

文章编号: 1000-8055(2002) 01-122-05

多孔层板换热特性实验研究

董 威, 韩树军, 曹玉璋
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 本实验选取了一种典型结构的多孔层板作为研究对象, 进行了换热特性实验研究。研究了改变冷气流吹风比对该型层板冷却效果的影响。另外, 对该型多孔层板的冷却效果沿中轴线顺气流方向的变化规律也作了深入的研究。并给出了层板局部 Nu_x 和冷却效果 E 关于局部 Re_x 及冷气流吹风比 M 的数学拟合表达式。

关 键 词: 多孔层板; 换热特性; 冷却效果; 吹风比

中图分类号: V 231. 1

文献标识码: A

Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristic of Porous Lamellar tablet

DONG Wei, HAN Shu-jun, CAO Yu-zhang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The experiment has taken a typical structure model as experimental tablet to test the heat transfer characteristic of the porous lamellar tablet. Research on the changing regulation of the cooling effectiveness of the porous lamellar tablet with the blowing ratio of the hot and cooling flow has been done. Furthermore, careful research on the cooling effectiveness of internal layer along the axis downstream has been performed. The mathematics fit formula of the partial Nu_x and the cooling effectiveness E with respect to partial Re_x and the blowing ratio M of the hot and cooling flow has been given.

Key words: porous lamellar tablet; heat transfer characteristic; cooling effectiveness; blowing ratio

1 引 言

提高航空燃气涡轮发动机的推重比是研制和发展高性能发动机始终不渝的追求指标之一。在合理的发动机诸热力参数匹配下, 提高涡轮前燃气温度是增加推重比的最有效的措施之一。但涡轮进口温度的增加受到涡轮叶片允许温度的限制, 同时保持燃烧室的使用寿命也成了严重的问题。为解决这个问题, 一方面是提高材料的耐热性及改善表面保护, 而更为重要的是采用既省气又

有效的冷却措施^[1]。

多孔层板冷却技术就是根据发散冷却经验并结合实际应用条件发展而成的。进一步提高冷却效果的方法是采用有冲击冷却、内部强化传热和燃气侧全气膜冷却的层板结构, 如本实验采用的类似英国罗·罗公司的 Transply^[2] 的层板模型设计(见图 1) 和美国通用汽车公司的 Lamilloy^[3] (见图 2) 层板模型。

全气膜多孔层板作为一种新型的全气膜冷却形式的优点在于: 多孔层板结构增加换热面积, 增

加了湍流换热, 全气膜冷却壁面给出了均匀的冷却效果, 外层壁(即上层)的孔径尺寸和孔形控制了冷却空气的流量, 因此具有冷却空气耗量少(与常规气膜冷却比较, 层板结构可以减少 70% 的冷气)、壁温均匀、冷却效果好等优点, 显示了其良好的应用前景。

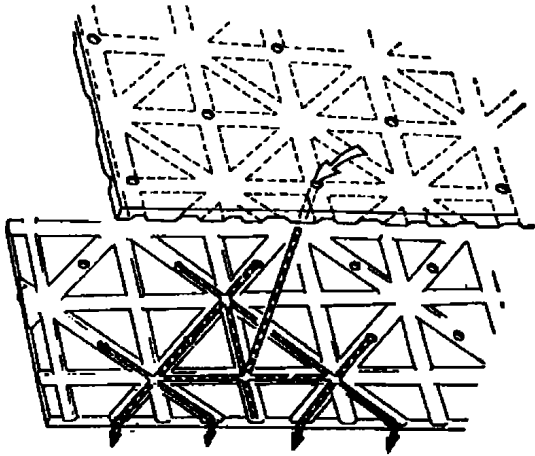


图 1 本实验采用的层板设计模型

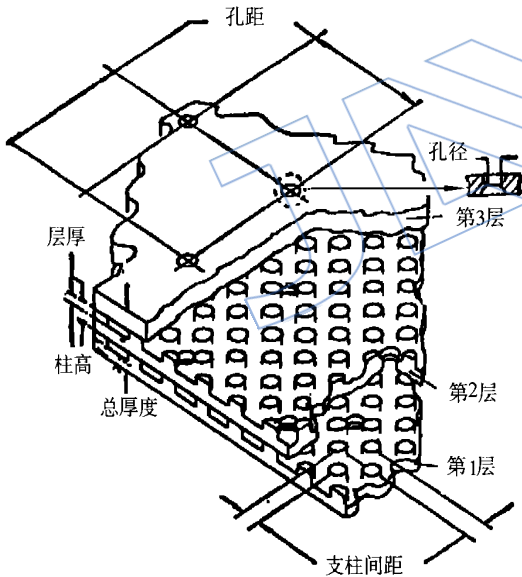


图 2 美国通用汽车公司 Lamilly 层板模型

本实验选取了一种典型结构的多孔层板作为研究对象, 进行了换热特性实验研究。仔细考察了改变冷热气流吹风比对该型层板冷却效果的影响。另外, 对该型多孔层板冷却效果沿轴线顺气流方向的变化也作了深入的研究工作, 并给出了层板局部 N_{ux} 和冷却效果 E 关于局部 Re_x 及冷热气流吹风比 M 的数学拟合表达式, 可用于今后相关的研究工作。

2 实验方案及理论导出

本项实验研究在主燃烧室元件实验器上进行。实验设备见图 3。

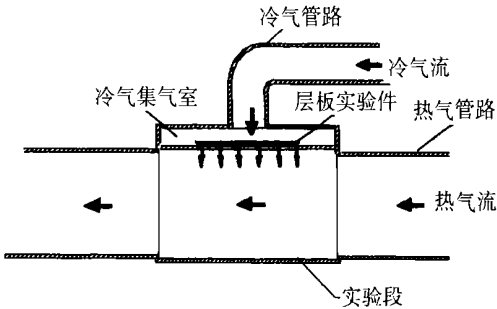


图 3 实验装置示意图

来自空压机的压缩空气分为两路, 一路为热气流路, 另一路为冷气流路。热气流路的气流, 先经过进气阀、标准流量喷嘴, 再经过加温器加温成为热燃气, 最后经过较长的进气管道进入矩形的实验段, 进口温度为 280°C 左右。冷气流路气流, 经过冷却器, 温度降低并保持稳定, 再经手动阀、音速喷嘴, 然后进入实验段的冷气集气室, 并通过层板冷侧的气孔, 经层板夹层, 由层板热侧的气孔进入热气流, 并在热侧形成气膜。

多孔层板实验控制体热平衡如图 4。在选择控制体时, 我们将紧贴层板热壁的薄层定为控制体下边界, 并设流出层板热壁的气流温度与该处层板热壁壁温 t_{wg} 相等, 这样做的依据是: 多孔层板设计目的就在于使冷却空气尽可能多地带走层板的热量, 而最优化的层板设计就是要达到流出层板热壁的气流温度与该处层板热壁壁温 t_{wg} 相等; 控制体的上边界远离层板冷壁(边界层外), 则控制体上边界处的气流温度应等于冷气流温度 t_c 。控制体的左、右边界按绝热处理。

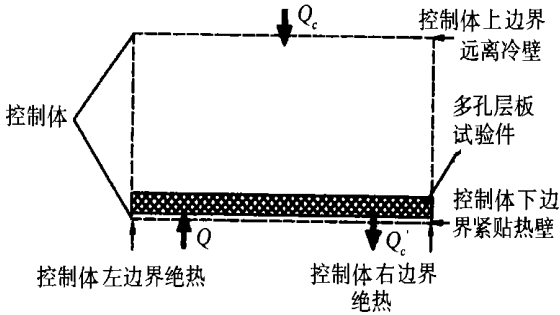


图 4 多孔层板实验控制体热平衡示意图

可以得到:

$$Q + Q_c = Q_c' \quad (1)$$

$$Q = A\alpha(t_g - t_{wg}) \quad (2)$$

$$Q_c = G_c C_{pc} t_c = A v_w \rho_w C_{pc} t_c \quad (3)$$

$$Q_c' = G_c C_{pw} g t_{wg} = A v_w \rho_w C_{pw} g t_{wg} \quad (4)$$

式中: G_c 为冷流流量(kg/s), A 为层板板面的有效流通面积(m^2), t_g 为实验段热气流温度($^{\circ}\text{C}$), t_{wg} 为实验件热侧壁温($^{\circ}\text{C}$), t_c 为实验段冷气流温度($^{\circ}\text{C}$), v_w 为冷气流流速(m/s), ρ_w 为冷气流密度(kg/m^3)。

将(2),(3),(4)式代入(1),并设 $C_{pw} = C_{pc} = C_p$, 整理得:

$$\begin{aligned} \frac{t_{wg} - t_c}{t_g - t_{wg}} &= \frac{1}{E} - 1 = \frac{\alpha}{v_w \rho_w C_p} \\ \Rightarrow E &= \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{v_w \rho_w C_p}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{u_g \rho_g C_p} \cdot \frac{u_g \rho_g}{v_w \rho_w}} \\ &= \frac{1}{1 + (St/M)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{v_w \rho_w C_p (t_{wg} - t_c)}{t_g - t_{wg}} \quad (6)$$

式中: ρ_g 为热气流密度(kg/m^3), u_g 为热气流流速(m/s)。

计算物性参数用的定性温度为边界层的平均温度 $t_m = (t_g + t_{wg})/2$, 查得空气在 t_m 时的导热系数 λ 及 C_p 等参数。

实验中热气流流量分别保持 1.35, 1.15, 0.89 (kg/s) 不变, 通过改变冷气流流量来改变冷热流吹风比。热气流流量采用标准流量喷嘴测量; 冷却空气流量约为 7~15 (g/s), 采用音速喷嘴测量, 用手动阀调节。实验中冷、热气流吹风比的变化范围为 0.012~0.025。

实验件为多孔层板实验件。层板实验件是由激光打孔的内层、照相腐蚀加工的夹层和外层的不锈钢板材真空扩散焊接组合而成, 外观为两面多孔的矩形平板, 板面的最大尺寸为 $150 \text{ mm} \times 92 \text{ mm}$, 板面的有效流通面积为 $120 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 板两侧的孔数和孔径完全相同, 照相腐蚀加工的夹层类似英国罗·罗公司的 Transply 的设计。每层板厚设计值为 0.5 mm , 层板总厚度为 1.5 mm 。正、反两面共敷设 26 点热电偶。1~12 号沿气流方向不等距地敷于层板冷侧中轴线上; 13~18 号敷于层板中轴线两侧, 并与层板中轴线保持垂直; 19~26 号敷于层板热侧层板中轴线, 并与冷侧部分点相对应。采用不等距的方案是为了尽可能不影响层板的换热特性, 敷设热电偶时

也应在不遮挡气孔为原则。

热电偶材料为镍铬—镍硅(K 分度号), 温度信号由 NEFF470 巡检系统采集, 输入计算机, 经过数采程序处理后直接打印出实验结果。

3 实验结果及分析

3.1 多孔层板冷侧的温度分布规律

鉴于多孔层板冷却方式的特殊性, 对多孔层板冷侧在不同冷热气流吹风比下温度的变化规律也进行了考察。图 5 给出了 $G_a = 1.15 \text{ kg/s}$ 时层板冷侧中轴线上各点在不同冷热气流吹风比下的温度分布。

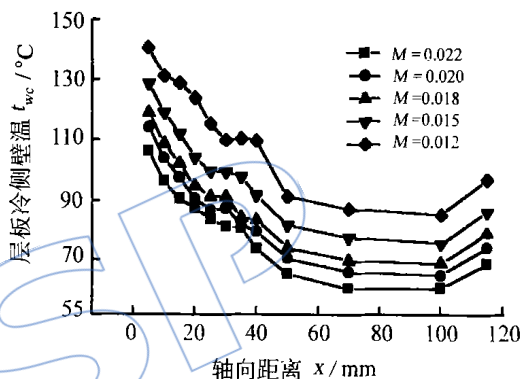


图 5 层板冷侧在不同冷热气流吹风比下的温度分布

由图 5 可以看出, 在吹风比一定的情况下, 层板冷侧壁温变化具有两边高中间低的特点, 即前缘迎气流方向最高, 尾缘处次之, 两端温度梯度较大, 温度变化较剧烈。而中心处各点的温度较低, 且温度变化不大。

不同的冷热流吹风比下, 冷侧壁温有如下特点: 吹风比 M 较低时, 壁温相对高一些, 吹风比 M 较高时, 壁温降低。对同一测点来说, 壁温随密流比的增大而降低。

垂直于中轴线布置的一系列共 6 支热电偶, 13~18 号热电偶, 用于研究相同轴向位置上径向温度分布的规律。实验结果表明: 层板实验件冷侧径向温度分布具有其轴向的相同特点, 这里就不再详述。

3.2 层板热侧的冷却效果

将冷气流进口温度 t_c 、热气流温度 t_g 和热侧壁温 t_{wg} 代入式(7) 计算冷却效果 E :

$$E = (t_g - t_{wg}) / (t_g - t_c) \quad (7)$$

图 6 为不同吹风比下的冷却效果在板面不同位置的变化(L 表示层板长度)。由图 6 中可以看

出,同一吹风比下,冷却效果 E 随层板轴向距离的增加而增大;在层板迎气流的前端,层板热侧并不能形成较好的全气膜冷却,板内的强化传热也受到了一定的限制,冷却效果很差。随层板轴向距离的增加,热侧的全气膜冷却和板内的强化传热都得到了一定的改善,表现在冷却效果 E 上,则是随 X/L 的增加而不断变大。不同吹风比下,吹风比越小,在板面相同位置的冷却效果 E 的值越小。

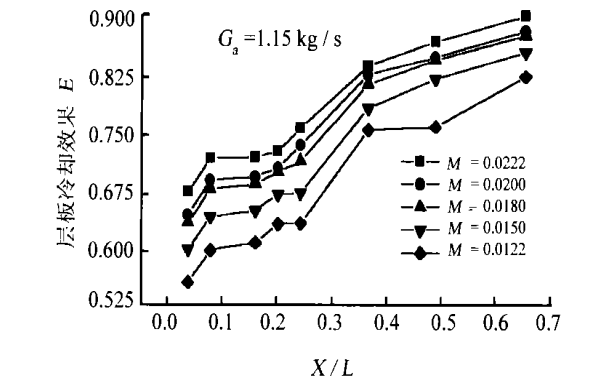


图 6 不同吹风比下的冷却效果 E 的变化

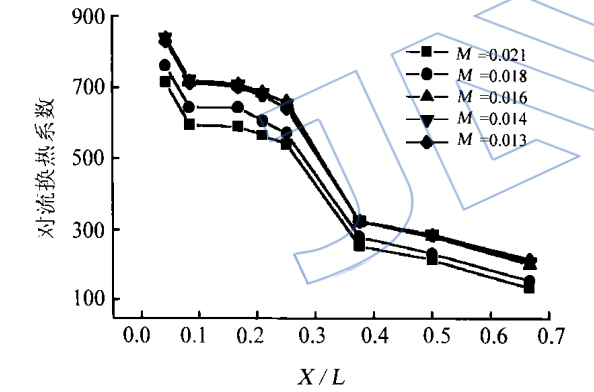


图 7 不同吹风比下对流换热系数 α 的变化

图 7 为不同吹风比下对流换热系数 α 在层板热侧不同位置的变化图。图 7 中可以看出,层板热侧的对流换热系数 α 沿层板中轴线的变化是非常有规律的。同一吹风比下,在层板迎气流方向的前缘,对流换热系数 α 达到最大值。随着层板轴向距离的加大,层板流通能力得到一定的改善,板内的强化传热进一步提高,对流换热系数 α 随 X/L 的增加而减小的趋势是相当明显的。不同的吹风比下,随吹风比变大,对流换热系数 α 随层板热侧边界层动量损失厚度的不断增加而不断减小。即层板相同位置上,吹风比 M 大时,对流换热系数 α 相对小。

3.3 拟合关系式

用最小二乘法编制的 FORTRAN 程序对实验数据进行多元线性回归,得到层板局部 Nu_x 关于局部 Re_x 及冷热气流吹风比 M 的数学拟合表达式,以及冷却效果 E 关于局部 Re_x 及冷热气流吹风比 M 的数学拟合表达式如下(参考图 8 和图 9):

$$Nu_x = 0.01884 \times (Re_x)^{0.855} \cdot M^{-0.0777} \quad (8)$$

$$E = 1.678 \times (Re_x)^{0.054} \cdot M^{0.368} \quad (9)$$

式中: $M = (G_c/A)/(G_h/A_g) = \rho_w v_w / \rho_g u_g$ 为冷、热气流吹风比, G_h 为热气流流量(kg/s), A_g 为热气流的流通面积(m^2), $Re_x = G_h X / A \mu_g = \rho_g u_g X / \mu_g$ 为局部雷诺数, X 为多孔层板轴向距离(mm)。

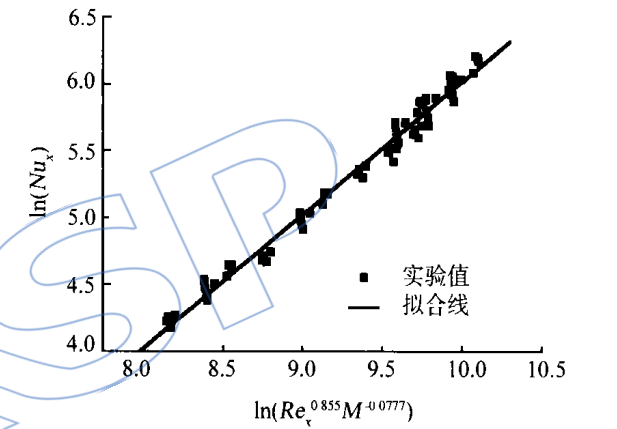


图 8 局部 Nu_x 数的实验结果及拟合

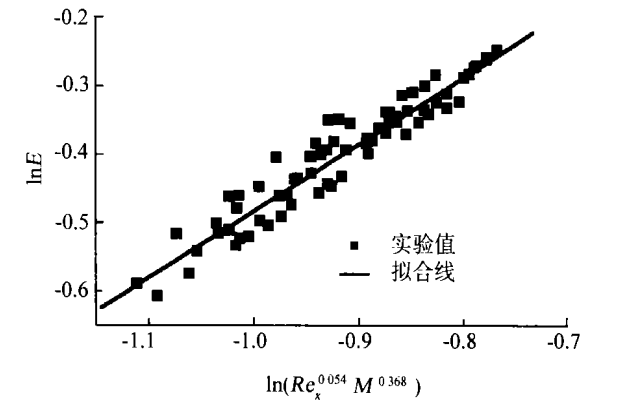


图 9 冷却效果 E 的实验结果及拟合

由求得的复项关系系数来看,线形回归的效果很好。局部 Re_x 及冷热气流吹风比 M 对冷却效果 E 的作用均非常显著,即两个变量均不能剔除。由于温度的差别不大,所以 Pr 数可取为常数。

拟合公式的适用范围:

$$0.9 \times 10^4 \leq Re_x \leq 1 \times 10^5$$

$$0.012 \leq M \leq 0.025$$

4 结 论

从上述对实验结果的分析, 可得到以下结论:

(1) 层板冷却效果良好。同一吹风比下, 距层板前缘距离越大, 冷却效果越好; 不同吹风比下, 吹风比越大, 同一位置上的冷却效果越好。

(2) 对流换热系数 α 沿层板轴向距离减小。不同的吹风比下, 随吹风比变大, 对流换热系数 α 随层板热侧边界层动量损失厚度的不断增加而不断减小。

(3) 在实验数据中出现的一些不规律的值, 可能的解释如下: 层板的加工过程中误差较大; 层板实验件在实验中出现局部焊点开焊; 实验中灰

尘颗粒堵塞气流孔, 产生局部气压的突升或突降; 敷设热电偶时堵塞了气孔, 使局部流通能力下降。

(4) 实验状态稳定, 线形回归效果好, 给出的拟合的关系式可用于今后相关的研究工作。

参考文献:

[1] 葛绍岩. 气膜冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[2] Wassell A B, Bhanga J K. The Development and Application of Improved Combustor Wall Cooling Technique[R]. ASME Paper, 80- GT- 66, 1980.

[3] Neatly D A, Reider S B. Evaluation of laminated Porous Wall Materials for Combustor Liner Cooling[R]. ASME Paper, 79- GT- 100, 1979.

(责任编辑 杨再荣)

