

研究论文

一种计算搅拌槽混合时间的新方法

张庆华¹, 毛在砂¹, 杨超¹, 王正²

(¹ 中国科学院过程工程研究所, 北京 100080;

² 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266071)

摘要: 基于对混合时间定义的思考, 提出了一种新的定义方法, 在湍流流场数值计算的基础上通过求解示踪剂的浓度输运方程, 研究了单层涡轮桨搅拌槽内的混合过程。结果表明: 搅拌转速和搅拌桨安装位置都影响混合时间的大小, 而进料位置对混合时间的影响不大。对于不同的搅拌转速而言, 随搅拌转速的增大, 相同体积分数对应的混合时间逐渐减小。当搅拌桨安装在槽中间位置时所对应的混合时间最小。利用适宜的尺寸和安装位置的导流筒可有效降低混合时间。

关键词: 混合时间; 计算流体力学; 搅拌槽; Rushton 桨

中图分类号: TQ 022

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 08-1891-06

A new method for determining mixing time in stirred tanks

ZHANG Qinghua¹, MAO Zaisha¹, YANG Chao¹, WANG Zheng²

(¹ Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

² SINOPEC Safety Engineering Institute, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: A new definition of mixing time was proposed based on the fraction of well-mixed volume. The mixing process in the stirred tank with a single Rushton turbine was examined by solving the transport equation of the tracer based on the numerical simulation of the whole flow field. It was shown that the value of mixing time was dependent on the speed and position of impeller. Mixing time decreased with the increase of impeller speed at the same volume concentration. When the impeller was in the center of the tank, the mixing time was the shortest. The draft tube with proper dimension and position could effectively decrease mixing time.

Key words: mixing time; computational fluid dynamics (CFD); stirred tank; Rushton impeller

引 言

搅拌槽由于其相际接触面积大, 传热传质效率高, 操作弹性大, 使用范围广, 操作稳定等优点而广泛应用于石油、化工、医药、食品、能源、造纸、废水处理等领域。其中, 混合时间是表征搅拌

槽内流体混合状况的一个重要参数, 是评定搅拌器效率的重要参数, 也是搅拌槽设计和放大的重要依据之一。混合时间一般是通过实验来测量, 并总结为经验关联式。但不同的实验测量方法都存在各自的缺点^[1]。示踪剂的进料位置和检测位置的选择都会影响混合时间的数值大小。随着计算机技术的发

2006-09-28 收到初稿, 2007-04-19 收到修改稿。

联系人: 毛在砂。第一作者: 张庆华 (1980—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20236050, 20306028, 20576133); 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217604)。

Received date: 2006-09-28.

Corresponding author: Prof. MAO Zaisha. E-mail: zsmao@home.ipe.ac.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20236050, 20306028, 20576133) and the National Basic Research Program of China (2004CB217604).

展, 利用计算流体力学 (CFD) 技术来计算混合时间也逐渐成为可能。利用 CFD 方法可以节省实验研究的费用, 还可以方便地获得实验手段不容易得到的搅拌槽内局部信息, 为新型、高效反应器的开发提供了一条新途径。20 多年来利用 CFD 技术计算混合时间已经取得了很大的进展^[2-8]。但以往的混合时间的计算都是选择几个代表性的监测点来确定混合时间, 这样的定义存在一定的主观性, 不能很好地表征搅拌槽内整体的混合状况。

基于对混合时间定义的思考, 本文提出了一种新的定义方法, 即体积分数法来表征搅拌槽内整体的混合状况, 将混合时间定义为示踪实验中达到最终平均浓度 (偏差 5% 以内) 的流场体积达到一定体积分数所需的时间。在湍流流场数值计算的基础上, 求解示踪实验的溶质对流-扩散方程, 得到了搅拌槽中示踪剂浓度达到混合均匀标准的体积分数随时间的变化, 从而得到了混合时间的数值。本文主要考察了不同进料位置、不同转速和搅拌桨安装位置以及导流筒对混合时间的影响。

1 搅拌槽结构

搅拌槽结构如图 1 所示。槽径 $D=0.54\text{ m}$ 的圆柱体^[3], 均匀分布 4 块挡板, 挡板宽为 $T/10$, 搅拌桨为六叶标准 Rushton 涡轮桨, 搅拌桨直径 $D=T/3$, 工作介质为水。在搅拌转速为 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 叶端速度 $U_{\text{tip}}=2.83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以搅拌桨直径为基准的 $Re=2.43\times 10^5$ 。P1、P2、P3、P4 为加料点位置, A、B 为监测点, 具体位置如图 1 和表 1 所示。

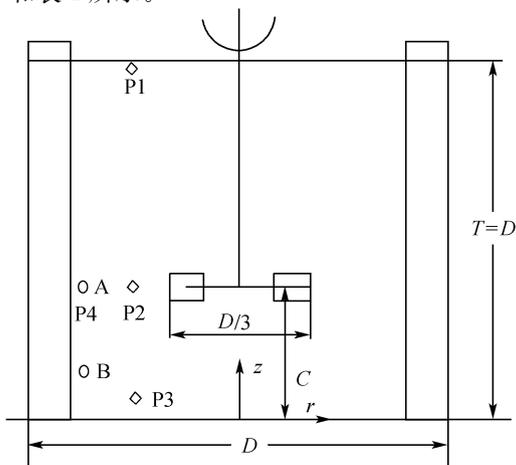


图 1 搅拌槽结构
Fig. 1 Sketch of stirred tank

表 1 进料点和监测点位置

Table 1 Position of injection points and detectors

Position	r/m	$\theta/(\text{°})$	z/m
P1	0.15	45	0.534
P2	0.15	45	0.180
P3	0.15	45	0.060
P4	0.225	45	0.180
A	0.225	45	0.180
B	0.225	45	0.090

2 数学模型

搅拌槽中的流动假定为充分发展的湍流, 湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 模型, 所有变量 (如 u, v, w, k, ϵ, c 等) 的输运方程的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho ur\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\Gamma_{\phi, \text{eff}}}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S$$

对于浓度扩散方程, $\Gamma_{c, \text{eff}}$ 为有效湍流扩散系数, $\Gamma_{c, \text{eff}} = \mu_{\text{eff}}/Sc$ 。Sc 为 Schmidt 数, 取值为 0.7; μ_{eff} 为有效湍流黏度, 来自流场计算得到的结果。整个搅拌槽计算域划分为 $72 \times 96 \times 90$ ($r \times \theta \times z$) 的网格。

首先计算动量方程和湍流方程得到速度场, 然后将速度场数据代入浓度输运方程进行计算得到示踪剂的浓度, 最后计算示踪剂浓度为最终混合均匀时浓度的体积分数随时间的变化。示踪剂初始浓度都设为 0, 在 $t=0$ 时进料点位置对应的网格内浓度设为 1。浓度计算方法参见文献 [9]。

3 结果与讨论

3.1 搅拌槽内不同时刻示踪剂浓度分布图

图 2 所示是搅拌转速为 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、搅拌桨安装位置为 $T/3$ 、进料点为 P3 时的两挡板中间不同时刻示踪剂浓度分布的垂直剖面图, 由此可以直接观察到示踪剂的分散过程。示踪剂分散受到速度场的明显影响而呈现断续不规则性。

3.2 典型的混合时间定义和新定义

混合时间定义, 是指两种完全互溶、但其物理和化学性质 (如电导率、颜色、温度、折光率等) 有差异的流体通过搅拌使之达到规定混合程度所需要的时间。习惯上采用 95% 规则, 即当监测点示踪剂浓度达到最终稳定浓度值的 $\pm 5\%$ 以内并不再超出时, 该时刻即为混合时间。本文混合时间的

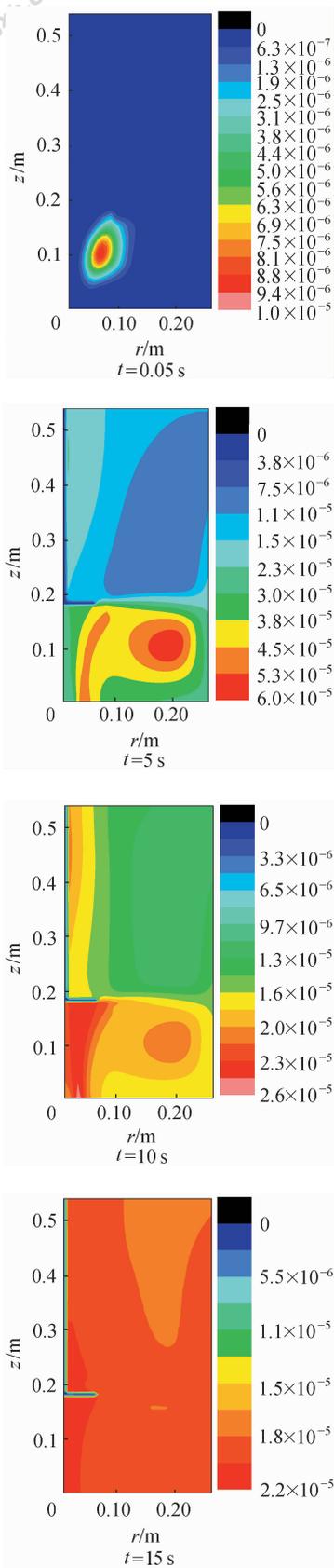


图 2 不同时刻搅拌槽内示踪剂浓度分布图

Fig. 2 Concentration distribution of tracer at different time

定义是指示踪实验中达到最终平均浓度（偏差 5% 以内）的流场体积达到一定体积分数（ V ）所需的时间。为了考察本文混合时间定义的适用性，在同一进料位置处与传统混合时间定义计算得到的混合时间进行了比较，结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出，对于同一进料点 P1 而言，不同的监测点得到的传统定义的混合时间不同，在监测点 A 处的混合时间为 14.75 s，而在监测点 B 处的混合时间为 20 s，二者相差很大，表现出选择监测点的主观性的影响。而用体积分数来定义混合时间时所得到的结果就避免了这样的主观性，能够更客观地表征搅拌槽内整体的混合状况。若认为当体积分数达到 90% 时，体系已混合均匀，此时的混合时间为 23.8 s，要比用典型的混合时间定义得到的混合时间长。

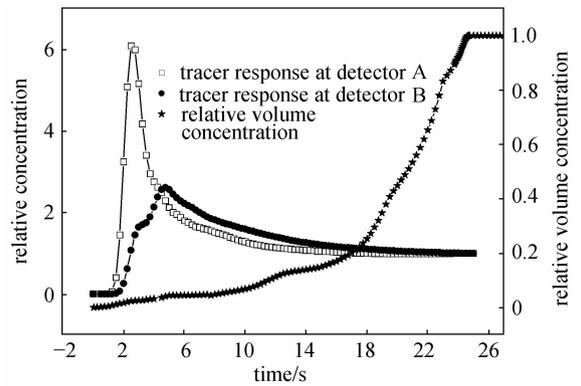


图 3 进料位置为 P1 时不同监测点浓度和体积分数比较 ($N=250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 3 Comparison between different detectors and volume concentrations at injection P1 ($N=250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

将本文计算的混合时间与文献 [3] 中实验测量的混合时间进行比较，结果如表 2 所示。其中，1a、2a、3a、4a 为不同的监测点，具体位置见文献 [3]。

由表 2 可以看出，当体积分数为 10% 时，文献中实验测量的量纲 1 混合时间与本文计算的数值很接近。文献 [3] 中实验测量所取的监测点大都是湍流强度较大的位置，所对应的量纲 1 混合时间较小，而且不同的监测点所对应的量纲 1 混合时间不同。若所取的监测点处在湍流强度较小的位置时，则混合时间就会增大。本文所定义的混合时间考察了整个搅拌槽内的混合状况，所以更接近于实际。

表 2 本文计算的量纲 1 混合时间与文献[3]中实验数据比较

Table 2 Comparison of predicted dimensionless mixing time with experimental data in Ref. [3]

Impeller speed /r · min ⁻¹	V/% (in this work)										Experiment			
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	1a	2a	3a	4a
200	47.1	70.5	77.8	82.7	83.9	84.2	85	86.1	86.8	89.2	52	55	55	48

3.3 搅拌转速的影响

搅拌转速是影响混合时间的一个重要参数。Rao 等^[10]和 Brennan 等^[11]考察了搅拌转速对混合时间的影响,结果表明,随搅拌转速的增大,混合时间逐渐减小。本文也考察了搅拌转速对混合时间的影响,结果如图 4 所示。从图中可以看出,随搅拌转速的增大,相同的体积分数所对应的混合时间是逐渐减小的。这是因为随搅拌转速的增大,湍流强度逐渐增强,物料循环速率加快,从而缩短了物料达到混合均匀的时间。

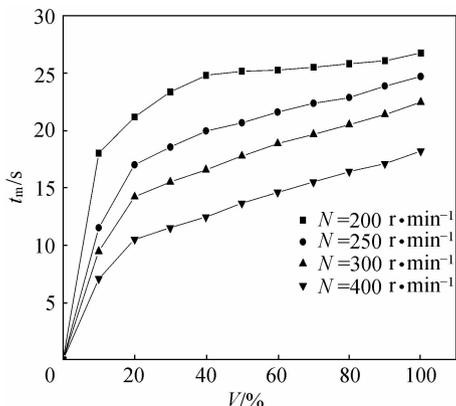


图 4 搅拌转速对混合时间的影响

Fig. 4 Effect of impeller speed on mixing time

3.4 进料位置的影响

进料位置的不同有可能影响混合时间的大小,因此需要考察进料位置对混合时间的影响。Lunden 等^[3]考察了进料位置对混合时间的影响,结果发现进料位置对混合时间的影响不大。Mayr 等^[12]通过研究发现,不同的进料位置条件下不同监测点的浓度响应曲线的形式是不一样的。而 Bujalski 等^[13]和周国忠等^[14]也考察了进料位置对混合时间的影响,发现进料位置显著影响混合时间的大小。本文考察了 4 个进料位置对混合时间的影响,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,进料位置对新定义的混合时间影响不大。

3.5 搅拌桨安装高度的影响

搅拌桨的位置也是影响混合时间的一个重要参数。Rao 等^[10]和 Shuie 等^[15]研究了涡轮桨的安装

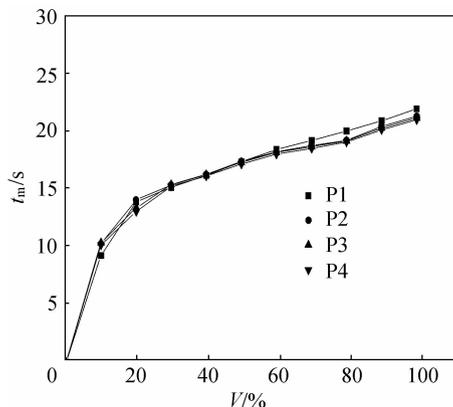


图 5 进料位置对混合时间的影响

Fig. 5 Effect of feed position on mixing time

位置对混合时间的影响发现,当桨的位置由 $T/3$ 变化至 $T/6$ 时,混合时间逐渐减小。本文考察了搅拌桨位置为 $C=T/6, T/3, T/2$ 三种情况下的混合时间,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,对于任一体积分数,当桨位置为 $T/2$ 时,混合时间最小,这与 Brennan 等^[11]和 Rewatkar 等^[16]的结论是相一致的。当桨位置由 $T/3$ 变化至 $T/6$ 时,达到同一体积分数的时间随桨安装高度的降低而减小。Rao 等^[10]认为这主要是由于随桨安装高度的降低,在桨上方区域的流体流动路径长度和流率都增大,而桨下方区域的路径长度和流率则都减小。由于桨盘的吸引作用,在桨上下两侧的循环速度都增大,从而降低了循环时间。在桨上方区域流动的增强相对于循环长度的增大要强,综合考虑流率和循环长度,循环时间减小,从而混合时间降低。

3.6 导流筒的影响

导流筒可以使叶轮排出的液体在筒内和筒外形成有规则的循环流。应用导流筒可以改善搅拌槽内的流体流动,获得比较高的液体循环速度。本文研究了导流筒不同大小和不同安装位置对混合时间的影响,结果如图 7 所示。导流筒具体尺寸和位置如表 3 所示。由图 7 可以看出当体积分数在 $0 \sim 80\%$ 范围内变化时,导流筒的加入可以有效地减少混合时间;当导流筒的大小一定时,提高桨与导流筒之间的间距导致混合时间增加,这是由于在导流筒两

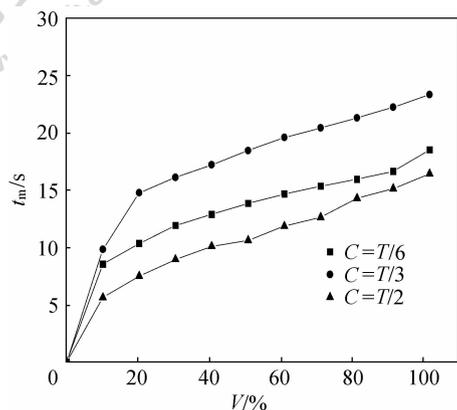


图 6 搅拌桨安装高度对混合时间的影响

Fig. 6 Effect of impeller clearance on mixing time

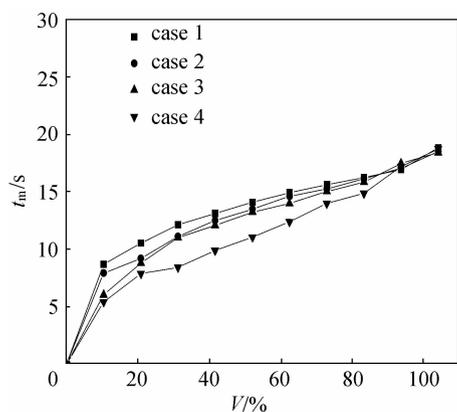


图 7 导流筒对混合时间的影响

Fig. 7 Effect of draft tube on mixing time

表 3 导流筒几何尺寸

Table 3 Geometric dimensions of draft tube

Case No.	C	d_t	C_t/T	H_t/T
1	T/6	—	—	—
2	T/6	0.55T	0.44	0.44
3	T/6	0.55T	0.28	0.44
4	T/6	0.72T	0.44	0.44

管间形成了死区。这与文献 [17] 得到的结论是一致的。而当导流筒位置相同时，直径较大的导流筒所对应的混合时间较小。

4 结 论

本文利用体积分数来定义混合时间，用 CFD 方法研究了单层 Rushton 涡轮桨搅拌槽内的混合过程，考察了搅拌转速、进料位置和桨安装高度对混合时间的影响。通过研究发现搅拌转速和搅拌桨安装位置都影响混合时间的大小，而进料位置对混合时间的影响不大。对于不同的搅拌转速而言，随

搅拌转速的增大，相同体积分数对应的混合时间逐渐减小；当搅拌桨安装在槽中间位置时所对应的混合时间最小；适宜的尺寸大小和安装位置的导流筒可有效降低混合时间。虽然本文所计算结果的准确性需要用实验进一步验证，但其相对值的规律性与大多数文献是一致的，因此是可取的定义方法。本文所定义的混合时间考察了整个搅拌槽内的混合状况，有更接近于实际混合状况的优点。

符 号 说 明

- C——桨叶离槽底距离，m
- C_t ——导流筒底面与槽底的距离，m
- c——浓度， $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- D——搅拌桨直径，m
- d_t ——导流筒直径，m
- H——槽内液位高度，m
- H_t ——导流筒的长度，m
- k——湍流动能， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- S——源项
- r——径向坐标，m
- T——搅拌槽直径，m
- t_m ——混合时间，s
- u——径向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- V——体积分数，%
- v——切向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- w——轴向速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- z——轴向坐标，m
- θ ——切向坐标，rad
- ϵ ——湍流耗散率， $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}$
- ϕ ——通用变量
- Γ_{eff} ——湍流黏度， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

References

- [1] Nere N K, Patwardhan A W, Joshi J B. Liquid-phase mixing in stirred vessels: turbulent flow regime. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, **42**: 2661-2698
- [2] Ranade V V, Bourne J R, Joshi J B. Fluid mechanics and blending in agitated tanks. *Chem. Eng. Sci.*, 1991, **46**: 1883-1893
- [3] Lunden M, Stenberg O, Andersson B. Evaluation of a method for measuring mixing time using numerical simulation and experimental data. *Chem. Eng. Commun.*, 1995, **139**: 115-136
- [4] Patwardhan A W, Joshi J B. Relation between flow pattern and blending in stirred tanks. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, **38**: 3131-3143
- [5] Sahu A K, Kumar P, Patwardhan A W, Joshi J B. CFD

- modelling and mixing in stirred tanks. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**: 2285-2293
- [6] Bujalski J M, Jaworski Z, Bujalski W, Nienow A W. The influence of the addition position of a tracer on CFD simulated mixing times in a vessel agitated by a Rushton turbine. *Trans. IChemE.*, 2002, **80**: 824-831
- [7] Bujalski W, Jaworski Z, Nienow A W. CFD study of homogenization with dual Rushton turbine—comparison with experimental results (II): The multiple reference frame. *Trans. IChemE.*, 2002, **80**: 97-103
- [8] Min Jian, Gao Zhengming. Large eddy simulations of mixing time in a stirred tank. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2005, **14**: 1-7
- [9] Wang Zheng (王正), Mao Zaisha (毛在砂), Shen Xiangqian (沈湘黔). Numerical simulation of macroscopic mixing in a Rushton impeller stirred tank. *Chinese Journal of Process Engineering (过程工程学报)*, 2006, **6** (6): 857-863
- [10] Raghava Rao K S M S, Joshi J B. Liquid phase mixing in mechanically agitated reactors. *Chem. Eng. Commun.*, 1988, **74**: 1-25
- [11] Brennan D J, Lehrer I H. Impeller mixing in vessels: experimental studies on the influence of some parameters and formulation of a general mixing time equation. *Trans. IChemE.*, 1976, **54**: 139-152
- [12] Mayr B, Horvat P, Nagy E, Moser A. Mixing-models applied to industrial batch bioreactors. *Bioprocess Eng.*, 1993, **9**: 1-12
- [13] Bujalski J M, Jaworski Z, Bujalski W, Nienow A W. The influence of the addition position of a tracer on CFD simulated mixing times in a vessel agitated by a Rushton turbine. *Trans. IChemE.*, 2002, **80**: 824-831
- [14] Zhou Guozhong (周国忠), Wang Yingchen (王英琛), Shi Litian (施力田). CFD study of mixing process in stirred tank. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2003, **54**: 886-890
- [15] Shuie S J, Wong C W. Studies on homogenization efficiency of agitators in liquid blending. *Can. J. Chem. Eng.*, 1984, **62**: 602-609
- [16] Rewatkar V B, Joshi J B. Effect of impeller design on liquid phase mixing in mechanical agitated reactors. *Chem. Eng. Commun.*, 1991, **91**: 322
- [17] Hoogendoorn C J, Hartog A P. Model studies on mixers in the viscous flow region. *Chem. Eng. Sci.*, 1967, **22**: 1689-1699