

气膜出流对叶片内表面换热系数影响的实验研究和计算

北京航空航天大学 吴 宏* 邓宏武 陶 智

【摘要】 本文用实验和数值计算的方法研究了气膜出流对通道内壁换热系数分布的影响,研究的重点是在三维湍流状况下气膜孔间距比的变化和进气雷诺数等因素的影响规律。研究结果表明:在所研究的范围内,湍流对流换热系数比层流换热系数有数量级上的增加,换热系数随着雷诺数的增大而增大,孔间距比的变化对换热系数的影响不是单调的,内壁的换热特性在孔的间距比变化时并没有明显的变化。

主题词: 湍流 叶片 换热系数 实验

分类号: V 231.1

在论文^[1]中,用数值计算的方法研究了二维层流状态下的气膜出流对内换热的影响,得出的结论为:气膜孔边的换热系数随气膜孔间距比的增大而增大,并使气膜的出流量增加,导致出口附近的换热系数迅速下降;随着雷诺数的增加,气膜出流边的换热系数也增加。本文将用实验与计算进一步研究三维湍流状态下的气膜出流对内换热系数的影响,由于在文献[1]中所采用的二维模型的热边界层在气膜狭缝处被完全割断,因此气膜间距比对换热系数分布的影响很大,但在三维状况下,热边界层只在气膜出流的小孔附近的局部区域被破坏,气膜孔的影响必然小于二维的情况。气膜孔对流动内表面换热系数的影响取决于两个方面:一方面气膜出流导致热边界层的破坏而增强换热,另一方面由于气膜出流导致下游流量的减少而降低了其换热效果,二者相互作用,决定着换热系数的分布。

1 实验模型

实验模型的建立是在已发表文章^[1]的基础上,根据相似理论进行设计的。整个实验装置的各个部分如图 1 所示,气流从入口进入稳压腔,然后进入实验段,在流道内形成气膜出流,气流最后直接进入大气。流道的截面图见(图 2 和图 3),考虑到研究的应用背景是航空发动机涡轮叶片冷却通道的情况,在文章^[1]中采用的几何参数为通道高 $B=0.005\text{ m}$,气膜孔径 $d=0.0002\text{ m}$ 。实验模型在该尺寸上放大 5 倍,实验模型的高 $B=0.027$

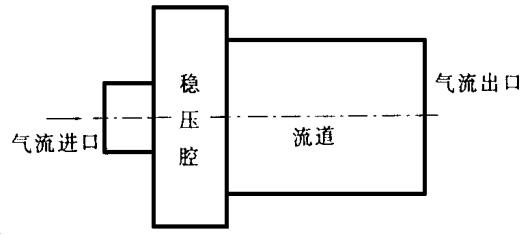


图 1 装置外形

m, 宽 $H = 0.04$ m, 气膜孔径 $d = 0.001$ m。由于主要研究的是内表面对流换热系数沿流动方向上的分布, 但由于气膜出流和壁面的作用, 导致横向的换热系数分布并不均匀, 这给测量和分析带来困难。在实验中, 采用沿流动方向布置窄铜条的方法平均横向换热系数。整个流道的气膜出流面用分离的紫铜条拼接而成, 每个铜条宽 5 mm, 铜条之间的粘接胶用较为耐热且绝热的 914 胶。由于紫铜的导热系数很大, 这样一块铜条测得的温度即代表在该长度方向的温度。其通道内壁面如图 3 所示。另在铜板的整个长度方向上均匀地铺上加热电阻丝, 在电热丝和

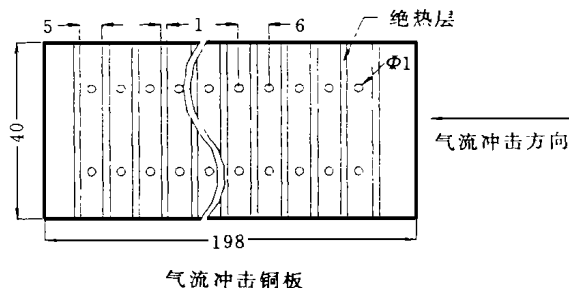


图 2 流道截面

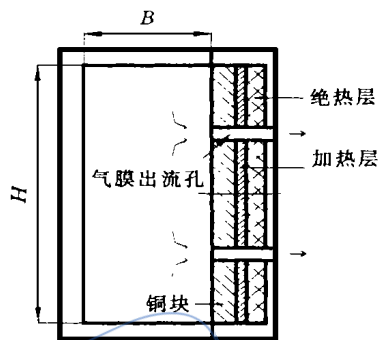


图 3 通道内壁面

铜条之间用高温胶粘接和绝缘, 并在加热丝和支撑壁之间填土绝热岩棉, 形成单向等热流的边界条件。岩棉的厚度大约 5 mm, 稳定时热损失小于总加热量的 1%, 故可忽略不计。热电偶焊接在铜条的顶端部远离气膜孔, 对测量的影响也较小。

2 实验和实验结果分析

由于条件所限, 只进行了湍流范围内的实验。实验时的雷诺数较高, 实验进行的孔数分别为 0, 5, 10, 15, 30 五种。则孔间距比 $r (r = d/L, d$ 为孔径, L 为两孔间距) 分别为 0, 0.028, 0.056, 0.083, 0.167, 湍流的雷诺数为 7 种: 16000, 20700, 26700, 33000, 42800, 62500, 96500。雷诺数在进行实验时有 0.6% 以内的误差。换热系数的特征温度为进出口平均温度 $T_{\infty} = (T_{in} + T_{out})/2$, T_L 为所测得的当地温度, 则当地换热系数 $α_L = q/(T_L - T_{\infty})$, 实验中热流 $q = I^2 R/A = 9.19 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, 平均换热系数 $\bar{α} = \sum_{i=1}^n \frac{α_{Li}}{n}$, 本实验中 $n = 30$ 。

对照文献[1], 由实验结果图(受篇幅限制只显示 4 张图)可以看出湍流时的换热系数比层流时的要明显高许多。但由换热系数曲线分布图来看, 入口处曲线的斜率湍流时要小于层流时的, 这表明湍流时在流动方向上的换热更为均匀一些。相同孔间距比时, 换热系数随雷诺数的增大而增大, 而且影响的效果非常明显, 雷诺数为 96500 时的换热系数约为雷诺数 16000 时的近 3 倍。在湍流状况下, 另外一个影响换热系数的主要因素是孔间距比。从平均换热系数可以看出, 孔间距比对平均换热系数的影响不是单调的。在孔间距比相对较小时 ($r < 0.083$), 平均换热系数随着孔间距比的增加而减少, 而在较大的孔间距比 ($r > 0.083$) 时, 换热系数开始随孔间距比的增加而增加。孔间距比非单调影响的原因是气膜出流对换热的双重作用: (1) 割断热边界层, 导致换热增强; (2) 气膜出流导致下游冷气量降低, 降低了换热。对三维气膜孔, 气膜割断热边界层的作用将局限于气膜孔附近, 其影响远小于二维气膜孔。上面气膜出流双重作用导致换热的非单调变化。但从总体分布图来看, 湍流时孔间距比对换热系数的影响是较小的。

表 1 平均换热系数表

		$Re=16000$	$Re=20700$	$Re=26700$	$Re=33000$	$Re=42800$	$Re=62500$	$Re=96500$
孔数 0	$r=0$	124.14	133.12	142.94	160.52	182.74	233.35	311.90
孔数 5	$r=0.028$	114.87	125.37	139.34	155.73	181.44	237.67	320.12
孔数 10	$r=0.056$	116.07	125.80	139.34	157.68	178.31	231.16	322.54
孔数 15	$r=0.083$	107.16	118.27	137.19	153.83	180.36	222.04	302.78
孔数 30	$r=0.167$	109.35	119.09	138.20	158.02	179.68	243.08	335.19

由图 4 还可以看出,在气膜出流口,换热系数又有所增加,这是由于气流在出口处迅速扩

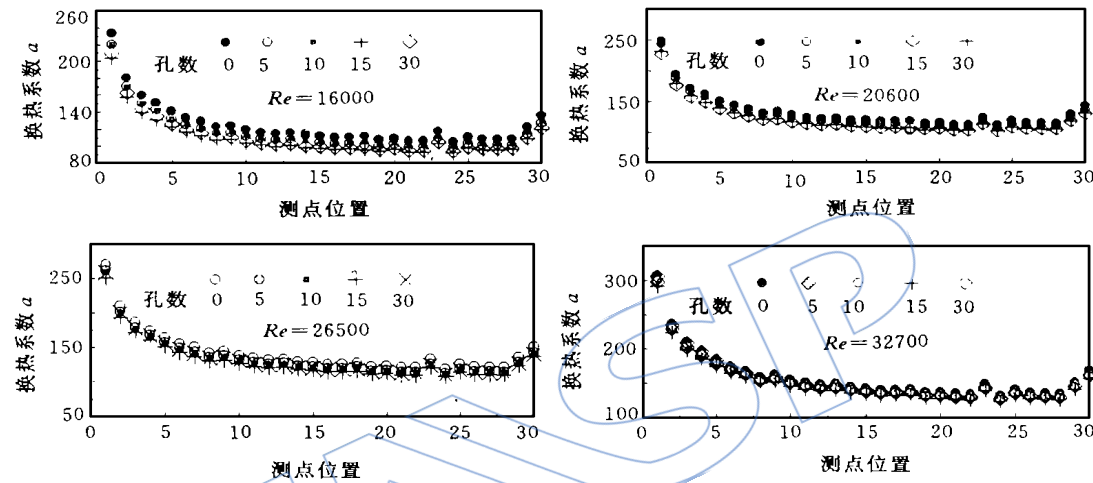


图 4 不同雷诺数下实验数据图

张导致出口附近流动边界层变薄,从而增强换热。

3 数值计算的物理模型和结果分析

计算采用的是和实验相同的物理模型,见图 5。计算所用湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型,其中 $C_D=0.1643$, $C_\mu=0.5478$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$,在近壁处采用壁面函数法,其常数 $k=0.435$ 。冷却空气的层流普朗特数 $Pr_L=0.71$,湍流普朗特数 $Pr_L=2.1$,这个值使计算值较好地符合其相应的实验值。由于篇幅限制,本文不再写出 N-S 方程组和其离散方法以及相应的计算方法,只给出边界条件和所用的计算参数。边界条件是气膜出流壁加上热流 $q=9.2\times10^3\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$,加热方向为 Z 向。计算了 Re 数为 16000, 20700, 33000, 62500 时, 5, 10, 15 个孔, 孔间距比 r 为 0.028, 0.056, 0.083 时的内壁换热特性。特征温度取的是进出口平均温度 $(T_{in}+T_{out})/2$ 。计算的物理模型见图 5, 为了能正确模拟气膜出流, 本计算模型在 Z 向分两个区域进行计算: (1) 为流道; (2) 为带有气膜孔的金属壁。计算当中, 流体和金属固体同时耦合求解, 气

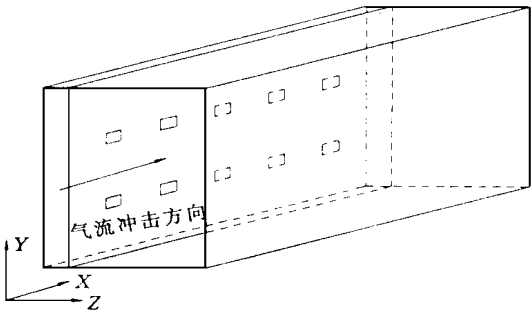


图 5 计算物理模型

膜孔的出口采用压力一定的流动边界条件。计算中,为节省计算工作量,避免使用贴体坐标系,把实验中的圆孔取当量面积的方孔来代替,这种方法在孔的邻域有一定影响,但所有出流孔的面积只占全部壁面的 0.8%,本实验的换热系数是求 Y 方向的平均换热系数,网格上的这种处理对其影响不大。

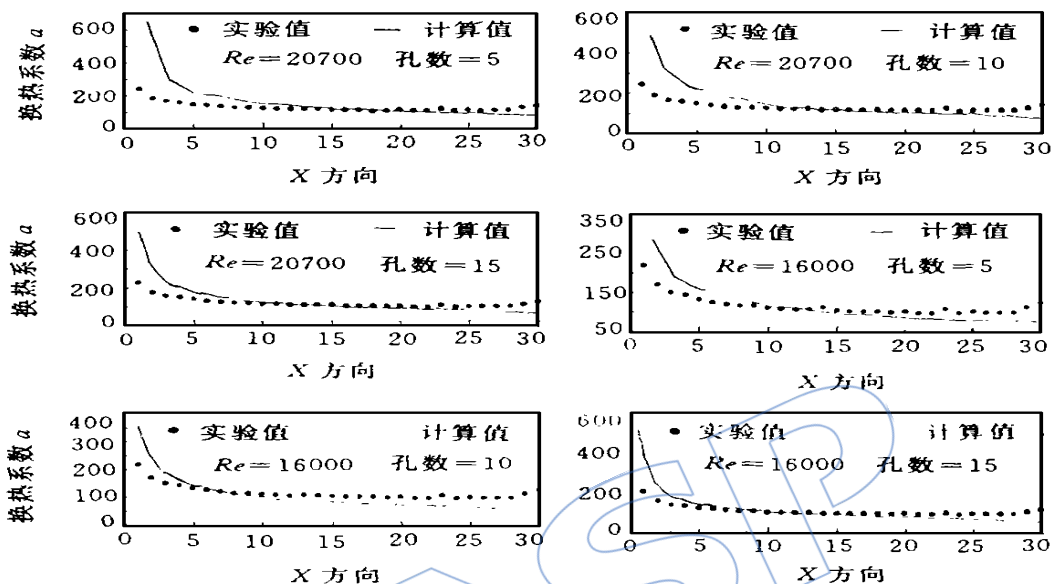


图6 计算与实验结果对照图

从计算结果(图6)可以看出,在入口处和出口处计算结果和实验有一定的差别。在进口处,计算的结果远大于实验结果,原因是计算中在进口处取均匀来流条件。出口计算结果低与实验结果的原因是实验中气流在出口处迅速扩张导致附近的边界层变薄。

4 结 论

通过实验和计算表明,湍流状况下的换热特性比层流下的要好得多。换热系数有显著的增加,而且湍流时的换热特性曲线在入口处的变化斜率没有层流时的大,说明湍流时在 X 方向上的换热特性更趋均匀一些。决定换热系数分布的因素主要为气膜出流量和孔间距比,且后者对换热系数的影响不是单调的,在孔间距比较小时换热系数的分布随孔间距比的增大而呈减小的趋势,但随着孔间距比的进一步增大,这时换热系数又开始增大。但对整个壁面来说,在所研究的范围内,雷诺数一定时,孔间距比对换热系数的影响远没有层流时的那么大。

致谢 感谢刘江虹同学在实验过程中的支持与帮助!

参 考 文 献

- 1 陶智,蔡毅等. 气膜出流对叶片内表面换热系数的影响. 航空动力学报, 1997, 12(4): 413-415
- 2 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学, 1988
- 3 Patanker S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, 1980

(责任编辑 杨再荣)

EFFECTS OF FILM COOLING ON INTERNAL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF A SQUARE CHANNEL

Wu Hong, Deng Hongwu, Tao Zhi

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

Effects of film cooling on the distribution of internal heat transfer coefficients of turbulent flow through a square channel were investigated experimentally and numerically. The main factors were the inlet Reynolds number and the hole distance ratio under turbulent condition. The investigation showed that the internal heat transfer coefficient was increased greatly with the increase of the inlet Reynolds number whereas its variation was not monotonous with the change of the hole distance ratio. The change of internal heat transfer characteristics was not obvious with hole distance variation.

Key Words Turbulence Blades Heat transfer coefficient Experiment

RADIATION HEAT- FLUX DISTRIBUTION CALCULATION ON COMBUSTOR WALL BY MONTE- CARLO METHOD

Zhang Jianqiang and Zhu Gujun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The calculation of the radiation heat- flux on combustor wall and in outlet by Monte- Carlo method takes into account the effects of radiation energy emitted from any single element on all other elements. The calculation gives better prediction of the radiation process in a gas turbine combustor. The radiation heat- flux densities of combustor wall and outlet can be calculated by Monte- Carlo method, provided the temperature, dioxide - carbon partial pressure and water vapor partial pressure distribution in a combustor are known. The changes of gas absorptivity and emissivity in the combustor have been taken into account. A complete computation procedure and related error analysis have been described in detail. A numerical example is given and the calculated results are reasonable.

Key Words Combustion chambers Radiation Heat flow Calculation

INFLUENCES OF MAINSTREAM TURBULENCE AND END- WALL EFFECT ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF TURBINE BLADE

Zhu Hui ren, Xu Duchun, Guo Tao, Liu Songlin

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

The influences of mainstream turbulence, end- wall effect and mainstream Reynolds number on the beginning location of transition, transition length and heat transfer both in the middle region and root region of a turbine blade were comparatively studied. A five- blade linear cascade in a large- scale low- speed opening wind tunnel was used in the experiment. A thin- foil thermocouple technique was applied to determining the heat transfer coefficients on the blade surface. Three row of thermocouple located 5 mm, 30 mm and 150 mm in the span- wise direction of blade from end- wall. The mainstream