

不同偏角多斜孔壁气膜冷却绝热温比研究^{*}

林宇震 宋 波 李 彬 刘高恩

(北京航空航天大学热动力研究所, 北京, 100083)

摘 要: 用传热传质类比实验的方法, 研究了不同偏角多斜孔壁气膜冷却绝热温比, 多斜孔壁由多斜孔实验板模拟。多斜孔实验板中, 孔排列方式均为叉排, 小孔与板表面夹角均为 30° , 偏角从 0° 变化至 50° , 孔排距比与孔间距比基本相等。研究结果揭示了不同孔偏角对多斜孔壁气膜冷却绝热温比的影响。

主题词: 燃气涡轮发动机, 多孔壁, 薄膜冷却, 绝热温比⁺

分类号: V235. 113

INVESTIGATION OF ADIABATIC WALL FILM EFFECTIVENESS OF INCLINED MULTIHOLE WALL FILM COOLING WITH DIFFERENT DEFLECTED ANGLE

Lin Yuzhen Song Bo Li Bin Liu Gaoen

(Inst. of Thermo—Power, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: An investigation of the adiabatic wall film effectiveness of the inclined multihole wall with different deflected angle was performed using the experimental method of heat-mass transfer analogy. The inclined multihole walls were simulated by the inclined multihole test plates. The holes of all the test plate are arranged into staggered pattern and angled 30° to the surface, with the deflected angle of the holes varying from 0° to 50° . The pitch-to-diameter ratios of the holes are nearly equal to the row spacing-to-diameter ratios of the holes of all test plates. The experimental results reveal the influence of different deflected angles on the adiabatic wall film effectiveness of the inclined multihole wall.

Subject terms: Gas turbine engine, Porous wall, Film cooling, Adiabatic wall film effectiveness⁺

1 引 言

多斜孔壁气膜冷却的燃烧室火焰筒壁的主要特征是: 在被冷却的火焰筒壁上运用激光钻孔技术钻出大量密集、离散的倾斜小孔, 小孔直径小于壁厚以形成较大的内部冷却能力。对多斜孔壁气膜冷却的绝热温比研究, 尚不多见。文献 [1~4] 所研究的多斜孔阵均为叉排形式, 实验的吹风比 M (吹风比的定义为: $M = \rho_j u_j / \rho_\infty u_\infty$) 较小, 在 $0.1 \sim 1.5$ 左右, 与主燃烧室实际工作情况差别较大。作者曾研究了在燃烧室吹风比范围内的吹风比以及不同孔排距比、

^{*} 收稿日期: 1997-10-27, 修回日期: 1998-02-26

孔间距比等几何参数对多斜孔壁气膜冷却绝热温比分布的影响^[5]。但未涉及不同偏角 β 的影响, 因此对其展开研究很有必要。

2 多斜孔壁气膜冷却及实验方法简介

多斜孔壁气膜冷却的燃烧室火焰筒壁的基本结构如图 1 所示。一般小孔直径为 0.5mm~1.0mm, 长径比 $l/d=3\sim 8$, 孔间距比 $p/d=3\sim 6$, 孔排距比 $s/d=3\sim 12$, 孔倾角 $\alpha=20^\circ\sim 30^\circ$, 偏转角 $\beta=0^\circ\sim 45^\circ$ 。冷却的基本过程是: 冷却气在环腔流动, 冷却火焰筒壁的冷侧。当冷却气流过小孔时, 以强制对流换热的方式主动冷却壁, 然后喷射进入主流, 在壁燃气侧形成气膜, 将壁面与燃气隔离, 以充分发挥冷却气流的冷却能力。

多斜孔壁冷却方式的绝热温比表示了燃气侧某一位置上的气膜冷却能力, 其定义式是 $\eta = (T_\infty - T_{aw}) / (T_\infty - T_j)$ 。式中, 绝热壁温 T_{aw} 是被冷却壁面在绝热时壁面附近的气体温度, 完全由燃气与小孔冷却气的混合情况来决定。

多斜孔壁气膜冷却实验研究方法为 CO_2 传质传热类比法。其理论基础是: 当流动及边值条件相似时, 传热过程的能量方程和传质过程的质量扩散方程的解具有相同的形式。文献 [6] 对此进行了详细的推证, 文献 [7] 用实验结果验证了当采用传质传热类比方法时, Sc 数从 0.226~1.54, 对测出的 η 值几乎没有影响。本文实验范围内 Sc 数约为 0.98, 实验温度 $|t_\infty - t_j| \leq 3^\circ\text{C}$, 热扩散影响可忽略, 可用传质传热类比方法获得绝热温比值。在传质实验时, 非渗透壁相应于绝热壁, 因而当壁表面 CO_2 浓度 c_m 被测出, 并已知冷却气和主流的 CO_2 浓度时, 即可得到绝热温比值。通常主流里不渗入 CO_2 , 以降低实验难度, 则 $\eta = c_m / c_j$, c_j 是冷却气射流的 CO_2 浓度。实验系统布局及操作过程见文献 [8], 精度分析见文献 [9]。

对于环形燃烧室, 绝热温比值在一定工况下以及确定的轴向位置上沿周向是周期性重复变化的。因而只需采用包含 6~10 列孔的一个局部进行实验研究即可。鉴于局部的弧度非常小, 多斜孔壁可用矩形多斜孔实验来模拟。相应的环腔通道以及火焰筒通道可用矩形道来模拟。用相似理论分析可以得到吹风比及多斜孔壁的几何参数是相似量, 必须加以保证。表 1 是所研究的 4 种不同偏角的多斜孔实验板的几何参数: 排距比 s/d 及间距比 p/d 基本相等, 孔倾角皆 α 为 30° , 孔排列方式均为叉排。不同之处是偏角 β 由 0° 变化至 5° 。

3 实验结果及分析

图 2 给出了多斜孔实验板的测量坐标系。对于偏角 $\beta=0^\circ$ 的叉排板, 测量 $z=0$ 、 $z=p/4$ 、 $z=p/2$ 三条线上的绝热温比, 对于偏角 $\beta \neq 0^\circ$ 的叉排板, 再加测 $z=-p/4$ 线上的绝热温比, 可以认为这些测量线上测量点反应出整个多斜孔板展向绝热温比分布。定义展向平均绝热温

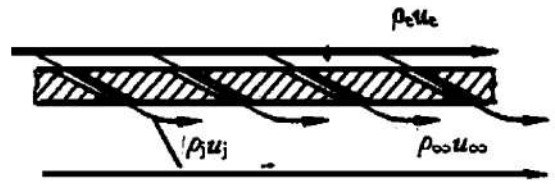


Fig. 1 Inclined multihole wall film cooling

Table 1 Inclined multihole test plate geometry

Test plate	p/d	s/d	l/d	α	β	Holes arrangement
1	5.13	5.13	6.25	30	0	staggered
2	5.00	5.00	5.00	30	15	staggered
3	5.16	5.16	6.45	30	30	staggered
4	5.13	5.13	6.25	30	50	staggered

比 $(\bar{\eta} = (\sum_{i=1}^n \eta_{(x/d)_i}) / n)$ 。其含义是在相同 x/d 的一排测量点上各 η 值的算术均值。 $\bar{\eta}$ 大, 表明该处气膜覆盖好, 冷却潜力大。

各多斜孔实验板在吹风比 $M=2.0$ 左右时的绝热温比分布见图 3~6。偏角差别最大的为 1 号板与 4 号板。1 号板 $\beta=0^\circ$ (图 3), 孔排中, 奇数排后 $z/d=0$ 这条线是孔中心线, 偶数排中, $z/d=(p/d)/2$ 线是孔中心线, 由于叉排板中小孔射流交叉喷射, 绝热温比 η 在这两条线中交错上升, 并且绝热温比 η 上升较快。4 号板 $\beta=50^\circ$ (图 6), 由于孔偏角存在, 对主流穿透比无偏角时大, 射流动量衰减较快, 不容易形成贴壁射流, 与 1 号板相比, 下游孔排孔后绝热温比值相差很多。但由于斜穿主流, 对两列孔中间区域保护比无偏角的 1 号板好一些, 见 $z/d=-(p/d)/4$ 和 $z/d=(p/d)/4$ 两条线上分布。4 号板多排孔叠加效果比偏角 $\beta=0^\circ$ 的 1 号板更快达到稳定状态。4 号板第 3 排孔下游分布与第 9 排孔下游分布并无明显区别, 而 1 号板第 9 排孔下游值比第 3 排孔下游要高很多。2 号实验板 $\beta=15^\circ$ (图 4), 与较大偏角的 4 号板相比, 绝热温比分布更接近于 $\beta=0^\circ$ 的 1 号板。3 号板 $\beta=30^\circ$, 绝热温比 η 的分布接近于 4 号板 (见图 5), 但分布达到稳定状态孔排数往后移。因为 3 号板第 3 排孔下游

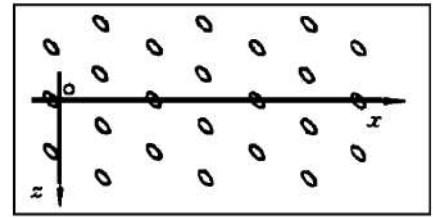


Fig. 2 Inclined multihole test plate and measurement coordination

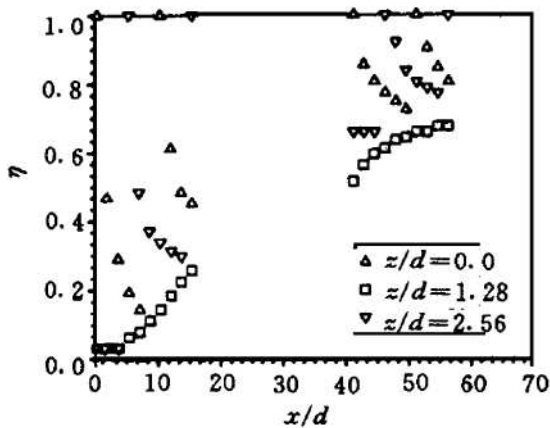


Fig. 3 Effectiveness distribution of No1 ($M=1.98$)

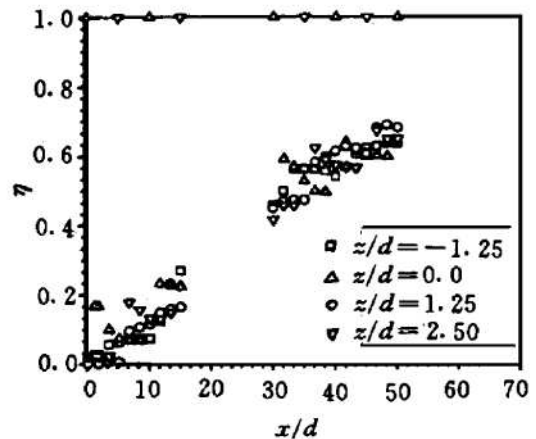


Fig. 4 Effectiveness distribution of No2 ($M=2.03$)

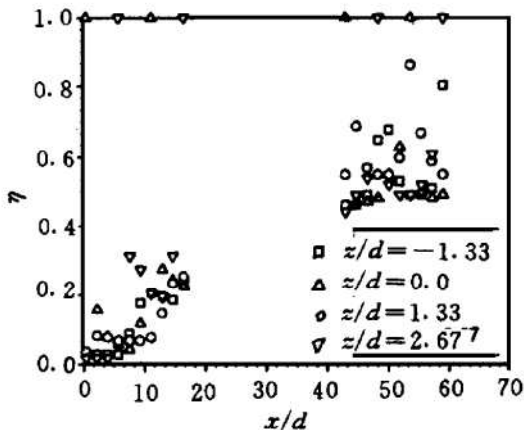


Fig. 5 Effectiveness distribution of No3 ($M=2.04$)

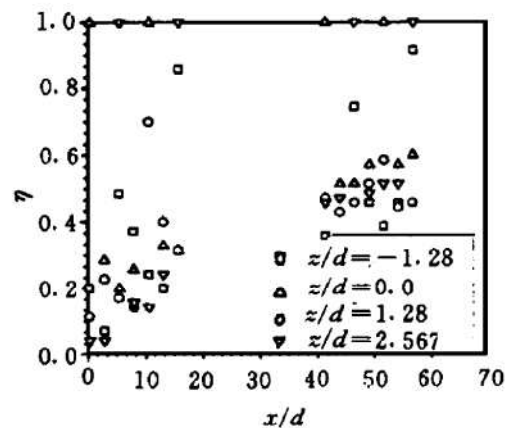


Fig. 6 Effectiveness distribution of No4 ($M=1.92$)

值与第 9 排孔下游有较明显差别。图 7 是这四种实验板平均绝热温比的比较。从图中可以看出,在上游第 1, 2, 3 排孔后, 四者 $\bar{\eta}$ 值差别不大; 而在下游第 9 排孔后, $\bar{\eta}$ 值有较大差别。在第 9 排孔后, 1 号板 $\bar{\eta}=0.69\sim 0.73$, 2 号板 $\bar{\eta}=0.6\sim 0.68$, 3 号板 $\bar{\eta}=0.52\sim 0.61$, 4 号板 $\bar{\eta}=0.34\sim 0.64$, 很明显, 孔偏角越大, $\bar{\eta}$ 越小, 并且沿轴向变化梯度大。说明偏角 β 越大, 气膜覆盖变差, 其有效性降低。

4 结 论

(1) $\beta=0^\circ$ 的多斜孔壁绝热温比较高, 说明能够达到较好的气膜覆盖。

(2) $\beta\neq 0^\circ$ 的多斜孔壁能改善绝热温比展向分布的均匀性, 但绝热温比的绝对水平下降, 气膜覆盖变差, 并且这个变化趋势与偏角的变化趋势相反。

(3) 如果燃烧室采用多斜孔壁气膜冷却, 对偏角的采用要综合考虑。

参 考 文 献

- 1 Mayle R E, Camarata F J. Multihole cooling film effectiveness and heat transfer. Trans of ASME, Journal of Heat Transfer, 1975, 97
- 2 Sasaki M, Takahara K, Kumagai T. Film cooling effectiveness for injection from multirow holes. ASME Parper 78-GT-32, 1978.
- 3 Crawford M E, Kays W M, Moffat R J. Full-coverage film cooling part I: comparison of heat transfer data for three injection angles. ASME Paper 80-GT-43, 1980.
- 4 Kumada M, Kasagi N, Hirata M. Studies of full-coverage film cooling part 2: measurement of local heat transfer coefficient. ASME Paper 81-GT-38, 1981.
- 5 方 韧, 李 彬, 林宇震, 等. 多斜孔壁气膜冷却绝热温比的传热传质类比实验研究. 航空动力学报, 1998, 13 (1)
- 6 李立国. 传质与传热的类比及其在薄膜冷却研究中的应用. 中国工程热物理学会 1981 年学术报告会, 编号 81-3114 (1981)
- 7 Pedersen D R, Eckert E R G, Goldstein R J. Film cooling with large density difference between the main stream and secondary fluid measured by the heat-mass transfer analogy. Trans of the ASME, Journal of Heat Transfer 1977, 99: 620~627
- 8 宋 波. 燃烧室多斜孔壁冷却方式研究: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.
- 9 林宇震. 燃烧室多斜孔壁气膜冷却研究: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1997.

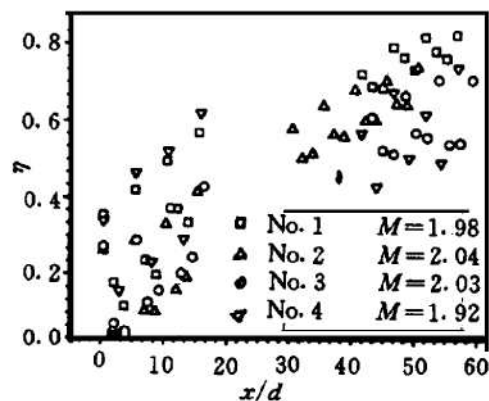


Fig. 7 The comparison of average effectiveness of all the test plates