

研究论文

搅拌槽内三维流场的数值模拟

马青山 聂毅强 包雨云 王英琛 施力田

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要 应用商业计算流体力学软件 CFX 对搅拌槽内的流场进行了模拟, 并与 PIV 测试结果进行了比较, 流型吻合良好。速度分量的对比结果表明不同情况与各种模型的吻合情况不尽相同, 标准 $k-\epsilon$ 双方程模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和代数应力模型在主流域内都能较准确地模拟搅拌槽内的流动场。

关键词 搅拌槽 流场测量 PIV 数值模拟 湍流模型

中图分类号 TQ 018

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2003) 05-0612-07

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMICS IN STIRRED TANK

MA Qingshan, NIE Yiqiang, BAO Yuyun, WANG Yingchen and SHI Litian

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

Abstract Stirred mixing vessels are widely used in chemical industry for processes involving the mixing or/and chemical reactions of liquids, gases or solids. The ability to numerically simulate the whole flow field is vital to optimal design. Previous attempts have adopted a steady-state semi-empirical analysis requiring experimentally-based inputs of some form. In the present work, the CFD code CFX-4 is used for the full field computation for both the fluid within the impeller passages and the fluid outside. The model solves the unsteady ensemble-averaged continuity and momentum equations (Reynolds equations) with turbulence effects accounted for by $k-\epsilon$ model, RNG $k-\epsilon$ model, and algebraic stress model. The equations are discretised by the finite-volume approach. The mesh is divided into two parts which are fixed to their respective frames of reference, one being stationary and the other rotating with the impeller. At the interface between these two parts the rotating mesh slides over the fixed one at each time interval. The computation proceeds simultaneously over the whole flow field and the solutions in both rotating and stationary domains are coupled at all times. Comparisons between the predictions and the experimental data measured by particle imaging velocimetry (PIV) show that all the major flow patterns are well reproduced. The quantitative comparisons show encouraging agreement.

Keywords stirred tank, flow field measurement, PIV, numerical simulation, turbulent model

引 言

搅拌设备在化工、冶金、能源及环境等行业中广泛应用, 如何准确地描述和模拟搅拌槽内的混合

过程及流动状况, 为混合设备的设计优化和放大提供理论指导, 是混合技术的一个重要发展方向。以往的数值模拟方法多采用实验与模拟相结合的方法^[1,2], 例如黑箱模型需要输入实验测量数据作为

2002-01-08 收到初稿, 2002-04-08 收到修改稿。

联系人及第一作者: 马青山, 男, 32 岁, 博士, 高级工程师, 现在北京化工研究院聚烯烃国家工程研究中心 (北京 100013)。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 29976002)。

Received date: 2002-01-08.

Corresponding author: Dr. MA Qingshan. E-mail: maqingshan@brici.ac.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 29976002).

边界条件，这些模拟方法并不考虑搅拌桨几何形状对流场的影响，而是将包括搅拌桨在内的区域作为黑箱^[3]，不对其进行模拟，而将这一区域边缘的速度作为边界条件对其外部流场进行模拟，这些边缘的速度一般通过 LDV 或 PIV 测得。这些测量手段一般比较昂贵，测量费用也较高，并且使用范围也受到极大的限制，所以对于通过这些模拟方法进行搅拌槽放大并无太大的实际意义。本文采用滑移网格法对全流场进行模拟，无需输入实验测量结果，初始条件和边界条件即搅拌桨的转速和几何形状、几何条件由 CAD 给出，表面做无滑移处理，网格采用贴体的结构化网格。该方法可同时对搅拌桨内部和外部进行模拟，并同时考虑由于搅拌桨与挡板的相对运动所引起的流场周期性变化，并可根据要求输出瞬时流场或时均流场。

1 实验部分

1.1 实验原理

PIV 光路系统如图 1 所示，光源为脉冲光源，两个（或多个）脉冲之间的时间间隔可以调节，并可根据被测速度进行选择。示踪粒子采用 150~154 μm 的球形树脂颗粒，其密度为 1045 kg·m⁻³。为使示踪粒子成像清晰，在其表面喷涂了荧光漆（荧光红）以增加其散射光线的强度。记录系统为 Nikon Coolpix 950 型数码相机。PIV 的基本原理是测量图像的位移 Δx 和 Δy，如图 2 所示。位移必须足够小，也就是说轨迹必须接近于直线并且沿着轨迹的速度应该近似恒定，这些条件可以由调节 Δt 来达到。

1.2 实验装置

搅拌槽为圆柱形平底有机玻璃槽，槽径 500 mm，高 600 mm，4 块挡板均匀分布，挡板宽度与

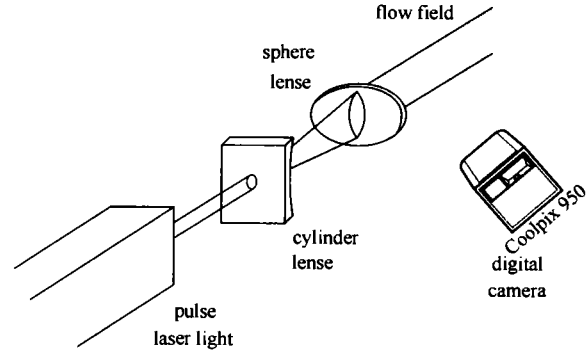


Fig. 1 Schematic diagram of PIV

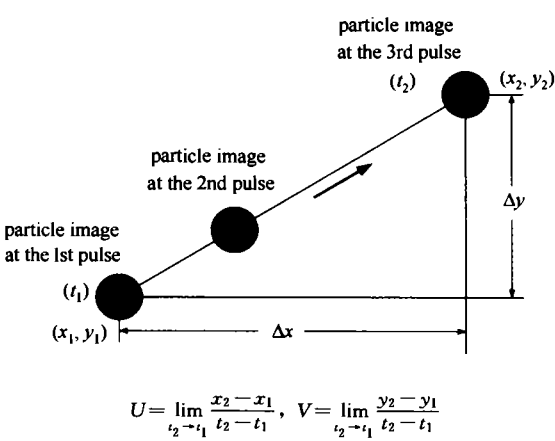


Fig. 2 Measurement principle of PIV

槽径之比为 $W_b/T=0.05$ ，挡板距槽壁 5 mm。为消除搅拌槽壁圆柱表面对光线的折射效应，搅拌槽外安装 1/4 方形槽。搅拌桨离底距离为 100 mm，液位高度 $H=400$ mm。

搅拌桨采用工业上应用较广泛的四叶 PBT 桨和双叶 CBY 桨，桨型参数和简图见表 1 和图 3。

Table 1 Parameters of agitators					
Agitator	<i>b</i> /mm	<i>D</i> /mm	<i>D</i> · <i>T</i> ⁻¹	θ/(°)	<i>n</i> _b
PBT	59	300	0.6	45	4
CBY	21	300	0.6	12~30	2

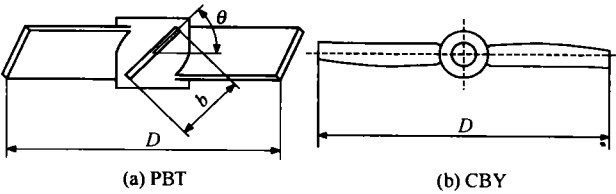
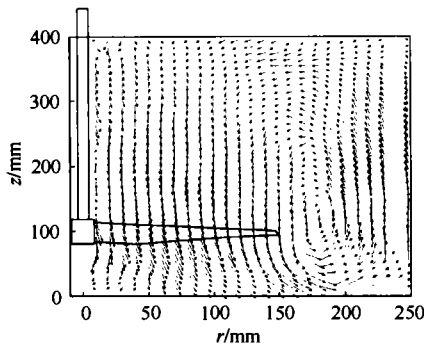


Fig. 3 Experimental agitators

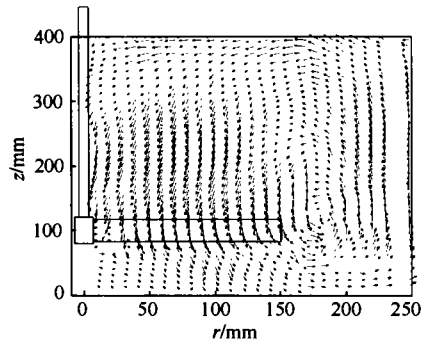
2 流场测量

研究测量了相同功率下的 CBY 与 PBT 两种桨型的流场，CBY 搅拌桨转速为 165 r·min⁻¹ ($Re=2.5 \times 10^5$)，PBT 桨转速为 60 r·min⁻¹ ($Re=9 \times 10^4$)，测量结果如图 4 所示。可以看出，相同输入功率下 CBY 与 PBT 桨流场均以轴向流动为主，都可产生较好的轴向循环，循环中心大致位于叶轮端部，但 CBY 桨流场轴流区域较大，能形成较稳定的全流场轴向循环，PBT 桨的流场则有较明显的径向流。

CBY 桨与 PBT 桨相比，叶轮区轴向速度稍大。CBY 桨的流场表现出规则的全流场轴向循环，在靠近液面区域流速仍较大；PBT 桨整体流型较



(a) CBY ($N=165\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)



(b) PBT ($N=60\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 4 Vector plot of mean velocity in R-Z plane measured by PIV

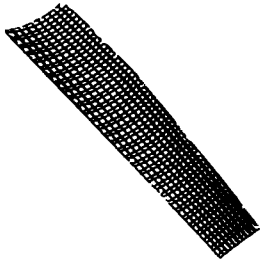
紊乱，不利于全流场的轴向循环。图 4 中空白处表示此处可测量数据较少或测量不到数据。由于搅拌桨叶轮的遮挡，一般在叶轮区示踪粒子图像较少。CBY 桨桨叶较窄，且为 2 叶，叶轮区内粒子像较多；而 PBT 桨叶较宽且为 4 叶，叶轮区尤其是桨叶根部取到的数据很少。

3 数值模拟结果

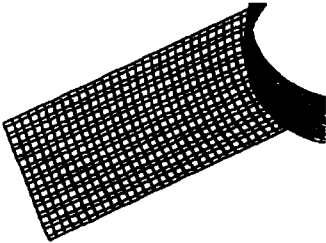
3.1 模拟策略

应用 CFX-4 软件，分别采用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和代数应力 (AS) 模型对各桨型进行了模拟。CBY 桨网格分布为 $38 \times 54 \times 60$ ($r \times \theta \times z$)，共 120288 个网格，叶片表面的网格分布为 30×10 。PBT 桨网格形式将桨叶附近的网格加密，采用了 $50 \times 70 \times 60$ ($r \times \theta \times z$) 的网格分布，共有 191904 个网格，叶片表面的网格是 30×10 。桨叶表面网格划分如图 5 所示。

计算方法采用滑移网格法^[4]，如图 6 所示。这种方法将计算域分为两部分，一部分包含了运动的叶轮，另一部分包含静止的槽体与挡板。两部分网



(a) CBY



(b) PBT

Fig. 5 Surface mesh of agitator blades

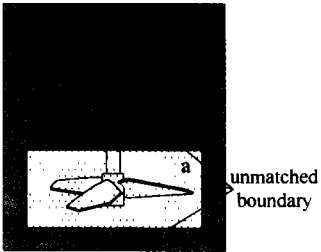
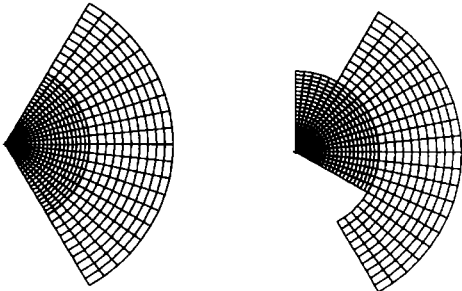


Fig. 6 Schematic diagram of sliding mesh method
a—rotating part; b—fixed part



(a) meshes at starting time (b) meshes after several iteration

Fig. 7 Illustration of rotation of sliding mesh

格彼此独立，内部网格随搅拌桨一起转动，外部网格静止，如图 7 所示。在 CFX-4 中划移网格是通过定义非匹配边界来实现的，两部分网格之间通过滑移界面进行插值处理。

求解方程采用控制容积法，压力-速度的耦合采用 SIMPLEC 算法，对流项的离散使用混合-上迎风差分格式。由于滑移网格法计算的是瞬态结

果，为了能与稳态的实验结果比较，对计算结果进行了平均处理。

3.2 数值模拟结果与分析

3.2.1 宏观速度场 图 8 为 CBY 搅拌桨转速为 $165\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同湍流模型模拟所得的平均速度场，所取平面为两挡板间 $r-z$ 平面。3 种模拟结果整体流型没有太大差别，在搅拌桨至液面间形成一大循环，对于 CBY 桨大循环范围很大，涡心从搅拌桨叶端一直到距液面约 $1/3T$ 处，所以即使在液面附近流速仍非常大，这种流型对于固-液悬浮等操作非常有利。在搅拌桨下方还有一小循环，可以看出小循环流体速度也较大。这些特点与 PIV 测得的结果基本相同，只是 PIV 测得的结果小漩涡不很清晰。

图 9 为 PBT 桨转速为 $60\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同湍流模型模拟所得的结果，3 种结果流型也大致相同。对于 PBT 桨，大循环的范围明显较 CBY 桨小，涡

心仅在桨叶末端偏上非常集中的区域，在靠近液面的位置流速变得非常小，也就是说搅拌桨输入的能量大多耗散在搅拌桨附近，而远离搅拌桨的区域没有得到很好的混合。

通过比较不同湍流模型模拟结果可以发现，代数应力模型所得的结果在搅拌桨附近比另外两个模型所得的矢量大，而在远离桨叶的区域较另外两种模型小，详细讨论将在速度分布部分进行。

3.2.2 速度分布 通过比较数值模拟与实验测量所得到的流型图可较直观地看出计算结果与模拟结果是否相符，也可得到流型空间结构方面的信息。但要定量地比较某特定区域数值模拟与实验测量各分速度大小的关系，则需将数值模拟量化结果与实验测量结果进行比较。本研究将详细讨论两挡板间与轴平行的一条线上以及两挡板间与液面平行的两条线上各速度分量，其具体位置如图 10 所示。

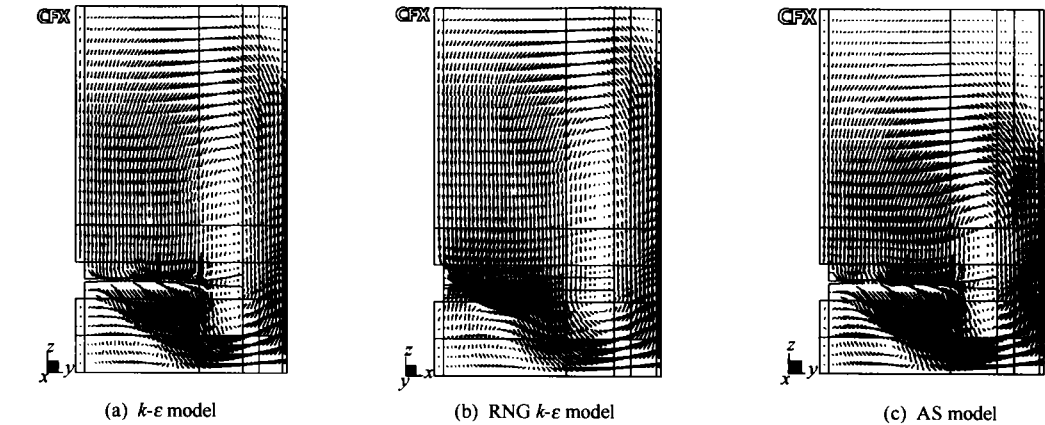


Fig. 8 Simulation results of CBY agitator predicted by various model

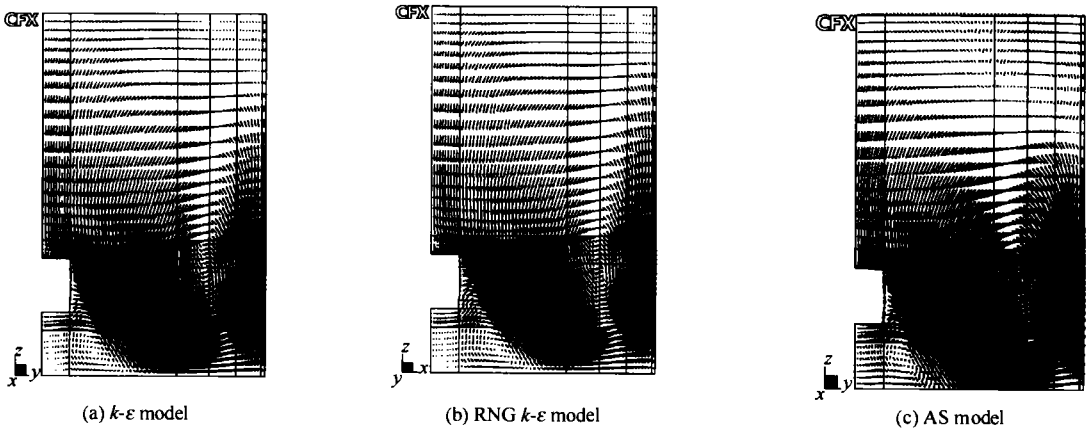


Fig. 9 Simulation results of PBT agitator predicted by various model

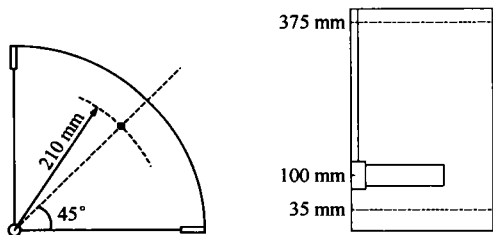


Fig. 10 Schematic diagram of analyzed lines

本研究约定：径向速度由槽心指向槽壁方向为正，反之为负；轴向速度与重力加速度方向相反为正，反之为负。

(1) 径向速度分布

图 11 为 CBY 桨径向速度数值模拟结果与实验结果的比较。其中图 11(a) 为两挡板间平行于搅拌轴的线上的情况，由图可见数值模拟与实验结果趋势大致相同，在离底约 20 mm 处 U_r 达到最大值，但测试结果明显要比模拟结果小。从 $z=20$ mm 到 $z=0$ ，模拟结果急剧减小至 0，而本实验很难测到近壁的数据。对于最小值，3 种模型模拟结果不同： $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型在 $z=330$ mm 处达到最低点，也就是说在液面下 70 mm 处流场向下返转；而代数应力模型在 $z=240$ mm 处达到最小值，在 $z=330\sim 400$ mm 范围内 U_r 基本为 0，这说明代数应力模型所得的流场比其他两种模型所得的流场搅拌桨的影响区域要小。实验结果在 $z=80\sim 280$ mm 范围内与 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型吻合很好，而在 $z=280\sim 400$ mm 范围内与各种模型吻合都不是很好，实验结果一直变化较小，这可能与粒子的跟随性有关。

图 11(b) 和图 11(c) 为平行于液面的两条线上的情况。在 $z=35$ mm 处，3 种模型模拟结果基本相同，实验结果趋势与模拟结果也基本相符，但数值相差较大。在 $z=375$ mm 处，3 种模型模拟结果相差较大，其中代数应力模型 U_r 绝对值很小，非常接近于 0，即前面提到的代数应力模型所得的流场搅拌桨的影响区域较小所致；实验结果与 $k-\epsilon$ 模型吻合较好。

图 12 为 PBT 桨径向速度模拟结果与实验结果的比较。图 12(a) 仍为平行于搅拌轴的线上的数据，在最大值处实验结果比模拟结果小，在 $z=50\sim 400$ mm 范围内实验结果与 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型吻合较好。在平行于液面的两条线上实验结果与 $k-\epsilon$ 模型吻合都较好，在 $z=35$ mm 处[图 12(b)] 3

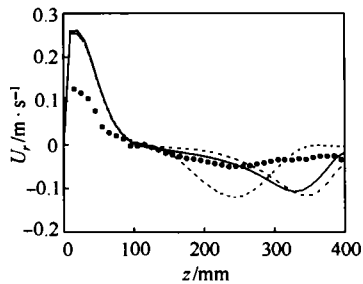
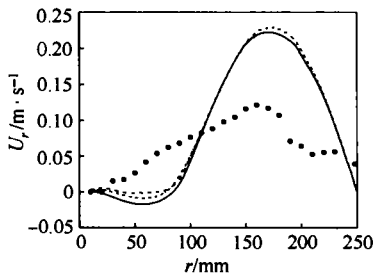
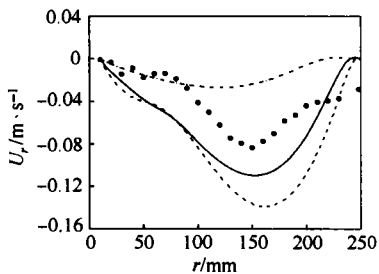
(a) $r=210$ mm(b) $z=35$ mm(c) $z=375$ mm

Fig. 11 Comparison of radial velocity between experimental and computational results of CBY agitator

● experimental; — $k-\epsilon$ model;
--- RNG $k-\epsilon$ model; - · - AS model

种模型模拟结果基本一致，在 $z=375$ mm 处[图 12(c)]，RNG $k-\epsilon$ 模型模拟结果绝对值大于实验结果的绝对值，代数应力模型则远小于实验结果，这进一步证实了代数应力模型所得的流场搅拌桨的影响区域较小的结论。

通过比较 CBY 桨和 PBT 桨相同输入功率下数值模拟结果与实验结果可见，在靠近搅拌桨的区域 PBT 桨流速比 CBY 桨流速大，而在远离搅拌桨的区域 CBY 桨流速比 PBT 桨流速大得多。如在 $z=35$ mm 处，CBY 桨模拟结果最大值为 $0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，测量结果最大值为 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [图 11(b)]；PBT 桨相应数据则分别为 0.28 、 $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [图 12(b)]，无论是计算结果还是实验结果 PBT 桨流

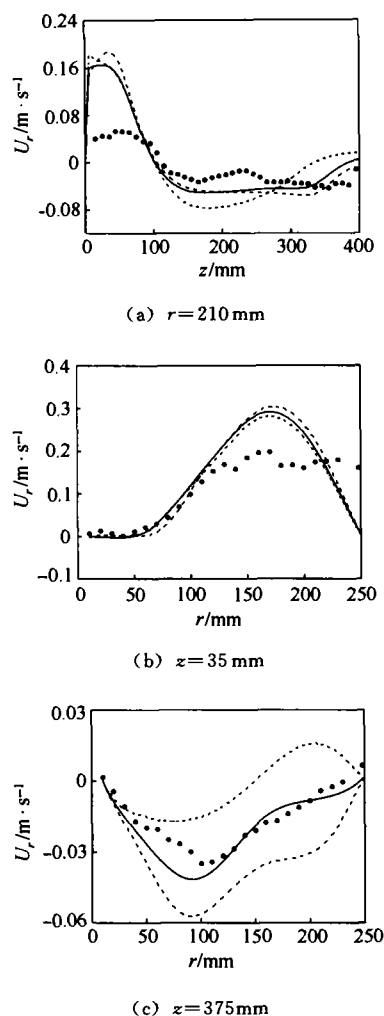


Fig. 12 Comparison of radial velocity between experimental and computational results of PBT agitator

● experimental; — $k-\epsilon$ model;
--- RNG $k-\epsilon$ model; -.- AS model

速都比 CBY 桨流速大。而在 $z=375\text{ mm}$ 处，以 $k-\epsilon$ 模型为例，CBY 桨模拟结果最小值（绝对值最大）为 $-0.11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，测量结果最小值为 $-0.09\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图 11(c)]；而 PBT 桨相应结果分别为 -0.04 、 $-0.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图 12(c)]，PBT 桨流速远小于 CBY 桨流速。即无论实验还是模拟结果都证实，在相同的输入功率下，在靠近搅拌桨的区域 PBT 桨比 CBY 桨速度大，而在靠近液面的区域 CBY 桨比 PBT 桨速度高出 1 倍以上，这种效果对于固-液悬浮等操作非常有利。

(2) 轴向速度分布

图 13 为 CBY 搅拌桨轴向速度数值模拟结果与实验结果的比较。其中图 13(a) 为平行于搅拌轴

的线上的情况，模拟结果与实验结果趋势相同，吻合情况也较好，实验结果比模拟结果略小。图 13(b) 和图 13(c) 为平行于液面的两条线上的结果，实验结果与模拟结果吻合都较好，尤其是与 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型，但是在数值上总有些差异，这可能有两方面的原因：第一，粒子的跟随性较差；第二，由于数据处理过程中平均处理，把一些最大值和最小值都平均掉了。由图 13(b) 可见，在 $r=60\text{ mm}$ 、 130 mm 处分别有一最大、最小值。 $r=130\text{ mm}$ 处即搅拌桨叶端下方、搅拌桨的排出区域，所以有一向下的极值。在 $r=60\text{ mm}$ 处出现向上的极值，说明该处有一漩涡。图 13(c) 中代数应力模型模拟所得结果绝对值较小，即 U_z 与 U_r 相同，代数应力模型所得结果是搅拌桨的影响区域较小。

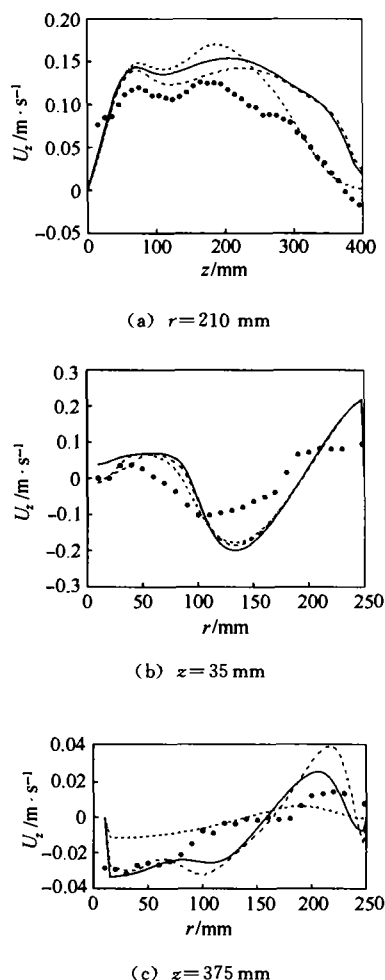
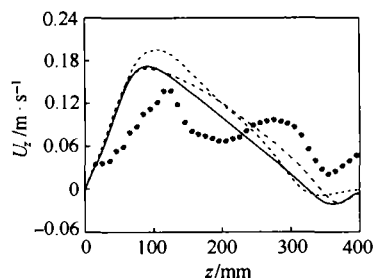


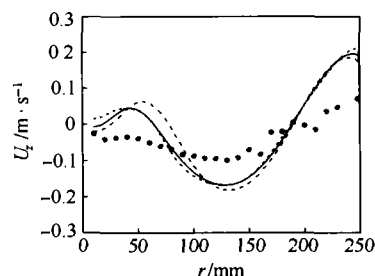
Fig. 13 Comparison of axial velocity between experimental and computational results of CBY agitator

● experimental; — $k-\epsilon$ model;
--- RNG $k-\epsilon$ model; -.- AS model

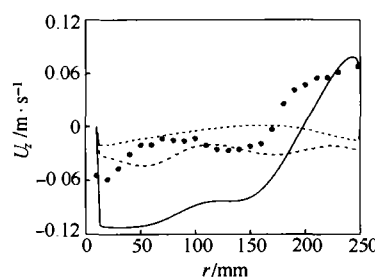
图 14 为 PBT 桨轴向速度数值模拟结果与实验结果的比较. 其中在图 14(a) 中实验结果与数值模拟结果流型趋势有所不同, 实验结果出现了两个极值点, 而数值模拟只有一个. 图 14(b) 中数值模拟结果在 $r=60\text{ mm}$ 处也有一个极值点, 说明 PBT 桨下方也有一个漩涡, 但是实验并没有测到. 图 14(c) 中无论是数值模拟还是实验结果 U_z 的绝对值都比较小, 在 $-0.02\sim0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 这说明 PBT 桨在液面附近流速非常小.



(a) $z=210\text{ mm}$



(b) $z=35\text{ mm}$



(c) $z=375\text{ mm}$

Fig. 14 Comparison of axial velocity between experimental and computational results of PBT agitator

● experimental; — $k-\epsilon$ model;
--- RNG $k-\epsilon$ model; - · - AS model

4 结 论

应用商业计算流体力学软件 CFX 对搅拌槽内的流场进行了模拟, 并与 PIV 测试结果进行了比较.

(1) 对比了不同湍流模型的模拟效果. 各种模

型模拟结果与实验结果流型吻合均较好, 但速度分量的对比结果表明不同湍流模型所得的结果在某些区域差别较大, 尤其是在靠近液面的区域, 这说明不同的湍流模型的主要差别在这些边缘区域, 尤其是对于自由液面的处理存在欠缺, 实验结果与各湍流模型的吻合情况也不尽相同. 标准 $k-\epsilon$ 双方程模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和代数应力模型在主流域内都能较准确地模拟搅拌槽内流体的流动, 所得相对结果能够较准确地描述搅拌槽内的流动场, 对于搅拌槽的设计与放大有一定指导意义.

(2) 比较了 CBY 与 PBT 搅拌桨的流型. 无论实验还是模拟结果都证实, 在相同的输入功率下, 在靠近搅拌桨的区域 PBT 桨比 CBY 桨流速大, 而在远离搅拌桨的区域 CBY 桨比 PBT 桨流速大, 这些结果对不同场合搅拌桨的选择有一定指导意义.

符 号 说 明

b ——叶片宽度, m
 D ——搅拌桨直径, m
 N ——搅拌桨转速, s^{-1}
 n_b ——叶片数目
 Re ——Reynolds 数
 r ——径向距离, m
 T ——搅拌槽直径, m
 t ——时间, s
 U ——平均速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 z ——轴向距离, m
 ϵ ——湍流动能耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
 θ ——叶片倾角, ($^\circ$)

下角标

r ——径向分量
 z ——轴向分量

References

- 1 Xu Y, McGrath G. CFD Predictions of Stirred Tank Flows. *Trans. IChemE*, 1996, **74** (A4): 471—479
- 2 Jian S, Hui M, Rodney O Fox. Validation of CFD Simulations of a Stirred Tank Using Particle Image Velocimetry Data. *Can. J. Chem. Eng.*, 1998, **76**: 611—625
- 3 Hou Shuandi (侯栓弟), Zhang Zheng (张政), Wang Yingchen (王英琛), Shi Litian (施力田). Numerical Simulation of Turbulent Flow in Stirred Tank Agitated by Axial Impeller. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2000, **51** (1): 70—76
- 4 Ng K, Fentiman N J, Lee K C, Yiannakis M. Assessment of Sliding Mesh CFD Predictions and LDA Measurements of the Flow in a Tank Stirred by a Rushton Impeller. *Trans. IChemE*, 1998, **76** (A6): 737—747