

文章编号: 1000-8055(2008)03-0425-05

火焰筒多斜孔冷却方式壁温梯度和冷却效率试验

徐 剑, 许全宏, 林宇震, 刘高恩, 樊鹏辉
(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 100083)

摘 要: 针对高温升燃烧室以延长其火焰筒使用寿命为目的, 实验研究了多斜孔冷却方式孔排列方式、壁厚与孔径比 h/d 以及无量纲参数 PS/d^2 对主燃烧室采用多斜孔冷却方式的火焰筒壁温梯度和冷却效率的影响。实验中冷却气为常温常压, 主流速度 $u_g \approx 20 \text{ m/s}$, 多斜孔内气流与主流速度比约为 0.66, 主流与冷却气温度比约为 1.25。实验结果表明: 长菱形多斜孔实验板比正菱形实验板壁温梯度小、冷却效率高; 减小 h/d 或者增大 PS/d^2 都可以降低壁温梯度, 但同时冷却效率也会降低。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 燃烧室; 火焰筒; 冷却; 多斜孔; 壁温梯度; 冷却效率

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A

Experimental investigation of the temperature gradient and cooling efficiency for effusion wall cooling methods on combustion liner

XU Jian, XU Quan-hong, LIN Yur-zhen, LIU Gao-en, FAN Peng-hui
(National Key Laboratory on Aero-engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Gas turbine combustor cooling has steadily acquired major importance whenever engine performances have to be improved. Effusion cooling is becoming one of the most efficient cooling techniques for protecting metal surfaces against hot gases in combustor liners.

As one of the most important influential factors to combustor life-span, the temperature gradient of the effusion wall and the cooling efficiency were investigated experimentally under the guidance of similarity theory. Geometric parameters such as the patterns of holes arrangement and the ratio of the wall thickness to the hole diameter h/d , as well as PS/d^2 , were varied in four different test models. IR thermograph was used to perform local measurements of the surface temperature field.

The experimental results indicated that it had a better performance in both the temperature gradient and the cooling efficiency if $P/S = 1$ as compared with $P/S = 2$; the temperature gradient would be reduced by decreasing h/d or increasing PS/d^2 , while the cooling efficiency would decline at the same time.

Key words: aerospace propulsion system; gas turbine engine; combustor; liner; cooling; effusion wall; temperature gradient; efficiency

符号表	h 多斜孔板壁厚(mm)
d 多斜孔直径(mm)	L 小孔长度(mm)

- n 小孔个数(个)
- P 横向孔排距(mm)
- S 流向孔间距(mm)
- T_c 冷却气温度(K)
- T_g 主流温度(K)
- T_w 壁面温度(K)
- u_c 冷却气速度(m/s)
- u_g 主流速度(m/s)
- u_j 小孔射流速度(m/s)
- h/d 多斜孔板壁厚与孔径之比
- L/d 多斜孔长径比
- P/d 多斜孔板孔间距与孔径之比
- S/d 多斜孔板孔排距与孔径之比
- PS/d^2 多斜孔板孔间距孔排距乘积与孔径平方之比
- $\frac{T_g}{T_c}$ 加温比
- $\frac{u_c}{u_g}$ 速度比
- Bi 毕渥数
- $gradt$ 无量纲壁温梯度
- Re 雷诺数
- α 孔斜角($^\circ$)
- η 无量纲冷却效率

相比常规燃烧室,高温升燃烧室要求更多的空气参与燃烧,这样用于冷却的空气量分配减少,而且随着压比的不断提高,燃烧室进口的气流温度也增高,导致冷却空气的冷却潜质下降,火焰筒的工作环境变的更加恶劣,壁温梯度会升高.而火焰筒的壁温梯度是决定其使用寿命的主要因素,必须严格控制.另外,由于火焰筒内流场的复杂性以及各种大孔的存在,都需要研究壁温梯度的分布,从而为延长火焰筒使用寿命提供依据.

多斜孔冷却技术(如图 1 所示)是一种先进的冷却方式,也是解决高温升燃烧室火焰筒冷却问题的关键技术之一,小孔内部的强对流换热和较大的对流换热面积是其显著特点.

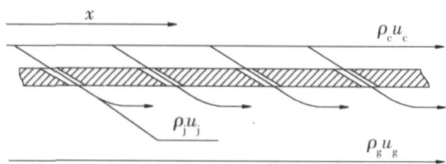


图 1 多斜孔壁冷却方式
Fig 1 Inclined multihole wall cooling method

国内外针对多斜孔冷却方式在燃烧室火焰筒上的应用已展开了许多基础流动及换热特性方面的实验和数值研究,取得了大量成果.宋波等人^[1]

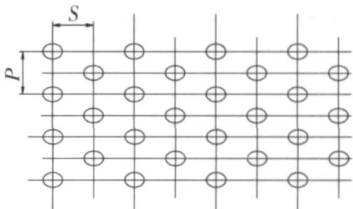


图 2 长菱形孔排列方式
Fig 2 Hole arrangement of long-rhombus

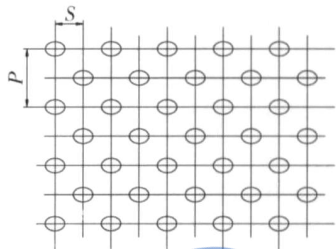


图 3 正菱形孔排列方式
Fig 3 Hole arrangement of rhombus

采用传热传质类比方法实验研究了 4 种孔阵排列方式(顺排,叉排,顺排+复合角及叉排+复合角)下多斜孔壁气膜冷却绝热温比,发现 4 种孔阵排列方式中,叉排无复合角孔阵为最优.林宇震等人^[2]研究了多斜孔冷却方式的基础流动和对流换热特性方面的问题,在相似理论指导下进行实验,对各种不同几何结构多斜孔实验板在不同流动参数,如吹风比、速度比、不同主流燃气雷诺数、环腔冷却气雷诺数和小孔冷却气雷诺数情形下,研究了流动特性中多斜孔壁流量系数以及对流换热特性中的多斜孔壁热侧对流换热系数、绝热温比、冷侧对流换热系数和小孔内部对流换热系数.最后在模拟加温比和换热比例系数情况下进行了多斜孔壁冷却总有效性研究.Leger B 等人^[3]研究了多斜孔壁几何结构如孔径、 S/d 等对壁面温度分布的影响,试验结果表明:多斜孔壁孔径越大壁面冷却效果越好,但同时冷却气消耗量也越大;随着 S/d 的减小,壁面温度梯度和冷却气消耗量都将增加. Arcangeli L^[4] 等人的研究表明:多斜孔的整体冷却效率往往与孔长与孔径比 L/d 成正比;在 $x/d, y/d$ 及孔倾斜角相同时,孔径越小,绝热温比越高.

目前,对多斜孔冷却方式壁温梯度的试验研究还不多见,而壁温梯度是决定火焰筒寿命的关键因素之一,因此对壁温梯度和冷却效率的研究很有必要.在前人对多斜孔基础流动及换热特性研究的基础上,本文对多斜孔冷却方式的壁温梯度以及冷却效率进行了试验研究.

温度梯度的一般表达式为 $\text{grad}t = \frac{dT_w}{dx}$, T_w 为沿轴向位置的展向平均温度,以多斜孔孔径 d 为长度标尺,冷却气温度 T_c 为温度标尺,将其无量纲化得到本文中定义的轴向无量纲壁温梯度为 $\text{grad}t = \frac{d}{T_c} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}$,展向壁温梯度将另文发表. 由于气膜的冷却作用,多斜孔实验件的轴向壁温呈现不断下降的趋势,因此本文中的壁温梯度都呈负值. 另外定义冷却效率为 $\eta = \frac{T_g - t}{T_g - T_c}$,小孔内冷却气与主流的速度比为 $\frac{u_c}{u_g}$,加温比为 $\frac{T_g}{T_c}$.

壁温梯度实验研究是根据相似理论,在常压条件下模拟真实工况的换热情况,保证多斜孔壁毕渥数 Bi 、主流雷诺数和孔内冷却气雷诺数等相似准则数相同,这样,常压条件下的试验与高压条件下的换热及流动相似. 结合对多斜孔基础流动及换热特性的研究成果设计了本文的实验件几何参数和实验系统气动参数. 实验件几何参数见表 1. 实验在常温常压下进行,具体参数如下: (1) 主流速度 $u_g \approx 20 \text{ m/s}$; (2) 速度比 $\frac{u_c}{u_g} \approx 0.66$; (3) 温度比 $\frac{T_g}{T_c} \approx 1.25$. 实验过程中对气动参数进行严格控制,误差在 1.3% 以内. 另外,主流速度、速度比以及加温比等气动热力参数对壁温梯度和冷却效率的影响将另文发表.

表 1 多斜孔实验板几何参数

Table 1 Geometric parameters of the inclined multihole cooling walls

实验板序号	1	2	3	4
P/d	5.84	8.24	5.84	6.8
S/d	5.84	4.12	5.84	6.8
h/d	2	2	1.6	2
PS/d^2	34	34	34	46
α	30	30	30	30
n	63	70	63	54

注:孔间距与孔排距之比 $P/S = 1$,称为长菱形实验板(实验板 1,3,4),排列方式如图 2 所示;孔间距与孔排距之比 $P/S = 2$,称为正菱形实验板(实验板 2),排列方式如图 3 所示.

1 实验系统及实验方案

本实验所用的常压传热实验台系统采用主流、冷却气均可单独调节的实验装置,实验台系统如图 4 所示. 主路气流由风机提供,经电炉加温

后进入试验段,其流量通过调节总静压差来控制;冷却气由低压气源提供,由浮子流量计控制其流量;实验中多斜孔主流侧壁面的温度采用 ThermoCAM P60 红外热像仪测量;电脑数据采集系统通过镍铬-镍硅热电偶测得多斜孔板主流侧两个校准点温度;在 ThermoCAM Researcher 2002 软件中调节由红外热像仪拍得图像的发散率,使图像中校准点的温度与热电偶测得的温度相同,以此对图像进行标定;标定后的红外图像经 MATLAB 软件处理可得到多斜孔板主流侧壁温梯度和冷却效率.

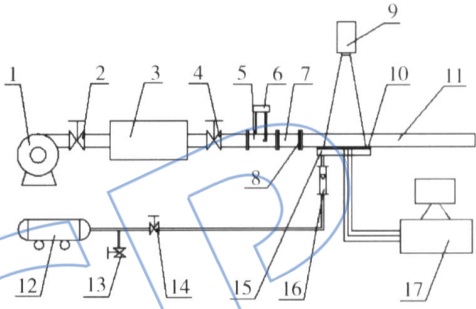


图 4 实验台系统图

Fig. 4 Experimental system

图中:1 风机;2 气阀;3 加热炉;4 气阀;5 总压静压管;6 水排;7 转接段;8 孔板;9 热像仪;10 试验板;11 尾排;12 低压气罐;13 气阀;14 气阀;15 集气箱;16 浮子流量计;17 电脑采集系统

2 实验结果及分析

将相同实验条件下 2,3,4 号实验板的实验结果与 1 号实验板的实验结果进行比较,分别得到了孔排列方式、 h/d , PS/d^2 对多斜孔试验板壁温梯度和冷却效率的影响.

2.1 孔排列方式对壁温梯度和冷却效率的影响

图 5 和图 6 显示的是 1 号实验板和 2 号实验

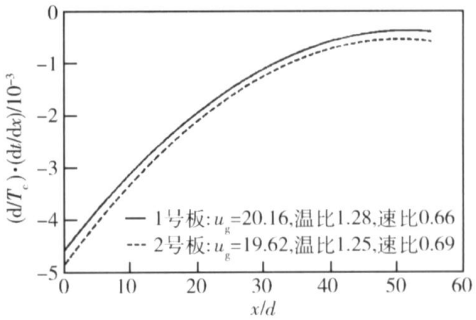


图 5 1 号实验板和 2 号实验板壁温梯度

Fig. 5 Temperature gradient contrast between experimental plate 1 and 2

板的壁温梯度和冷却效率. 1, 2 号实验板的区别是: 1 号实验板的孔排列方式为长菱形叉排, 2 号实验板的孔排列方式为正菱形叉排.

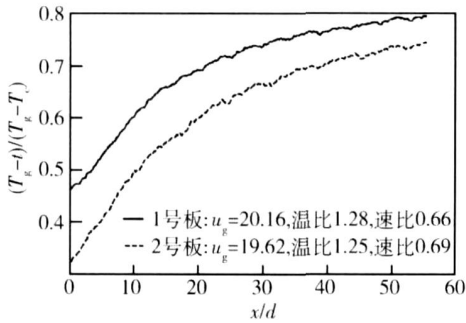


图 6 1 号实验板和 2 号实验板冷却效率
Fig. 6 Cooling efficiency contrast between experimental plate 1 and 2

由图 5 和图 6 可知, 沿气流方向, 1, 2 号实验板的壁温梯度的绝对值逐渐减小, 并在 $x/d > 50$ 趋于稳定; 在相同的轴向位置, 1 号板的壁温梯度的绝对值略小于 2 号板. 冷却效率沿气流方向逐渐增加, 并逐渐趋于稳定; 在相同的轴向位置, 1 号实验板的冷却效率明显高于 2 号实验板.

造成上述长菱形实验板比正菱形实验板冷却效率高、壁温梯度绝对值小的根本原因是: 由于两块实验板 PS/d^2 相同, 即具有相同的单位面积开孔率, 与正菱形实验板相比, 长菱形实验板的孔间距 P 较小, 使列与列之间的干扰更强, 使其气膜覆盖更好, 换热更强^[5], 因此长菱形实验板较之正菱形实验板不仅总体冷却保护水平明显提高, 且气膜覆盖的均匀性亦大有改善.

2.2 h/d 对壁温梯度和冷却效率的影响

图 7 和图 8 显示的是 1 号实验板和 3 号实验板的壁温梯度和冷却效率. 1, 3 号实验板的区别是: 1 号实验板 $h/d = 2$, 3 号实验板 $h/d = 1.6$.

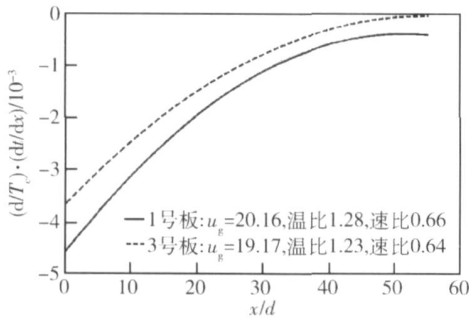


图 7 1 号实验板和 3 号实验板温度梯度
Fig. 7 Temperature gradient contrast between experimental plate 1 and 3

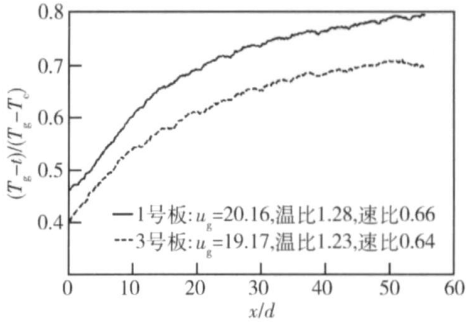


图 8 1 号实验板和 3 号实验板冷却效率
Fig. 8 Cooling efficiency contrast between experimental plate 1 and 3

由图 7 和图 8 知, 在相同的轴向位置, 1 号实验板壁温梯度的绝对值略大于 3 号实验板, 冷却效率 1 号实验板高于 3 号实验板.

气膜冷却在壁面整体冷却效率中所占比例比小孔内对流换热冷却所占比例要小, 孔内对流换热冷却占支配地位^[6]. 当板厚与孔径之比增高时, 即增加了相对孔内通道面积, 从而增强了孔内对流换热, 提高了冷却效率.

2.3 PS/d^2 对壁温梯度和冷却效率的影响

图 9 和图 10 显示的是 1 号实验板和 4 号实验板的壁温梯度和冷却效率. 1, 4 号实验板的区

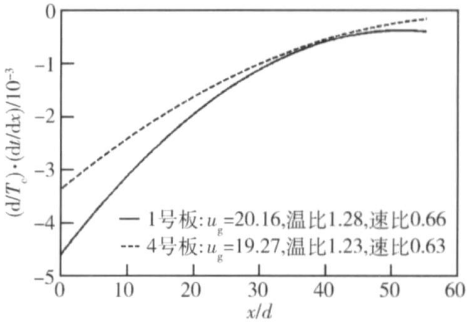


图 9 1 号实验板和 4 号实验板温度梯度
Fig. 9 Temperature gradient contrast between experimental plate 1 and 4

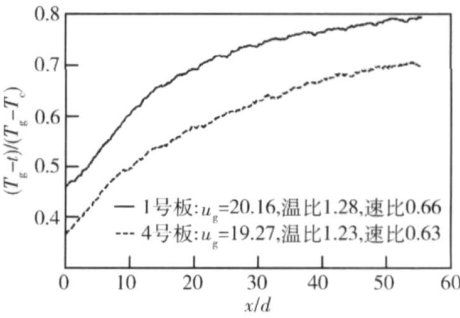


图 10 1 号实验板和 4 号实验板冷却效率
Fig. 10 Cooling efficiency contrast between experimental plate 1 and 4

别是:1号实验板 $PS/d^2 = 34$, 4号实验板 $PS/d^2 = 46$.

因为实验误差,图9中1号板与4号板的壁温梯度在 $x/d = 40$ 处几乎相同.由图9和图10知,在相同的轴向位置,壁温梯度的绝对值4号实验板小于1号实验板,而冷却效率1号实验板高于4号实验板.

由上知, PS/d^2 在34时的冷却效果要比在46时好,其原因是:随着 PS/d^2 的增大,即单位面积开孔率减小,单位面积内小孔内对流换热面积就减小,同时在相同的主流速度、加温比、速度比下,冷却气量也会相对减小,因此冷却效率会降低.

3 结 论

针对不同孔排列方式、壁厚与孔径比 h/d 以及无量纲参数 PS/d^2 的四种孔板结构,进行了多斜孔冷却壁温梯度和冷却效率的实验研究.实验结果表明:

(1) 在相同单位面积开孔率情况下,长菱形实验板比正菱形实验板壁温梯度小、冷却效率高.因为孔间距的影响大于孔排距,孔间距越小,列与列之间的干扰越强,气膜覆盖均匀性越好,换热越强;

(2) 当 h/d 增大时,即增加了孔内通道面积,从而增强了孔内对流换热,壁温梯度和冷却效率

都会增加;

(3) 随着 PS/d^2 增大,单位面积内小孔内对流换热面积就减小,冷却气量也减小,壁温梯度和冷却效率都会降低.

参考文献:

- [1] 宋波. 燃烧室多斜孔壁冷却方式研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1995.
- [2] 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.
- [3] Leger B, Schott G, Grienche G. Experimental study of geometric effect for design of multihole cooling for combustion chamber walls [R]. ADA419254, Mar 2003.
- [4] Arcangeli L, Surace M, Tarchi L. Correlative analysis of effusion cooling systems [R]. ASME Turbo Expo, (GT2006-90405), 2006.
- [5] 李军,董志锐,林宇震,等. 多斜孔气膜冷却壁面换热系数实验研究[J]. 推进技术,2000,21(5):45-48.
LI Jun, DONG Zhirui, LIN Yuzhen, et al. Experimental investigation of heat transfer coefficients on the inclined multihole film cooling wall [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5): 45-48.
- [6] 李彬,胡正义,林宇震,等. 多斜孔壁整体冷却效率实验研究[J]. 航空动力学报,1999,14(2):157-160.
LI Bin, HU Zhengyi, LIN Yuzhen, et al. An experimental study on overall cooling effectiveness of inclined multihole plates [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(2): 157-160.