

# 充填浮选柱的混合传质特性及 操作参数<sup>①</sup>

## (II) 模拟研究及选矿试验<sup>②</sup>

丁一刚 李定或 吴元欣

(武汉化工学院化工系, 武汉 430073)

**摘要** 通过捕集区流体流动、混合和扩散传质研究表明: 多级串连槽模型比一维轴向扩散模型更适用于描述捕集区, 其模型参量  $N = 6.80 \times 10^{-1} J_g^{0.44} (\frac{H_c}{D})^{0.17}$ ; 液相传质系数  $k_{1,a}$  可表征浮选动力学常数  $K$ ,  $K = Ak_{1,a}$ ,  $k_{1,a} = 99.29 J_g^{1.09}$ . 依据精选区的脉冲示踪应答确定, 90% 以上的洗水由柱顶随泡沫排出. 在此研究基础上, 进一步试验操作参数对磷块岩选别指标的影响, 并对照模型参量值  $N$  和无因次方差值  $\sigma^2$  进行分析.

**关键词** 充填浮选柱 停留时间分布 混合特性 操作参数

对于确定的浮选体系, 当其它工艺条件和药剂制度不变时, 充填柱的操作条件  $J_g$ 、 $J_w$  和结构参数  $H_c/D$  是影响传递(流体流动和混合)特性和工作性能的主要变量<sup>[1~3]</sup>. 本文研究了以水模拟矿浆、水-空气为操作介质时充填柱的传递特性; 以磷块岩为例, 探讨了操作条件变化对选矿指标的影响.

### 1 捕集区流体流动和混合特性<sup>[4]</sup>

#### 1.1 气含率与气流(泡)流型

在试验条件  $J_g = 0.86 - 1.94$  (cm/s),  $H_c/D = 12.5 - 35.7$  时, 图1的回归方程为:

$$\epsilon_g = 0.96 \times 10^{-1} J_g^{0.91} (\frac{H_c}{D})^{-0.18} \quad (1)$$

从图1中看出, 在相同表观充气速率  $J_g$  下, 开式浮选柱的气含率  $\epsilon_g$  比充填柱低, 主要原因是充填介质对气体的破碎和分散能有效地抑制小气泡的聚并, 维持较高的充气表面积.

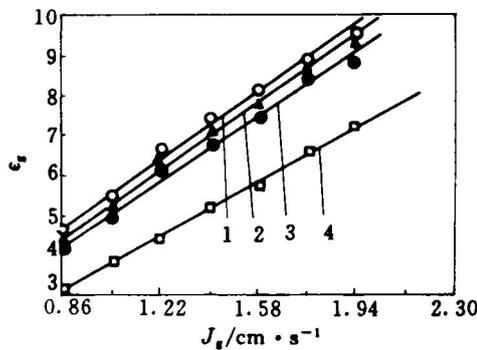


图1  $\epsilon_g \sim J_g$  的关系曲线

1- $H_c/D = 12.5$ ; 2- $H_c/D = 28.9$ ;  
3- $H_c/D = 35.7$ ; 4- $H_c/D = 35.7$ (开式柱)

从图2可看出: 在试验条件下, 按 Griffith 和 Wallis 提出的漂移通量(Drift Flux)关系式<sup>[5,6]</sup>, 应用单纯形法回归得:

$$\begin{aligned} J_D &= U_{b,\infty} \cdot \epsilon_g (1 - \epsilon_g)^n \\ &= 21.5 \epsilon_g (1 - \epsilon_g)^{1.7} \end{aligned} \quad (2)$$

① 湖北省科委重点科研项目 收稿日期: 1994-01-17; 修回日期: 1994-04-16

② 续完。(I)部分见本刊1995, 5(1): 18-22.

即  $U_{b,\infty} = 21.5 < 23.7(\text{cm/s})$ ,  $n = 1.7 < 2$ , 由此确定气流在捕集区中呈近似均匀鼓泡流流型。

### 1.2 返混与矿浆流型

矿浆在捕集区的返混尤以进料口附近的 变化明显。进料口附近的 RTD 曲线如图 3 所示。当  $J_g = 0$  时, 进料口上部的 RTD 曲线近似于一直线, 表明矿浆在此处的返混很小; 而进料口以下的矿浆在柱中呈一定程度的返混。当  $J_g \neq 0$  时, 进料口上、下部的 RTD 曲线皆呈指数递减状, 表明气流的流动与混合及进料口上部也产生了返混。(见图 4)

以上表明, 在试验条件下, 矿浆在捕集区的进料口附近呈一定程度返混的全混流。

### 1.3 捕集区的流动模型

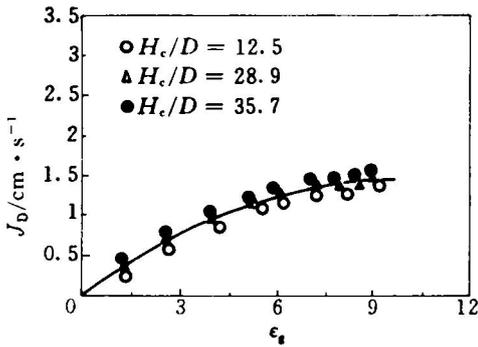


图 2  $J_D \sim \epsilon_g$  的关系曲线

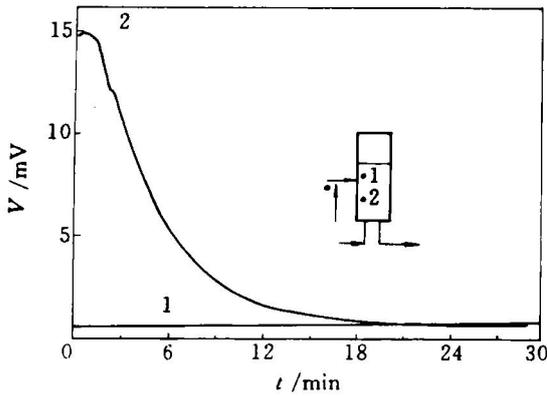


图 3 捕集区上部的 RTD 曲线

( $J_g = 0$ ; ●—示踪剂入口或检测点)

1—进料口上 10 cm; 2—进料口下 10 cm

矿浆从进料口向下流过捕集区, 目的矿物在填料的混合室内逐步发生变化, 根据前人多槽串连的概念, 则在第  $N$  级槽  $t$  时刻的目的矿物的浓度为<sup>[7]</sup>:

$$C_N(t) = \frac{1}{\tau_{ii}(N-1)!} \left(\frac{t}{\tau_{ii}}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ii}}\right) \quad (3)$$

式中  $N$  表征流体在体系内返混程度的模型参量。 $N = \infty$  时, 流体在多级串连全混槽内具有平推流的特征;  $N = 1$  时, 流体在多级串连全混槽内具有全混流流型。

图 5 列举了当  $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ ,  $J_w = 0.07$

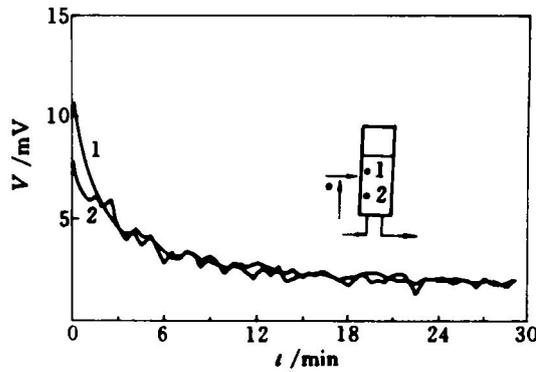


图 4 捕集区上部的 RTD 曲线

( $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ )

1—进料口上 10 cm; 2—进料口下 10 cm

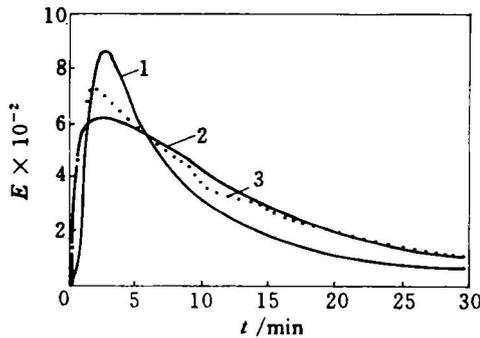


图 5 捕集区 RTD 曲线试验值与模型值的比较

1—一维轴向扩散模型值;

2—多级串连槽模型值; 3—试验值

( $H_c/D = 12.5$ ;  $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0.07 \text{ cm/s}$ )

cm/s、 $H_c/D = 12.5$  时，试验值与扩散模型值和多槽串连模型值的拟合情况。按前文(1)中式(16)计算两模型的目标函数值分别为  $P_p = 0.35\%$ 、 $P_c = 0.09\%$ ；从表 1 看出，按两模型计算的  $\tau_1$  值与试验  $\tau_1$  值的相对误差的平均值分别为  $\bar{n}_p = 84.8\%$  和  $\bar{n}_c = 13.7\%$ 。可见，流体在充填柱捕集区的流动模型采用多槽串连模型比扩散模型更为合适。

1.4 捕集区的流体混合特性

试验时分别改变操作变量表观充气速率  $J_g$ 、表观洗水速率  $J_w$  和结构参数高径比  $H_c/D$  时，确定矿浆平均停留时间  $\tau_1$  的变化，并将按前文(1)中式(2)计算的扩散模型值  $\tau_1$ 、 $Pe_1$  和按式(3)计算的多槽串连模型值  $\tau_1$ 、 $N$  分别与试验值相比较，详见表 1。

从表 1 看出：

(1) 随着  $J_g$  的提高， $\tau_1$  值及模型参量值  $Pe_1$ 、 $N$  均有所增大，无因次方差值  $\sigma^2$  略有下降，表明此时捕集区流体的返混程度略有减小。原因在于：捕集区内气、液两相逆流接触的“拦截”作用使填料内沟流、壁流、死区等减少，流体轴向返混程度减小，径向混合作用加强，在  $J_g = 1.94$  cm/s 时，此种影响尤为明显。

(2) 试验条件下改变  $J_w$  对表征捕集区流型的  $Pe_1$ 、 $N$ 、 $\sigma^2$  值影响不大，表明从柱顶部加入洗水一般对捕集区的操作影响有限。这与

Shah 的结论类似，他认为当  $J_w < 0.03$  m/s 时，可忽略洗水速率对液相扩散系数的影响<sup>[8]</sup>。

(3) 当捕集区高度即  $H_c/D$  值提高时，捕集区的  $\tau_1$  值及  $Pe_1$ 、 $N$  值均增大， $\sigma^2$  值明显下降，表明提高  $H_c/D$  时，流体在柱内轴向返混程度减小，平推流成分增加。

综上分析，在试验条件下，当忽略  $J_w$  对捕集区流体混合特性影响时， $J_g$ 、 $H_c/D$  对两种模型参量影响的关系式分别为：

$$Pe_1 = 2.16 \times 10^{-2} J_g^{1.34} \left(\frac{H_c}{D}\right)^{1.15} \quad (4)$$

$$N = 6.80 \times 10^{-1} J_g^{0.44} \left(\frac{H_c}{D}\right)^{0.17} \quad (5)$$

上两式的相关系数分别为 0.97 及 0.98。

2 捕集区的传质特性<sup>[4]</sup>

$J_g$ 、 $H_c/D$  对液相传质系数  $k_{1,a}$  的影响可从图 6 看出： $k_{1,a}$  的值随  $J_g$  提高而增大。据文献<sup>[9]</sup>报导，在一定范围内  $k_{1,a}$  与  $J_g$  无关，可见  $k_{1,a}$  值随  $J_g$  的变化而增大，主要是由气液两相接触面积  $a$  的增大而引起。

从图 7 看到， $H_c/D$  变化对  $k_{1,a}$  值影响不大。在试验条件  $J_g = 0.86 - 1.94$  (cm/s)、 $H_c/D = 12.5 - 35.7$  下，回归试验数据有：

$$k_{1,a} = 99.29 J_g^{1.09} \quad (6)$$

其回归式的相关系数为 0.97。

表 1 捕集区模型参数估计结果表

试验 编号	$J_g$ /cm·s <sup>-1</sup>	$J_w$ /cm·s <sup>-1</sup>	$H_c$ /D	一维轴向分散模型计算值				多槽串连模型计算值				试验值		
				$\tau_1$ /min	$Pe_1$	$P$ (%)	$n_p$ (%)	$\tau_1$ /min	$N$	$P$ (%)	$n_c$ (%)	$\tau_1$ /min	$\sigma^2$	
$J_g$	A-1	1.40	0.07	12.5	20.28	0.74	0.35	90	11.74	1.24	0.09	10	10.68	0.55
	A-2	1.58	0.07	12.5	20.62	0.74	0.36	94	11.78	1.24	0.09	11	10.63	0.54
	A-3	1.76	0.07	12.5	20.76	0.84	0.38	87	12.15	1.27	0.08	10	11.10	0.52
	A-4	1.94	0.07	12.5	20.76	0.95	0.29	80	12.40	1.42	0.10	8	11.54	0.47
$J_w$	B-1	1.40	0.04	12.5	20.28	0.74	0.35	90	11.79	1.24	0.09	10	10.70	0.55
	B-2	1.40	0.11	12.5	19.20	0.73	0.45	108	10.34	1.26	0.08	12	9.23	0.52
	B-3	1.40	0.14	12.5	18.20	0.73	0.37	109	9.87	1.27	0.09	13	8.71	0.50
$H_c/D$	C-1	1.40	0.07	23.4	20.16	0.88	0.26	84	12.11	1.29	0.09	11	10.94	0.52
	C-2	1.40	0.07	28.7	20.05	1.34	0.20	62	14.48	1.32	0.08	17	12.41	0.41
	C-3	1.40	0.07	35.7	19.84	2.27	0.18	44	18.74	1.42	0.07	36	13.75	0.33

注：试验时示踪剂脉冲输入在进料 D，应答测点在尾矿口。

### 3 精选区的泡沫挟带

充填柱精选区产生的泡沫挟带有两种情况：一种是上升气泡之间产生的机械挟带；另一种是气泡尾涡的卷吸作用产生的细泥挟带。

前文报导将矿浆视作拟均相，以水作模拟介质。本试验仍以水-空气体系为对象，采用脉冲示踪法研究操作条件变化对泡沫挟带的影响，在进料口处脉冲注入示踪剂，在不同泡沫高度检测应答值，结果见表2及图8~10。

对照表2和图8看出：当 $J_w = 0$ 时，在同一 $J_g$ 下，随离界面距离增加，泡沫挟带量减少， $P_{c1}$ 、 $N$ 值增大， $\sigma^2$ 值下降，表明流体的返混程度减小，平推流成分增加；而在精选区的同一位置，随 $J_g$ 值的提高，泡沫挟带量增多， $P_{c1}$ 、 $N$ 值减小， $\sigma^2$ 值上升，表明流体的返混程度增大，平推流成分减少。

对照表2和图9、10可看出：与上述现象不同的是，当 $J_w \neq 0$ 时，在相同 $J_g$ 值下，随离界面距离的改变，流体在精选区内的返混程度

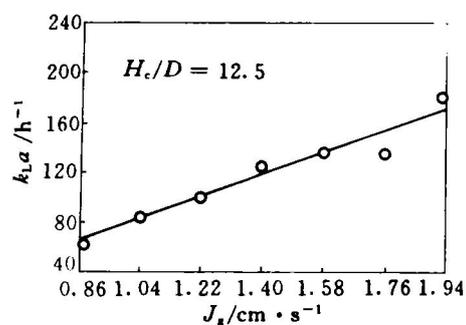


图6  $k_{La} \sim J_g$  的关系曲线

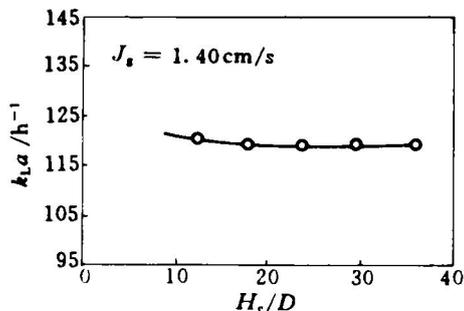


图7  $k_{La} \sim \frac{H_c}{D}$  的关系曲线

表2 精选区模型参数估计结果表

试验 编号	$J_g$ /cm · s <sup>-1</sup>	$J_w$ /cm · s <sup>-1</sup>	测点 位置	一维轴向分散模型计算值				多槽串连模型计算值				计算值	
				$\tau_1$ /min	$P_{c1}$	$P$ (%)	$n_p$ (%)	$\tau_1$ /min	$N$	$P$ (%)	$n_c$ (%)	$\tau_1$ /min	$\sigma^2$
D-1	1.49	0	1	8.84	0.40	2.05	63	5.33	1.05	1.29	-2	5.41	0.72
D-2	1.49	0	2	9.78	0.38	2.49	75	5.85	1.00	1.07	4	5.60	0.69
D-3	1.49	0	3	10.96	1.09	0.58	74	6.52	5.24	4.44	3	6.32	0.46
E-1	1.49	0.02	1	10.89	0.74	0.86	94	5.78	1.22	0.39	3	5.61	0.59
E-2	1.49	0.02	2	7.95	0.43	1.28	65	4.34	1.12	1.34	-10	4.82	0.83
E-3	1.49	0.02	3	10.94	6.22	0.49	29	16.67	6.49	5.13	96	8.50	0.27
F-1	1.49	0.04	1	13.34	0.66	1.37	122	7.06	1.11	0.36	18	6.00	0.53
F-2	1.49	0.04	2	12.35	0.57	1.17	106	6.57	1.19	0.65	10	6.09	0.53
F-3	1.49	0.04	3	11.23	7.73	0.50	29	15.50	7.30	5.68	78	8.70	0.18
G-1	1.76	0	1	7.10	0.35	3.40	45	4.63	0.93	1.59	5	4.89	0.88
G-2	1.76	0	2	7.87	0.41	1.74	48	5.05	1.04	1.84	-5	5.30	0.76
G-3	1.76	0	3	10.35	0.85	0.74	67	6.27	1.37	1.18	1	6.21	0.51
H-1	1.76	0.02	1	9.48	0.46	1.86	102	4.77	1.02	0.32	1	4.70	0.81
H-2	1.76	0.02	2	6.84	0.37	2.60	60	3.95	0.95	1.16	8	4.28	0.99
H-3	1.76	0.02	3	9.04	3.87	0.22	25	6.35	8.49	3.11	-12	7.21	0.26
I-1	1.76	0.04	1	10.47	0.48	2.16	138	5.32	0.98	0.28	21	4.40	0.78
I-2	1.76	0.04	2	8.60	0.43	1.34	76	4.64	1.12	1.09	-5	4.88	0.79
I-3	1.76	0.04	3	9.12	4.26	0.19	24	9.74	7.49	3.90	-32	7.37	0.24

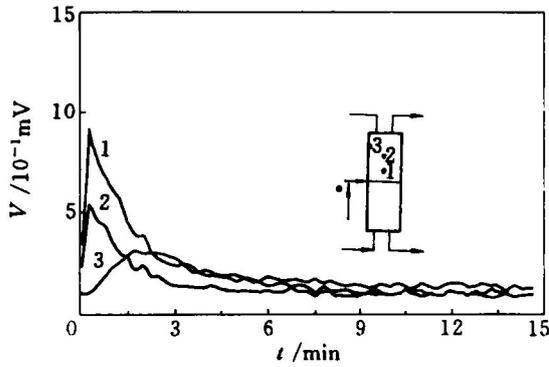


图8 操作条件对精选区 RTD 曲线的影响  
( $J_k = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0$ ; 泡沫深度 130 cm)  
●— 示踪剂入口或检测点; 1— 界面上 5 cm;  
2— 界面上 10 cm; 3— 界面上 40 cm

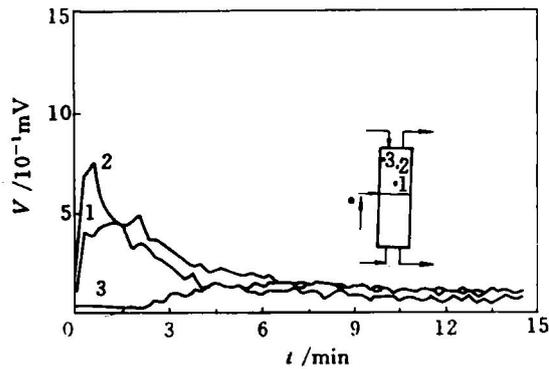


图9 操作条件对精选区 RTD 曲线的影响  
( $J_k = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0.02 \text{ cm/s}$ ;  
其余符号同前)

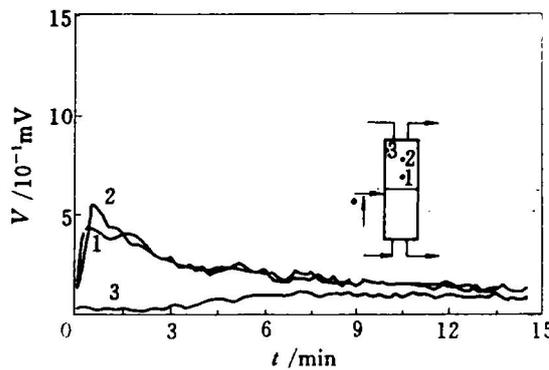


图10 操作条件对精选区 RTD 曲线的影响  
( $J_k = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0.04 \text{ cm/s}$ ;  
其余符号同前)

经历了从小到大又变小的非线性过程，即最大返混出现在离界面较高的某一区域，在此处气、液两相的相互“拦截”和制约作用达到最充分，此区域在精选区的位置视气、液两相的表观速率不同而变化。

对照图 8~10 看出：在相同  $J_k$  下，随着  $J_w$  值的提高，界面上泡沫挟带有所抑制；当  $J_k = 1.40 \sim 1.76 \text{ cm/s}$ ,  $J_w = 0.04 \text{ cm/s}$  时，离界面上 40 cm 处，泡沫挟带基本消失。

可见：在相同  $J_w$  下，随  $J_k$  提高泡沫挟带现象增加；而  $J_w$  的作用则相反，有利于泡沫的清洗。但  $J_w$  并非越大越好，它取决于同  $J_k$  的合理匹配。

### 4 精选区的清洗行为和洗水分配

在精选区由于柱顶洗水的加入，除能促进泡沫稳定外<sup>[11]</sup>，还使矿浆中亲水矿粒和部分粘附在气泡表面不牢固的疏水矿粒随洗水正偏流重新返回捕集区。显然，前者属物理的冲刷作用，后者属物理化学力作用的结果。

通过脉冲应答法确定洗水的分配系数为：

$$\xi = 1 - \frac{Q_i}{Q_T} \quad (7)$$

式中  $Q_T$  为注入的示踪剂量； $Q_i$  是尾矿排出口的示踪剂量， $Q_i = U_i \Sigma C_i(t) \Delta t$ ， $U_i$  是尾矿排出口的体积流量。

试验结果如图 11 所示。在操作条件下，91% 的示踪剂由柱顶部泡沫口排出，即洗水量的 91% 由柱顶随泡沫排出。

### 5 操作参数对选矿指标的影响

试验用磷块岩为湖北荆襄王集矿一、三层混合矿，其磨矿细度为 -200 目占 88%，矿浆浓度为 20%，药剂制度参照文献[11]的报导经改性调优而成。从试验中看出操作条件和结构参数的变化对浮选指标有不同影响。

#### 5.1 $J_k$ 对浮选指标的影响

$J_k$  对浮选指标的影响规律如图 12 所示，

现分别予以探讨。

(1) 从流体流动和混合特性分析

从前节 1.4 可知：随  $J_g$  的提高，流体在柱内轴向返混程度减小，径向混合作用加强而导致目的矿物品位  $\beta$  值和选矿效率  $E_m$  值皆有所下降。

(2) 从扩散传质及浮选动力学分析

根据前文(1)中式(7)、(8)、(11)可知  $K = (Ak_{1,a}) \propto (J_g/d_b^3)$ 。可见：当  $J_g$  开始提高时， $K$ 、 $k_{1,a}$  值随之增大，相应浮选速率提高；进一步提高  $J_g$  时，由于受小气泡聚并的影响， $d_b$  的增大以负三次方( $d_b^{-3}$ ) 关系超过  $J_g$  的影响，使得  $K$ 、 $k_{1,a}$  值不再随之提高，由此目的矿物回收率  $\epsilon$  随  $J_g$  提高而增大到一定值。

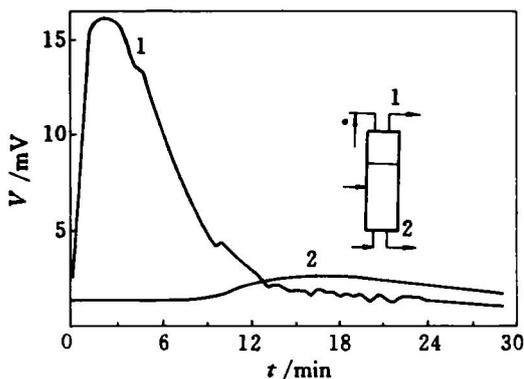


图 11 柱顶、柱底的 RTD 曲线

( $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0.07 \text{ cm/s}$ ;  
泡沫深度 210 cm)

● 示踪剂入口或检测点  
1—精矿口；2—尾矿口

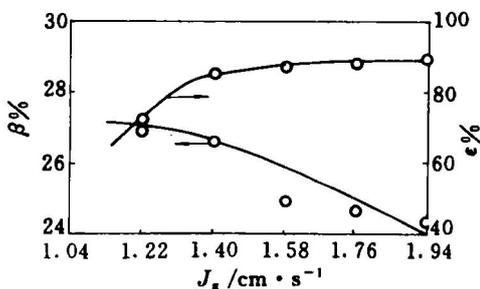


图 12  $J_g$  对浮选指标的影响

( $J_w = 0.07 \text{ cm/s}$ ;  $H_c/D = 12.5$ )

从 Espinosa 等描述气泡对固体颗粒的最大输送能力关系式<sup>[12]</sup>：

$$C_s^* = \left( \frac{0.0064\psi\pi d_p P_p J_g}{d_b} \right) \propto \frac{J_g}{d_b} \quad (8)$$

看出：随  $J_g$  的进一步提高，因小气泡聚并使  $d_b$  增大， $C_s^*$  值受到限制， $\epsilon$  值趋于稳定；另外，由于泡沫挟带，使得  $\beta$  值下降。

可见，在一定工艺条件下  $J_g$  有一优化值。

5.2 矿液面高度  $H_c$  对浮选指标的影响

由前节 1.4 可知：当  $D$  确定时，随  $H_c$  即  $H_c/D$  值提高，矿浆在捕集区的轴向返混程度减少，相应平推流成分增加，致使  $\beta$ 、 $\epsilon$  值均下降。从图 13 可见：当  $H_c/D = 8 - 10$  (即  $D = 45 \text{ mm}$ ,  $H_c = 360 - 450 \text{ mm}$ ) 时，在柱顶测得  $\beta$ 、 $\epsilon$  值皆最高，这与文献[3]的结果一致。

5.3  $J_w$  对浮选指标的影响

(1) 洗水对精选区泡沫二次富集作用的影响

从图 14 可看出：在  $J_w = 0.04 \sim 0.07 \text{ cm/s}$  区间， $\beta$  和  $\epsilon$  出现极值。从泡沫流动和混合特性分析，参照前节 3，当  $J_w$  小于极值时， $J_w$  的

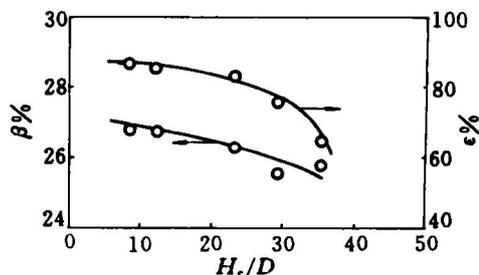


图 13  $H_c/D$  对浮选指标的影响

( $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $J_w = 0.07 \text{ cm/s}$ )

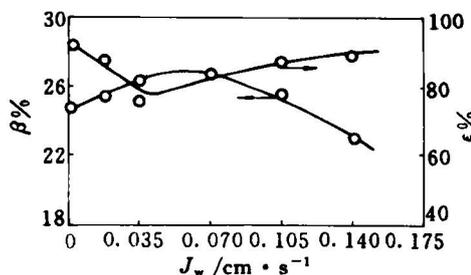


图 14  $J_w$  对浮选指标的影响

( $J_g = 1.40 \text{ cm/s}$ ;  $H_c/D = 12.5$ )

提高能抑制亲水性矿粒的泡沫挟带, 有利于精选区泡沫对疏水性目的矿物的二次富集作用, 其结果是  $\beta$  提高  $\epsilon$  下降。当  $J_w$  超过极值而继续提高时, 气液“拦截”效应随之增强。矿浆在精选区的  $\tau_1$  值延长, 目的矿物和非目的矿物的附着几率皆增加, 使得泡沫的二次富集作用受到抑制,  $\beta$  下降  $\epsilon$  提高。

(2) 洗水对捕集区流体流动和混合的影响

从前节 4 可知, 在试验条件下 91% 的洗水由柱顶排出。从表 1 可以看出: 当  $J_w < 0.07$  cm/s 时, 表征流体流动和混合状态的模型参数值  $N$  及  $\sigma^2$  值均变化不大, 表明浮选指标主要受精选区的泡沫二次富集作用影响, 而捕集区的流体流动和混合变化不大。

## 6 结论

(1) 将扩散传质与浮选动力学相关联, 用液相传质系数  $k_{l,a}$  表征浮选动力学常数  $K = Ak_{l,a}$ , 在试验条件下,  $k_{l,a} = 99.29 J_g^{1.09}$ 。

(2) 当用水模拟矿浆, 将水 - 空气介质视为拟均相体系时, 对充填柱捕集区的流体流动模型验证表明一维轴向扩散模型的适用性不如多槽串连模型。在试验条件下, 其模型参量  $N = 6.80 \times 10^{-1} J_g^{0.44} (H_c/D)^{0.17}$ 。

(3) 脉冲示踪法试验表明在操作条件下 90% 以上的洗水由柱顶随泡沫排出。

(4) 从流体流动和混合、扩散传质综合分析, 表观充气速率  $J_g$  是影响选矿效率  $E_m$  的主

要综合参数; 表观洗水速率  $J_w$  主要影响目的矿物的品位  $\beta$ ; 捕集区高度  $H_c$  是影响目的矿物回收率  $\epsilon$  的主要结构参数。

(5) 依据模型参量值  $N$  及试验测定的流体平均停留时间值  $\tau_1$ 、无因次方差值  $\sigma^2$  与选矿指标  $\beta$ 、 $\epsilon$ 、 $E_m$  值相对照, 分析浮选柱的工作特性, 并以王集一、三层混合磷块岩为例, 选用与机械搅拌式浮选机相近的药剂制度时, 确定充填柱的操作条件为  $J_g = 1.30 - 1.45$  cm/s,  $J_w = 0.04 - 0.07$  cm/s,  $H_c/D = 8 - 10$  较为适宜。

## 参考文献

- 1 上海化工学院, 天津大学, 浙江大学. 化学工程, 第二册. 北京: 化学工业出版社, 1980. 213.
- 2 化学工程手册编委会. 化学工程手册(3). 北京: 化学工业出版社, 1989. 13-13.
- 3 Yianatas J B *et al.* Miner Metall Process, 1988, 5(1): 11.
- 4 丁一刚. 硕士学位论文, 武汉化工学院, 1992.
- 5 Griffith P *et al.* J Heat Trans, 1961, 83: 307.
- 6 Haberman W L *et al.* David Taylor Model Basin Rep. 1953. 802.
- 7 李佐虎, 陈家镛. 化工学报, 1980, 31(4): 307.
- 8 Shah Y T *et al.* AIChE J, 1982, 28(3): 353.
- 9 游文泉. 化学工程, 1988. 16(2): 54.
- 10 Laplante A R *et al.* In: 1988 International Symposium, USA, Arizona: 1988. 69.
- 11 化工部化工矿山设计研究院. 国家“七五”重点科技项目 PF-8 浮选机工业试验报告, 1990.
- 12 Espinasa R G *et al.* In: Column Flotation'88. USA, Arizona: 1988. 143.