

# R-P 型磷酸反应器混合特性的研究\*

吴玉亭 许秀成

(郑州工学院化学工程系)

**摘 要:** 本文研究了搅拌桨型式、转向、转速和搅拌桨安装位置对 R-P 型磷酸反应器的流型、混合时间和停留时间分布的影响。提出斜桨的吸入流体侧是决定混合时间长短的控制区域,并依此观点修正了 Joshi 的循环混合模型。所得修正模型能较好地解释实验观测结果。

**关键词:** R-P 型磷酸反应器, 搅拌, 混合, 流型

湿法磷酸是生产高浓度复合肥料的重要原料。磷酸反应器(或称萃取槽)是湿法磷酸生产的核心设备。目前,单槽单桨式磷酸反应器是世界上较为先进的槽型。法国 Rhone-Poulenc 公司开发的磷酸反应器(简称 R-P 槽)就属于这种类型<sup>(1)</sup>。

研究者为了相互间进行比较,普遍使用高径比为 1 的搅拌槽。即取液体深度等于槽径( $H/D=1$ )。桨的安装位置常固定在  $h=\frac{1}{2}H$  或  $h=\frac{1}{3}H$  处。但对于 R-P 槽,由于传热方面的限制,需采用扁型槽。有时液位高度与搅拌桨直径相差不多。这在搅拌领域里是一种特殊情况,研究者不多。另外,对斜桨的研究报导较少。实际上由于斜桨加工方便,功耗比平桨低得多。在磷酸工业中使用较多。本文主要研究斜桨,通过测定 R-P 槽的流型、混合时间及停留时间分布,找出影响混合性能的主要因素及其间存在的关系,为国内开发和设计这类槽型提供参考。

## 1 实验方法和装置

实验槽选用与工业 R-P 槽几何相似结构的有机玻璃槽。槽直径为 335mm。各部分尺寸比例如图 1 所示(图中  $H/D=0.4$ ,  $d/D=1/3$ ,  $W_b/D=1/10$ ,  $W_p/d=1/5$ )。实验使用五种不同的搅拌桨,如表 1 所示。以自来水作为被搅拌液体。

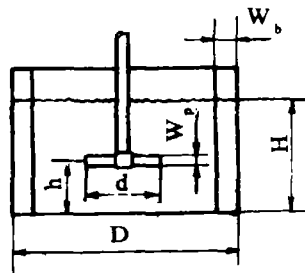


图 1 实验槽尺寸比例

\* 收稿日期: 1990.03.02

表1 实验用搅拌桨型

编 号	1	2	3	4	5
叶片数	2	2	4	4	6
叶片倾角	90°	45°	90°	45°	45°

搅拌槽内流场的显现采用狭缝光照射法, 以少量粉末物质作为反光点, 在狭缝光的照射下可观察到它的运动轨迹, 以此判断流体微团的运动方向。狭缝光由 HE-83 型片光源产生。混合时间的测量采用电导法, 以饱和 KCl 溶液作示踪剂。停留时间分布 (RTD) 的测定采用脉冲注入法, 在出口测定响应曲线。由下式算出 RTD 密度函数。

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

## 2 实验结果与分析

### 2.1 流型

在通常的挡板槽 ( $H/D=1$ ) 中, 不同类型的搅拌桨可以形成不同的流型, 并把搅拌桨简单地分为轴向流式 (如螺旋桨)、径向流式 (如平桨, Rushton 透平桨) 和斜向流式搅拌桨 (如  $45^\circ$  倾角斜桨)<sup>(2)</sup>。其流型分别如图 2(a)、(b)、(c) 所示。

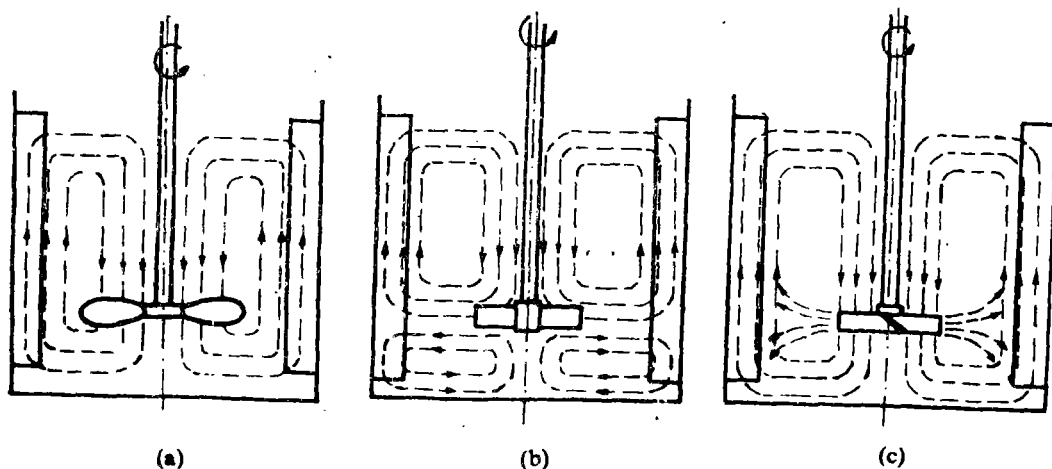


图2 不同桨型产生的流型示意图

当液位高度降低到与搅拌桨直径相当时 (如  $H/d=1.2$ ), 桨的安装高度会对流型产生一定影响。

本实验所用斜桨均为右螺旋方向倾斜。流场观察的结果表明: 桨的安装位置在  $h=0.25H \sim 0.75H$  之间时, 斜桨的流型与转向有关。顺时针转动 (正转) 时, 叶片作用在流体微团上的轴向分力向上, 形成如图 3(a) 所示的 A 流型; 逆时针转动 (反转) 时, 轴向分力向下, 形成如图 3(b) 所示的 B 流型。若  $h < 0.25H$ , 则不论正反转均形成 B 流型; 若  $h > 0.75H$  时, 则均形成 A 流型。

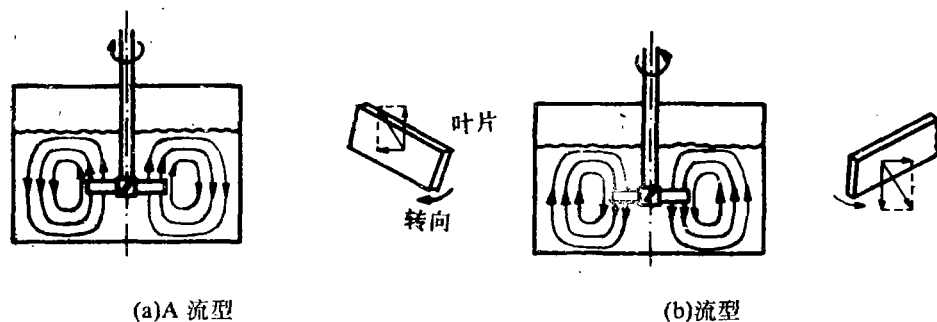


图 3 实验槽中两种流型示意图

平桨 ( $\alpha = 90^\circ$ ) 形成的流型, 以液位高度的一半处为分界限。当桨的位置高于液位高度一半时形成 A 流型; 低于液位高度一半时形成 B 流型。这一点与已报道的普通搅拌槽 ( $H/D=1$ ) 的情况不同 (参照图 2(b))。只有当平桨位于液体中部时才能形成图 2(b) 所示的上下两个循环回路的流型 (称为 C 流型)。

作用在流体微团上合力的方向, 决定流体运动方向。采用斜桨操作, 安装位置靠近容器底部时, 流体微团受力情况将发生变化, 因为, 当正转时桨叶将流体向上抛出, 由于桨叶与器底之间距离窄小, 形成的流动通道阻力大, 被桨叶上抛出去的流体不能及时由桨叶下部周围流体补充。从而在桨叶下部形成低压区, 阻止桨叶继续向上抛出流体。当桨叶施与流体微团的向上轴向分力与逆向压力梯度形成的阻力相抵消时, 流体微团仅受桨叶施加的径向力。当桨叶很接近容器底部时 ( $h < 0.25H$ ), 这时在器底附近流体被径向抛出形成 B 流型而不是 A 流型; 当反转时桨叶向器底抛出流体, 因受到器底的阻挡, 流体被迫转为径向流, 并继而在容器侧壁和挡板的作用下向上流动亦形成 B 流型。采用斜桨, 当安装位置靠近上部液面时 ( $h > 0.75H$ ), 重力的影响变得十分重要, 对流体向上运动起阻碍作用, 如同在上部液面处加个限流板。用类似上面的分析可得出无论桨叶正反转均形成 A 流型的结论。

平桨的情况与斜桨有所不同。平桨不施加流体的轴向力。当平桨安装位置偏离液位高度的一半时, 平桨上下方流体通道呈非对称性。平桨径向抛出流体时, 通道狭窄的一方形成低压区。在此压力梯度的作用下, 流体贯通桨叶平面由较宽通道一侧向较窄通道一侧流动, 从而形成 A 或 B 流型而非 C 流型。

采用斜桨在转速较高时 ( $> 300 \text{ r/min}$ ), 液面波动较大。尤以桨叶位置靠近液面时波动加剧。但 A 流型相对于 B 流型液面要平稳一些。高转速时两种流型的吸入空气位置不同。A 流型的吸气位置在挡板背向桨叶旋转方向一侧与槽壁所形成的夹角处。吸入气泡仅沿槽壁四周分布, 不影响桨叶转动。B 流型的吸气位置靠近搅拌轴。气泡被卷向桨叶, 使桨叶受力不均匀, 易引起搅拌轴振动损坏。

## 2.2 混合时间

### 2.2.1 转速对混合时间的影响

实验结果如图 4 所示, 混合时间随转速增加而减小。在相同转速下叶片数增多混合时

间减小。若令  $N_0 = t_m \cdot n$ , 以  $N_0$  对搅拌雷诺数  $R_e = \frac{d^2 n \rho}{\mu}$  作图示于图 5。当  $R_e > 2 \times 10^4$  时,  $N_0$  基本上与  $R_e$  无关。即  $N_0 = \text{常数}$ , 从而  $t_m \propto \frac{1}{n}$ 。  $N_0$  通常被称为无因次混合时间, 其物理意义是示踪剂从加入到混合均匀搅拌桨所转过的圈数。对不同结构形式的搅拌器, 通过比较它们的  $N_0$  值就能判断其混合性能的差异, 而不必局限在相同  $R_e$  状态下。永田认为几何相似的容器在湍流状态下, 只要无因次混合时间相同, 则混合状态相似<sup>(3)</sup>。因此, 本实验所得结论可依据无因次混合时间推广到几何相似的放大容器中。

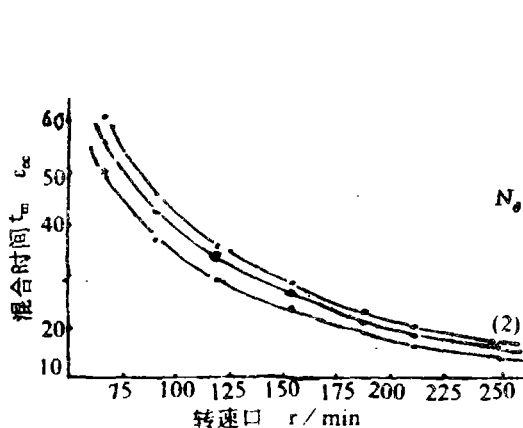
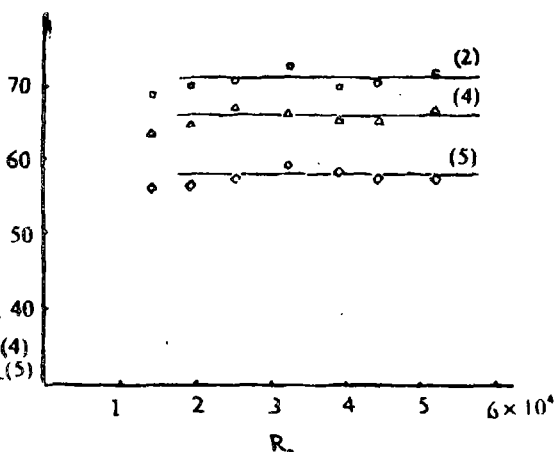


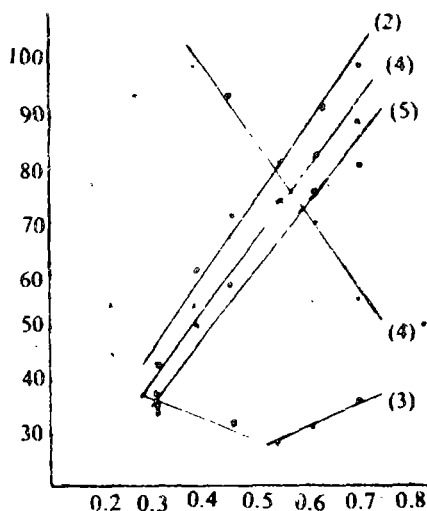
图4 转速对混合时间的影响

图5  $N_0$  与  $R_e$  的关系

### 2.2.2 搅拌桨安装位置对混合时间的影响

桨型及安装位置的变化可以影响槽内流体流动情况, 从而影响混合时间。实验结果如图 6 所示。由图可见搅拌桨的安装位置对斜桨的  $N_0$  影响很大。在  $h/H > 0.30$  时, 斜桨正转的  $N_0$  随  $h/H$  增大而增加; 在  $h/H < 0.25$  时,  $N_0$  却比  $h/H = 0.3$  时突然增加。斜桨反转时  $N_0$  随  $h/H$  增加而降低, 并且约在  $h/H = 0.55$  处与斜桨正转时的  $N_0$  相等。平桨的  $N_0$  受安装位置影响程度不如斜桨那样显著。在  $h/H \approx 0.50$  处平桨有一最低  $N_0$  值。平桨的  $N_0$  比斜桨的小得多, 说明平桨的混合速度快, 但平桨的功耗比斜桨大得多。

斜桨的混合时间受安装位置影响很大的原因在于斜桨平面上下两侧的混合效果是不相同的。在流体吐出侧, 吐出的流体流线集中, 具有较高的流速和湍动能, 使湍流混合过程进行很快, 而在桨叶的另一侧, 流体靠桨叶旋转所产生的低压吸入桨叶之间, 流线分散, 因而流速低, 湍动能小, 混合速度比流体吐出侧慢。整个容器的混合速度由混合最慢的局部区域控制。流体吸入侧的混

图6 安装高度对  $N_0$  的影响

合情况决定着整个容器的混合性能。若减少流体吸入侧所占的体积, 该侧液体被循环流动流体置换到吐出侧的时间就会减少, 整个容器的混合速度相应加快。由此推论, 在 A 流型时, 桨叶位置降低会使混合时间缩短; 在 B 流型时, 桨叶位置升高会使混合速度加快。结合前面流型实验与本节的实验可知, 该推论与实验结果是一致的。

### 2.3 循环模型的修正

用来描述搅拌槽中混合过程的数学模型已经发表许多 (Cloette, Goldstein<sup>[4]</sup>, Van de Vusse, Khang 和 Levenspiel<sup>[5]</sup>, 等等)。Joshi 等根据最长循环回路及平均循环速度的概念提出的循环模型具有以下特点: 物理概念清晰; 模型直接与流型及搅拌器结构相联系; 数学表达式简明<sup>[2]</sup>。Joshi 模型的数学表达式为:

$$\text{A 流型: } N_{\theta} = 5.0 \left( \frac{2H}{d} + \frac{D}{d} \right) \left( \frac{H-h}{d} \right) \quad (\text{斜桨})$$

$$\text{B 流型: } N_{\theta} = 5.0 \left( \frac{2H}{d} + \frac{D}{d} \right) \left( \frac{h}{d} \right) \quad (\text{斜桨})$$

$$\text{C 流型: } N_{\theta} = 9.43 \left( \frac{\omega H}{d} + \frac{D}{d} \right) \left( \frac{D}{d} \right)^{\frac{7}{6}} \left( \frac{W_p}{d} \right) \quad (\text{透平桨})$$

其中  $\omega$  的值由桨叶所处位置而定。当桨位于液体中部时  $\omega$  取最小值 1, 随着桨的位置偏离液体中部  $\omega$  值增大, 直至器底部  $\omega$  取最大值 2。对于 C 流型, 在液体中部  $N_{\theta}$  值为最小。与本实验用平桨所得结果一致。

Joshi 模型用于 A 流型和 B 流型所得的结论为: A 流型时桨叶位置越高,  $N_{\theta}$  越小; B 流型时桨叶位置越低,  $N_{\theta}$  越小。显然与本实验结果相矛盾。笔者认为 Joshi 在推导循环模型时采用的平均循环速度的计算方法缺乏实验依据。在前述对斜桨混合机理分析基础之上, 笔者推导出一个循环模型的修正模型。

Joshi 循环模型假设在搅拌槽内存在一个最大循环回路。对斜桨所形成的流型, 其最大循环回路为“abcdca”, 如图 7 所示。其总长度为  $L_{\max} = D + 2H$ 。Joshi 循环模型包含两个基本观点:

- ①. 混合时间与最大循环回路的长度成正比;
- ②. 混合时间与平均循环速度成反比。

用数学式描述为:

$$t_m = K_1 \cdot \frac{L_{\max}}{V_c} \quad (2)$$

Joshi 在选用平均循环速度的表达式时没有考虑槽中局部混合性能的差别, 导致错误的结论。笔者认为整个搅拌槽混合速度快慢的控制步骤在桨叶的流体吸入侧。混合时间应与吸入侧的流体被置换到吐出侧速度成反比, 即:

$$t_m \propto \frac{1}{V_r} \quad (3)$$

而置换速度  $V_r$  与桨叶平均输出流速成正比, 与吸入侧流体所占体积分数成反比。因此,

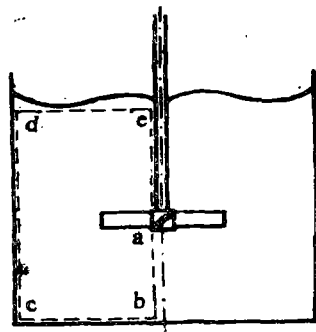


图 7 最大循环回路位置

$$\text{对A流型: } V_r \propto \frac{\bar{V}}{\left(\frac{h}{H}\right)} \quad (4)$$

$$\text{对B流型: } V_r \propto \frac{\bar{V}}{\left(\frac{H-h}{H}\right)} \quad (5)$$

对有挡板搅拌槽, 当流动处于湍流区时 ( $Re > 10^4$ ), 桨叶输出流准数  $N_q = \frac{q_d}{nd^3}$  为一常数<sup>(6)</sup>。从而桨叶平均输出流速为:

$$\bar{V} = \frac{q_d}{\frac{\pi}{4}d^2} \propto \frac{nd^3N_q}{\frac{\pi}{4}d^2} \propto nd \quad (6)$$

将(6)代入(4)、(5)式得:

$$\text{A流型: } V_r \propto \frac{nd}{\left(\frac{h}{H}\right)} \quad (7)$$

$$\text{B流型: } V_r \propto \frac{nd}{\left(\frac{H-h}{H}\right)} \quad (8)$$

引用Joshi模型中的最大回路概念, 结合(3)式可得:

$$t_m \propto \frac{L_{\max}}{V_r} \quad (9)$$

将(1)、(7)、(8)式分别代入(9)式, 并引入比例常数K得下面两式:

$$\text{A流型: } t_m = K \left( \frac{D+2H}{nd} \right) \left( \frac{h}{H} \right) \quad (10)$$

$$\text{B流型: } t_m = K \left( \frac{D+2H}{nd} \right) \left( \frac{H-h}{H} \right) \quad (11)$$

根据无因次混合时间  $N_\theta$  的定义, 从(10)、(11)式整理得到对Joshi循环模型的修正式:

$$\text{A流型: } N_\theta = K \left( \frac{D+2H}{d} \right) \left( \frac{h}{H} \right) \quad (12)$$

$$\text{B流型: } N_\theta = K \left( \frac{D+2H}{d} \right) \left( \frac{H-h}{H} \right) \quad (13)$$

这样, 由(12)、(13)式所得到的结论就与本实验结果相吻合。比例常数K与桨型有关, 由实验数据进行回归求出。能得结果列于表2。

表2 K值的计算结果

桨 型	流 型	K	相关系数
二叶 45° 斜桨	A	27.5	0.99
四叶 45° 斜桨	A	24.9	0.99
六叶 45° 斜桨	A	22.5	0.99
四叶 45° 斜桨	B	25.3	0.92

表 2 中线性回归的相关系数均大于 0.9, 表明修正后的循环模型能较好地拟合实验数据。

## 2.4 停留时间分布

采用两种停留时间分布模型, 对脉冲法测得的响应曲线进行数据拟合。第一种是理想混合模型, 其分布密度函数为:

$$E(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}$$

第二种是扩充的多级串联理想混合模型<sup>[7]</sup>。扩充之处在于允许串级数  $N$  取任意正数。其分布函数为:

$$E(t) = \frac{N^N t^{N-1} e^{-Nt/\tau}}{\tau^N \Gamma(N)} \quad (14)$$

其中:  $\Gamma(N)$  为 gamma 函数。

$$\Gamma(N) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{N-1} dx$$

该模型中含有一个未知参数  $N$ , 需根据实验数据进行参数估值。本文以精确度较高的时间域最小二乘法作为误差准则<sup>[8]</sup>, 即:

$$S = \sum_{i=1}^k [y(t_i) - \hat{y}(t_i; N)]^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

式(15)的求解是一个最优化问题。本文用 Marquardt 法在计算机上求解, 计算结果列于表 3。理想混合模型拟合的相关系数  $R_1$  都大于 0.98。串联级模型的相关系数  $R_2$  稍大于  $R_1$ , 并且  $N$  值接近于 1。拟合结果表明两种模型均显示出在给定条件下搅拌槽内基本上达到理想混合状态。

表 3 RTD 模型拟合结果

流 量 l/h	平均停留时间 min	搅拌速度 r/min	$\tau/t_m$	理想混合模型 $R_1$	串级模型 $R_2$ $N$
160	4.5	150	10.2	0.99	1.00    1.02
160	4.5	100	6.8	0.98	1.00    1.03
160	4.5	50	3.4	0.99	1.00    1.05
160	4.5	0	/	0.99	1.00    1.07
120	6.0	150	13.7	0.98	0.99    1.09
120	6.0	100	9.1	0.99	1.00    1.05
120	6.0	50	4.5	0.99	1.00    1.04
80	9.0	150	20.4	0.99	1.00    0.99
80	9.0	100	13.7	0.98	0.99    1.00
80	9.0	50	6.8	1.00	1.00    1.02
56	12.9	50	9.7	0.99	1.00    1.03
56	12.9	35	/	0.98	0.99    1.06

从表 3 还可以看出, 转速对停留时间分布状态的影响很小。在高流量的情况下甚至不

加搅拌亦能达到理想混合。产生这种现象的原因在于输入搅拌槽中的流体具有一定的动能,形成喷射搅拌器。若喷射搅拌器作用很强,就能使槽内达到理想混合。在此情况下再施加机械搅拌就不会对 RTD 产生明显影响。

单位时间内输入流体所具有的动能由(17)式计算,其结果列于表 4。

$$E_v = \frac{8\rho q^3}{\pi^2 d_0^4} \quad (17)$$

表 4 输入流体的动能

流量 (l/h)	160	120	80	56
动能 ( $W \times 10^{-3}$ )	7.12	3.00	0.89	0.31

此外,测定了转速为 50r/min 时,搅拌桨向流体输入能量为  $1.53 \times 10^{-2}W$ 。该值为表 4 中最大喷射动能的两倍。可见即使在较低转速下搅拌功率也远远大于喷射动能。因此,在喷射动能产生的混合作用可以忽略不计时(例如平均停留时间很长时),仅靠施加的机械搅拌也能达到理想混合状态。

### 3 结 论

对于液位高度与槽直径之比为 0.4 的扁平型磷酸反应槽:

3.1 槽中流体流型与桨叶形式、旋转方向、安装高度有关。对于斜桨(右螺旋倾斜),安装位置在  $h/H = 0.25 \sim 0.75$  之间时,顺时针方向旋转形成 A 流型,逆时针方向旋转形成 B 流型;当  $h/H > 0.75$  时,不论顺、逆转均形成 A 流型;当  $h/H < 0.25$  时,均形成 B 流型。对于平桨,  $h/H > 0.50$  时,形成 A 流型;  $h/H < 0.50$  时,形成 B 流型;  $h/H = 0.50$  时,形成 C 流型。

3.2 鉴于工艺要求磷酸反应槽中各点浓度梯度、温度梯度尽可能小,加入的物料尽可能快分散至整个槽中,若选用平桨应安装在液位中部;若选用斜桨桨叶逆时针方向旋转,应安装在  $h/H = 0.5 \sim 0.75$  之间,桨叶顺时针方向旋转应安装在  $h/H = 0.5 \sim 0.25$  之间。

3.3 在转速较高的操作条件下, A 流型的吸气位置在槽侧壁处,而 B 流型在搅拌轴附近,后者将引起轴振动。对小型磷酸反应槽,操作转速较高,斜桨宜取顺时针方向转动。

3.4 测定表明流体加入所形成的喷射搅拌作用对停留时间分布函数产生的影响不可忽视。因此对磷酸反应槽的各种加入物料(如淡磷酸、硫酸、返回冷料浆等)选择合适的加入方式,使之形成喷射流,有可能使反应槽在较低转速下操作就能达到均匀混合的目的。

3.5 本文修正了 Joshi 的循环模型,对斜桨得到下面两个方程:

$$\text{A 流型: } N_0 = K \left( \frac{D + 2H}{d} \right) \left( \frac{h}{H} \right)$$

$$\text{B 流型: } N_0 = K \left( \frac{D + 2H}{d} \right) \left( \frac{H - h}{H} \right)$$

3.6 本文系在固液比很小的牛顿型流体系统中所测结果。而实际磷酸反应槽中固液比大。高固液比系统的测定,将在今后进行。



## 符号表

A: 搅拌桨掠过面积, $m^2$	$t_m$ : 混合时间, S
C: 示踪剂浓度, $g/l$	$V_c$ : 平均循环速度, $m/S$
D: 搅拌槽直径, m	$V_r$ : 置换流速, $m/S$
d: 搅拌桨直径, m	$\bar{V}$ : 搅拌桨平均吐出流速, $m/S$
$d_0$ : 搅拌槽流体输入管内径, m	$W_b$ : 挡板宽度, m
H: 液位高度, m	$W_p$ : 桨叶宽度, m
h: 桨叶安装高度, m	$\mu$ : 粘度, $P_a \cdot S$
n: 搅拌速度, $r/S$	$\rho$ : 密度, $kg/m^3$
q: 搅拌槽输入流体流量, $m^3/S$	$\tau$ : 平均停留时间, S
$q_d$ : 搅拌桨吐出流量, $m^3/S$	$\omega$ : 参数

## 参 考 文 献

- (1) Wahba C.M., Hill K. and More A.I., Phosphonic Acid, Outline of the Industry, Punly Press Limited, London, 1980
- (2) Joshi J.B., Pandit A.B. and Shanma M.M., Chem. Eng. Sci., 37, 813(1982)
- (3) 永田进治编著, 马继舜译, 混合原理与应用, 化学工业出版社, 1984
- (4) Goldstein A.M., Chem. Eng. Sci., 28, 1021(1973)
- (5) Khang S.J. and Levenspeil O., Chem. Eng. Sci., 31, 569(1976)
- (6) 瓦西利佐夫等著, 姚兆生译, 搅拌设备参考手册, 化学工业出版社, 1983
- (7) Buffham B.A. and Gibilano L.G., AIChE.J., 14, 805(1968)
- (8) 杨基础等, 化工学报, 2, 103(1982)

## Mixing Characteristics of R-P Type Phosphoric Acid Reactor

Wu Yuting    Xu Xiucheng  
(ZhengZhou Institute of Technology)

**Abstract:** The effects of impeller type, turning direction, turning speed and installing position of impeller on flow pattern, mixing time, and Resident time distrilution were studied with a R-P type phosphoric acid reactor. The results show that the two sides of impeller plane are different on mixing efficiency. The control zone for mixing process is in the absorbing-fluid side of pitched-blade turbine. Joshi's circulation model was modified, and the modified model can be agreceable to the experimental results.

**Keywords:** agitation, mixing, flow pottern, phosphoric acid reactor