

# 层板冷却特性的实验与数值模拟研究<sup>\*</sup>

全栋梁, 刘松龄, 李江海, 许都纯, 游绍坤

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 在大尺寸低速回流式风洞内对一种应用于涡轮叶片的典型的层板结构进行了流阻特性和冷却特性的实验研究, 获取了该层板综合冷却效果与层板两侧压比的关系, 结果表明层板具有很高的冷却效果。运用商用软件 Fluent6.0 对其进行了流固耦合传热计算, 分析了层板内部复杂的流动和换热情况, 得到了在不同的进出口条件下该层板的综合冷却效果。计算结果和实验值进行了比较, 两者符合较好, 表明通过数值计算获取层板冷却效果的方法是可行的。

**关键词:** 涡轮叶片; 多孔板; 冷却; 耦合; 数值仿真

中图分类号: V434.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0134-05

## Experimental and numerical investigation of the cooling characteristics in a laminate porous plate

QUAN Dong-liang, LIU Song-ling, LI Jiang-hai, XU Du-chun, YOU Shao-kun

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

**Abstract:** A typical configuration of laminate plate for turbine blade application was manufactured and tested in a large scale low speed close-looped wind tunnel. The internal flow resistance and the cooling effectiveness were obtained. The experimental results showed that very high effectiveness can be achieved by using lamilloy. Coupled fluid/solid heat transfer calculations were performed to obtain the cooling effectiveness and the complex flow and heat transfer patterns in the laminate plate by using the commercial codes, FLUENT6.0. The numerical results showed the agreement with the experimental data were fairly good and the coupled fluid/solid method is a feasible way to obtain the cooling effectiveness of lamilloy.

**Key words:** Turbine blade; Porous plate; Cooling; Coupling; Numerical simulation

## 1 引 言

航空发动机推重比的不断提高对涡轮叶片的冷却提出了更高的要求。由于多孔层板冷却方式集冲击冷却、对流冷却、气膜冷却为一体, 具有比单纯的气膜冷却需要的冷气量少、冷却效率高的优点, 越来越受到重视<sup>[1,2]</sup>。目前, 美、俄等国的层板技术已进入实际应用阶段, 铸造的层板涡轮叶片已经通过了耐久性试验, 据报道在未增加冷却空气用量的情况下极大地提高了涡轮前温度<sup>[3]</sup>。日本也在积极进行层板冷却方面的研究, Funazaki K<sup>[4]</sup>等人研究了层板内部通道

的强化换热, 并且对不同通道高度和扰流柱排布方式的层板结构进行了数值模拟和传热优化分析<sup>[5]</sup>。国内关于层板的研究尚处于起步阶段, 郁新华等<sup>[6]</sup>进行了层板放大模型内流阻特性研究, 发展了层板内流阻计算方法。全栋梁<sup>[7]</sup>对层板内部复杂流场进行了数值模拟, 尝试通过数值计算获得层板结构的流阻特性。本文对一种典型的层板结构进行了流阻特性和冷却特性的实验研究, 研究了冷却效果和层板两侧压比的关系。另外, 应用商用软件 FLUENT6.0 对该层板结构进行了流固耦合传热计算, 获取了接近实验条件下层板内部通道流体域和固体域的温度信息以及

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2003-06-30; 修订日期: 2003-10-08。

基金项目: 国家“九七三”项目 (JC2000050500501); 西北工业大学博士论文创新基金 (CX200315)。

作者简介: 全栋梁 (1976—), 男, 博士生, 研究领域为高性能航空发动机高温部件的传热和冷却技术。

E-mail: quandl@sina.com

综合冷却效果和压比的关系。

## 2 实验装置

在涡轮叶片真实工作环境中,外侧主流是高温燃气,考虑到实际条件的限制,实验中主流为冷流,而对进入层板的冷却气流进行加热。图1给出了实验装置示意图,冷气由压气机提供,经过加热过滤后流过层板试验件,主流系统由大尺寸低速回流式风洞构成,包括收缩段,实验段,扩张段,风机和冷却器。实验过程中保持主流速度为40m/s左右,温度为室温。冷气加热至高于主流30℃左右,通过调节冷气管路的流量改变层板两侧的压比或吹风比。

层板试验件是经过光绘制版、电化学腐蚀和真空扩散焊接而成,外观为两面多孔的方形平板,其外观尺寸为120mm×120mm,有效迎风面积为96mm×96mm,内部通道高度0.3mm,扰流柱直径0.6mm,进出气孔径0.5mm,图2给出了其结构示意图。在层板燃气侧表面焊有6支热电偶,并且呈三角形分布,以最大可能减少对主流的干扰。实验数据经数据转换板转换为数字信号后由计算机自动采集处理。

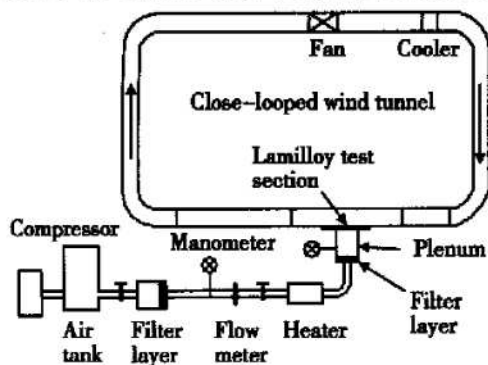


Fig. 1 Lamilloy cooling effectiveness test rig

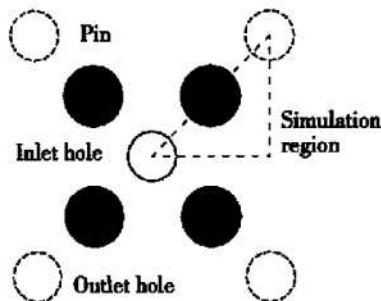


Fig. 2 Schematic of the laminated porous plates

## 3 数据处理方式

文献[6]按多孔介质沿程阻力关系式整理了层板放大模型流阻实验数据,指出对于确定的一种层板结构,  $(p_1^2 - p_2^2) \cdot d / (16R \bar{T} \eta \mu)$  与  $\frac{m\dot{L}}{\mu}$  之间为线性关系,

即:  $\frac{(p_1^2 - p_2^2) \cdot d}{16R \bar{T} \eta \mu} = a + b \frac{m\dot{L}}{\mu}$ ,  $a, b$  为常数,  $p_1$  为进气

边的静压,  $p_2$  为出气边的静压,  $L$  为层板总厚度,  $R$  为气体常数,  $\mu$  为气体动力粘性系数,  $\bar{T}$  为流经层板的气体平均温度。本文亦按此种方法处理实验中的流阻数据。

综合冷却效果定义为:  $\eta = (T_g - T_w) / (T_g - T_c)$ , 式中  $T_g$  为燃气(主流)温度,  $T_w$  为层板燃气侧平均壁温,  $T_c$  为冷气温度的。压比的定义为:  $p_r = p_1 / p_2$ 。实验过程中通过改变层板两侧的压比来获得冷效与压比的关系。

## 4 流固耦合数值计算

已有的数值模拟研究<sup>[7]</sup>表明,层板内部结构复杂,气流冲击和反卷强烈,在进行传热计算时,如果仅求解流体区域,则换热的边界条件不容易按照实验条件给出,计算的结果也不容易与实验结果进行比较,为此本文尝试采用流固耦合传热计算方法来进行层板冷效的数值模拟。

### 4.1 基本方程和湍流模型

采用三维雷诺平均守恒型 Navier-Stokes 方程。对流固耦合传热计算, FLUENT 采用的是整场离散、整场求解的耦合方法,即对流体域和固体域采用统一的控制方程,不同区域的区别仅在广义扩散系数及广义源项的不同,耦合界面成了计算域的内部。文献[8]较详细地介绍了流固耦合传热问题的求解。湍流模型采用 RNG  $k-\epsilon$  模型,壁面采用强化壁面处理<sup>[9]</sup>。

### 4.2 计算域和计算网格

计算域包括层板内部通道和进出气孔的流体部分和层板进出气板以及扰流柱等固体部分。层板结构几何上具有对称性,因此仅使用层板单元结构的一半作为计算域,考虑到真实层板结构较小,在进出气孔附近气流的突缩和突扩有较大的损失,在进气孔和出气孔外分别加了进口段和出口段,以便更接近实际情况。

采用商用软件 Fluent6.0 的前置网格处理器 Gambit2.0 生成计算网格。在进口段和出口段,网格采用四面体网格,并用 Gambit 所带的 Sizefunction 功能控制网格数,在层板结构及其内部通道部分,采用四棱柱网格,先在进出气孔及进气板生成四边形网格,然后垂直平铺到整个计算域。在壁面附近采用边界层型网格,并使壁面上第一层网格中心的  $y^+$  满足强化壁面处理的要求。网格总数约为  $2 \times 10^5$ 。图3给出了计算域及网格,图4给出了出气板、出气孔壁面及

扰流柱面网格。

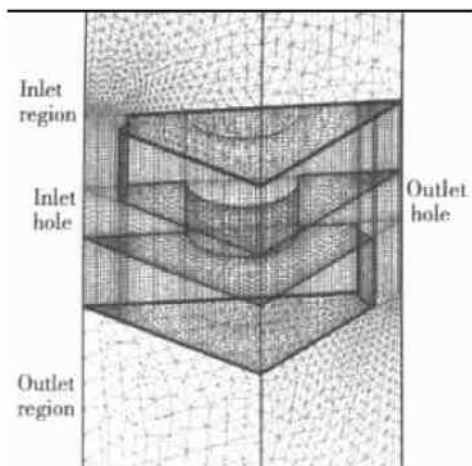


Fig. 3 Numerical simulation region

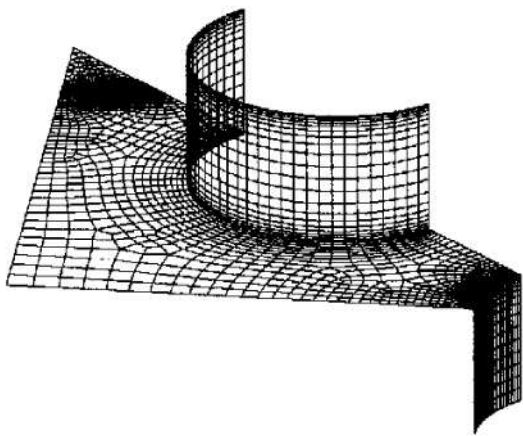


Fig. 4 Part of the numerical simulation grid

#### 4.3 边界条件及计算工况

在进气段入口给定进口压力和总温,  $k$  和  $\varepsilon$  的进口边界值根据湍流尺度  $l$  ( $l = 0.07D$ ,  $D$  为进气孔水力直径) 和估计的初始湍流强度  $I$  ( $= u'/u = 5\%$ ) 确定。出气段出口给定压力出口。进气板外表面按第三类边界条件给出冷气来流温度和换热系数, 出气板同样给定燃气来流温度和换热系数。冷气和燃气的来流温度基本按实验工况给出, 两侧换热系数按湍流外掠平板表面换热系数计算公式计算。计算域侧向均为对称边界条件, 但流体域和固体域分别指定。计算域内部固体域和流体域的交界面不需指定边界条件。

本文对 scb1522 型层板在出口压力为  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 不同的进出口压比下做了流固耦合计算, 得到了每块层板的流阻特性和在不同压比下的冷效值, 并和实验值进行了初步比较。

#### 4.4 数值计算方法

采用 FLUENT 软件的分离隐式稳态求解器求解三维 Navier-Stokes 雷诺时均湍流方程, 速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法处理, 各参数的离散均采用二

阶精度的迎风格式。

### 5 结果分析

#### 5.1 流阻和冷却特性分析

图 5 给出了按照沿程阻力关系式整理的流阻特性的计算值和实验值。从图中可以看出计算得到的流阻特性在总体趋势上和实验值一致, 随着层板进出口压比的增大, 通过层板的气流流量增加。计算曲线和实验曲线都近似呈直线分布, 有一个确定的斜率值。在实际应用中, 知道这条直线的斜率, 根据具体工况, 就可求出该条件下的通过层板的气体流量, 进而可以进行该层板综合冷却效果的计算。从图中还可以看出, 计算曲线在实验曲线的下侧, 表明计算得到的流阻特性要小于实验值, 在相同的压差下, 计算得到的通过层板的流量要大于实验得到的流量。在计算的九个工况中, 流量计算值和实验值的最大偏差在 18% 左右。

图 6 给出了计算和实验得到的综合冷却效果和层板两侧压比的关系图。从总体上看, 冷效计算值的变化趋势和实验值一致, 随着压比的增加, 综合冷却效果也增大, 并且, 在较小压比下, 冷效随压比的增加而迅速增加。在较大压比下, 冷效随压比的变化趋于平稳, 随着压比的增大, 实验值略有下降, 而计算值继续小幅增大, 造成这种差别的原因可能是由于当压比增大时, 冷气的吹风比也增大, 由于本实验中层板试验件的出气孔都垂直于主流, 吹风比大到一定程度时, 气膜对层板表面的覆盖很差, 气膜冷却效率很低, 因而造成了当压比较大的时候, 层板的冷效反而有下降的趋势。计算中没有考虑这种效应, 因而呈现冷效随压比提高而增大的趋势。此外, 计算得到的冷效值要高于实验值。可以看出, 这种层板结构具有很高的冷却效果, 实测的最大值在 0.9 左右。

计算值和实验值存在差别, 其原因主要有以下几方面。首先, 由于工艺原因, 使得层板试验件的结构和尺寸很难严格和设计值一致, 而数值模拟建模是以设计值为准, 两者的差别在很大程度上影响了流阻特性的准确计算, 进而影响换热计算的准确性。第二, 由于层板内部流场异常复杂, 存在强烈的气流冲击和反卷, 对于射流冲击问题, 现有的湍流模型很难准确模拟其流动和换热<sup>[10]</sup>。第三, 给定的燃气侧和冷气侧换热系数是根据实验条件按外掠平板换热公式推算的, 未考虑冷气燃气掺混影响, 可能和实际情况有一定的差别。

## 5.2 层板内部压力和换热系数分布

以层板进出口压比为 1.1 的计算工况为例分析层板内部复杂的流动和换热图形。图 7 给出了该计算工况下气流的粒子示踪图。在进出口压差的驱使下,气流从进气孔进入,冲击到出气板上,滞止,转向,加速,由于遇到扰流柱的阻挡,大部分气流沿着扰流柱侧面流向出气孔,并且气流有沿柱面爬升加速趋势,另一部分气流冲击到扰流柱面后反卷形成驻涡结构。图 8 给出了进出气板和扰流柱面的静压分布图,可以看出在射流冲击区和扰流柱前缘,由于气流的滞

止和反卷,压力变化比较剧烈。图 9 给出了进出气板和扰流柱面的换热系数分布云图,和静压分布相类似,在出气板射流冲击区,扰流柱面前缘,换热系数很高,在进气板靠近扰流柱面处,由于气流的反卷冲击,换热系数也比较高。此外,还可以看出气流在扰流柱侧面的加速和爬升对柱面换热系数分布的影响。图 10 给出了进出气板和扰流柱的温度分布云图,可以看出扰流柱的导热作用对进出气板温度分布有一定影响。流固耦合传热计算可以获取固体域的温度信息,进而可以估算其热应力,这是耦合传热计算的一大优势。

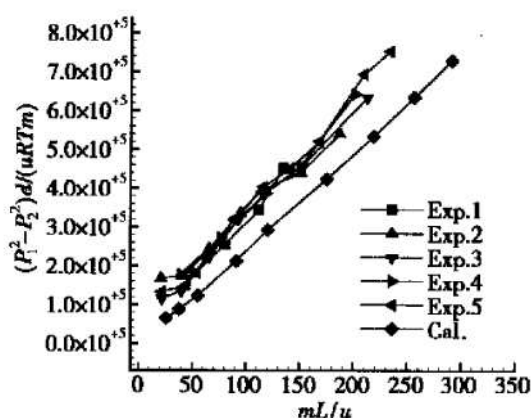


Fig. 5 Experimental and numerical results of flow resistance

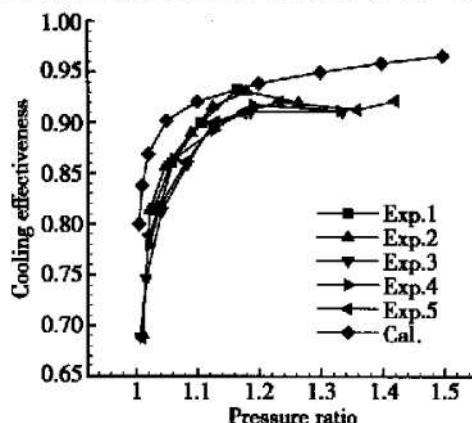


Fig. 6 Experimental and numerical results of cooling effectiveness

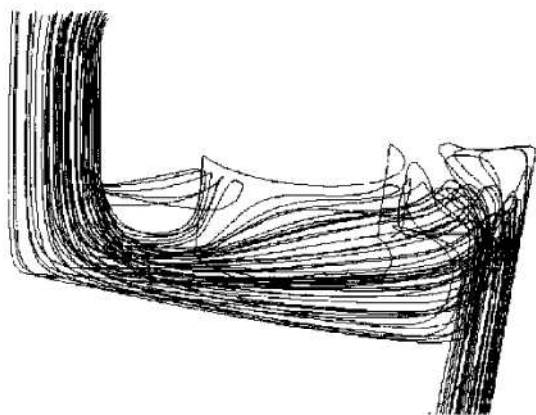


Fig. 7 Path line in laminate plates

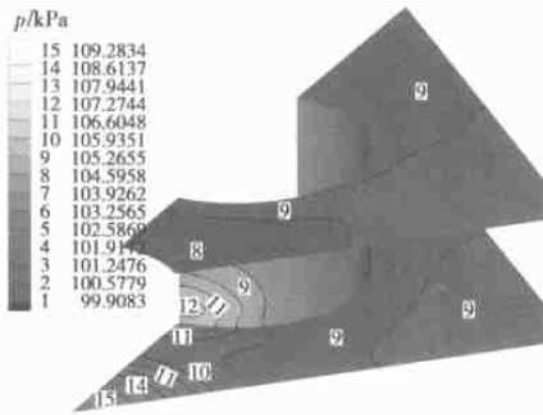


Fig. 8 Pressure distribution on cylinder wall and plates

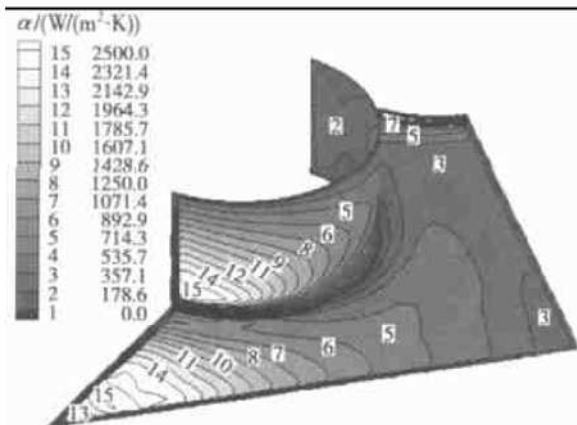


Fig. 9 Heat transfer coefficient distribution on cylinder wall and outplate wall

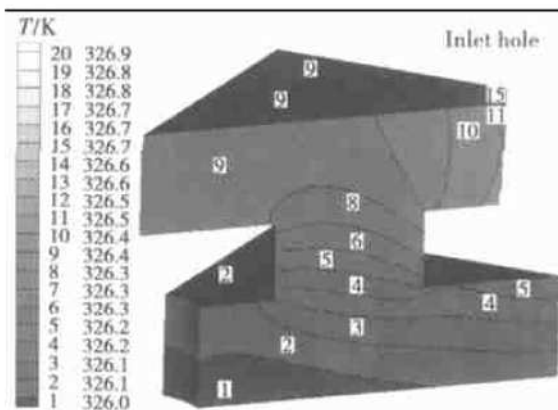


Fig. 10 Temperature distribution of cylinder and plates

定义当地换热系数  $\alpha = q_i / (t_{wi} - t_a)$ , 其中  $q_i$  为当地热流密度,  $t_{wi}$  为当地壁温,  $t_a$  为冷气进口静温和出口静温的平均值,  $i$  为网格标号。将当地换热系数  $\alpha$  按网格面积加权平均可以得到层板内部各表面的平均换热系数  $\alpha$  以及整个层板内表面平均换热系数。定义努谢尔数  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ , 定义雷诺数  $Re = (\rho V) \cdot d / \mu$ , 其中  $d$  为进气孔直径,  $\lambda$  为冷气导热系数,  $\rho V$  为单位迎风面积上的冷气密流,  $\mu$  为冷气动力粘性系数。图 11 给出了进气孔, 出气孔, 进气板, 出气板和扰流柱面的  $Nu$  数以及上述各面按面积加权的平均  $Nu$  数与  $Re$  数的关系图。由图 11 看出, 上述五个表面中, 进出气孔中的  $Nu$  数最高, 进气孔的  $Nu$  数高于出气孔, 原因是孔内边界层很薄, 换热强烈。出气板面由于受到射流的冲击,  $Nu$  数高于进气板和柱面。进气板面  $Nu$  数最低, 换热最弱。整个层板的平均  $Nu$  数和柱面比较接近。

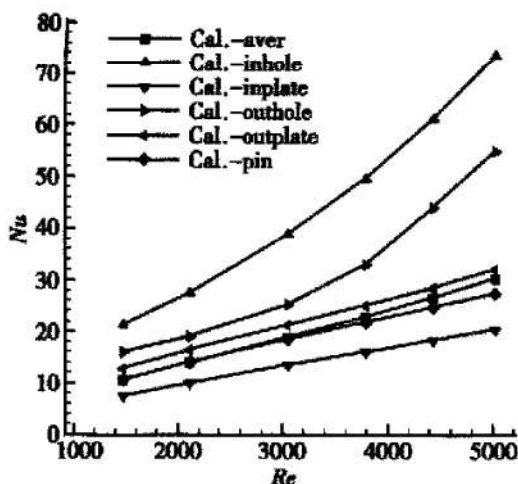


Fig. 11 Averaged Nusselt number for different surfaces in laminate plates

## 6 结 论

(1) 对一种层板结构进行了流阻特性和冷却特性的实验研究, 结果表明层板结构具有很高的冷却效果。在较小的压比下, 冷效随压比的增大迅速增大, 当压比大到一定程度, 冷效基本保持不变。

(2) 采用流固耦合传热计算可以获取层板结构的综合冷却效果, 计算结果和实验值在总体趋势上一致, 计算值略大于实验值。

(3) 层板内部流动和换热非常复杂, 扰流柱前气流的冲击和反卷是换热强化主要原因。内部表面的换热随雷诺数的增大而增大, 其中进气孔换热最强, 出气孔次之, 出气板和扰流柱面接近, 进气板最弱。

## 参考文献:

- [1] Nealy D A, Reldler 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] Rolls-Royce Aerospace Group. 喷气发动机第四版[M]. 北京: 罗尔斯-罗伊斯公司技术出版物部, 1986.
- [3] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲, 等. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. *航空工程与维修*, 1998, (2).
- [4] Funazaki K, Tarukawa Y, Kudo T. Heat transfer characteristics of an integrated cooling configuration of ultra-high temperature turbine blades: experimental and numerical investigations [R]. 2001-GT-0148.
- [5] Funazaki K, Hachlya K. Systematic numerical studies on heat transfer and aerodynamic characteristics of impingement cooling devices combined with pins[R]. 2003-GT-38256.
- [6] 郁新华. 层板冷却特性的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [7] 全栋梁. 层板冷却特性的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [8] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [9] Anon. FLUENT User's Guide[M]. *Fluent Inc., Lebanon, NH*, 1999.
- [10] 陈庆光, 徐 忠, 张永建. 湍流冲击射流流动与传热的数值研究进展[J]. *力学进展*, 2002, 32(1).

(编辑: 梅 瑛)