

# 矩 形 通 道 内 的 放 热

颜迪民 许国华 肖国忠 张传贞

**提要** 本文对矩形通道内水的放热进行了试验研究,除了平板区外还测定了角区的局部放热系数;同时在气回路里测定了矩形通道角区及定位肋条附近的切应力分布;将局部放热系数分布与切应力分布进行了比较,二者是接近的。

## 一、前 言

目前有关平板、套管及束棒这样一些元件的放热试验工作已经有了一定的基础,但是对于矩形、三角形通道的角区及平板、套管内定位肋条附近的局部放热系数分布还研究得很少。由于角区、肋区流速的下降,那里的放热有明显的恶化,所以精确测定角区、肋区的局部放热系数对保证设备的安全运行极为重要。

1932 年文献 [1] 研究过非元形通道内流体的流动,测定了矩形、正方形、三角形通道内的流速分布。文献 [2] 利用文献 [1] 的数据,根据传热率与切应力相似的原理计算了这些通道的局部放热系数,计算结果近似地被文献 [3] 的试验(仅测了角上的温度,没有角区的有关数据)所证实。

本文研究了矩形通道的角区及肋区的局部放热系数。定位肋条的形状对肋区放热系数有很大影响,但直接模拟复杂的肋形给放热试验带来困难,所以我们仅研究了矩形通道(或矩形肋条)一种情况,肋条形状的变化则通过切应力分布的测量加以考虑。

## 二、放 热 试 验

**1. 试验设备与试验方法** 试验在中温中压水迴路<sup>[4]</sup>内进行。试验装置见图 1。其中试验元件由壁厚 0.54mm 的不锈钢板在油压机上用模子加工而得,形成宽 91.3mm,高 4.5mm 的矩形通道。宽高比为 20,当量直径为 8.62mm。试验时,元件的压力由玻璃布板及承压钢板支持。元件长 390mm,其加热电流由一台直流电机供给,电机最大输出电流 10000A,最大电压 20V。

为了计算矩形通道的放热系数,除进出口水温外,还测量了元件长度方向及  $l/de = 44.7, 51.8$  二个截面上的周向壁面温度分布。热偶全部固定在元件外的绝缘板上。绝缘板紧贴壁面。热偶头上涂环氧树脂以防止热偶结点直接与壁面接触。为消除热偶头与壁面不直接接触时热损失所引起的测量误差,在试验本体外均匀地安装了电阻片(包括拐角处)。电阻片由不锈钢片制成,由它通电发热补偿热损失,从而保证壁温测量的可靠和正确。

若热负荷  $q_F$  按电功率计算,则各截面上的放热系数  $\alpha_x$  为

$$\alpha_x = \frac{q_F}{\bar{t}_{wx} - t_{fx}}, \quad q_F = \frac{0.86IV_{\text{总}}}{SL_{\text{总}}} \quad (1)$$

这里  $V_{分}$ ,  $L_{分}$  分别为分电压降及分电压测量距离;  $S$  为截面周长。

分电压降与总电压降之间有一定的比例关系, 在预备试验里我们确定了  $V_{分}/V_{总} = 0.797 \pm 0.029$ 。因此试验中有时只测量总电压降, 而分电压用上述比值计算。

水温分布认为是线性的, 这样任一截面的平均水温为

$$t_{fx} = t_{\lambda} + \left( \frac{V_1}{V_{总}} + \frac{V_x}{V_{总}} \right) (t_{出} - t_{\lambda}) \quad (2)$$

其中  $t_{\lambda}$ ,  $t_{出}$  分别为进、出口平均水温;  $V_1$  为上导电铜排至上测压点的电位差;  $V_x$  为上测压线至计算点的电位差;  $V_{总}$  为元件的总电位差。

元件内壁温  $\bar{t}_{wx}$  由外壁温计算而得:

$$\bar{t}_{wx} = \bar{t}_{0x} - \Delta t_{wx}$$

其中  $\Delta t_{wx}$  是壁温降, 由热传导公式计算

$$\Delta t_{wx} = q \delta / (2\lambda) \quad (3)$$

式中  $\delta$  为壁厚,  $\lambda$  为热传导系数。

在我们的试验中, 电功率与热功率之间的不平衡除个别点外不超过  $\pm 5\%$ 。

**2. 试验结果** 试验数据表明: 在同一截面上放热系数从拐角开始逐渐向矩形通道中间部分增高, 并且在  $x/de > 2$  以后达到稳定。对稳定区域的平均放热系数进行整理, 结果见图 2。全部实验数据以  $\pm 8\%$  的偏差散布在与下述准则关系式相适应的直线上:

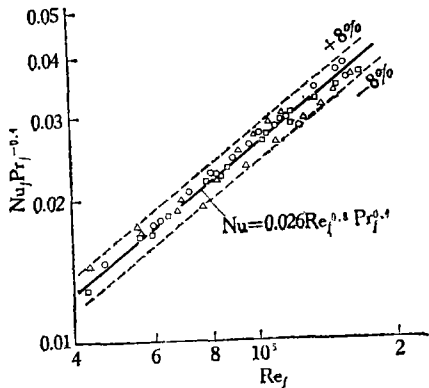


图 2 平板稳定区的放热系数

$q_F$  (大卡/米<sup>2</sup>·时):  
 ○  $3.2 \times 10^3$   
 □  $5.5 \times 10^3$   
 △  $8.5 \times 10^3$

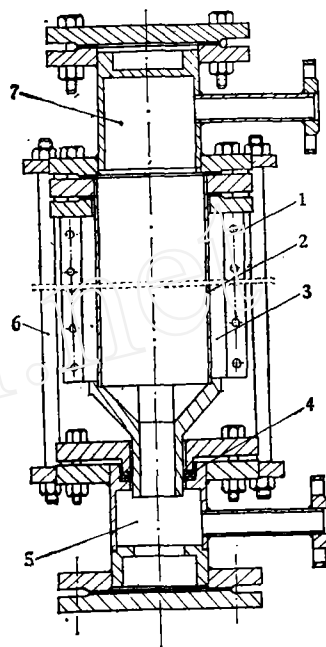


图 1 试验本体图

1. 承压钢板, 2. 试验元件; 3. 绝缘板, 4. 密封垫圈, 5. 出水室, 6. 联接螺栓, 7. 进水管

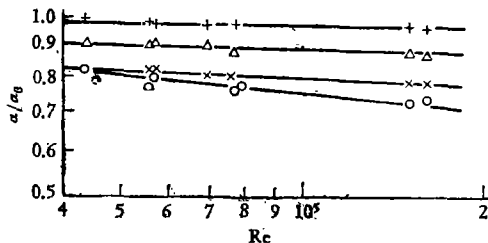


图 3 局部放热系数  $\alpha/\alpha_0$  与  $Re$  数的关系  
 沿平板方向位置  $x$  (mm): ○ 0.5, × 2.5, △ 6.5, + 14.5

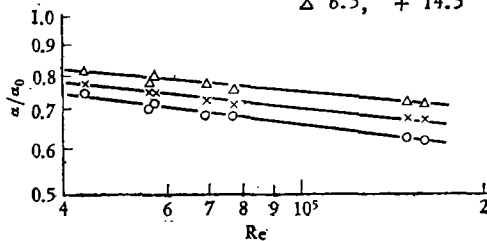


图 4 局部放热系数  $\alpha/\alpha_0$  与  $Re$  数的关系  
 沿间隙方向位置  $x'$  (mm): ○ 0.25, × 1.25, △ 2.25

$$Nu_f = 0.026 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (4)$$

这里定性温度取的是流体平均温度,定性尺寸取的是水力当量直径。

式(4)与我们双面加热的窄套管( $d_2/d_1 = 1.14$ )放热试验公式<sup>[4]</sup>完全一致。

也整理了从拐角开始到稳定区域的放热数据,结果见图3,4,可表成下式:

$$\alpha/\alpha_0 = C Re_f^{-n} \quad (5)$$

式中 $\alpha_0$ 为稳定区域的放热系数, $C$ , $n$ 值见表1,并在图5上画成曲线以便于应用。

表 1

| 沿 平 板 方 向      |      |       | 沿 间 隙 方 向       |      |       |
|----------------|------|-------|-----------------|------|-------|
| $x(\text{mm})$ | $C$  | $n$   | $x'(\text{mm})$ | $C$  | $n$   |
| 0.5            | 2.07 | 0.088 | 0.25            | 2.78 | 0.125 |
| 2.5            | 1.42 | 0.050 | 1.25            | 2.54 | 0.112 |
| 6.5            | 1.19 | 0.025 | 2.25            | 2.30 | 0.098 |
| 14.5           | 1.02 | 0.005 |                 |      |       |
| 25, 35, 45     | 1.00 | 0     |                 |      |       |

从试验结果可以看出,由于角上有层流区,角区对放热系数的影响将随 $Re$ 数而增加。

式(5)的数据都取自 $l/de = 51.8$ 的截面。数据表明, $l/de > 40$ 时,中央区和角区的放热系数都已达到稳定。图6为 $l/de = 44.7$ 与 $51.8$ 二截面的 $Nu$ 数,可见相差不超过 $\pm 2\%$ 。角区的放热系数资料极少,见到的仅有文献[3]。在图7上与我们的数据进行了比较,一致性还是良好的。

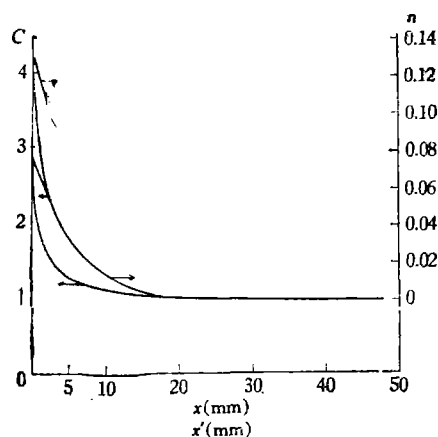


图 5  $C, n$  随  $x, x'$  的变化  
 $\alpha/\alpha_0 = C Re_f^{-n}$

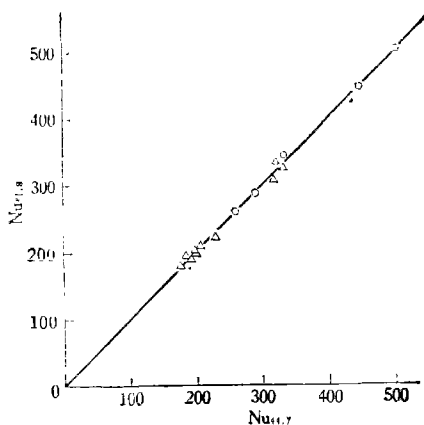


图 6  $l/de = 44.7, 51.8$  时的放热系数比较  
 $\triangle$  角区  $x' = 0.25\text{mm}$ ,  $\circ$  中央区  $x = 45\text{mm}$

### 三、切应力分布的测定

**1. 试验设备与试验方法** 采用空气作工质。迴路是开式的,由一台离心通风机(容量 $2090\text{m}^3/\text{hr}$ ,压头 $786\text{mm}$ 水柱)将空气送入迴路,经过文都里管、试验本体,最后流入大气。试验本体由二块铝板加工形成宽 $360\text{mm}$ ,高 $9.0\text{mm}$ 的矩形通道。肋条位于中央部分,将通道分成二个相同的、但独立的流道。流道宽高比为 $20$ ,长 $1200\text{mm}$ , $l/de = 70$ ,肋

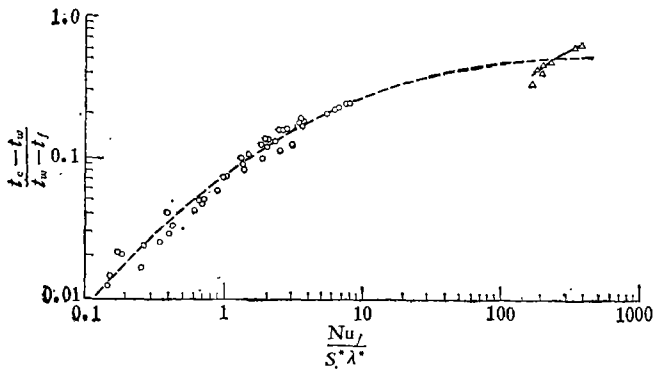


图7 矩形通道角区的放热系数

- 文献[3](空气)  
 △ 本文试验 ( $x' = 0.25$ )  
 — 本文外推的角上 ( $x' = 0$ ) 经验公式

$$S^* = \frac{b}{de}, \quad \lambda^* = \frac{\lambda_w}{\lambda_f}$$

$b$  为壁厚,  $de$  为当量直径;  $\lambda_w, \lambda_f$  分别为管壁与流体的热传导系数  
 $t_c$  为角上的壁温,  $t_w$  为稳定区的壁温,  $t_f$  为流体平均温度

条形状及几何尺寸见图8。

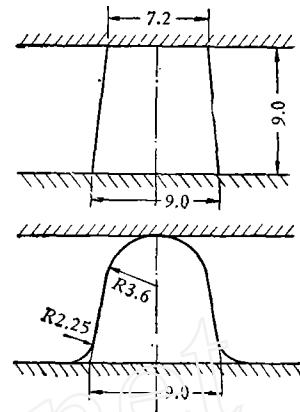


图8 肋条形状及几何

尺寸

上图梯形肋

下图为带圆角的梯形肋

文都里管的流量曲线根据流量变化范围分别在  $\phi 44.3$ ,  $\phi 74.3$  二个圆管内用动压头法进行刻度(十点法)。动压头用  $\phi 1$  毕托管测量。其压头用充酒精的差压计确定。文都里管的压差很小,用斜管式差压计(最小刻度 0.1mm 水柱)测量,充的工质也是酒精。在试验中为了减小流量波动对测量的影响,在差压计二侧接了阻尼。试验数据表明,流量大于  $400 \text{ m}^3/\text{hr}$  后,流量系数将保持不变,为 1.085。本试验采用流量系数计算流量。在试验中还测量了气压及文都里管和试验本体进、出口的气温。

测量局部切应力分布的方法很多,其精确度与复杂性也各不相同,在文献[5]内作了较详细的介绍。其中文献[6]的方法是比较简单可靠的方法,目前得到广泛的应用,特别是用于非圆形通道内<sup>[7]</sup>。为了利用该法测量,我们在内径为 18, 44.3, 74.3 三种圆管内进行了标定试验。在试验中采用五种不同直径的毕托管,其内外径比相应为  $0.2/0.3 = 0.667$ ;  $0.2/0.4 = 0.5$ ;  $0.3/0.5 = 0.6$ ;  $0.6/1.0 = 0.6$ ;  $1.2/2.0 = 0.6$ 。压力梯度  $\Delta p/\Delta x$  测量在 40 倍当量直径以外。试验结果见图9。我们的试验结果与文献[6]特别是文献[8]的数据符合得很好。上述标定结果可用经验公式表示为

$$4 < \log p^+ < 5, \quad \log \tau^+ = -1.12 + 0.825 \log p^+ \quad (6)$$

$$5 < \log p^+ < 7, \quad \log \tau^+ = -1.47 + 0.888 \log p^+ \quad (7)$$

这里  $p^+ = (p_t - p_s) d^2 / 4 \rho \nu^2$ ;  $\tau^+ = \tau_w d^2 / 4 \rho \nu^2$ ;  $d$  为毕托管外径;  $p_t, p_s$  分别为总压力及静压力;  $\rho, \nu$  分别为空气密度及运动粘度系数;  $\tau_w$  为壁面处的切应力。

图9上还表示了壁面法则(Karman 速度分布)计算的关系式,后者可表为<sup>[8]</sup>

$$p^+ = 4.134 \tau^+ (\log^2 \tau^+ + 3.723 \log \tau^+ + 3.620) \quad (8)$$

可见与我们的试验数据与公式(6), (7)符合得很好。在我们的试验范围  $0.5 < d_{\text{内}}/d_{\text{外}} < 0.667$  内没有发现毕托管内外径比的影响,因此测量切应力分布可用任一种管子,本试验

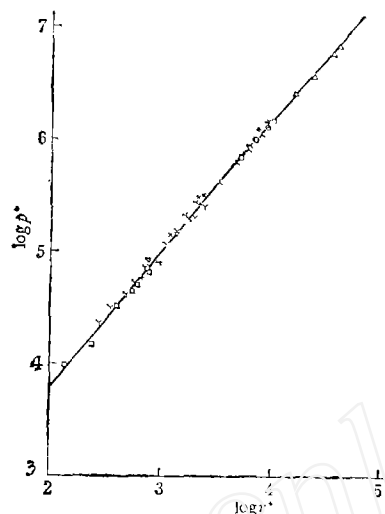


图9 圆管内毕托管的标定值

| 符 号 | 毕 托 管 尺 寸 |       | 刻度用圆管尺寸 |
|-----|-----------|-------|---------|
|     | 外 径       | 内外径比  | 内 径     |
| △   | 2         | 0.6   | 14.3    |
| ○   | 1         | 0.6   |         |
| ▽   | 0.5       | 0.6   |         |
| ×   | 0.4       | 0.5   |         |
| +   | 0.3       | 0.667 |         |
| 人   | 1         | 0.6   | 74.25   |
| Y   | 0.5       | 0.6   |         |
| □   | 0.3       | 0.667 |         |
| ∠   | 0.5       | 0.6   | 18.0    |
| ×   | 1         | 0.6   |         |

基本上采用的是  $\phi 0.5 \times 0.1$  这一种。

在本试验中速度分布及切应力分布均在离出口 2—5mm 处测量。许多专门的研究<sup>[4,7]</sup>表明,在出口(甚至在管外 0.2mm 处)速度场、切应力分布都没有变形。毕托管安装在坐标器上,可在三个垂直方向上移动,其最小读数为 0.05mm,起始位置根据后者与管壁相碰为准。为此安装了电路,相碰时指示灯发亮。为了保证毕托管与气流方向平行,坐标器还允许毕托管上下或左右旋转。压差均用充酒精的玻璃压差计测量。根据动压头可计算局部流速

$$u = c \sqrt{h \frac{\gamma_{cu} - \gamma_B}{\gamma_B} 2g} \quad (9)$$

这里  $\gamma_{cu}$ 、 $\gamma_B$  分别为酒精及水的比重,  $h$  为动压头在差压计上的读数,  $c$  为刻度系数取为 1。

**2. 试验结果** 我们对带梯形肋、带弧角的梯形肋以及不带肋三种矩形通道的切应

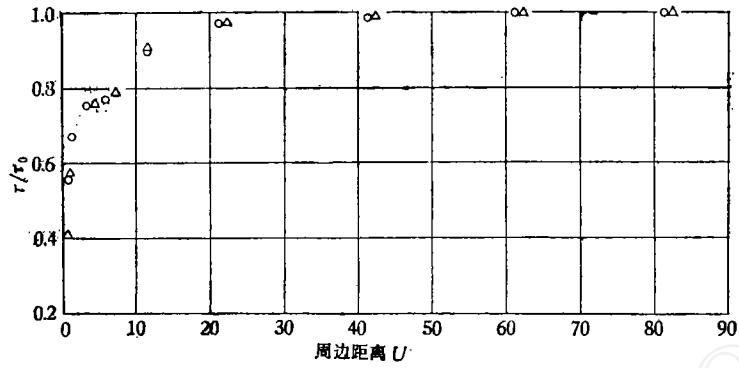


图 10a 矩形通道角区的切应力分布  
 $Re$ :  $\circ$   $7.4 \times 10^4$ ,  $\triangle$   $6.7 \times 10^4$   
 周边距离  $U(mm)$

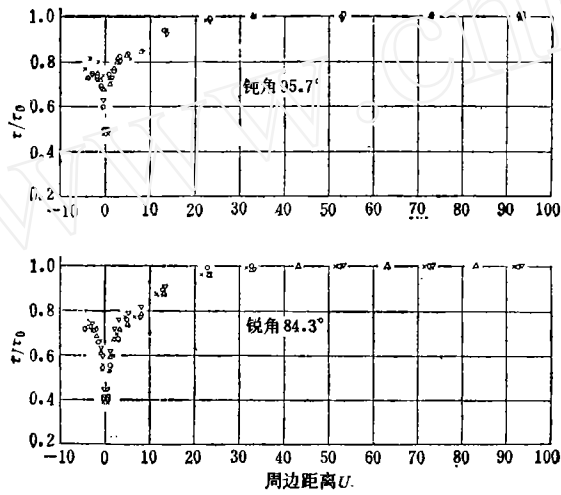


图 10b 梯形肋区的切应力分布  
 $Re$ :  $\circ$   $7.5 \times 10^4$   
 $\triangle$   $6.6 \times 10^4$   
 $\nabla$   $5.3 \times 10^4$   
 $\times$   $3.1 \times 10^4$   
 周边距离  $U(mm)$

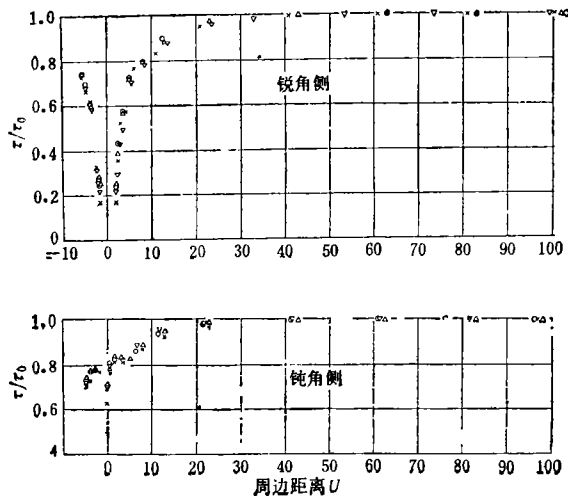


图 10c 带圆角的梯形肋附近的切应力分布  
 $Re$ :  $\circ$   $7.4 \times 10^4$   
 $\triangle$   $6.7 \times 10^4$   
 $\nabla$   $5.0 \times 10^4$   
 $\times$   $3.18 \times 10^4$   
 周边距离  $U(mm)$

力分布进行了测量。其切应力分布和中央区的局部阻力系数分别列入图 10, 11. 由图 11 可见, 中央区的阻力系数与 Blasius 公式相符, 分散度不超过  $\pm 10\%$ , 也与我们窄套管的阻力公式<sup>[4]</sup>基本一致。这证明我们的测量技术与试验方法是可靠的。由图可以看出下述

几点:

1. 切应力分布基本上与  $Re$  数无关, 只是在角上  $\tau/\tau_0$  随  $Re$  的减小而下降。这是由于在低  $Re$  数时角上出现了层流区, 在带弧形肋条的顶端表现得更为明显 (那里流动情况与带小尖角的三角形通道相似)。

2. 在肋区发生二次流。这可从切应力分布出现局部弯曲得到证实。流体沿着切应力由大变小的方向流动, 这样在角上出现一些涡流, 这从速度分布的测量上也得到说明。

3. 肋条上的切应力与壁上的切应力

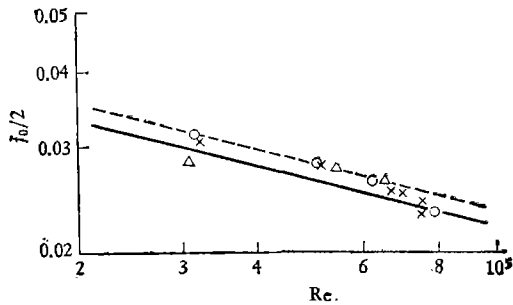


图 11 平板中部摩擦系数  $f_0$  与  $Re$  数的关系  
试验数据取自:  $\circ$  矩形通道  $\triangle$  带梯形肋,  $\times$  带圆角的梯形肋  
—— Blasius 公式  
—— 窄套管 ( $d_2/d_1 = 1.14$ ) 阻力公式<sup>[4]</sup>  
 $f/2 = 0.42 Re^{-1/4}$

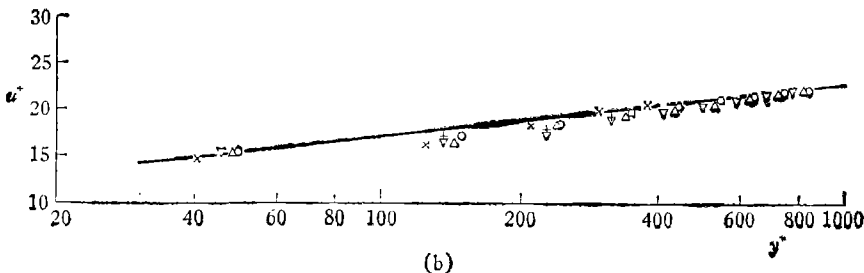
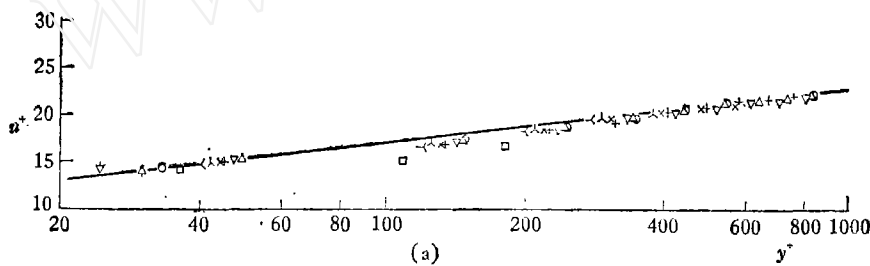


图 12 带肋矩形通道的速度分布 (带圆角的梯形肋)  
—— Karman 速度分布

(a) 锐角侧

|      |        |            |          |           |          |          |          |      |          |             |         |
|------|--------|------------|----------|-----------|----------|----------|----------|------|----------|-------------|---------|
| 符 号  | $\div$ | $\uparrow$ | $\nabla$ | $\square$ | $\angle$ | $\wedge$ | $\times$ | $+$  | $\nabla$ | $\triangle$ | $\circ$ |
| 周边位置 | 1.8    | 2.3        | 2.8      | 3.3       | 4.3      | 5.3      | 7.3      | 10.3 | 15.3     | 25.3        | 45.3    |

(b) 钝角侧

|      |          |     |          |             |         |
|------|----------|-----|----------|-------------|---------|
| 符 号  | $\times$ | $+$ | $\nabla$ | $\triangle$ | $\circ$ |
| 周边位置 | 0        | 2   | 5        | 10          | 20      |

在位置相当(即 $U$ 相等)时基本上接近。

4. 角区的影响范围不大, 仅二个当量直径。当 $x/de > 2$ 时,  $\tau/\tau_0 = 1$ 。

图 12 上按无量纲准则整理了带肋矩形通道的速度分布。可见甚至在角区也可以用 Karman 公式表示, 局部的偏离可能与二次流的存在有关。

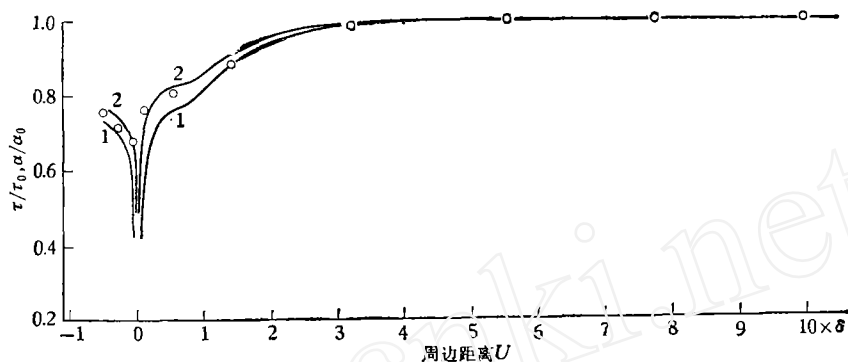


图 13 局部放热系数与切应力分布的比较

- 局部放热系数  $Re = 7.65 \times 10^4$   
 1 切应力分布 拐角  $90^\circ, 84.3^\circ$  (各  $Re$  数平均值)  
 2 切应力分布 拐角  $95.7^\circ$   
 通道宽高比  $\approx 20$   $\delta$  为通道高(即间隙)  
 周边距离  $U(mm)$

#### 四、讨 论

切应力和热流方程可分别写成

$$\tau = (\mu + \rho\varepsilon)\frac{du}{dy}, \quad q = -(\lambda + \rho C_p \varepsilon)\frac{dt}{dy} \quad (10)$$

改写成无量纲形式, 则分别为

$$\tau/\tau_0 = (1 + \varepsilon/\nu)du^+/dy^+, \quad q/q_0 = (1/Pr + \varepsilon/\nu)dt^+/dy^+ \quad (11)$$

式中  $u^+$  为无量纲速度  $u/u^*$ ,  $t^+$  为无量纲温度  $(t_0 - t)\rho C_p u^*/q_0$ ,  $u^*$  为摩擦速度  $\sqrt{\tau_0/\rho}$ ,  $\tau_0$  为稳定区的壁面切应力,  $q_0$  为稳定区的管壁热流,  $\varepsilon$  为湍流扩散系数,  $y^+$  无量纲距离  $yu^*/\nu$ 。

当  $Pr = 1$  时, 速度场、温度场相似, 此时

$$\tau/\tau_0 = q/q_0 \quad (12)$$

而放热系数根据定义可写作

$$\alpha = q/(t_w - t_f) \quad (13)$$

在稳定区相应为

$$\alpha_0 = q_0/(t_w - t_f) \quad (14)$$

在等壁温情况下由式(12)——(14)得

$$\alpha/\alpha_0 = q/q_0 = \tau/\tau_0 \quad (15)$$

对于  $Pr \approx 1$  与等热流情况,  $\alpha/\alpha_0$  与  $\tau/\tau_0$  可能有些差别。图 13 上对二者作了比较。可见基本上是接近的。角上差别较大, 除了热量与动量交换的不相似外是由于放热试验用的

元件是压成的,角上总有一点圆角,因此试验值有些偏高。另外在角上存在层流区,那里放热系数与阻力系数随  $Re$  数变化的规律不同,所以二者分歧变大了。

### 参 考 文 献

- [1] Nikuradze, J., VDI-Forschungsh, H. 356 (1932).
- [2] Eckert, E. R. G., et al., NACA-RM-E50J25 (1950).
- [3] Lowdermilk, H., et al., NACA-RM-E53J07 (1954).
- [4] 颜迪民等, 力学, 1 (1976).
- [5] Brown, K. C., et al., *J. Fluid Mech.*, 35, Part 4 (1969).
- [6] Престон, Г., *Механика*, 6 (1955).
- [7] Левченко, Ю. Д., *Атомная энергия*, 22, 3 (1967)
- [8] Michihiro Nishi, 日本机械学会论文集, 第40卷, 第331号.

www.cnki.net