

文章编号: 1000-8055(2001)04-0386-04

冲击粗糙壁面复合冷却实验研究

张净玉, 常海萍

(南京航空航天大学 教研室, 江苏 南京 210016)

摘要: 对有初始横流的冲击粗糙壁面复合冷却技术进行了实验研究。由以往研究可知, 影响换热效果的因素很多, 主要可分为流动参数和几何参数。本文主要通过实验以了解各种流动参数、几何参数对换热特性的影响规律, 并对其结构设计提出有价值的参考意见。

关键词: 冲击冷却; 传热; 实验

中图分类号: V 231.1; TK124

文献标识码: A

1 前言

冲击粗糙壁面复合冷却是一种极其有效的强化传热方法, 因而在工业生产中得到了广泛的应用, 例如纺织品、纸张、木材等的干燥, 玻璃的回火, 钢材的冷却及加热, 内燃机活塞的油冷等。不仅如此, 这种冷却技术在尖端技术中也得到有效的利用, 尤其是航空发动机涡轮叶片的冷却, 以及计算机高负荷微电子元件的冷却。从 70 年代开始, 已有一些学者对这种冷却方式的研究开展了许多有意义的工作^[1~5], 主要是针对单纯冲击光滑壁面的情况, 阐述了有初始横流情况下, 单孔、多孔冲击射流的流动特性和换热特性。而在冲击粗糙壁面的情况下, 影响冷却效果的因素中除了流动参数, 还包括诸多冲击腔内的几何参数。不难看出, 这些因素的大小和组合的改变对换热效果同样存在很大的影响。本文着重通过实验探讨诸参数对冷却效果的影响。

2 实验设备及实验方案

2.1 实验设备

换热实验装配示意图如图 1。图中: 1 横流进口; 2 射流进口; 3 冲击孔板; 4 冲击靶板安装板; 5 绝热层; 6 冲击靶板; 7 石棉垫片; 8 加热系统; 9 定距板。实验装置主要由冲击孔板、冲击靶板、加热原件、定距板组成。冲击射流 G_j 经冲击孔板

上的冲击孔冲击到冲击靶板上, 然后与初始横流 G_c 一起沿流道的流向流经换热表面即冲击靶板。实验中共设计了 11 套冲击孔板 ($x_n = 5 \sim 15$), 8 套冲击靶板 ($p/e = 7.5 \sim 12$, $e/d = 0.75 \sim 1.5$), 以及定距板若干块 ($z_n = 1.5 \sim 3.0$)。

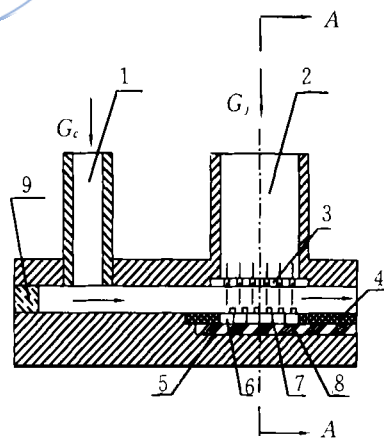


图 1 实验装置示意图

其中冲击靶板示意图如图 2, 图中: 1 热电偶; 2 石棉垫片。靶板分为 6 块, 每块宽度取一个 x_n , 每两块之间用石棉垫绝热, 图中的黑点为热电偶敷设点。实验中使用的发热原件是康铜膜。

2.2 实验数据处理方法

通过对流动和换热的基本理论推导可得出平均换热努氏尔数的表达式:

收稿日期: 2000-10-26; 修订日期: 2001-01-16

作者简介: 张净玉(1973-), 女, 南京航空航天大学讲师, 硕士

$$\overline{Nu} = f \left[Re_j, \frac{G_c}{G_j}, X_n, Z_n, \frac{p}{e}, \frac{e}{d} \right]^{[6]} \quad (1)$$

其中: G_c/G_j 为横流射流密流比, $G_j = (\rho v)_j$ 为射流密流 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), G_c 为横流密流 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); Re_j 为冲击射流雷诺数 ($Re_j = G_j \cdot d/\mu$); X_n 为冲击孔板孔间距(x_n)和冲击孔径(d)比; Z_n 为冲击孔靶间距(z_n)和冲击孔径(d)比; p/e 为冲击靶板肋高与肋间距比; e/d 为冲击靶板肋高与肋间距比。

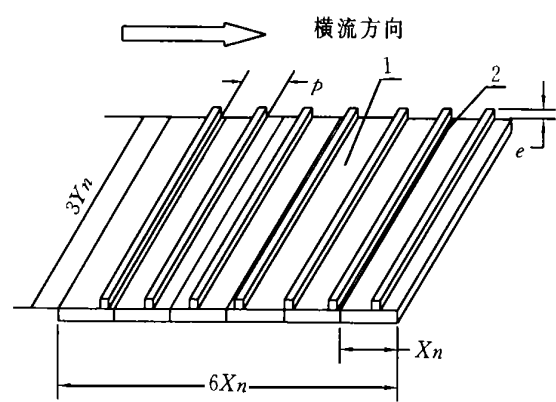


图 2 冲击靶板示意图

局部努氏数的定义:

$$Nu_i = \frac{(Q_i - Q_{loss}/6)d}{A_i(T_{wi} - T_{refi})\lambda} \quad (i = 1, 2, \cdots, 6) \quad (2)$$

其中: Q 为每块紫铜块上的加热量 (W); λ 为空气导热系数 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{s}$); A^i 为各块铜块的换热面积 (不包括粗糙肋带来的扩展表面) (m^2); T_{wi} 为测得的各块铜块的壁面温度 (K); T_{refi} 为参考温度 (K); 参考温度定义式为: $T_{refi} = (T_{mi} + T_j)/2$, ($i = 1, 2, \cdots, 6$)。其中: T_{mi} 为每块铜块上冲击腔内流体的杯混温度 (K)。

计算式如下:

$$T_{mi} = \frac{m_c T_c C_p (T_c) + (m_j/6) i T_j C_p (T_j) + Q/6}{[m_c + (m_j i/6)] C_p (T_{mi})} \quad (3)$$

T_j 为冲击射流的总温 (K)

平均努氏尔数的定义:

$$\overline{Nu} = \sum_{i=1}^6 \frac{Nu_i}{6} \quad (i = 1, 2, \cdots, 6) \quad (4)$$

Nu_i 为每块铜块的局部努氏尔数。

3 实验结果及分析

3.1 横流与射流的密流比 G_c/G_j

图 3 是在不同的 Re_j 下, 冲击靶板的 $\overline{Nu}$ 随

G_c/G_j 变化的分布曲线。从 3 幅图中不难看出, G_c/G_j 增加, $\overline{Nu}$ 曲线都是先下降后上升。根据实

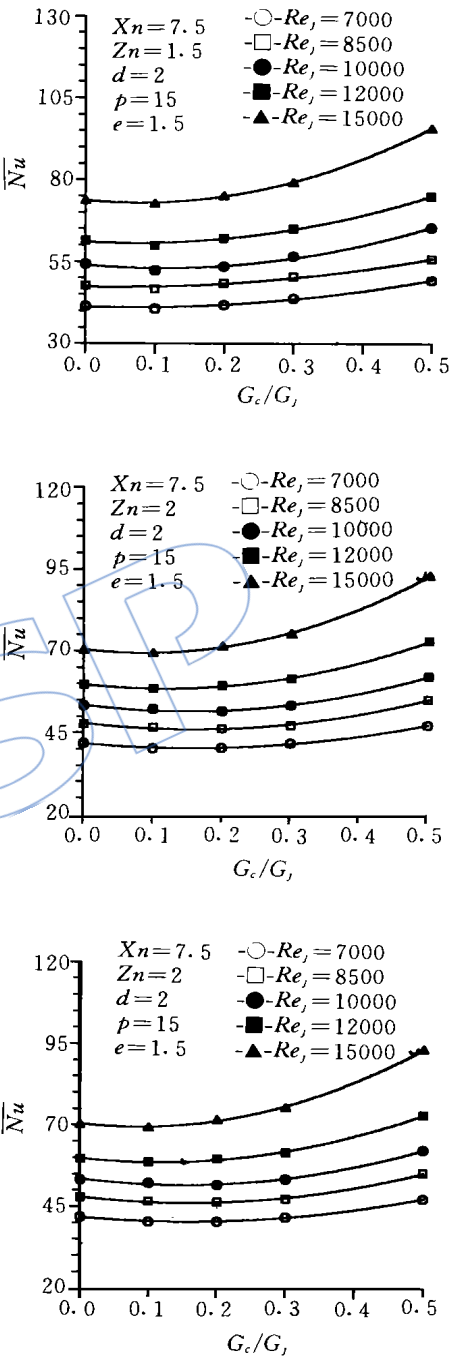


图 3 平均努氏尔数分布图

验结果的分析可知: 有初始横流的冲击冷却, 对其冲击靶板冷却换热的贡献主要有两个方面, 一方面是冲击射流的冲击冷却作用, 另一方面是横流的对流换热作用。当初始横流较小时, 初始横流的加入会削弱射流的冲击冷却效果, 而当初始横流较大时又能够加强冲击靶板的对流换热, 同时粗糙肋对流场的扰动作用, 也能有效地强化流场的

对流换热。基于以上几方面的分析, 不难得出以下的结论: 当初始横流较小时, 横流仅起到削弱射流冲击冷却的作用, 而不足以强化对流换热, 平均换热特性曲线下降趋势; 当初始横流较大后, 横流对流换热和粗糙肋的扰动作用增强, 平均换热特性上升。

3.2 冲击射流雷诺数 Re_j

从图 3 中可以看到, 平均换热努氏尔数 $\overline{Nu}$ 随着 Re_j 的增加而增加。这主要是由于在其它实验条件不变的情况下, 冲击射流雷诺数的增大就意味着冷却剂量的增加, 从而必然会增强换热表面的冷却效果。

3.3 孔靶间距与冲击孔径比 Z_n

图 4 是不同冲击孔板、靶板间距 Z_n 下测得的冲击靶板 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 的变化曲线。从图中可看到, 随着 Z_n 的减小, 平均努氏尔数均呈上升趋势。这主要是因为 Z_n 的减小直接造成了冲击腔截面的减小, 冲击腔内的流体流速增加, 从而增强了对流换热。

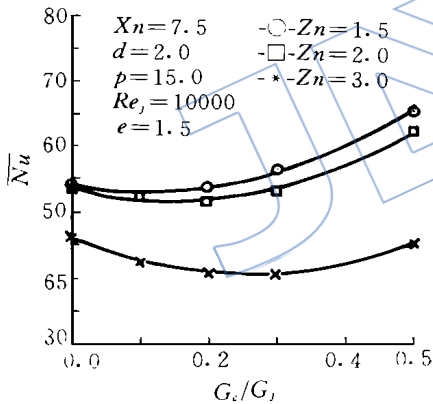


图 4 不同冲击孔板靶间距 Z_n 下测得的 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 的变化曲线

另外, 图中 3 条曲线的对比还可发现: 随着 Z_n 的增加, 平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 增加的幅度, 不断降低。当 Z_n 较大时 ($Z_n = 3.0$), 只有当初始横流流量较大后, 冲击靶板的换热效果才能得到一定的改善, 而且这种改善的幅度远不如在小 Z_n 的时候大。从几何结构上分析可知: 当 Z_n 增大, 而其他几何尺寸不变, 流道变宽, 流道中粗糙肋的相对粗糙高度降低。因而, 当 G_c/G_j 增加时, 粗糙肋的扰动强化换热作用不强, 从而造成平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 上升幅度较小。同时由此可见, 在有初始横流的情况下, 粗糙肋对流场的强化换热作

用是十分有效的。

3.4 冲击孔间距与冲击孔径比 X_n

图 5 是在不同孔间距与孔径比 X_n 下, 测得的平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 的变化曲线。图中可以看到, 随着 X_n 的增大, 平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 呈降低趋势。这是由于在相同的 Re_j 下, 冲击孔径 d 不变, 即总的冲击冷却流量不变, X_n 越小, 流过单位冲击靶面上的冷却流量就越大, 从而冷却效果也就更好。

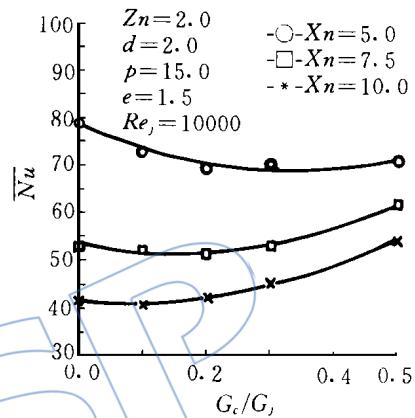


图 5 在不同孔间距与孔径比 X_n 下测得的 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 的变化曲线

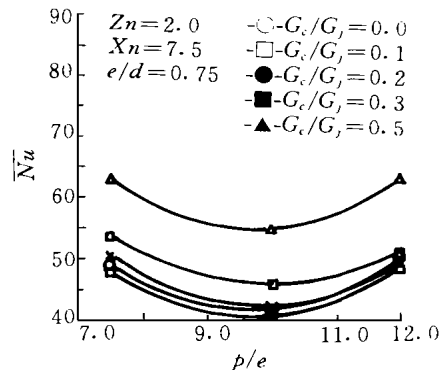


图 6 在不同 G_c/G_j 下 $\overline{Nu}$ 随肋间距与肋高比 p/e 增加的变化曲线

同时图中的 3 条曲线对比可见, 随着 G_c/G_j 的增加, 平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 的变化趋势不完全相同: 随着 X_n 的增大, 平均努氏尔数 $\overline{Nu}$ 随 G_c/G_j 的增加而增大的幅度显著增大。这是由于实验中粗糙靶板的粗糙肋高和肋间距不变, 当 X_n 较小时, 每块冲击靶板上的粗糙肋数目随之减少, 粗糙度

降低, 对流场的扰动作用不强。因而, 当横流密流比较大时, 粗糙肋对流场扰动引起的强化换热作用不强。由此进一步肯定了在加入较大初始横流的情况下, 粗糙肋对流场扰动的强化换热效果是十分显著的。

3 5 肋间距与肋高比 p/e

图 6 是在不同 G_c/G_j 下, 平均努氏尔数随肋

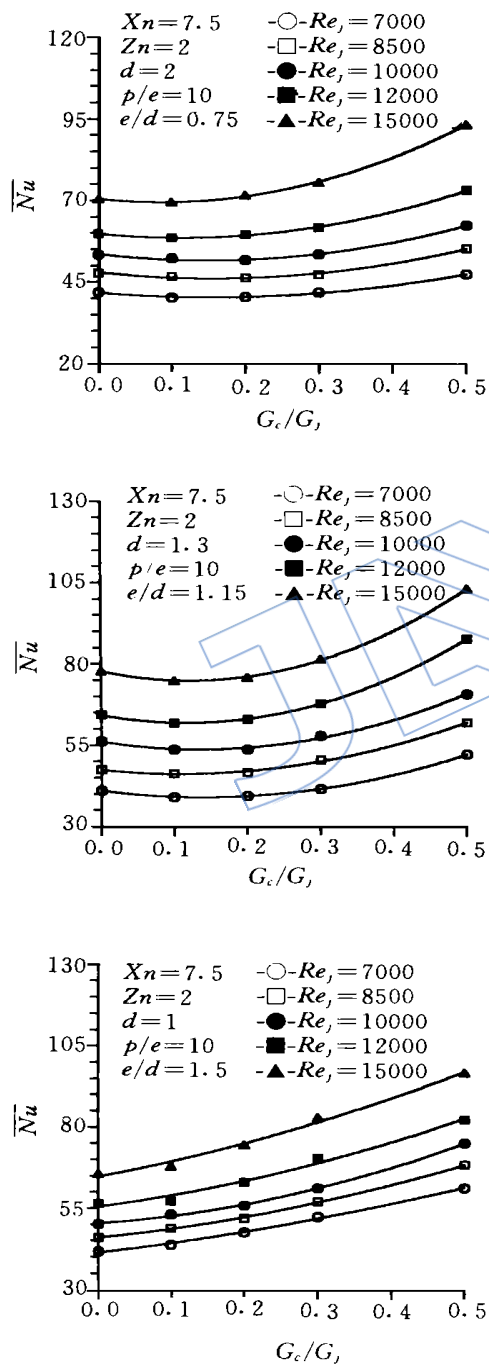


图 7 不同肋高与孔径比 e/d 的平均换热特性曲线

间距与肋高比 p/e 增加的变化曲线。从图中可以看到, 在实验参数范围内, 在不同的横流密流比下, 随着 p/e 的增大, 其平均换热努氏尔数的变化规律基本相同: 随 p/e 的增大, 平均努氏尔数先降低, 后增加, 但总的变化幅度不大。

3 6 肋高与孔径比 e/d

图 7 是不同肋高与孔径比 e/d 的平均换热特性曲线。3 幅图对比可见, 随着 e/d 的增大, 冲击靶板上的平均努氏尔数先增大, 后降低。由于 e/d 反映的是流场中的相对粗糙高度, 当粗糙高度较小时, 粗糙肋对流体的扰动作用较弱, 而当相对粗糙高度过高时, 对冲击腔内的流体流动又形成严重的堵塞。因而只有当 e/d 的取值在某一适当的范围内, 这种由粗糙肋的扰动所引起的强化换热才会达到最佳效果。

综上所述, 在本实验范围内, 经过对近 2000 组实验数据的整理发现: 最佳的参数匹配范围在 $G_c/G_j=0.5, Zn=1.6, Re_j=15000, Xn=5, p/e=7.5, e/d=0.75$ 左右。

参考文献

[1] Florschuetz L W, Metzger D E. Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement with Initial Crossflow [R]. ASME 83- GT- 28

[2] Florschuetz L W, Metzger D E. Streamwise Flow and Heat Transfer Distributions for Jet Array Impingement with Cross Flow [R]. ASME 81- GT- 77.

[3] Florschuetz L W, Tseng H H. Effect of Nonuniform Geometries on Flow Distributions and Heat Transfer Characteristics for Arrays of Impinging Jets [R]. ASME 84- GT- 156

[4] Trabold T A, Obot N T. Impingement Heat Transfer for with in Arrays of circular Jets: Part II - Effects of Crossflow in the Presence of Roughness Elements [J]. Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery, 1987, 109: 594- 601

[5] Obot N T, Trabold T A. Impingement Heat Transfer within Arrays of Circular Jets: Part I - Effects of Minimum, Intermediate and Complete crossflow for Small and Large Spacings [J]. Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 1987, 109: 872- 879

[6] 张净玉. 冲击粗糙表面复合冷却参数优化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 1998

(责任编辑 杨再荣)

A Study of Enlarging Surge Margin and Optimization of Variable Geometry for Afterburning Turbofan Engines

WU Hu, LIAN Xiao-chun, SHEN Shao-ying

(7th Dept., Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract A general model for predicting the thermodynamic performance of variable geometry axial compressors has been developed, based on stage-stacking model. The model is combined with the method, with which off-design operating points of gas turbine engines can be predicted. The simulation program is established for predicting variations in engine surge margins. An example on the use of the model and method is given to prove their validity. The optimization is obtained to predict the effects of combined variable geometry of fan inlet guide vane, mixer and nozzle area on the performances and surge margins of the engine.

Key words: turbofan engine; variable geometry; aerodynamic stability; optimization

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP386- 389)

Experimental Investigation on Impingement Heat Transfer from Rib Roughened Surface

ZHANG Jing-yu, CHANG Hai-ping

(2th Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Impingement heat transfer is one of the useful cooling methods for high temperature gas turbine blades and/or guide vanes in aeroengines. After the cooling jet impinges on the leading edge of the turbine blade and/or guide vane, it flows downstream and turns to be the initial crossflow for the aft row of impinging jet. The process of impingement heat transfer is quite complicated, especially when the target surface is rib roughened. In this paper, impingement heat transfer from rib roughened surface with two-dimensioned arrays of circular jet with initial crossflow has been investigated experimentally. Through the thousands of experimental data, the effect of the several flow parameters ($Re_j = 7000 \sim 15000$, $G_c/G_j = 0 \sim 0.5$) and geometric parameters ($X_n = 5 \sim 15$, $Z_n = 1.5 \sim 5$, $p/e = 5 \sim 12$, $e/d = 0.5 \sim 1.5$) on heat transfer characteristics has been studied. It would be useful for the cooling analysis and design of gas turbine hot section.

Key words: impingement cooling; heat transfer; experiment