

冲击加多斜孔双层壁冷却方式流量系数研究^{*}

许全宏, 林宇震, 刘高恩

(北京航空航天大学 热动力研究所, 北京 100083)

摘要: 为了获得冲击加多斜孔双层壁冷却方式的流量系数, 分别对两种孔排列方式的冲击和多斜孔实验板组合成的四组双层壁模型在相似理论指导下进行实验。研究压力参数从0变化到80时, 流量系数的变化情况。另外讨论并分析了主流流量、孔排列方式、双层壁缝高的变化对流量系数的影响程度。为燃烧室设计和壁温预估提供依据。

关键词: 航空发动机; 燃烧室; 多斜孔壁; 冷却; 流量系数

中图分类号: V231.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)05-0049-04

Discharge coefficient of double wall with discrete hole and inclined multihole for combustor liner

XU Quan hong, LIN Yu zhen, LIU Gao en

(Inst. of Thermal Power Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to determine the discharge coefficients for double wall cooling with discrete hole and inclined multihole in combustor liner, an experimental investigation was performed for two different forms of hole arrangement. Four test models were used in this study. The variation of discharge coefficients with the change of pressure parameter from 0 to 80 was obtained. In addition, the effects of main airflow, distance between the walls, the form of hole arrangement were analyzed and discussed. This study can be useful in combustor design and its wall temperature prediction.

Key words: Aircraft engine; Combustion chamber; Inclined multihole wall; Cooling; Flow coefficient

1 引言

采用先进冷却方法是确保燃烧室高效稳定工作的最有效途径, 冲击冷却^[1]的优点是换热强、冷却区域易控制, 而多斜孔冷却方式效率高、结构简单。本文在对多斜孔壁冷却方式研究^[2]的基础上, 研究了主燃烧室火焰筒采用冲击加多斜孔双层壁复合冷却方式时双层壁在一定流动、几何参数下的流量系数。

关于双层壁方面流量系数的研究不多。文献[3]是关于离散孔气膜冷却流量系数研究, 但离散小孔与壁面垂直, 与本文研究的双层壁中的多斜孔壁几何结构不同。文献[4]是单排小斜孔流量系数研究, 其研究对象是涡轮叶片。文献[5]亦是单排小孔流量系数研究, 但对孔排距、倾角变化、孔排数及主流存在是否影响流量系数未作研究。文献

[6, 7]研究了多斜孔壁气膜冷却方式在一定的流动及几何参数下的流量系数。文献[8]针对涡轮叶片研究了冲击孔的流量系数。对冲击加多斜孔这种组合冷却形式的流量系数研究, 尚未见文献报道。

2 冲击加多斜孔双层壁流量系数分析

本文研究的主燃烧室火焰筒采用冲击加多斜孔双层壁气膜冷却方案如图1, 外层壁上分布大量密集冲击小孔, 直径0.8 mm~1.5 mm, 称为冲击壁; 内层壁上分布大量密集离散倾斜小孔, 直径0.8 mm~1.5 mm, 称为多斜孔壁。流动冷却过程为: 冷却气体在压力作用下进入冲击孔, 然后冲击冷却多斜孔壁冷侧。在冲击点向四周贴壁流动, 遇到多斜孔后进入多斜孔, 然后在多斜孔壁热侧形成气膜, 保护多斜孔壁的热侧。形成组合冷却, 充分发挥冷却气流的冷却能力。

^{*} 收稿日期: 1999-10-08; 修订日期: 1999-12-08。基金项目: 国家重点实验室基金资助项目。

作者简介: 许全宏(1969—), 男, 博士生, 研究领域为航空发动机燃烧及燃烧室传质传热。

冷却气流经双层壁时, 由于存在进口损失、摩擦损失、出口突扩损失以及加热损失, 而导致实际通过小孔气流流量 $\dot{m}_{re}$ 比相同流动情况下理论流量 $\dot{m}_{th}$ 小, 由此引出流量系数的定义: $C_D = \dot{m}_{re} / \dot{m}_{th}$ 。由于影响实际流量的因素很多, 因此实际流量由实验确定, 理论流量由连续方程及柏努利定律计算。

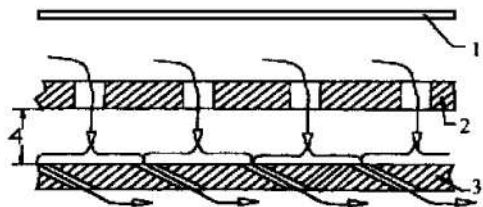


Fig. 1 Schematic of the double wall

- 1) Case; 2) Discrete-hole wall;
3) Incline multihole wall; 4) Height

设环腔总压为 p_{an}^* , 环腔静压为 p_{an} , 冲击壁与多斜孔壁夹缝之间的总压为 p_s^* (由于在双层壁夹缝中间, 气流流速较低, 总压与静压近似相等), 火焰筒内静压为 p_g , 则在一定压力参数下通过冲击壁的理论流量为

$$\dot{m}_{th} = A_i \sqrt{2\rho(p_{an}^* - p_s)} \quad (1)$$

通过多斜孔壁的理论流量为

$$\dot{m}_{th} = A_m \sqrt{2\rho(p_s - p_g)} \quad (2)$$

通过双层壁的理论流量为

$$\dot{m}_{th} = A_o \sqrt{2\rho(p_{an}^* - p_g)} \quad (3)$$

双层壁可以假想为一个流动通道, 则其当量流动面积为

$$A_o = 1 / \sqrt{(1/A_i)^2 + (1/A_m)^2} \quad (4)$$

双层壁的当量流量系数即可作如下推导: 冲击壁的流量系数为

$$C_{Di} = \dot{m}_{re} / \dot{m}_{th} = \dot{m}_{re} / A_i \sqrt{2\rho(p_{an}^* - p_s)} \quad (5)$$

多斜孔壁的流量系数为

$$C_{Dm} = \dot{m}_{re} / \dot{m}_{th} = \dot{m}_{re} / A_m \sqrt{2\rho(p_s - p_g)} \quad (6)$$

同上两式, 双层壁的当量流量系数为

$$C_{Do} = \dot{m}_{re} / \dot{m}_{th} = \dot{m}_{re} / A_o \sqrt{2\rho(p_{an}^* - p_g)} \quad (7)$$

考虑到式 (5), (6) 及当量流动面积 A_o , 则双层壁的当量流量系数为

$$C_{Do} = 1 / \sqrt{(A_o / A_i C_{Di})^2 + (A_o / A_m C_{Dm})^2} \quad (8)$$

为计算理想流量, 试验时需要测量的参数为环腔总压、双层壁夹缝静压、多斜孔壁内侧静压。实际流量通过孔板流量计和浮子流量计测量。

3 流量系数实验

由于在实际燃烧室进行流量系数测量既困难又不精确, 所以试验方案是保证压力参数一致, 几何结构相似条件下对双层壁实验板进行试验, 此处压力参数定义为冲击气流与环腔气流动量之比, 实验板冲击小孔直径放大到 2.2 mm, 多斜孔直径放大到 2.5 mm。其它几何特征参数保持不变, 以此模拟主燃烧室双层壁。通常主燃烧室壁厚在 1.5 mm ~ 2 mm, 多斜孔孔倾角 α 为 30° 。本文对两组不同几何参数组合成的双层壁实验板进行试验。实验板参数见表 1。

Table 1 Double wall model parameter

Test model	Hole distribution pattern	D/mm	P/mm	S/mm
No. 1 impingement wall	Regular	2.1	21.0	10.6
No. 1 inclined multihole wall	Regular diamond	2.5	10.6	10.3
No. 2 impingement wall	Crushed	2.1	15.0	15.0
No. 2 inclined multihole wall	Long diamond	2.5	7.5	7.5

D : hole diameter; P : hole pitch in one row; S : hole pitch of two adjacent rows.

试验段主气流由风机提供, 流量可以调节。模拟环腔的配气箱横截面为 120 mm × 21 mm, 进出配气箱流量 $\dot{m}_{c1}$ 和 $\dot{m}_{c2}$ 由两孔板测量。孔板在试验前用 LWQ-15 型涡轮流量计仔细的标定。孔板测量精度在 $\pm(2.0\% \sim 3.2\%)$, 当 $\dot{m}_{c1}$ 和 $\dot{m}_{c2}$ 测出后, 实际气流流量就确定了。理论流量可以通过测量配气箱与试验段的压力、温度后用伯努利定律及质量连续方程进行计算。为保证环腔压力与试验段主流压力在一定范围内, 可调节主流路后部的阀门。变化各种流动参数和实验板, 即可得到不同参数影响下的流量系数值。

4 实验结果分析与讨论

4.1 主流速度影响

首先进行主流变化对流量系数影响的试验。试验时保持环腔流速不变, 变化主流流速, 参见图 2。试验结果表明, 主流流速改变对流量系数影响不大, 损失绝大部分是突扩损失, 掺混损失极小。另外随着主流流速增加, 流量系数呈减小趋势, 说明掺混损失逐渐增加, 但幅度极其微弱。因此以后的试验可以忽略主流速度的影响。

4.2 压力参数影响

根据燃烧室实际工作状态的环腔流量, 实验分两组进行: (1) 高环腔流量, 实际流量由二孔板流量计所测流量之差决定。(2) 低环腔流量, 实际流量由小流量浮子流量计所测流量决定。从第一组实验结果可以看出 随着压力参数增加, 流量系数增加, 流量系数增幅相差不大。压力参数在 0~20 范围内流量系数增幅较大, 而高于 20 后曲线趋于水平, 略微下降。压力参数增加导致流量系数增加的原因是孔内气流摩擦损失的影响相对减小, 这个结果与文献 [1~3] 给出的试验结果是一致的。参见图 3~6。第二组实验结果表明流量系数基本为一条直线, 只是由于试验误差, 流量系数随压力参数增大而略微降低, 如图 7 所示。

4.3 几何因素影响

为获得双层壁缝高对流量系数的影响, 对 No.2 双层壁试验板的缝高定为三组进行试验, 分别为 1.0, 2.0, 3.0 倍冲击孔直径。由图 4~6 可以看出: 试验结果基本相当。因此可以说在选定的缝高范围内, 流量系数基本保持不变。

孔排列方式的影响可通过缝高都为一倍冲击孔直径的 No.1, No.2 试验板来得到。通过图 3、图 4 的对比可以看出长菱形排布的当量流量系数为 0.73 左右, 比正菱形排布要高 0.08 左右。当量流量系数 C_{D0} 、冲击孔当量流量系数 C_{Di} 、多斜孔当量流量系数 C_{Dm} 基本都在 0.6~0.8 范围内。 C_{Dm} 比 C_{Di} , C_{D0} 小 0.1 左右。

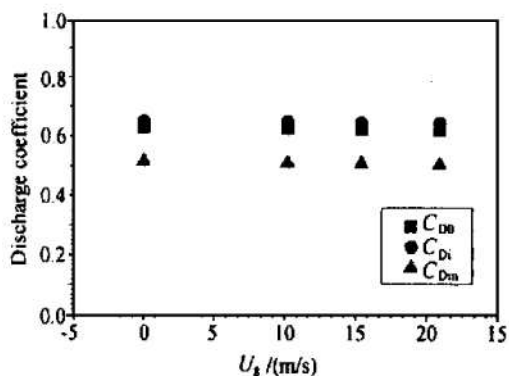


Fig. 2 Influence of the main stream

5 结 论

(1) 本实验选定的参数范围内, 主路气流对流量系数影响非常小, 而环腔流动与小孔内气流流动状态对流量系数的影响较大。

(2) 流量系数随压力参数的变化情况是: 当压

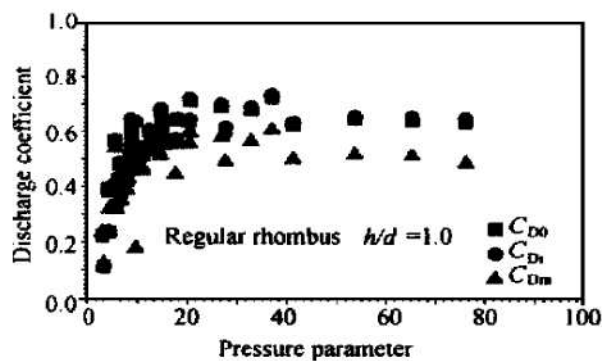


Fig. 3 No. 1 model

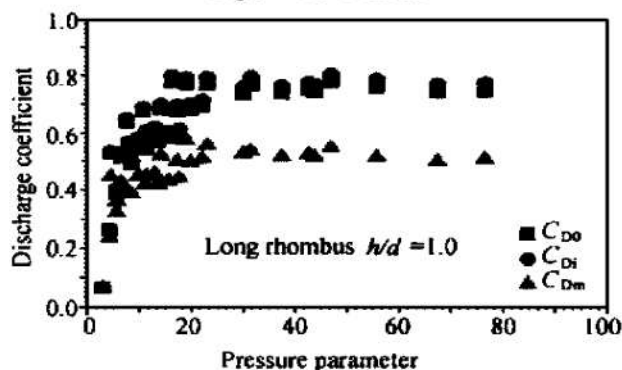


Fig. 4 No. 2 model $h/d = 1.0$

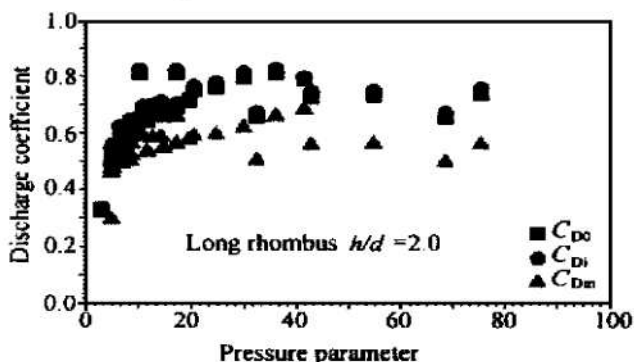


Fig. 5 No. 2 model $h/d = 2.0$

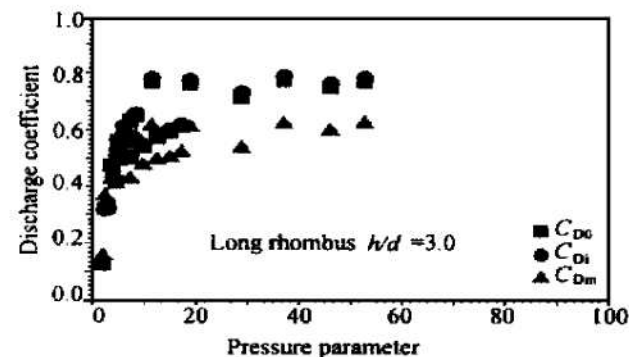


Fig. 6 No. 2 model $h/d = 3.0$

力参数从 0 增至 20, 流量系数迅速增加, 压力参数大于 20 后, 达到一个稳定状态, 即流量系数不随压力参数变化。

(3) 对掺混孔后双层壁的流量系数研究表明,

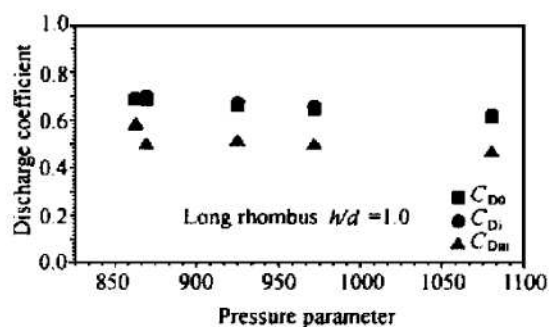


Fig. 7 No. 1 model

此时压力参数对流量系数基本无影响。双层壁中, 冲击壁流量系数大于多斜孔壁流量系数。原因是多斜孔的孔长径比和倾斜进气损失比垂直进气的冲击壁大。

(4) 对不同几何结构实验板的对比研究表明, 双层壁实验板长菱形排布的流量系数值高一些。双层壁夹缝高度的改变对流量系数的影响很小。

主燃区冲击加多斜孔双层壁设计时, 因压力参数小, 流量系数值较低, 对开孔孔径有较大影响, 应避免因开孔面积而导致主燃区冷却气流量较小。设计孔径时需要仔细考虑。

参 考 文 献

- [1] 高 潮, 褚孝荣, 王宝官. 燃烧室壁冲击冷却换热的实验研究 [J]. 推进技术, 1998, 19 (1).
- [2] 林宇震, 李 彬, 宋 波, 等. 多斜孔壁冷却方式不同进气角度小孔内对流换热研究 [J]. 推进技术, 1999, 20 (1).
- [3] Andrews G E, Mkpadi M C. Full coverage discrete hole wall cooling: discharge coefficients [R]. ASME 83-GT-79.
- [4] Hay N, Lampard D, Benmansour S. Effect of crossflow on the discharge coefficient of film cooling holes [R]. ASME 82-GT-147.
- [5] 高 峰. 多斜孔流量系数研究及冷却技术分析 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.
- [6] 方 韧. 燃烧室多斜孔壁流量系数研究 [J]. 航空动力学报, 1998 (1).
- [7] Champion J L, et al. Experimental investigation of the wall flow and cooling of combustion chambers walls [R]. AIAA 95-2498.
- [8] Tay Chu, et al. Discharge coefficients of impingement and film cooling holes [R]. ASME 85-GT-81.

(责任编辑: 盛汉泉)

(上接第 37 页)

通过采用父本的动态适应值、引进共享函数并对演化过程控制参数作适应性调整, 虽然不能完全避免局部最优聚类死区, 但能延迟聚类死区的到来。当聚类死区最终出现时, 采取聚类死区检测与小组合并、大组分裂策略使算法跳出聚类死区。数值实验也证实了这一点。

参 考 文 献

- [1] 谢 涛. 基于进化计算的液体火箭发动机故障诊断研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 1998.
- [2] Rechenberg I. Evolutionstrategie: optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution [M]. Stuttgart: Frommann-Holzboog Verlag, 1973.
- [3] Schwefel H P. Numerische optimierung von computer-modellen mittels der evolutionstrategie [M]. Interdisciplinary systems

Research, Vol. 26, Basel: Birkhuser, 1977.

- [4] Schwefel H P. Numerical optimization of computer models [M]. Chichester, UK: John Wiley, 1981.
- [5] 谢 涛, 张育林. GA-HCM 混合聚类算法及其在液体火箭发动机故障检测中的应用 [J]. 推进技术, 1997, 18 (1).
- [6] 谢 涛, 张育林. 非线性混合回归演化算法研究 [J]. 推进技术, 1998, 19 (5).
- [7] Eric Chen Kuo Tsoa, Bezdek J C, Nikhil R Pal. Fuzzy kohonen clustering networks [J]. Pattern Recognition, 1994, 27 (5): 757~764.
- [8] Phanendra Babu G, Narasimha Murty M. Clustering with evolution strategies [J]. Pattern Recognition, 1994, 27 (2): 321~329.

(责任编辑: 盛汉泉)