

文章编号:0253-987X(2002)09-0881-05

带交叉肋方形截面通道内强制对流换热的实验研究

邓斌¹, T. T. Wong², 陶文铨¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 香港理工大学机械工程系)

摘要: 在雷诺数为 5 000 ~ 40 000 的范围内, 对以不同角度 (45°, 60°, 75°) 布置的、具有不同高度 (4 mm, 5 mm) 的交叉肋条的方形截面通道内的强制对流换热进行了实验研究. 实验结果表明: 对交叉布置的肋条, 其角度越大, 高度越高, 对流换热增强得越明显, 但同时阻力也大为增加; 与平行布置的肋条相比, 交叉布置的肋条虽能使对流换热有所增强, 但阻力增加的程度大于换热的增加. 就换热与阻力的总体效果来说, 在雷诺数较低时, 交叉肋条有一定的优越性, 但在高雷诺数下, 交叉布置的肋条相对于平行布置的肋条并无优势.

关键词: 交叉肋; 强制对流; 传热强化

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A

Experimental Study of Forced Convection in a Rectangle Duct with Cross Ribs on the Opposite Walls

Deng Bin¹, T. T. Wong², Tao Wenquan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University)

Abstract: Within the Reynolds number range from 5 000 to 40 000, experiments were performed by using cross ribs (three angles: 45, 60, 75 degrees; two heights: 4 mm, 5 mm) roughened ducts to determine the effect of building repeated turbulators of the inner surface of the rectangular duct on forced convection and fluid friction. The experimental results show that for the cross rib arrangements studied, the rib height and cross angle have positive effect on heat transfer; the larger the cross angles and the rib height, the higher the heat transfer coefficients. At the meantime, the friction factor also increases significantly. Compared with the parallel rib configuration, the cross rib arrangement can enhance heat transfer with greater penalty in pressure drop.

Keywords: cross ribs; forced convection; heat transfer enhancement

人工粗糙元被认为是强化换热的一项有效的技术. 粗糙元能使流体的流动形成湍流而强化换热, 同时也会引起阻力增加. 为了不使阻力增加过多, 应使湍流脉动限制在靠换热面很近的地方, 也就是在边

界层内. 通常, 粗糙元是一些小的凸起物, 按照一定的角度, 周期性地布置在需要强化换热的换热面上. 对方形通道内布置粗糙元以强化换热的研究, 国内、外学者从70年代以来做了大量的工作, 以下列

收稿日期: 2001-12-19. 作者简介: 邓斌(1973~), 男, 博士生; 陶文铨(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 香港研究基金资助项目 (Grant No. PolyU5156/99E); 国家重点基础规划资助项目 (G2000026303).

举的仅仅是 90 年代以来公开报道的一些结果. Lau 和 Han 等人^[1,2]通过实验,研究了方形截面通道内布置平行肋条、V 型肋条和离散肋条时的强化换热情况. Liou 和 Hwang^[3]研究了通道内布置半圆型肋条时的换热情况. Lorenz 等人^[4]借助于红外线摄像机研究了通道内布置肋条时的换热效率以及压降的分布情况. Saini 等人^[5]研究了具有大的高宽比的方腔内布置有形如金属网状的肋条时通道内的换热和阻力分布. Leung^[6]研究了三角形通道内布置有周期性的沟槽时通道内的换热和阻力分布.

在以前的研究中,通道内壁布置的大多是平行的肋条. 本文主要研究按不同角度、不同肋高和不同方式(交叉、平行)布置的肋条通道内的换热情况.

1 实验装置

实验系统主要由进口段、实验段、混合段以及出口段 4 个部分组成,如图 1 所示. 引风机由 1.5 kW 的电机驱动,风量可由手动调节阀调节.

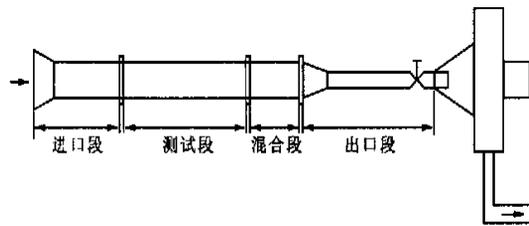


图 1 实验系统布置图

进口段、实验段、混合段以及出口段的长度分别为:700、1 000、400 和 1 400 mm. 前三段都是由 18 mm 厚的木版制成,而且都有相同的端面形状和尺寸(宽为 150 mm,高为 30 mm).

实验系统采用电加热(电阻膜). 进、出口温度,壁温(在每一个周期内布置测温点,然后将所测得的各点温度取平均)均采用热电偶测定(测量精度为 0.2). 压力采用微压计测定,精度为 1%. 流速采用皮托管与倾斜微压计在实验系统出口段处测定.

实验前对实验系统进行了校核,分别采用 Dittus Boelter 公式及 Blasius 阻力公式,其相对偏差均在 10% 以内,证明该实验系统是合理的.

2 实验结果及分析

本实验共分 2 组,交叉布置肋条和平行布置肋条. 交叉布置肋条分为 2 种高度 ($h = 4, 5$ mm) 和 3 个角度 ($\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$). 平行布置肋条的实验仅

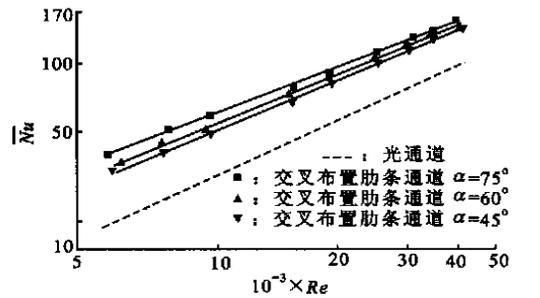
仅是为了与交叉肋条的实验做比较,它采用了 60° 的角度.

2.1 平均特性

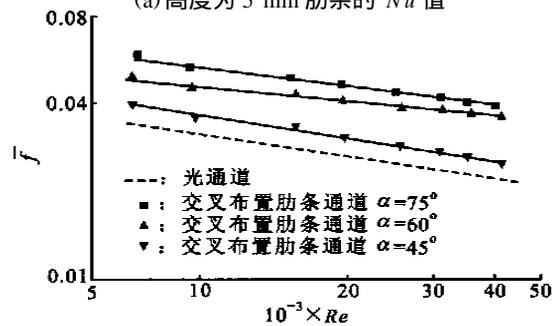
这里的平均特性仅是指在中心线上对整个通道的传热特性和阻力特性进行平均的结果

2.2 交叉布置的肋条

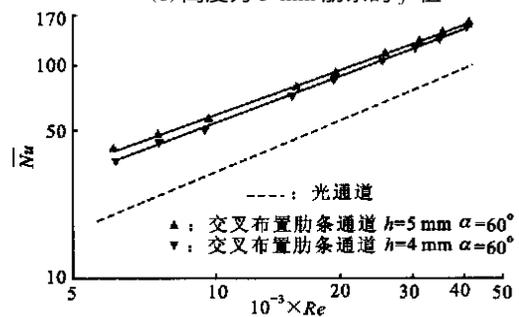
2.2.1 两边加热,仅有一边布置肋条 实验结果如图 2 所示. 从图 2 可以得出如下结论:同一高度的交



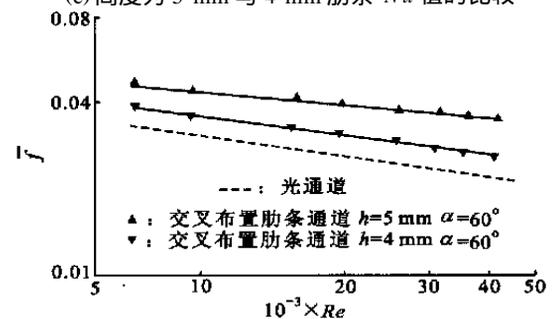
(a) 高度为 5 mm 肋条的 \bar{Nu} 值



(b) 高度为 5 mm 肋条的 \bar{f} 值



(c) 高度为 5 mm 与 4 mm 肋条 \bar{Nu} 值的比较



(d) 高度为 5 mm 与 4 mm 肋条 \bar{f} 值的比较

图 2 单侧布置肋条的实验结果

叉肋条相比,其角度越大,换热效果越好,但阻力也相应增大;不同高度的交叉肋条相比,其高度越高,换热效果越好,但阻力也随之增大。

2.2.2 两边加热,两边布置肋条 实验结果如图3所示,从图3可以得出如图2同样的结论。

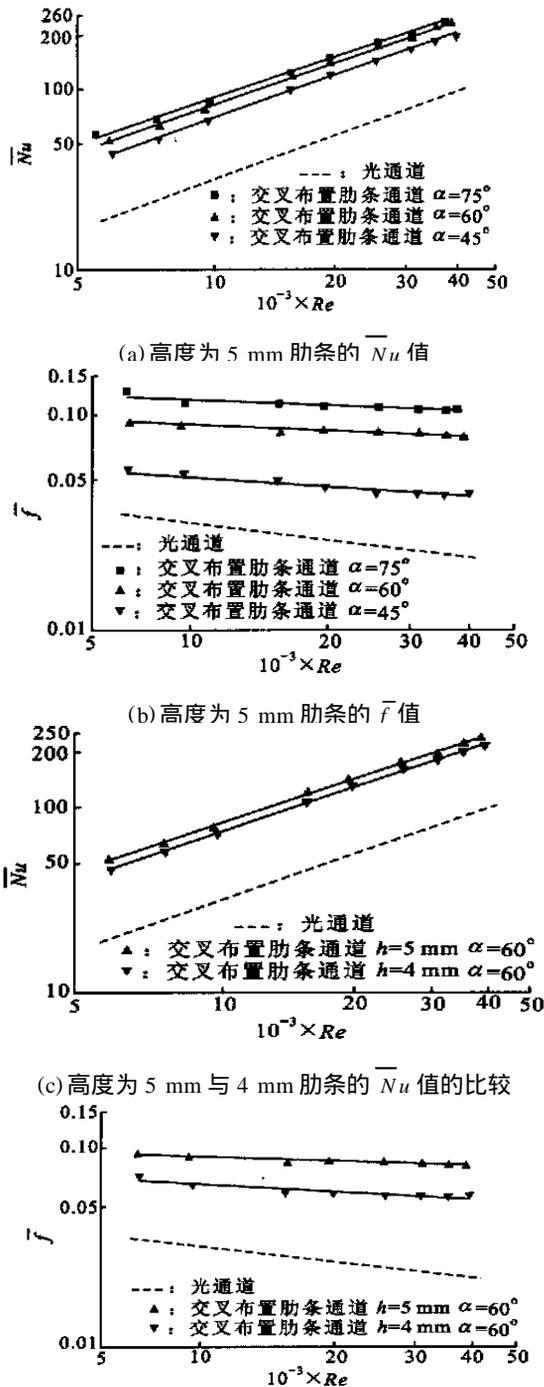
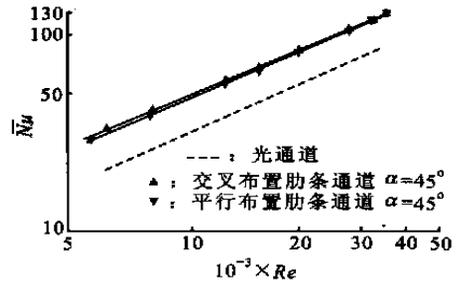


图3 两侧布置肋条的实验结果

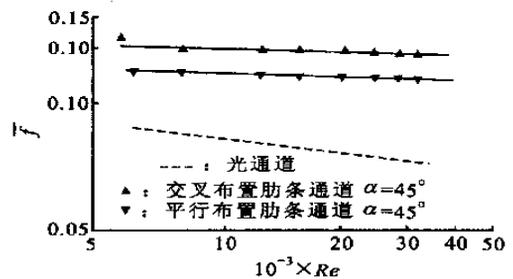
2.3 平行布置的肋条

实验结果如图4所示,从图4可以得出如下结

论:交叉布置的肋条与平行布置的肋条相比,换热效率有轻微的增加,但伴随着的是阻力的明显增大。



(a)两边加热高度为5 mm 肋条的 \overline{Nu} 值



(b)两边加热高度为5 mm 肋条的 \overline{f} 值

图4 平行布置肋条的实验结果

换热与阻力关系式按以下两式进行拟合^[7]

$$Nu_D = C_1 Re_D^m \tag{1}$$

$$f = C_2 Re_D^n \tag{2}$$

式(1)、式(2)中各系数的拟合值详见表1。

表1 式(1)、式(2)中的系数值

肋条布置方式	h/mm	l/mm	$Nu_D = C_1 Re_D^m$		$f = C_2 Re_D^n$	
			C_1	m	C_2	n
单	45	4	0.036 1	0.774 7	0.721 9	- 0.315 1
	60	4	0.042 4	0.766 3	0.482 5	- 0.229 7
	75	4	0.069 1	0.720 8	0.596 2	- 0.244 3
侧	45	5	0.039 5	0.769 6	0.519 6	- 0.267 3
	60	5	0.070 4	0.719 4	0.350 9	- 0.191 7
	75	5	0.077 2	0.712 9	0.502 7	- 0.199 1
双	45	4	0.060 8	0.752 1	0.596 2	- 0.244 3
	60	4	0.085 8	0.732 1	0.246 8	- 0.098 9
	75	4	0.083 5	0.746 6	0.323 0	- 0.090 8
侧	45	5	0.086 4	0.724 4	0.111 2	- 0.048 0
	60	5	0.086 7	0.741 6	0.355 3	- 0.098 0
	75	5	0.084 1	0.724 0	0.556 0	- 0.116 0

对实验数据的不确定度分析^[8]表明,本实验中 Nu_D 的不确定度为 8.54%, f 的不确定度为 8.07%.

2.4 各组通道的比较^[9]

为了对布置有不同形状肋条的方形截面通道进行科学的比较,现将已有的文献中广泛采用的 2 种比较准则(相同质量流量和相同泵功率)的条件介绍如下.

(1) 相同质量流量条件

$$(\dot{m})^* = \dot{m} \tag{3}$$

在相同介质条件下无量纲关系式为

$$Re^* = Re_m \frac{D_m}{D_m^*} \tag{4}$$

在相同温差条件下的传热量之比为

$$\frac{Q^*}{Q} = \frac{A^* Nu^* Re_m^*}{A Nu Re_m} \tag{5}$$

(2) 相同泵功率条件

$$(\dot{m}_p)^* = (\dot{m}_p) \tag{6}$$

化为无量纲关系式

$$(A_x f Re_m^3)^* = (A_x f Re_m^3) \tag{7}$$

$$Re^* = \left(\frac{A_x f Re_m^3}{A_x f} \right)^{1/3} \tag{8}$$

在相同温差条件下的传热量之比为

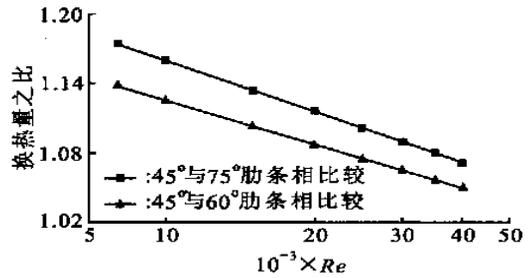
$$\frac{Q^*}{Q} = \frac{A^* Nu^* Re_m^*}{A Nu Re_m} \tag{9}$$

式中:上标 * 表示所研究通道的量,其他的量是参考量.

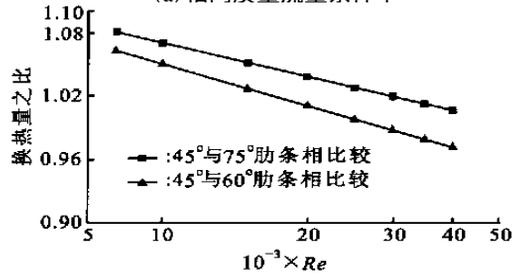
2.4.1 两边加热,仅有一边布置肋条 高为 5 mm 肋条的第 1 组通道换热性能的比较如图 5 所示.由图 5 可见:在相同质量流量的条件下,45°肋条比 75°肋条的换热量最多高 17%,随着 Re 的升高,该值有所下降;45°肋条与 60°肋条的比较以及在相同泵功率条件下的比较结果均与此类似.总的来说,45°肋条通道的换热效果最好,60°肋条的换热其次,75°肋条的换热最差.

2.4.2 两边加热,两边布置交叉肋条 高为 5 mm 肋条的第 2 组通道换热性能的比较如图 6 所示.在相同的质量流量条件下,45°肋条比 75°肋条的换热量高 25%,随着 Re 的升高,该值基本不变;45°肋条比 60°肋条换热量高 17%,随着 Re 的升高,该值有所上升.在相同的泵功率条件下,图 6b 表明当流量小于一定值时,45°肋条的换热量略低于 60°及 75°的情形.按总的效果来说,仍然是 45°肋条的通道换热

效果最好,60°肋条的换热效果其次,75°肋条的换热

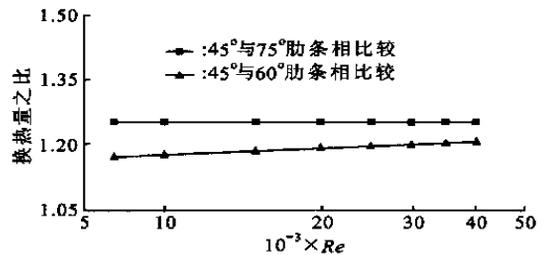


(a) 相同质量流量条件下

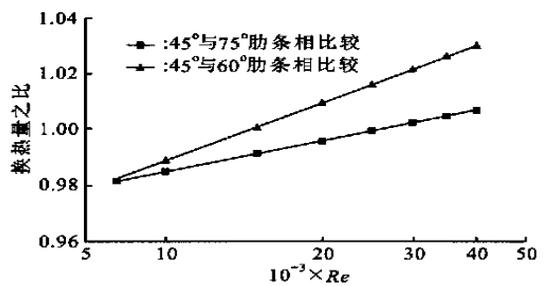


(b) 相同泵功率条件下

图 5 第 1 组通道换热性能的比较



(a) 相同质量流量条件下

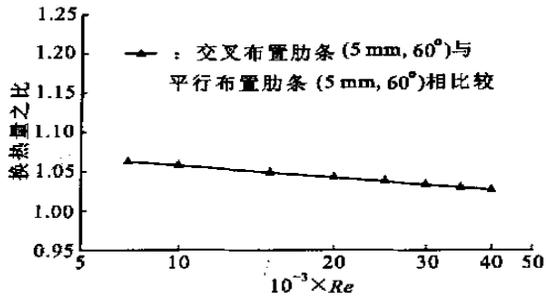


(b) 相同泵功率条件下

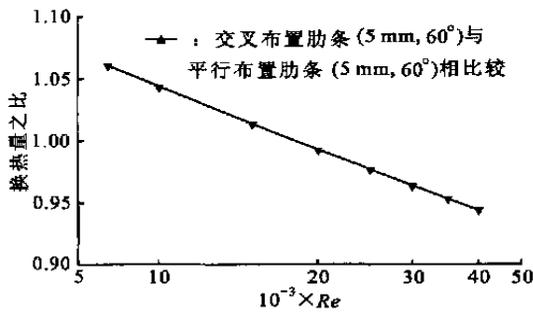
图 6 第 2 组通道换热性能的比较

效果最差.

2.4.3 平行肋条与交叉肋条的比较 第 3 组通道换热性能的比较如图 7 所示.在相同的质量流量条件下,高为 5 mm 的交叉肋条比平行肋条通道换热量高 6%左右,随着 Re 的升高,该值有所下降.在相同的泵功率条件下,当 Re 小于某一定值时,高为 5 mm 的交叉肋条比平行肋条的通道换热量高 6%左



(a) 相同质量流量条件下



(b) 相同泵功率条件下

图7 第3组通道换热性能的比较

右,随着 Re 的升高,该值下降.总的来说,在高 Re 时,交叉布置的肋条通道的综合换热性能并无优势.

3 结论

(1) 交叉布置肋条的高度和布置角度对换热有很大的影响.通常,角度越大,肋条高度越高,换热增强,但阻力也相应增大.对3个不同角度的肋条研究表明,45°肋条的综合换热效果较好.

(2) 对交叉布置与平行布置的肋条换热和阻力特性的对比研究可知:交叉布置的肋条能强化换热,但阻力特性也大大增强.就总的效果来说,在 Re 较低时,交叉布置的肋条通道有一定的强化换热效果,但在高 Re 下并无优势.

参考文献:

- [1] Lau S C, McMillin R D, Han J C. Turbulent heat transfer and friction in a square channel with discrete rib turbulators [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113:360~366.
- [2] Han J C. Square channels with parallel, crossed, and v shaped angled ribs[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1991, 113:590~596.
- [3] Liou T M, Hwang J J. Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in a rectangular channel [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 36:931~940.
- [4] Lorenz S, Mukomilow D, Leiner W. Distribution of heat transfer coefficient in a channel with periodic transverse grooves[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 3:234~242.
- [5] Saini R P, Saini J S. Heat transfer augmentation in a rectangular channel with slit turbulators with expended metal mesh as roughness element [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(4): 973~986.
- [6] Leung C W, Chen S, Wong T T. Forced convection and pressure drop in a horizontal triangular sectional duct with v grooved inner surfaces [J]. Applied Energy, 2000, 66:199~211.
- [7] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].第3版.北京:高等教育出版社,1998.
- [8] Moffart R J. Contribution to the theory of single sample uncertainty analysis [J]. ASME J Heat Transfer, 1982, 104:250~260.
- [9] 王良璧.复杂截面及扭转通道中紊流流动与换热的试验与数值研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1996.

(编辑 王焕雪)