

文章编号: 1000-8055(2009)10-2235-06

冲击-多斜孔壁复合冷却中冲击孔与 多斜孔面积比对换热特性的影响

张 勃¹, 李继保², 吉洪湖¹, 尚守堂², 程 明², 王艳丽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: 用数值计算的方法研究了冲击-多斜孔壁复合冷却方式的冷却特性, 在保证当量开孔面积相同且压降相同的前提下, 研究了冲击孔壁与多斜孔壁开孔面积比 A/A_e 变化对冷却特性的影响. 研究发现, 随着冲击孔与多斜孔开孔面积比减小, 多斜孔壁气膜出流速度降低, 气膜覆盖增强, 冲击传热系数呈增大趋势, 使得模型冷却效果增强; 多斜孔壁热侧、冷侧与多斜孔孔内换热量随开孔面积比减小而减小, 多斜孔内换热量在模型总体换热量中所占比例逐渐增加.

关 键 词: 冲击-多斜孔; 燃烧室; 冷却; 压降; 开孔面积比

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Effect of area ratio of impingement hole to effusion hole on heat transfer characteristics of impingement-effusion composite cooling

ZHANG Bo¹, LI Jibao², JI Hong-hu¹, SHANG Shou-tang²,
CHENG Ming², WANG Yan-li²

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The influence of area ratio to heat transfer characteristics of impingement-effusion double wall was investigated numerically, under the precondition of the same equivalent hole area. Results show that, with the decrease of area ratio of impinging hole to effusion hole, film flow velocity decreases, impinge cooling heat flux increases, and the cooling effectiveness enhances. The heat fluxes of hot side wall, cold side wall and effusion hole wall decrease with the area ratio, but the last one decreases least, and its quotient among the total heat flux increases.

Key words: impingement-effusion; combustor; cooling; pressure drop; hole area ratio

随着高温燃烧室技术的发展, 组织燃烧所需用气量不断增加, 使得可用于冷却的空气量相应减少, 给燃烧室冷却带来了一定的困难^[1-3]. 解决这一问题的一个有效的方法就是发展复合冷却技术, 冲击-多斜孔壁复合冷却正是一种高效复合冷

却方式.

冲击-多斜孔壁复合冷却方式由冲击孔壁和多斜孔壁组成. 由于多斜孔壁上开有大量密集分布的倾斜小孔, 这是一种向多孔介质的发散冷却趋近的结构. 在火焰筒冷侧的壁为冲击孔壁, 在火

焰筒燃气侧的壁为多斜孔壁,如图 1 所示.冷却气体首先通过冲击孔,对多斜孔壁进行冲击冷却,而后从多斜孔流出,在热侧壁面形成全覆盖气膜冷却.因而多斜孔壁的冷却包括冷侧的冲击冷却、多斜孔内的对流冷却和热侧的气膜冷却三种冷却方式.

冲击冷却是一种有效冷却方式,通过气流对冷却壁面的高速冲击,有效增强传热效果^[45].一般而言,其冲击靶区中心的传热系数较大,能够有效增强局部区域换热.多斜孔壁加强了冷却气流与多斜孔壁内部的对流换热,换热效果大大提高.陈炎、吉洪湖等^[6]试验研究发现,在相同的吹风比 M 下,致密微孔壁的绝热冷却效果明显高于常规气膜冷却.胡娅萍、吉洪湖等^[7]研究了多斜孔的排列方式对换热效果的影响,发现长菱形排布的换热效果好于正菱形;进一步在文献[8]中研究发现,随多斜孔孔倾角的增大,冷却效果是降低的. Myers 等^[9]则指出多斜孔壁增大了气流与壁面的对流换热,其与冲击方式联合使用可以进一步增强冷却效果.

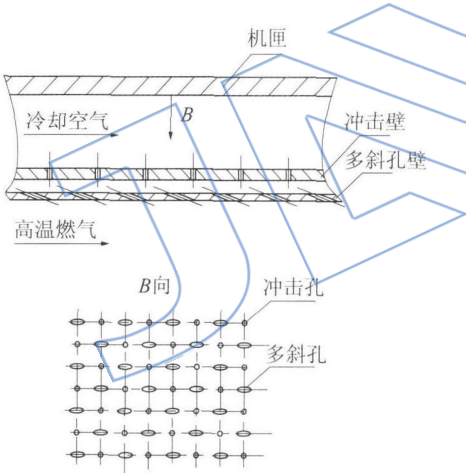


图 1 模型结构示意图
Fig. 1 Sketch of model structure

Andrews^[10]研究发现,决定冲击多斜孔壁复合冷却方式冷却效果的主要因素为冲击换热与气膜孔内换热之和,气膜绝热温比影响较小.林宇震等^[11]进一步对冲击多斜孔壁复合冷却方式中多斜孔孔内的局部传热系数进行了研究,发现压降分配对孔进口区的换热有较大影响,许全宏^[12]研究了冲击加多斜孔复合冷却方式中多斜孔壁冷侧局部冲击传热系数,结果表明多斜孔壁上的倾斜小孔抽吸气流对斜孔周围换热增强有明显的效果.唐庆如^[13]得出在压降一定且单位面积冷却气

量固定时,存在冲击换热与多斜孔内换热的最佳分配的结论.

在冲击多斜孔壁复合冷却方式中,冲击孔壁与多斜孔壁开孔面积比将直接影响两壁的压降分配,是影响换热效果的重要因素之一.本文通过 5 种冲击孔壁与多斜孔壁的不同开孔面积比模型,在整体压降一定的条件下,对宏观换热特性进行了数值研究,并从流动与换热两个角度进行了分析.

1 数值计算

1.1 物理模型

环形燃烧室在现代涡轮发动机中得到大量应用,在工况一定时,其温度在确定的轴向位置上沿周向基本是均匀分布的,本文选取只包含 2~3 列孔的一个局部区域进行研究,其弧度非常小,可以简化为矩形通道来模拟.

冲击多斜孔壁复合冷却方式中,冲击孔壁与多斜孔壁开孔面积比 A_i/A_e 会影响两壁之间的压降分配比例,从而对模型换热效果产生很大影响.本文在模型当量开孔面积 $A_0 = 1/\sqrt{(1/A_i)^2 + (1/A_e)^2}$ ^[11] 相同的前提下设计了 5 种不同开孔面积比模型,表 1 给出了各个模型中不同的多斜孔和冲击孔孔径参数,模型其他几何参数是相同的.如图 2 所示,模型沿流向为 X 向,展向为 Y 向,高度方向为 Z 向,坐标原点位于模型进口,多斜孔壁中间位置.多斜孔孔倾角为 20° ,多斜孔排布采用长菱形分布,孔间距 P 均为 6 mm,孔排距 S 则为 3.5 mm,冲击孔采用直孔,其出口正对两个多斜孔进口中间.模型长度 L 为 150 mm,宽度 W 为 3.0 mm.两壁之间间距为 1.4 mm.冲击孔壁与多斜孔壁厚分别为 1.5, 1 mm,各个方案中多斜孔与冲击孔孔数相同,两者开孔面积比 A_i/A_e 变化范围在 1/3~3 之间,具体参数见表 1 所示.

表 1 模型几何参数

Table 1 Geometry parameter of models			
方案	开孔面积比	多斜孔孔径	冲击孔径
	A_i/A_e	D_e/mm	D_i/mm
1	3: 1	0.63	1.09
2	$\sqrt{3}$: 1	0.64	0.84
3	1: 1	0.7	0.7
4	1: $\sqrt{3}$	0.84	0.64
5	1: 3	1.09	0.63

1.2 计算模型与计算网格

图 2 中给出了本文计算模型与计算网格图. 图 2(a) 中给出了冲击孔与多斜孔(分别如虚线和实线所示)的排布位置图. 为便于后文说明, 图 2(a) 中还给出了中心线(多斜孔壁热侧面上两列孔中心)和对称面(通过同一列孔中心位置的平面)的位置. 图 2(b) 所示为对称面上的网格分布, 可以看出模型由流体域和固体域组成, 流体域包括多斜孔、冲击孔内流体区域与热流区、冷流区、两壁之间狭缝区等 5 个, 固体域包括多斜孔壁与冲击孔壁两个区域. 整个计算域采用非结构化与结构化混合的网格, 多斜孔壁和狭缝区采用非结构化网格, 其他区域均采用结构化网格, 在多斜孔、冲击孔、狭缝区和多斜孔壁热侧附近等流动参数变化剧烈的区域实施了网格局部加密, 计算域的总网格数在 90 万左右.

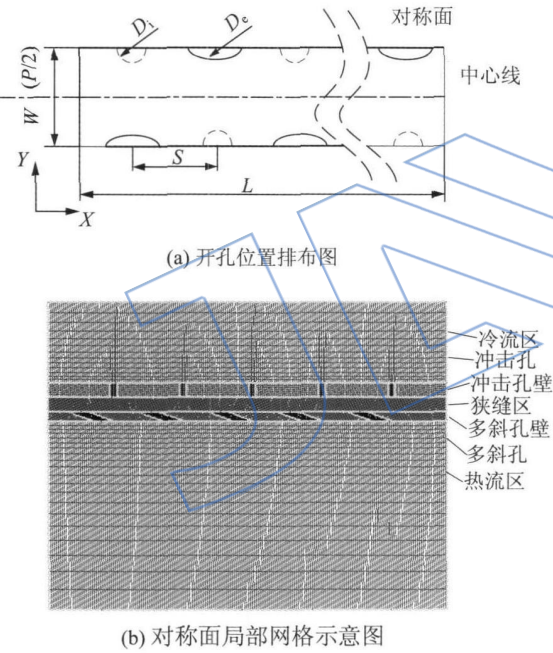


图 2 计算网格与孔排形式示意图
Fig.2 Computing grids and distribution of impinging and effusion holes

2 紊流模型与计算网格

本文使用商业软件 FLUENT 进行计算, 本文中冷热流的压比、温比与实际燃烧室参数相同, 算例采用相同的边界条件设置. 热流和冷流进口均设为压力进口, 热流的进口压力 $p_g=101\,400\text{Pa}$, 温度 $T_g=735\text{K}$; 冷气流的进口压力 $p_c=105\,000\text{Pa}$, 温度 $T_c=300\text{K}$. 热流的出口为压力边

界, $p=101325\text{Pa}$, 冷却流体出口为固壁面, 冷却流体通过双层壁结构与热流混合后从热流出口流出. 计算域的前后表面($y=\pm p/4$, 包括固体域和流体域的表面)均设为对称边界. 多斜孔壁与冲击孔壁上下游的两个端面设置为绝热边界, 两侧壁面则均设为气固耦合面.

计算中采用 standard $k-\varepsilon$ 模型进行紊流模拟, 计算中热、冷流均设为理想流体, 温度较低, 没有考虑辐射换热的影响. 各方程均采用二阶迎风差分格式进行离散, 采用耦合隐式求解器求解并实施亚松弛, 解收敛的判断标准是相对残差小于 1×10^{-5} .

3 计算结果与分析

3.1 多斜孔壁热侧速度矢量分布与壁间压降分配

图 3 中给出了模型 1, 2, 3, 4 和模型 5 对称面上的速度矢量分布, 各图中采用相同矢量长度比例.

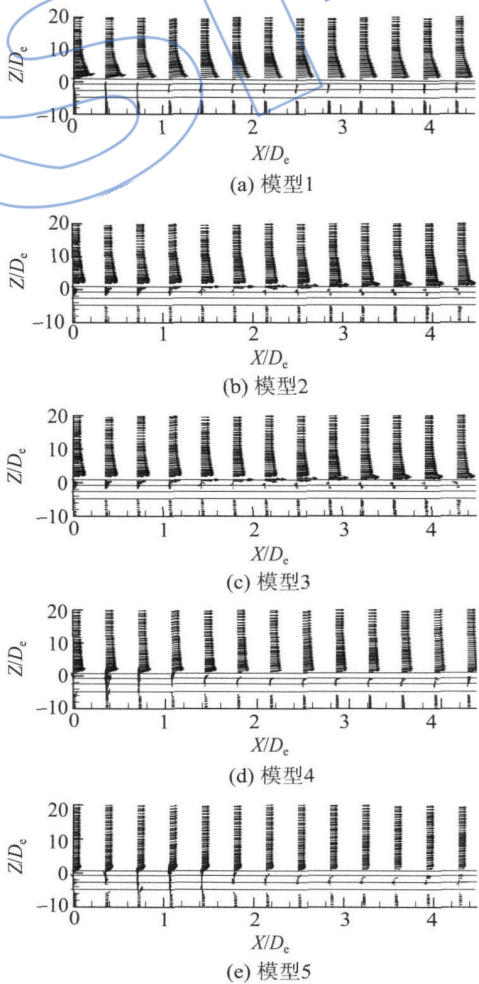


图 3 不同模型对称面速度分布
Fig.3 Distribution of velocity on symmetrical plane

可以看出, 开孔面积比 A_i/A_e 为 3 的模型 1 (图 3(a)) 的气膜出流速度与热流速度差值较大, 掺混剧烈, 气膜出现较为明显的脱壁现象, 这使得热流可以绕过气膜接触壁面, 直接与壁面进行热交换, 降低了模型的冷却效果. 模型 2, 3 的 A_i/A_e 分别减小为 $\sqrt{3}$ 和 1, 其气膜出流速度逐渐降低, 但仍大于热流速度(图 3(b), (c)), 且气膜出流速度方向与壁面具有一定夹角, 使得气膜不易附壁; 而模型 4 的 A_i/A_e 减小到 $1/\sqrt{3}$, 其气膜出流速度与热流速度差值进一步减小(图 3(d)), 使得气膜不易为热流掺混; 开孔面积比 A_i/A_e 继续减小为 $1/3$ 的模型 5(图 3(e)) 的气膜出流速度基本与热流速度相同, 气膜覆盖良好, 起到较强的隔热作用.

模型开孔面积比的变化使得冲击孔壁压降占模型整体压降比例 $\Delta p_i/\Delta p$ 发生变化, 正是此压降比例的变化引起了以上流动状态的变化. 文中取热流区域中多斜孔壁下方 1 mm 处、冷流区域中冲击壁上方 1 mm 处和狭缝区域中间截面 3 个截面上的平均压力 p_1 , p_2 和 p_3 , 定义各个模型多斜孔壁压降 $\Delta p_e = p_3 - p_1$, 冲击孔壁的压降 $\Delta p_i = p_2 - p_3$, 计算得到的 $\Delta p_i/\Delta p$ 随开孔面积比 A_i/A_e 变化规律如图 4 所示, 可以看出, 随着面积比 A_i/A_e 的减小, 冲击孔壁压降占模型整体压降的分配 $\Delta p_i/\Delta p$ 逐渐增大. 冲击孔壁压降比例增加意味着多斜孔壁压降比例 $\Delta p_e/\Delta p$ 减少, 可以推断, 多斜孔壁压降减小, 气膜出流速度减小, 气流附壁效果增强. 图 4 中给出了两者之间的关系式, 如式 (1) 所示

$$\Delta p_i/\Delta p =$$

$$1.18 - 0.81(A_i/A_e) + 0.148(A_i/A_e)^2 \quad (1)$$

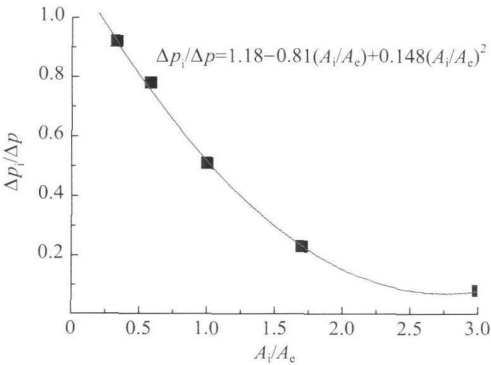


图 4 开孔面积比与压降分配的关系

Fig. 4 Pressure drop distribution vs. area ratio

3.2 多斜孔壁热侧壁面温度分布

图 5 给出了模型 1, 2, 3, 4 和 5 多斜孔壁热侧

壁面的温度分布. 图中横坐标为模型沿流向距离 X 与孔径 D_e 之比 X/D_e , 纵坐标为展向距离 Y 与孔径之比 Y/D_e , 为了清晰起见, 两者采用不同的比例.

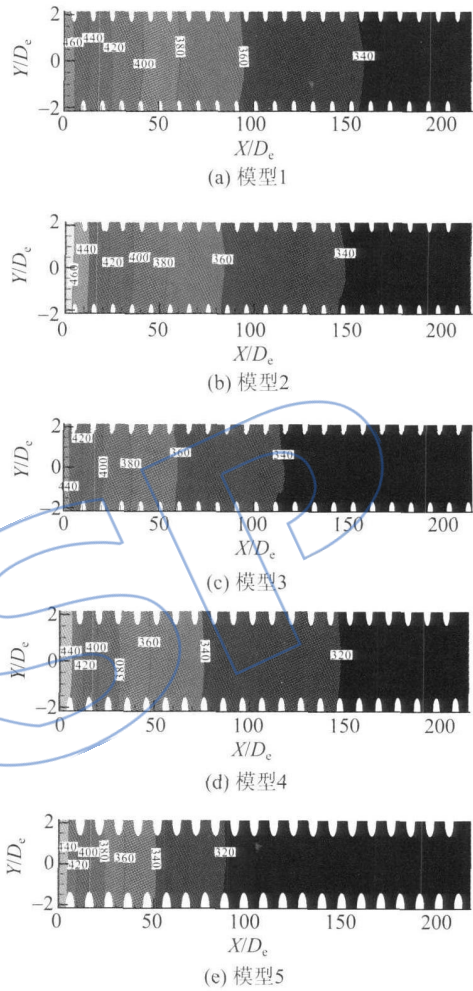


图 5 不同模型多斜孔热侧温度分布图

Fig. 5 Temperature on hot side of effusion hole plate

由图 5(a) 中模型 1 可以看出, 在进口($X/D_e=0$) 附近壁面约为 460K, 沿 X 方向温度梯度较大, 这是由于热流掠过多斜孔壁上游区对其加热和此处没有形成气膜覆盖导致的. 在整个多斜孔壁上, 随着 X 的增大, 壁面温度和沿 X 方向温度梯度逐渐减小. 当 $X/D_e < 150$, 壁面温度都高于 340K. 这是由于随着 X 的增大, 多斜孔壁形成全气膜覆盖, 后段冷却效果显著增强. 同时可以看出, 温度沿展向变化很小, 等温线基本呈直线分布, 说明多斜孔壁内部展向换热较强, 温度梯度逐渐减小.

图 5(b)~ 图 5(e) 中模型 2, 3, 4, 5 与模型 1 热侧壁面温度分布规律相似, 温度沿流向逐渐降

低,展向温度均匀.但是比较发现,随着冲击孔壁与多斜孔壁面积比减小,模型热侧面温度高于 340 K 的范围逐渐减小,以模型 3 与模型 5 为例,其 340 K 的温度等值线分别降到了 $120D_e$ 与 $50D_e$ 附近,模型 4、5 中最低温度则降到了 320 K . 可以看出,随着开孔面积比的减小,模型的强化换热效果是逐渐增强的.

3.3 冷却效率分布

图 6 中给出了各个模型多斜孔壁热侧面中心线上冷却效率 $\eta = (T_g - T_{wg}) / (T_g - T_c)$ 沿流向分布,其中 T_{wg} 为热侧面壁面温度, T_g 和 T_c 分别为热流与冷流温度. 在模型前端,由于没有气膜存在,冷却效率较小,接近第一排气膜孔时,冷却效率迅速上升,而后随着轴向距离 X 的增大,气膜不断叠加,冷却效率逐渐增大,但是增大趋势逐渐减缓,在模型末端附近,达到最大值. 比较发现,随着冲击孔壁与多斜孔开孔面积比 A_i/A_e 减小,压降比 $\Delta p_i/\Delta p$ 增加,模型冷却效率逐渐提高,模型 5 中冷却效率达到 0.99 左右.

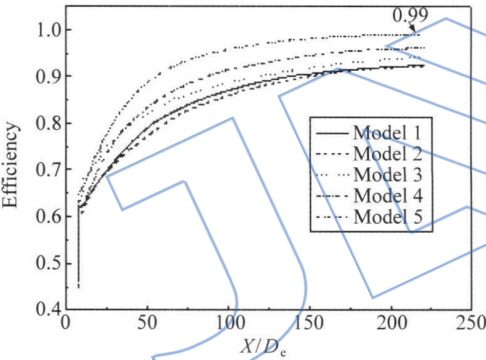


图 6 冷却效率沿轴向分布

Fig. 6 Cooling efficiency along axis direction

3.4 模型换热量比较

图 7 中给出多斜孔壁局部热平衡示意图,主要包括燃气流向壁面的传热 Q_g (文中不考虑辐射换热的影响),多斜孔壁内壁与斜孔内壁对流换热之和 Q_h ,冷侧面壁面与冷却气流的换热 Q_c ,模型各部分换热量随开孔面积比变化见图 8 所示. 可以看出,模型 1、2、3、4 和模型 5 开孔面积比 A_i/A_e 逐渐减小,多斜孔壁热侧换热量逐渐降低,多斜孔壁冷侧与多斜孔孔内换热量均逐渐减小,但是多斜孔内换热量降低幅度最小. 比较发现,当开孔面积比 > 1 时(模型 1、2 和模型 3),换热量变化相对平缓,而在开孔面积比 < 1 时(模型 3、4 和模型 5),换热量变化则相对剧烈,带来了前文图 5 中热

侧面温度的相应变化.

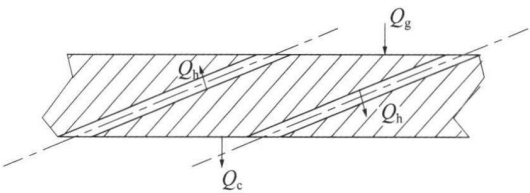


图 7 多斜孔壁热平衡分析

Fig. 7 Heat transfer analysis in effusion plate

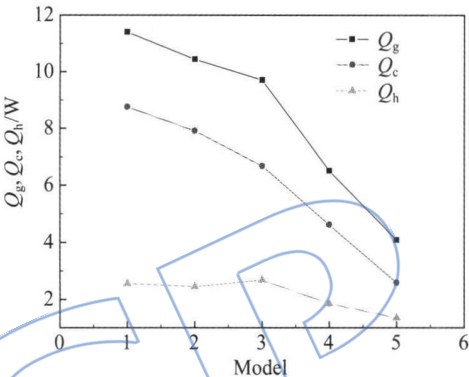


图 8 模型多斜孔壁热侧、冷侧和斜孔内换热量

Fig. 8 Comparison of heat transfer in different sides

3.5 传热系数沿程分布

文中对模型多斜孔壁热侧与冷侧的传热系数进行了比较. 图 9 中给出了模型 1 多斜孔壁热侧与冷侧面壁面中心线上传热系数 $h_g = q / (T_f - T_{wg})$, $h_c = q / (T_{wc} - T_f)$ (q 为单位面积热流量 (W/m^2), T_{wg} 和 T_{wc} 分别为多斜孔壁热侧、冷侧面壁温, T_f 为参考温度,文中取为 300 K) 沿流向的分布图. 可以看出,热侧传热系数 h_g (图中虚线) 沿流程波动较大,而冷侧传热系数 h_c (图中实线) 波

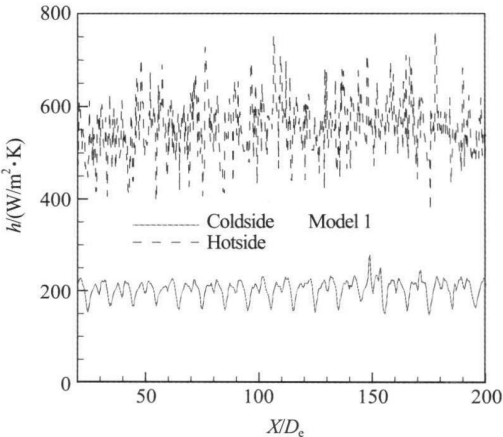


图 9 多斜孔壁热侧与冷侧传热系数比较

Fig. 9 Comparison of heat transfer coefficient on two sides of effusion plate

动较小,呈现出多股射流冲击的多峰分布的特点,冲击靶区位置处传热系数较大,流体向其两侧流动时,受到多斜孔的强烈抽吸作用,壁面传热系数大于靶区,出现两个峰值,而后流体与相邻冲击射流相遇,发生碰撞,传热系数减小,出现峰谷.热侧传热系数在整个模型中均大于冷侧.

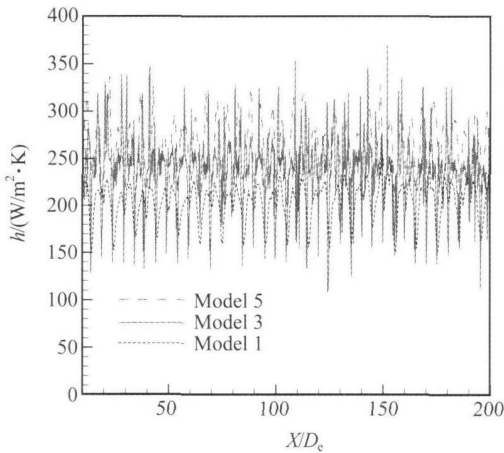


图 10 不同模型冷侧冲击传热系数分布

Fig. 10 Comparison of cold side heat transfer coefficient of different models

为了研究开孔面积比 A_i/A_e 对多斜孔壁冷侧冲击换热的影响,图 10 中对模型 1、3 和模型 5 多斜孔壁冷侧的冲击传热系数进行了比较.可以看出,三者均为多峰值波动变化,模型 1 传热系数最小,模型 3 传热系数变化幅度较大,其值总体上大于模型 1,模型 5 传热系数最大.模型开孔面积比 A_i/A_e 减小,冲击孔壁开孔面积减小,冲击射流速度增大,使得冷侧冲击传热系数相应提高.

4 结 论

本文对不同开孔面积比条件下的 5 种冲击多斜孔壁复合冷却模型的换热特性进行了数值研究.在本文研究条件下,有如下结论:

- 1) 冲击孔壁与多斜孔壁开孔面积比减小,冲击壁压降增加,冲击换热增强,模型整体换热效果逐渐增强;
- 2) 随着冲击孔壁与多斜孔壁开孔面积比减小,多斜孔壁压降减小,气膜出流速度减小,附壁效果增强,使得热气流与壁面之间换热减弱;
- 3) 多斜孔壁冷侧冲击传热系数沿流向呈多峰值变化,峰值位于两排多斜孔之间,出现在正对冲击孔以及两侧区域.

参考文献:

[1] Mellor A M. Design of modern gas turbine combustor [M]. London: Academic Press, 1990.

[2] 侯晓春,季鹤鸣,刘庆国,等.高性能航空燃气轮机燃烧技术[M].北京:国防工业出版社,2002.

[3] 李继保,胡正义.高温升高热容燃烧室设计技术分析[J].燃气涡轮试验与研究,2000,13(4):58.

[4] 葛绍岩.气膜冷却[M].北京:科学出版社,1985.

[5] 曹玉璋.航空发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[6] 陈焱,吉洪湖,胡娅萍.致密微孔壁复合冷却对流换热系数研究[J].工程热物理学报,2005,26(3):489-491.

CHEN Yan, JI Honghu, HU Yaping. Study of convective heat transfer coefficient of effusion cooling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 489-491. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 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(1):116-119.

HU Yaping, JI Honghu. Numerical study of the blowing angle effect on effusion cooling effectiveness[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 116-119. (in Chinese)

[9] Myers G, Geest J V D. Comparison of advanced cooling concepts using color thermography[R]. AIAA 85-1289.

[10] Andrews G E, Asere A A. Full coverage discrete hole film cooling: the influence of the number of holes and pressure loss[R]. ASME 90-GT-61.

[11] 林宇震,俞文利,刘高恩,等.冲击加发散双层壁冷却方式压降分配对斜孔内对流换热影响的研究[J].航空学报,2003,24(2):97-101.

LIN Yuzhen, YU Wenli, LIU Gaoen, et al. Influence of pressure drop distribution on the convection heat transfer inside the inclined hole of impingement/effusion cooling [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(2): 97-101. (in Chinese)

[12] 许全宏,刘高恩,林宇震.冲击加多斜孔双层壁冷却方式冲击换热系数[J].大连理工大学学报,2001,41(1):63-66.

XU Quanhong, LIU Gaoen, LIN Yuzhen. Heat transfer coefficient of impingement/effusion double wall cooling method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(1): 63-66. (in Chinese)

[13] 唐庆如.冲击加多斜孔双层壁对流与冲击换热优化研究[J].航空动力学报,2007,22(3):375-379.

TANG Qingru. A study of optimization of convection and heat transfer of impingement/effusion double wall[J], Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 375-379. (in Chinese)