

## 糠醛-润滑油系统的流体力学和传质研究

倪信娣 章寿华 周永传 于筛成 苏元复

(华东化工学院)

在 $\phi 100\text{mm}$ 的转盘塔中进行了糠醛-润滑油系统的流体力学和传质研究。结果表明,除低转速外,液滴特征速度与两相流量及分散相滞留量之间基本上符合 Logsdail 等人提出的  $U_d + U_{ex}/(1-x) = \bar{U}_0 x(1-x)$  关联式。在高转速时测得的特征速度与 Laddha 有传质的关联式的计算值较为接近。传质试验结果表明,传质效率随转速的增加而提高,直至接近液泛为止。

转盘塔主要藉转盘旋转而产生剪切作用,使分散相迅速分散成液滴。它具有结构简单、维修方便、造价低廉、通量大、效率高和适应性大等优点。国内外广泛应用于菜油精制、核燃料加工、维生素提纯及石油工业。丙烷脱沥青与润滑油糠醛精制就是在石油工业应用的典型例子。

国外在转盘塔方面已做了大量的研究工作,积累了许多有关设计、放大的资料<sup>[4]</sup>。我们在 $\phi 100\text{mm}$ 玻璃转盘塔内,选用糠醛-润滑油工业体系进行了流体力学和传质研究。

### 一、实验方法

实验装置如图一。转盘塔外壳系用6节内径为 $100\text{mm}$ 、高为 $300\text{mm}$ 的厚壁玻璃管,以胶木法兰及长螺栓联接而成。塔中有一根直径为 $12\text{mm}$ 的不锈钢转轴,两端由轴承支撑。塔的中段法兰上装有四根不锈钢顶针以保护转轴,减小转轴的摆动和挠度。轴上装有40片厚 $1\text{mm}$ 的不锈钢圆盘,塔壁上装有41片厚为 $1\text{mm}$ 的固定环,固定环按装在三根不锈钢丝上,环与环之间及盘与盘之间的距离由定距管固定。定环外径与玻璃管内壁密切接触。安装时应使转盘位于2片定环形成的间隔中间。塔中各部份结构参数与比例如表1。

表 1 转盘塔结构参数

D(mm)	$d_s(\text{mm})$	$H_T(\text{mm})$	$d_R(\text{mm})$	$D/d_s$	$D/d_R$	$D/H_T$
100	67.5	25	50	1.48	2.0	4.0

操作前在定环表面涂上一层原料油,以改善定环对原料油的润湿性能。为了改善塔内液滴的分布状况,提高塔的效率,在两相进口处分别装有不锈和胶木制成的料液预分布装置。转轴通过联轴节与直流电机连接,并用调压变压器调节转速。转速以光电测速仪直接测定。

实验流程如图2所示。操作时先使塔中充满糠醛(连续相),然后调节转速。待转速稳定以后,慢慢开启油相(分散相)阀门,使润滑油通入塔内,控制界面在某一位置并使其稳

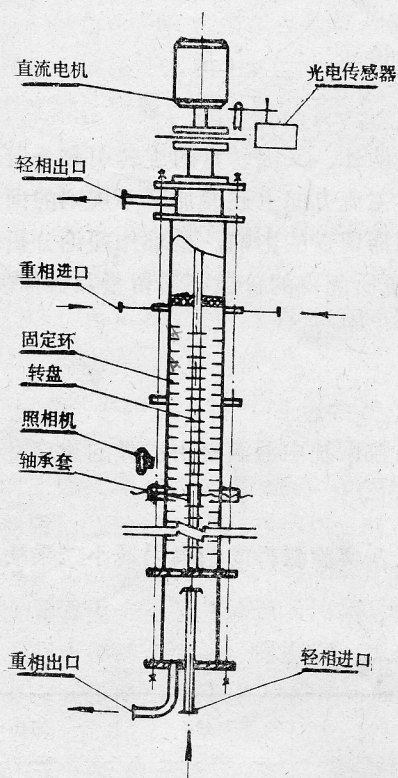


图1 转盘塔装置

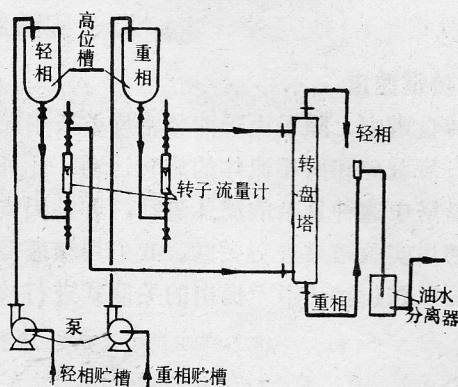


图2 试验流程示意图

定。待置换到塔的有效体积2.5~3.0倍后，同时取进出口液体的样品，用阿贝折光仪和离心机分别测定其折光率和两相中的夹带量，随后同时关闭两相进口阀门，停止转轴旋转，让两相静止分层，然后通入糠醛，取代油相，测定其体积。以最下面的一块定环到两相界面处的体积为基准，计算分散相滞留量的分率。

实验测得糠醛-润滑油系统的物性数据和界面张力的变化分别见表2和表3。

表2 系统的物性

	折光率 ( $n_D^{20}$ )	粘度 $\mu(\text{cp})$		密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	
		30℃	50℃	30℃	50℃
某厂减二线脱蜡油	1.4851	15.65	8.75	0.8721	8.8598
糠醛(工业用)	1.5167	1.670	0.975	1.1488	1.1238

表3 操作中该系统界面张力的变化

N (rpm)	$U_c(\text{糠醛, l/hr})$	$U_d(\text{油, l/hr})$	$\sigma_{\text{塔顶}}$ (dynes/cm)	$\sigma_{\text{塔底}}$ (dynes/cm)	$\sigma_{\text{平均}}$ (dynes/cm)
300	84.5	85	5.76	4.42	5.09
420	84.5	85	6.1	3.88	4.99
540	33	33	5.63	3.73	4.68
150	借用300 rpm的数据				5.09



## 二、实验结果及讨论

### 1. 特征速度

在转盘塔中,除了由于两相密度差所引起的逆流流动外,又因转盘的旋转引起分散相液滴的进一步破碎和两相流体的旋转运动。此外,在流体主流方向上还叠加了不规则的回流。由于转盘塔中这种复杂的流体流动,各种因素对分散相滞留量的影响,很难作理论分析,所以一般都用实验结果进行关联。我们用糠醛-润滑油系统所测得的分散相滞留量及操作条件数据,可以按Logsdail<sup>[1]</sup>提出的关联式进行校核:

$$U_d + U_c \frac{x}{1-x} = \bar{U}_0 x (1-x) \quad (1)$$

式中的 $\bar{U}_0$ 为分散相液滴的特征速度。它的物理意义是多粒系统中液滴自由沉降的速度,也即当 $U_c=0$ 、 $U_d$ 趋近于零时,分散相液滴的极限运动速度。

Kung<sup>[6]</sup>认为当 $\frac{d_s - d_R}{D} > \frac{1}{24}$ 时,上式可以适用。实验测得的结果用最小二乘法进行拟合,所得的特征速度值列于表4。

表4 几种转速下的特征速度

N[rpm]	0	150	300	420	540
$\bar{U}_0$ [cm/s]	4.96	4.56	3.06	2.08	0.93

由表4可以看出,分散相液滴的特征速度随着转速的增加而减小,150rpm后尤为显著。这是由于转速增加,分散相液滴直径逐渐减小之故。

### 2. 实测的特征速度与前人建议的关联式计算值相比较

Logsdail<sup>[1]</sup>等人根据特征速度与系统物性、塔几何结构及转速之间的关系,提出了下述的关联式:

$$\frac{\bar{U}_0 \mu_c}{\sigma} = 0.012 \left( \frac{g}{d_R N^2} \right)^{1.0} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0.9} \left( \frac{d_s}{d_R} \right)^{2.3} \left( \frac{H_T}{d_R} \right)^{0.9} \left( \frac{d_R}{D} \right)^{2.7} \quad (2)$$

最近Laddha<sup>[2]</sup>等人用因次分析方法得出了类似的关联式:

$$\phi = C_1 [Fr \cdot \psi_2]^n \quad (3)$$

其中区域I:  $C_1=1.08$ ;  $n=0.08$ ; 区域II:  $C_1=0.01$ ;  $n=1.0$ ;  
适用于区域II的式(3),实质上与式(2)无异。

式中  $\phi = \bar{U}_0 / \left[ \frac{\sigma \Delta \rho g}{\rho_c} \right]^{0.25} \cdot \left[ \left( \frac{H_T}{d_R} \right)^{0.9} \left( \frac{d_s}{d_R} \right)^{2.1} \cdot \left( \frac{d_R}{D} \right)^{2.4} \right]$

$$Fr = \frac{g}{d_R N^2} \quad \psi_2 = \left( \frac{\sigma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g} \right)^{0.25} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0.6}$$

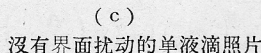
对于物质从分散相D向连续相C传质时, Laddha<sup>[2]</sup>等建议分成两种情况:

$$\text{区域 I: } \phi = 1.46 [Fr \cdot \psi_2^{0.5}]^{0.08}$$

(4)

$$\text{区域 II: } \phi = 0.11 [Fr \cdot \psi_2^{0.5}]^{1.0}$$

(此横座标有错,更正見64页。)



照片中 (a) 为界面激烈扰动的情况, (c) 为没有界面扰动的情况, (b) 为润滑油在糠醛中形成液滴的情况, 液滴不呈平滑的表面, 有一定的界面扰动, 但没有左边的激烈。界面扰动的存在, 加速了 RDC 中分散相液滴与液滴之间的凝聚频率, 其相应的分散相液滴亦较大。这很可能就是实验测得的特征速度值较大的原因。一般情况, 界面扰动在比较宁静的连续相中 (例如像以上三张照片系在静止的连续相中所摄取的情况) 影响较大, 而在高度湍流中影响则相对地较小。因此, 当转速较高时 (即在图三中的区域 II), 实验值与直线偏离较小, 而在转速低时偏离就大了。

继Kung和Beckmann<sup>[6]</sup>观察到甲苯-水系统的临界周边速度为152cm/s以后,许多学者又进行了深入研究,据报道<sup>[2]</sup>特征速度可以分为两个区域:一个区域中,特征速度值随转速



的增加变化不大,其 $\bar{U}_0$ 基本上为一常数,称恒速 $\bar{U}_0$ 区;另一区域中,特征速度值随转速的增加而显著降低。从恒定的特征速度过渡到降速特征速度的转速称为临界转速。并提出了没有传质与D→C(分散相到连续相)方向传质时相应的关联式分别为:

$$\left(\frac{g}{d_R N^2}\right)_{cr} \cdot \psi_2 \approx 180; \quad \left(\frac{g}{d_R N^2}\right)_{cr} \cdot \psi_2^{0.5} \approx 16 \quad (5)$$

一般认为,临界转速随系统不同而变化,即使是同一系统,塔的几何结构不同,其临界转速也不同。我们把糠醛-润滑油系统的特征速度 $\bar{U}_0$ 和转速N之间的关系绘于图5。由图可

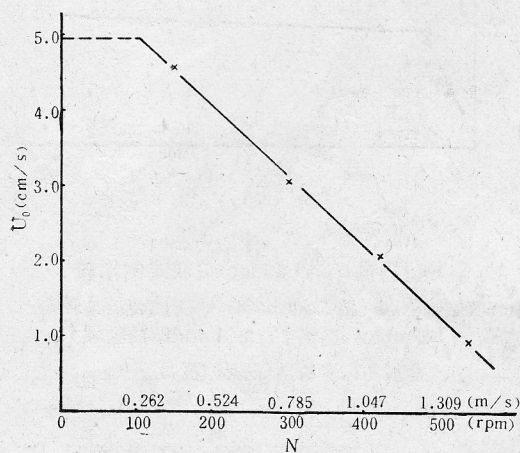


图5 糠醛-润滑油系统特征速度和转速的关系

可以看到,在0~150rpm时,特征速度 $\bar{U}_0$ 仅从4.96~4.56cm/s,变化甚小;而当转速在150~540rpm时,相应的特征速度变化较大,从4.56cm/s下降到0.93cm/s。从而可以粗略地估计出:糠醛-润滑油系统从恒速区到降速区的临界转速在100~150rpm左右,即折周边线速为0.26~0.39m/s。当 $N < 150$ rpm时,外加能量还不足以克服液体的界面张力,因而转盘的旋转不能使分散相液滴进一步破碎,故液滴的尺寸变化不大,其相应的特征速度基本上为一常数;若 $N > 150$ rpm时,随着转速的增加,分散相液滴在塔内停留时间增加,平均液滴尺寸减小,相应的特征速度也迅速下降,这就是特征速度形成两个区域的原因。在转盘塔设计和操作中,为了得到较高的传质速率,就必需使两相有较大的接触面积,因而必须保证操作转速大于这个临界转速。

为了比较,我们用了下述三种方法对临界条件下的特征速度进行计算:

(1) 按Logsdail提出的式(2)进行计算得:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_0 \mu_c}{\sigma} &= 0.012 \times \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c}\right)^{0.9} \left(\frac{g}{d_R N^2}\right)^{1.0} \left(\frac{d_s}{d_R}\right)^{2.3} \left(\frac{H_T}{d_R}\right)^{0.9} \left(\frac{d_R}{D}\right)^{2.7} \\ &= 0.012 \times \left(\frac{1.1488 - 0.8721}{1.1488}\right)^{0.9} \times \left(\frac{981}{5 \times 2.5^2}\right)^{1.0} \times \left(\frac{6.75}{5.0}\right)^{2.3} \\ &\quad \times \left(\frac{2.5}{5.0}\right)^{0.9} \times \left(\frac{5.0}{10.0}\right)^{2.7} \\ &= 0.0172 \quad (\text{按实测 } 150 \text{ rpm 进行计算}) \end{aligned}$$

$$\therefore \text{临界点的 } \bar{U}_0 = 0.0172 \times \frac{5.09}{0.0167} = 5.24 \text{ cm/s}$$

(2) 按Laddha提出的下列无传质算式计算:

$$\bar{U}_0 / \left(\frac{\sigma \Delta \rho g}{\rho_c^2}\right)^{0.25} \cdot G_f \approx \phi \quad (6)$$

在临界条件下 $\phi \approx 1.8$ , 则:

$$\left(\frac{\sigma \Delta \rho g}{\rho_c^2}\right)^{0.25} = \left[\frac{5.09 \times (1.1488 - 0.8721) \times 981}{1.1488^2}\right]^{0.25} = 5.688$$

$$G_f = \left(\frac{H_T}{d_R}\right)^{0.9} \left(\frac{d_s}{d_R}\right)^{2.1} \left(\frac{d_R}{D}\right)^{2.4} = \left(\frac{2.5}{5}\right)^{0.9} \times \left(\frac{6.75}{5.0}\right)^{2.1} \times \left(\frac{5.0}{10.0}\right)^{2.4} = 0.1907$$

$$\therefore \text{临界点的 } \bar{U}_0 = 1.8 \times 0.1907 \times 5.688 = 1.952 \text{ cm/s}$$

按Laddha有传质的算式进行计算, 从D到C方向传质时,  $(Fr)_{cr} \cdot \psi_2^{0.5} \approx 16$

$$\text{而 } \psi_2 = \left(\frac{\sigma^3 \rho_c}{\mu_c^4 g}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c}\right)^{0.6} = \left(\frac{5.09^3 \times 1.1488}{0.0167^4 \times 981}\right)^{0.25} \times \left(\frac{1.1488 - 0.8721}{1.1488}\right)^{0.6} \\ = 15.978$$

$$\therefore (Fr)_{cr} = \frac{16}{\psi_2^{0.5}} = 4.003 \quad N^2 = \frac{981}{4.003 \times 5} = 49 \quad N \approx 7 \text{ rps} \approx 420 \text{ rpm}$$

$$\therefore \bar{U}_0 = 1.46 \times [(Fr) \cdot \psi_2^{0.5}]^{0.08} \times Gr \left(\frac{\sigma \Delta \rho g}{\rho_c^2}\right)^{0.25} = 1.977 \text{ cm/s}$$

(3) 按Klee-Treybal<sup>[5]</sup>建议的式子计算液滴极限速度

$$\bar{U}_0 = C_R V_t \dots\dots\dots (7)$$

在临界条件下, 末端速度 $V_t$ 可用下式算:

$$V_t = \frac{17.6 \times \Delta \rho^{0.28} \cdot \mu_c^{0.10} \cdot \sigma^{0.18}}{\rho_c^{0.55}} \\ = \frac{17.6 \times (1.1488 - 0.8721)^{0.28} \times 0.0167^{0.10} \times 5.09^{0.18}}{1.1488^{0.55}} \\ = 10.13 \text{ cm/s}$$

$C_R$ 为收缩系数, 可选择下述三式中最小的一个值:

$$\left(\frac{d_s}{D}\right)^2 = 0.4556 \quad 1 - \left(\frac{d_R}{D}\right)^2 = 0.75$$

$$\left(\frac{d_s + d_R}{D}\right) \left[ \left(\frac{d_s - d_R}{D}\right)^2 + \left(\frac{H_T}{D}\right)^2 \right] = 0.3586$$

所以

$$\bar{U}_0 = C_R V_t = 0.3586 \times 10.13 = 3.63 \text{ cm/s}$$

从上述计算结果可以粗略看出: 按式(2)和式(7)计算所得的结果与实验测得的恒速区特征速度值(4.56~4.96 cm/s)稍接近。但必须注意, 式(2)不适用于低于临界转速的情况。

鉴于糠醛-润滑油系统的界面张力较低、又部份互溶的特点, 究竟用何种方法来关联, 求取临界转速与特征速度以适合工业上放大和设计的需要, 还有待今后中型热模试验中进一步研究。

**4. 传质效率的评价** 在我国润滑油糠醛精制的工艺中, 转盘塔的应用相当广泛, 但对该设备的性能和操作还缺乏认识。为了掌握该设备的性能, 寻找适宜的操作条件, 我们用某厂减二线脱蜡油和工业级糠醛为原料, 在室温下( $28.5 \pm 1^\circ\text{C}$ )进行了五级逆流萃取的实验模拟, 测定了第五级中润滑油的折光率 $n_D^{30} = 1.4755$ , 并以此数据作为比较传质效率的依据。然



后用同一批油在塔中进行试验,测定各种操作条件下出口油样的折光率,并与前者进行对比。试验结果整理在表5。由表看出,当转速低于150rpm时,整个塔的理论级数低于五级;当转速大于300rpm时,整个塔的理论级数就大于五级。由此可见,转与不转的结果肯定是不一样的。在比负荷相同情况下,比较转速对萃取效率的影响时可以发现,转盘塔的效率随着转速的增加而提高,直至接近液泛。这是由于转速的增加,分散相液滴直径减小,两相接触面积迅速增加。另外分散相液滴运行的环形线加大和整个塔中液体湍动加剧,强化了传质效果。

表 5

转 速 N		U <sub>c</sub> 糠 醛		U <sub>d</sub> 油		比 负 荷 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·hr)	折 光 率		效 率 (表观级数)
(rpm)	(m/sec)	(l/hr)	(cm/min)	(l/hr)	(cm/min)		油	糠 醛	
0	0	33.0	7.01	33.0	7.01	8.41	1.4792	1.5205	3.1
0	0	50.0	10.62	49.6	10.53	12.69	1.4790	1.5201	3.2
0	0	70.0	14.86	71.0	15.07	17.96	1.4789	1.5211	3.2
0	0	87.8	18.64	87.2	18.51	22.29	1.4788	1.5210	3.3
150	0.393	40.5	8.60	39.0	8.28	10.19	1.4754	1.5222	5.1
150	0.393	70.0	14.86	71.0	15.07	17.96	1.4780	1.5207	3.7
150	0.393	84.5	17.94	85.0	18.05	21.59	1.4778	1.5211	3.8
300	0.785	40.5	8.60	39.0	8.28	10.19	1.4753	1.5213	5.1
300	0.785	80.0	16.98	80.5	17.08	20.45	1.4754	1.5229	5.1
300	0.785	84.5	17.94	85.0	18.05	21.59	1.4752	1.5229	5.2
420	1.099	40.5	8.60	39.0	8.28	10.19	1.4727	1.5237	6.4
420	1.099	61.0	12.95	61.0	12.95	15.54	1.4731	1.5249	6.3
420	1.099	70.0	14.86	71.0	15.07	17.96	1.4732	1.5249	6.2
540	1.414	24.0	5.10	24.0	5.10	6.11	1.4722	1.5248	6.7
540	1.414	30.0	6.37	30.0	6.37	7.64	1.4724	1.5243	6.6
540	1.414	33.0	7.01	33.0	7.01	8.41	1.4724	1.5246	6.6

注:原料为糠醛( $n_D^{30}=1.5167$ )、油( $n_D^{30}=1.4851$ );以五级逆流萃取实验测得的第五级油样 $n_D^{30}=1.4755$ 为比较基准;油相和糠醛相夹带量均 $\leq 0.2\%$ 。表观级数= $\frac{\text{原料油折光率}-\text{出口油相的折光率}}{\text{原料油折光率}-\text{第五理论级油相折光率}} \times 5$ 。

5. 比负荷的测定 实验测定了液泛时转速与两相总流量之间的关系,结果见表6。

表 6 液泛时转速和两相流量之间关系

N		U <sub>c</sub>	U <sub>d</sub>	U <sub>c</sub> +U <sub>d</sub>
(rpm)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /hr·m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /hr·m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /hr·m <sup>2</sup> )
300	0.785	12.74	17.45	30.19
420	1.099	11.66	17.45	29.11
470	1.230	11.18	11.11	22.29
540	1.414	4.46	4.46	8.92

由表6看出,当转速 $N < 1.1 \text{ m/s}$ 时,此 $\phi 100 \text{ mm}$ 的玻璃转盘塔的比负荷可达到 $30 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^2$ 左右,但随着操作转速的进一步增加,液泛时两相比负荷迅速下降。综合考虑效率和比负荷两个因素,选取周边速度为 $1.1 \text{ m/s}$ 左右较为适宜。

### 三、几点结论

(1) 糠醛-润滑油系统中, 分散相滞留量、两相流量与特征速度之间的关系, 除低转速外, 基本上符合Logsdail提出的关联式:

$$U_d + U_c x / (1 - x) = \bar{U}_0 x (1 - x)$$

(2) 在 $\phi 100\text{mm}$ 的玻璃塔中, 测得糠醛-润滑油系统的临界转速约为 $100 \sim 150\text{rpm}$ , 即折周边线速为 $0.26 \sim 0.36\text{m/s}$ 。

(3) 实验测得的特征速度值比按式(2)(3)的计算值为高, 但区域II中的实验值与Laddha有传质的关联式较为接近。

(4) 在转盘塔中, 传质效率随着转速的增加而迅速提高, 直至接近液泛为止。

#### 符 号

$\mu_c$  连续相粘度,  $[\text{P}]$ ;  $\sigma$  两相间界面张力,  $[\text{dynes/cm}]$ ;  $\rho_c$  连续相密度,  $[\text{g/cm}^3]$ ;  $\Delta\rho$  两相密度差,  $[\text{g/cm}^3]$ ;  $\rho_d$  分散相密度,  $[\text{g/cm}^3]$ ;  $N$  转盘转速,  $[\text{rps}]$ ;  $g$  重力加速度,  $[\text{cm/s}^2]$ ;  $d_s$  固定环孔径,  $[\text{cm}]$ ;  $d_R$  转盘直径,  $[\text{cm}]$ ;  $H_T$  间隔高度,  $[\text{cm}]$ ;  $D$  塔内径,  $[\text{cm}]$ ;  $\bar{U}_0$  特征速度,  $[\text{cm/s}]$ ;  $U_c$ 、 $U_d$  分别为连续相糠醛和分散相油的表观速率,  $[\text{cm}^3/\text{min}\cdot\text{cm}^2]$ ;  $X$  分散相滞留分率。

#### 参 考 文 献

- [1] Logsdail, D. H., et al., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., **36**, 301 (1957).
- [2] G. S. Laddha, et al., The Canadian Journal of Chemical Engineering, **56**, 137 (1978).
- [3] Reman, G. H., Olney, R. B., Chem. Eng. Prog., **51**, 3, 141 (1955).
- [4] "Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers", (1979).
- [5] R. E. Treybal, Liquid-Liquid Extraction, 184, 511 (1963).
- [6] E. Y. Kung, et al., AIChE J. **7**, 319 (1961).

## HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER IN FURFURAL EXTRACTION OF LUBRICATING OILS IN RDC

Ni Xindi, Zhang Shouhua, Zhou Yongchuan,  
Yu Shaicheng, and Su Yuonfu

(East China Institute of Chemical Technology)

### Abstract

The hydrodynamics and mass transfer for furfural lubricating oil system were studied with a 100 mm diameter rotating disc column. The results indicate that the interrelationship between the characteristic speed of droplets, the flow rate of both phases, and the hold-up of dispersed phase approximately follows the correlation suggested by Logsdail, et al. under moderate rotor-speed. The characteristic speed determined in zone II is approximately equal to the value calculated by the correlation of mass transfer of Laddha. The experimental results also indicate that the mass transfer efficiency increases with the rotor speed till the flooding point is approached.