

文章编号:1000-8055(2012)11-2455-07

凹槽孔槽深和动量比对气膜冷却特性的影响

王振伟, 朱惠人, 张宗卫, 孟庆昆

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用瞬态液晶全表面测量技术测量了凹槽孔的气膜冷却特性,研究了动量比和槽深对冷却效率的影响,并和圆柱形孔的测量结果实施了比较.结果表明:冷气在凹槽内横向传播,凹槽抑制了冷气射流分离,凹槽孔比圆柱形孔提供更多的二维气膜.槽深孔径比为 0.75 是最佳的.随着动量比的增加,冷却效率值逐渐趋于稳定,冷却效率仅有轻微增加.

关 键 词: 凹槽孔; 气膜冷却; 热色液晶; 全表面测量; 冷却效率

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of trench hole depth and momentum flux ratio on film cooling characteristics

WANG Zhen-wei, ZHU Hui-ren, ZHANG Zong-wei, MENG Qing-kun

(School of Engine and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Film cooling characteristics of trench hole were measured using a transient liquid crystal full-surface measurement technique. The influence of momentum flux ratio ($I=0.5, 1, 2, 4$) and trench depth ($s=0.5D, 0.75D, D$; D stands for film hole diameter) were studied comparison between trench hole and cylindrical hole was conducted. The results show that the trench suppresses coolant jet separation, and the trench hole provides greater lateral film coverage compared with the cylindrical hole. An optimum trench depth is $s=0.75D$. With a further increase in momentum flux ratio, the cooling effectiveness levels start to plateau, so increased coolant would not be warranted because only a slight increase in film cooling effectiveness would occur.

Key words: trench hole; film cooling; liquid crystal; full-surface measurement; cooling effectiveness

气膜冷却是现代航空发动机高温部件冷却的有效冷却措施之一.近些年来,随着制造工艺的蓬勃发展,气膜孔形开始由圆柱形孔向非圆柱形孔演变. Lu 等人^[1]利用瞬态红外线测温技术同时研究了槽深和槽宽对气膜冷却效率和传热系数的影

响,发现过深的槽会降低冷却效果,并认为 $0.75D$ 为最佳的槽深. Dorrington 等人^[2]利用前视红外测温技术在封闭环形风洞中研究了横向槽的宽度、深度、壁面角度、孔间距等因素的对气膜冷却特性的影响,发现槽深 $0.75D$ 的浅槽结构能急剧

收稿日期:2011-10-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.009.html>

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2007CB707701)

作者简介:王振伟(1987—),男,安徽阜阳人,硕士生,主要从事航空发动机高温部件先进冷却技术研究.

提高气膜冷却特性,槽深增加超过 $0.75D$ 使性能提高很小. Waye 和 Bogard^[3] 研究了 9 种不同的开槽结构,发现窄槽结构在所有实验工况下都能提供最好的冷却效果. Bunker^[4] 在平板风洞实验中研究了 $2D$ 离散凹槽孔的冷却效果,发现凹槽孔的冷却效果对吹风比 ($Ma=1\sim4$) 的变化相对不敏感,在高吹风比下也几乎没有发现气膜的脱离. Lu 等人^[5] 利用红外测温方法同时研究了单一槽深下槽宽和槽出口形状对气膜冷却效果和传热系数的影响,发现凹槽孔比圆柱形孔能提供更好的冷却效果. 但是,凹槽孔的传热系数没有显著高于圆柱形孔的. 当槽开在孔的上游时,气膜冷却效果减小. Lu 等人^[6] 采用数值模拟方法研究了在主流雷诺数为 11000 和吹风比为 1.0 时典型槽宽下槽深对气膜冷却特性的影响,发现凹槽孔的冷却效果显著高于圆柱形孔的. Lu 等人^[7] 用瞬态红外线测温技术同时测量了详细的传热系数和气膜冷却效率,结果表明凹坑孔的气膜冷却效果比圆柱形孔的增加 50%,但是他们不能像凹槽孔提供显著的横向传播. 尽管其涡强比圆柱形孔弱,但是射流依然维持三维结构. Wang 等人^[8] 首次研究了射流方位角、凹槽前倾角、槽深和槽宽等因素对

槽内射流掺混的影响,发现凹槽孔出口能提供均匀的速度分布. 本文在平板模型上运用瞬态液晶全表面测量技术研究了不同动量比和槽深下凹槽孔的气膜冷却特性,得到了凹槽孔在不同动量比和槽深下的全表面冷却效率 η 分布,并与相同动量比下圆柱形孔的冷却效率的测量结果实施了比较.

1 实验装置与测试方法

1.1 实验装置

本实验系统图如图 1 所示. 主流由离心风机提供,经气罐、旋拧阀、蝶形阀、稳定段、缩比为 5.3:1 的收缩段、金属网快速加热器进入主流腔. 二次流由另一离心风机提供,经气罐、浮子流量计、旋拧阀、空气加热器进入二次流腔. 主流和二次流的开关由电磁阀控制. 主流温度、二次流温度、测量板在导热方向的初始温度分别由布置在主流腔、二次流腔和测量板中的 K 型热电偶测得. 测量板内布置了 11 支热电偶,其位置可以参见文献[9].

凹槽孔模块由圆柱形孔模块和凹槽板模块组合而成. 测试区域和凹槽孔示意图如图 2 所示,

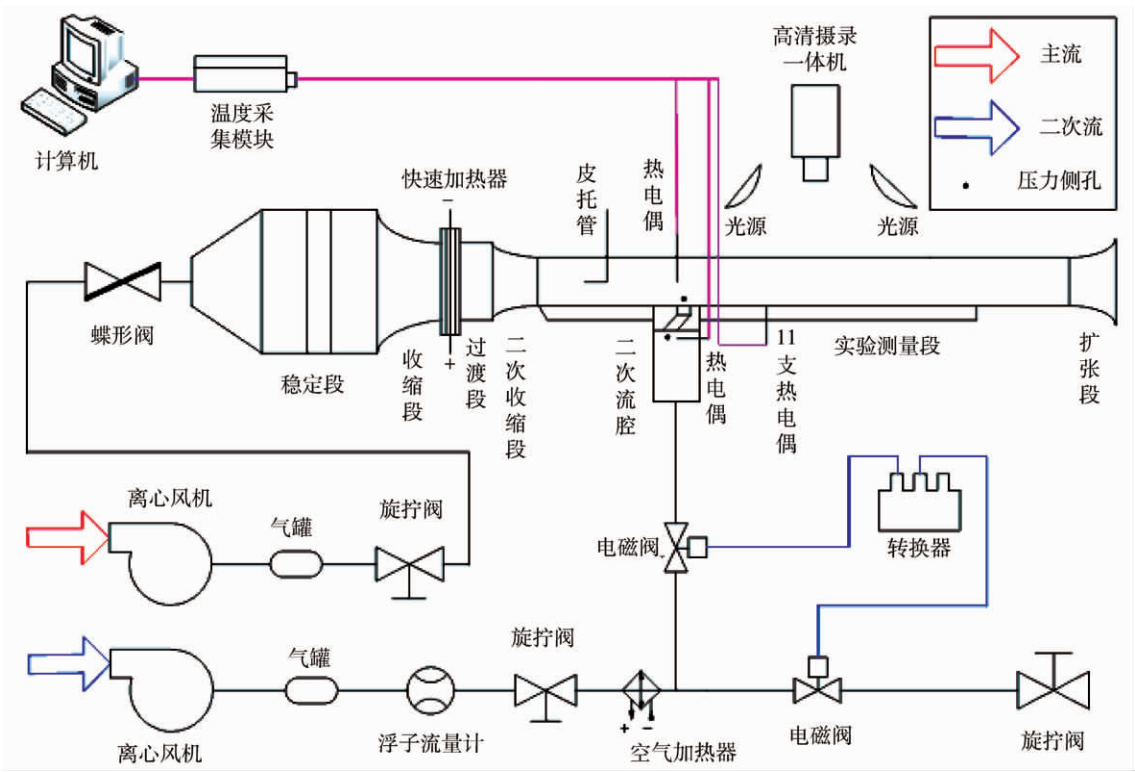


图 1 实验系统图

Fig. 1 Sketch of experiment system

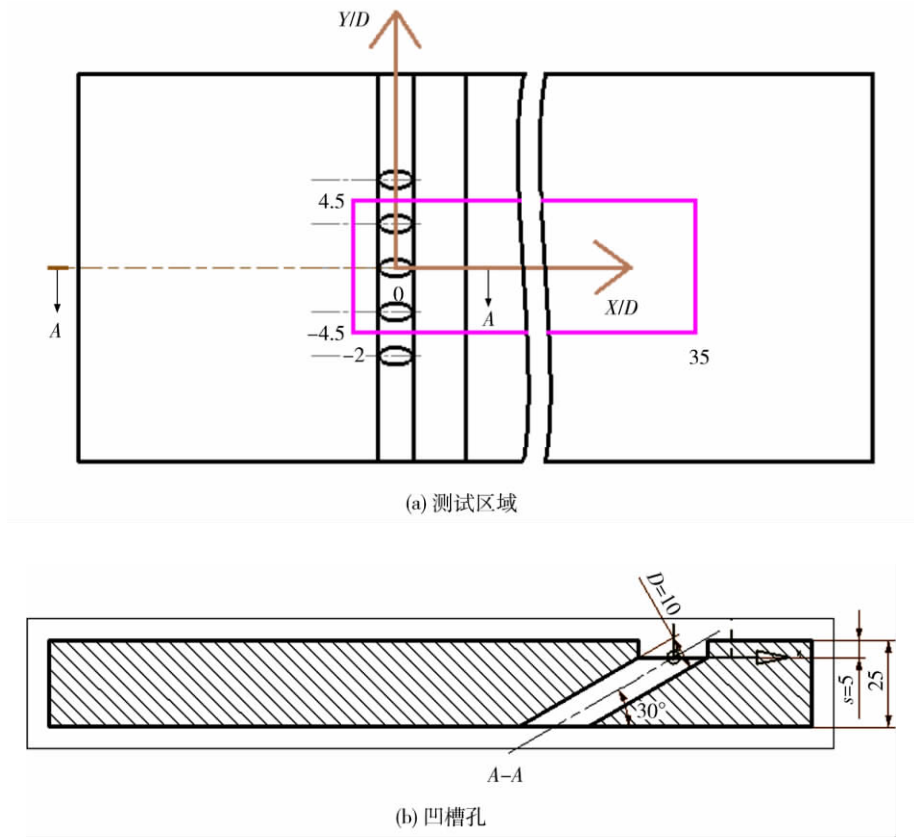


图 2 测试区域和凹槽孔示意图(单位:mm)

Fig. 2 Diagrammatic sketch of test region and the trench hole(unit:mm)

图 2(a)由凹槽板和测量板组成,粉红色矩形区域为测试区域的范围:流向 $[-2D, 35D]$,展向 $[-4.5D, 4.5D]$, 1°C 带宽的窄带液晶喷涂在这个区域中.图 2(b)为凹槽孔槽深 $s=0.5D$ 模块示意图,另有 2 个槽深 $s=0.75D$ 和 $s=D$ 模块.圆柱形孔模块是由 5 个气膜孔组成的单排气膜孔,气膜孔直径 $D=10\text{ mm}$,孔间距为 $3D$,孔轴线与壁面夹角为 30° .

1.2 测量方法

本实验采用一种处理非均匀初始壁温的瞬态液晶测量技术(参见文献[9-10]),该技术基于一维半无限大非稳态导热理论.实验测量了凹槽孔和圆柱形孔下游的全表面气膜冷却效率.实验采用热电偶测量气流温度,温度采集频率为 10 Hz .实验采用 3CCD 高清数码相机记录测量板表面窄带热色液晶的变色过程,相机拍摄速率为每秒 25 帧,获得了测量板表面各点的温度 $T_s(t)$ 及其所对应的时间 t .窄带热色液晶测温原理和图像处理技术可以参见文献[11-15].

1.3 误差分析

本实验中由热电偶测得的主流温度、二次流

温度、测量板在导热方向的初始温度和由热色液晶测得的测量板表面变色温度的测量误差均为 $\Delta T=\pm 0.2\text{ K}$,窄带热色液晶变色时间的测量误差 $\Delta t=\pm 0.1\text{ s}$,测量板物性参数的测量误差 $\Delta\sqrt{\rho c \lambda}=\pm 20$.采用误差计算方法估算出实验测得的冷却效率的相对误差约为 10% .

2 实验结果与讨论

2.1 实验工况

本实验基于主流雷诺数为 $10\,000$ 、槽宽为 $2D$.主流雷诺数定义如下:

$$Re_d = \rho_g U_g D / \mu_g \tag{1}$$

式中 ρ_g, U_g, D, μ_g 分别代表主流密度,主流速度,气膜孔直径和主流动力黏度.实验研究了 4 个动量比为 $0.5, 1, 2, 4$; 3 个槽深为 $0.5D, 0.75D, D$ 下的冷却效率,并与圆柱形孔的冷却效率实施了比较.通过浮子流量计调节二次流流量实现了不同的动量比,动量比定义如下:

$$I = \rho_c U_c^2 / \rho_g U_g^2 \tag{2}$$

式中 ρ_c, U_c 分别代表二次流密度和气膜孔入口截面处的二次流平均速度.

2.2 冷却效率分布结果与讨论

2.2.1 凹槽孔与圆柱形孔比较

尽管采用液晶方法可以获得测量壁面全表面的温度场,并计算出全表面的冷却效率,获得比使用热电偶测量丰富的信息,但毕竟只有一个平面上的温度信息.为了分析三维流动与换热,分析壁面冷却效率分布的形成原因,本文先采用数值计算的方法获得三维流动的速度场与温度场.

图 3 是采用数值模拟方法得到的凹槽孔 $Y/D=0$ 截面上的流线和温度云图,孔中心线在 $Z/D=0$ 处,其中基于主流温度 T_g 和二次流温度 T_c 的无量纲温度定义为 $T_{nd} = (T - T_g) / (T_c - T_g)$.从图中可以看到,射流冲击凹槽形成的角涡和槽下游形成的回流涡减弱了射流的动量.在槽下游有动量损失,射流在主流压迫下形成更好的覆盖效果.一般情况下,当凹槽深度小于气膜孔长度时,凹槽孔既能提高气膜冷却效果,又能维持机械完整性.

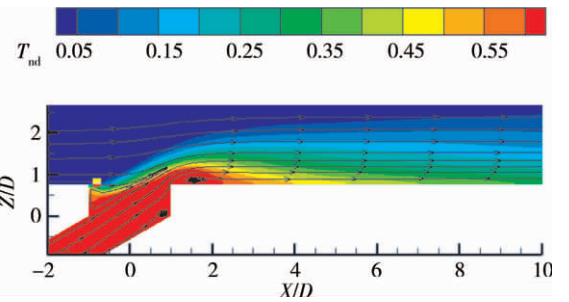


图 3 凹槽孔流线和气膜冷却效率云图
($Y/D=0$)

Fig. 3 Streamlines and temperature contours of trench hole ($Y/D=0$)

图 4(a)是采用数值模拟方法得到动量比 $I=0.5$ 下的凹槽孔下游 $X/D=0.9$ 截面上的速度矢量图和温度云图.孔中心线在 $Y/D=0$ 截面处,气膜孔出口在 $Z/D=0$ 截面处,凹槽出口为 $Z/D=0.75$ 截面处.冷气从气膜孔喷出后被凹槽下游壁面阻塞,迫使在槽内分流,横向传播,直至充满整个凹槽,减小了孔出口的三维结构,进而在槽出口形成均匀的二维气膜.可见,凹槽抑制了冷气射流分离.

图 4(b)和图 4(c)分别是采用数值模拟方法得到动量比 $I=0.5$ 下的凹槽孔和圆柱形孔下游 $X/D=2$ 截面上的速度矢量图和温度云图.从图中可以看出:凹槽孔使射流在槽内横向传播,可以覆盖比气膜孔出口更宽的范围,实现了全表面气

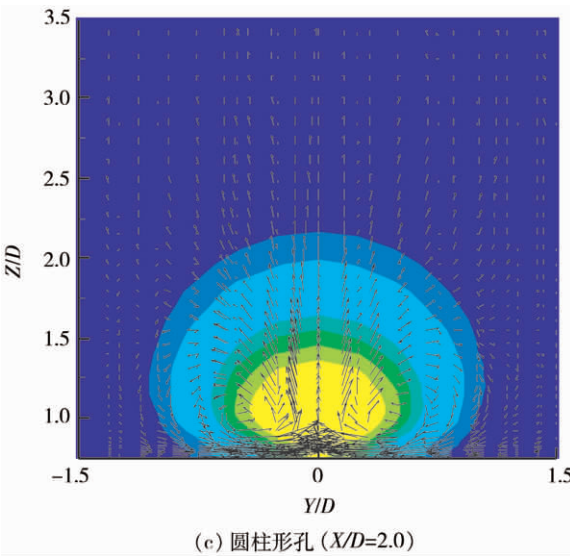
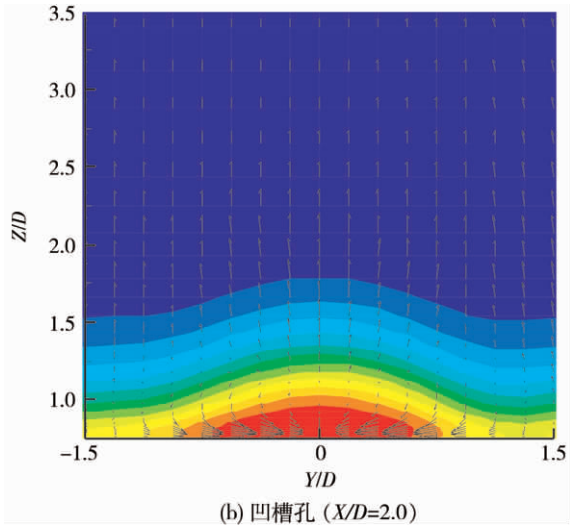
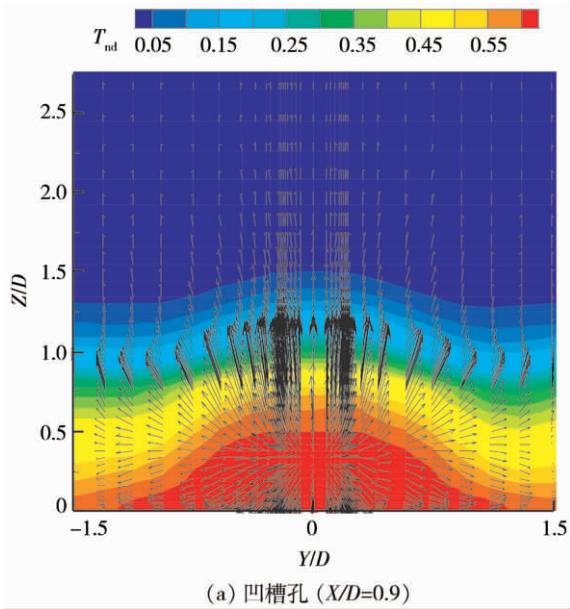


图 4 气膜孔下游速度矢量图和温度云图
Fig. 4 Velocity vectors and temperature contours of downstream of film cooling hole($I=0.5$)

膜覆盖;而圆柱形孔出口没有展向扩展,射流在与主流的相互作用下逐渐扩大覆盖范围,使得孔间附近区域没有形成气膜覆盖,尤其在大动量比下,射流脱离壁面,使整个孔附近区域得不到很好的气膜覆盖.可见,凹槽孔产生展向连续气膜,圆柱形孔产生展向离散气膜,凹槽孔的冷却效果明显好于圆柱形孔的.

2.2.2 槽深的影响

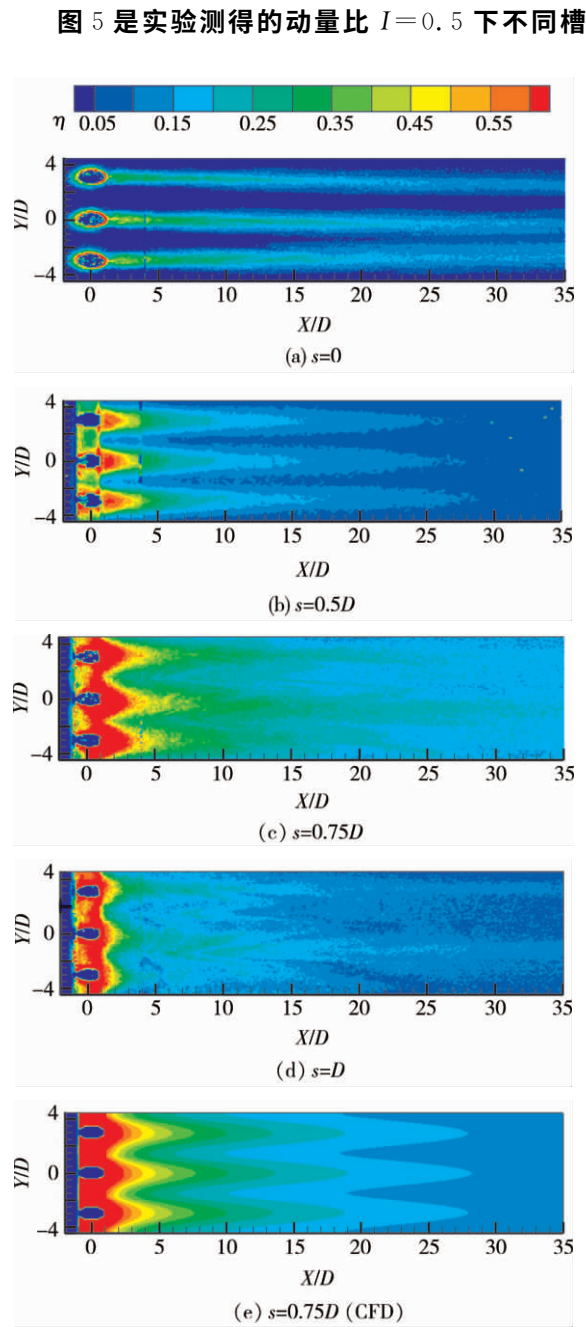


图 5 $I=0.5$ 气膜冷却效率分布云图

Fig. 5 Contours of film cooling effectiveness distribution($I=0.5$)

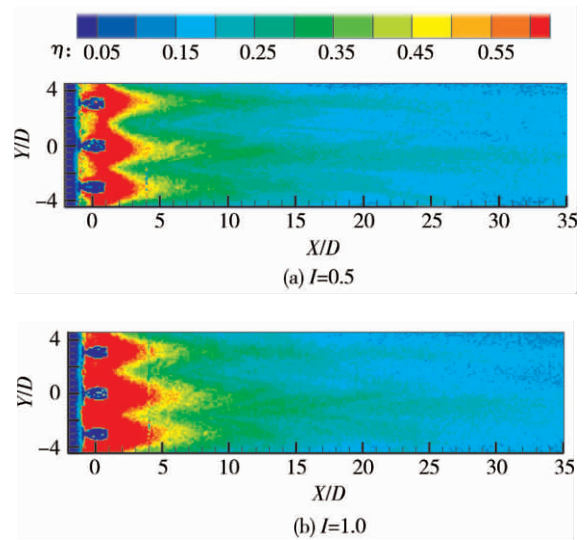
深的冷却效率分布云图. 对于圆柱形孔 $s=0$ (见图 5(a)),射流没能全部覆盖气膜孔下游壁面,两气膜孔中间很宽的区域没得到气膜覆盖. 凹槽孔总体分布规律呈现:孔上游的冷却效率较低,相同流向位置处气膜孔中心线附近冷却效率高,两侧冷却效率低,沿流动方向冷却效率迅速衰减的特点. 对于浅槽 $s=0.5D$ (见图 5(b)),冷气射流从气膜孔流出进入凹槽,由于射流的横向传播,射流逐渐充满凹槽后再和主流均匀掺混,进而在凹槽孔下游形成保护气膜. 对于槽深 $s=0.75D$ (见图 5(c)),与浅槽相比,槽深 $s=0.75D$ 的横向传播较高,进一步减小了孔出口的三维结构,在孔下游形成更加均匀的二维气膜,槽深 $s=0.75D$ 的冷却效率较高. 对于深槽 $s=D$ (见图 5(d)),深槽增加了槽内的冷却效果但是却大大削弱了槽下游的冷却效果.

由于槽深 $s=0.75D$ 时二维低动量($I=0.5$)射流覆盖整个下游壁面,覆盖效果最好,冷却效果最好,综合考虑 4 个动量比下凹槽孔的冷却效率,槽深 $s=0.75D$ 是最佳槽深.

图 5(c)和图 5(e)分别是瞬态液晶测温和数值模拟获得的动量比 $I=0.5$ 下的冷却效率分布云图. 对比两图可以看出,冷却效率的数值计算结果与实验结果分布规律一致,数值略有差别.

2.2.3 动量比的影响

图 6 是实验测得的槽深 $s=0.75D$ 下不同动量比的冷却效率分布云图. 槽深 $s=0.75D$ 时,不同动量比下均可以实现全表面气膜覆盖,动量比对气膜冷却效率的影响很小. 较少冷气用量就可以达到均匀的冷却效果,体现了凹槽孔的优越性.



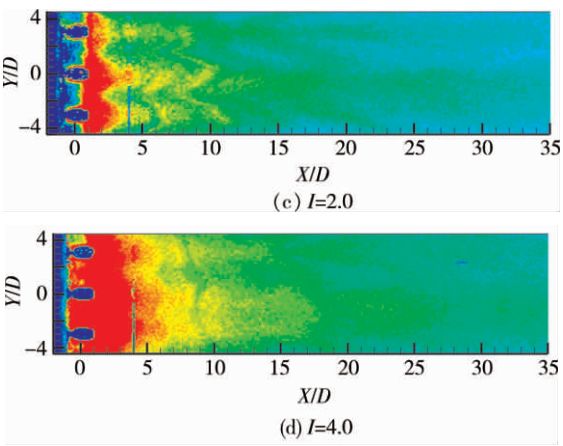


图 6 气膜冷却效率分布云图 $s=0.75D$
Fig. 6 Contours of film cooling effectiveness distribution ($s=0.75D$)

2.3 平均冷却效率结果与分析

图 7 是实验测得的各个动量比和槽深下的展

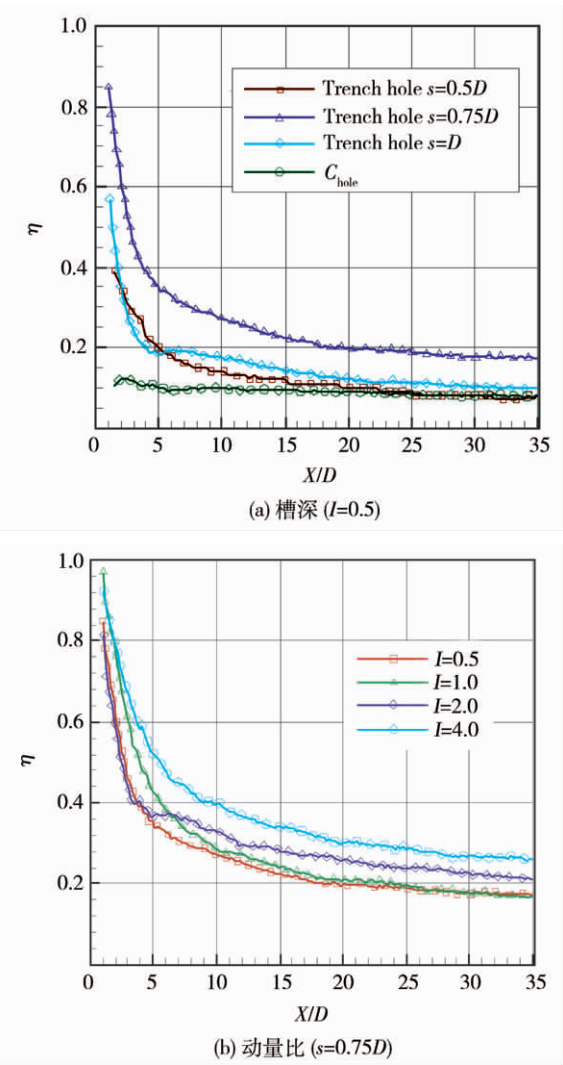


图 7 展向平均气膜冷却效率沿流向分布

Fig. 7 Streamwise distribution of laterally averaged film cooling effectiveness

向平均冷却效率沿流向的变化曲线,以及相同动量比下的圆柱形孔的实验数据.图中 Trench hole 代表凹槽孔, s 代表槽深, C_{hole} 代表圆柱形孔,参考点 $X/D=0$ 为圆柱形孔出口中心线.

图 7(a)为动量比 $I=0.5$ 下槽深对凹槽孔展向平均冷却效率沿流向的变化曲线.总体来说,凹槽孔的冷却效果明显好于圆柱形孔的.在动量比 $I=0.5$ 下,由于射流在凹槽内的横向传播,射流覆盖很宽的区域,而且射流喷出后很快的贴附在壁面上,在 $X<25D$ 区域内,凹槽孔的平均冷却效率高于圆柱形孔的;但在 $X>25D$ 区域内,浅槽 $s=0.5D$ 的平均冷却效率却略低于圆柱形孔的,这是由于从气膜孔流出的冷气在槽内自由的传播,在流出凹槽和主流掺混之前聚集,期间有一部分主流沿着槽的外侧进入槽内,冷气与主流在槽内相互作用,槽内的冷气被加热,而且凹槽也减弱了射流的动量,导致槽出口冷却效果较高和槽远下游的冷却效果反而较低.

图 7(b)为槽深 $s=0.75D$ 下动量比对展向平均冷却效率沿流向的变化曲线.从图中可以看出,冷却效率沿流向逐渐降低.随着动量比的增加,冷却效率值逐渐趋于稳定,冷却效率仅有轻微增加.

3 结 论

本文运用瞬态液晶全表面测量技术得到了凹槽孔和圆柱形孔下游的全表面气膜冷却效率分布图,并对不同动量比和槽深下凹槽孔的测量结果实施了分析与讨论,主要得出以下几点结论:

- 1) 各个动量比下的凹槽孔冷却效率分布比较相似:孔上游的冷却效率较低,孔近下游区域的冷却效率较高,沿流动方向冷却效率迅速衰减.凹槽抑制了冷气射流分离,凹槽孔的冷却效果好于圆柱形孔的.在动量比 $I=0.5$ 下,在 $X<25D$ 区域内,凹槽孔的平均冷却效率高于圆柱形孔的;但在 $X>25D$ 区域内,浅槽 $s=0.5D$ 的平均冷却效率却略低于圆柱形孔的.
- 2) 槽深 $s=0.75D$ 是最佳槽深.
- 3) 随着动量比的增加,凹槽孔的冷却效率值逐渐趋于稳定,冷却效率仅有轻微增加,盲目增加冷气流来提高冷却效率是不合理的.

参考文献:

[1] Lu Y P, Dhungel A, Ekkad S V, et al. Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches[R]. ASME Paper GT-2007-27388, 2007.

- [2] Dorrington J S, Bogard D G, Bunker R S. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions[R]. ASME Paper GT-2007-27992, 2007.
- [3] Wayne S K, Bogard D G. High resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations[R]. ASME Paper GT-2006-90226, 2006.
- [4] Bunker R S. Film cooling effectiveness due to discrete holes within a transverse surface slot[R]. ASME Paper GT-2002-30178, 2002.
- [5] Lu Y P, Nasir H, Ekkad S V. Film cooling from a row of holes embedded in transverse slots[R]. ASME Paper GT-2005-68598, 2005.
- [6] Lu Y P, Srinath V. Predictions of film cooling from cylindrical holes embedded in trenches [R]. AIAA-2006-3401, 2006.
- [7] Lu Y P, Dhungel A, Ekkad S V, et al. Film cooling measurements for cratered cylindrical inclined holes[R]. ASME Paper GT-2007-27386, 2007.
- [8] Wang T, Chintalapati S, Bunker R S, et al. Jet mixing in a slot[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 22(1): 1-17.
- [9] Liu C L, Zhu H R, Bai J T, et al. Film cooling performance of converging-slot holes with different exit-entry area ratios[R]. ASME Paper GT-2009-59002, 2009.
- [10] Drost U, Boles A, Hoffs A, Utilization of the transient liquid crystal technique for film cooling effectiveness and heat transfer investigations on a flat plane and a turbine airfoil[R]. ASME Paper 97-GT-026, 1997.
- [11] 张宗卫, 朱惠人, 杜小琴, 等. 带 60° 肋和出流孔的矩形通道端壁换热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 116-119.
- ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, DU Xiaoqin, et al. Investigations of endwall heat transfer in the rectangular passage with 60° -degree ribs and suction holes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 116-119. (in Chinese)
- [12] 张宗卫, 朱惠人, 王振伟, 等. 出流孔位置对带肋矩形通道换热特性的影响[J]. 推进技术, 2011, 32(4): 581-585.
- ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, WANG Zhenwei, et al. Influence of bleed hole location on heat transfer in rectangular channels with ribs[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4): 581-585. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 郭涛, 朱惠人, 许都纯, 等. 热色液晶瞬态测量全表面换热系数的技术研究[J]. 测控技术, 2006, 25(9): 789-795.
- GUO Tao, ZHU Huiren, XU Duchun, et al. Research on transient measurement of heat transfer coefficient distribution with liquid crystal technique[J]. Measurement and Control Technology, 2006, 25(9): 789-795. (in Chinese)
- [15] 梁卫颖, 朱惠人, 郭涛, 等. 利用液晶瞬态技术测量离散缝的气膜加热效率及换热系数[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 501-504.
- LIANG Weiying, ZHU Huiren, GUO Tao, et al. New transient state measurements of film heated effectiveness and heat transfer coefficients of the discrete slots with liquid crystal technique[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4): 501-504. (in Chinese)