

文章编号: 1000-8055(2008)03-0410-05

竖直平板自然对流强化换热的实验

闻洁, 于兆吉, 吴宏

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 研究各种强化换热结构对竖直平板自然对流换热的强化作用。通过比较圆柱扰流、圆锥扰流、三棱柱扰流、三棱锥扰流、四棱柱扰流、四棱锥扰流和直角三角翼纵向涡发生器 LVG (Longitudinal vortex generator) 等对自然对流换热的强化效果, 发现: 单种换热结构中直角三角翼纵向涡发生器的强化换热效果最好, 组合结构中直角三角翼叉排与圆柱扰流的混合排列换热效果最好, 其能将竖直平板自然对流换热效果提高 24.5%。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 自然对流; 强化换热; 实验研究

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Experimental study in natural convection heat transfer enhancement

WEN Jie, YU Zhao-ji, WU Hong

(National Key Laboratory on Aero-Engines,

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

Abstract: This paper focuses on study of heat transfer enhancement in natural convection along upright board. Comparing the different effects of heat transfer enhancement by using columned turbulent pins, conical turbulent pins, prisms, pyramids, and LVG (longitudinal vortex generator) arrays, the results show that the performance of LVG in heat transfer enhancement is better than others during simplex pins tests. Furthermore, the mixed configuration of columned turbulent pins and LVG has the best performance in natural convection heat transfer enhancement, which enhances heat transfer by 24.5 percent.

Key words: aerospace propulsion system; natural convection; heat transfer enhancement; experimental study

对流换热领域, 强迫对流换热的新技术和新方法已经相当成熟有效, 应用很广泛, 主要有: 扰流柱、散热肋片、涡旋发生器等, 但由于自然对流的换热特性, 当前其应用并不十分广泛。为提高自然对流换热性能, 将这些常用的强迫对流换热方法用在自然对流换热上, 是现今自然对流换热研究的热门方向。

扰流柱强化换热, 是利用扰流柱对流体的扰动, 破坏流体在固体壁面上的附面层来强化换热。但在自然对流中, 流体流动速度比较低, 扰流柱对

流体在固体壁面上附面层的破坏程度不够, 因此换热效率不高。对于散热肋片强化换热, 它仅是通过扩大散热表面积来强化换热, 该换热方式效率也不高^[1]。对于涡旋发生器强化换热, 它利用涡旋发生器扰动来流, 使流体在发生器后面产生旋涡, 破坏流体在壁面上的附面层, 使热量快速输散在外流中, 强化换热效果比前两种好, 因此国际^[2-3]、国内有很多教授学者都对其进行研究。研究表明, 在一定的 Re 数范围内, 直角三角翼的纵向涡发生器 LVG (Longitudinal vortex genera-

收稿日期: 2007-03-19; 修订日期: 2007-05-08

作者简介: 闻洁(1964)女, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要从事传热传质和涡轮旋转换热研究。

tor)的攻角、翼高、翼宽等几何参数是影响强化换热的主要因素. 华南理工大学的王涛^[4] 和吕静^[5] 等人研究发现 LVG 的强化换热效果优于矩形低肋, 且多排 LVG 可以增强整体换热效果.

1 实验装置

由自然对流换热牛顿公式 $h = q / \Delta T$ 得: 实验需配置稳定加热热源、测温仪器和保证热量沿着所要求方向传递的绝热板, 如图 1 所示.

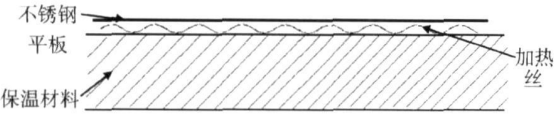


图 1 试验件设计原理图

Fig. 1 Priniple of experimental design

试验平板为 1 mm 厚的镀锌薄铁片, 面积为 100 mm×400 mm, 为了降低平板边缘效应对换热的影响, 实验件的两侧各用 100 mm 宽的硬纸板进行扩展. 加热热源采用镍铬丝作加热丝, 间距 2 mm 平行排列, 以实现等热流的加热条件, 电压由稳压电源提供, 通过电压表和电流表测量计算加热功率. 保温材料选择酚醛树脂塑料泡沫, 其导热系数小于 0.027 W/(m·K). 测温采用镍铬-镍硅热电偶, 标定并进行冷端补偿后, K 型热电偶的测量精度能达到 ±1 °C. 在试验面上布 11 排热电偶, 每排 3 个, 两边热电偶距边缘 3 mm, 由于自然对流换热系数在起始处变化明显, 故在实验面低处的热电偶布置较为密集. 强化换热元件如图 2 所示, 扰流圆柱和扰流圆锥的底面直径 $d = 0.7$ cm, 高度 $h = 2$ cm; 扰流棱柱和扰流棱锥的底面均为正多边形, 边长 $a = 0.5$ cm, 高度 $h = 2$ cm; 直角三角翼 LVG 由两片对称布置的直角三角翼组成, 定义直角三角翼底边与来流方向的夹角为攻角 β 翼前端距 $s = 2$ mm.

为了研究单纯强化换热件的换热加强作用, 各种表面强化换热件都是用硬纸板或软塑料做成, 排除了其作为扩展换热面的强化作用.

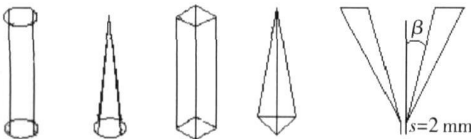


图 2 强化换热元件

Fig. 2 Elements for enhancing heat transfert

2 实验过程与结果分析

2.1 光滑平板自然对流换热研究

将光滑试验元件竖直悬挂, 在环境温度稳定的密闭试验室进行竖直平板自然对流换热试验, 选定实验件上距离底边 6 cm 的一块 10 cm×10 cm 的表面为实验研究区域.

试验热流由公式(1)可计算得到, 其中用热电偶温度 T_i 代表所在区域的平均温度以计算辐射出

$$q = UI / A - \epsilon \sum_{i=1}^{33} A_i (T_i^4 - T_0^4) / A \quad (1)$$

的热量, 取黑度 $\epsilon = 0.23$. 环境平均温度 20.4 °C, 温度波动不超过 0.4 °C. 为了降低边缘效应和增强实验结果的应用性, 用每排热电偶中最中间的那个温度值计算局部对流换热系数, 继而得到局部 Nu . 对实验做不确定度分析, 得对流换热系数不确定度小于 7.8%, 故本实验结果具有较高的可信度.

试验结果如图 3: 横坐标是测点距起点的距离 x 与总长 L 的比, 理论 Nu 是根据恒热流自然对流竖直平板理论近似解的公式(2)计算而得.

$$\overline{Nu} = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (2)$$

此公式适用于 $Ra < 9.0 \times 10^9$ 时, 其定性温度 $T = (T_\infty + T_w) / 2$. 由图中可知, 该试验的误差较小, 故该实验系统能够比较真实的反映竖直平板自然对流换热的情况. 从中计算知, 光滑平板自然对流换热 $Nu = 70.841$.

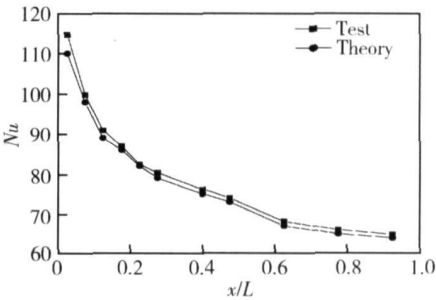


图 3 光滑平板自然对流换热理论与实际换热比较

Fig. 3 Compare of theory results with test results in nature convection heat transfer by smooth board

2.2 常见强化换热结构性能研究

实验研究各种常见扰流结构对自然对流换热的增强, 主要选择圆柱、圆锥、三棱柱、三棱锥、四棱柱、四棱锥和翼高×翼宽为 15 mm×30 mm 的 LVG. LVG 共 6 对, 分 3 排, 以顺排方式排列, 其

它的扰流件均为 20 个,分 8 排,以叉排方式排列.为方便图表中的说明,15 mm×30 mm 简写为 15-30,以下皆同,不再说明.

实验结果见图 4,可知:(1)对于底面边长和高都相同的棱锥与棱柱,棱锥扰流结构的强化换热效果要好于棱柱扰流结构;(2)棱锥或棱柱棱数增多时,强化换热的效果增强;(3)实验中,强化换热效果最好的是 15 mm×30 mm LVG 扰流结构,其 $Nu=86.97$,与竖直平板相比,提高了 22.8%. Nu 变化见图 5.

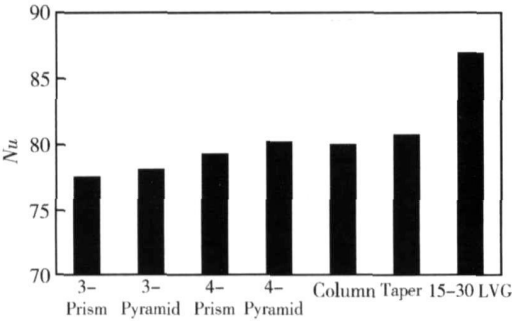


图 4 多种扰流结构对自然对流换热增强效果的比较
Fig.4 Compare of nature convection enhancements of disturbing elements

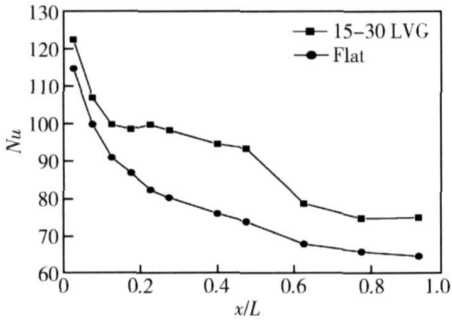


图 5 15-30 LVG 与光滑平板的对流换热 Nu 比较
Fig.5 Compare 15-30 LVG with smooth board in convection heat transfer

2.3 影响直角三角翼 LVG 换热的各种因素

通过改变直角三角翼的攻角、翼高、翼宽等几何参数,以及多排三角翼阵列中前后排的排距及排列方式,来研究 LVG 阵列对竖直平板自然对流换热强化的变化规律.在下列 LVG 试验中,每排相邻两对 LVG 的间距保持一定,均为 5 mm.

2.3.1 翼形尺寸对 LVG 阵列强化换热的影响

选用宽高比为 0.5,攻角为 45°,尺寸分别为 10 mm×20 mm,15 mm×30 mm,20 mm×40 mm 的三组 LVG,采用顺排的方式(见图 9 中(a)).

试验结果如图 6 所示:强化换热效果最好的是 15 mm×30 mm LVG 阵列,其 $Nu=86.97$,比光滑竖直平板提高了 22.8%,其次是 20 mm×40 mm LVG 阵列,最后是 10 mm×20 mm LVG 阵列.

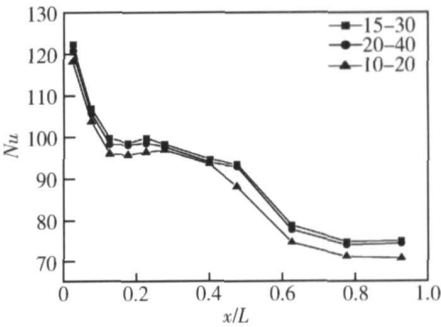


图 6 不同大小 LVG 阵列的对流换热 Nu 比较
Fig.6 Compare of nature convection enhancements of different dimension LVGs

翼高增大时,LVG 产生的纵向涡旋增大,促进了主流区与传热壁面附近流体间的动量和能量交换,对温度边界层破坏或减弱作用加强,增强了对流换热.但纵向涡旋的增大,也增大了前排 LVG 对后排 LVG 的影响,从而影响了整体的换热效果.所以当 LVG 翼高为 20 mm 时,尽管产生更大的纵向涡旋,其整体的换热系数仍要小于翼高为 15 mm 的情况.

2.3.2 翼形攻角对 LVG 阵列强化换热的影响

选用宽高比为 0.5,排距 3.35 mm,尺寸 10 mm×20 mm 的 LVG 阵列,分别对攻角 30°,45°和 60°的顺排 LVG 阵列进行实验.结果如图 7:三角翼攻角为 45°时,LVG 阵列的换热效果最佳,其 $Nu=77.27$.通常攻角在 30°~60°时,漩涡会发生破裂现象,破裂后的漩涡强度会减弱很多,这就是换热效果在三角翼攻角为 45°时最强的主要原因.

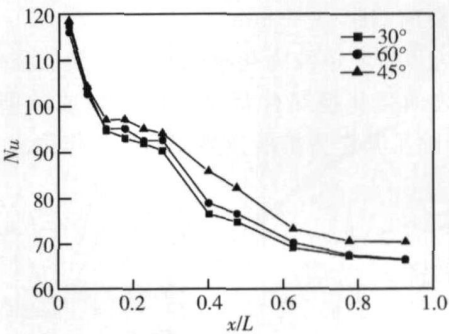


图 7 不同攻角下 LVG 强化换热效果比较
Fig.7 Compare of nature convection enhancements of LVGs in different incidence angles

2.3.3 排距对 LVG 阵列强化换热的影响

选用每排两对 10 mm×20 mm 三角翼, 攻角 45°, 排距分别为 3.35 cm、5 cm 和 6.7 cm, 采用顺排的方式进行实验研究, 结果见图 8: 当两对 10 mm×20 mm 三角翼阵列的排距为 5 cm 时, 换热效果最好, 其对流换热 $Nu=80.83$ 。在空气流到三角翼时, 会在其前方形成小的滞止区, 影响换热; 当三角翼 LVG 排列过密, 其产生的涡旋不能破坏或削弱太多区域的温度附面层, 便到达第二排 LVG 的滞止区, 从而影响了整体的换热; 当 LVG 排列过疏, 其产生的涡旋在其影响区域破坏或削弱温度附面层后涡旋碎裂或消失, 破坏能力降低很多, 在后排 LVG 前的一块区域将出现弱涡旋或无涡旋强化换热, 故存在最佳的 LVG 阵列排距。

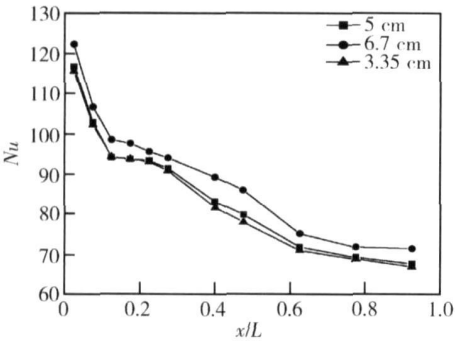


图 8 不同排距的 LVG 强化换热效果的比较

Fig. 8 Compare of nature convection enhancements of LVGs in different row distances

2.3.4 排列方式对 LVG 阵列强化换热的影响

选择不同排列方式的 LVG 阵列(见图 9 中(a), (b)), 来研究不同排列方式对 LVG 强化自然对流换热的影响。



图 9 LVG 阵列

Fig. 9 Arrangement of LVG

选用每排一对 15 mm×30 mm、攻角 45°的三角翼阵列, 分别采用叉排 (Cha) 和顺排 (Shun) 方式进行试验研究, 结果见图 11: 叉排方式的三角翼 LVG 阵列强化换热效果略好于顺排方式, 其 $Nu=87.13$ 。流场显示: LVG 两翼片产生的是旋向相反的一对纵向涡, 这对纵向涡在发生器外侧

同时远离壁面, 把 LVG 内侧已被加热的流体, 卷吸携带至外侧, 使得外侧的流体相对于没有加 LVG 时温度升高, 换热恶化. LVG 叉排方式可以使后排 LVG 的换热较弱区受前排 LVG 换热较强区影响, 前排 LVG 的换热较弱区受后排 LVG 换热较强区的影响, 从而减弱前后排 LVG 之间的换热恶化区域。

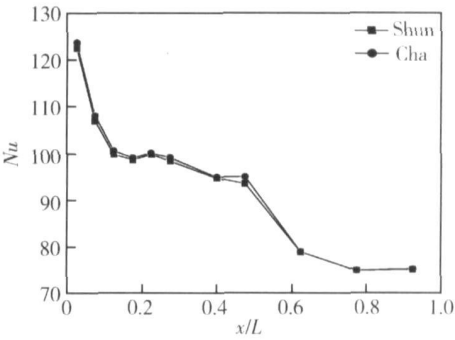


图 10 叉排和顺排的 LVG 阵列强化换热效果比较

Fig. 10 Compare of nature convection enhancements of LVGs in different arrange manners

综合直角三角翼 LVG 强化自然对流换热的各种影响因素, 对尺寸为 15 mm×30 mm, 攻角为 45°的采用叉排方式排列的 LVG 阵列的最佳排距进行实验研究. 结果发现, 排距为 6 cm 的叉排 15 mm×30 mm LVG 阵列对自然对流强化换热效果最好, 其对流换热 $Nu=87.13$, 较之竖直光滑平板提高 23.2%。

2.4 常温下自然对流强化换热最佳排列方式

实验比较大小三角翼阵列交叉混合排列结构 (LVG mixed)、圆柱和三角翼叉排阵列混合结构 (Mixed)(见图 9 中(c))以及 15 mm×30 mm 叉排三角翼结构 (Cha) 对自然对流换热的强化效果. 基于实际使用中圆柱扰流结构应用较多, 故本实验中

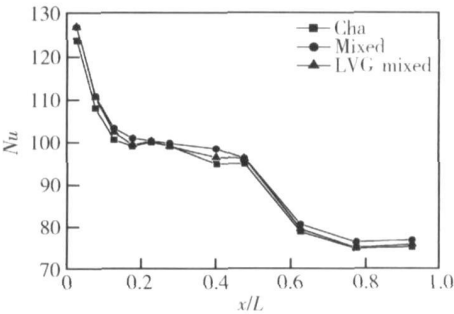


图 11 不同阵列组合的强化换热效果比较

Fig. 11 Compare of nature convection enhancements in different arrangements and combinations

研究圆柱与 LVG 阵列混合的强化换热效果.

实验结果见图 11. $15\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 直角三角翼叉排阵列与圆柱扰流结构的混合结构, 强化换热的效果最好. 其中, 直角三角翼 LVG 的攻角是 45° , 排距为 6 cm , 圆柱扰流位于一对三角翼的中间位置. 在本实验中, 这种混合结构的自然对流换热的 $Nu=88.22$, 相对于光滑平板自然对流换热, 效果提高了 24.5% .

3 结 论

本文针对竖直平板自然对流的各种强化换热结构进行了试验研究, 结合强化换热效果分析了强化换热的原理, 试验结果表明:

(1) 单纯比较各种自然对流强化换热结构, 直角三角翼 LVG 的强化换热效果在各种强化换热结构中是最好的, 它可以将光滑竖直平板的换热效果提高 22.8% ;

(2) 直角三角翼 LVG 的攻角、翼高、翼宽等几何参数是影响强化换热的主要因素; LVG 阵列中前后排的排距和 LVG 的排列方式是影响强化换热效果的主要因素. 直角三角翼 LVG 强化换热存在一个最佳攻角, 三角翼的宽高比一定时, 增加翼高和翼宽可以增强换热效果, 但增加的程度将逐渐减弱; LVG 阵列中叉排方式换热效果优于顺排;

(3) $15\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 直角三角翼叉排与圆柱扰流结构的混合排列的换热效果最好, 它可以将光滑竖直平板自然对流的换热效果提高 24.5% .

参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 178-185.
- [2] Bswas G, Mitran K. Longitudinal vortex generators for enhancement of transfer in heat exchanger applications[C] // Proc. of 11th IHTC. Kyongju: [s. n.], 1998: 329-334.
- [3] Jacobi A M, Shah R K. Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: a review of recent progress[J]. Experimental Thermal Fluid Science, 1995, 11(3): 295-309.
- [4] 王涛, 杨泽亮, 冯光畅. 纵向涡强化竖直平板自然对流换热的实验研究[J]. 热科学与技术, 2004, 3(1): 51-54.
WANG Tao, YANG ZeLiang, FENG Guangchang. Experimental study on heat transfer enhancement in natural convection by using delta-winglet longitudinal vortex generators[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(1): 51-54.
- [5] 吕静, 马济成, 杜雅萍. 纵向涡旋发生元 LVG 强化换热的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(3): 283-285.
LÜ Jing, MA Jicheng, DU Yaping. Experimental study on heat transfer enhancement by using delta-winglet longitudinal vortex generators[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2001, 23(3): 283-28.