

文章编号: 1000-8055(2009)05-1016-06

扰流柱几何参数对层板流阻和 换热特性的影响

袁 星¹, 吕 东²

(1. 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重点实验室, 北京 100191;
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: 研究了扰流柱几何参数中填充比和直径比对于层板结构流阻和换热特性的影响, 在进口流量和两侧换热条件相同情况下, 对孔径、通道高度和开孔率相同, 扰流柱均为圆柱形, 出气孔均倾斜 60° 角, 但扰流柱填充比和扰流柱直径比不一样的 15 种模型进行了流固耦合计算, 得到了模型的流阻和换热特性。结果表明对于流阻而言, 填充比的增加有利于层板模型流阻的减小和换热效率的提高; 同时, 在等填充比条件下, 主扰流柱直径的增加有利于层板流阻的减小; 当主、副扰流柱直径相同时, 换热效果达到最佳。

关 键 词: 层板; 填充比; 直径比; 流阻系数; 换热效率; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Effects of pin-fin's geometry parameters on flow resistance and heat transfer characteristics of lamilloy

YUAN Xing¹, L Ü Dong²

(1. National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aero-Engine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: This paper dealt with a numerical simulation of the flow resistance and heat transfer characteristics on fifteen different laminated porous wall models. The effects of pin-fin's fill ratio and diameter ratio were investigated. This investigation considered fifteen geometry models: pin-fin's fill ratio and diameter ratio were varied from 0.15 to 0.35 or from 0.3 to 0.7 respectively, while pin-fin's fill ratio was kept at 0.25. Length and height of the whole model were 4mm and 2mm respectively; height of pin-fin was 1mm, diameter of holes in entrance surface and coolant supply plane was 0.5mm, and the injection angle of outlet with the coolant supply plane was 60°. Results are presented as the coefficient of flow resistance and the heat transfer efficiency. The results show that: (1) the increase of pin-fin's fill ratio is propitious to decrease the flow resistance and improve the heat transfer efficiency, (2) the increase of main pin-fin's diameter is propitious to decrease the flow resistance, and the heat transfer efficiency is best when main pin-fin's diameter is same with assistant pin-fin's diameter.

收稿日期: 2008-12-02; **修订日期:** 2009-05-07

作者简介: 袁星(1981-), 男, 湖南郴州人, 硕士, 主要研究方向为传热传质。

Key words: lamilloy; fill ratio; diameter ratio; flow resistance coefficient; heat transfer efficiency; numerical simulation

层板研究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,国外有关研究均显示,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的研究成果成功应用于新一代的航空发动机上^[2-4],比较有代表性的两种结构,一种是通过增加固体材料形成的扰流柱式,如美国 Allison 公司设计的 Lamilloy 式层板,被主要应用于航空发动机涡轮叶片冷却领域;另一种是通过减少板间固体材料形成的通道式,如英国 Rolls-Royce 公司设计的 Transply 式层板,被主要应用于航空发动机燃烧室冷却,两种形式的示意图见图 1. 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”三种,其中层板开孔密度、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. 中国北京航空航天大学的陶智等人对层板内的辐射换热进行了数值研究^[5],吕东等人提出了新的层板模型以提高换热效果^[6],吕品等人对扰流柱在层板内的布局进行了研究^[7]. 本文以扰流柱的填充比和直径比为研究重点,比较了扰流柱不同的填充比和直径比对于层板流阻和换热特性的影响.

1 建 模

1.1 几何建模

为了突出扰流柱填充比和直径比对层板流阻和换热的影响,在建模中采用了等迎风面积的设计方法. 在保证其他几何元素均相同的条件下,只改变扰流柱填充比或者直径比一个几何参数,来突出这两个参数对于层板性能的影响. 其中迎风面积 A 代表了层板单元体在切向方向所占的面积, $A = L^2$, L 为进气口间距,不同模型中的进气孔间距相等, $L = 4 \text{ mm}$.

扰流柱的填充比 θ 定义为扰流柱体积所占内腔总体积的比例,即:

$$\theta = \frac{N_1 \times \frac{\pi d_1^2}{4} \times H + N_2 \times \frac{\pi d_2^2}{4} \times H}{L^2 \times H} = \frac{(N_1 d_1^2 + N_2 d_2^2) \pi}{4L^2}$$

式中 H 为扰流柱高度; d_1 为主扰流柱直径, d_2 为副扰流柱直径; N_1 为单元内主扰流柱个数, N_2 为单元内副扰流柱个数. 如图 2 所示,主扰流柱是指被进、出气孔中心连线穿过的扰流柱. 副绕流柱是指没有被进、出气孔中心连线穿过的扰流柱. 扰流柱的填充比代表了层板内腔中金属导体所占体积的程度,在层板进气板和出气板的厚度 h_1 和 h_2 不变,以及进气孔和出气孔直径不变的情况下,扰流柱填充比的变化反映了层板质量的变化.

扰流柱的直径比 β 定义为

$$\beta = \frac{\text{主扰流柱直径}(d_1)}{\text{副扰流柱直径}(d_2) + \text{主扰流柱直径}(d_1)}$$

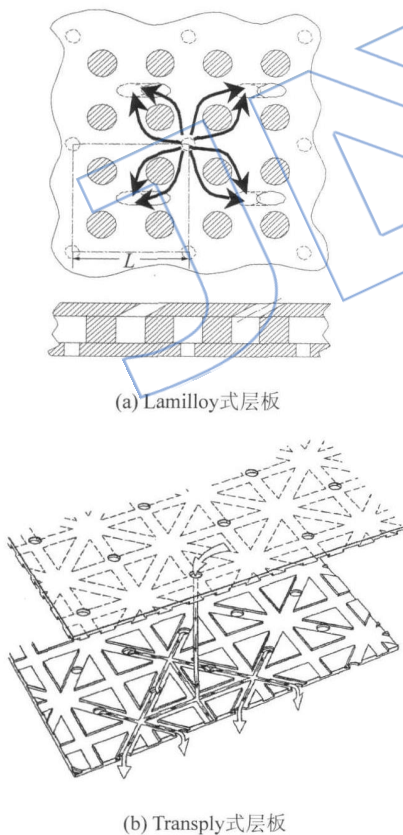


图 1 两种层板模型
Fig. 1 Models of Lamilloy and Transply

由扰流柱位置示意图图 2 可知,白色圆代表进气孔,黑色圆代表出气孔,斜线圆代表主扰流柱,网格圆代表副扰流柱,点划线代表进、出气孔中心连线,实线部分为计算模型区域.真实层板的出气孔都是倾斜的,本文计算模型的出气孔均倾斜 60° 角.由于层板结构具有对称性,选择了图 2 中实线所示的长方形区域,即层板单元体的 $1/2$ 作为计算对象.共计算了 15 种模型,分别为 $\theta = 15\%$, $\theta = 25\%$, $\theta = 35\%$, $\beta = 0.3$, $\beta = 0.4$, $\beta = 0.5$, $\beta = 0.6$, $\beta = 0.7$ 的不同组合方式.全部模型中相同的几何参数有 $L = 4\text{ mm}$, $H = 1\text{ mm}$, $h_1 = h_2 = 0.5\text{ mm}$.

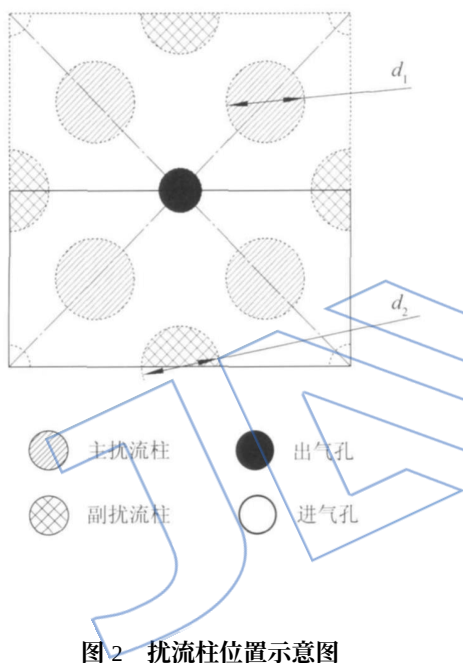


图 2 扰流柱位置示意图

Fig. 2 Schematic representation the model of simulation

1.2 网格划分

采用了非结构化网格作为网格划分方式,对于流体和固体交接的壁面附近的流体网格,采用了边界层加密,在出气孔拐角处,采用了点加密.网格的边长为 0.04 mm ,为 L 的 1% ,点加密处网格边长为 0.02 mm ,影响半径为 0.12 mm ,该网格边长经过了数值计算网格无关解的验证,即继续增加网格密度不会带来计算结果的变化.图 3 为计算模型网格示意图,其中,网格节点有 474 389 个,网格单元数为 2 458 428 个,其中包括边界层的棱柱体网格单元 79 573 个.

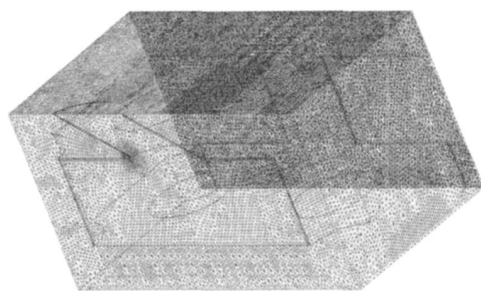


图 3 计算模型网格示意图

Fig. 3 Schematic representation of the nets for the model

2 计算条件的设定

本文采用了商用软件,对层板网格进行流体-固体稳态无旋转耦合求解.在湍流模型方面选择了标准 $k-\varepsilon$ 模型,配以壁面函数率,计算结果中 y^+ 符合使用壁面函数率的要求.模型的进口采用流量边界条件,选择了流量 m 分别等于 1×10^{-6} , 4×10^{-6} , 6×10^{-6} , $8 \times 10^{-6}\text{ kg/s}$ ($1/4$ 进气孔)的工况.出气孔背压相同 $p_{\text{out}} = 101325\text{ Pa}$.模型四周均为对称性边界条件.层板下表面绝热,上表面为第二类边界条件,热流 $q = 50000\text{ W/m}^2$.

3 结果分析

3.1 流阻性能分析

根据前文所叙述的方法,对 15 种模型分别进行了计算.得到了流阻系数 α 的曲线.流阻系数越大,说明层板的流阻越大,流动损失越严重.在本文中

$$\alpha = \frac{2(p_{\text{total-inlet}} - p_{\text{total-outlet}})}{\rho v^2}$$

流阻系数随直径比的变化趋势见图 4.由图 4 可以明显地看出:在相同的填充比条件下,层板模型的流阻系数随着主扰流柱直径的增加而变小.这主要是因为,在等填充比条件下,主扰流柱直径越大,扰流柱边缘距离出气孔的距离越小.随着这个距离的变小,出口流线变得圆滑.这个规律由图 5 和图 6 可以看出.而总压损失又与流动的变化快慢有直接关系,流动变化越剧烈,总压损失越大.图 5 可以看出:随着直径比的增加,扰流柱边缘与出气孔之间的距离变小.由图 6(a)、(b)可以看出:

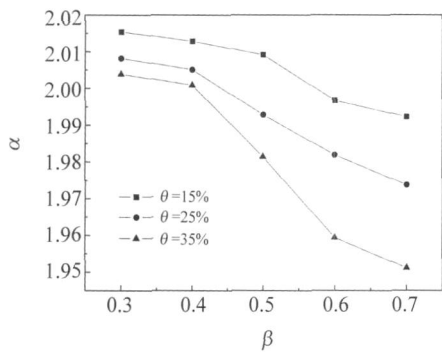


图 4 流阻系数随直径比的变化趋势

Fig. 4 Relationship between the ratio of diameter and the flow resistance coefficient

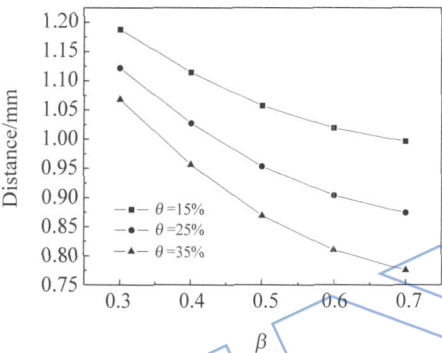


图 5 扰流柱边缘距出气孔距离随直径比的变化趋势

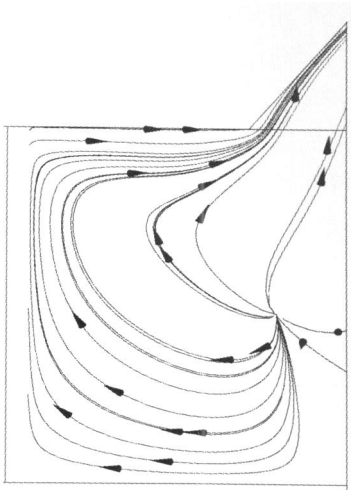
Fig. 5 Relationship between the ratio of diameter and the distance of outlet and pin-fin

主扰流柱直径越大,扰流柱后流动变化越平缓.相应的总压损失也就越小.由图 4 还可以看出:在等直径比的条件下,随着填充比的增加,流阻系数变小.这主要是因为层板腔内流动经历了一个“扩张-收缩-扩张-收缩”的过程.具体是指由进气孔进入层板内腔的扩张,进入扰流柱缝隙的收缩,离开扰流柱缝隙的扩张,进入出气孔的收缩.扩张-收缩的趋势越剧烈,总压损失越大,流阻相应的也越大.随着填充比的增加,扩张收缩的趋势减弱,因此,流阻变小.

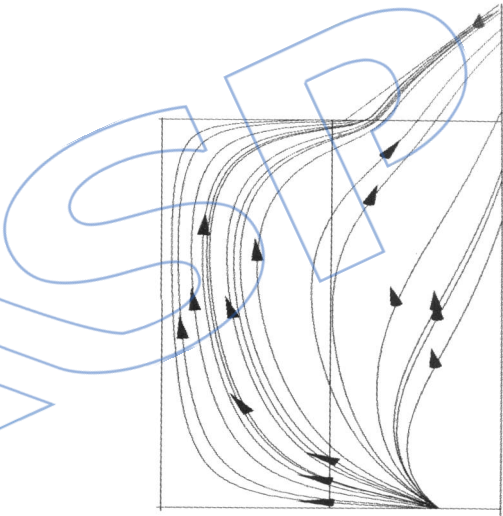
综上所述,随着扰流柱直径比的增加,流阻变小,随着填充比的增加,流阻变小.当然,这个结论只适用于本文讨论的几种模型,当填充比大到一定程度,流动在腔内会出现阻塞现象,流阻会急剧增加,这个结论也就不适用了.

3.2 换热性能分析

层板的换热性能可通过换热效率 η 来衡量,



(a) 直径比为0.3



(b) 直径比为0.7

图 6 扰流柱后流线示意图

Fig. 6 Schematic representation of stream line rearward of the pin-fin

η 定义如下:

$$\eta = \frac{\overline{T}_{\text{outlet}} - \overline{T}_{\text{inlet}}}{\overline{T}_{\text{gasface}} - \overline{T}_{\text{inlet}}} \quad (2)$$

其中 $\overline{T}_{\text{outlet}}$ 是出气孔流体平均温度, $\overline{T}_{\text{inlet}}$ 是进气流体平均温度, $\overline{T}_{\text{gasface}}$ 是燃气面的平均温度. 图 7 显示了换热效率随直径比和填充比的变化趋势. 由图 7 可以看出,在填充比相同时,随着直径比的增加,换热效率先增加后减小,在直径比接近 0.5,即主副绕流柱大小接近一样时,换热效率达到最大值.在直径比相同时,随着填充比的增加,换热效率变大.这主要是因为,随着填充比的增加,扰流柱的换热面积明显加大,对流换热量与换热面积成正比,不同填充比之间流体与壁面的平均温

差相差不到 10%, 但面积差别达到了 29.2%, 因此面积的增加决定了换热量的增加, 换热效果增强. 图 8 显示了换热面积随直径比和填充比的变化趋势. 同理, 由图 8 可以看出, 在等填充比条件下, 随着直径比的增加, 由于换热面积呈现先增大后减小的趋势, 换热效果也是先增大后减小. 另外由图 9 可以看出, 在等填充比条件下, 当主扰流柱直径过小时, 扰流柱扰流作用不充分, 大部分流体没有经过扰流, 直接流到出气孔, 换热效果相应较差; 主扰流柱过大时, 流动在进气孔中间附近相互碰撞, 流速很低, 换热效果很差, 另外由于主扰流柱过大, 在扰流柱后出现换热死区, 换热效果很差. 因此, 扰流柱过大和过小对换热都不利, 这也验证了图 7 的趋势. 另外, 上下板之间的导热面积 (扰流柱与上下板接触面积) 也相应增大, 导热热量与横截面积成正比, 因此, 随着填充比的增加, 扰流柱的换热面积和横截面积相应增加, 换热效果变好.

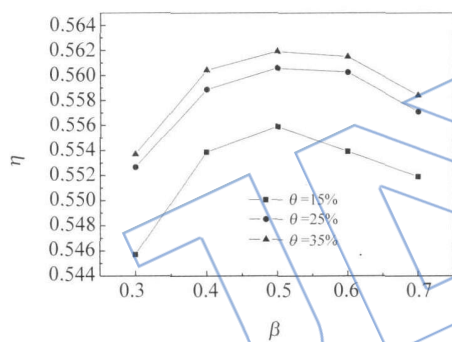


图 7 换热效率随直径比的变化趋势

Fig. 7 Relationship between the ratio of diameter and the coefficient of heat transfer

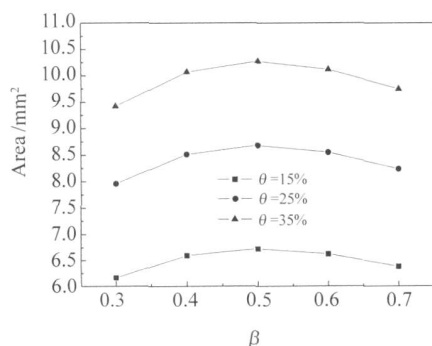


图 8 换热面积随直径比的变化趋势

Fig. 8 Relationship between the ratio of diameter and the area of heat transfer

综上所述, 在填充比不变的条件下, 换热效果

随着直径比的增加先增强后减弱, 在直径比达到 0.5 时, 换热效果最好. 换热效果随着填充比的增加变好. 同样, 这个结论只适用于填充比不太大时, 当填充比达到一定程度, 层板近似实体, 这个结论也将不再适用.

Wall heat Transfer coefficient / $10^2(\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$
(Contour 1)

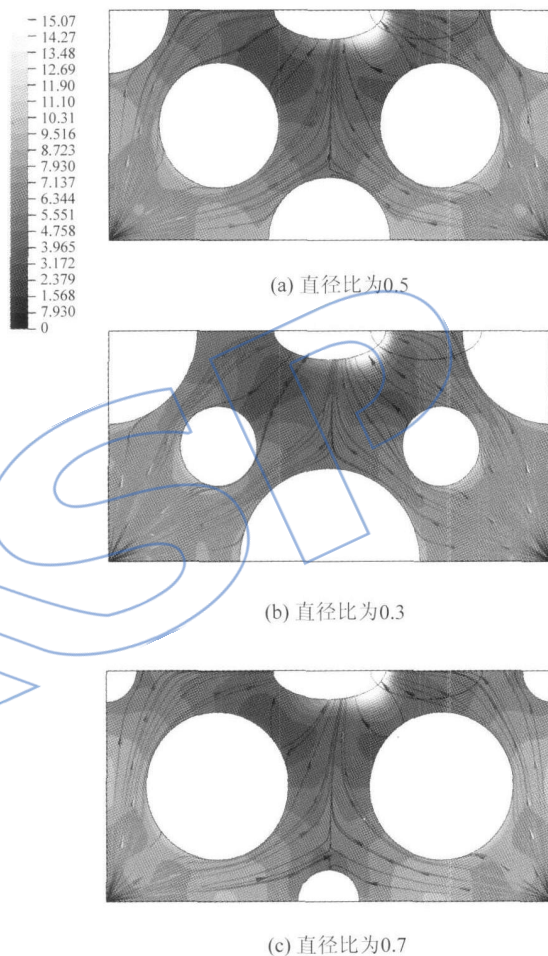


图 9 出气板换热系数分布和流线示意图

Fig. 9 Schematic representation of stream line and the coefficient of heat transfer

4 结 论

本文通过数值模拟的方法, 计算了层板扰流柱的填充比和直径比对于层板流阻和换热特性的影响, 得到了如下规律 (需要说明的是, 这些规律只适用于本文所讨论的取值范围, 超出这个范围, 下面的规律将不再适用):

1) 扰流柱填充比和直径比能够改善层板的流动特性, 随着填充比和直径比的增加, 层板的流阻变小.

- 2) 扰流柱填充比能够改善层板的流动特性,随着填充比的增加,层板的换热效果增强.
- 3) 随着直径比的增加,层板的换热效果先变好后变坏,在直径比接近 0.5 时,换热效果达到最好.

参考文献:

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

[2] Wear J D , Trout A M , Smith J M , et al. Design and preliminary results of a semi-transpiration cooled (Lamilloy) liner for a high-pressure , high-temperature combustor [R]. AIAA-78-997 , 1978.

[3] Rolls-Royce Aerospace Group. 喷气发动机[M]. 4 版. 北京:罗尔斯-罗伊斯公司技术出版物部,1986.

[4] Mongia H C , Reider S B. Allison combustion research and

development activities[R]. AIAA-85-1402 , 1985.

[5] 陶智,吕东,丁水汀,等.层板内冷通道辐射换热影响[J].北京航空航天大学学报,2007,33(11):1273-1276.

TAO Zhi , L Ü Dong , DING Shuiting , et al. Thermal radiation effects in the Lamilloy interior cooling passage [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics , 2007 , 33 (11) :1273-1276. (in Chinese)

[6] 吕东,陶智,邓宏武,等.两种层板性能对比[J].北京航空航天大学学报,2008,34(5):546-550.

L Ü Dong , DAO Zhi , DENG Hongwu , et al. Performance evaluation and comparison of 2 porous laminated plates [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics , 2008 , 34 (5) :546-550. (in Chinese)

[7] 吕品,李海旺,陶智,等.扰流柱分布对层板流阻和换热特性的影响[J].航空发动机,2007,33(3):28-32.

L Ü Pin , LI Haiwang , DAO Zhi , et al. Effect of pin-fin distribution on flow resistance and heat exchange characteristics in Lamilloy [J]. Aeroengine , 2007 , 33 (3) :28-32. (in Chinese)