

多斜孔壁冷却方式小孔内对流换热研究

北京航空航天大学 林宇震* 宋波 李彬 刘高恩

【摘要】 研究了多斜孔壁冷却方式小孔内对流的局部和平均换热情况。研究方法是相似理论指导下的实验研究。研究结果表明: 小孔进口区的换热增强幅度较大, 并且在进口区不同的位置上增幅存在差别; 孔内雷诺数对换热增强幅度影响较大, 孔内雷诺数越高, 换热增强越大。

关键词: 斜孔板 冷却 对流换热

分类号: V 231. 1

1 引言

为满足现代航空燃气涡轮发动机日益提高的性能对主燃烧室火焰筒壁冷却提出的要求, 发展了多斜孔壁冷却方式。文献[1]的研究与多斜孔壁工作状态有显著差距: 一是孔进口处气流主流无流动; 二是小孔雷诺数很低, 在 1000~10000 之间, 实际情况中孔内 Re 数大于 10^4 ; 三是小孔垂直于壁面。这与本文研究的多斜孔壁存在显著区别。从流动角度来考虑换热问题, 倾斜小孔内对流换热可认为是一类小孔进口处具有主流流动的圆管进口区换热。文献[2]归纳的各种圆管进口区换热数据, 都与本文研究倾斜小孔对流换热有很大区别。本文研究单个孔内部局部换热系数, 并且考虑孔内 Re 数及冷却气环腔主流流动影响。

2 研究方法及实验研究系统

图1是多斜孔壁冷却方式的燃烧室火焰筒壁的基本构造。其主要特征是: 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。一般而言, 小孔直径为 0.5~1.0 mm, 小孔长径比 $l/d = 3 \sim 8$, 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 $\beta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 。其冷却的基本过程是: 冷却气在环腔流动, 冷却火焰筒壁的冷侧, 遇到小孔时, 冷却气流入小孔。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。



图1 多斜孔壁冷却方式

对于多斜孔壁冷却方式换热特性, 存在多个倾斜小孔内部对流换热显著特点。多斜孔内部对流换热系 h_{hc} 的定义式: $h_{hc} = q_{hc} / (T_{hw} - T_c)$ 。公式中温差选择是孔内表面温度与冷却气进口温度之差, 研究过程中, 若热流 q_{hc} 确定, T_{hw} 测出, 则孔内换热系数 h_{hc} 随之确定。

孔内对流换热系数采用相似理论导下的实验研究。经过分析,确定影响孔内对流换热系数的定性准则有孔内 $Re = \rho u_h d / \mu$, 速度比 H (定义为孔内气流流速 u_h 与环腔气流进口流速 u_c 之比) 及孔与壁面倾角 α [4]。实际模化实验时,须将小孔放大,放大后多个孔的模拟较为困难,只模拟一个孔,于是采用一个倾斜圆管模拟小孔。实验方法采用恒热流法。恒热流由电加热丝提供,实验时给定电加热功率,测出管壁局部温度及冷却气温度,即可计算出换热系数 h_{hc} 。

由实验得到的换热系数 h_{hc} 值表达成一个局部位置的 $N_{u_{hc}}$ 与相同 Re 数下,管流充分发展时的 $N_{u_{\infty}}$ 的比值,以直接表示在倾斜小孔内局部换热系数的增强。则小孔内对流换热增强系数 E_h 为: $E_h = N_{u_{hc}} / N_{u_{\infty}} = h_{hc} / h_{hc0}$ 式中: $N_{u_{hc}} = h_{hc} d / \lambda_c$; $N_{u_{\infty}} = h_{hd} / \lambda_c = 0.022 Pr_c^{0.5} Re_h^{0.8}$ (该式来源于文献[3])。其中, d 是冷却孔的直径, λ_c 是冷却气导热系数。 Pr_c 与 Re_h 分别是通过小孔冷却气的 Pr 数与 Re 数。

因为只用一根圆管来模拟小孔,并且为形成与多斜孔壁小孔进口时的相似流动,实验件设计为:在一块板基上开一倾斜椭圆孔,然后将预埋热电偶和包裹电加热丝和绝热层的实验管组件装配到板基上,保证圆管进口与板基齐平,板基与三块侧壁形成矩形通道 ($30 \times 120 \text{ mm}^2$),以模拟气流进入小孔前的环腔流动,如图 2 所示。实验管由 1Cr18Ni9Ti 圆管加工而成,外径 $\Phi 12 \text{ mm}$,壁厚 0.5 mm ,主要加工两个端面,端面之间相互平行,并与管中心线成 30° 夹角。壁温测量用直径 $\Phi 0.1 \text{ mm}$ 的镍铬—镍硅热电偶。热电偶总数 28 对,在管外壁的位置如图 2 所示,实验时测量管外壁温度,然后换算成相应位置的内壁表面温度。沿 A、B、C、D 四条圆管母线上布置热电偶。以每条母线在管进气口为坐标原点 O,母线方线为 X 轴方向,采用这样一个坐标系统的原因是保证测量点距孔进口距离有一个统一度量标准,是一种相对坐标系。

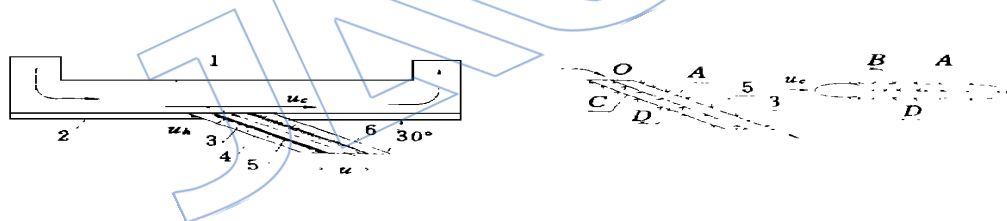


图 2 小孔内对流换热实验件构造及测温热电偶布置

(1. 冷却气通道 2. 板基 3. 模拟小孔的圆管 4. 绝热层 5. 测温热电偶 6. 电加热丝)

采用一个数据采集板记录所测温度。温度测量数据采集系统在实验前经过仔细标定,误差小于 0.25°C 。电加热层用铁铬铝电加热丝,在电加热层外面再包裹一层软泡沫塑料,其导热系数 $\lambda_p = 0.043 \sim 0.056 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,以减少加热量的损失。实验管的倾斜角 $\alpha = 30^\circ$,偏转角 $\beta = 0^\circ$ 。实验系统的配置及各参数测量精度分析见文献[4]。实验时环腔流速 u_c 在 $0.5 \sim 7 \text{ m/s}$ 之间,小管内流速 u_h 在 $12.5 \sim 70 \text{ m/s}$ 之间,气流为室温空气,温度在 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 之间,速度比 H 在 $4 \sim 20$ 之间,管内雷诺数 Re 在 $10000 \sim 56000$ 之间,管壁加热温度在 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间。

3 实验结果及分析

3.1 热流均匀性实验

当实验用小孔内对流实验管完成后,在通电电压 8.56 V ,通电电流 0.204 A 时,室温 $T = 19.5^\circ\text{C}$ 时的进行热流均匀性实验。此时小管内无流动。测量了绝缘层外温度及 A、B、C 和 D 四条测量线的上温度值,各测量线上的温度值见图 3。结果发现绝缘层外温度平均为 21.3°C ,说

明绝热很好。4 条测量线上最大温差在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,说明电阻丝热流量非常均匀。

为对实验结果分析便于展开,定义两项平均换热增强

强系数:周向平均换热增强系数 $\bar{E}_h = \sum_{i=1}^4 E_h \frac{(x/d)_i}{4}$,具

体含义是将周向 4 个 x/d 相同的换热增强系数作算术

平均,以期反应出不同 x/d 位置上换热改变强度;总平

均换热增强系数 $\bar{E}_{ha} = \sum_{i=1}^n (\bar{E}_h \cdot F) i$ 。式中 $\bar{E}_h$ 是不同的

$\frac{x}{d}$ 位置上周向平均换热增强系数, F 是加权系数。根据不

同管长, F 有不同的值, F 计算由每一相同 x/d 位置测量

点影响范围确立。总平均换热增强系数反映了一定孔(管)长度下换热总增强幅度^[4]。

3.2 局部分布特点

图 4 是该实验管在速度比 $H = 19.80$, 管内雷诺数 Re_h 分别是 10676 和 51783 时的局部换

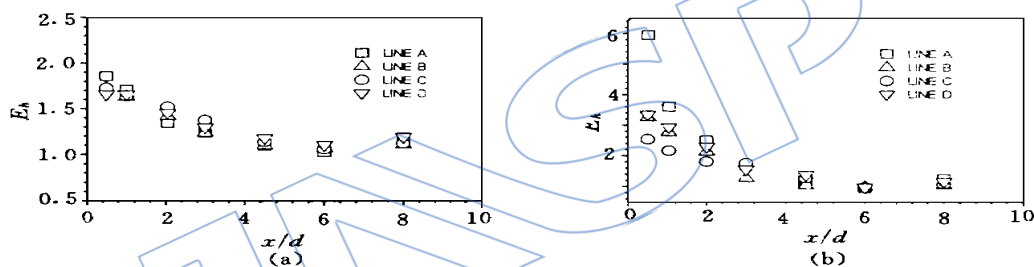


图 4 局部换热增强系数分布 (a) $H = 19.79$, $Re_h = 10676$ (b) $H = 19.83$, $Re_h = 51783$

热增强系数分布图。流动大致情形是:气流在环腔内向前流动,流经小孔时,一部分气流折转流入小孔。流入小孔的气流在孔进口处发生分离,流束形成局部收缩,存在涡流,然后流束重新扩张,直到与小孔壁面接触,成为充满流动直至出口^[1,5]。从图中可以看出,在 $x/d < 2.0$ 时测量线 A 上的局部换热系数值时是最高的,并且随着 Re_h 增加,测量线 A 上的 E_h 增加幅度比其它三条测量线上大。在 $x/d \geq 2.0$ 后,各测量线上的局部换热增强系数逐渐趋于一致。在 $x/d \geq 4.0$, 各测量线上的局部换热增强系数基本相等。测量线 B, D 上的 E_h 值在沿所有管长的区域内基本相等,说明换热情况是对称的。测量线 C 局部换热增强系数 E_h 值在较小管内雷诺数 Re_h 时与 B、D 两条线上测量值基本相等;在较大管内雷诺数 Re_h 时,在管进口区 $x/d < 2.0$ 时,测量线 C 上的局部换热增强系数 E_h 值比测量线 B、D 上的 E_h 值小,其他区域内基本相同。从各测量线上的局部换热增强系数 E_h 沿管长度方向的变化情况来看,在 $0.0 \leq x/d < 6.0$ 的范围内,换热增强,换热增强系数 $E_h \geq 1.0$ 。并且在孔进口处换热增强最高,然后逐步降低,在 $x/d = 6.0$ 处,基本上所有状态下实验结果表明此处的换热增强系数 E_h 值为 1.0 左右。从这个分布趋势来看,孔进口区的影响要持续到 $x/d = 6.0$ 处。在沿管长 $6.0 < x/d \leq 8.0$ 范围内,换热增强系数又逐步增加。在 $x/d = 8.0$ 处, E_h 值在 1.1~1.2 之间。造成上述局部换热增强系数分布的原因是:在孔进口区气流从环腔进入小孔时, A 测量线这一区域在进口处气流分离程度比 B, C 和 D 这 3 条线上分离程度要高。文献[5]研究单个斜孔进气冷侧流动时发现了这一特点,

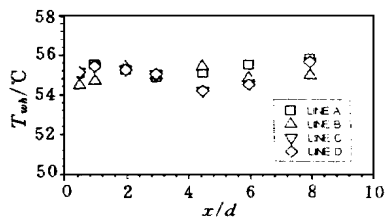


图 3 小孔内对流换热实验管
热流均匀性标定

所以导致 A 测量线在孔进口处换热增强比其它区域强。当进口气流分离的影响逐渐减弱后, 各测量线上的局部换热增强系数就逐步减小并趋于一致。这与通常管进口处无整体主流流动的管进口区换热分布有所不同, 它并不是一个对称的分布。在接近孔出口处, 小孔射流的影响有所回传, 因此在此处各测量线上的局部换热增强系数又有所增加。

3.3 管内雷诺数 Re_h 影响

图 5 是该实验管的周向平均换热增强系数图。由图可知, 当速度比相同的情况下, 在 $0.0 \leq x/d < 4.5$ 这一区域里, 随着管内 Re_h 增加, 这个区域内的周向平均换热增强系数 $\bar{E}_h$ 也增加, 并且随着 Re_h 增加, $\bar{E}_h$ 增加幅度越大。在 $4.5 \leq x/d \leq 8.0$ 这一区域内, 周向平均换热增强

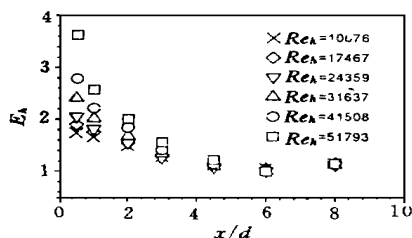


图 5 周向平均换热增强系数分布

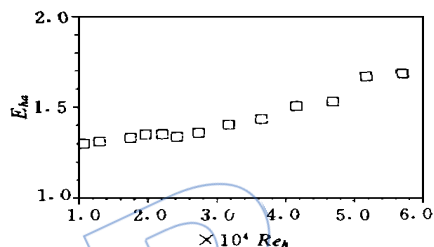


图 6 总平均换热增强系数

系数基本相等, 并不随管内雷诺数的变化而发生很大的变化。图 6 是该实验管的总平均换热增强系数图。由图可见, 在相同速度比 H 情况下, 管内雷诺数 Re_h 增加, 总平均换热增强系数 $\bar{E}_{ha}$ 增加。这一点说明在相同速度比 H 情形下, 管内雷诺数 Re_h 增加, 使得管进口区换热增强, 并且 Re_h 越大, 进口区换热增强越高。原因是管内雷诺数增加, 虽然速度比相同, 但管进口区湍流强度增加, 因此导致管口区换热增强。并且雷诺数 Re_h 越大, 湍流强度增幅比低 Re_h 时增幅大, 因此换热增强系数增幅变大。

小结 对进口处环腔气流主流存在流动的倾斜圆管内换热系数研究表明: (1) 管内雷诺数 Re_h 越大, 管内换热增强越强; (2) 倾斜圆管进口区换热增强区域不同。在 $8.0 \geq x/d > 4.0$ 的区域换热增强基本一致; (3) 孔进口区对换热增强的影响要持续到 $x/d = 6.0$ 处。

参 考 文 献

- Andrews G E, Alikhanpadeh M et al. Small Diameter Film Cooling Holes: Wall Convection Heat Transfer. ASME 86-GT-225, 1986
- Rohsenow W M et al (Ed). Handbook of Heat Transfer Fundamentals (Second Edition) Mc Graw - Hill Book Company, 1985
- Kays W M, Crawford M E. Convective Heat and Mass Transfer Mc Graw - Hill Book Company, 1980
- 林宇震. 燃烧室多斜孔壁气膜冷却研究: [博士论文]. 北京航空航天大学, 1997
- Byerley A R. Heat Transfer Near the Entrance to a Film Cooling Hole in a Gas Turbine Blade AD- A 217396, 1989

(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 MULTI-HOLE 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 multi-hole 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 Multi-hole wall Cooling Heat convection

AN INVESTIGATION ON FILM COOLING EFFECTIVENESS OF INCLINED - MULTI-HOLE 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 - multi-hole 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 multi-hole patterns were arranged with streamwise row-to-row spacings of eight hole diameters and spanwise hole pitch-to-diameter ratio of four. The superior multi-hole pattern was found out from the experiments.

Key Words Multi-hole wall Gas films Cooling Adiabatic wall temperature