

具有相反横向射流角的全覆盖气膜孔 冷却特性

丁 阳¹, 常海萍¹, 杜治能²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 通过数值计算的方法对全覆盖气膜冷却结构的流场特性、壁面表面传热系数、绝热壁面气膜冷却效率以及考虑固体导热影响下的综合冷却效率进行了对比研究. 结果显示:相反横向射流角产生的反肾形涡对使冷气侧向扩散能力更强;虽然表面传热系数升高,但是由于较高的绝热壁面气膜冷却效率降低了传入固体壁面的热量,提升综合冷却效率. 吹风比为 1.0 时,45°相反横向射流角斜孔有最高的综合冷却效率. 当吹风比为 1.5 和 2.0 时,30°相反横向射流角斜孔有最高综合冷却效率. 与相同横向射流角斜孔作对比,15°相反横向射流角斜孔综合冷却效率不及 15°相同横向射流角斜孔,45°、60°相反横向射流角斜孔综合冷却效率在不同流向长度上与相同横向射流角斜孔综合冷却效率相差不大,30°相反横向射流角斜孔综合冷却效率高于相同横向射流角斜孔.

关 键 词: 全覆盖; 冷却; 相反横向射流角; 表面传热系数; 综合冷却效率

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Cooling characteristics of full coverage film holes with opposite lateral ejection angles

DING Yang¹, CHANG Hai-ping¹, DU Zhi-neng²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Numerical investigations were performed to study the full coverage film cooling structure on the flow field characteristics, wall surface heat transfer coefficient, adiabatic wall film cooling effectiveness and integrated cooling effectiveness under consideration of heat conduction. Results indicates that kidney vortex pair generated in the flow field of film cooling with opposite lateral ejection angles makes the film spread wider laterally. Despite of raised heat transfer in this condition, the integrated cooling effectiveness increases as high adiabatic wall cooling effectiveness reduces the heat conduction. Under blowing ratio of 1.0, the slant hole with opposite lateral ejection angle of 45° has the highest integrated cooling effectiveness. The integrated cooling effectiveness of slant hole with opposite lateral ejection angle of 30° is the highest when blowing ratio of 1.5 and 2.0. Compared with corresponding slant hole with single lateral ejection angle, the film cooling with opposite lateral ejection angle of 15° has lower integrated cooling effectiveness. The cooling effectiveness of slant hole with opposite lateral ejection angles of 45° and 60° respectively are both comparable to the integrated cooling effectiveness of the corresponding structures with single lateral ejection an-

gle. When compared with slant hole with single lateral ejection angle of 30° , the film cooling with opposite lateral ejection angle of 30° has higher integrated cooling effectiveness.

Key words: full coverage; cooling; opposite lateral ejection angle; surface heat transfer coefficient; integrated cooling effectiveness

离散孔全覆盖气膜冷却是一种高效冷却方式. 由被冷却表面密布的大量小孔通过一定量的冷气形成低温隔绝层将主流与被冷却表面隔离开, 从而达到冷却壁面的作用. 研究人员对影响离散孔全覆盖气膜冷却效率的相关因素^[1-11]如吹风比、开孔率、排距比、孔与壁面的倾角以及与主流的横向偏角都做过详细研究. 在全覆盖气膜冷却结构中孔与主流的横向偏角只做过单一偏转方向的研究, 对不同偏转方向的研究还鲜见有关报道.

近些年来, 双射流结构的概念被提出^[12], 基本原理是利用具有不同横向偏转方向的孔射流来构建反肾形涡对, 促使冷气射流贴附在被冷却表面上, 具有非常优异的冷却效果. Kusterer等^[13-16]研究了在流向距离为3倍直径、展向距离为0.5~2倍直径下不同横向射流角度在不同流动参数下的冷却特性, 并且已经代替了成型孔在燃气轮机叶片的真实流动参数与结构下做过实验. 王文三等^[17]研究了孔型的改变对双射流气膜冷却的影响.

双射流结构除了冷却效果优异以外, 其使用的圆形孔结构易于加工, 很适合需要大量密集打孔的离散孔全覆盖气膜冷却结构. 本文在文献^[16]的单排孔基础上进一步对不同偏转方向的横向射流角的多排全覆盖气膜孔冷却特性进行研究, 对比了具有相同与相反横向射流角复合斜孔(以下简称同向斜孔、反向斜孔)多排全覆盖气膜冷却结构的流动特性, 有气膜冷却下的壁面换热特性, 绝热壁面冷却效率以及考虑固体导热影响下的综合冷却效率, 为离散全覆盖气膜冷却结构的改进与优化提供一定参考.

1 计算物理模型

图1是所研究模型示意图, 气膜孔直径 $d=1\text{ mm}$, $S=4d$, $L=8d$. 取全覆盖多孔壁的一个横向周期建模, 展向宽度为 $2S$, 沿流向布置了20个气膜孔. 气膜孔的流向倾角为 30° , 展向倾角 β 分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 分为同向(β -same)和反向(β -diff)两种, 共8种结构. 主流通道高度为 $40d$, 多孔板的厚度为 $2d$, 长度为 $90d$.

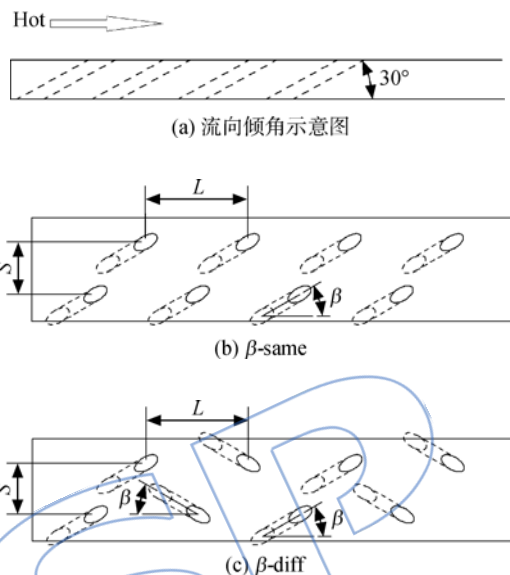


图1 气膜冷却孔开孔方式

Fig. 1 Arrangement of film cooling holes

2 边界条件及网格

本文采用 FLUENT 软件计算, 边界条件的设置如下: 固体区域为不锈钢, 导热系数随温度线性变化 $\kappa=0.020\,176\,T+6.811$. 主流进口马赫数 $Ma=0.3$, 总温为 $1\,600\text{ K}$.

定义吹风比

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_g u_g}$$

其中 ρ_c, u_c, ρ_g, u_g 分别代表冷气密度与流速, 燃气密度与流速.

冷气射流相对主流吹风比 M 分别为 $1.0, 1.5, 2.0$, 总温为 700 K . 出口为压力出口, 出口压力为 1.2 MPa . 模型两侧采用周期边界条件, 流体与固体温度耦合计算. 经计算网格量增加至150万时, 冷却表面温度计算结果变化幅度在 3 K 以下(图2).

通用控制方程的离散采用控制容积法, 速度-压力耦合采用 SIMPLE(求解压力耦合方程组的半隐式)方法, 动量方程、能量方程、湍流动能方程与湍流耗散率方程的对流项差分采用2阶迎风格式.

文献^[16]通过在低速风洞下加热二次流得到气膜覆盖表面的绝热壁面气膜冷却效率 η , 以此

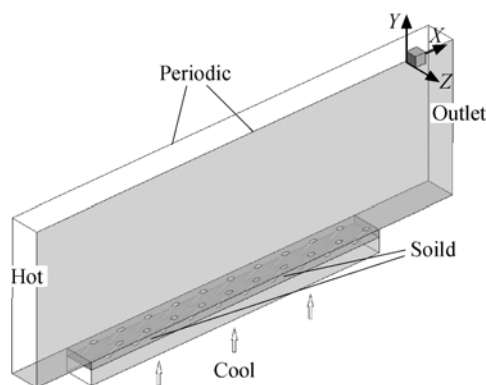
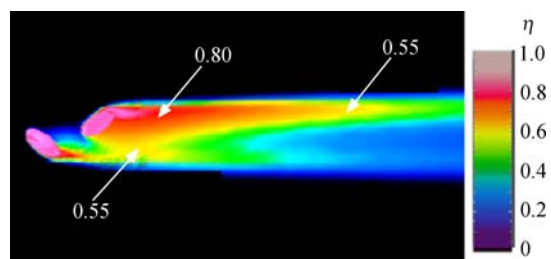


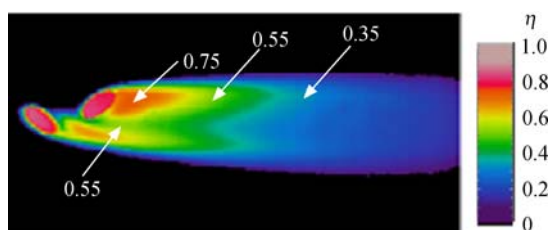
图2 计算模型及其网格

Fig. 2 Computational model and mesh

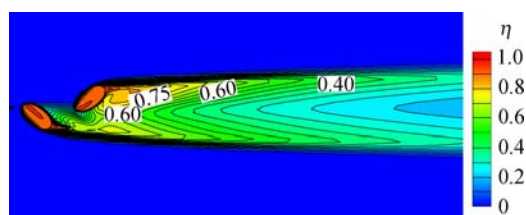
来验证数值计算结果的合理性. 本文使用文献[16]中的物理模型, 并采用 *realizable k- ϵ* 湍流模型与速度分布两层模型, 边界条件与文献[16]中的边界条件相同: 主流温度为 290.15 K, 主流进口马赫数 $Ma=0.136$, 出口压力为标准大气压, 二次流温度为 320.53 K, 相对主流吹风比为 0.5. 计算结果显示的绝热壁面气膜冷却效率 η 分布图如图 3 所示: 与文献[16]相对比, 绝热壁面气膜冷却效率 η 分布相似, 说明所使用湍流模型可以模拟



(a) 文献[16]绝热壁面气膜冷却效率计算结果



(b) 文献[16]绝热壁面气膜冷却效率实验结果



(c) 本文绝热壁面气膜冷却效率计算结果

图3 绝热壁面气膜冷却效率分布云图

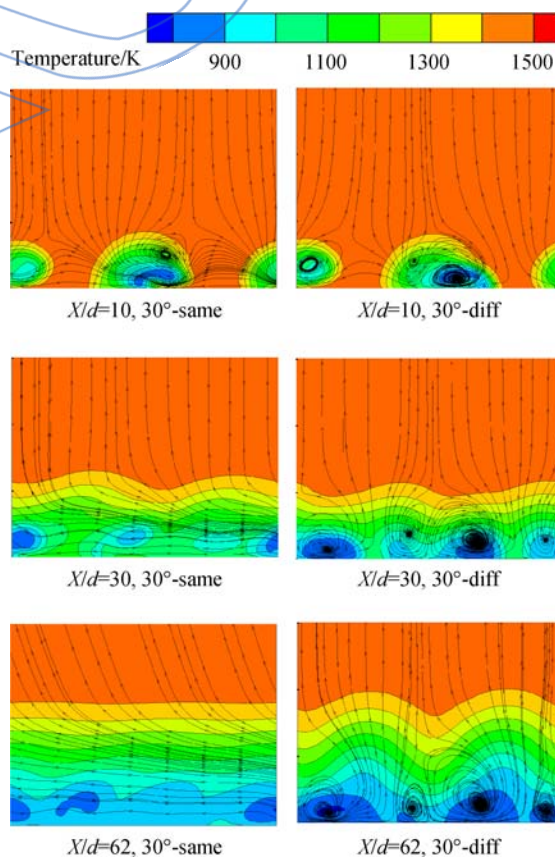
Fig. 3 Contour of adiabatic wall film cooling effectiveness distribution

双射流气膜冷却的反肾形涡对结构.

3 计算结果分析

3.1 速度场与温度场分析

图 4 是在 $M=1.5$ 时, 30° -same, 30° -diff 两个模型在流动方向 $X/d=10$, $X/d=30$, $X/d=62$ 三个流向截面上的流线以及温度分布图, 截面在两排气膜孔中间位置. 由图可以明显看出具有反向斜孔与同向斜孔流场的差别: 同向斜孔使冷气射流具有了侧向速度分量, 在上游位置 $X/d=$

图4 流向横截面的温度分布以及流线 ($M=1.0$)Fig. 4 Cross sectional temperature distribution and streamlines under $M=1.0$

10,主流流向发生偏转,并产生了单侧涡,冷却工质展向扩散.在多斜孔壁中游($X/d=30$),流场结构与上游类似,但是冷却工质已经开始干涉叠加,在近壁处形成低温冷气层.到了下游($X/d=62$),冷气的侧向运动更加强烈,冷气覆盖效果进一步增强,使绝热壁面气膜冷却效率明显提升.

反向斜孔的流场发生很大改变,前孔和后孔不同方向复合角射流产生的单侧涡叠加为反肾形涡对,冷却工质沿孔两侧扩展,汇入主流.在冷却工质的侧向覆盖方面相比同向斜孔有较大改善.由于反向斜孔的这些特点,在上游($X/d=10$)区域冷气贴壁效果已经强于同向斜孔的模型,在中游($X/d=30$),由温度分布等值线可以看出:此时的冷气层厚度虽然与同向斜孔模型相同,但是在近壁处冷气射流温度要低于同向斜孔的模型,在下游($X/d=62$)近壁处的冷气几乎保持了冷气进口的温度.总之,反向斜孔由于反肾形涡对加强了冷气的横向扩散与贴壁效应,使得绝热壁面气膜冷却效率提高非常明显.

3.2 绝热壁面气膜冷却效率分析

定义绝热壁面气膜冷却效率 $\eta = (T_g - T_{aw}) / (T_g - T_c)$ 其中 T_g 为燃气总温, T_{aw} 为气膜覆盖表面绝热壁温, T_c 为冷却气体温度.

对比各个模型的平均绝热壁面气膜冷却效率分布图5,可看出在吹风比 $M=1.0$ 下, $\beta=15^\circ$ 的两个模型绝热壁面气膜冷却效率明显低于其他角度模型. 45° -diff 有最高的绝热壁面气膜冷却效率, 60° -diff 绝热壁面气膜冷却效率略低,两种模型绝热壁面气膜冷却效率都略高于其对应的同向斜孔结构.由于吹风比相对较低, 30° -diff 不能形成反肾形涡对,导致了绝热壁面气膜冷却效率相对较低,不及 30° -same 的绝热壁面气膜冷却效率.

当吹风比增加到 $M=1.5$, 30° -diff 有最高的绝热壁面气膜冷却效率,并且 30° -diff 绝热壁面气膜冷却效率大大高于 30° -same. $\beta=45^\circ, 60^\circ$ 在中上游反向斜孔绝热壁面气膜冷却效率高于同向斜孔,在下游反向斜孔冷却效率被同向斜孔反超. $\beta=15^\circ$ 模型绝热壁面气膜冷却效率依然最低.吹风比 M 增加到 2.0 时,绝热壁面气膜冷却效率的分布与 $M=1.5$ 比较相似,但是绝对值略有下降.

由绝热壁温分布云图(图6)中温度等值线的分布可以看出:对于同向斜孔,由于冷气拥有侧向动量,随着角度增加,绝热壁面气膜冷却效率增加, 45° -same 拥有最高的绝热壁面气膜冷却效率,超过 45° 后绝热壁面气膜冷却效率开始降低.

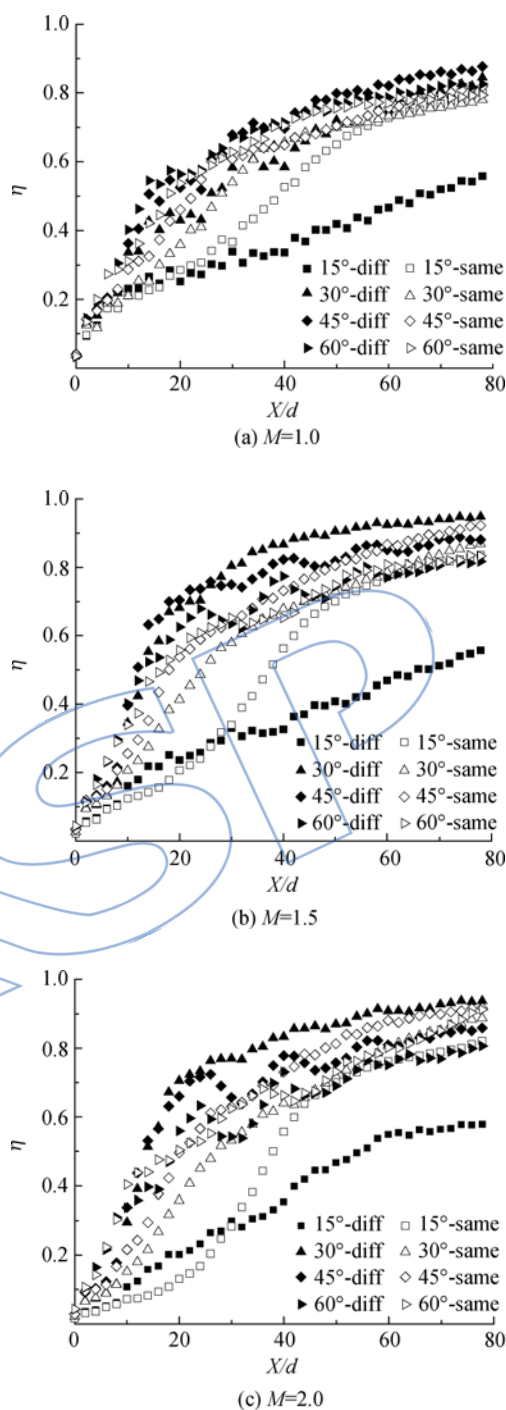
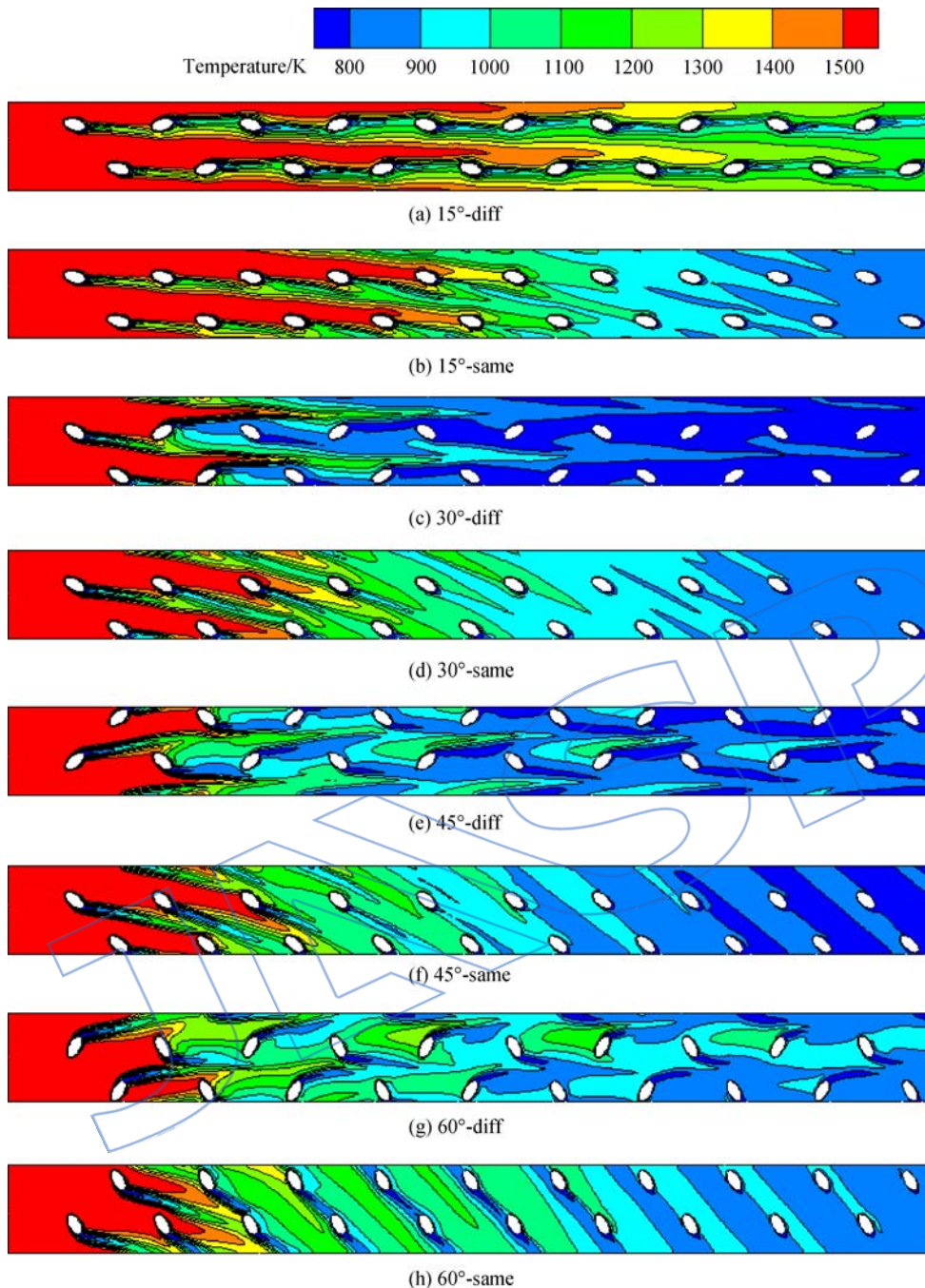


图5 横向射流角对绝热壁面气膜冷却效率的影响
Fig. 5 Effect of lateral ejection angle on adiabatic wall film cooling effectiveness

对于反向斜孔,当反向偏角角度为 15° 时,由于侧向动量较弱,并且由于射流方向的不同侧向动量无法叠加,导致了 15° -diff 模型绝热壁面气膜冷却效率非常有限,温度分布类似于无复合角的圆柱孔.当反向角度增加到 30° (30° -diff),由于形成了反肾形涡对,在 $X/d=10\sim30$ 距离内绝热壁面气膜冷却效率快速增加,甚至在 $X/d=20$ 的

图6 绝热壁面温度分布云图 ($M=1.5$)Fig. 6 Contours of adiabatic wall temperature distribution ($M=1.5$)

位置的平均绝热壁面气膜冷却效率就达到了同向复合角 $X/d=40$ 的平均绝热壁面气膜冷却效率的水平(图 5(b)),但是随着反向角度的增加,绝热壁面气膜冷却效率开始下降,模型 45°-diff 与模型 60°-diff 可以看出在中下游的壁面有高温斑块,并且 60°-diff 模型上的斑块温度要高于 45°-diff 模型斑块,这是由于角度增加导致了反肾形涡对涡心间距过大,主流被携带至壁面降低了绝热壁面气膜冷却效率,吹风比由 1.5 增加到 2.0 导致绝热壁面气膜冷却效率小幅下降也是基于这个

原因。

3.3 壁面表面传热系数分析

定义表面传热系数

$$h = \frac{q}{\Delta T}$$

表面传热系数计算方法是:每个模型计算两遍,气膜覆盖表面边界分别为绝热和等热流密度 q ,得到两次计算的平均温度差 ΔT ,根据热流密度和温差计算平均表面传热系数。

图7是3种模型的展向平均表面传热系数

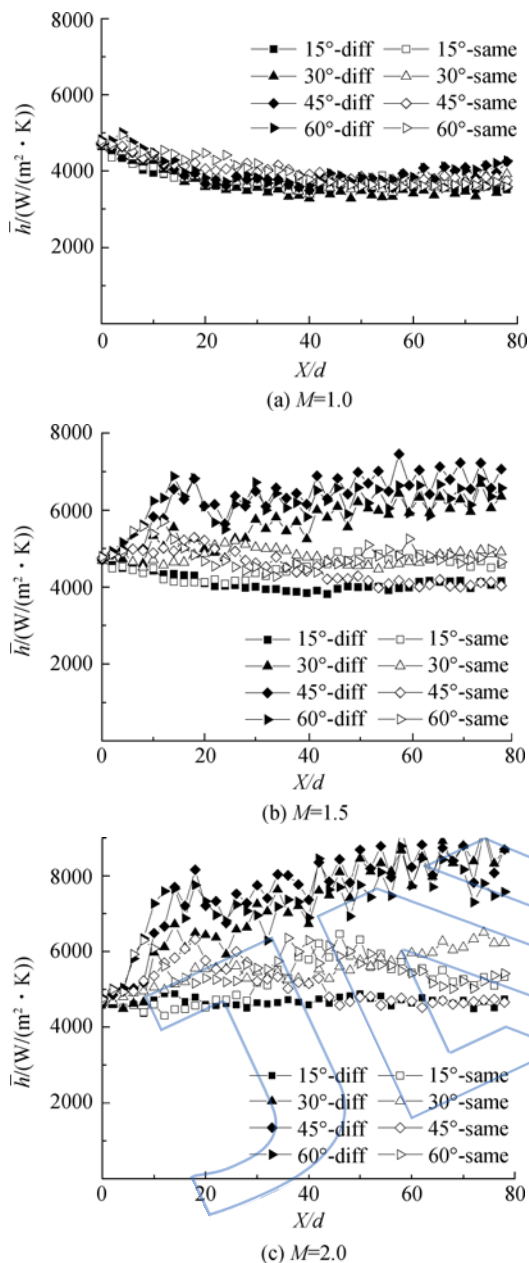


图7 横向射流角对平均表面传热系数的影响

Fig. 7 Effect of lateral ejection angle on average surface heat transfer coefficient

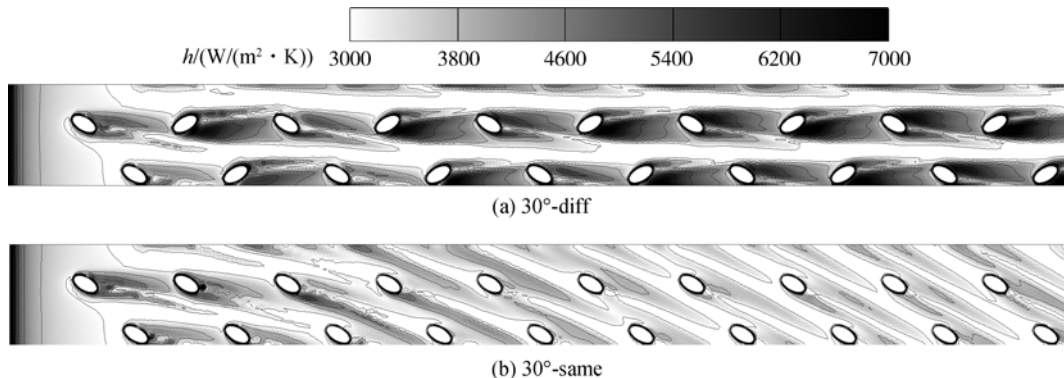
图8 表面传热系数分布云图 ($M=1.5$)

Fig. 8 Contours of surface heat transfer coefficient distribution ($M=1.5$)

图,在吹风比 $M=1.0$ 下,8 种结构平均表面传热系数相差不大,随 X 距离增加略微降低,这是因为主流边界层沿着 X 方向不断增厚导致了平均表面传热系数沿流向略微减小.随着吹风比增加 ($M=1.5, 2.0$),平均表面传热系数随之增加,这是由于孔在 X 方向的倾斜,大动量的冷却工质将主流向后推,近壁处主流被加速导致整体平均表面传热系数增加.

在高吹风比下 ($M=1.5, 2.0$),同向斜孔的平均表面传热系数会在沿流向距离上出现平缓起伏.反向斜孔的平均表面传热系数随横向偏角角度先增加再降低, 45° -diff 是拐点.除了 15° -diff,反向斜孔平均表面传热系数高于同向斜孔.

表面传热系数分布云图(图8)说明了反向斜孔与同向斜孔表面传热系数分布的差异:模型 30° -diff 表面传热系数峰值出现在气膜孔下游大约 3 倍气膜孔直径的范围内,这是因为在射流孔的侧面由于主流与射流相互作用产生了大切应力和旋涡使该区域成为表面传热系数最高的传热区.在峰值传热区域下游,壁面附近的流体受到反肾形涡对的作用,同时具有了展向与流向速度,提高了此区域混合气流整体动量水平,提高了表面传热系数.

同向斜孔的冷气射流全部用来增强侧向动量使从而使当地扰动增强,提高了表面传热系数.侧向动量的叠加会增强近壁处扰动,其表现如图7所示平均表面传热系数在沿流向距离上出现平缓起伏.

3.4 综合冷却效率分析

定义综合冷却效率

$$\eta_{\text{nteg}} = (T_g - T_w) / (T_g - T_c)$$

其中 T_w 为金属表面温度.

考虑金属导热以后,由于冷气侧的溢流作用以及气膜孔内的对流换热,综合冷却效率相比绝热壁面气膜冷却效率有明显提高.由图9可知,8种结构综合冷却效率最小值在0.35以上,明显高于绝热壁面气膜冷却效率.在所计算吹风比范围内综合冷却效率分布图显示与绝热壁面气膜冷却效率相比其分布趋势并无太大变化,但是在各个位置相比绝热壁面气膜冷却效率普遍有了0.1~0.2的提高.

综合冷却效率受绝热壁温、热侧表面传热系数以及冷气侧表面传热系数共同影响.绝热壁温、热侧表面传热系数决定了传入金属板内部的热量,气膜孔内以及冷气侧表面传热系数决定了将热量带走的能力.在8种模型中气膜孔内以及冷气侧壁面结构相似,在流动参数不变的前提下表面传热系数不会相差太多.由绝热壁温、热侧表面传热系数决定的表面热流密度可以反映燃气侧导入金属内部的热量,是影响综合冷却效率的主要因素.

热流密度分布(图10)反映了同向斜孔和反向斜孔热流密度分布的区别,可以看出热流密度

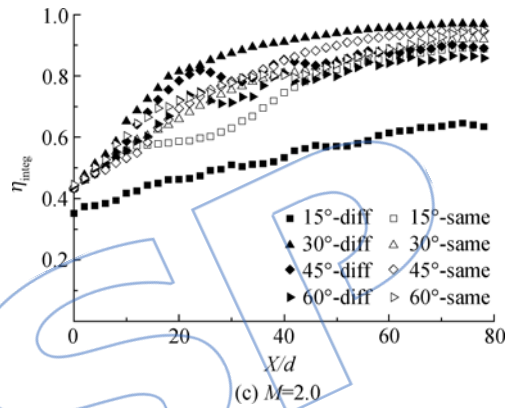
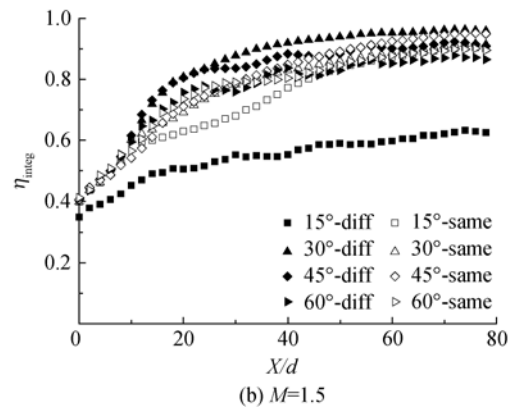
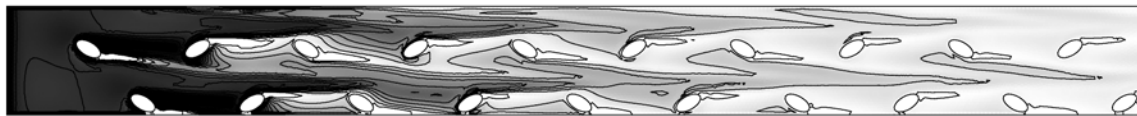
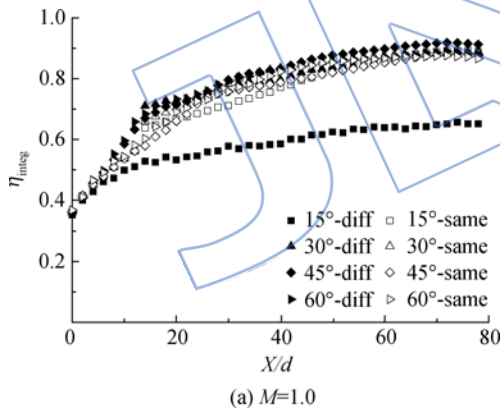


图9 横向射流角对综合冷却效率的影响

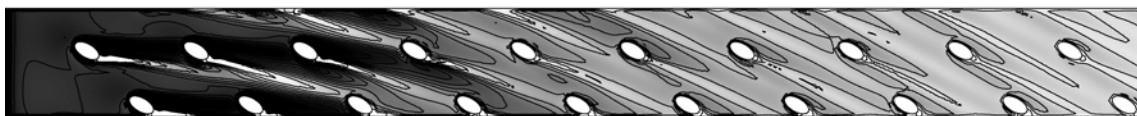
Fig. 9 Effect of lateral ejection angle on integrated cooling effectiveness

最高的位置在上游第一排气膜孔后,上游的热流密度值高于下游.热流密度分布与绝热壁面气膜冷却效率分布相似.

相比同向斜孔,反向斜孔的热流密度较低,其最高值只出现在第一排孔后,第二排孔后热流密度迅速降低并持续到下游.



(a) 30°-diff



(b) 30°-same

图10 气膜覆盖表面热流密度分布云图 ($M=1.5$)

Fig. 10 Contours of heat flux on film covered surface ($M=1.5$)

4 结 论

1) 相比同向斜孔,反向斜孔形成的反肾形涡对结构可以增强冷气在侧向的扩散程度,有效提高冷气利用效率。

2) 相比同向斜孔,反向斜孔形成的反肾形涡对提高了壁面的表面传热系数。

3) 吹风比为 $M=1.0$ 时, 45° 反向斜孔有最高的综合冷却效率,当 $M=1.5$ 和 2.0 时, 30° 反向斜孔有最高综合冷却效率。

4) 与同向斜孔作对比, 15° 反向斜孔全程综合冷却效率小于同向斜孔, 45° , 60° 反向斜孔综合冷却效率在不同流向长度与同向斜孔综合冷却效率互有胜负, 30° 反向斜孔综合冷却效率大于同向斜孔。

参考文献:

- [1] Mayle R E, Camarata F J. Multihole cooling film effectiveness and heat transfer [R]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97(2): 534-538.
- [2] Sasaki M, Takahara K, Kumagai T, et al. Film cooling effectiveness for injection from multirow holes [R]. ASME Paper 78-GT-32, 1978.
- [3] Andrews G E, Khalifa I M, Asere A A, et al. Full coverage effusion film cooling with inclined holes [R]. ASME Paper 95-GT-274, 1995.
- [4] Fric T, Campbell R, Rettig M. Quantitative visualization of full coverage discrete hole film cooling [R]. ASME Paper 97-GT-328, 1997.
- [5] Lin Y Z, Song B, Li B, et al. Investigation of film cooling effectiveness of full-coverage inclined multihole walls with different hole arrangements [J]. ASME Paper 2003-GT-38881, 2003.
- [6] 林宇震, 宋波, 李彬. 不同倾斜角多斜孔壁冷却方式绝热温比研究 [J]. 航空学报, 1999, 20(3): 201-204.
LIN Yuzhen, SONG Bo, LI Bin. Investigation of adiabatic wall effectiveness of the inclined multihole wall film cooling with different angles to the wall surface [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 201-204. (in Chinese).
- [7] 吴伟民, 张青藩, 李亚峰. 全离散孔气膜冷却实验研究 [J]. 航空动力学报, 1994, 9(4): 387-390.
WU Weimin, ZHANG Qingfan, LI Yafeng. Experimental investigation on full coverage discrete hole film cooling [J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(4): 387-390. (in Chinese).
- [8] 胡娅萍, 吉洪湖. 孔阵排列疏密度对致密多孔壁冷却效果的影响 [J]. 推进技术, 2005, 26(1): 28-33.
HU Yaping, JI Honghu. Effect of porosity of holes array on cooling effectiveness of effusion cooling [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(1): 28-33. (in Chinese).
- [9] 杨卫华, 王立, 宋双文, 等. 冲击发散冷却流场结构 PIV 测量 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 483-487.
YANG Weihua, WANG Li, SONG Shuangwen, et al. PIV measurement of flowfield for impingement effusion cooling [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 483-487. (in Chinese).
- [10] 胡娅萍, 吉洪湖. 致密多孔壁冷流入射角对冷却效果影响的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 116-119.
HU Yaping, JI Honghu. Numerical study of the blowing angle effectiveness on effusion cooling effectiveness [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 116-119. (in Chinese).
- [11] 杨成风, 张靖周, 杨卫华. 全覆盖气膜孔阵列方式对冷却特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1524-1529.
YANG Chengfeng, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Effect of the holes array arrangement on the full coverage film cooling characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1524-1529. (in Chinese).
- [12] Sugimoto T, Tanaka R, Tsuji K, et al. Double jet film cooling structure: United States, US 7,682,132 B2 [P]. 2010-05-23.
- [13] Kusterer K, Bohn D, Sugimoto T, et al. Double-jet ejection of cooling air for improved film-cooling [R]. ASME Paper GT-2006-90854, 2006.
- [14] Kusterer K, Bohn D, Sugimoto T, et al. Influence of blowing ratio on the double-jet ejection of cooling air [R]. ASME Paper GT-2007-27301, 2007.
- [15] Kusterer K, Elyas A, Bohn D, et al. Double-jet film-cooling for highly efficient film-cooling with low blowing ratios [R]. ASME Paper GT2008-50073, 2008.
- [16] Kusterer K, Elyas A, Bohn D, et al. A parametric study on the influence of the lateral ejection angle of double-jet holes on the film cooling effectiveness for high blowing ratios [R]. ASME Paper GT2009-59321, 2009.
- [17] 王文三, 唐菲, 赵庆军, 等. 新型双射流冷却孔对气膜冷却效率影响的研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1291-1294.
WANG Wensan, TANG Fei, ZHAO Qingjun, et al. An investigation of the effect of new-type double-jet film cooling (DJFC) hole on film cooling effectiveness [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1291-1294. (in Chinese).