两种层板性能对比

吕 东 陶 智 邓宏武 李海旺

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室,北京 100083)

摘 要:针对常规的141型层板,提出了一种增加50%数量扰流柱的设计,即161型层板.采用实验和数值模拟相结合的办法研究了两种类型层板在流阻和换热方面的差别.换热实验部分采用了辐射式加热设备,测量了层板上下表面平均壁温,以及冷气进、出口截面间的焓差,得到了相应进气雷诺数下的层板体积换热努塞尔数.发现161模型流阻降低20%,换热增强5%.对一些实验工况,采用三维计算流体力学程序进行了流-固耦合传热数值模拟,所得结果在趋势上与实验一致,在数值上,流阻和换热与实验结果分别相差5%和30%.利用数值模拟结果分析并比较了两种模型在流场和表面对流换热系数分布方面的细节差别.

关 键 词:航空航天推进系统;层板;扰流柱;流阻;换热

中图分类号:V 231.1

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2008)05-0546-05

Performance evaluation and comparison of 2 porous laminated plates

Lü Dong Tao Zhi Deng Hongwu Li Haiwang

(National Key Lab on Aero-Engine, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new form of porous laminated plate (PLP), model 161, was put forth, which had 50% pin-fin quantity increasing compared with its conventional counterpart, model 141. The 2 models were studied on their flow resistance and heat transfer characteristics by experiment and numerical simulation. A thermal radiation heating facility was employed to maintain the heat flux on the PLP upper external surface, and the actual heating rate was calculated by the enthalpy difference between the inlet and outlet of the coolant. The external surface temperatures were arithmetically averaged. It was found that the model 161 had 20% less flow resistance and 5% more heat transfer than the model 141. The numerical simulation results were in good agreement with the experiment for the flow resistance. However, the discrepancy for the heat transfer was significant and a maximum deviation of 30% in Nusselt number existed, although the variation patterns were quite the same.

Key words: aerospace propulsion system; porous laminated plate; pin-fin; flow resistance; heat transfer

层板是目前国内外航空发动机热端部件冷却结构研究中的一个热点领域,国内外相关研究均显示,层板结构能够在保证冷却效果的同时,节省冷气用量30%以上[1].国外一些研发部门已经将层板成功应用于新一代的航空发动机上[2-3],而在国内,因为该领域研究起步较晚,目前处于机理研究阶段,而没有实际应用.层板的特征结构包括"板"、"孔"、"板间支撑物"3种.层板开孔密度,孔的形状和大小,板间支撑物的排列形式和尺寸等几何条件是影响层板流动和换热性能的主要因素,而对板间支撑物的研究更是文献显示的热点.西北工业大学的郁新华等人就曾做过一种常规的141型层板性能的研究[4].Rolls-Royce Allison公司的Sweeney和Rhodes使用红外测温的方法对板间支撑物呈花朵型的两种层板结构进行了换热性能研究[5].

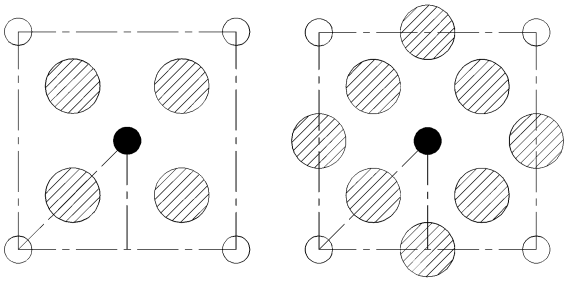
收稿日期:2007-04-17

作者简介:吕 东(1979—),男,辽宁鞍山人,博士生,lvdong1979@163.com.

本文同样以扰流柱的分布为研究重点,提出一种异于常规的 161 型层板,对比了其与常规结构 141 型层板之间的性能差异,从而探索更优的层板结构形式.

1　实验件结构设计和数值模拟建模

对于板间支撑物为扰流柱的层板,可以根据其中"进气孔"、"扰流柱"、"出气孔"的数量比来区分不同类型之间的差别.首先定义层板的单元体——相邻 4 个进气孔轴线所划分的部分,如图 1 所示,点划线所包括部分即为层板单元体.在每个单元体中,包括 4 个 1/4 进气孔,1 个完整出气孔和一些扰流柱,以 N 来代表单元体中扰流柱的数量(不完整的部分以其所占完整部分的比例来计算),则每个单元中"进气孔"、"扰流柱"、"出气孔"的数量比为 1 :N :1,称该种层板为 1N1 型,并称 N 为层板扰流柱分布特征参数.图 1 显示的是 141 和 161 模型的单元体示意图,空心圆圈表示进气孔,实心圆圈表示出气孔,剖面线表示扰流柱.



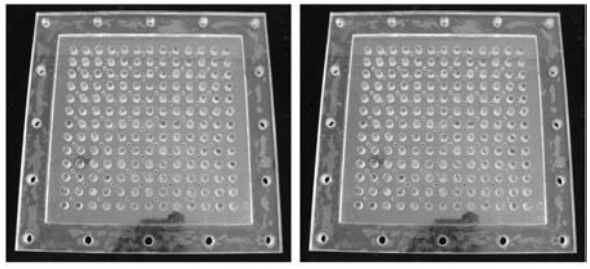
a　141 层板模型　　b　161 层板模型

图 1　层板模型单元体示意图

161 模型相对于 141 模型,其本质区别在于前者在两进气孔之间新增加了一个扰流柱,称原扰流柱为主扰流柱,后增加的为副扰流柱.

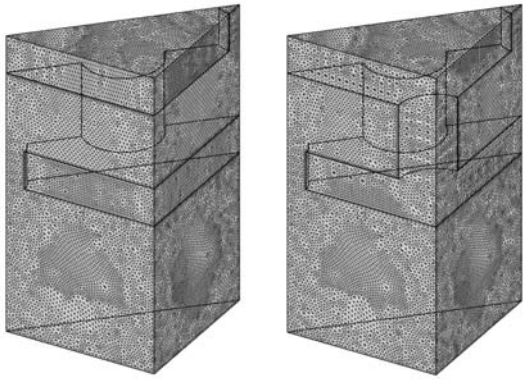
实验件的加工采用了有机玻璃材料,两个模型有着相同的外形尺寸,均布置了 6×6 个单元,所不同之处在于 141 模型有 169 个扰流柱,而 161 模型有 241 个,在除去四周为了减小边缘效应而增加的 25 个扰流柱后,二者的扰流柱数量比为2 :3,见图 2.其余尺寸为:进气孔间距 L = 0.04 m;进气板厚度 h_1 = 0.005 m;出气板厚度 h_2 = 0.005 m;扰流柱高度 H = 0.01 m;层板总厚度 S = 0.02 m;扰流柱直径 D = 0.01 m;进气孔直径 d_1 = 0.005 m,出气孔直径 d_2 = 0.005 m.

为了更详细的对流动和换热情况进行分析,本文还用了三维数值模拟的方法对实验模型及其实验工况进行了数值计算.由于层板具有对称性,所以仅建立 1/8 单元体的模型,即图 1 中三角形点划线所包括的区域,网格情况见图 3.为了更好的贴近真实情况,增加了层板入口段.相对于将入口设置在层板进气孔,这样可以更准确的模拟气流在进气孔附近的流动.由于需要计算实验件上的温度分布,同时建立了固体区域.



a　141 层板模型　　b　161 层板模型

图 2　层板实验件



a　141 层板模型　　b　161 层板模型

图 3　层板计算模型及网格

2　实验和计算方法

2.1　实验方法

实验在北京航空航天大学的国家气动热力重点实验室进行,利用了其气源和小型风洞.整个实验装置采用立式装配,分为"进气风洞"、"实验件主体"、"加热设备"和"压力及温度测量设备"4 个部分,见图 4.

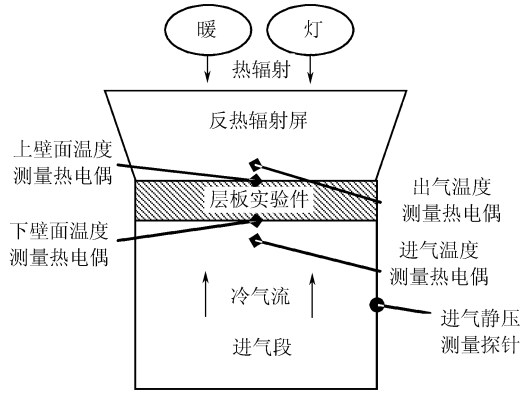


图 4　层板实验装置示意图

实验时调整进气风洞的阀门,获得不同的层板入口流量,而层板外侧则直接暴露于大气.同时调整位于层板上方的辐射加热式暖灯,使得实验件在不至于熔化或机械性能产生变化的情况下存在一定的上下表面温差.为了防止周围环境与层板受热面之间产生影响实验的辐射换热,在层板侧面装有使用光亮铝箔做成的反热辐射屏,该热屏同时还具有将暖灯散射出的热能重新收集回层板受热面的功能.为了防止辐射热能穿过层板受热面到达内腔表面,同时也是为了提高受热面对辐射的吸收率,在其表面喷涂有哑光黑漆.相对于对流加热和导热式加热等方式,使用辐射加热的方式可以在最大限度上减少对层板流场的影响.

本实验采用了同时测量流阻和换热参数的方法.在流阻测量方面,通过布置在进气段静压探针得到层板进气的静压 P_{in},因为计算发现进气速度非常小,在整个实验工况范围内不足 0.5 m/s,因而认为层板进气总压与静压相等,即

$$P_{in}^{*}=P_{in} \tag{1}$$

层板出气的总压是由大气压和计算出的动压头相加得到,即

$$P_{out}^{*}=P_{atm}+0.5\rho_{out}v_{out}^{2} \tag{2}$$

而层板出气截面的密度 ρ_{out} 和速度 v_{out} 是通过连续方程(3)和气体状态方程(4)计算得到:

$$\dot{m}_{in}=\dot{m}_{out}=\rho_{out}v_{out}A_{out} \tag{3}$$

$$P_{atm}=\rho_{out}RT_{out} \tag{4}$$

常数 $R=287.1\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$.在得到层板进气和出气总压及它们之差 $\mathrm{d}P^{*}$ 之后,便可得到两个模型进出口总压差随流量和层板进气雷诺数的变化关系,即比较它们之间的流阻大小.雷诺数的定义为

$$Re=\frac{\dot{m}/36}{\mu L} \tag{5}$$

其中,$\dot{m}$ 为总质量流量;L 为层板进气孔间距 0.04 m;μ 为气流在进气温度下的动力学粘性系数.

在换热方面,本实验采用热电偶作为温度测量工具,测量两个层板实验件在一定流量和一定辐射加热量的情况下,冷气的进出口温度 T_{in},T_{out} 和层板上、下外壁面的平均温度 T_{W1} 和 T_{W2},定义整个层板的固体平均温度:

$$\overline{T}_{W}=(T_{W1}+T_{W2})/2 \tag{6}$$

再根据这些结果计算得到层板的体积换热系数:

$$\alpha_{V}=\frac{Q/V}{\overline{T}_{W}-T_{in}} \tag{7}$$

式中,Q 为层板单元体的被加热量;在数值上等于流经一个单元的气流吸热量,即

$$Q=\dot{m}c_{p}(T_{in}-T_{out})/36 \tag{8}$$

而 V 为层板单元体的外轮廓体积,即

$$V=SL^{2} \tag{9}$$

定义层板体积对流换热努塞尔数为

$$Nu_{V}=\frac{\alpha_{V}\cdot SL}{\lambda_{air}} \tag{10}$$

以其和雷诺数的函数关系为研究的目标.

T_{W1} 和 T_{W2} 的测量方法是在实验件中心的位置,在 1/8 单元的区域内,密布多个热电偶,然后求其算术平均值.更换实验件后,保证热电偶位置和数量不变.为了不影响层板内腔流场,同时也是防止实验件上方暖灯的直接加热,出气温度采用了引气式测量方法,使用陶瓷支架将热电偶固定在一根外表光亮的不锈钢管内部,并让层板出气气流射入钢管.

2.2 数值计算方法介绍

采用四面体网格对层板模型进行网格划分,边长经过网格无关解验证后取值为 L 的 1%,为 0.4 mm.在壁面附近,采用棱柱型网格进行边界层加密,层数为 3 层.第一层网格厚度为 0.1 mm,相邻两层网格厚度比例为1∶1.3.网格情况可见图 3.

本文采用了数值计算的方法对层板网格进行流体-固体稳态无旋转耦合传热求解.在湍流模型方面选择了标准 k-ε 模型,配以壁面函数,计算结果中 y^{+} 符合使用壁面函数的要求.模型的进口采用流量边界条件,其值以及温度值选取实验的典型工况.出口条件为静压条件,取值为实验时的大气压.层板上壁面为等热流条件,根据实验时加热器输出功率来估算取值.固体区域的导热系数为 0.25 W/(mK).计算模型四周边界均为对称性边界条件.

3 结果分析

3.1 流阻结果分析

根据前面介绍的实验方法,得到了两个不同模型的层板进出口总压差 $\mathrm{d}P^{*}$ 与进气雷诺数之间的关系,见图 5.由两次实验的对比可知,在相同的进气雷诺数下,141 模型的总压损失要大于 161 模型,幅度大约为 20%.数值模拟结果与实验相差不到 5%.

161 模型相对于 141 模型,扰流柱数量增加了 50%.通常情况,增加扰流元件,会使系统流动阻力增加,但本文的情况有所不同,本文认为,161 模型的流阻更小是因为增加的副扰流柱起到了对气流的组织作用,即改善了流动结构从而降低了

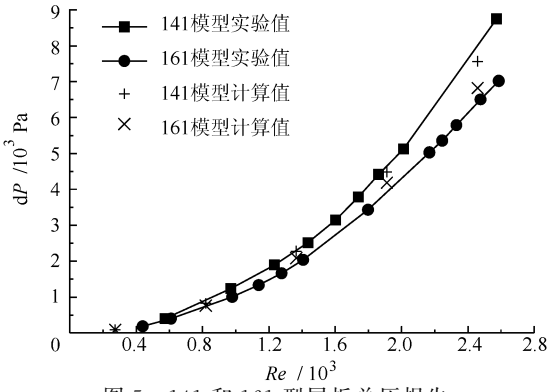
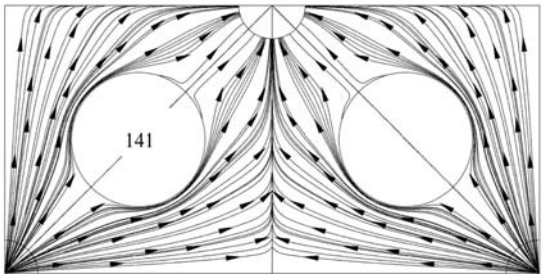


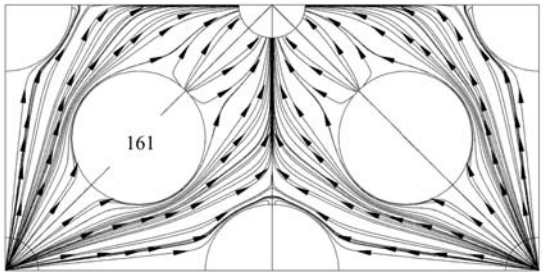
图 5　141 和 161 型层板总压损失

流阻.

利用数值计算得到的详细流场来具体分析两个模型之间的差别,截取了内腔上表面附近的平面,绘制成流线图,如图 6 所示,为了便于观察而复制多个镜像.图 6a 为 141 模型,矩形区域两个底角为进气冲击区域,正对着进气孔,从图中可知,相邻两个进气孔的气流会在扰流柱通道内形成相互冲击,会产生强烈的剪切运动,造成大量的动能耗散,且这种耗散不是源自流体与壁面之间而是流体与流体之间,因而对换热无益.在图 6b 所示的 161 模型中,副扰流柱阻止了相邻两股气流的直接冲击,并且使气流交汇时的矢量方向夹角从原来的 180°减小为大概 120°,从而减弱了流体相互间的剪切运动,减少了流阻的损失.



a　141 模型



b　161 模型

图 6　141 和 161 模型内腔流线图

根据图 5 中的实验曲线,对层板流阻进行了指数拟合,得到式(11)和式(12):

$$dP^*_{141}=0.000\,86\times Re^{2.06} \tag{11}$$

$$dP^*_{161}=0.000\,91\times Re^{2.02} \tag{12}$$

式(11)和式(12)的适用范围为 $400<Re<2\,600$.

3.2　换热结果分析

根据前面介绍的实验方法,得到了两个实验件在不同进气雷诺数下的壁温分布和冷气进出口焓差,进而根据式(10)计算得到层板体积换热努塞尔数,示于图 7.随着进气雷诺数的增大,努塞尔数也相应增大,在各个工况下,161 模型的换热均强于 141 模型,幅度大概 5% 左右.图中还绘制了数值计算的结果,同样印证了 161 模型换热好的结论,但是相对于实验值,整体计算结果偏小,幅度大约为 30%,本文认为该误差的引气因素之一是计算所采用的光滑壁面(无滑移)条件与实验件表面粗糙的实际情况有所差别.

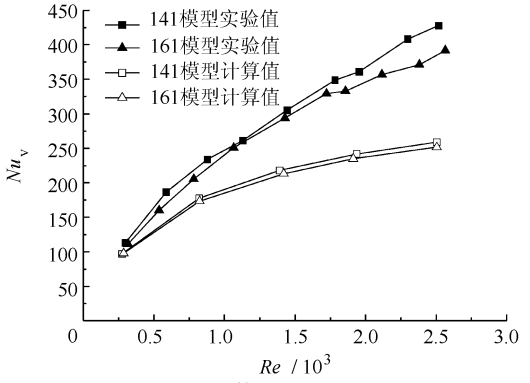


图 7　141 和 161 模型体积对流换热努塞尔数

根据图 7 中的实验结果,进行曲线指数拟合得到:

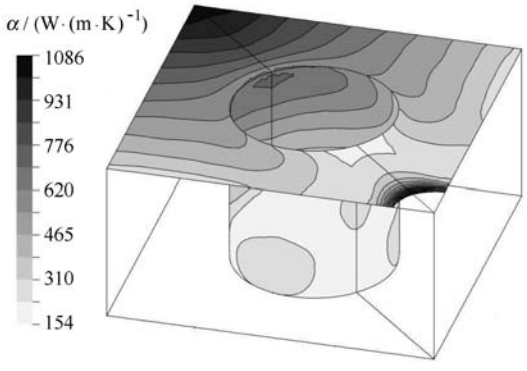
$$Nu_{V141}=4.37Re^{0.573} \tag{13}$$

$$Nu_{V161}=4.14Re^{0.593} \tag{14}$$

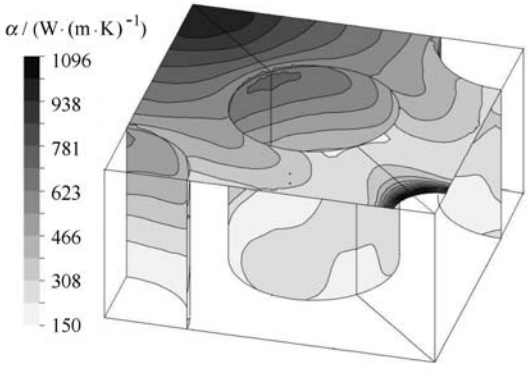
式(13)、式(14)的适用范围是 $400<Re<2\,600$.

为了更详细的说明两个实验件在换热效果的差别,取入口雷诺数为 2 503 的两个计算结果,描绘了其出气板和扰流柱上的表面对流换热系数 α,示于图 8,其中参考温度为气流当地温度,左上角为进气方向,右下角为出气方向.对于出气板表面来说,二者有着相似的 α 分布,都是在进气冲击区域数值较高,然后沿程逐渐降低,在扰流柱尾缘区域最低,在出气孔的边缘,因为流体加速流动,α 很高,且等值线分布密集,但是因为区域面积较小,对整体换热的无较大影响.对于主扰流柱,两个模型的 α 分布也相似,在前缘,气流会形成一个冲击区,α 较高,而在尾缘,因为气流分离形成低压低速区,使得 α 很低.161 模型的优势在于增加了一个位于通道中间的副扰流柱,使原来两股相互冲击的气流改为对该扰流柱进行冲击,形成了

额外的强化换热区，因而整体换热效果变好. 此外，161 相对于 141 模型内腔换热面积增加了 8.2%，也会增强换热. 另外需要说明的是，由于 161 模型增加了扰流柱，其上下板之间的导热面积增大，即增强了层板冷热壁之间的导热能力，对于提高层板整体温度的均匀性有所帮助，有助于减少结构的温度应力.



a 141 层板模型



b 161 层板模型

图 8 内腔表面 α 分布云图

直观来看，161 模型有着更大的结构重量，不利于应用在航空发动机上，但是由于其在减阻、增强换热和加强结构强度三方面的优势，值得设计人员通过对扰流柱的形状和尺寸进行详细的设计来减少重量，且继续提高其各方面性能.

4 结 论

本文在常见的 141 型层板的基础上，在相邻两进气孔中间位置设计放置扰流柱，命名该型层板为 161 型. 在使用实验和计算方法研究过 141 和 161 两种层板模型后得到以下结论.

1) 161 型和 141 型层板相比，新增的副扰流柱能够减少相邻两股进气的相互冲击，能够组织气流以更小的流阻通过层板内腔通道，总流阻损失减少 20% 左右.

2) 161 模型新增的副扰流柱，可以将冷气在该处的相互冲击变成气流对固体壁面进行冲击，使得其前缘有较高的对流换热系数，增强了整体换热效果.

3) 161 模型在内腔换热面积增加了 8.2% 的情况下，体积对流换热努塞尔数增加了 5% 左右，且层板温度均匀性会更好.

4) 通过改变 161 模型的主、副扰流柱形状和尺寸可以继续改进其流阻和换热性能.

5) 161 型层板在流阻和换热两方面均优于 141 型层板，但所增加的扰流柱会带来结构重量的增加.

参考文献（References）

[1] Nealy D A, Reider S B. Evaluation of laminated porous wall material for combustor liner cooling [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1980, 102: 268－276

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

[3] Essman D J, Vogel R E, Tomlinson J G. TF41/Lamilloy accelerated mission test[J]. Journal of Aircraft, 1983, 20 (1):70－75

[4] 郁新华，全栋梁. 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. Investigation of the internal heat transfer characteristics of lamilloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24 (5): 405－410

[5] Sweeney P C, Rhodes J F. An infrared technique for evaluating turbine airfoil cooling designs [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 122: 170－177

(责任编辑:张 嵘)