

固液搅拌槽内近壁区液相速度研究

李良超 张仲敏 黄雄斌*

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要: 在直径 476 mm 的固液搅拌槽内, 采用自行研制的双电导电极探头对搅拌槽内距壁 0.4 mm 的近壁区液相速度进行了测定。平均固相体积分数 ϕ_v 从 1.0 % 至 5.4 %。实验结果表明: 固体颗粒离底悬浮最小液相速度与固液的物理性质有关, 而与实验的操作条件无关; 液相速度和搅拌转速在近壁上流区成正比关系, 而在槽底区不成正比关系; 临界均匀悬浮时, 近壁上流区液相速度不随固相体积分数变化; 悬浮高度处液相速度和操作条件无关等。

关键词: 搅拌槽; 近壁区; 液相速度; 固体悬浮

中图分类号: TQ630.54

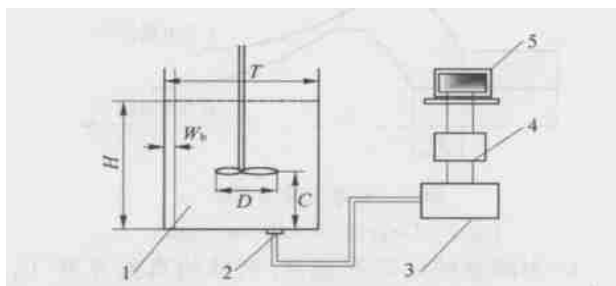
对固液悬浮搅拌槽内近壁区液相速度的研究, 可以了解固体颗粒悬浮和哪些因素有关, 进而实现怎样以最小能耗达到固体颗粒悬浮的要求。目前, 对近壁区液相速度的研究还很少^[1-5], 但测点都离壁面较远。如 Geisle^[1]研究的离壁距离为 13 mm, 包雨云^[3]的测点为在近壁上流区距壁 20 mm 和槽底区距壁 4 mm, 而研究固液悬浮机理, 搅拌槽内传热, 壁面结垢等和离壁更近的滞流层内液相速度行为更密切相关。本文在槽底区主要对离底悬浮时液相速度行为进行研究, 在近壁上流区主要研究均匀悬浮时的液相速度行为, 以供工业应用中参考, 为 CFD 模拟作参考。

1 实验部分

1.1 实验装置

本实验在直径 476 mm 的平底有机玻璃槽内进行, 槽内设有四块挡板, 全挡板条件, 挡板宽为槽径的 1/10, 实验装置及实验测试系统如图 1 所示。实验中如没特别说明, 采用的桨型为 CB YIII 型轴流式向下泵送流体的搅拌桨, 桨的离底高度为 $C/H = 0.33$ 。桨的直径为 $D/T = 0.44$, $H = T$ 。

实验物系如没特别说明为玻璃珠-自来水体系, 玻璃珠密度为 2500 kg/m^3 , 粒径为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,



1. 搅拌槽 2. 测速测量头
3. 电导率仪 4. A/D 转换板 5. 微机
图 1 实验装置及实验系统测试图

Fig. 1 Experimental apparatus and testing system

粒径分布为正态分布, 颗粒平均直径为 $100 \mu\text{m}$, 槽内平均固相体积分数 ϕ_v 从 1.0 % 变化到 5.4 %。

1.2 测点分布

近壁区分为槽底区和近壁上流区两部分。本实验在槽底开 8 个孔 (测点序号 1 ~ 8), 在近壁上流区开 5 个孔 (测点序号 9 ~ 13) 进行测量。测点位于两挡板中间位置, 测点离壁面距离为 0.4 mm。各测点在槽底区 (1 ~ 8)、近壁上流区 (9 ~ 13) 的位置如表 1 所示。

表 1 近壁区测点位置一览表

Table 1 Position of the tested points near the wall region

测点序号	1	2	3	4	5	6	7	8
测点位置 ($2r/T$)	0.23	0.32	0.48	0.6	0.65	0.74	0.82	0.9
测点序号	9	10	11	12	13			
测点位置 (h/H)	0.19	0.31	0.42	0.6	0.96			

1.3 测试方法

本实验对近壁区液相速度测量的方法是用自行

收稿日期: 2004-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19976002)

第一作者: 男, 1976 年生, 硕士生

*通讯联系人

E-mail: Huangxb@mail.buct.edu.cn

研制的双电导电极探头法。

探头的测试平面和槽底在一个平面上,测试时将 4~8 μL 的饱和 KCl 溶液从进样针头注入槽底测试流场中,当两对电极所在的方向与来流的方向一致时,注射的 KCl 溶液经过 1 号电极和 2 号电极,电极的电导率信号依次发生突变,接受的电导率信号经过电导率仪放大、A-D 板转换后由计算机采集。信号示意图如图 2 所示,KCl 溶液经过两对电极的时间差为 Δt ,两对电极间距 d^* 已定,因此流体在两电极间的液相速度可计算为

$$V_1 = k \times d^* / (\Delta t) = k \times V$$

$$V = d^* / (\Delta t)$$

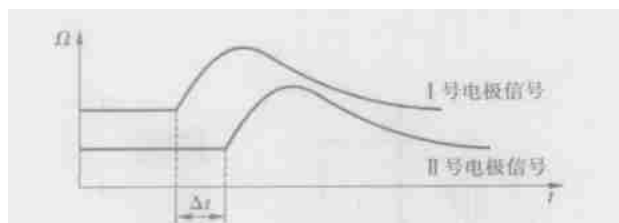


图 2 采集信号示意图

Fig. 2 Diagram of collected signals

V 为测量的示踪剂速度,液体的真实速度 V_1 与 V 成正比, k 为校正因数, k 只与探头的结构有关。由于示踪剂速度 V 与液体真实速度 V_1 成比例关系, V_1 与 V 的变化趋势一致,在本文中用示踪剂速度 V 代替真实液相速度 V_1 进行讨论。为叙述方便,文中用液相速度的名称表示示踪剂的速度。

当两对电极的方向和流体的方向一致时,测量的时间差 Δt 最小。

2 实验结果与讨论

2.1 槽底区液相速度研究

固液悬浮状态主要可分为定点离底悬浮、完全离底悬浮和完全均匀悬浮。如图 3 所示,所有颗粒

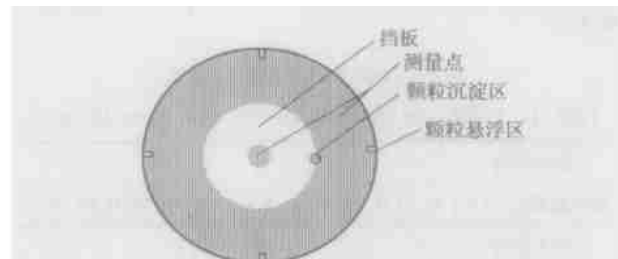


图 3 定点离底悬浮示意图

Fig. 3 Diagram of off-bottom suspension in the pointing region
都在观察点区域上方运动,颗粒在观察点区域上方

停留时间不超过 1~2 s 称为定点离底悬浮。定点离底悬浮所需的最低转速为定点离底悬浮临界转速 n_{js}^* ,此时的悬浮状态为临界定点离底悬浮,观察点处的液相速度称为定点离底悬浮临界液相速度 V_{js}^* 。 V_{js}^* 也是颗粒运动所需的最小液相速度。

当所有颗粒都在槽底上方运动,颗粒在槽底的停留时间不超过 1~2 s 称为完全离底悬浮。完全离底悬浮所需的最低转速称为完全离底悬浮临界转速 n_{js} ,此时的悬浮状态称为临界完全离底悬浮。完全均匀悬浮是指所有颗粒比较均匀的悬浮在整个槽中,整个搅拌槽在轴向无明显浓度差。在此状态下继续增加搅拌转速或功率,对整个槽内固体浓度的分布无明显影响。完全均匀悬浮所需的最低转速为完全均匀悬浮临界转速 n_c ,此时所对应的悬浮状态为临界完全均匀悬浮。

2.1.1 颗粒离底悬浮最小液相速度 (V_{js}^*) 的影响因素

固液相物理性质的影响

以树脂、赤英砂、玻璃珠为固相,颗粒的尺寸范围如表 2 所示,粒径的分布为正态分布。由表中可以看出,平均固相体积分分数 ϕ_v 为 2.5 % 时,测点 3 定点离底悬浮时,该点处液相速度受颗粒的尺寸、密度等影响较大。玻璃珠和树脂的粒径相同,密度不同,经回归测点 3 颗粒离底悬浮最小液相速度 V_{js}^* 和固液相密度差 $\Delta \rho$ 关系为 $V_{js}^* \propto \Delta \rho^{0.42}$ 。玻璃珠和赤英砂的密度相近,颗粒尺寸 d_p 分别按平均尺寸 275 μm 和 100 μm 计算,回归 V_{js}^* 和 d_p 的关系为 $V_{js}^* \propto d_p^{0.27}$ 。所以 V_{js}^* 与固液相密度差 $\Delta \rho$ 和颗粒尺寸 d_p 的关系为

$$V_{js}^* \propto \Delta \rho^{0.42} \cdot d_p^{0.27}$$

表 2 不同固体颗粒在测点 3 液相速度测量一览表

Table 2 Liquid velocities in point 3 with different particles

固体颗粒	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒直径/ μm	n_{js}^* / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	V_{js}^* / V_t
树脂	1070	50~150	29	2.4
赤英砂	3000	250~300	101	6.5
玻璃珠	2500	50~150	171	6.5

固相体积分数的影响

如图 4 所示,测点 3 临界定点离底悬浮时,随着平均固相体积分数的增大,临界转速 n_{js}^* 增加,但液相速度 n_{js}^* 在 3.0 % 幅度以内变化,液相速度基本不

变。所以,在一定固相体积分数范围(1 % ~ 5.4 %)内,平均固相体积分数对颗粒离底悬浮最小液相速度没有影响。液相速度方向 在测点 3 处为 6.5°,随着固相体积分数变化,该点的液相速度方向基本不变。

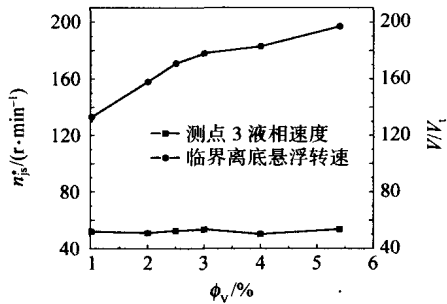


图 4 测点 3 液相速度随固相体积分数变化图
Fig. 4 Solid concentration vs. liquid velocities relationship in point 3

桨离底高度的影响

表 3 表示 ϕ_v 为 5.4 % 时,在 C/T 从 0.229 到 0.452 范围内,测点 3 临界定点离底悬浮时该点的液相速度。由表 3 中可以看出,随着桨的离底高度的变化,该点的液相速度的变化幅度分别在 2.4 % 以内,可见桨的离底高度对颗粒离底悬浮最小液相速度 V_{js}^* 没有影响。

表 3 桨的高度和槽底液相速度关系表

Table 3 Relation between liquid velocity in point 3 and height of the impeller

C/T	$n_{js}^*/(r \cdot \min^{-1})$	$\alpha/(\circ)$	V_{js}^*/V_t
0.229	177	6.5	52.4
0.275	186	7.9	52.3
0.333	197	8.1	53.6
0.376	197	8.1	51.3
0.452	202	10.5	52.2

桨的尺寸、桨型的影响

分别以 CB Y (1) 桨、CB Y (2) 桨、宽叶 CB Y (CB Y-W)、四斜叶桨 (PB T)、六直叶涡轮桨 (RTB) 为实验用桨,平均固相体积分数 ϕ_v 为 5.4 % 实验。由表 4 可以看出,虽然桨的尺寸、桨型等不同,但测点 3 临界定点离底悬浮时,该点的液相速度 V_{js}^* 平均变化幅度在 1.1 % 以内,可见桨的尺寸、桨型对颗粒离底悬浮的最小液相速度没有影响,但临界转速 n_{js}^* 和搅拌功率 P_{js}^* 随桨型的不同而不同。表 4 中 CB Y 为低剪切型桨,RTB 为高剪切型桨,FB T 桨在

表 4 不同桨型在测点 3 液相速度测量一览表

Table 4 Liquid velocities in point 3 with different impeller types

桨型	叶片数	D/T	$n_{js}^*/(r \cdot \min^{-1})$	$\alpha/(\circ)$	v_{js}^*/V_t	P_{js}^*/W
CB Y(1)	3	0.445	197	6.5	53.6	3.66
CB Y(2)	3	0.403	194	6.5	53.4	3.87
CB Y-W	3	0.414	177	4	52.5	5.78
PB T	4	0.313	168	10.5	52.7	46.4
RTB	6	0.326	341	171.9	51.3	88.5

高剪切与低剪切型之间。由表 4 中可以看出,用低剪切型桨的能耗最小,高剪切型桨的能耗最大。可见用低剪切型桨有利于固体颗粒的离底悬浮。

离底悬浮位置的影响

由图 5 (a) 可知,沿着径向方向测点 1,2,...,8 处颗粒临界定点离底悬浮时,所需临界转速不同,在 $2r/T=0.48$ 附近临界定点离底悬浮所需的搅拌转速最小,但临界定点离底悬浮的测点不同,颗粒离底悬浮最小液相速度 V_{js}^* 基本不变,变化幅度在 3.0 % 以内。说明颗粒离底悬浮需要的最小液相速度和在槽底的位置无关。

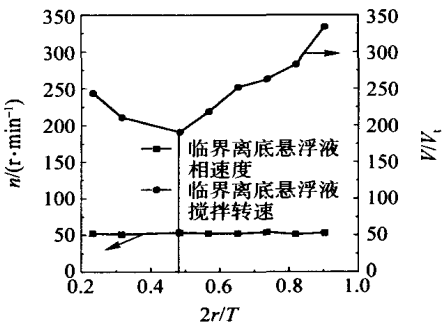


图 5 (a) 槽底不同位置处临界离底悬浮液相速度

Fig. 5 (a) Just-suspension liquid velocities in different positions of the bottom region

图 5 (b) 为槽底各点临界定点离底悬浮时,液相速度方向的变化,由图 5 中可以看出,沿径向颗粒离底悬浮最小液相速度 V_{js}^* 大小虽然不变,但径向速度分量变小,切向速度分量变大。

由以上分析可知,在一定平均固相体积分数范围内(1 % ~ 5.4 %),颗粒离底悬浮的最小液相速度和颗粒尺寸、固液密度等因素有关,而与平均固相体积分数、桨的离底高度、桨的尺寸、桨型、在槽底位置等因素无关。用低剪切型桨更有利于颗粒离底悬浮。

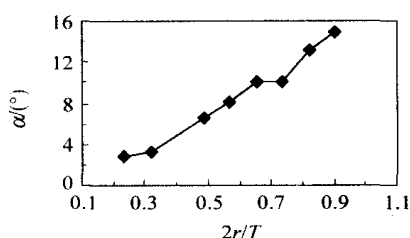


图 5(b) 槽底不同位置处临界离底悬浮液相速度方向

Fig. 5(b) Direction of just-suspension liquid velocity in different positions of the bottom region

2.1.2 搅拌转速(叶端速度)和槽底区液相速度的关系 在桨径 D 不变条件下,可用叶端线速度 V_{tip} ($V_{tip} = Dn$) 代替搅拌转速。由图 6 可以看出,当为纯液相体系时,测点 3 处液相速度和搅拌转速成正比关系,当固液悬浮体系时,测点 3 的液相速度和搅拌转速不成正比关系。对液相速度 V 和叶端速度 V_{tip} 曲线回归得 $V = (V_{tip})^{0.55}$,这主要是因为搅拌转速的变化对槽底区的固相体积分数影响较大,而固相体积分数的变化使液相速度的衰减幅度不同。

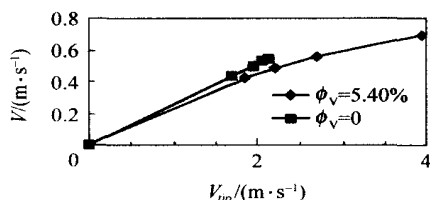


图 6 槽底液相速度和叶端线速度(搅拌转速)关系图

Fig. 6 Relations between liquid velocity and impeller speed in the bottom region

2.1.3 槽底液相速度分布 当搅拌转速为 356 r/min 时,平均固相体积分数为 5.4 % 的固液悬浮体系达到临界完全离底悬浮。由图 7(a) (b) (图中“ A ”表示固液悬浮体系状态,“ B ”为纯液相体系状态)可以看出,槽底液相速度随在槽底的位置不同而不同,在 $2r/T = 0.48$ 附近槽底液相速度最大。固体颗粒的存在,对液相速度有衰减作用,和纯液相相比,液相速度的衰减幅度达 10.3 %。各点液相速度方向和纯液相相比基本不变。

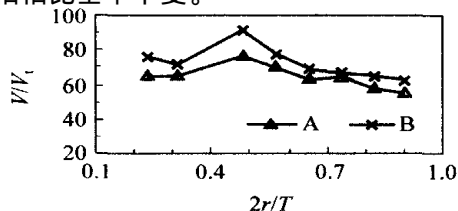


图 7(a) 槽底液相速度分布图

Fig. 7(a) Liquid velocity distribution in the bottom region

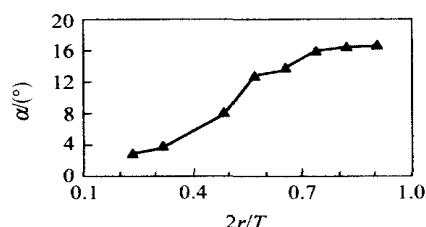


图 7(b) 槽底液相速度方向变化图

Fig. 7(b) Direction of liquid velocity in the bottom region

2.2 近壁上流区液相速度研究

2.2.1 均匀悬浮临界搅拌转速的确定 搅拌槽内均匀悬浮临界转速的确定采用固定点取样法。实验中在液面下固定点用玻璃管抽取一定量样本,经沉淀后测定样本中的颗粒体积,改变搅拌转速,当抽取样本的颗粒体积量不再随搅拌转速变化时,即认为此时已达到均匀悬浮,图 8 为平均固相体积分数 ϕ_v 为 5.4 % 时测点处颗粒实际固相体积分数 ϕ_v 随搅拌转速变化图,由图 8 中可以看出,达到均匀悬浮的临界转速为 380 r/min。

由此方法测定不同平均固相体积分数 ϕ_v 的均匀悬浮临界转速 n_c 如表 5 所示,对 n_c 和 ϕ_v 的曲线回归有 $n_c = \phi_v^{0.088}$ 关系。

表 5 不同平均固相体积分数下均匀悬浮临界转速一览表

Table 5 Just uniform suspension impeller speeds at different concentrations

ϕ_v / %	1.0	2.0	2.5	3.0	4.0	5.4
n_c / (r · min ⁻¹)	330	340	340	360	370	380

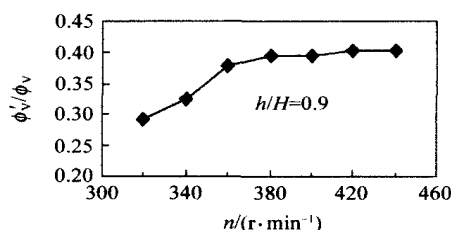


图 8 测量点体积分数与搅拌转速关系变化图

Fig. 8 Relations between concentration and impeller speed in tested point

2.2.2 搅拌转速(叶端速度)和近壁上流区液相速度的关系 由图 9 中可以看出,固液悬浮体系中,近壁上流区测点 10 的液相速度和搅拌转速成正比关系。纯液相体系在测点 10 液相速度和搅拌转速也为正比关系,但比值比固液悬浮体系大。

2.2.3 临界均匀悬浮时,平均固相体积分数对近壁

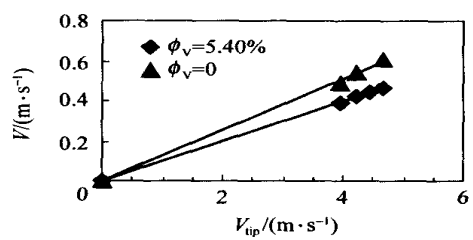


图 9 近壁上流区液相速度和叶端线速度(搅拌转速)关系图

Fig. 9 Relations between liquid-velocity and impeller speed in the up-flow wall region

上流区液相速度的影响 由表 6 可以看出,临界均匀悬浮时,随着平均固相体积分数从 1.0 %变化到 5.4 %,测点 10 处液相速度变化幅度范围在 3.6 %以内,随着平均固相体积分数的变化,液相速度基本不变。这主要是因为随着平均固相体积分数增加完全均匀悬浮临界转速增加,但同时颗粒之间的摩擦、碰撞的强度、次数增加,消耗的能量增大,在一定固相体积分数范围内(1 % ~ 5.4 %),近壁上流区的液相速度保持不变。

表 6 临界均匀悬浮时近壁上流区液相速度随浓度变化关系表

Table 6 Relations between liquid-velocity in the up-flow wall region and concentration for just uniform suspension

ϕ_v %	1.0	2.0	2.5	3.0	4.0	5.4
n_c (r·min ⁻¹)	310	340	340	350	370	380
V_c/V_t	56	52.7	54.5	54	53.1	54.1

2.2.4 悬浮高度处液相速度的影响因素 在固液悬浮时,液面附近有一层,该层内固相体积分数比下面液层浓度低得多,这主要是因为大部分固体颗粒向上运动达不到此层面高度就已经沉降,实验中将该层称为清液层。清液层最低位置离槽底高度称为悬浮高度。悬浮高度为固体颗粒向上运动达到的最大高度,在该高度处固体颗粒受力达到动态平衡。表 7 为不同条件下,使悬浮高度在测点 12 和 13 时

表 7 悬浮高度处液相速度一览表

Table 7 Liquid-velocity in the just pure-liquid layer

ϕ_v %	h/H	C/H	n (r·min ⁻¹)	V_q/V_t
5.4	0.57	0.333	152	12.5
5.4	0.96	0.333	300	12.7
5.4	0.96	0.25	341	14
10	0.96	0.333	324	14.2
15	0.333	0.333	370	14

悬浮液高度处的液相速度。由表 7 中可以看出,悬浮高度受搅拌转速、桨的离底高度等因素影响较大,但悬浮高度处液相速度 V_q 基本不变,和悬浮高度、桨的离底高度、固相体积分数等因素无关。

2.2.5 近壁上流区液相速度分布 近壁上流区的液相速度方向基本是垂直向上的,颗粒受到重力作用与颗粒的运动方向相反,而且颗粒与颗粒由于直接摩擦作用消耗了部分能量,所以颗粒在槽壁处的液相速度是随着离底高度的增加而越来越小的,在搅拌桨高度附近液相速度分布如图 10 所示,由图 10 中可以看出,转速为 356 r/min 时,在搅拌桨高度附近,固液悬浮体系液相速度比纯液相体系液相速度平均衰减幅度为 14.3 %,由此可见,固体颗粒的存在,对近壁上流区液相速度有衰减作用。由图 10 和 7 比较,在相同操作条件下,和纯液相相比,固体颗粒的加入对液相速度的衰减幅度近壁上流区比槽底区大。

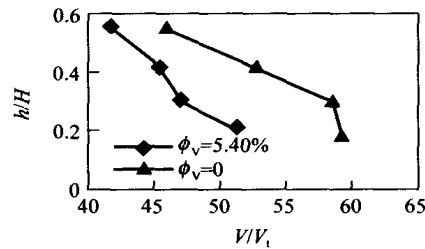


图 10 近壁上流区液相速度分布图

Fig. 10 Liquid-velocity distribution in the up-flow wall region

3 结论

(1) 在一定固相体积分数范围内(1 % ~ 5.4 %),颗粒离底悬浮所需最小液相速度只与颗粒的尺寸、密度等因素有关,而与固相体积分数、桨离底高度、桨的尺寸、桨型、在槽底的位置等无关。用低剪切型桨有利于固体颗粒的离底悬浮。

(2) 颗粒悬浮高度受搅拌转速、桨的离底高度等因素影响较大,但悬浮高度处的液相速度和悬浮高度、桨的离底高度、固相体积分数等因素无关。

(3) 在一定范围内(1 % ~ 5.4 %),临界均匀悬浮时近壁上流区液相速度和固相体积分数无关。

(4) 在纯液相体系中,槽底和近壁上流区液相速度都和搅拌转速成正比。在固液悬浮体系中,槽底的液相速度和搅拌转速不成正比关系,近壁上流区的液相速度和搅拌转速成正比关系。

符 号 说 明

——槽底液相速度方向, (°)
 n_{js}^* ——定点离底悬浮临界转速, $r \cdot \min^{-1}$
 C ——搅拌桨离底距离, mm
 ——固液相密度差, $kg \cdot m^{-3}$
 ϕ_v ——全槽平均固相体积分数
 P_{js}^* ——定点离底悬浮搅拌功率, W
 ϕ_v ——测点处实际固相体积分数
 r ——径向位置, mm
 d^* ——两对电导电极间距, mm
 T ——搅拌槽直径, mm
 d_p ——颗粒尺寸, μm
 D ——搅拌桨直径, mm
 h ——测量点离底距离, mm
 V_{js}^* ——定点离底悬浮临界转速下的液相速度, $m \cdot s^{-1}$
 H ——搅拌槽内液体的高度, mm
 V_c ——临界均匀悬浮近壁上流区液相速度, $m \cdot s^{-1}$
 V_q ——悬浮高度处液相速度, $m \cdot s^{-1}$
 n ——搅拌转速, $r \cdot \min^{-1}$
 W_b ——挡板宽度, mm

V_t ——单个粒子的沉降速度, $m \cdot s^{-1}$

n_c ——均匀悬浮临界搅拌转速, $r \cdot \min^{-1}$

参 考 文 献

- [1] Geisler R K, Mersmann A B. Local velocity distribution and power dissipation rate of suspensions in stirred vessels [C]. Proceedings of the 6th European Conference on Mixing. England: BHRA, 1988, 267 - 272
- [2] Nouri J M, Whitelaw J H. Particle velocity characteristics of dilute to moderately dense suspension flows in stirred reactors[J]. Int J Multiphase Flow, 1992, 18:21 - 33
- [3] 包雨云, 黄雄斌, 施力田, 王英琛. 搅拌槽内固体颗粒对液相速度影响的研究[J]. 化学工程, 2000, 30(5): 29 - 34
- [4] 包雨云. 固液搅拌槽中液相速度测量技术开发及搅拌装置在水处理过程中的应用研究[D]. [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1995
- [5] 钟 丽. 搅拌槽内固液悬浮的数值模拟[D]. [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2003

Determination of liquid velocity near wall region in a solid-liquid stirred tank

LI Liang-chao ZHANG Zhong-min HUANG Xiong-bin

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Experiment was carried out in a cylindrical plexiglass tank of 476 mm diameter with a solid-liquid system. A new type of bi-electrode probe was used to measure the liquid-velocity near the wall region of the tank with solid volumetric concentration(ϕ_v) from 1.0 % to 5.4 %. The result show that the minimum liquid-velocity in the just-suspension region was influenced by the properties of the solid and liquid, such as the density of the solid and liquid, the diameter of the solid, and not by the operation conditions. The relations between the impeller speed and the liquid velocity are different in the bottom region and the up-flow wall region. The liquid-velocity in the up-flow wall region is not influenced by the solid concentration for just uniform-suspension and the liquid-velocity in just pure-liquid layer are not influenced by the operational condition, etc.

Key words: stirred tank; near wall region; liquid-velocity; solid suspension

(责任编辑 云志学)