

不同排列方式多斜孔壁气膜 冷却绝热温比研究

北京航空航天大学 宋 波** 林宇震 刘高恩 王华芳

【摘要】 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。小孔与壁面夹角为 30° ;复合角为 45° ;孔阵排距比 8.0,侧向间距比 4.0,吹风比为 1.94。比较了各排列方式孔阵绝热温比的分布规律,得出了较优的孔阵排列方式。

主题词: 斜孔板 气膜 冷却 绝热壁温

自由词: 多斜孔壁

分类号: V231.1

1 引 言

随着现代航空燃气涡轮发动机性能的不断提高,涡轮进口温度越来越高,使得燃烧室及涡轮部件的热负荷大大增加;相应地,对冷却技术提出了更苛刻的要求。一种适应上述发展需要的冷却技术就是多斜孔壁气膜冷却,见图 1^[1]。气膜冷却的一项重要研究内容就是研究其绝热温比。预估受热部件的热载荷以及壁温的计算都必须先知道绝热温比。绝热温比的定义式为 $\eta = (T_\infty - T_{aw}) / (T_\infty - T_j)$, 式中 T_∞ 为燃气侧主流温度, T_{aw} 为被冷却壁面绝热壁温, T_j 为冷却气流温度。绝热温比 η 实际上反映了气膜冷却保护的有效性, η 值的大小和分布是衡量气膜冷却方案优劣的重要尺度。

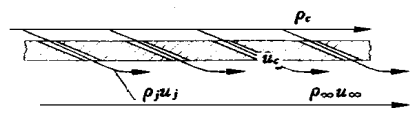


图 1 多斜孔壁气膜冷却

影响多斜孔壁气膜冷却绝热温比的因素很多,大致分为两大类:一是流动参数,如最典型的吹风比($M = \rho_j U_j / \rho_\infty U_\infty$);二是几何参数,如开孔率、孔阵间距、小孔与壁面倾角 α 及与主流方向的偏角 β (或称为复合角)。已有的关于离散孔气膜冷却的研究多限于单孔、单排孔的基础性研究^[2],多排孔气膜冷却由于各孔射流的相互作用而体现出更大的复杂性,研究手段大都依靠实验,这方面的报道很少^[3,4],文献[5]对此作了系统总结。

在多斜孔壁冷却方案的设计中,考虑到具体流动状况、加工难度限制及冷却空气污物对小孔的堵塞,影响绝热温比的流动参数和几何参数不能任意选取,但这时若采用不同的孔阵排列方式可获得不同的气膜冷却效果。因此,研究不同的孔阵排列方式对气膜冷却的影响具有重要的意义。本文针对多斜孔壁气膜冷却方案,在流动参数和几何参数相同的情况下,实验研究了

1997 年 12 月收稿;1998 年 2 月收到修改稿。

** 男 28 岁 硕士 讲师 北京航空航天大学热动力研究所 100083

不同排列方式孔阵的绝热温比(包括顺排、叉排、有无复合角),获得了较优的孔阵排列方式。

2 实验系统及参数

本实验采用传热传质类比方法,通过测定非渗透壁异性气体(CO₂)浓度来获得气膜冷却的绝热温比 η 。当一个传热过程和一个传质过程的流动完全相似,即描述它们的连续方程和动量方程相同且边界条件不变,同时分子刘易斯数 $Le = Sc/Pr = 1$ 及湍流刘易斯数 $Le_t = Sc_t/Pr_t = 1$ 时,传热的能量方程和传质的质量扩散方程的解具有完全相同的形式。实验中,非渗透壁相应于绝热壁,测出非渗透壁表面 CO₂ 浓度 C_{iw} , 已知射流 CO₂ 浓度 C_j 和主流 CO₂ 浓度 C_∞ ($C_\infty = 0$), 由浓度比 $\eta = (C_\infty - C_{iw}) / (C_\infty - C_j) = C_{iw} / C_j$ 来代表绝热温比 $\eta^{[6]}$ 。本实验中, $Sc = 0.98$, $|T_\infty - T_j| \leq 3^\circ\text{C}$, 忽略热扩散影响, 传质过程的 η_c 和传热过程的 η 可认为相等。文献[7]对此作了详细论证。

实验系统的主流为常温空气, 由风机提供, 通过阀门控制流速, 经由稳定箱后进入实验段。冷却射流由压缩空气和 CO₂ 气体以一定比例混合成具有确定 CO₂ 浓度的混合气来模拟, 通过浮子流量计监控流量以确定射流流速。实验段安装有被测多孔板和移位取样机构, 通过取样探针贴壁抽取多孔板不同位置点的气体, 送入红外线气体分析仪测量 CO₂ 浓度。该仪器的测量范围为 0~5% (CO₂), 精度为 0.5%。详细的实验系统介绍及操作过程见文献[6]。

实验参数如下: (1) 实验在常温常压下进行, $p_0 = 101.325\text{ kPa}$, $t_0 = 23^\circ\text{C}$; (2) 主流流速 $u = 22.0\text{ m/s}$; (3) 吹风比 $M = 0.75, 1.20, 1.94$; (4) 射流混合气 CO₂ 浓度 $C_j = 4.5\%$ 。

实验板几何参数见表 1。图 2 给出了实验板的测量坐标系。第一排孔的中间一列孔孔口下游边缘定义为坐标原点, 主流流向为 x 坐标, 侧向为 z 坐标。

表 1 实验板几何参数

板号	D	P/D	S/D	L/D	α	β	排列方式
1	1.5	4.0	8.0	6.7	30	0	顺排
2	1.5	4.0	8.0	6.7	30	0	叉排
3	1.5	4.0	8.0	6.7	30	45	叉排
4	1.5	4.0	8.0	6.7	30	45	顺排

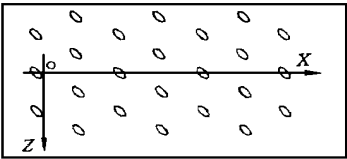


图 2 实验板测量坐标

表中: D 为孔直径(mm), P/D 为孔侧向间距, S/D 为孔排间距, L/D 为孔长径比, α 为孔与壁面倾角($^\circ$), β 为孔与主流流向偏角或复合角($^\circ$)。

3 实验结果及分析

本文在吹风比 $M = 0.75, 1.20$ 和 1.94 下分别测定了上述 4 种具有典型代表性的孔阵排列方式的绝热温比 η 的分布情况, 发现吹风比 M 对 4 种孔阵 η 的影响体现了相同的规律, 即 M 增大, 孔阵前几排 η 略减小, 再往下游区域 η 则有所提高; 同时发现 $M > 1.0$ 后, 这种变化趋势已很小, 可认为 $M > 1.0$ 时对 η 几乎无影响^[5], 故本文只讨论 $M = 1.94$ 时 4 种孔阵 η 的实验结果就已具有代表性。另外, 由于 η 在孔阵中分布的侧向对称性, 研究两列孔间区域 η 的分布既可反映整个孔阵上的规律^[6], 所以本文的侧向 z 坐标测量范围只涉及两列孔间区域。多排孔阵 η 的分布规律不同于单孔或单排孔在于各排各列孔射流叠加而使多排孔阵 η 的分布呈现出整体特性。因此, 研究排列方式对 η 的影响只有针对孔阵前几排后的下游区域才有意义。本文

将讨论 4 种孔阵第 5 排孔下游 η 的变化规律, 欲了解 η 在整个孔阵的分布情况请参阅文献 [6]。

图 3~6 分别给出了 $M=1.94$ 时 4 种孔阵第 5, 6, 7 排后绝热温比 η 的分布情况。图 3 为顺排无复合角孔阵 η 的分布, 孔正下游 ($Z/D=0$) η 由 1.0 迅速减小, 至下一排孔, 重现相同的分布规律, 只是每往下游一排 η 值略有提高; 孔列间 ($Z/D=1.0, 2.0$) η 值明显低于孔正下游 η 值, 随 X 坐标逐渐缓慢升高, 这一区域显然为气膜保护薄弱区。各排间 η 值的逐渐增大清晰地体现了多排孔阵气膜冷却的叠加效应。图 4 为叉排无复合角孔阵 η 的分布, 各列孔正下游 η 的分布与顺排无复合角情形相似, 不同在于孔正下游 η 由 1.0 下降幅度小, 孔列间 ($Z/D=1.0$) η 值明显提高, η 值最大区域交替出现在 $Z/D=0$ 和 $Z/D=2.0$ 孔列。由图 3 和图 4 比较可以看出: 叉排孔阵较之顺排孔阵不仅总体冷却保护水平明显提高, 且气膜覆盖均匀性亦大有改善。其根本原因就在于 $Z/D=0$ 和 $Z/D=2.0$ 交错开设孔列, 避免了顺排情况下 $Z/D=2.0$ 这一列气膜覆盖最薄弱区。

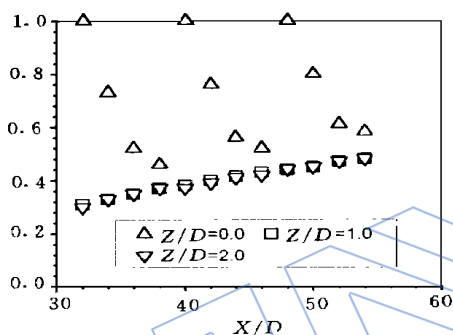


图 3 顺排无复合角孔阵 η 的分布

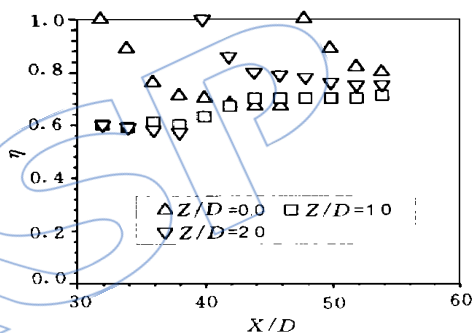


图 4 叉排无复合角孔阵 η 的分布

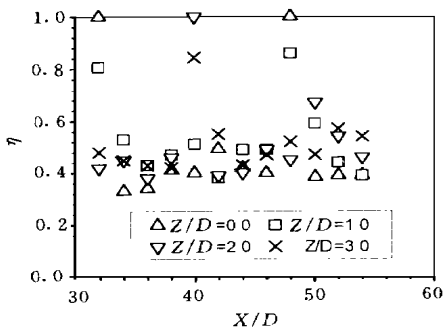


图 5 叉排加复合角孔阵 η 的分布

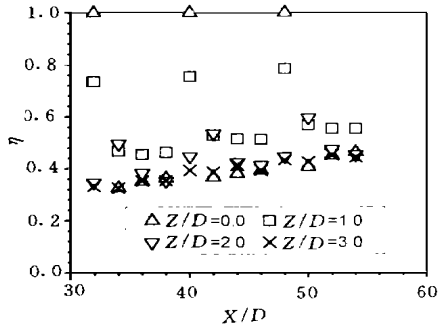


图 6 顺排加复合角孔阵 η 的分布

图 5 为叉排加复合角孔阵 η 的分布, 相对于叉排无复合角孔阵, 复合角的引入使 $Z/D=1.0, 3.0$ 的区域冷却保护有所加强, 但孔正下游 ($Z/D=0, 2.0$) 的区域 η 值下降幅度更大, 对 η

分布侧向均匀性无明显改善,冷却保护总体水平有所下降。图 6 为顺排加复合角孔阵 η 的分布,相对于顺排无复合角孔阵,孔列间的 η 值有所提高,气膜覆盖的侧向均匀性变好,而冷却保护总体水平无明显改变。复合角对孔阵 η 的影响一方面对侧向均匀性有利,可加强列间气膜保护;一方面由于复合角使冷却射流与主流夹角变大从而更难贴壁形成气膜,导致冷却保护效果降低,所以对气膜冷却的总体水平的影响由这两方面因素综合决定,因此,复合角的采用要针对具体情况综合考虑。

图 7 整理给出了 4 种孔阵排列方式的侧向平均绝热温比 η 的比较。定义为侧向 4 列($Z/D = 0, 1.0, 2.0, 3.0$)的算术平均绝热温比,以代表气膜冷却保护的总体水平。由图可见,叉排无复合角孔阵给出了最高的 η 值,且 η 值沿 X 坐标变化最小,说明这种孔阵不仅气膜冷却保护总体水平最高,并且沿主流方向(X 坐标)气膜保护均匀性最好。复合角的采用使得叉排孔阵气膜冷却保护总体水平明显下降,沿主流方向均匀性变差。对于顺排孔阵,复合角的采用使气膜冷却保护总体水平有所提高,沿主流方向均匀性无改善。

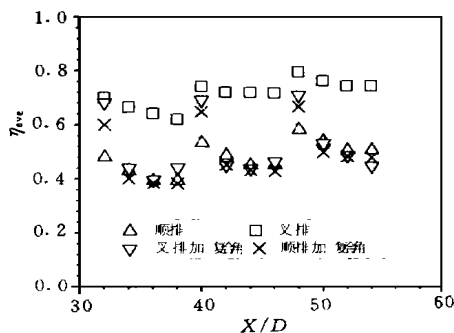


图 7 4 种孔阵排列方式 η 的比较

4 结 论

- (1) 在多斜孔壁气膜冷却方案中,叉排孔阵排列方式明显优于顺排,表现在更高的气膜冷却水平和更均匀的气膜保护。
- (2) 复合角会降低叉排孔阵气膜冷却效果,叉排孔阵不宜采用复合角;复合角对顺排孔阵气膜冷却有利,顺排孔阵宜采用复合角。
- (3) 4 种孔阵排列方式中,叉排无复合角孔阵为最优。

参 考 文 献

- 1 方韧,李彬,林宇震,刘高恩.多斜孔壁气膜冷却绝热温比传热质类实验研究.航空动力学报,1998,13(1):65-68
- 2 葛绍岩,刘登瀛,徐靖中,李靖.气膜冷却.北京:科学出版社,1985
- 3 Sasaki M, Takahara K, Kumagai T, Haman M. Film Cooling Effectiveness for Injection from Multirow Holes, ASME Paper 78-GT-32, 1978
- 4 Mayle R E, Camarata F J. Multi-hole Cooling Film Effectiveness and Heat Transfer. Trans. of Heat Transfer, 1975, 97
- 5 林宇震.燃烧室多斜孔壁气膜冷却研究:[博士学位].北京航空航天大学,1997
- 6 宋波.燃烧室多斜孔壁冷却方式研究:[硕士学位论文].北京航空航天大学,1995
- 7 李立国.传热传质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

(责任编辑 杨再荣)

AN ENGINEERING EVALUATION SYSTEM OF TURBINE DISC COOLING CONFIGURATION

Ding Shuiding, Tao Zhi, Xu Guoqiang, Qiu Xuguang

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

ABSTRACT

An engineering evaluation system is proposed to appraise the fluid flow and heat transfer in a turbine cooling configuration of an aero-engine. The system includes resistance evaluation, heat transfer evaluation and temperature distribution evaluation. The former determines the whole system flow friction loss, the later two determine the relative cooling effect and the level of thermostress. The relationships of rotating Reynolds number, cooling air Reynolds number, Grashoff number with the three evaluations have been investigated experimentally. The engineering evaluation system serves as a tool to optimize turbine cooling configuration system.

Key Words Discs Cooling Optimization

A STUDY ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN HOLES OF INCLINED MULTIHOLE WALL FILM COOLING

Lin Yuzhen, Song Bo, Li Bin, Liu Gaoen

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 710072)

ABSTRACT

The local and the overall convective heat transfers inside the small holes have been investigated experimentally for the inclined multihole wall film cooling, according to the similarity theory. The results demonstrate that the convective heat transfer intensifies very greatly in the region inside the hole entrance. The results also reveal that the Reynolds number of the hole has strong influence on the convective heat transfer. The higher the Reynolds number, the more intensive the convective heat transfer inside the hole.

Key Words Multihole wall Cooling Heat convection

AN INVESTIGATION ON FILM COOLING EFFECTIVENESS OF INCLINED- MUTIHOLE WALLS WITH DIFFERENT PATTERNS

Song Bo, Lin Yuzhen, Liu Gaoen, Wang Huafang

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

ABSTRACT

An experimental investigation on the film cooling effectiveness of the inclined- multihole walls with different patterns (In- line, Staggered, In- line+ compound angle, Staggered+ compound angle) was conducted by using the method of heat- mass transfer analogy. The holes were inclined with 30° to the wall surfaces and the compound angle was 45° to the mainstream. The multihole patterns were arranged with streamwise row- to- row spacings of eight hole diameters and spanwise hole pitch- to- diameter ratio of four. The superior mutihole pattern was found out from the experiments.

Key Words Multihole wall Gasfilms Cooling Adiabatic wall temperature