

多斜孔气膜冷却壁表面换热系数实验研究^{*}

李 军¹, 董志锐¹, 林宇震², 刘高恩², 陆 涛²

(1. 西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072; 2. 北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘 要: 采用恒热流法, 对4种不同结构实验板的多斜孔气膜冷却壁表面换热系数进行了实验研究, 研究的主要影响因素有: 吹风比、孔排列方式、孔间距和孔排距等, 实验主流雷诺数约为17 000, 吹风比 $M=1\sim 4$ 。实验结果表明: 引入气膜冷却使表面换热系数明显增强; 单一实验板换热随吹风比增大而增强; 在相同单位面积开孔率情况下, 列间距的影响大于排间距, 即列间距越小换热越强。

关键词: 燃气涡轮发动机; 薄膜冷却; 多孔壁; 对流传热; 传热系数

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)05-0045-04

Experimental investigation of heat transfer coefficients on the inclined multihole film cooling wall

LI Jun¹, DONG Zhirui¹, LIN Yuzhen², LIU Gaoren², LU Tao²

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

2. Dept. Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Using the method of constant heat flux, the convective heat transfer coefficients were investigated experimentally in the inclined multihole film cooling. The main factors influencing the convective heat transfer include the blowing ratio, row-to-row spacing, hole-to-hole spacing and arrangement for inclined multihole. The ranges of these parameters were: main fluid Reynolds number about 17 000 and blowing rates from 1 to 4. Measurements were done for 4 variant test plates. The results indicated that the convective heat transfer coefficient increases greatly with film cooling and with the increasing of blowing rates for the same plate; the hole-to-hole spacing is more important than the row-to-row spacing for film cooling at the same condition.

Key words: Gas turbine; Film cooling; Porous wall; Convective heat transfer; Heat transfer coefficient

1 引 言

随着航空发动机燃烧室中温度和压力的不断提高, 燃烧室火焰筒的工作环境十分恶劣, 可用于冷却的空气越来越少, 对火焰筒表面的冷却要求越来越高。多斜孔全气膜覆盖冷却是一种新型高效的火焰筒冷却方式, 得到了国内外发动机研究人员的广泛关注和研究。本文利用相似理论放大斜孔孔径进行实验, 以保证多斜孔排列方式的几何参数无量纲量尽量与实际相近。本文在文献[1, 2]的研究基础上, 对多斜孔气膜冷却壁实验参数进行了重新设计, 深入研究了这种冷却方式的表面换热系数, 完善了多斜孔气膜冷却壁表面换热系数的实验数据, 包括4种不同几何结构的实验板和20个工况下, 吹

风比和多斜孔几何结构等因素对换热系数的影响。

2 实验方法及参数

本实验所用的实验系统是主流、二次流均可单独调节的实验装置^[3]。实验中主流和二次流均为常温常压空气, 物性差被认为很小。主路气流由风机提供, 二次流由低压气源提供, 实验中加热膜的测温装置是红外热像仪, 其测温精度为0.1℃。主流用水银温度计测量, 方法是将温度计伸入主流管道中心线上进行测量, 测量精度为1℃。

实验采用热膜测量法。在低导热系数材料多斜孔板上镶上一层很薄的不锈钢电加热薄膜, 实验过程中测出电加热薄膜表面各点的温度, 根据温度求得各点局部换热增强系数(如下文)。因多斜孔实验板

^{*} 收稿日期: 1999-10-11; 修订日期: 2000-03-03。基金项目: 国家重点实验室基金资助项目(97JS48.2.1HK0302)。

作者简介: 李 军(1977—), 男, 硕士, 研究领域为传热传质学。

表面粘有加热带，加热带上开有小孔，各点热流密度不均匀，给求换热系数带来困难。为解决这一问题，保持加热电压和电流不变，这样在一定几何条件下，吹风前后热流密度就可保持不变，即所谓恒热流法，以便于求增强系数。加热带热量由自耦变压器将 220 V 交流电降到所需来提供，其中为保证恒热流，用精密电压表和精密电流表对加热带热流进行控制。

本实验所采用的多斜孔实验板板材为夹布胶木，板上用强力胶粘贴厚度 0.04 mm 的 1Cr18Ni9Ti 薄钢带，在薄带两端用焊锡焊有导线，以便给薄钢带直接通电加热。因夹布胶木导热系数极低，加热带导入板热量可以减到最低程度，消除了背部换热和孔内换热对加热带温度的影响。另外实验中边界条件的影响和加热膜 x 向导热影响均很小，予以忽略^[3]。

实验中设计了 4 块不同几何结构的实验板（图 1 是各板几何参数含义），结构参数见表 1。对每一块实验板，在主流雷诺数一定的条件下，调节冷却气流流量，实验进行了无吹风比和四个吹风比的实验，实验工况见表 2。为便于比较，以无气膜冷却时的表面换热系数 h_0 为基准，计算出 4 个吹风比下的气膜冷却壁表面对流换热系数 h 相对于无气膜冷却时的表面换热系数的比值 E ，定义为换热增强系数。

$$E = h/h_0 = \frac{t_0 - t_\infty}{t_w - t_\infty}$$

式中 t_0 为无吹风时热膜表面温度， t 为有吹风时热膜表面温度， t_∞ 为主流来流温度。

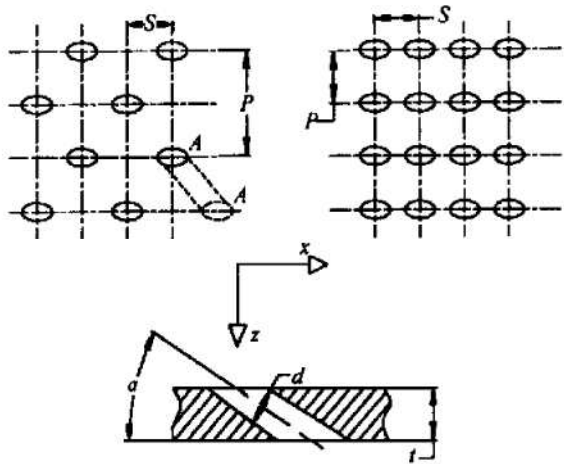


Fig. 1 Geometric configuration for plates

实验中 z 方向（展向）共取了 3 条测量线，相邻两列孔中心线上各 1 条，两列孔中线上 1 条，得到平均换热增强系数定义如下：

$$E = \sum_{i=1}^3 F_i E_{(x/d)i}$$

含义是在相同 x/d 一排测量点上，对不同 z/d 测量点取加权平均， F_i 为权值，取 $F_1 = F_3 = 1/4$ ， $F_2 = 2/4$ ，这是出于几何对称性考虑。

Table 1 Parameters of geometry

No.	d/mm	P/d	S/d	α	β	t/d	n	Pattern
1	2.5	5.68	5.68	30°	0	5.2	10	Staggered
2	2.5	4	8	30°	0	5.2	7	In line
3	2.5	3.25	9.76	30°	0	5.2	6	Staggered
4	2.5	4	8	30°	0	5.2	7	Staggered

Table 2 Conditions of the experiment

No.	Re_g	Blowing rate ($M = \rho_f u_f / \rho_g u_g$)			
		M_1	M_2	M_3	M_4
1	168393.1	1.05	2.11	3.16	3.82
2	172177.2	0.95	1.89	2.84	3.78
3	175881.0	1.01	2.02	3.02	4.03
4	172177.2	1.03	2.06	3.09	3.93

3 实验结果及分析

3.1 吹风比的影响

图2 (a), (b), (c) 和 (d) 分别给出了 1~4 号板在不同吹风比下的换热增强系数 E 的变化规律。 E 大于 1 表示换热增强, E 越大, 换热增强越高, 换热越强烈。图中可以看出在各吹风比下, 换热增强系数 E 均大于 1, 说明由于小孔气流的引入, 孔排下游的换热均增强。对同一实验板的不同吹风比的比较可明显看出, 随着吹风比的增加, 各实验板的换热增强系数都有显著增加, 说明吹风比对换热系数有强烈影响。其原因是: 随着吹风比 M 的增加, 冷却气流量和动量均增加, 对孔排下游主流附面层有极大阻碍和减薄作用, 致使换热系数增加。对于多排孔, 下游孔排后小孔射流相互叠加以及上游中游孔排射流穿透与再附, 使下游孔排后附面层基本上由冷却气来形成, 吹风比越高, 附面层越薄, 下游孔排换热系数增加越大。

对于不同的 x/d , 换热增强系数亦不同, 随着 x/d 增加, 换热增强系数 E 亦增加, 即下游排孔后的换热强于上游, 并且到一定的 x/d 后, 换热增强系数逐渐趋于一个稳定值。说明在最初几排孔后换

热较弱, 随 x/d 的增加, 各排孔喷出的气流相互叠加干扰, 造成换热增强。

3.2 几何结构的影响

3.2.1 排列方式比较

2 号和 4 号实验板孔间距 P/d 与孔排距 S/d 完全相同, 前者为顺排, 后者是叉排。两块实验板在不同吹风比下换热增强系数基本一致 (见图 2 (b) 和 (d)), 但从这两块实验板温度分布图 3 可看出, 4 号实验板在不同 z/d 下的温度分布较 2 号实验板为匀, 这有利于减小热应力, 由此可认为叉排比顺排要好。

3.2.2 间距不同的比较

图 4 是 1, 3 和 4 号实验板在吹风比 M_2 和 M_3 下的换热增强系数比较图。各板几何结构特点是 1 号实验板 $S/P=1$, $P/d=5.68$, $S/d=5.68$; 3 号实验板 $S/P=3$, $P/d=3.25$, $S/d=9.76$; 4 号实验板 $S/P=2$, $P/d=4$, $S/d=8$; 3 块板均为叉排, 且单位面积开孔率相同。图中明显可看出, 3 号实验板 (定义为超长菱形实验板) 在相近吹风比下的换热增强系数远高于其它两块板; 而 1 号实验板 (正菱形) 和 4 号实验板 (长菱形) 的换热增强系数在相近吹风比下几乎一致。

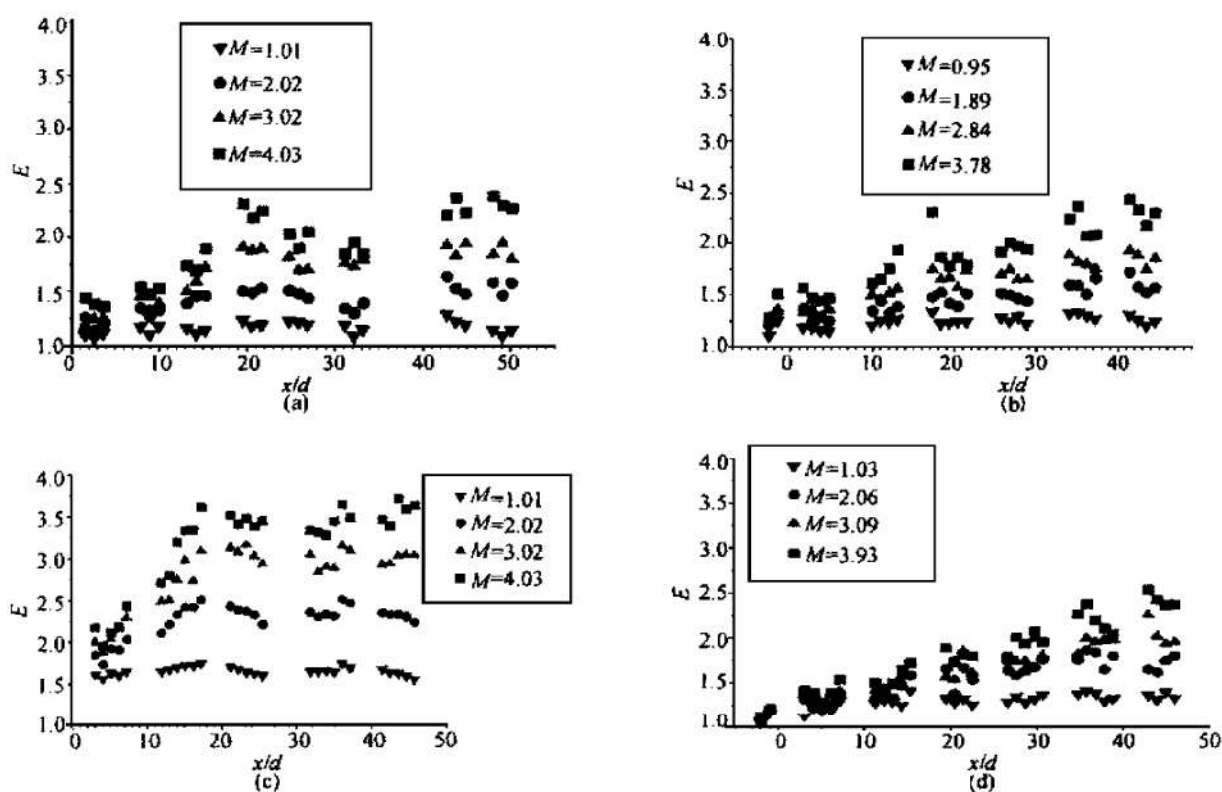
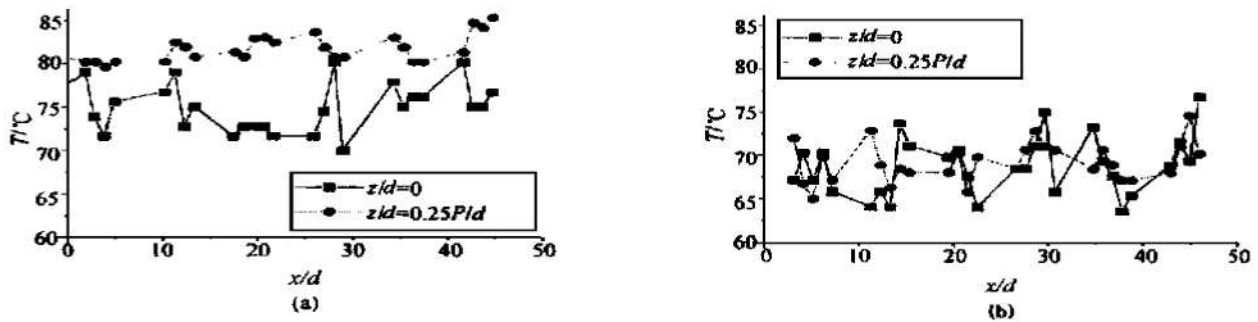
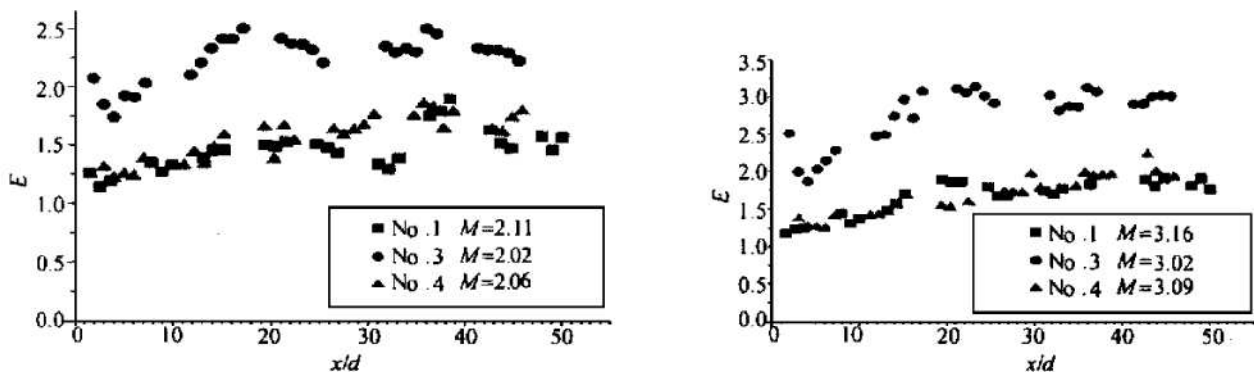


Fig. 2 Profiles of E with x/d at different blowing rate

(a) No. 1 staggered (b) No. 2 in line (c) No. 3 staggered (d) No. 4 staggered

Fig. 3 Distribution of temperature with x/d at different z/d (a) No. 2 $M = 0.85$ (b) No. 4 $M = 1.03$ Fig. 4 Profiles of E for different plates

由于 3 块实验板具有相同的单位面积开孔率, 比较它们的 P/d 和 S/d 可以发现, P/d 最小的实验板即超长菱形实验板由于列与列之间的干扰最强, 使其气膜覆盖最好, 换热最强。对于正菱形和长菱形实验板其 S/d 与 P/d 对换热的影响相互有所抵消, 换热系数就不如超长菱形实验板。

4 结 论

引入气膜冷却使表面换热系数明显增强, 前几排气膜孔的换热系数随 x/d 增大增加较快, 到一定 x/d 后, 换热系数逐渐趋于稳定值。吹风比对换热影响很大, 随吹风比的增大, 换热显著增强, 不同结构实验板增大幅度不同。孔的几何参数对换热影响较为复杂, 在相同单位面积开孔率情况下, 列间

距的影响大于排间距, 列间距越小换热越强。从传热的角度来看, 超长菱形结构优于长菱形结构和正菱形结构。

参 考 文 献

- [1] 林宇震. 燃烧室多斜孔壁气膜冷却研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1997.
- [2] 林宇震, 宋 波, 李 彬, 等. 不同偏角多斜孔壁气膜冷却绝热温比研究 [J]. 推进技术, 1998, 19(5).
- [3] 董志锐, 林宇震, 李 军. 多斜孔壁局部换热系数的实验研究 [R]. 中国国防科学技术报告, 1999.
- [4] Eriksen V L. Film cooling effectiveness and heat transfer with injection through holes [R]. NASA-CR-72911, 1971.

(责任编辑: 龚士杰)