

文章编号: 1000-8055(2007)02-0193-06

典型层板冷却结构中流体流阻 与换热特性的实验

陶 智, 魏豪杰, 丁汀, 邓宏武, 徐国强, 林宇震
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国防重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 对进气孔、扰流柱和出气孔个数之比为 1:4:1 的典型层板冷却结构的流体流阻与换热特性进行了实验研究. 结果表明, 对于进、出气板间距不大的层板模型, 出气板内表面的换热系数最大, 扰流柱表面的换热系数次之, 进气板内表面的换热系数最小. 对不同层板模型的比较表明, 相同流量下随着进气孔直径的增大, 流阻系数增大, 进气板内表面的换热系数变化不大, 出气板内表面的换热减弱; 随着出气孔直径的增大, 流阻明显减小, 进气板内表面的换热减弱, 出气板内表面的换热变化不大; 随着出气孔倾角的增大, 流阻增大, 进气板内表面的换热增强, 出气板内表面的换热变化不大.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 燃气轮机; 层板叶片; 对流换热; 流阻

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigation of flow resistance and heat transfer characteristics of typical lamilloy models

TAO Zhi, WEI Haojie, DING Shuting, DENG Hongwu,
XU Guoqiang, LIN Yuzhen

(National Key Laboratory on Aero Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Experimental investigation of flow resistance and heat transfer characteristics has been carried out on a typical lamilloy model whose ratio of inlet hole, pir fin, and outlet hole is 1:4:1. The results show that for a lamilloy model, the heat transfer coefficient of the internal surface of outlet board is the highest, followed by the pir fin's surface, and that of the internal surface of inlet board is the lowest. The comparisons show that at the same mass flow, the flow resistance increases, the heat transfer coefficient of the outlet board decreases, and the heat transfer coefficient of the inlet board changes little by enlarging the inlet hole. Comparisons also show that the flow resistance and the heat transfer coefficient of the inlet board increase, but the heat transfer coefficient of the outlet board has little change by reducing the outlet hole or increasing the obliquity of the outlet hole.

Key words: aerospace propulsion system; gas turbines; lamilloy blade; heat transfer; flow resistance

收稿日期: 2006-01-17; 修订日期: 2006-03-20

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-05-0189)

作者简介: 陶智(1963), 男, 辽宁大连人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院教授、博士生导师, 博士, 主要从事高效冷却技术的研究.

层板冷却是一种介于气膜冷却和发散冷却之间的冷却方式, 是国内外的研究热点. 美国的 Al-lison 公司^[1]和英国的罗·罗公司^[2]早在 1970 年代就开始了此项研究. 在国内, 西北工业大学从 2000 年起开始层板的研究工作^[3-5], 但已有的研究成果若不借用多孔介质模型, 在层板叶片的温度场计算中会引起方程组不封闭.

本文在换热实验中, 提出并采用了分步实验法. 这样, 在层板叶片的温度场计算中, 不仅使得方程组得以封闭, 而且可以方便地加入进、出气板之间的辐射换热.

本实验在雷诺数 5 000~ 60 000 的范围内, 研究了静止状态下进气孔、扰流柱和出气孔个数之比为 1: 4: 1 的层板模型的流阻特性与换热特性(进、出气板间距不大), 并对不同的进气孔直径、出气孔直径和出气孔倾角进行了对比实验.

1 实验模型及设备

1.1 实验模型

层板结构具有一定的周期性和对称性, 可以看作是由若干个相同的单元体铺展开来. 在 1: 4: 1 型层板结构中, 最小单元体包括 1 个进气孔、4 个扰流柱和 1 个出气孔. 本实验取 9 个单元体, 放大 20 倍, 作为实验件, 如图 1.

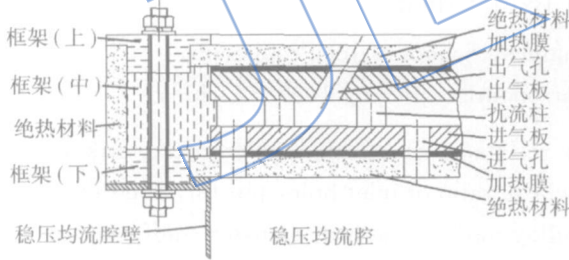


图 1 层板模型简图

Fig. 1 Schematic of lamilloy test model

进气板和出气板用紫铜, 由于紫铜的导热系数很高, 可以认为整个进气板(或整个出气板)的温度相同. 层板进(出)气板上打盲孔, 孔底距进(出)气板内表面 2 mm, 测量壁温的热电偶涂导热硅胶后插在盲孔内. 进(出)气板外表面粘贴加热膜, 紧贴加热膜外表面铺设绝热材料, 以保证加热膜所产生的热量只朝层板内表面传递. 进气板、出气板和绝热材料由绝热性较好的夹布胶木框架相互定位. 为获得较好的进口条件, 实验段进口处安装了整流滤网和蜂窝结构, 使得进口来流均匀一致.

1.2 实验台

本实验的实验台如图 2 所示.

实验用的冷气来自经过稳压后的压缩空气, 由稳压均流腔进入层板实验段, 冷却气体与层板充分换热后喷入大气中. 气体压力由精密压力表测得. 流量由热式质量流量计测量. 实验件的壁面温度和气流温度由 NiCr-NiSi 热电偶测量, 并由 ADAM 4018 模块采集. 进、出气板的加热电流和电压由数字万用表分别测出.

2 实验方案

2.1 流阻实验

由于稳压均流通道内的气流速度很低, 可用其静压作为进气孔处的气体总压 p_1^* . 又由于环境中的气体无流动, 出气孔出口处的气流静压 p_2 可以用背压(即大气压力 p_0) 近似代替.

进气孔处 $p_1^* = p_1 + \rho u_1^2/2$, $p_1 = \rho RT_{c1}$, $m = \rho u_1 A_{in}$, 联立可得进口处的气流密度 ρ_1 和流速 u_1 ; 由 $p_2 = \rho RT_{c2}$, $\dot{m} = \rho u_2 A_{out}$ 分别得到出气孔处的气流密度 ρ_2 和流速 u_2 ; 气流出口总压 $p_2^* = p_0 + \rho u_2^2/2$. 最后可得层板的流阻系数 $\xi = (p_1^* - p_2^*)/(\rho u_1^2/2)$.

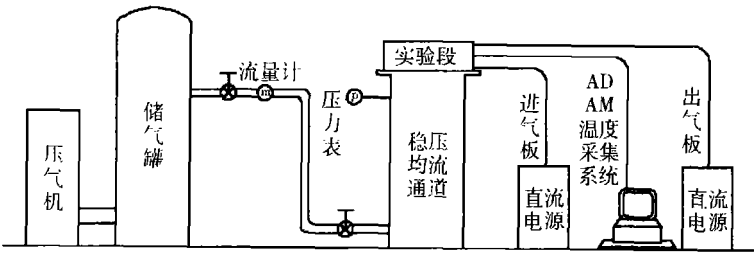


图 2 层板实验台

Fig. 2 Schematic of lamilloy test facility

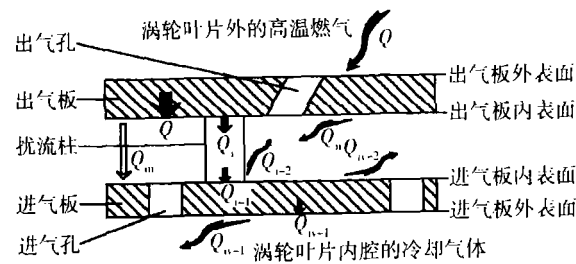


图3 层板叶片的实际传热过程

Fig.3 Heat transfer process of lamelloy blade

2.2 换热实验

层板结构应用于涡轮叶片的实际传热过程,若做一维处理(如图3),可分为以下6个步骤:

(1) 高温燃气通过对流和辐射传递给层板叶片外表面(即层板单元的出气板外表面)的热量 Q_1 ; (2) Q_1 以导热的方式传递到出气板内表面; (3) 出气板内表面的热量分为三部分传出($Q = Q_i + Q_{ii} + Q_{iii}$), Q_i 通过导热传递给扰流柱, Q_{ii} 通过对流传递给冷气, Q_{iii} 通过辐射传递给进气板内表面(忽略进、出气板与扰流柱之间的辐射换热); (4) 扰流柱相当于一个肋片,传到扰流柱上的 Q_i 有一部分 Q_{i1} 通过导热传递到了进气板内表面,另一部分 Q_{i2} 通过对流传递到冷气中去($Q_i = Q_{i1} + Q_{i2}$); (5) 传到进气板内表面的热量 $Q_{iv} = Q_{iii} + Q_{i1}$,也分为两部分, Q_{iv1} 通过导热传递到了层板单元进气板外表面, Q_{iv2} 通过对流传递给冷气($Q_{iv} = Q_{iv1} + Q_{iv2}$); (6) Q_{iv1} 通过对流传递到层板单元进气板外的冷气中。

我们所研究的层板内部的换热问题,传热过程中的未知参数为进气板内表面、出气板内表面、扰流柱表面与冷气的对流换热系数。对这3个对流换热系数的确定通过下面的分步实验来实现。

在分步实验中,对进气板和出气板分别加热:进气板外表面加热量 Q_1 ,出气板外表面加热量 Q_2 。由于进、出气板的加热温度较低(不超过 100°C),进气板内表面和出气板内表面的辐射换热可以忽略。

第1步:扰流柱换热为零。扰流柱用聚四氟乙烯,并分成三段(如图4(a)),中间一段多处铣槽以减少导热,上下两个带外螺纹的端盖与铜板上的内螺纹紧密配合,起密封作用。由于扰流柱用导热系数很低的非金属材料,并采取了多种隔热措施,扰流柱与进、出气板之间的热传递可以忽略。这样,进(出)气板外表面的加热量通过冷气与进(出)气板内表面的对流换热全部带走。

由 $Q_1 = \alpha_1 A_1 (t_{w1} - t_{c1})$ 得进气板内表面与冷气的换热系数 α_1 ;由 $Q_2 = \alpha_2 A_2 (t_{w2} - t_{c2})$ 得出气板内表面与冷气的换热系数 α_2 。其中 A_1 包括进气孔内表面的面积, A_2 包括出气孔内表面的面积。第1步实验结束后拟合进出、出气板内表面 $NuRe$ 准则关系式。

第2步:扰流柱正常换热。扰流柱用不锈钢,两端开有与铜板上的内螺纹紧密配合的外螺纹(如图4(b))。在装配扰流柱时,在其外螺纹上涂抹导热硅胶,以与铜板紧密接触并减少热阻。由于扰流柱用导热系数不太高的金属材料,这样,既能保证扰流柱与进、出气板之间很好地进行导热,又能保证进、出气板之间有一定的温度差。

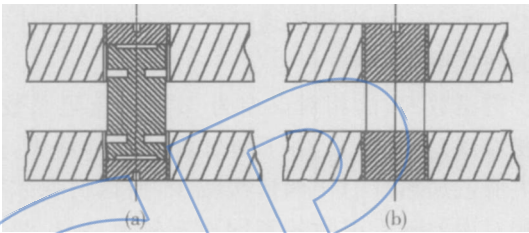


图4 扰流柱型式

Fig.4 Shape of pir fin

由第1步实验拟合得到的 $NuRe$ 准则关系式,求得对应于第2步实验雷诺数的进气板内表面的换热系数 α_1 和出气板内表面的换热系数 α_2 ,代入方程:

$$Q_1 + Q_2 = \alpha_1 A_1 (t_{w1} - t_{c1}) + \alpha_2 A_2 (t_{w2} - t_{c1}) + \alpha_3 A_3 [(t_{w1} + t_{w2})/2 - t_{c1}]$$

可得扰流柱表面与冷气的换热系数 α_3 。

为了工程应用的方便,在换热实验中,冷气温度均取进气温度 t_{c1} ,这样得到3个面的对流换热系数 α_1, α_2 和 α_3 比实际值偏低,只具有工程意义。

3 实验数据处理及误差分析

3.1 无因次分析

通过对控制方程的无因次分析知道,在几何相似的基础上控制层板对流换热过程的无因次准则数为雷诺数 Re ,努塞尔数可表示为: $Nu = f(Re)$ 。式中,努塞尔数 $Nu = \alpha d / \lambda$;雷诺数 $Re = \rho u d / \mu$, ρ, u 和 μ 分别为进气孔进口处的空气导热系数、气体密度、气流速度和动力粘性系数;对于进气板、出气板和扰流柱,特征长度 d 都取进气孔直径。

3.2 热损失处理

进气板的热损失主要是稳压均流腔中的冷气

对进气板外绝热材料的冲击冷却所带走的热量,可用进气孔处的气体与稳压均流腔内的气体的焓差来计算.即 $Q_{1_loss} = mc_p \Delta t_1$, 式中 m 为层板实验中的冷气流量, Δt_1 为进气孔处的气体与稳压均流腔内的气体的温差.

出气板的热损失主要是出气板外的绝热材料与空气之间的自然对流换热所带走的热量,即 $Q_{2_loss} = \alpha A^2 \Delta t_2$, 式中 α 和 Δt_2 分别为出气板外绝热材料表面与空气的自然对流换热系数和温差.

3.3 误差分析

实验用热电偶的测量误差为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力表精度为 0.4 级, 热式质量流量计的最大相对误差为 2%, 进、出气板加热量的相对误差分别为 0.2%, 0.5%. 由误差传递公式, 可以估算出本实验的间接测量误差.

雷诺数 Re 的相对误差为 3.1%, 流阻系数 ξ 的相对误差为 22%. 由于随着雷诺数的增大, 热损失所占加热量的比例依次减少, 所以努塞尔数的相对误差随雷诺数的不同而有较大差异. 最大雷诺数时, Nu_1 的相对误差为 3.8%, Nu_2 的相对误差为 1.8%; 最小雷诺数时, Nu_1 的相对误差为 17%, Nu_2 的相对误差为 2.2%.

4 实验结果分析

4.1 不同层板模型的实验结果

层板实验件编号中的前 3 个数字代表层板结构最小单元中进气孔、扰流柱和出气孔的个数比, J、C 和 Q 分别代表进气孔直径、出气孔直径和出气孔倾角, 例如 141J12C10Q30 表示层板模型中, 进气孔、扰流柱和出气孔的个数比为 1: 4: 1, 进

气孔直径为 12 mm, 出气孔直径为 10 mm, 出气孔倾角为 30° .

图 5 和图 6 分别为 141J12C10Q30 型层板的换热和流阻特性曲线.

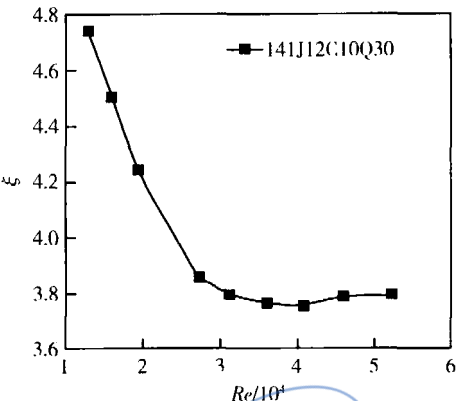


图 6 141J12C10Q30 型层板的流阻特性曲线
Fig. 6 Flow resistance characteristic of 141J12C10Q30

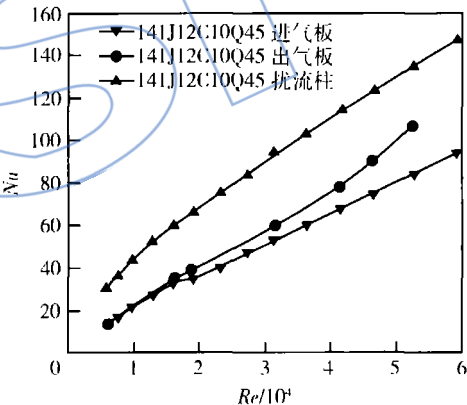


图 7 141J12C10Q45 型层板的换热特性曲线
Fig. 7 Heat transfer characteristic of 141J12C10Q45

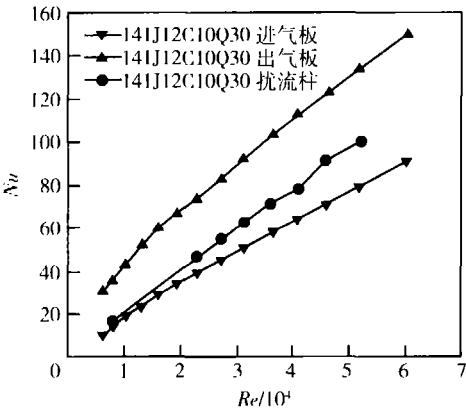


图 5 141J12C10Q30 型层板的换热特性曲线
Fig. 5 Heat transfer characteristic of 141J12C10Q30

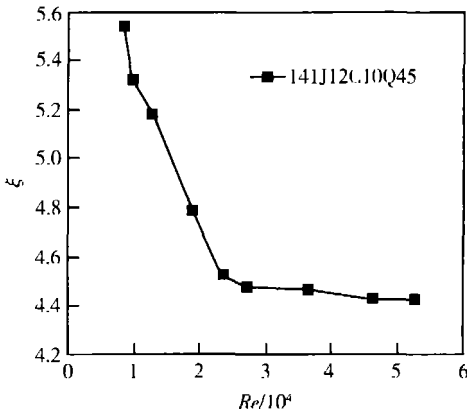


图 8 141J12C10Q45 型层板的流阻特性曲线
Fig. 8 Flow resistance characteristic of 141J12C10Q45

图 7 和图 8 分别为 141J12C10Q45 型层板的换热和流阻特性曲线。

从以上实验结果可以看出, 对于本文中进、出气板间距不大的层板模型, 出气板内表面的换热系数最大, 扰流柱表面的换热系数次之, 进气板内表面的换热系数最小. 层板结构的流阻系数随着雷诺数的增大而减小, 当雷诺数增大到一定程度之后, 流阻系数趋近于定值。

4.2 实验结果的比较

4.2.1 不同进气孔直径的比较

图 9 为出气板完全相同(C10Q30), 而进气孔直径不同的两种层板模型的换热特性的比较, 图 10 为两者流阻特性的比较。

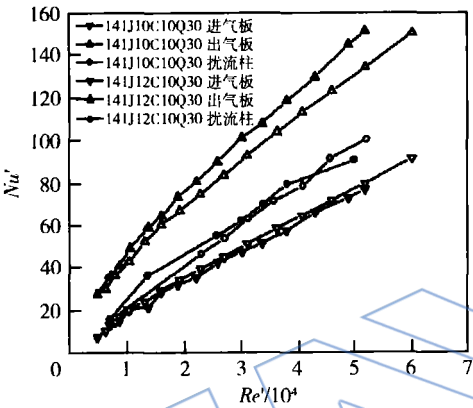


图 9 不同进气孔直径的换热特性比较
Fig. 9 Heat transfer comparison of different inlet hole

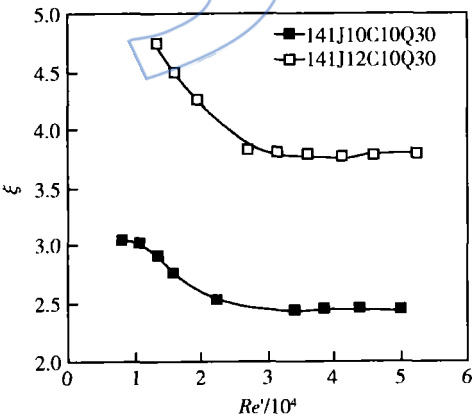


图 10 不同进气孔直径的流阻特性比较
Fig. 10 Flow resistance comparison of different inlet hole

由于雷诺数 Re 和努塞尔数 Nu 中的特征长度均为进气孔直径 d_1 , 当进气孔直径不同时, 相同雷诺数所对应的流量不同, 相同努塞尔数所对应的对流换热系数也不同. 为了比较相同流量下

不同进气孔径层板的换热和流阻特性, 我们定义了无量纲参数 $Re' = Re \times d_1 / d_0$, $Nu' = Nu \times d_0 / d_1$, 其中 d_0 为 141J12C10Q30 型层板的进气孔直径. 这样 Re' 、 Nu' 反映的分别是与流量和对流换热系数有关的无量纲量。

比较表明, 相同流量下, 随着进气孔直径的增大, 流阻系数增大, 出气板内表面的换热减弱, 进气板内表面的换热变化不大。

这是因为, 相同流量下, 进气孔直径越大, 冷气从进气孔流出后形成的射流速度越小, 对出气板的冲击冷却作用就越弱; 同时由于进气孔增大, 导致进气孔处的动压头减小, 从而引起流阻系数的增大。

4.2.2 不同出气孔直径的比较

图 11 为进气孔直径和出气孔倾角完全相同 (J12, Q30), 而出气孔直径不同的三种层板模型的换热特性的比较, 图 12 为三者流阻特性的比较. 比较表明随着出气孔直径的增大, 流阻减小;

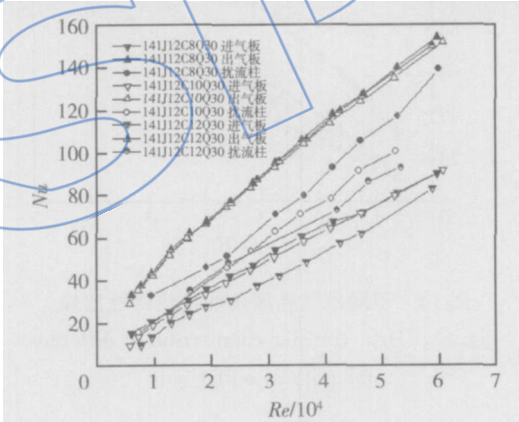


图 11 不同出气孔直径的换热特性比较
Fig. 11 Heat transfer comparison of different outlet hole

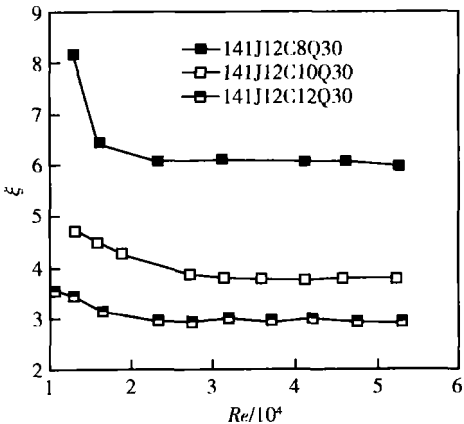


图 12 不同出气孔直径的流阻特性比较
Fig. 12 Flow resistance comparison of different outlet hole

进气板的换热减弱;而出气板的换热几乎不受出气孔直径变化的影响。

这是因为随着出气孔直径的减小,对气流的阻滞作用增大,流阻增大,气流冲击出气板后的折返流动增强,引起了进气板的换热增强;而出气板在相同速度的射流冲击冷却下,换热几乎没有变化。

4. 2. 3 不同出气孔倾角的比较

图 13 为进气孔直径和出气孔直径完全相同(J12,C10),而出气孔倾角不同的三种层板模型的换热特性的比较,图 14 为三者流阻特性的比较。比较表明随着出气孔倾角的增大,流阻增大;进气板内表面的换热增强;随着出气孔倾角的进一步增大,进气板内表面的换热增强趋缓;出气板的换热几乎不受出气孔倾角变化的影响。

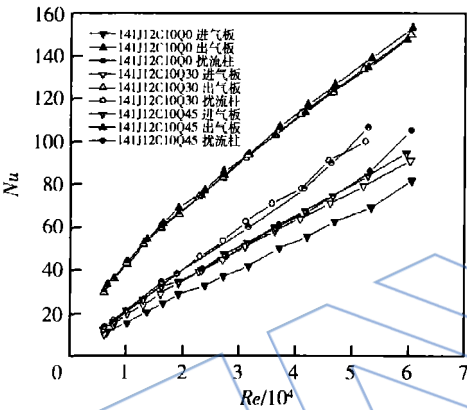


图 13 不同出气孔倾角的换热特性比较

Fig. 13 Heat transfer comparison of different obliquity of outlet hole

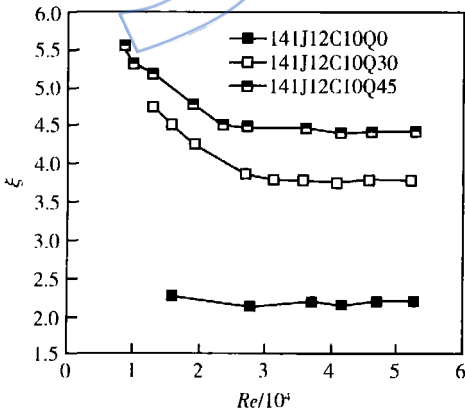


图 14 不同出气孔倾角的流阻特性比较

Fig. 14 Flow resistance comparison of different obliquity of outlet hole

这是因为随着出气孔倾角的增大,对气流的阻滞作用增强,流阻增大,气流冲击出气板后的折

返流动增强,引起了进气板的换热增强;并且出气孔从无倾角到有倾角的变化过程中,流阻明显增大,使得进气板的换热显著增强,而随着出气孔倾角的进一步增大,流阻增大有限,使得进气板的换热增强趋缓;而出气板在相同速度的射流冲击冷却下,换热几乎没有变化。

5 结 论

(1) 对于进、出气板间距不大的层板模型,出气板内表面的换热系数最大,扰流柱表面的换热系数次之,进气板内表面的换热系数最小。层板结构的流阻系数随着雷诺数的增大而减小,当雷诺数增大到一定程度之后,流阻系数趋近于定值。

(2) 对不同进气孔直径的层板模型,相同流量下,随着进气孔直径的增大,流阻系数增大,出气板内表面的换热减弱,进气板内表面的换热变化不大。

(3) 对不同出气孔直径的层板模型,随着出气孔直径的增大,流阻减小;进气板的换热减弱;而出气板的换热几乎不受出气孔直径变化的影响。

(4) 对不同出气孔倾角的层板模型,随着出气孔倾角的增大,流阻增大;进气板内表面的换热增强;出气板的换热几乎不受出气孔倾角变化的影响。

参考文献:

[1] Mongia H C, Reider S B. Allsion combustion research and development activities[R]. AIAA 28521402, 1985.

[2] Rolls Royce Aerospace Group. The jet engine [Z]. Rolls Royce Group Publishing Company, England: 1986.

[3] 郁新华,董志锐,刘松龄.层板模型流阻特性的研究[J]. 推进技术,2000,21(4): 47-50.

YU Xinhua, DONG Zhirui, LIU Songling. Study for flow resistance characteristics of the modelled laminated porous wall[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 47-50.

[4] 郁新华,全栋梁,刘松龄.层板结构内部换热特性的研究[J]. 航空学报,2003,24(5): 405-410.

YU Xinhua, QUAN Dongliang, LIU Songling. Investigation of the internal heat transfer characteristics of lamilloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(5): 405-410.

[5] 郁新华,全栋梁.层板结构冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报,2003,18(5): 615-622.

YU Xinhua, QUAN Dongliang, LIU Songling. Investigation of the cooling effectiveness of lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 615-622.