

垂直多孔通道中的变质量流动

徐志刚, 俞丰, 李瑞江, 吴勇强, 朱子彬, 张成芳

(华东理工大学化工学院, 上海 200237)

摘要: 导出了在垂直圆形多孔通道中的分流和合流流动含重力项的动量交换方程. 通过大型冷模实验, 得出了分流、合流在向上流动、向下流动时的静压分布和虚拟压强分布, 应用黄金分割法进行一维搜索, 得出了实验条件下分流、合流的动量交换系数为 0.77 和 1.26, 平均相对误差分别为 10% 和 15%. 结果说明表观气速较小时, 重力的影响不能忽略.

关键词: 多孔通道; 变质量流动; 动量交换; 分流; 合流

中图分类号: O351 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2003)01-0001-07

1 前言

多孔通道中的流动是化工、冶金、建筑、核能等各种工业过程中的基本问题, 更是换热器、流体分布器、径向反应器等技术的关键, 已引起了研究者广泛的重视^[1,2]. 对水平多孔通道中的变质量流动已经进行了广泛的研究, 得出了许多有益的结果. 金涌等^[3]研究了流化床气体分布器, 得出分流动量交换系数为 $0.6041 \sim 0.1561(w_A^2 - w_B^2)/w_A^2$; 张成芳等^[4]测定了水平多孔管及多孔套管中分流和合流的动量交换系数, 得出分流的动量交换系数 $k_d = 0.57 + 0.15w_B/w_A$, 合流动量交换系数 $k_c = 0.98 + 0.17w_A/w_B$, 考虑到密集开孔, 孔前后流道流速变化很小, 则 k_d 取 0.72, k_c 取 1.15; 黄谊仁等^[5]研究了 $\phi 50$ mm 多孔管中水的分流流动, 得出了分流动量交换系数为 $(0.605 \pm 0.0109) u/w$; 王昂等^[6]研究了 $\phi 32$ mm 多孔管中水的分流流动, 得出了分流动量交换系数为 $(0.475 \pm 0.015) u/w$. 在垂直多孔通道中的流动分析仍然沿用水平体系中变质量流动的动量交换方程, 主要结果有^[7-10]: 宋续祺等研究了 $\phi 500$ mm 径向床中分流和合流流动, 得出了分流的动量交换系数为 $0.684 + 0.0128(dw/dz)/w$, 合流动量交换系数为 $1.135 + 0.0158(dw/dz)/w$.

但本文作者在实验过程中发现, 重力对流道静压的影响并不总是可以忽略的, 因此考虑在动量交换方程中引入重力项, 并应用此动量交换方程对 2 种不同规模、2 种不同类型多孔通道中获得的数据进行处理, 得出了分流、合流的动量交换系数, 并与已有的结果进行了对比.

2 数学模型

在如图 1 所示的垂直向下分流通道中, 假设: (1) 流动在 z 方向上是一维的, 仅为 z 的函数; (2) 孔间距足够小, 可以认为侧流流体沿壁面连续分布. 流体在垂直分流通道中作向下流动, 以进口端为 z 轴原点, 取一微元控制体, 在单位时间内对其建立质量守恒

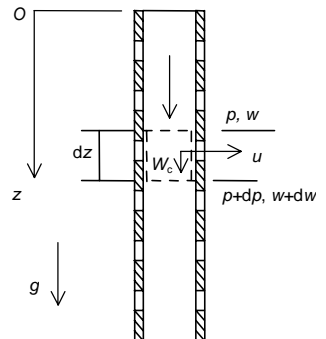


图 1 垂直分流通道微元控制体
Fig.1 Differential element of the vertical perforated channel

收稿日期: 2002-07-27, 修回日期: 2002-11-24

基金项目: 上海市重中之重重点学科建设项目资助(编号: 2000)

作者简介: 徐志刚(1967-), 男, 江苏省无锡市人, 博士, 副教授, 化学工程与工艺专业.

和 z 方向的动量守恒方程组.

$$\text{质量守恒: } Adw + A_c u = 0. \quad (1)$$

$$\text{动量守恒: } pA - (p + dp)A + \rho g Adz - \tau_w \pi D dz = \rho A (w + dwz)^2 - \rho A w^2 + \rho A_c u w_c. \quad (2)$$

对于圆管有 $A = \frac{\pi}{4} D^2$, $A_c = \pi D \beta dz$, 壁面流体剪切应力 $\tau_w = \lambda \frac{\rho w^2}{8}$, 将以上各式及式(1)代入式(2), 简化并忽略 dw 的高阶项, 可以导出:

$$\frac{dp}{dz} - \rho g + \frac{\lambda}{2D} \rho w^2 + 2\rho w \frac{dw}{dz} - \rho w_c \frac{dw}{dz} = 0. \quad (3)$$

假定 $w_c = 2\alpha w$, α 为常数, 又令

$$k_d = 1 - \alpha, \quad (4)$$

得出动量交换方程:

$$\frac{dp}{dz} - \rho g + 2k_d \rho w \frac{dw}{dz} + \frac{\lambda}{2D} \rho w^2 = 0. \quad (5)$$

同样地对于垂直向上的分流流动, 以流体进口端为基准, 可得出:

$$\frac{dp}{dz} + \rho g + 2k_d \rho w \frac{dw}{dz} + \frac{\lambda}{2D} \rho w^2 = 0. \quad (6)$$

对于流体作垂直方向的合流流动, 通过相同的分析, 可得出:

$$\frac{dp}{dz} \pm \rho g + 2k_c \rho w \frac{dw}{dz} + \frac{\lambda}{2D} \rho w^2 = 0. \quad (7)$$

如果重力方向与合流主流方向相反, 则重力项取“+”号; 方向相同, 则重力项取“-”号.

3 冷模实验

为了准确地测定分流和合流流动的动量交换系数, 共建了二套冷模实验装置(参数如表 1), 主要流程如图 2, 冷模设备结构如图 3.

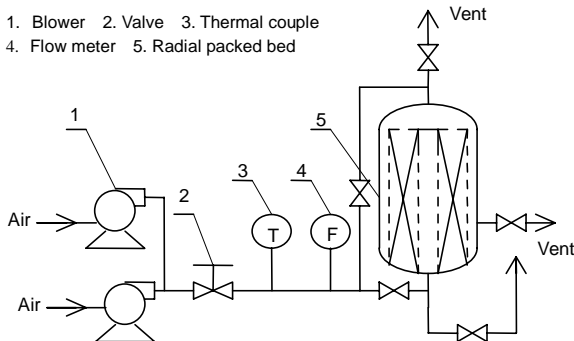


图 2 实验装置流程图

Fig.2 Flowsheet of the experimental facilities

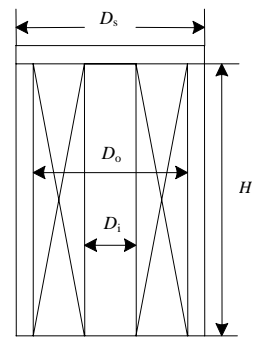


图 3 冷模设备简图

Fig.3 Sketch of the mock-up column

表 1 冷模实验装置几何尺度和条件

Table 1 Dimensions of the mock-up and the experimental condition

Configuration	D_s (m)	H (m)	D_i (m)	D_o (m)	D_p (mm)	Q (m ³ /h)
Column of 120° sector (A)	3.0	4.0	1.2	2.4	ϕ 3~5	<10000
Full cylindrical column (B)	3.0	8.0	1.2	2.4	ϕ 3~5	<36000

空气经离心风机输送入管道,经调节阀调整流量、温度计测量气体温度、毕托管测出气体压力和压差后,进入冷模设备的入口,气体流过床层,从冷模设备的出口离开放空.气体在冷模设备中的流向通过一组插板阀来控制,从而可以分别对分流、合流及向上流动、向下流动进行实验测试.

径向床中填充 ϕ 3~5 mm 的塑料小球,在中心管和外环通道上,均匀开 ϕ 2 mm \times 8 mm 孔,开孔率 30%;在流道上每隔 100 mm 安排一测量点,以测定该处气体的壁面静压.为了避免速度测量误差,有目的地使系统的阻力集中在床层,以获得均匀的径向流速.实验时空气温度 30~50°C,分流进口空气表压 300~1500 Pa,计算时空气密度为 1.2 kg/m³,粘度为 1.8 \times 10⁻⁵ Pa·s.

主要测试仪器有 JM-9 型微差压计(测压差范围 0~1470 Pa 精度 0.1 Pa,上海气象仪器厂生产)、毕托管(上海汽轮机研究所)和 QDF-3 型热球式电风速仪(测速范围 0~10 m/s, 5~30 m/s,测量误差满量程 $\leq \pm 5\%$,北京检测仪器厂生产)、QDF-2B 型热球式电风速仪(测速范围 0~5 m/s,最小检测量 0.05 m/s,测量误差满量程 $\leq \pm 3\%$,北京检测仪器厂生产).

4 数据处理

以垂直分流流动为例,首先将式(5)离散化,假设以进口段为基准将分流流道等分成 n 段,如果流速分布、 i 点的静压、 k_d 已知,则可以通过下式计算出 $i+1$ 点处的静压:

$$(p_{i+1} - p_i) \pm (\rho g z_{i+1} - \rho g z_i) + 2k_d w_{i+\frac{1}{2}} (w_{i+1} - w_i) + \frac{\lambda}{2D} \rho w_{i+\frac{1}{2}}^2 (z_{i+1} - z_i) = 0, \quad (8)$$

也可写成:

$$(p_{i+1} \pm \rho g z_{i+1}) - (p_i \pm \rho g z_i) + 2k_d w_{i+\frac{1}{2}} (w_{i+1} - w_i) + \frac{\lambda}{2D} \rho w_{i+\frac{1}{2}}^2 (z_{i+1} - z_i) = 0,$$

记虚拟压强 $p_v = p \pm \rho g z$, 以上各式中“+”表示向上流动,“-”表示向下流动,其中:

$$w_{i+\frac{1}{2}} = \frac{w_{i+1} + w_i}{2}. \quad (9)$$

以计算 p_{i+1} 和实测静压 $p_{e,i+1}$ 的方差为目标函数:

$$S = \sum_{i=1}^n (p_{i+1} - p_{e,i+1})^2, \quad (10)$$

用黄金分割法^[11]进行一维搜索以求出使方差 S 达到极小值时的 k_d .

按照相同的方法,可导出合流流动时动量交换系数计算的公式和步骤,从而求得合流动量交换系数 k_c .

多孔管摩擦系数 λ 按粗糙的湍流圆管计算 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2 \lg \left(\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{18.7}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$, 绝对粗糙度取 0.01 mm.

5 结果与讨论

5.1 预实验

在实验设备设计时有目的地使系统的阻力主要集中在床层,从而使径向流速 u 基本均匀. 在 $\phi 3000$ mm 的扇形冷模和整体冷模中进行实验测试,在空气流量 5000~9000 m^3/h 范围内,分别测定了主流向上和向下流动的分流和合流流动流体在流动方向上的速度分布, w 随 z 的变化是线性关系,说明 u 的数值是不随 z 变化的,冷模设计是合理的.

为了准确地测定动量交换系数,控制流量使得进口平均流速较小,按实验最大进口流速计算,动量交换方程中阻力项 $\frac{\lambda}{2D}\rho w^2$ 的值约为 0.8 Pa/m,动量交换项 $2\rho w \frac{dw}{dz}$ 的值约为 24 Pa/m,阻力项与动量交换项相比可忽略,从而避免了摩阻系数的计算对动量交换系数参数估值的影响.

5.2 分流静压分布与动量交换系数

图 4 和 5 分别给出了空气流量为 32800, 4200 m^3/h 时向上流动、向下流动的壁面静压 p 和虚拟压强 p_v 的实验值和理论计算曲线.

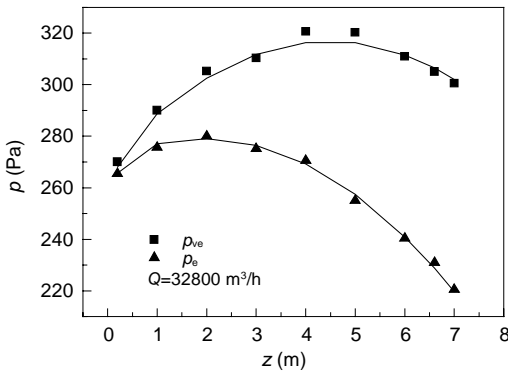


图 4 向上分流(B)静压和虚拟压强沿通道的分布
Fig.4 Pressure and virtual pressure profile along channel under upward splitting flow

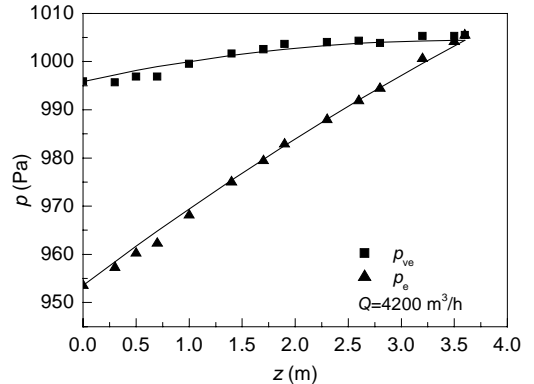


图 5 向下分流流动静压和虚拟压强沿通道的分布
Fig.5 Pressure and virtual pressure profile along channel under downward splitting flow

从图中可以看出:

(1) 主流向上分流流动的壁面静压、虚拟压强的分布曲线和主流向下分流流动的壁面静压、虚拟压强分布曲线炯然不同,此时重力产生的静压已达 11.8 Pa/m,对动量交换方程有重大影响,在垂直的分流流动中必须考虑重力的影响.

(2) 在流体作向上的分流流动时,动量交换项引起的能量回升将用以克服流体向上流动的位能,在进口端流速较大,动量交换项大于位能的增加,其多余的量将引起静压的回升;当分流后动量交换项逐渐减小以致于不足以克服位能的增加,其不足的部分将由静压的下降来补充.

(3) 在流体作向下分流流动时,动量交换项引起的能量和位高的下降都将引起流体静压回升.

假定 u 为常数,对以上动量交换方程用黄金分割法进行一维搜索可以求得使理论计算静压和实测静压方差最小时的动量交换系数,在各实验条件下得出的动量交换系数列于表 2. 由表可得出,在实验范围内动量交换系数平均值为 0.77,平均相对误差 10%,比水平多孔管分流动量交换系数 0.72 略大^[4].

表 2 分流动量交换系数

Main flow	L (m)	Q (m^3/h)	w_0 (m/s)	$Re_0 \times 10^{-5}$	k_d
Upward (A)	3.4	5900	4.32	3.62	0.766
Upward (A)	3.4	7200	5.24	4.39	0.804
Upward (A)	3.6	7880	5.81	4.87	0.760
Upward (A)	3.6	8500	6.26	5.24	0.823
Upward (A)	3.6	8700	6.37	5.33	0.804
Downward (A)	3.6	8540	6.30	5.28	0.746
Downward (A)	3.6	4200	3.04	2.55	0.714
Upward (B)	7.2	32800	8.06	6.45	0.829
Upward (B)	7.2	31800	7.82	6.26	0.826
Upward (B)	7.6	34020	8.36	6.69	0.692
Upward (B)	7.6	33550	8.24	6.59	0.816
Upward (B)	7.6	33120	8.13	6.50	0.792
Downward (B)	7.0	33150	8.14	6.51	0.706
Downward (B)	7.0	32580	8.00	6.40	0.758

5.3 合流动量交换系数

图 6 和 7 分别给出了空气流量为 $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ 时向上合流、向下合流的壁面静压和虚拟压强的分布和理论计算曲线。

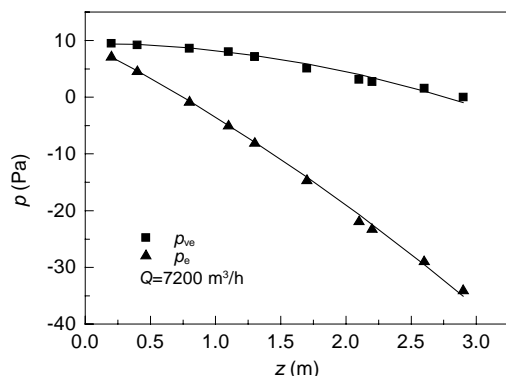


图 6 向上合流(A)静压和虚拟压强沿通道的分布
Fig.6 Pressure and virtual pressure profile along channel under upward collecting flow

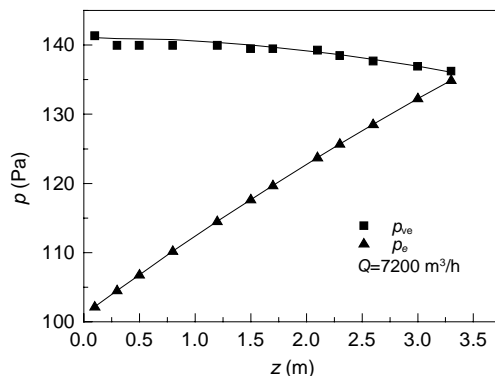


图 7 向下合流(A)静压和虚拟压强沿通道的分布
Fig.7 Pressure and virtual pressure profile along channel under downward collecting flow

从图中可以得出：

(1) 主流向上合流流动的壁面静压、虚拟压强的分布曲线和主流向下合流流动的壁面静压、虚拟压强分布曲线炯然不同，说明在垂直的合流流动中必须考虑重力的影响。

(2) 在流体作向上的合流流动时，流体的虚拟压强沿流动方向略有降低，而流体静压沿流动方向下降较快，这主要是动量交换引起的能量损失和流体向上流动的位能的增加都需要流体静压的下降来补充而造成的；

(3) 在流体作向下的合流流动时，流体的虚拟压强沿流动方向略有降低，而流体静压沿流动方向上升较快，这主要是流体向下流动的释放位能使得流体静压的上升，远不足以弥补动量交换引起的能量损失。

根据流道流速分布和静压分布计算出的合流动量交换系数列于表 3。

表 3 合流动量交换系数
Table 3 Momentum exchange coefficients for collecting flow

Main flow	L (m)	D (m)	Q (m ³ /h)	w_0 (m/s)	$Re_0 \times 10^{-5}$	k_c
Upward (B)	7.0	0.60	27000	2.95	1.18	1.10
Upward (A)	3.0	0.56	7200	2.40	0.90	1.44
Upward (A)	3.0	0.56	7920	2.58	0.96	1.41
Upward (A)	3.0	0.56	8750	2.87	1.07	1.10
Upward (A)	3.0	0.56	9000	2.93	1.09	1.07
Downward (B)	3.3	1.256	7200	5.09	4.26	1.42

从表 3 可得, 在实验范围内合流动量交换系数平均值为 1.26, 平均相对误差 15%, 较水平多孔管分流动量交换系数 1.15 略大^[4]。

前人的工作或是在水平管道中进行, 或是在表观流速很大时进行的^[3-6], 因此不考虑重力影响也是合理的。当表观气速较小时, 即流体重力项 ρg 与动量交换项 $2k\rho w \frac{dw}{dz}$ 数量级相当时, 则必须考虑重力影响。

6 结论

本文研究流体在垂直方向上的分流流动和合流流动, 推导了描述在垂直方向上的分流流动和合流流动的动量交换方程, 并在大型冷模设备中测定了分流和合流流道的静压分布, 通过参数估计确定了动量交换系数。得出:

(1) 在垂直方向上的分流流动和合流流动, 重力有重要的影响, 重力项必须包含在动量方程中, 动量交换方程为

$$\frac{d(p \pm \rho g z)}{dz} + 2k\rho w \frac{dw}{dz} + \frac{\lambda}{2D} \rho w^2 = 0.$$

在上式中, 以进口段为基准, 如果重力方向与主流方向相反则重力项取“+”号, 如果重力方向与主流方向相同则重力项取“-”号。

(2) 根据实验测定流道静压分布, 通过参数估值得出分流动量交换系数为 0.77, 平均相对误差 10%; 合流动量交换系数为 1.26, 平均相对误差 $\pm 15\%$, 其值与现有数据^[4]范围一致。

(3) 由于位能对垂直的分流和合流流动的静压分布有影响, 在流体均布设计时须注意考虑其影响。

符号表:

A	流道横截面面积 (m ²)	p_e	实测流道静压 (Pa)
A_c	侧壁小孔面积 (m ²)	p_i	第 i 段处流道计算静压 (Pa)
D	流道水力当量直径 (m)	$p_{e,i}$	第 i 段处流道实测静压 (Pa)
D_s	冷模壳体直径 (m)	Q	空气流量 (m ³ /h)
D_i	冷模径向床内径 (m)	Re_0	分流进口雷诺数或合流出口雷诺数
D_o	冷模径向床外径 (m)	u	侧壁小孔穿孔流速 (m/s)
D_p	径向床填料颗粒直径 (m)	w	流体在流道横截面上的垂直平均流速 (m/s)
g	重力加速度 (m/s ²)	w_0	分流进口平均流速或合流出口平均流速 (m/s)
H	冷模总高 (m)	w_i	第 i 段流体在流道横截面上的垂直平均流速 (m/s)
k	动量交换系数	w_c	侧壁小孔穿孔流速在轴向的分速度 (m/s)

k_c	合流动量交换系数	z	轴向距离 (m)
k_d	分流动量交换系数	z_i	第 i 段与多孔通道坐标原点的距离 (m)
L	流道长度 (m)	α	第 i 段流体侧流速度与垂直平均流速之比
p_v	计算流道虚拟压强 $p \pm \rho g z$ (Pa)	λ	摩阻系数
p_{ve}	实测流道虚拟压强 $p_e \pm \rho g z$ (Pa)	ρ	流体密度 (kg/m^3)
p	计算流道静压 (Pa)	τ_w	壁面剪切阻力 (N/m^2)

参考文献 :

- [1] Bassiouny M K, Martin H. Flow Distribution and Pressure Drop in Plate Heat Exchangers [J]. Chem. Eng. Sci., 1984, 39(4): 693–670.
- [2] Genkin V S, Dilman V V, Sergeev S P. The Distribution of a Gas Stream over the Height of a Catalyst Bed in a Radial Contact Apparatus [J]. Inter. Chem. Eng., 1973, 13(1): 24–28.
- [3] 金涌, 俞芷青, 孙竹范, 等. 流化床多管式气流分布器的研究 [J]. 化工学报, 1984, 35(3): 203–212.
- [4] 张成芳, 朱子彬, 徐懋生, 等. 径向反应器流体均布设计的研究 [J]. 化工学报, 1979, 30(1): 67–88.
- [5] 董谊仁, 过健. 填料塔管式液体分布器的研究和设计 [J]. 化学工程, 1990, 18(3): 28–34.
- [6] 王昂, 王黎, 张士博, 等. 变孔径直管液体分布器的研究和设计 [J]. 化学工程, 1993, 21(3): 22–29.
- [7] 宋续祺, 汪展文, 金涌. 移动床径向反应器中流体力学行为的研究 [J]. 化工学报, 1992, 43(3): 268–274.
- [8] 吴民权, 黄发瑞, 束忠明, 等. 圆柱容器内流经环形填充床流动的研究 [J]. 水动力学研究与进展, 1992, 7(1): 41–51.
- [9] 黄发瑞, 吴民权, 束忠明, 等. 具有变截面流道的圆柱容器内流经环形填充床流动的研究 [J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(1): 107–113.
- [10] 王金福, 杜晓华, 金涌, 等. 重整径向反应器布气系统的流体力学行为及其优化设计 [J]. 石油炼制与化工, 1997, 28(4): 47–53.
- [11] 陈开周. 最优化计算方法 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985. 249.

Variable-mass Flow through the Vertical Perforated Channels

XU Zhi-gang, YU Feng, LI Rui-jiang, WU Yong-qiang, ZHU Zi-bin, ZHANG Cheng-fang

(Institute of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The momentum equation with gravity considered was applied to describe the variable-mass flow in the vertical perforated channel for radial packed reactors. The profiles of pressure and the virtual pressure along the perforated channels were measured for upward and downward flows in the distributor or collector on large scale mock-up. Under the experimental conditions, the coefficients of momentum exchange for distribution and collection were calculated to be equal to 0.77 with the average relative error of 10% and 1.26 with the average relative error of 15% respectively. It is concluded that gravity can not be neglected as the mass velocity is relatively small.

Key words: perforated channel; variable-mass flow; momentum exchange