

层板模型流阻特性的研究^{*}

郁新华, 董志锐, 刘松龄, 游少坤

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 设计了不同内部流动结构的单、双层多孔层板, 并针对这些层板在吸气式风洞上进行了流阻实验, 得出了绕流柱形式、开孔率、孔间距、绕流柱高度以及单、双等敏感因素对层板流阻特性的影响: 方形扰流柱阻力最小, 圆形次之, 菱形阻力最大; 开孔率越大, 孔间距越小, 流阻越小; 扰流柱越高, 流阻越小; 双层扰流柱的层板阻力明显高于单层扰流柱。

关键词: 航空发动机; 多层板; 多孔板; 冷却; 流体阻力

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)04-0047-04

Study for flow resistance characteristics of the modelled laminated porous wall

YU Xin-hua, DONG Zhi-rui, LIU Song-ling, YOU Shao-kun

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Some laminated porous walls with different internal configuration were designed. Based on the several experiments, this paper made an investigation on the effects such as the number of holes, the shape of the fin elements, the grid depth, single layer lamilloy and double layer lamilloy on the flow resistance. Some practical conclusions are drawn. The more the holes are, the lower the pressure loss will be. The larger the hole space is, the lower the pressure loss will be. The present results also indicate that the cube element yields the lowest pressure loss, followed by circular pin-fin and diamond. The higher the grid depth is, the lower the pressure loss will be. The double layer lamilloy represents higher pressure loss than the single layer lamilloy.

Key words: Aircraft engine; Multilayer board; Porous plate; Cooling; Fluid drag

1 引言

层板冷却是一种新型的发动机冷却方式。美国的Allison 先进技术开发公司和英国的罗·罗公司早在70年代就开展此项研究^[1,2], 有的已成功应用于燃烧室壁面和涡轮叶片冷却上。这种冷却技术不仅可以提高发动机的推重比和工作温度, 而且有助于增加发动机的寿命, 可以扩大现在和未来的发动机的温度裕度。我国开展这项课题的研究较少^[3], 缺乏系统的研究。层板流阻特性是层板换热的基础, 因此本文侧重于流阻特性的实验研究。

2 试验装置和试验方法

试验在西北工业大学的吸气风洞试验台上进行, 实验设备如图1所示。

吸气式风洞进口 p_1 是大气压力, p_2 , p_3 , p_e 由压力表读数, 通过调节涡街流量计后面的阀门来控制空气流量。为了保证得到准确的空气流量, 这台实验设备必须进行密封检验。由于吸气风洞的试验段是有机透明玻璃制成的, 可以通过向实验系统加入水来检查是否有水渗透到系统里面。压力 p_1 和 p_2 是用于计算层板试验件前后的压比或压差, 而压力 p_e 则是用于状态方程求密度, 将涡街流量计测出的体积流量换算成质量流量。

3 试验件设计类型

发动机任何一个元件的冷却系统都应保证在给定工况下得到必须的冷空气消耗量。例如冷却空气具有压差的情况下。这就必须实验一系列内部具有各种截面气道的层板模型, 为每一种具体情况挑选

^{*} 收稿日期: 1999-09-07; 修订日期: 1999-12-25。基金项目: 航空基础科学基金重点项目(98Z53001)

作者简介: 郁新华(1972—), 男, 博士生, 从事发动机过失速性能、气动热力学及航空发动机冷却技术研究。

出合适的流阻特性的内部结构。为此, 设计制造了内部扰流柱结构为方形、圆形及菱形的放大 10 倍的模型试验件共 32 件。每件进气板、中间板、出气板的开孔个数相同。其整体结构示意图和单元局部图如图 2 所示。(其中有填充黑色是出气孔, 没有填充

色是进气孔, 有剖面线的是扰流柱子, 其中只画了方形扰流柱, 圆形及菱形与方形位置一样,)

实验层板无因次基本结构尺寸如表 1 所示, 其中 d 为进气孔直径, F_1 为进气孔的总面积, F 为层板迎风面积。

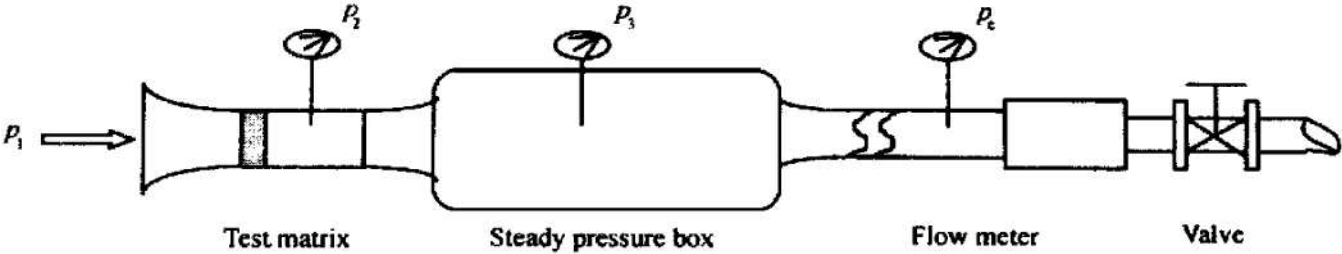


Fig. 1 Lamilloy matrix flow resistance test rig

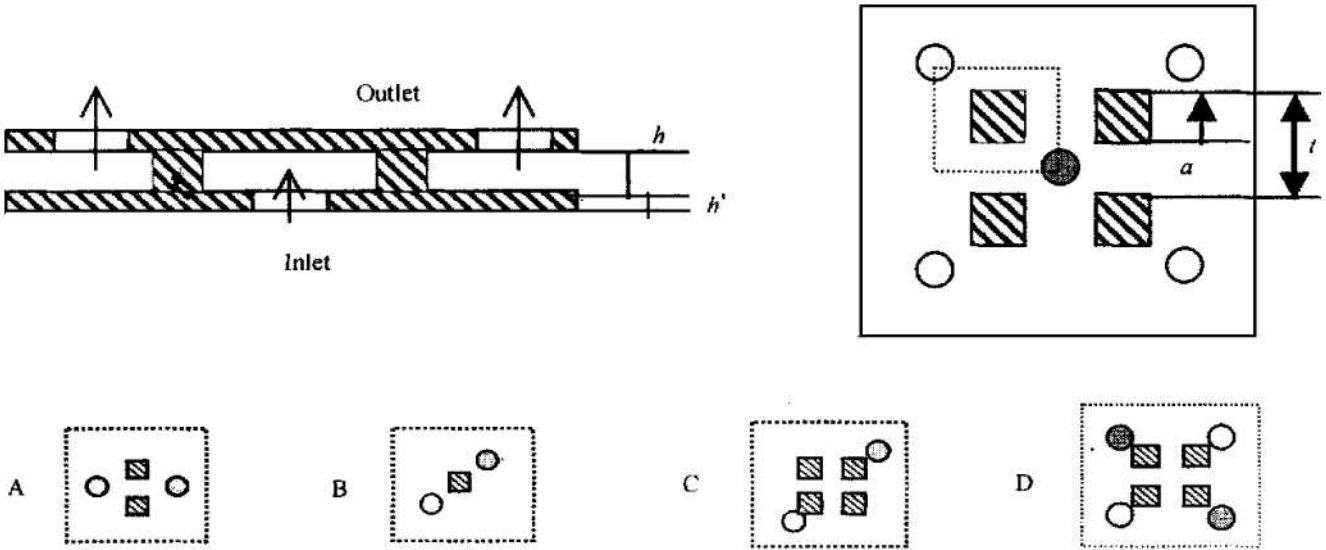


Fig. 2 Schematic of the laminated porous wall

Table 1 Test samples of the laminated porous wall

NO.	Test sample	t/a	h/a	d/a	h'/a	F_1/F (%)
1	Single, square, C	2	0.417	0.75	0.667	0.69
2	Single, circular, C	2	0.417	0.75	0.667	0.69
3	Single, diamond, C	2	0.417	0.75	0.667	0.69
4	Single, circular, C	2	0.333	0.75	0.667	0.69
5	Single, circular, C	2	0.667	0.75	0.667	0.69
6	Single, circular, C	2	0.417	0.75	0.667	0.69
7	Single, circular, A	2	0.625	0.75	0.625	0.69
8	Double, circular, A	2	0.625	0.75	0.625	0.69
9	Single, circular, A	2	0.417	0.75	0.667	5.5
10	Single, circular, B	2	0.417	0.75	0.667	2.76
11	Single, circular, C	2	0.417	0.75	0.667	0.69
12	Single, circular, D	2	0.417	0.75	0.667	1.379

4 实验数据处理方法

试验数据处理采用以下三种方法。

(1) 沿程阻力关系式

将流经层板的阻力看成多孔介质中的沿程阻力, 因此, 根据公式

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho u_m^2 \quad (1)$$

式中 p_1 为进气边的压力, p_2 为出气边的压力, λ 为沿程阻力系数, L 为层板总厚度, d 为多孔通道的当量直径, ρ 为流过层板的气体平均密度, u_m 为气体流经多孔板的平均速度。

如果流动是在阻力平方区内的紊流流动, 其沿程阻力系数 λ 为一常数, 即 $\lambda = C$, 将它代入式 (1), 可以推导出

$$(p_1^2 - p_2^2) / (2WRFLm) = C / (2d) \cdot m / \mu \quad (2)$$

式中 m 为层板单位迎风面积上的质量流量, R 为气体常数, F 为流经层板的气体平均温度, μ 为空气的动力粘性常数。由式 (2) 可以看出: 对于确定的一种层板结构, $C/2d$ 为一定值, $(p_1^2 - p_2^2) / (2WRFLm)$ 与 m/μ 之间呈线性关系, $C/2d$ 即为直线的斜率。

如果流动是层流流动, 则 $\lambda = C/Re = C\mu/(\rho u_m d)$, 其中 C 为一常数。将它代入式 (1) 并整理为 $(p_1^2 - p_2^2) / (2WRFLm) = C/(2d^2)$ (3)

式 (3) 的右端对一种层板应为一个常数。

(2) 流量函数与压比的关系

由气体动力学的流量函数得

$$q(\lambda) = G \sqrt{T_1} / (KF_1 p_1) \quad (4)$$

式中 F_1 为进气板开孔总面积, G 为流经层板的总质量流量, T_1 为总温, $K = 0.0404$ 。

将试验数据整理为 $q(\lambda)$ 与 p_1/p_2 的关系曲线图。即

$$q(\lambda) = f(p_1/p_2) \quad (5)$$

(3) 阻力系数关系式

定义层板阻力系数 ξ 为

$$\xi = (p_1 - p_2) / (\frac{1}{2} \rho_1 u_1^2) \quad (6)$$

将试验数据整理为

$$\xi = f(Re) \quad (7)$$

式中 Re 数定义为 $Re = \rho_1 u_1 d_{1e} / \mu_1$, 式中 ρ_1 , u_1 , μ_1 分别为进气孔处的密度、平均速度和动力粘性系数, d_{1e} 为进气孔的当量直径。

5 实验结果及分析

对于一个固定的层板, $(p_1^2 - p_2^2) / (2WRFLm)$ 与 m/μ 始终呈线性关系, 从图 3 中可以看出, 其斜率为固定值 β , 仅与层板本身的内部结构有密切的关系。这条直线具有十分重要的工程应用价值, 知道这张图, 根据某层板的斜率 β 来求出实际工况下的层板流量, 就可以进行该层板的换热计算。至于直线图上出现翘起, 是由于当流动达到壅塞状态时, 出气孔气流已达音速, p_2 的减小已不影响层板的内流动, m/μ 保持为定值, 但随着 p_2 的减小, $(p_1^2 - p_2^2) / (2WRFLm)$ 将继续增大, 所以会出现翘起现象。

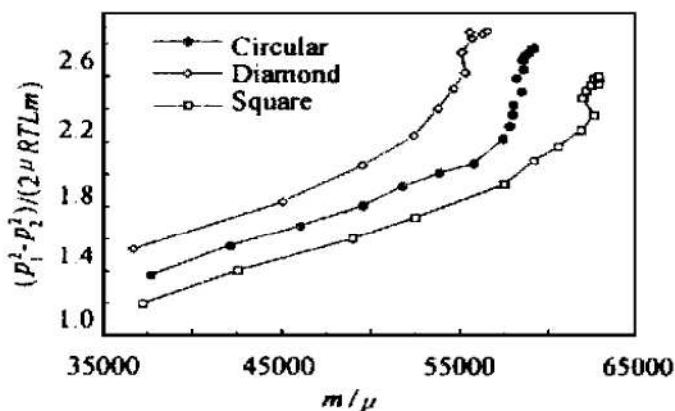


Fig. 3 Typical lamina flow resistance data

把图 3 与公式 (2) 相对照, 从而说明层板内部的流动是阻力平方区内的紊流流动。从图 3 还可以看出, 方形扰流柱的实验直线斜率最小, 圆形扰流柱直线斜率次之, 菱形扰流柱的直线斜率最大。说明方形扰流柱阻力最小, 圆形次之, 菱形阻力最大, 此情况与文献 [4] 的结论一样。文献 [4] 还说明方形扰流柱比圆形扰流柱具有较强的换热, 看来, 方形扰流柱更具有有一定工程应用前景。

$q(\lambda)$ 与 p_1/p_2 的关系见图 4, 可以看出, 随着压比的改变, $q(\lambda)$ 首先迅速增大, 然后它的增长速率迅速减缓, 并在一定的条件下, 可以得到最大的和恒定流量, 此时层板发生堵塞, 流量不变。从图中还可以看出, 方形的流量系数最大, 圆形的次之, 菱形的最小, 与图 3 结论相一致。

图 5 中, 在整个 Re 研究的范围内, 流阻系数 (在所有模型中) 都随 Re 增大而增大, 并且在同一雷诺数下, 方形扰流柱阻力系数最小, 圆形次之, 菱形阻力系数最大。从图中还可以得出, 达到临界时, 方形的流量最大, 而菱形的最小, 圆形的居中,

与图3, 图4结论相一致。

扰流柱的高度对流阻特性亦有很大的影响, 图6中看出, 扰流柱子越矮, 直线斜率越大, 说明冲击距离越短, 阻力越大, 图7是单、双层层板的比较。双层扰流柱的层板明显要比单层扰流柱的层板的阻力大, 因为前者比后者多经过了一层扰流柱和一组元件。但单板与双板之间的关系尚需要经过后

续的大量试验和计算分析来确定。

从几种方案的对比(图8)看出, 层板的流阻还与层板的开孔率和孔间距有关。开孔率越大, 直线斜率越小, 流阻越小。从换热的角度来看, 开孔率大, 冷气流量大, 有利于换热。孔间距越小, 斜率越小, 流阻越小, 同样压降下, 通过的流量就越大。

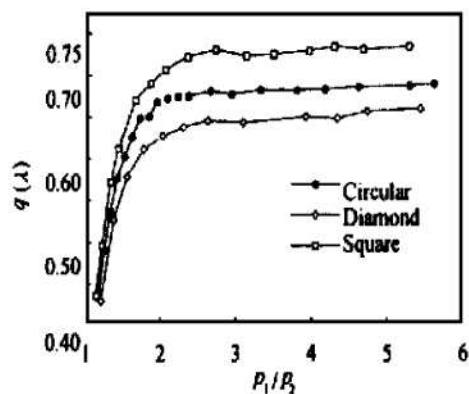


Fig. 4 Discharge coefficient

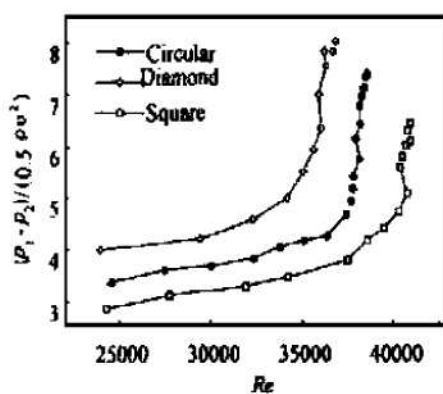


Fig. 5 Pressure loss coefficient versus Reynolds number

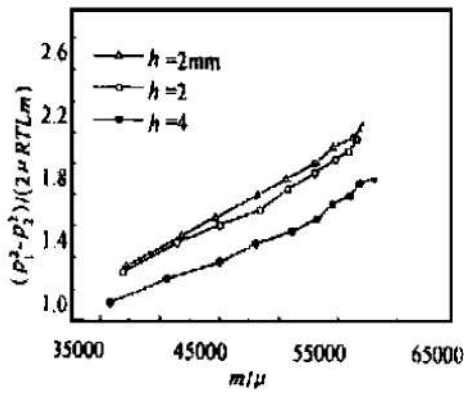


Fig. 6 Flow resistance versus grid depth

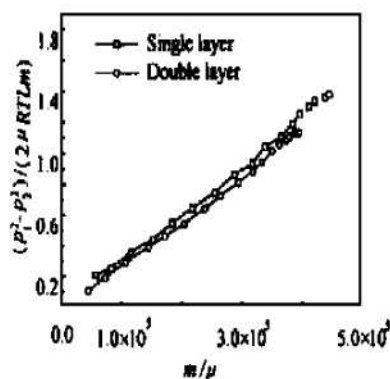


Fig. 7 Flow resistance versus the layer numbers

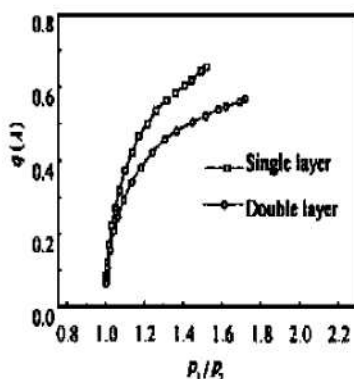


Fig. 8 Flow resistance versus the different scheme

由于层板结构涉及的因素很多, 因此有必要进行更多的层板设计及试验, 进行流阻分析, 并整理出适用于工程的一套经验公式, 方便实际应用。

参考文献

[1] Nealy D A, Relder S B. Evaluation of laminated porous wall material for combustor liner cooling [J]. Journal of Engineering for Power, 1980, 102: 267~276.

[2] Rolls-Royce Aerospace Group. The jet engine [M]. Rolls-Royce Aerospace Group, 1986.
[3] 何家德. 用瞬态测试技术研究多孔层板的换热特性[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(1): 21~24.
[4] Chyu M K. Convective heat transfer of cubic fin arrays in a narrow channel [R]. AIME96-GT-201.

(责任编辑: 龚士杰)