

填充床中的速度分布预测*

程振民** 袁渭康

(华东化工学院联合化学反应工程研究所, 上海 200237)

关键词 填充床 速度分布 水力半径

1 引言

Smith 等早在 1953 年就作了填充床中速度分布的实验研究^[1], 但至今尚未建立关于速度分布的普遍化关联式。作为填充床基本性质之一的速度分布, 对于正确认识床内的传热传质过程以及建立固定床反应器的模型都具有重要意义。研究表明^[2], 反应器流动模型考虑了速度分布等因素的径向变化, 比用平推流模型能更好地预测实验现象。随着对速度分布和空隙率等认识的深入, 反应器流动模型越来越真实。Stephenson^[3]报道了他们的激光测速实验, 使实验研究方法趋于成熟, 但理论预测问题仍显得落后。近 10 年来一直采用修正的 Brinkman 方程进行预测^[4], 但结果与实验现象的偏差太大。

Brinkman 方程本质上是多孔介质中流体流动的 Darcy 定律同均匀流体中 Navier-Stokes 方程的结合

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -150u\mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2 d_p^2} - 1.75\rho u^2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 d_p} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu' \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

边界条件 $z=0, p=p_0; r=0, \frac{\partial u}{\partial r}=0; r=1, u=0$

值得注意的是:

1. 方程右侧前两项已用 Ergun 方程表达了压力降 $\partial p / \partial z$, 则不必引入第 3 项, 其引入完全是为了产生壁上流速为零这一边界条件。

2. 方程右侧第 3 项是流体本身的粘性摩擦项, 粘度 μ' 是分子粘度和涡流粘度之和。而涡流粘度是 1 个随离壁面距离而变化的变量, 故难以给出其正确值。

2 模型建立

填充床中流体通过颗粒间的缝隙流动时, 流动路线曲折, 流道面积不断变化。基于填充床中流体流动与空管中流动具有类似性, 可将这些流道看成 1 束平行管, 其管长和压降

1992-07-04 收到初稿, 1993-04-10 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

** 通讯联系人。

都与固定床原型相同。这些管束的管径由流动空间内所有润湿面积和流动体积决定。

2.1 Ergun 方程的修正

Ergun 方程的最初形式^[5]是将填充床作为 1 个整体导出的, 并设填充床为圆柱形, 且不考虑器壁影响。若直接采用这种形式, 由于壁上空隙率为 1, 则壁处的流速为无穷大, 而实际上应为零, 因此 Ergun 方程必须加以修正: 考虑器壁的影响, 引入以流动空间和润湿面积表达的水力半径, 可将各种几何形状的填充床转化为 1 束等效的空管, 从而使修正的 Ergun 方程具有广泛适用性。

流体在圆柱形空管中作等温流动时的压降为

$$\Delta p = 4f (L/d_i)(\rho u^2/2) \quad (2)$$

式(2)应用于固定床时, u 应为流体在孔道中的真实平均流速 v , 圆管直径 d_i 应以固定床当量直径 d_e 代替, 而管长应以流体在床层中的流动途径代替。考虑到流体在固定床中的流动途径远大于固定床的长度, 可以用填充床中的阻力因子 f_M 代替空管中的阻力因子 f 。 v 和 d_e 表示为

$$v = u/\varepsilon \quad (3)$$

$$d_e = (2/3)[\varepsilon/(1-\varepsilon)]d_p \quad (4)$$

代入式(2)中得到

$$\Delta p = 3f_M \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \frac{\rho u^2}{d_p} L \quad (5)$$

Ergun 方程的表达式为

$$\Delta p = f_M \frac{\rho u^2}{d_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} L \quad (6)$$

比较式(5)与式(6), 可得出以水力半径和空隙流速表示的修正 Ergun 方程

$$\Delta p = \frac{4}{3} f_M \frac{L}{d_e} \frac{\rho v^2}{2} \quad (7)$$

式中

$$d_e = 4R_h; \quad f_M = \frac{150}{Re_p} + 1.75; \quad Re_p = \frac{d_p \rho u}{\mu(1-\varepsilon)} = \frac{2}{3} \frac{d_e v \rho}{\mu}$$

式(7)的物理含义为: 将填充床看作 1 束直径为 d_e 的空管, 空管中的流速即为流体在填充床空隙中的平均流速。

2.2 速度分布计算方法

管壁的影响对壁面附近流速的计算十分重要。为考虑壁的影响, 应研究管壁 R 至某一径向位置 r ($0 \leq r \leq R$) 之间的环形区域的流动。这是 1 个有外壁无内壁的圆环形填充床, 将其转化为等价的空管后, 便可求出这一圆环截面上平均空隙流速。

体积微元 $(2\pi r dr)L$ 中含有的颗粒数为

$$d_n = \frac{[1-\varepsilon(r)](2\pi r dr)L}{\pi d_p^3/6} \quad (8)$$

r 和 R 之间的环形区域内所含颗粒外表面积为

$$A_p = \int_r^R dn \cdot \pi d_p^2 = 12L \int_r^R \pi r [1-\varepsilon(r)] dr / d_p \quad (9)$$

从壁表面积 $A_w = 2\pi RL$ 和流动空间 $V = L \int_r^R 2\pi r \varepsilon(r) dr$ 可得水力半径

$$R_h = \frac{V}{A_w + A_p} = \frac{L \int_r^R 2\pi r \varepsilon(r) dr}{2\pi RL + 12L \int_r^R \pi r [1 - \varepsilon(r)] dr / d_p}$$

则当量直径为

$$d_e = 4R_h = \frac{4 \int_r^R r \varepsilon(r) dr}{R + 6 \int_r^R r [1 - \varepsilon(r)] dr / d_p} \quad (10)$$

空隙率分布 $\varepsilon(r)$ 采用 Mueller 关系式^[6]计算。由 d_e 表达式 (10) 可完成由填充床向空管的转化。由于 $\varepsilon(r)$ 的描述比较复杂, 积分项难以解析表达。本文采用龙贝格求积法进行数值运算, 积分精度为 10^{-8} 。

在床层的同一截面上, 各点具有相同的压强, 且等于整个填充床的压强 Δp 。已知 Δp 和 d_e 便可根据式 (7) 求出所选截面内的 v 。床层压降采用 Menta 和 Hawley 式^[7]计算, 该式考虑了器壁对床层压降的影响。

若已知 R 和 $r - \Delta r$ 之间的流速 v_1 以及 R 和 $r + \Delta r$ 之间的流速 v_2 , 可得到 $r - \Delta r$ 和 $r + \Delta r$ 之间的表观流速

$$u(r) = \frac{\pi[R^2 - (r - \Delta r)^2]v_1 - \pi[R^2 - (r + \Delta r)^2]v_2}{\pi[R^2 - (r - \Delta r)^2] - \pi[R^2 - (r + \Delta r)^2]} \varepsilon \quad (11)$$

当 Δr 足够小, $u(r)$ 就是 r 点的表观流速。

3 模 拟 计 算

根据本文提出的物理模型, 可对速度分布进行模拟计算, 并与实验^[3]比较。

在采用光学法^[3]测定速度分布之前, 采用热线风速仪研究固定床中流速分布。热线法只能测量流体离开床层后的速度, 由于流体离开床层后会造成重新混合, 致使测量失真。热线法测得速度最大值处于距壁面 $1d_p$ 处。激光测速实验得到不同的结果, 流速最大和最小值处于距壁 $0.2d_p$ 和 $0.5d_p$ 处。光学法对流动场无干扰, 测定流体的真实流动情况比较可靠。

模拟计算选取与光学实验^[3]完全相同的条件, 即 $d_i / d_p = 10.8$, $\Delta r = 0.025R$, 得到与实验一致的结果 (见图 1)。而采用文献^[2]方法却不能反映速度分布的脉动特点, 其数值也有较大偏差。

实验中 $\Delta r = 0.025R$, 对于求点速度可能太大。计算结果表明, $\Delta r = 0.01d_p$ 时才能得到点速度, 最大值为 1.736, 最小值为 0.610, 所处位置不变。 Δr 如此小, 实验难以做到。

在许多情况下, 人们都按平推流来简化处理反应器模型, 并且认为流速越高越接近平推流, 图 2 说明这种看法并不正确。流速增大到一定值后速度分布趋于不变, 始终不能达到平推流。

颗粒直径与填充床管径比影响速度分布显著。图 3 表明, 速度分布表现出大约 1 个颗粒的振荡周期。颗粒越小, 振幅越小, 频率越高, 越早趋于均匀。

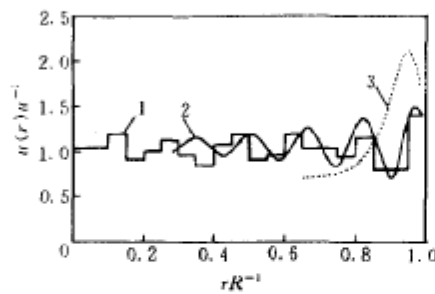


图1 模拟同实验的比较

Fig.1 Comparison between experiment and simulations

1—实验测量^[3]; 2—本文方法;
3—文献^[2]方法

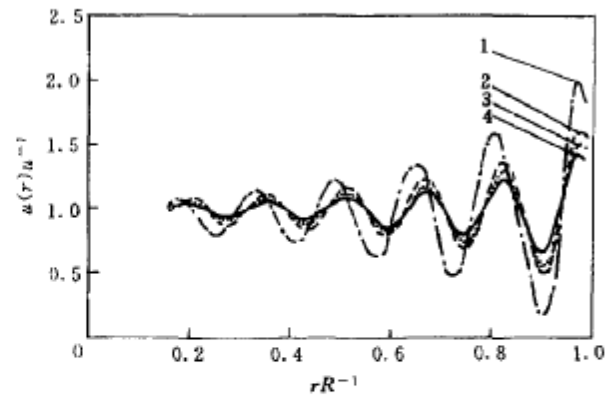


图2 流速对速度分布的影响

Fig.2 Effect of velocity magnitude on velocity profile

$G / \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$: 1—0.1; 2—0.5;
3—1.0; 4—5.0, 10.0, 50.0

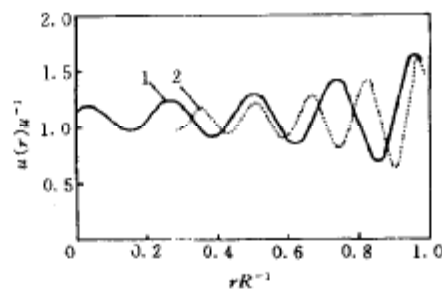


图3 粒径对速度分布的影响

Fig.3 Effect of particle size on velocity profile

d_p / mm : 1—5; 2—3

模拟计算中除图中另有说明外, 均取 $d_t = 38 \text{ mm}$, $d_p = 3.5 \text{ mm}$, $G = 1.0 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $L = 1 \text{ m}$.

4 结 论

填充床中的通道与空管之间存在着类似性, 以润湿面积和流动空间表达的水力半径是由填充床向空管转化的桥梁。本文据此提出的平行管物理模型较好地解决了速度分布的理论预测问题。模拟计算表明, 增大流速并不能有效地使流动接近平推流, 真正有效的方法是增大填充床管径与颗粒直径之比。

符 号 说 明

A_p —— 颗粒外表面积, m^2

A_w —— 填充床管壁内表面积, m^2

d_e —— 填充床当量直径, m

d_p —— 填料颗粒直径, mm

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| d_i —— 空管直径, m | $u(r)$ —— 填充床中 r 处的表观流速, m/s |
| f, f_M —— 分别为空管和填充床中的阻力因子 | V —— 床内颗粒间的空隙体积, m^3 |
| G —— 质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$ | v —— 平均空隙流速, m/s |
| L —— 填充床高度, m | z —— 轴向位置, m |
| p, p_e —— 压强, Pa | ε —— 平均空隙率 |
| R —— 填充床半径, m | $\varepsilon(r)$ —— 径向位置 r 处的空隙率 |
| R_h —— 水力半径(流体所占体积与润湿面积之比), m | μ —— 流体分子粘度, $Pa \cdot s$ |
| r —— 床内径向位置, m | μ' —— 分子粘度与涡流粘度之和, $Pa \cdot s$ |
| u —— 表观流速, m/s | ρ —— 流体密度, kg/m^3 |

参 考 文 献

- 1 Schwartz C E, Smith J M. Ind Engng Chem. 1953, 45(6): 1209 ~ 1218
- 2 Vortmeyer D, Haidegger E. Chem Engng Sci. 1991, 46(10): 2651 ~ 2661
- 3 Stephenson J L, Stewart W E. Chem Engng Sci. 1986, 41(8): 2161 ~ 2170
- 4 Vortmeyer D, Schuster J. Chem Engng Sci. 1983, 38(10): 1691 ~ 1699
- 5 Ergun S. Chem Engng Prog. 1952, 48(2): 89 ~ 94
- 6 Mueller G E. Chem Engng Sci. 1991, 46(2): 706 ~ 708
- 7 Menta D, Hawley M C. Ind Engng Chem Proc Design Dev. 1969, 8(2): 280 ~ 282

PREDICTION OF VELOCITY DISTRIBUTION IN PACKED BEDS

Cheng Zhenmin and Yuan Weikang

(UNILAB Research Center of Chemical Reaction Engineering, East China University of Chemical Technology, Shanghai 200237)

Abstract A physical model called parallel-tube model based on the analogy between fluid flow in a packed bed and in an empty pipe is established and a method for the velocity prediction is presented. It is found that the prediction is close to the experimental study and is better than those methods developed previously.

Keywords packed bed, velocity distribution, hydraulic radius