

充填浮选柱的混合、传质特性及 操作参数^①

I 理论分析及试验原理

李定或 丁一刚 吴元欣

(武汉化工学院化工系, 武汉 430073)

摘 要 对充填柱中流体的流动和混合特性进行了分析, 认为用一维轴向扩散模型模拟充填柱有一定程度的偏离, 应寻求更为合适的流体流动模型。将扩散传质与浮选动力学相关联, 得出 $K = Ak_1a$ 的关系式, 并介绍了流体混合特性及液相传质系数 $k_{1,a}$ 的测定原理和试验方法。

关键词 充填浮选柱 流体的流动和混合 扩散传质 浮选动力学

Rice 等认为一维轴向扩散模型能较好地描述开式浮选柱捕集区的轴向混合, 而多槽串联模型在此不适用^[1, 2]。80 年代推出的充填式浮选柱由于内部充装了波纹填料, 使矿浆和气流(泡)在曲折的填料通道内流动, 其混合特性有别于开式。Rice 的结论是否仍适用于充填柱, 作者对此进行了研究与探讨。

1 理论分析

将矿浆和气流(泡)组成的流动体系视为拟均相, 对于开式浮选柱的捕集区, 假定^[3, 4]:

(1) 沿着与流体流动方向垂直的每一个截面, 具有均匀的径向浓度。

(2) 在每一横截面和沿流体流动的方向, 流体速度 u_1 和轴向扩散系数 E_z 均为一定值。

(3) 流体浓度为其轴向流动距离的连续函数。

据此, 流体在捕集区的流动状况可用一维轴向扩散模型(以下简称扩散模型)表征为:

$$E_z \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - u_1 \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

在拉普拉斯变换域, 此方程的解为^[5]:

$$C(t) = \left(\frac{Pe_1 \tau_1}{4\pi t^3} \right)^{0.5} \times \exp \left[\frac{Pe_1}{4} \left(2 - \frac{t}{\tau_1} - \frac{\tau_1}{t} \right) \right] \quad (2)$$

式中 Pe_1 为 Peclet 准数、模型参量, 且 $Pe_1 = u_1 H_c / E_z$ 。其值表征流体在流动体系中的返混程度: 当 $Pe_1 = \infty$ 时, 流体在流动体系中呈理想平推流; 当 $Pe_1 = 0$ 时, 表明呈理想全混流。

对于定常态下的一级浮选速率过程, 式(1)可进一步表示为:

$$E_z \frac{d^2 C}{dZ^2} - u_1 \frac{dC}{dZ} - KC = 0 \quad (3)$$

由此求得捕集区流体中目的组分的回收率为:

$$R = 1 - 4a \exp(1/2N_d) / [(1+a)^2 \times \exp(a/2N_d) - (1-a)^2 \times \exp(-a/2N_d)] \quad (4)$$

式中 $a = (1 + 4K\tau_1 N_d)^{0.5}$

$$N_d = 1/Pe_1$$

当捕集区高度 H_c 一定时, 式(4)为:

$$R = f(\tau_1, E_z, K) \quad (5)$$

此式右边的三个参量分别代表流体的传递特性——动量传递(流体的流动和混合)、扩散传质

及浮选动力学对选矿回收率的影响。

1.1 流体在充填柱中的动量传递特性^[6-9]

图1为充填浮选柱工作原理示意图。如图1所示: 全柱充装若干个板(网)波纹填料节, 相邻两节填料波纹方向成90°交叉排列; 每节填料相邻两片板(网)的波纹倾角 φ 方向相反; 且相邻两板(网)波纹片导缘(棱)形成夹角为 2φ 的三角形通道和无数个接触点, 相邻四个接触点间的三角形通道构成一个流体混合室。因此, 流体不管是由上向下流动的矿浆或是由下朝上的充气气体, 在每节板(网)波纹填料内流动和混合的过程可表示为图2的形式。

1.1.1 三角形通道内的Z形波动和混合

沿轴向流动的流体在每个接触点处被劈分成两股各自进入互相交叉夹角为 2φ 的三角形通道。如图3所示: 在流动方向由于受板(网)波纹导缘(棱)的切割, 流体在通道内呈Z形波动, 从柱的中心区流至柱壁; 同时柱壁区流体又沿相反倾角方向的通道流向中心区。显然, 流体在填料节内进行了径向对流混合。

1.1.2 混合室内的分-合流动和混合

如图4所示, 流体沿一条通道方向上依次流过由相邻四个接触点形成的混合室时, 必然与相反倾角方向多个通道来的流体相遇混合。这种混合室如同全混流型浮选槽, 且每相邻四个接触点所形成的混合室依次相通, 构成多级串联浮选槽(简称多槽串联)。

1.1.3 柱壁面的轴向、径向流动和混合

图5所示为填料节的轴向半剖面。当流体沿一定倾角的三角形通道流至柱壁后, 一部分沿柱壁与壁沟流混合继续沿柱壁面作轴向流

动, 其余流体从柱壁处沿相反倾角方向的三角形通道返回填料的中心区, 其径向速度分量以180°转向而使流体受到撕裂混合。

1.1.4 填料节端面处的转向流动和混合

图6为填料节的横剖面。如图所示: 由于相邻两节填料沿板(网)波纹方向成90°交叉, 当流体从一节填料端面处转向进入另一节填料时, 其流动分层方向也随同填料折转90°, 由此产生转向流动和混合。

综上所述, 流体在充填柱捕集区内的流动和混合规律与一维轴向扩散模型有一定程度的偏离, 为此需按二维扩散模型进一步考虑径向混合的影响。对于定常态下的一级浮选速率过程, 其柱坐标的模型式为:

$$E_z \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} + E_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - u_1 \frac{\partial C}{\partial Z} - KC = 0 \quad (6)$$

由于此偏微分方程难以求解解析解, 使本研究的目的之一旨在研究充填柱流体流动特性基

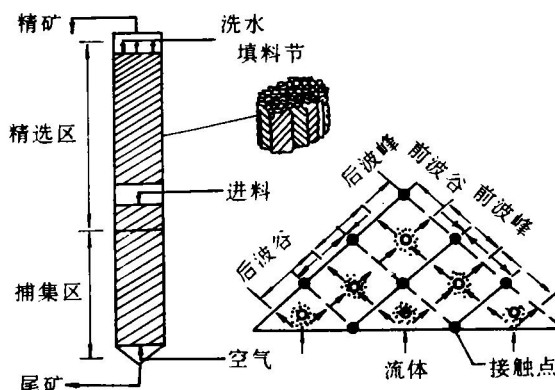


图1 充填浮选柱工作原理示意图

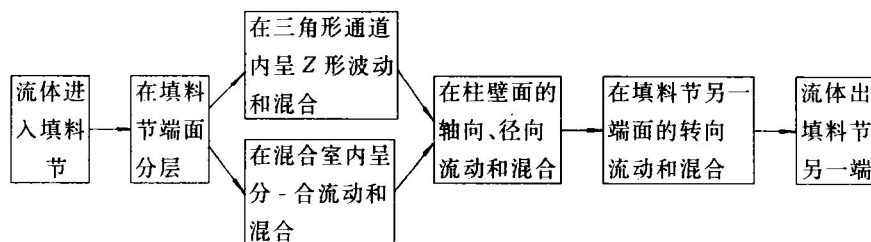


图2 流体在填料节内的流动和混合过程

基础上, 探求更适用于充填柱捕集区的数学模型和模拟方法, 并与一维轴向扩散模型相比较。

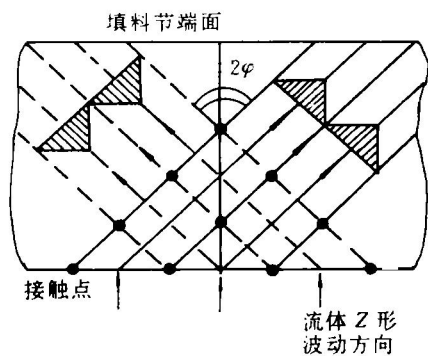


图 3 流体在通道内的波动和混合

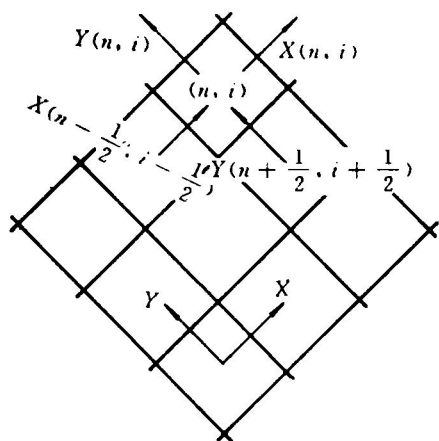


图 4 流体在混合室内的流动和混合

X, Y —流体 Z 形波动方向;
 n, i —分别为波纹板片长度和高度方向的位置坐标

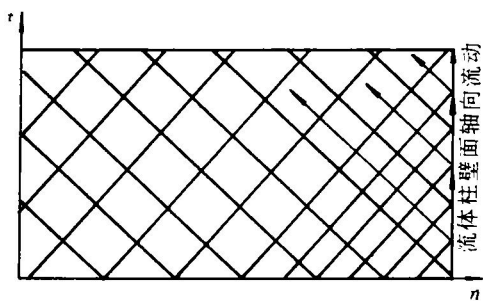


图 5 流体沿柱壁面的轴向、径向流动和混合

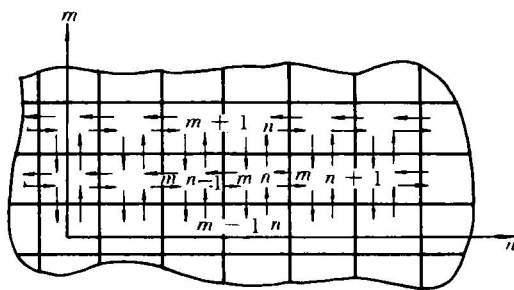


图 6 流体在端面处的转向流动和混合

m —填料节端面流体的分层数;

n —波纹板片长度方向的位置坐标

1.2 扩散传质与浮选动力学的关联^[10]

浮选动力学常数 K 一般可表示为:

$$K = 1.5 E_K V_g / d_b \quad (7)$$

$$\text{或 } K \propto \left(\frac{1}{d_b}\right)^3 \quad (8)$$

式中 E_K 为矿粒捕集效率, 且 $E_K \propto \left(\frac{1}{d_b}\right)^2$ 。

式(8)表明, 浮选动力学常数 K 与单位体积气泡的外表面积有关。矿化气泡形成之前在矿粒和气泡之间存在一个由气泡外表面提供的相界面 A_L (相界面面积 $A_L = A_2 a$), 其两侧分别为具有液膜性质的扩散层, 此双膜产生的扩散传质阻力影响并控制矿粒和气泡因碰撞-粘附形成矿化气泡的附着过程的速率。其固相侧液膜的扩散传质阻力受膜裂压力影响, 而气相侧液膜的扩散传质阻力是分子热运动的结果。

当吸附有药剂的目的矿粒经碰撞通过两扩散层在气泡表面被粘附时, 由于是扩散传质过程, 其扩散传质速率 N 决定了附着速率 r_M 。在定常态下吸附有药剂的目的矿粒以传质速率 $k_{SL} A_L (C_S - C_{is})$ 通过液膜达到相界面 A_L ; 而达到相界面的吸附有药剂的目的矿粒进一步以传质速率 $k_{GL} A_L (C_{iG} - C_G)$ 通过液膜而粘附在气泡的主体面。

按此, 浮选过程的总括(宏观)速率 R_F 受扩散传质速率 N 的控制, 即

$$\begin{aligned} R_F &= N = r_M \\ &= k_{SL} A_L (C_S - C_{is}) \\ &= k_{GL} A_L (C_{iG} - C_G) \end{aligned}$$

$$= k_1 a_s C_G = k_1 a_s E_c E_a C_M(t) \\ = K C_M(t) \quad (9)$$

整理此式可得:

$$\frac{E_c}{K} = \frac{1}{A_1 A_2 k_1 a} + \frac{m_b}{A_2 A_3 k_1 a} + \frac{m_b}{k_1 a_s} \quad (10)$$

或

$$K = A k_1 a \quad (11)$$

式中 E_c 、 E_a 分别为矿粒和气泡碰撞的效率及形成矿化气泡的附着效率; a_s 为矿粒比表面积; m_b 为平衡常数; A_1 、 A_3 为比例系数; A_2 为矿粒和气泡的相接触系数。一般 a_s 值较大, $m_b/k_1 \cdot a_s$ 项可忽略, 在规定的工艺条件下, A_1 、 A_2 、 A_3 、 m_b 、 E_c 皆为确定值, $A = (A_1 m_b + A_3)/E_c A_1 A_2 A_3$ 。

从式(11)看来, 难以直接计算的总括(宏观)浮选速率常数 K 与能直接测定的液相传质系数 $k_1 a$ 建立了关联式, 浮选动力学的问题转化为扩散传质的研究内容。

综上所述, 流体在充填柱中的传递特性研究是浮选柱开发的重要工程理论依据。

2 试验原理^[3, 11]

2.1 流体的流动和混合特性

依据流体在流动体系的停留时间分布(RTD), 研究充填柱的操作条件和结构参数变化对捕集区流体流动和混合特性的影响及精选区的泡沫挟带和清洗行为。

试验采用脉冲示踪法, 以电解质作示踪剂, 用电导率仪测定其电导度, 据此确定流体的RTD曲线。当电解质浓度较稀时, 电极输出的电压值 $V_i(t)$ 与示踪剂浓度 $C_i(t)$ 呈线性关系。据此, RTD 密度函数为:

$$E(t) = \frac{V_i(t)}{\sum V_i(t) \Delta t_i} \quad (12)$$

其特征值——流体在捕集区的平均停留时间 τ_1 (一次矩) 和无因次方差 σ^2 (二次矩) 分别为:

$$\tau_1 = \frac{\sum t_i V_i(t)}{\sum V_i(t)} \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 V_i(t)}{\tau_1^2 \sum V_i(t)} - 1 \quad (14)$$

根据测定的 $V(t) \sim t$ 即 $E(t) \sim t$ 变化和 σ^2 值可确定流体在捕集区的流动状态和混合程度。当 $t < \tau_1$, $E(t) = 0$; $t = \tau_1$, $E(t) = \infty$ 或 $\sigma^2 = 0$ 时, 流体流动为平推流; 而呈全混流时, $E(t) = (1/\tau_1) \exp(-t/\tau_1)$ 或 $\sigma^2 = 1$, 流体的流动状态介于上述两种理想流型之间时, $0 < \sigma^2 < 1$ 。

2.2 液相传质系数 $k_1 a$ 的测定

$k_1 a$ 的测定有物理法和化学法两种, 由于后法所加入的化学试剂对 $k_1 a$ 值的影响较大, 故本试验采用物理法。

试验时用溶氧测定仪测定氧电极吸附达到平衡后的电位值 V_∞ , 并按下式计算 $k_1 a$ 值:

$$L_n \frac{V_\infty - V_t}{V_\infty - V_0} = -k_1 a t - L_n M \quad (15)$$

然后按式(11)确定 K 值。

3 试验装置及数据处理^[12, 13]

3.1 试验装置

实验装置见图7。试验用的充填柱为 $d 45 \times 2800$ 有机玻璃柱, 内装天津大学填料开发中心提供的CB型刺孔板波纹填料。沿柱高分布有不同间距的12个小孔, 供分别插入氧电极和电导电极之用。所获得的0~10 mV电信号经MS-1230 A转换, 输入到微机系统, 在线

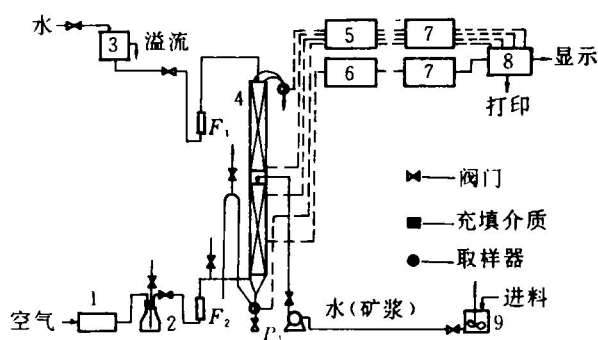


图7 试验装置

1—空压机; 2—缓冲槽; 3—高位槽; 4—充填柱;
5—电导仪; 6—溶氧仪; 7—A/D转换板; 8—微机;
9—搅拌槽; P_1 —变量泵; F_1 、 F_2 —流量计

采集、显示、记录和数据处理的。

3.2 数据处理

试验所获得的数据分别采用多元线性回归和单纯形法处理。其中,单纯形法是无约束最优化处理非线性关系试验数据的一种参数估计方法,其计算程序见图8,图中定义的目标函数为:

$$P = \frac{\sum (C_{ei} - C_{ci})^2}{\sum C_{ei}} \quad (16)$$

式中 C_{ei} 、 C_{ci} 分别为试验值和按模型式计算的值。多次迭代使目标函数 P 趋近最小时的参数值即为逼近试验曲线上相应点的最优模型值。

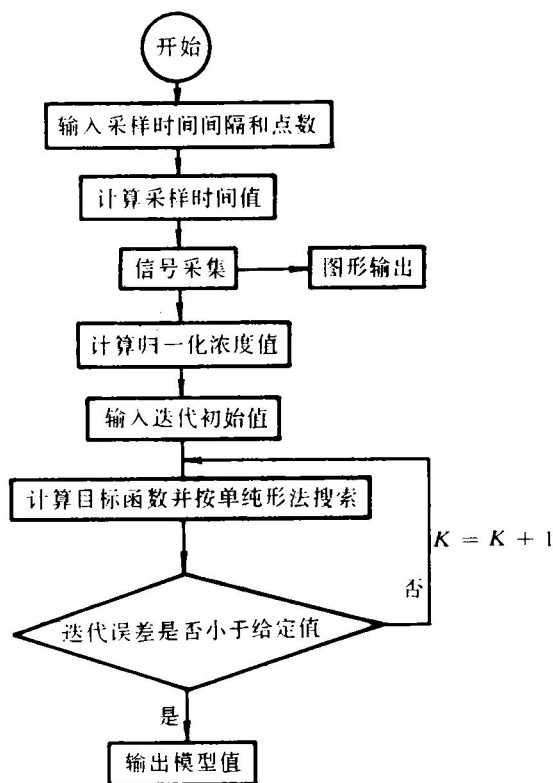


图8 模型参量计算程序框图

符号说明

a — 气泡比表面积;

$C_M(t)$ 、 $C(t)$ — 分别为矿浆目的矿物、示踪剂的浓度;

C_s — 矿浆中具有能发生碰撞能量的目的矿物浓度, $C_s = E_c C_M(t)$;

C_G — 矿浆中经碰撞-粘附后能附着在气泡表面上的目的矿物浓度, $C_G = E_a C_s$;

C_{is} 、 C_{ig} — 分别为相界面处固相侧和气相侧液膜扩散层的目的矿物平衡浓度, $C_{is} = m C_{ig}$;

d_b — 气泡直径;

$E(t)$ — 停留时间分布密度函数;

H_c — 捕集区高度;

k_{SL} 、 k_{GL} — 分别为固相侧及气相侧液膜扩散层的液膜传质系数, $k_{SL} = A_1 k_L$, $k_{GL} = A_3 k_L$;

k_L — 液膜传质系数;

k_1 — 形成矿化气泡的附着速率常数;

M — 与膜阻引起滞后有关的常数;

N_d — 容器分散系数;

r — 柱半径;

u_1 — 流相间隙速率;

V_0 、 V_t — 分别为测试开始($t=0$)及 t 时刻记录仪的电压值;

V_g — 充气表观速率。

参考文献

- 1 Rice R G *et al.* Can Jour Chem Eng, 1981, 59(12): 677.
- 2 Rice R G *et al.* Powder Technology, 1974, 10: 201.
- 3 Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc, 1972, 272.
- 4 Finch J A, Dobby G S. Column Flotation. Toronto: Pergamon Press, 1990, 59.
- 5 Ostergard K *et al.* Can Jour Chem Eng, 1969, 47: 107.
- 6 徐崇嗣等. 化工学报, 1986, 37(1): 89.
- 7 Schott N R *et al.* Chem Eng Prog, 1975, 71(1): 54.
- 8 Meer U D *et al.* Chem Eng Scie, 1978, 33(9): 1277.
- 9 Streiff F A, Sulzer Tech Revi, 1977, 59(3): 108.
- 10 Li D H *et al.* In: Proc of the First Int Conf on Modern Process Mineralogy and Mineral Processing. Beijing: International Academic Publishers, 1992, 563.
- 11 陈明允等. 化工学报, 1988, 39(6): 737.
- 12 俞玉森. 数学规划的原理和方法. 武汉: 华中工学院出版社, 1985, 267.
- 13 蒲十周等. 化工矿山技术, 1993, 22(6): 32.