

文章编号: 1000-8055(2002) 03-0341-03

封闭空间内单孔冲击局部换热特性研究

许全宏, 林宇震, 刘高恩
(北京航空航天大学 热动力工程研究所, 北京 100083)

摘要: 在相似理论指导下用恒热流方法研究了封闭空间内单孔冲击局部换热系数。总结了不同流动、几何结构参数对冲击换热系数影响的一些规律。并且根据线性拟合法给出单孔冲击平均换热系数的拟合公式, 从而为工程设计和科研提供一定的依据。

关键词: 冲击; 冷却; 换热系数

中图分类号: V 231. 1

文献标识码: A

Investigation of Impingement Heat Transfer of Single Hole in a Limited Space

XU Quan-hong, LIN Yu-Zhen, LIU Gao-en

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of the similarity theory, the local impingement heat transfer coefficient of a single hole impinging on a plate in a limited space was studied with constant heat flux methods. The relationship of various flow and structure parameters with the impingement heat transfer coefficient was summarized, also the fitting equations of average impingement heat transfer coefficient were given according to the linear simulation. The results could be useful for the engineering design and scientific research.

Key words: impingement; cooling; heat transfer coefficient

1 引言

随着高性能燃气涡轮发动机燃烧室进口温度的不断提高, 对火焰筒冷却的要求越来越高, 需要高效的冷却方法或新型耐高温材料。本文结合火焰筒壁的结构特点, 研究在封闭空间内冲击冷却换热系数, 为主燃烧室火焰筒壁的工程设计和壁温计算提供依据。

局部冲击换热系数的定义式由牛顿冷却公式得出:

$$h_i = \frac{q}{T_w - T_i} \quad (1)$$

式中: h_i 为冲击换热系数, T_w 为冲击靶板的壁温, T_i 为冲击射流温度。关于单孔冲击换热研究, 文献[1]给出了单孔无封闭的平板冲击换热特性, 研究了射流紊流度对冲击换热的影响; 文献[2~4]是关于涡轮叶片冲击换热的研究。其结构和流动都与本实验有较大的区别。文献[5]研究了有横流时, 单孔冲击换热系数在冲击距离为冲击孔直径的6倍时存在极值。本文针对主燃烧室火焰筒壁的结构特点, 对单孔冲击特性展开实验研究。

2 冲击换热系数实验

对局部冲击换热系数采用相似理论指导下的

收稿日期: 2001- 06- 04; 修订日期: 2001- 12- 01

作者简介: 许全宏(1969-), 男, 吉林通化人, 北京航空航天大学热动力工程研究所博士后,

主要从事工程热物理以及航空发动机燃烧室研究。

实验研究,通过对双层壁间冷却气体流动及换热微分方程的无量纲分析,推出相似准则以指导模化实验,相似准则如下:

$$Nu = f (Re_i, \text{双层壁无量纲几何参数})$$

(2)

实验方法采用恒热流法,最终将实验得到的换热系数 h_i 值表达成 Nu_i 数。

$$Nu_i = \frac{h_i - d_i}{\lambda}$$

(3)

式(3)中, d_i 是冲击孔的直径, λ 是冷却气流的导热系数。

2.1 双层壁实验板结构

由于实验研究的是局部换热系数,为确保实验精度,根据相似准则,将冲击孔放大到10.4 mm。加热带选用厚度等于0.05 mm的1Cr18Ni9Ti薄钢带,沿冲击靶板长度方向粘贴3条加热带,中间的1条下面布置测温电偶,在加热带两端设有引线端子,以便给加热带直接通电加热。采用夹布胶木出于以下考虑:即导热系数很低, $\lambda=0.05\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。加热带导入板热量可以减到很低程度,且加工方便。另外可消除孔内换热对加热带温度的影响。

2.2 实验系统

需要测量的参数有:加热带表面温度、冷却气流温度和加热带加热功率。实验系统见图1。冷却气由最大压力可达1 MPa的中压储气罐1提供,由浮子流量计3测量气体流量。自耦变压器8将220 V交流电降至实验所需电压,通过精密电压表6与电流表7测量加热功率。加热带温度测量用镍铬—镍硅热电偶,电流与电压测定用DF-4600型数字万用表,气流温度用水银温度计测出。

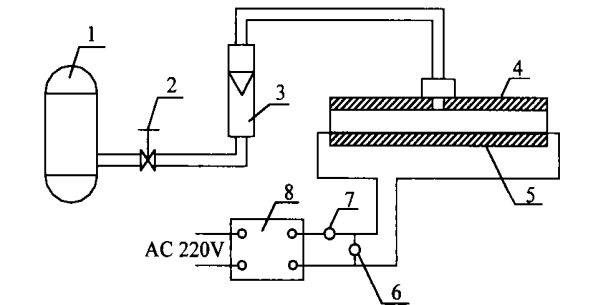


图1 单孔冲击实验系统

Fig. 1 Schematic of experiment system

2.3 实验参数

实验参数见下表。

表1 实验参数范围

参 数	符 号	数 值
冷却气流雷诺数	$Re_i = \rho u_i d_i / \mu_i$	5000~40000
冲击射流速度/(m/s)	u_i	20~70
冷却气温度/($^{\circ}\text{C}$)	T_i	10~20
加热带温度/($^{\circ}\text{C}$)	T_w	80~150

3 实验结果及分析

3.1 热损失试验

首先进行热损失实验,目的在于修正换热实验的热损失。在一定的加热量下,待试件温度稳定后测出对应这一工况下的加热带表面温度 T_w 及环境温度 T_i 。改变不同的加热量值 q ,测出各个稳态情况下的 $(T_w - T_i)$ 值。然后作出热损失修正曲线。

3.2 总分布趋势

由 $H/d=1.0$ 的封闭空间单孔冲击实验结果

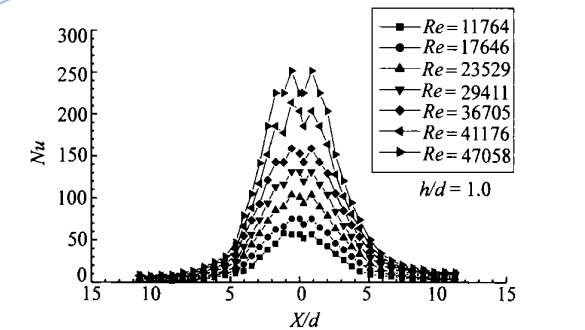


图2 单孔冲击换热实验 $H/d=1.0$

Fig. 2 Test result of $H/d=1.0$

图2来看,在距离冲击孔口直径3~5倍距离内效果比较明显。与文献[1~4]的结果基本一致。可以说在5倍冲击孔直径距离内可以有效地增强冷却效果。

3.3 冲击雷诺数影响

努塞尔数随气流雷诺数的增大而增大。低雷诺数时变化平缓,高雷诺数时,峰值陡峭。从 $H/d=1.0$ 的单孔冲击特性实验的曲线图上可以清楚地看到在冲击点附近曲线呈双峰分布这一特点。

表2 冲击加多斜孔双层壁实验板平均换热系数拟合公式系数

	缝高 H/d_i	a	e	f
单孔	0.7	1.470×10^{-3}	1.0528	- 0.8584
冲击	1.0	5.240×10^{-3}	1.1111	- 1.2936
特性	1.5	5.335×10^{-3}	0.9701	- 0.2436
实验	2.0	1.316×10^{-3}	1.1915	- 0.7680
板	3.0	6.927×10^{-3}	1.0146	- 0.7633

3.4 缝高影响

由实验结果可以得出以下结论: 缝高的变化范围是从0.7倍冲击孔径到3.0倍冲击孔径, $H/d = 2.0$ 努赛尔数最高, $H/d = 3.0$ 努赛尔数略低一些, 大约低10%。 $H/d = 0.7, 1.0$ 和 2.0 的努赛尔数基本相等。

3.5 分布曲线及拟合公式

从实用的角度, 本文给出了根据线性拟合法得出的单孔冲击平均特性的拟合公式, 为设计和科研提供一定的依据。平均的方法采取单个测量点所测量的努赛尔数 Nu 及其影响区域进行加权平均, 计算公式如下:

$$\overline{Nu_i} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \tag{4}$$

单孔冲击特性拟合公式如下:

$$Nu_i = a (Re_i)^e \left(\frac{d}{d_i} \right)^f \tag{5}$$

其中: a 为拟合系数, e 和 f 为拟合指数, a, e 及 f 具体数值见表2。

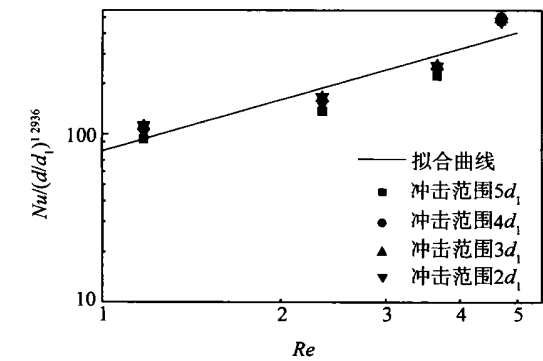


图3 平均换热系数分布及拟合曲线

Fig.3 Average result and fitting curve

$H/d = 1.0$ 的平均换热系数分布及拟合曲线如图3。由图可见, 实验点的平均值可由拟合公式满意地表达, 最大计算误差小于9.7%。

4 结 论

通过对单孔冲击特性冲击换热系数的研究发现:

- (1) 随着冲击雷诺数 Re_i 增加, 冲击换热系数也呈增加趋势。从实验数据来看, 二者基本呈线性关系。
- (2) 对本实验确定的不同缝高实验结果表明, 缝高为2时换热系数达最大值。
- (3) 由单孔冲击特性实验曲线可以看出: 单孔冲击冷却的有效范围在4倍冲击孔直径范围内, 所以在实际应用中冷却范围应选在4倍冲击孔直径范围内。可以有效地增强冷却效果。

参考文献:

[1] Gardon R, et al. The Role of Turbulence in Determining the Heat-T transfer Characteristics of Impinging Jets[J]. Int. J. Heat Transfer, 1965, (8): 1261- 1272.

[2] 邱绪光等. 气冷叶片典型内冷结构的流动与换热研究技术总结报告[R]. 北京: 北京航空航天大学, 1992.

[3] Hrycak P, et al. Experimental Flow Characteristics of a Single Turbulent Jet Impinging on a Flat Plate[R]. NASA TN D-5690, 1970.

[4] Sparrow E M, et al. Effect of Nozzle-Surface Separation Distance on Impingement Heat Transfer for a Jet In a Crossflow [J]. Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, 1975: 528- 533.

[5] Bouchez J P, et al. Impingement Cooling from a Circular Jet in a Cross Flow [J]. Heat and Mass Transfer, Pergamon Press 1975, 13: 719- 730

(责任编辑 吴一黄)