configuration and mainstream turbulence intensity [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 89(10): 1141-1154.

(编辑 荆树蓉)

撤稿声明

由于在基础理论和一些计算方面抄袭《润滑数值计算方法》(高等教育出版社)第21章的内容,现决定对发表在《西安交通大学学报》2016年50卷第1期59-66页的“微型电机人字沟轴承润滑特性分析”(作者巨刚、袁亮、姜道伟、刘小月、李长勇)作撤稿处理,并在此向本刊读者及《润滑数值计算方法》作者致歉。

《西安交通大学学报》编辑部

2017年6月20日