

流体在带有狭槽管道中的流动^{*}

翁 荣 周

(化工与生化工程系)

摘要 本文研究了流体流过带有狭槽的管道的流动问题,得到了流场中的速度分布规律.

关键词 狭槽管道,狭槽流动,换热器

0 引言

最近为适应热核聚变发电的需要,出现了一种称为 *hypervaportron* 的新型换热技术^[1-2],在化工厂中,对于某些高热流的换热器及反应器,也会遇到这种情况.在这种换热技术里,当流体流过有狭槽的通道时,槽内流体受热膨胀到一定程度后,流体突然以很高速度射向主流,从而带走热量,此后,狭槽又被新鲜流体所充满,重新经历受热膨胀射向主流的过程.实验发现这种换热强度很高,因此引起人们的广泛重视,但至今人们对它的换热机理还不太清楚.因此,对流体流过狭槽的研究,具有很大的理论和实践意义.

1 控制方程

参考图1,在不可压缩流体忽略质量力的情况下,流体作稳态层流流过狭槽时的控制方程

如下:

$$\nabla(\bar{\nabla} \xi) = \bar{v} \bar{\nabla}^2 \xi, \quad (1)$$

$$\bar{\nabla}^2 \bar{\psi} = \xi, \quad (2)$$

其中

$$\bar{u} = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y}, \bar{v} = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, \quad (4)$$

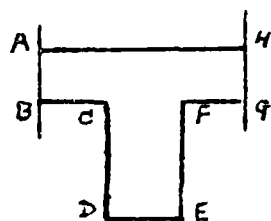


图1 管道模型

* 本文1992-10-16收到.

上面横杠表示有量纲量,其中 \bar{u}, \bar{v} 为速度向量 V 在 \bar{x}, \bar{y} 坐标上的分量, $\bar{\nu}$ 为运动粘性系数, ξ 为涡度, $\bar{\psi}$ 为流函数.

如果引进无因次量

$$u = \bar{u}/\bar{u}_0, \quad v = \bar{v}/\bar{u}_0, \quad (5a)$$

$$x = \bar{x}/\bar{L}, \quad y = \bar{y}/\bar{L}, \quad (5b)$$

$$\xi = \bar{\xi}/(\bar{u}_0/\bar{L}), \quad (5c)$$

于是方程(1)、(2)可化为下面的无因次形式

$$V(\nabla^2 \xi) = \frac{1}{R_*} \nabla^2 \xi, \quad (6)$$

$$\nabla^2 \psi = \xi, \quad (7)$$

这里

$$R_* = \bar{u}_0 \bar{L} / \bar{\nu} \quad (8)$$

其中 \bar{u}_0 为特征速度; \bar{L} 为特征长度.

边界条件如下:

(1) 对BCDEFG面

沿此是一根流线,故可取 ψ 为任意常数,即

$$\psi = C \quad (9)$$

涡度 ξ 按非滑流条件确定,即在此面上 $u, v=0$,故 $\partial u/\partial x=0$,所以

$$\xi = \partial u/\partial y. \quad (10)$$

(2) 出流面GH

按出流条件 $v=0$,故

$$\partial \psi/\partial x = 0, \quad (11)$$

ξ 按下式确定

$$\partial \xi/\partial x = 0. \quad (12)$$

(3) 入流面AB

入口速度为匀流,其速度为 u_0 =常数,故 ψ 可按下式确定

$$\partial \psi/\partial y = u_0, \quad (13)$$

而 ξ 为

$$\xi = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (14)$$

(4) 上边界AH

ψ 是一根流线,故 ψ 值可由入流面的上壁值确定,

ξ 按非滑流条件确定与式(10)相同

2 数值方法

为了求解式(6)、(7),将连续的各函数值离散到结点 (i, j) 上.

(1) 扩散项 采用中心差分

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i,j} + \Phi_{i-1,j}}{\Delta h^2},$$

这里 $\Phi_{i,j}$ 表示任意函数中在结点 (i,j) 的值,如图2所示; Φ 表示 $\zeta, \psi, \Delta x = \Delta y = \Delta h$.

(2) 对流项:采用上风差分

$$u \frac{\partial \Phi}{\partial x} = u \frac{\Phi_{i,j} - \Phi_{i-1,j}}{\Delta h}, \quad \text{当 } u > 0;$$

$$u \frac{\partial \Phi}{\partial x} = u \frac{\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i,j}}{\Delta h}, \quad \text{当 } u < 0,$$

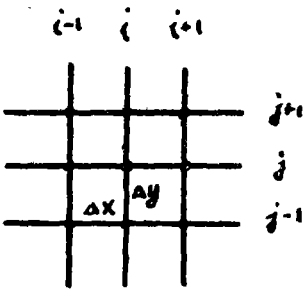


图2 结点划分

在 y 方向也有类似的三个差分式.

(3) 边界条件的差分

对 $BCDEFG$ 面,按式(9),取 $C=0$,故 $\psi=0$,为

了求 ζ 的差分计算式,把 ψ_{i,j_c+1} 按壁面值 ψ_{i,j_c} 展成台劳级数

$$\begin{aligned} \psi_{i,j_c+1} = \psi_{i,j_c} &+ \frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i,j_c} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \Big|_{i,j_c} \Delta y^2 \\ &+ \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3} \Big|_{i,j_c} \Delta y^3 + O(\Delta y^4), \end{aligned} \tag{A}$$

由非滑流条件及式(10)有

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j_c} = u_{i,j_c} = 0, \tag{B}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \Big|_{i,j_c} = \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{i,j_c} \zeta_{i,j_c}, \tag{C}$$

将式(B)、(C)及式(10)代入式(A)得

$$\zeta_{i,j_c} = 2(\psi_{i,j_c+1} - \psi_{i,j_c})/\Delta h, \tag{15}$$

对于任意壁面位置和 ζ_w 的壁面值可以得到

$$\zeta_w = 2(\psi_{w+1} - \psi_w)/\Delta h, \tag{16}$$

对出流边 GH : ψ 由式(11)有

$$\psi_{i,j} = \psi_{i-1,j}$$

ζ 由式(12)有

$$\zeta_{i,j} = \zeta_{i-1,j}.$$

对入流面 AB : ψ 由式(13)有

$$\psi_{1,j} = \psi_{1,j-1} + U_0 \Delta h,$$

ζ 按式(14)有

$$\zeta_{1,j} = \frac{u_{1,j} - u_{1,j-1}}{\Delta h} + \frac{\psi_{1,j} - 2\psi_{2,j} + \psi_{3,j}}{\Delta h^2}.$$

对上边界 AH :

$$\psi_{i,j_c} = \psi_{i,j_c-1} + U_0 \Delta h,$$

$$\zeta_w \text{ 按式(16).}$$

4 结果

本文在 5mm 宽 10mm 深的矩形狭槽中(不考虑槽距的影响),对不同的 Re 进行了数值求解,编写了计算程序,由于篇幅所限,计算程序从略.其计算结果画于图3和图4中,图3和图4分别相应于 $Re=50$ 和 $Re=500$ 的情况.从图3和图4中可以看到,当随着 Re 增大时,在狭槽底部生成了漩涡.

上述的结果表明底部流体的漩涡作用,可以减少边界层厚度增加扰动,有利于提高壁面与流体之间的换热强度.因此,在管道中带有狭槽,可以大大改善换热效果,这有很大的工程意义.

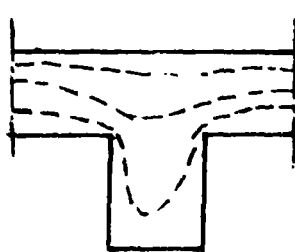


图3 $Re=50$ 速度分布

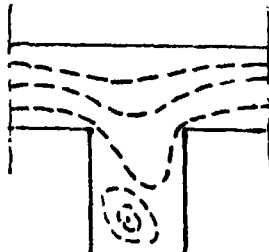


图4 $Re=500$ 速度分布

参 考 文 献

- [1] Duesing, G., *JET Neutral Beam Injection System construction and Components Tests*, Proc. 13th symposium on Fusion Technology, Varese, (1984).
- [2] Haange R, et al. *JET Neutral Injection Beamline System Manufacture and Assembly*, Proc. 11th symposium on Fusion Engineering, Austin, (1985).

The Flow of Fluid Through a Pipe with Narrow Groove

Weng Rongzhou

(Department of Chemical and Biochemical Engineering)

Abstract The author deals with the flow of fluid through a pipe with narrow groove, and obtains the distribution of velocities in the flow field.

Key words the pipe with groove, the flow through a groove, heat exchanger