

文章编号:1006-7329(2002)03-0053-05

空气横掠叉排三维外肋管束 换热及流阻特性的实验研究*

吴伟栋, 王厚华, 廖光亚, 江村

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:对由重庆大学研制开发的新型三维外肋管叉排管束的换热及流动特性进行正交优化实验研究。实验结果表明:与光管管束相比,在 $Re = 2\,900 \sim 14\,000$ 范围内,三维外肋管束的换热系数增大了 1.5~2.5 倍,阻力增大了 1~3.5 倍。对实验数据进行逐步回归,得出了实验条件下的换热及流阻的准则方程式,并对肋几何参数对换热及流阻的影响进行了分析。

关键词:三维外肋管束;强化传热

中图分类号:TK124

文献标识码:A

当前,合理地利用现有能源,降低生产成本及开发新能源已成为世界性的研究课题。在生产中大部分能量是通过各种换热设备传递的,换热器的合理设计、性能改善将直接关系到能源的合理利用。列管式换热器作为最常见的换热器型式,广泛地应用于冶金、化工、电力、轻工、动力、空调等领域。提高它们的换热性能,一方面可以提高能源利用率,另一方面还可以减小换热器的体积和重量,以节省材料、降低成本、减少占地,从而对促进国民经济的发展有非常重要的意义。

由重庆大学研制的三维内外肋管是一种换热性能优异的高效换热元件,有广阔的使用前景,其加工工艺曾获得 1990 年布鲁塞尔国际发明金奖。本文对气体横掠叉排三维外肋管束的换热和流阻特性进行了正交优化实验研究,目的在于找出其换热及流阻的普适关联式,为其在更广阔的领域应用提供可靠的设计依据,并根据实验结果分析三维肋的强化传热机理及其几何参数对换热和流阻性能的影响,指导对肋高、肋间距等参数的优化选取,为国民经济各领域提供更加高效紧凑的列管式换热器。

各国学者对于气体横掠光管管束及气体横掠肋管管束(常见的肋片型式为平片、螺旋片等)作了大量的、深入的研究,其结果已得到了广泛的工业应用,但多局限于二维连续肋^[1-3]。利用三维离散肋强化传热的研究正在兴起^[4-8],但尚未形成统一的理论。研究表明:连续肋离散后导致气流产生回流、横向二次流以及涡漩等,使强化传热机理更加复杂,但强化传热效果更佳。

文献检索未见有对相同类型的三维外肋管束的研究,因此,本文对三维外肋管束换热和流阻特性进行的实验研究是新颖的、有必要的。

1 实验装置及实验方法

实验装置见图 1。实验在一台标准吸风式直流风洞中进行,空气从整流段进入实验段被加热,经测试段后流入大气。整流段和测试段流道均由有机玻璃构成,便于观察测点情况,及时发现问题。实验段截面为 300 mm × 300 mm,试件安装后进行了外保温。

管壁平均温度由 20 对嵌入不同位置的热电偶测得,空气出口温度由 9 对均布于实验段出口的

* 收稿日期:2002-01-06

作者简介:吴伟栋(1970-),男,四川人,工程师,主要从事换热器设计和强化传热的研究工作。

热电偶测得,入口口设置了一只标准温度计和一对热电偶以测量空气入口温度,管束沿程压降由实验段前后的静压环配备微压计测得,空气流量由毕托管配备倾斜式微压计测得(毕托管置于测速段,测速段截面仅为实验段的1/4,因此流速较高,测量准确)。热电偶测温通过数据采集仪连续跟踪采集,并利用计算机储存及显示。

管束由置于管中心的电阻丝(外套石英管)加热,加热量由调压器精确控制。风量由风机出口风阀控制。在某一工况下(对应于一特定流速),加热至稳态后,测出上述参数后即可计算出管束平均换热及流阻准则数。

在实验前,首先用光管管束对实验装置进行了标定,将实验结果与文献[1]推荐采用的准则方程式的计算值进行了比较, Nu 准则数的偏差在 $\pm 5\%$ 之内, Eu 准则数的偏差在 $\pm 12\%$ 之内,说明本实验装置是可靠的。

实验用三维外肋管试件如图2所示。肋的几何结构与几何尺寸如图3所示。沿轴向相邻两周肋为叉排排列,肋高是以光管表面为肋基的径向长度,肋宽是肋沿周向的长度,肋间距是轴向相邻两周肋的距离,肋沿周向的距离 P_c 约等于肋宽 B 。

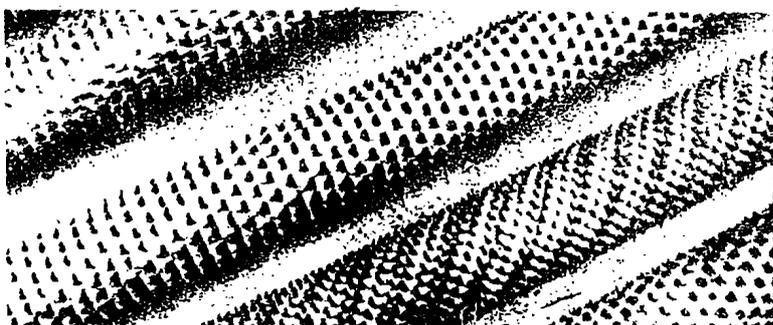


图2 三维外肋管

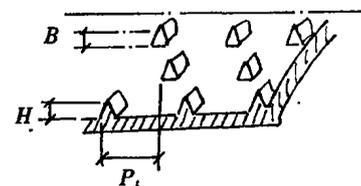


图3 三维外肋管的几何尺寸

实验管束用D32×3无缝钢管制造,正三角形叉排,管间距 $S_1 = 43\text{ mm}$, $S_2 = 37\text{ mm}$,五排,33根三维外肋管组成。根据正交原理,对肋宽(B)、肋高(H)、肋间距(P_t)各取三个水平,共九组肋管如表1。

表1

试件号	管外径 $d(\text{mm})$	肋宽 $B(\text{mm})$	肋高 $H(\text{mm})$	肋间距 $P_t(\text{mm})$	每周肋数(个)
1	32	1.7	2	2	30
2	32	1.7	2.3	3	30
3	32	1.7	2.6	2.5	30
4	32	2.1	2	2.5	24
4	32	2.1	2	2.5	24
5	32	2.1	2.3	2	24
6	32	2.1	2.6	3	24
8	32	2.5	2.3	2.5	20
9	32	2.5	2.6	2	20

2 实验数据处理

空气吸收的热量由实验段进出口的焓增来计算:

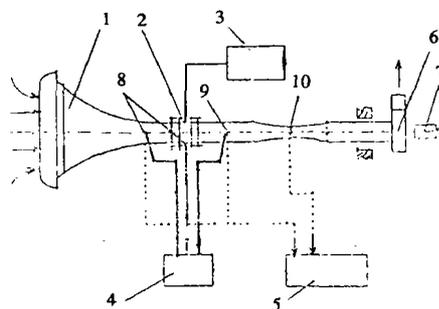


图1 实验装置图

- 1.风洞;2.实验段;3.可变加热电源;4.数据采集仪;
5.液压计;6.风机;7.电机;8,9.温度、压差测点;
10.风速测点

$$Q_2 = GC_p(T_{out} - T_{in}) \tag{1}$$

式中: G ——质量流量, kg/s; C_p ——空气的定压比热, j/kg·k; T_{out} ——空气的出口温度, k; T_{in} ——空气的进口温度, k。

物性参数由定性温度 $T_f = (T_{out} + T_{in})/2$ 来确定。

加热量:

$$Q_1 = IV \tag{2}$$

式中: I ——加热电流, A; V ——加热电压, V。

在满足 $|(Q_1 - Q_2)/Q_1| \leq 5\%$ 时, 测量数据方为有效数据。

空气侧平均对流换热系数按如下公式进行计算:

$$h = Q_2/F \cdot \Delta T \tag{3}$$

$$\Delta T = T_w - T_f \tag{4}$$

式中: F ——管束总外表面积, m^2 ; ΔT ——换热温差, k; T_w ——管壁平均温度, k。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

九种三维外肋管束的实验结果见图3、图4。

对实验数据进行逐步回归, 去掉不显著因素, 把实验结果整理成如下换热和流阻的准则方程式:

$$Nu = 5.593\epsilon^{0.24} [H/(s_1 - d)]^{1.26} Re^{0.544} \tag{5}$$

$$Eu = 30.06\epsilon^{0.6} [H/(s_1 - d)]^{1.08} Re^{-0.15} \tag{6}$$

式(5)和式(6)的适用范围为: $0.68 < Pr < 0.72$, $2\ 900 < Re < 14\ 000$, 管排数 $z = 5$, 误差 $\leq \pm 15\%$ 。

式中: Re ——雷诺数, $Re = u_{max}d/\nu$; ν ——空气运动粘性系数, m^2/s ; u_{max} ——管间最大流速, m/s ; Nu ——努谢尔特数, $Nu = hd/\lambda$; d ——基管外径, m ; λ ——空气导热系数, $w/m \cdot k$; Eu ——欧拉数, $Eu = \Delta p/\rho u_{max}^2$; ρ ——空气密度, kg/m^3 ; ϵ ——肋化系数, 三维外肋管总外表面积与光管外表面积之比, $\epsilon = 1 + H/Pt$; $[H/(s_1 - d)]$ ——无量纲肋片高度。

准则方程式中肋化系数 ϵ 反映了肋高和肋间距对换热及流阻的影响, 具有明显的物理意义。

3.2 实验结果分析

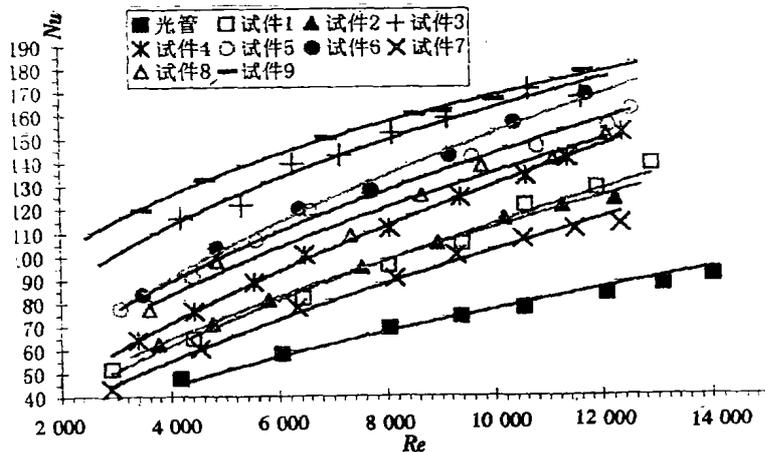


图3 三维外肋管束的 Nu 与 Re 关系曲线

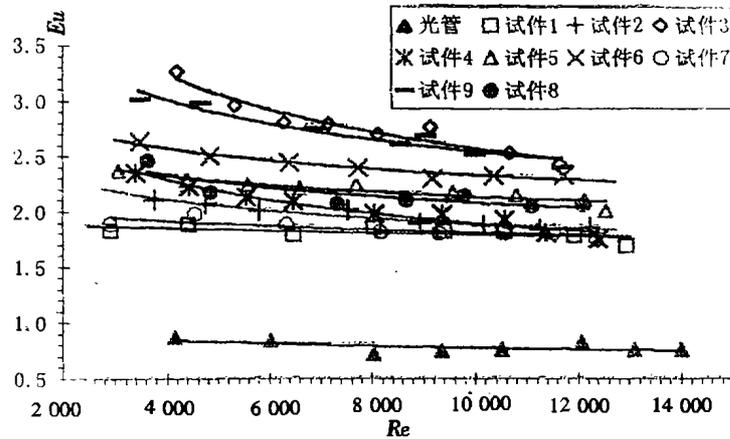


图4 三维外肋管束的 Eu 与 Re 关系曲线

在 $Re = 2\,900 \sim 14\,000$ 范围内,三维外肋管束的平均 Nu 数为光管管束的平均 Nu 数的 $1.5 \sim 2.5$ 倍,同时,其 Eu 数比光管管束增大了 $1 \sim 3.5$ 倍。气流的具体流动力学情况,决定了外肋管的换热强度。实验表明,气流外掠三维外肋管束时,由于肋的存在,导致气流产生回流、横向二次流以及涡漩等,有力地激励了气流与管壁之间的强化传热。

分析实验结果可以看出肋几何参数对 Nu 、 Eu 的影响。

肋高对 Nu 数的影响:三维外肋管强化换热效果除了受 Re 数的影响以外,肋片的高度 H 是最重要的影响因素。当肋间距一定时,肋片高度增加,一方面使肋化系数 ϵ 增加,换热面积增大;另一方面增强了气流的扰动,使换热得以强化。此外,在管束间距一定时,肋片高度越高,则自由流通面积越小,管束紧凑度提高, u_{\max} 增大,也是换热得以强化的原因。当然,肋片高度受金属材料的切削性能、加工技术及管间距的限制,且 $H < 2Pt$ 。

肋高对 Eu 数的影响:肋高对管束的阻力特性同样也是最重要的影响因素。当肋间距一定,肋片高度增加时,一方面增大摩擦阻力,另一方面加剧了肋后间断处的涡漩运动使动能耗散增大,因此阻力随肋高的增加而迅速增加。

肋间距对 Nu 数的影响:当肋高一定,肋间距增大时,一方面使换热面积减小,另一方面也同时使扰动源减小,两种原因均削弱了换热,因此 Nu 数随肋间距增加而减小。

同样的原因, Eu 数也随肋间距增加而减小。

从准则方程式(4)、(5)可以看出,肋间距对 Eu 数的影响大于对 Nu 数的影响。

通过对实验结果的方差分析,肋宽对换热和流阻性能的影响不显著 [$F_B = 0.74 < F_{0.1} < 2, 2) = 9$]。由于两肋间沿周向的距离约等于肋宽,每周肋片的宽度和约为 $\pi d/2$,所以肋宽的变化不会引起肋化系数的改变,这是肋宽对换热和流阻的影响不显著的主要原因。

4 结束语

1) 对叉排三维外肋管束的换热及流阻特性的正交实验结果表明:在 $Re = 2\,900 \sim 14\,000$ 的范围内,三维外肋管束的平均 Nu 数为光管管束的平均 Nu 数的 $1.5 \sim 2.5$ 倍,同时, Eu 数比光管管束增大了 $1 \sim 3.5$ 倍。说明三维外肋管是一种高效的强化传热元件。

2) 对三维外肋管束的换热及流阻特性影响最为显著的因素为肋高,而肋宽的影响不显著。

3) 本文提出的叉排三维外肋管束的换热及流阻特性准则方程式,为设计三维外肋管式换热器及进一步的实验研究提供了参考依据。

4) 由于时间和条件的限制,对管排数、排列方式、管子节距、流态等因素对换热及流阻特性的

影响未作进一步的研究,使上列准则方程式的使用受到局限。进一步的深入研究尚待进行。

参考文献:

- [1] (苏)A·A·茹卡乌斯卡斯. 换热器内的对流传热[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [2] Chi Chun Wang, Kuan Yu Chi. Heat transfer and friction characteristics of plain fin - and - tube heat exchange. Part I : new experimental data[J]. Int. J. heat and mass transfer, 2000, 43: 2681 - 2691.
- [3] A - NIR Heat transfer and friction factor correlations for crossflow over staggered finned tube banks[J]. Heat transfer engineering, 1991, (12).
- [4] 胡振军, 神家锐. 离散倾斜肋的传热强化及流动特性[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(3):
- [5] M. K. Chyu and V. Natarajan. Heat transfer on the surface of three - dimensional protruding elements[J]. Int. J. Heat and mass transfer, 1996, 39: 2925 - 2935.
- [6] M. Alomogbel, A. Bejan Cylindrical trees of pin fins[J]. Int. J. Heat and mass transfer 2000, 43: 4285 - 4297.
- [7] G. Ledezma, A. M. Morega, A. Bejan. Optimal spacing between pin fins with impinging flow[J]. Journal of Heat transfer, 1996, 118: 570 - 577.
- [8] W. W. Lin and D. J. Lee. Second - law analysis on a pin - fin array under crossflow[M]. Int. J. Heat and mass transfer, 1997, 40: 1937 - 1945.
- [9] 田胜元, 萧日嵘. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,

Heat Transfer and Friction Characteristics for Cross - flow over Staggered External Three - dimensional Finned Tube Banks

WU Wei - dong, WANG Hou - hua, LIAO Guang - ya, JIANG Cun

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In this paper, the heat transfer and friction characteristics for cross - flow over staggered new external three - dimensional finned tube banks developed by the Chongqing University of China are investigated by means of cross optimization experiment. The results of experiment show that the rate of heat transfer is enhanced from 1.5 to 2.5 and the ratio of pressure drop is increased from 1 to 3.5 compared to the bare tubes in the range of Reynolds numbers $Re \approx 2\,900 - 14\,000$. The heat transfer and friction factor correlations are obtained through step by step regression and then, the influence of geometric parameters of fins on the characteristics of heat transfer and friction is analyzed.

Keywords: external three - dimensional finned tube banks; enhancement of heat transfer