

# 涡轮桨搅拌槽内流动及尾涡特性研究

程先明 李志鹏 高正明\* 刘心洪  
(北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 采用颗粒成像测速仪(PIV), 实验测定了相同功率下两种不同叶片长度的六直叶涡轮桨(RT 桨)的流动场, 分析了叶片长度对液相速率、湍流动能和尾涡特性的影响规律, 并研究了桨叶离底距离对尾涡特性的影响。结果表明, 径向速率分布差别不大, 而长桨叶的轴向速率大于短桨叶, 最大相差达 40%。对于湍流动能, 二者在近桨叶区数值相近, 但在远桨叶区长叶桨较短叶桨的湍动要强, 最大差值 30%; 对于尾涡特性, 上下尾涡发展轨迹、涡量大小是不对称的, 下尾涡较上尾涡发展稍快, 且涡量较大, 涡量大 20% 左右。

**关键词:** 流场; 尾涡; 粒子图像测速仪; 搅拌槽

**中图分类号:** TQ031

## 引 言

在流体混合过程中, 机械搅拌是一种最常用的方式。各种形式的搅拌槽普遍应用于化工、冶金、食品、制药等领域。有效的认识搅拌槽内流场的结构, 对搅拌槽的设计有重要的指导意义。

近几年, 对搅拌槽内涡轮桨流场的实验研究有大量的报导, 如 Lee<sup>[1]</sup>等人对 Rushton 涡轮桨搅拌槽内桨叶区的湍流特性进行了 LDA 测量; Sharp<sup>[2]</sup>等人利用粒子图像测速仪(PIV)测量技术对桨叶区微观尺度的湍流结构进行了详细的研究; Escudie<sup>[3]</sup>等人对 Rushton 涡轮桨的尾涡特性进行了探讨。但以上研究和报道大多集中在标准小桨型(即  $D/T = 1/3$ )的研究方面, 对  $D/T$  较大的涡轮桨的流场研究较少, 而工业上多采用  $D/T = 0.4$  的涡轮桨。吴莹等<sup>[4]</sup>分析探讨了搅拌槽内不同  $D/T$  的涡轮桨流动结构, 但未涉及叶片长度的讨论, 而涡轮叶片长度不同也会对流动特性产生一定的影响, 进而影响质量和热量的传递。

基于此, 本文在同功率下, 采用 PIV 方法对两种叶片长度六直叶涡轮桨的流动特性进行了测量, 研究了速率、湍流动能和尾涡的分布规律。并进一

步讨论了桨叶离底距离对尾涡轨迹的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 流场测量设备

实验采用平底圆柱形有机玻璃搅拌槽, 内径为  $T = 476$  mm。分别配置两种叶片长度的单层六直叶涡轮桨: RT1 桨(叶片长度 48 mm)和 RT2 桨(叶片长度 60 mm), 直径为  $D = 0.4 T$ , 搅拌桨尺寸及其示意图见表 1 和图 1, 2。

表 1 搅拌桨的几何尺寸一览表  
Table 1 Main parameters of the impellers

桨型	$D$ /mm	$D_{disc}$ /mm	$D_{hub}$ /mm	$W_{imp}$ /mm	$H_{imp}$ /mm
RT1	190	142	35	48	38
RT2	190	130	35	60	38

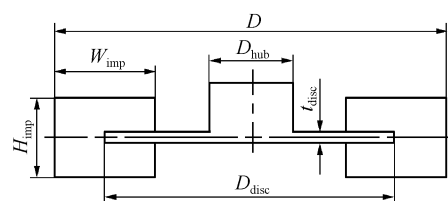


图 1 搅拌桨几何尺寸示意图

Fig. 1 Parameters of the impellers

### 1.2 测试方法

在涡轮桨离底距离为  $C = T/3$  时, 探讨了两种不同叶片长度涡轮桨 RT1, RT2 对流动及尾涡特性的影响; 研究离底距离对尾涡特性影响时, 选择 RT1 桨, 分别取  $C = 1/2 T, 1/3 T, 1/4 T$ 。4 块挡板均布, 挡板宽度为  $T/10$ 。以清水为工作介质, 液

收稿日期: 2009-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(20776008)

第一作者: 男, 1983 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

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

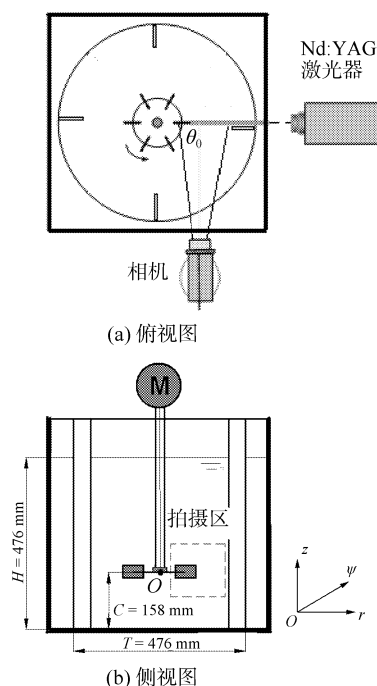


图 2 实验装置图俯视图及侧视图

Fig.2 Scheme of the experimental arrangement

位高度  $H = 476 \text{ mm}$ 。为避免圆形壁面对光的折射, 将搅拌槽安置在一个同样材质的矩形槽内, 内部充满相同液位的清水介质。示踪粒子为直径约  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  的空心玻璃珠。PIV 测量区域为长方形平面, 选择笛卡尔坐标系, 坐标轴为  $r, z, \psi$ , 分别代表径向、轴向、切向, 以桨中心为原点  $O$ , 待测平面为轴向和径向构成的平面, 指向槽壁方向为径向正方向, 垂直向上为轴向正方向。Nd:Yag 激光器发出的激光束通过柱面透镜形成片光, 片光垂直于方槽的玻璃壁面射入圆柱形有机玻璃槽内, 光片与  $z$  轴重合。采用  $4008 \times 2672$  分辨率的 CCD 相机拍摄流场中的粒子图像。相机安放在与激光入射平面相邻的平面上, 拍摄区域集中在桨叶端部及射流区。将桨叶与光平面重合的位置定义为  $\theta = 0^\circ$ , 如图 2 所示。两涡轮桨的功率准数分别为:  $Np_{RT1} = 5.93, Np_{RT2} = 5.40$ 。在功率  $P = 4.95 \text{ W}$ , 即单位体积功为  $P/V = 58.48 \text{ W/m}^3$  时, R1 桨转速为  $N = 92.85 \text{ r/min}$ , 雷诺数  $Re = ND^2\rho/\eta = 5.864 \times 10^4$ ; R2 桨转速为  $N = 90 \text{ r/min}$ , 雷诺数  $Re = ND^2\rho/\eta = 5.415 \times 10^4$ 。在讨论离底距离对尾涡特性影响时  $N = 92.85 \text{ r/min}$ , 雷诺数  $Re = ND^2\rho/\eta = 5.415 \times 10^4$ 。以上几种条件下, 搅拌槽内流场均属于典型的双循环流动, 且处于高度湍流状态。

### 1.3 参数选取和数据处理

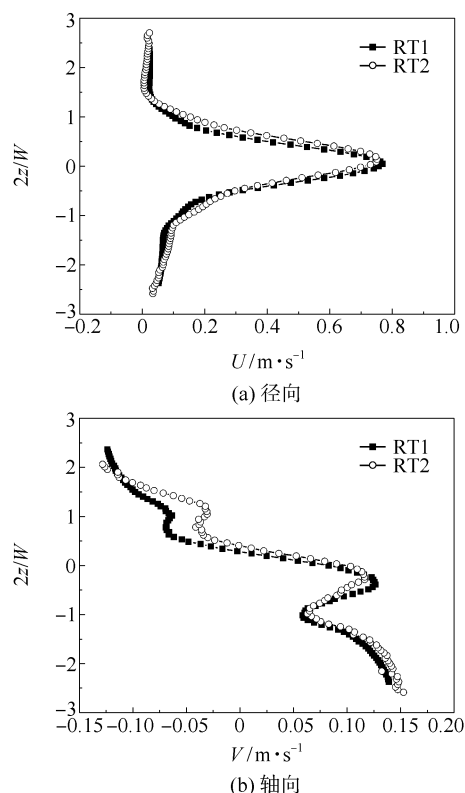
实验采用 TSI 的二维 PIV 测试系统, 在 Keane and Adrian 优化 PIV 实验测量的基本原则下<sup>[5]</sup>, 选取查询区为  $32 \times 32$  相素, 50% 重叠。通过调节轴编码器及其时间延迟来实现相位解析测量, 各相位间隔为  $2.5^\circ$ , 每个相位拍摄 200 对图像, 取平均。通过对 PIV 图像处理, 获得瞬时速率分布, 进而求解其对应的平均速率、湍流动能和涡量等参数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涡轮桨桨叶长度对平均流场的影响

#### 2.1.1 速率场

图 3 为  $r/R = 1.06$  处两桨叶的径向、轴向速率比较图。其中, 图 3(a) 为  $r/R = 1.06$  处两桨叶相位平均的径向速率比较图, 速率峰位置分布和数值大小都相差不大。径向最大值出现在桨叶中心位置 ( $2z/W = 0$ ), RT1 桨约为  $U_{\max} = 0.78 V_{\text{tip}}$ , RT2 桨约为  $U_{\max} = 0.76 V_{\text{tip}}$  在同一搅拌槽内, 不同叶片长度的 Rushton 涡轮桨对径向的速率影响不大。在

图 3  $r/R = 1.06$  处两桨叶径向速率(a), 轴向速率(b)比较图Fig.3 Comparison of the radial velocity(a) and axial velocity(b) of two impellers at the point where  $r/R = 1.06$

$r/R = 1.3$  和  $1.6$  位置作图也得到相同的结论。图 3(b) 为  $r/R = 1.06$  处两桨叶相位平均后的轴向速率比较图, 在桨叶中心上方即  $2z/W > 0$  数值为负值(方向向下); 在桨叶中心下方即  $2z/W < 0$  数值为正值(方向向上), 即流体从桨叶上下两侧流向桨叶中心。轴向速率在不同  $2z/W$  处数值不同, 对  $r/R$  的其他位置作图结论相同。实验发现在  $r/R = 1.06, 2z/W = 1.3$  处相差最大(约 40%)。

### 2.1.2 湍动能

Chung<sup>[6]</sup>的研究表明, 在有挡板的搅拌槽中, 2D-PIV 可以较为准确地估计三维流场中湍流动能的分布。本文在全挡板的实验条件下, 研究桨叶区附近的流动情况, 因此可以使用 2D-PIV 的测量结果近似计算湍流动能分布。通过(1)式即可由径向与轴向两个方向上的脉动速率求出湍流动能。

$$k = \frac{3}{4} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (1)$$

图 4 为不同位置两桨叶湍动能比较图, 可以看出在近桨叶区( $r/R = 1.06, 1.3$ ), 两种桨叶对应位置的湍动能数值相差不大, 分布趋势大体一致。两种桨叶的湍动能在径向上的变化趋势一致。即为从桨叶边缘  $r/R = 1.06$  开始逐渐增大, 在  $r/R = 1.3$  附近达到极大值, 然后逐渐减小。RT2 桨较 RT1 桨湍动能区域偏上。

但在相对远离桨叶区的位置( $r/R = 1.6$ ) RT2 桨的湍动能明显大于 RT1 桨, 最大差值处( $2z/W = 1.2$ )相差近 30%。说明在相同功率下, 长桨叶 RT 桨在远桨叶区的湍动要强于短桨叶 RT 桨。工业上若想让湍动能向槽壁方向传递的更远, 让近壁处获得更大剪切速率, 达到全槽的有效混合, 在相同功率下, 采用长桨叶搅拌桨能达到可观的效果。

## 2.2 六直叶涡轮桨的尾涡分析

### 2.2.1 桨型

用最大涡量法来定义尾涡的中心。分别对径向、轴向的上下尾涡中心发展轨迹做图 5。从图 5 可以看出, 叶片长度对尾涡的运动影响显著。

(1) 径向方向上, RT1 桨的尾涡起源比 RT2 桨略远, 即 RT1 桨的尾涡出现在  $r/R = 0.75$ , 而 RT2 桨的尾涡在  $r/R = 0.65$  左右。与对应相位角比较, 可知 RT1 桨的尾涡及运动较 RT2 桨稍微滞后。就 RT1 和 RT2 本身而言, 各自的上下尾涡发展轨迹也不完全一致, 下尾涡的运动较上尾涡略快, 该现象与 Escudie 等<sup>[7]</sup>的研究一致。

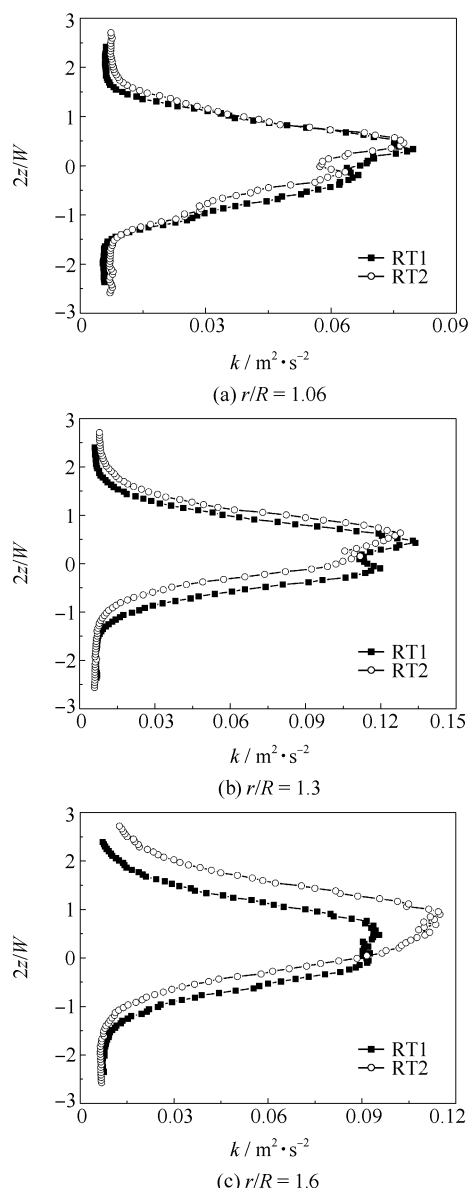


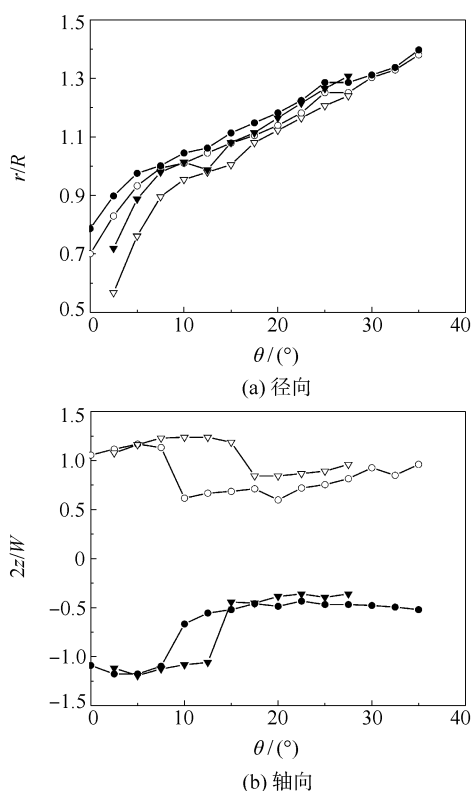
图 4 不同位置两桨叶湍动能比较图

Fig. 4 Comparison of the turbulent kinetic energy of two impellers in different locations

(2) 轴向方向上, 两种桨叶的尾涡轨迹为上、下两尾涡先各自向上、下发展, 而后迅速靠拢, 最后又逐渐向上、下两侧运动。但是 RT1 桨上、下尾涡在相位角为  $10^\circ$  的位置就开始迅速靠拢, 而 RT2 桨两尾涡则在  $15^\circ \sim 17.5^\circ$  时出现该现象。从图 5 中也可以看出, RT2 桨涡心发展轨迹要比 RT1 桨偏上, 即 RT2 桨的射流偏角要比 RT1 桨大一些。

(3) RT1 桨的尾涡在叶片后方  $35^\circ$  位置几乎耗散, 而 RT2 桨  $27.5^\circ$  位置几乎耗散。

上述现象主要由圆盘大小  $D_{\text{disc}}$  和桨叶叶片长



●—RT1; ▼—T2; 空心点—上涡; 实心点—下涡

图 5 RT1, RT2 桨尾涡发展轨迹比较图

Fig.5 Comparison of the trailing vortices of two impellers

度  $W_{\text{imp}}$  不同而致, 且叶片长度起主要影响因素。总体上而言, 小圆盘, 长叶片的 RT2 桨的尾涡运动距离较短, 耗散较快。

### 2.2.2 离底距离

不同离底距离下 RT1 桨的尾涡轨迹如图 6 所示, 当  $C = 1/4T$ ,  $1/3T$ ,  $1/2T$  时, 上、下尾涡的发展轨迹也是不对称的, 且下尾涡较上尾涡发展稍快。

### 2.2.3 尾涡与湍流动能的关系

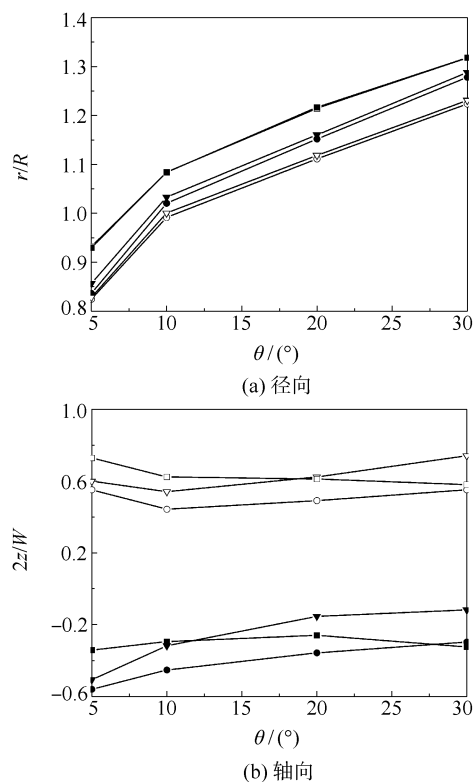
图 7 为 RT1 桨不同角度相位解析的速率和湍流动能分布图。由图 7 可以看出, 高湍流动能分布区域与尾涡的结构及运动密不可分, 两反向旋转尾涡的交汇处即为高湍流动能分布区, 且能量随尾涡运动由桨叶区逐步向槽内传递, 直至耗散。综合速率矢量分布可知, 高湍流动能分布区位于速率梯度较大的区域, 即双尾涡结构的汇合引起了流体速率的强烈脉动, 进而有效地促进混合。

### 2.2.4 涡量

图 8 为两种桨型各个相位的涡量比较图, 涡量为反映流动特性的一个关键的物理参量, 其计算公式为

$$\omega = \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2)$$

从图 8 中可以看出, 二者变化趋势大体相同, 均为先增大到一个极大值, RT1 桨的涡量最大值出现在  $2.5^\circ \sim 5^\circ$  之间, RT2 桨的涡量最大值出现在  $5^\circ \sim 10^\circ$  之间, 而后随着尾涡的向前发展而逐渐减小。



●— $C = 1/4T$ ; ▼— $C = 1/3T$ ; ■— $C = 1/2T$ ;  
空心点—上涡; 实心点—下涡

图 6 RT1 桨不同离底距离尾涡轨迹比较图

Fig.6 Comparison of the trailing vortices with different off-bottom clearances of RT1

从图 8 中还可以看出, 下尾涡的涡量绝对值要比上尾涡偏大。RT2 桨涡量耗散的要比 RT1 桨快近  $10^\circ$  的相位, RT1 桨上尾涡涡量要比 RT2 桨上尾涡涡量平均大 20% 左右。对于下尾涡, 两种桨在  $15^\circ$  相位前 RT1 桨涡量偏大, 在  $15^\circ$  相位后二者涡量值保持一致。

## 3 结 论

同功率下, 长叶片和短叶片的涡轮桨的径向速率差别不大, 但轴向速率在  $2z/W = 1.2$  处相差约 40%。对于湍流动能来说, RT1 和 RT2 在近桨叶区数值相近, 但在远桨叶区 RT2 桨较 RT1 桨的湍动



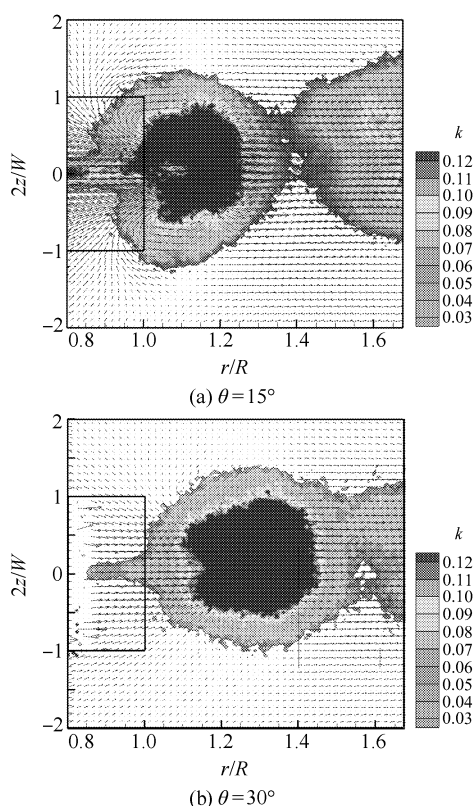
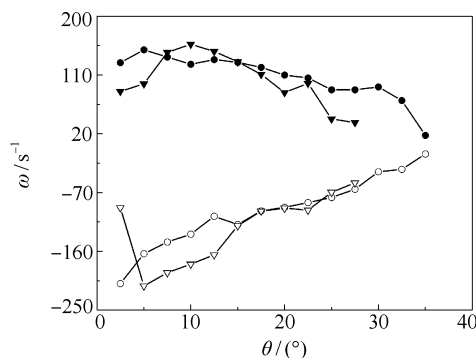


图7 RT1 桨不同角度相位解析的速率和湍流动能分布图

Fig.7 Phase resolved plots of velocity and turbulent kinetic energy fields of RT1 at different phases



●—RT1; ▼—RT2; 空心点—上涡; 实心点—下涡  
图8 RT1,RT2 桨涡量变化图

Fig.8 The relation between vortex and phase

要强,最多可提高 30%。六直叶涡轮桨的上下尾涡发展轨迹、涡量大小是不对称的。下尾涡较上尾涡发展快,且涡量较大。RT1 桨的尾涡在 35°位置几乎耗散,RT2 桨 27.5°位置几乎耗散。

## 符号说明

- $C$ ——桨叶离底高度,mm  
 $D$ ——搅拌桨直径,mm  
 $H$ ——液面高度,mm  
 $k$ ——湍动能, $\text{m}^2/\text{s}^2$   
 $N$ ——搅拌转速,r/min  
 $Np$ ——功率准数  
 $Re$ ——雷诺数  
 $r$ ——坐标系径向坐标,mm  
 $T$ ——搅拌槽直径,mm  
 $U$ ——径向速率 m/s  
 $u'$ ——径向脉动速率,m/s  
 $V$ ——轴向速率,m/s  
 $V_{\text{tip}}$ ——叶端线速率,m/s  
 $v'$ ——轴向脉动速率,m/s  
 $W$ ——桨叶宽度,mm  
 $z$ ——坐标系轴向坐标,mm  
 $\theta$ ——相位角度,(°)  
 $\psi$ ——坐标系切向坐标,mm  
 $\omega$ ——涡量, $\text{s}^{-1}$

下标:

- disc——搅拌桨圆盘  
 imp——搅拌桨

## 参考文献:

- [1] Lee K C, Yianneskis M. Turbulence properties of the impeller Stream of a rushton turbine[J]. AICHE J, 1998, 44(1):13-24.
- [2] Sharp K V, Adrian R J. PIV study of small-scale flow structure around a rushton turbine[J]. AICHE J, 2001, 47(4): 766-778.
- [3] Escudié R, Liné A. A simplified procedure to identify trailing vortices generated by a rushton turbine [J]. AICHE J, 2007, 53(2):523-526.
- [4] 吴莹, 闵健, 李志鹏, 等. 搅拌槽内流动结构的 PIV 研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(1): 561-565.
- Wu Y, Min J, Li Z P. The characteristics of flow fields in a stirred tank by PIV[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2007, 34(1): 561-565. (in Chinese)
- [5] Keane R D, Adrian R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images[J]. Appl Sci Res, 1992, 49(3):191-215.
- [6] Chung K H K, Barigou M, Simmons M J H. Reconstruction of 3-D Field inside Miniature Stirred Vessels Using a 2-D PIV Technique[C]//12th European Conference on Mixing, Bologna, 2006: 407-414.

- [7] Escudié R, Bouyer D, Liné A. Characterization of trailing vortices generated by a Rushton turbine[J]. *AIChE J*, 2004, 50(1):75–86.

## Characteristics of flow fields and trailing vortices in a stirred tank with a Rushton turbine

CHENG XianMing LI ZhiPeng GAO ZhengMing LIU XinHong

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

**Abstract:** The flow fields of two Rushton turbines with different lengths of blades have been measured by using particle image velocimetry (PIV) under the same power input. The effect of the blade length of the Rushton turbine on the velocity, turbulent kinetic energy and trailing vortices was investigated. The effect of clearance between the impeller and tank bottom on the trailing vortices was also studied. The results show that the radial velocities of the two impellers were almost the same under the same power input. The impeller with the longer blades produced up to 40% larger axial velocity than that with shorter blades. The turbulent kinetic energy generated by the impeller with longer blades was larger than that with shorter blades in the region far away from the impeller, with the largest difference being 30%; the turbulent kinetic energies were almost the same in the region near the impeller. The pair of vortices was asymmetric, with the lower vortex developing a little faster and generating more vorticity (nearly 20%) than the upper one.

**Key words:** flow field; trailing vortex; particle image velocimetry (PIV); stirred tank