

搅拌槽内流动结构的粒子图像测速技术研究

吴莹 闵健 李志鹏 高正明*
(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 使用粒子图像测速技术(PIV)对 Rushton 桨在全挡板搅拌槽内的流场结构进行了研究。在同一搅拌槽中采用固定雷诺数的放大准则,对比了不同直径的 Rushton 桨的速度和湍流动能分布。结果表明,Rushton 桨叶产生的径向射流沿径向方向是向上方倾斜的,倾斜角度在 $5^\circ \sim 6^\circ$;在排出区,湍流动能沿径向先增加至一峰值后减小;不同桨叶直径的 Rushton 桨,无因次化后的速度和湍流动能的大小分布在桨叶附近几乎没有差别,但随着桨叶直径的增大,剪切速率和输入功率减小,射流偏角和排出量增大。

关键词: 搅拌槽; 流动结构; 放大; 粒子图像测速技术(PIV)

中图分类号: TQ027

引言

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意义。早期的流场测量多采用毕托管法和热膜风速仪法,这两种测量方法对流场有较大的干扰。随着激光测速技术的发展,粒子图像测速技术(PIV)在流场测量领域得到了广泛的应用,它克服了单点测量技术的缺点,具有不干扰流场,测量精度高,分辨率高等优点。

近些年,国内外很多学者对搅拌槽内的流场进行过研究。Wu 等^[1]使用激光多普勒法在 $T = 270$ mm 的搅拌槽中测量了湍流流动参数,得到了流场速度、湍流尺度、能谱函数和湍流动能耗散率等湍流数据。Wernersson 等^[2]用热膜风速仪测量了槽径 $0.8 \sim 2.09$ m 的搅拌槽,发现无因次化的湍流动能和湍流动能耗散率随着单位输入功率的增加而增加;主体区无因次化的湍流动能与雷诺数 Re 无关,而在桨叶区,湍流动能随着 Re 的增加而增加。Sharp 等^[3]研究了 Rushton 桨搅拌槽桨叶区的小尺度湍流结构,分析了尾涡从生成和发展的运动情况,对瞬时流场的测量显示大尺度循环的变化与平均流场有关。Bugay 等^[4]测量了雷诺应力,估算出湍流

动能耗散率,发现 40% 的湍流动能耗散在桨叶区,其余 60% 的湍流动能在主体区耗散。Escudé 和 Liné^[5]分析了 Rushton 桨的局部动力学特性,湍流动能从桨叶末端到 $r/R = 1.4$ 的位置处增长了 2 倍,随后,湍流动能迅速下降。Khan^[6]测量了下压式斜叶桨的流场,实验表明可以通过 2D-PIV 测量结果估算湍流动能,44% 的湍流动能在桨叶区耗散,桨叶区的湍流动能耗散率是全槽平均湍流动能耗散率的 40 倍。

前人的研究多集中在小尺度的搅拌槽中进行,只对单一桨径的搅拌桨进行研究,使用 PIV 对同一搅拌槽中不同桨叶直径对流场的影响的研究还未见有报道。本文首先使用 $D_1 = 0.33 T$ 的 Rushton 桨,测量桨叶转过 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 和 50° 等 6 个位置处的流场,根据速度场,分析了桨叶尖端和中心处湍流动能的径向分布。其次,在同一搅拌槽中,采用固定 Re 的放大准则,使用 $D_1 = 0.33 T$ 、 $D_2 = 0.4 T$ 和 $D_3 = 0.5 T$ 等 3 个不同直径的 Rushton 桨,考察桨叶直径对流场速度、射流偏角、桨叶排出量以及湍流动能的影响。

1 实验装置与方法

实验在直径 $T = 476$ mm 的平底圆柱形有机玻璃搅拌槽内进行。搅拌槽的外部套有一长方形玻璃槽,两槽中均装满水,两槽中液位高度均为 $H = 476$ mm,搅拌槽内平均分布 4 块挡板,每块挡板的宽度为 $T/10$,采用 Rushton 桨,桨叶直径分别为 $D_1 = 0.33 T$ 、 $D_2 = 0.4 T$ 和 $D_3 = 0.5 T$,桨叶离底距离

收稿日期: 2007-04-30

第一作者: 女,1981 年生,硕士生

*通讯联系人

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

$C = T/3$ 。

实验所用的粒子图像测速系统为美国 TSI 公司生产,其组成为:Nd:YAG 双腔脉冲激光器、CCD 照相机、同步器、轴编码器和数据采集系统。示踪粒子为直径 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的空心玻璃球,CCD 照相机的分辨率为 4008×2672 像素。

在流场内加入反光性、跟随性较好的示踪粒子,流场由一狭缝激光束照射,CCD 照相机以垂直激光光源的方向对准被测流场,记录下两次脉冲激光曝光时粒子的图像,形成两幅 PIV 底片,从曝光时间内粒子的位移计算出速度。图 1 为实验桨叶的示意图。测量平面与挡板之间夹角 45° 。获取速度场时,由于 Rushton 桨的 6 个桨叶平均分布,所以数据采集在相邻 2 个桨叶之间的 6 个不同位置处进行,在桨叶转过 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 和 50° 等 6 个位置处拍照,每个位置拍摄 300 对图像。两次激光脉冲的时间间隔 $t = 100 \mu\text{s}$ 。数据处理采用 TSI 公司的 INSIGHT 3G 系统,粒子图像采用互相关方法处理。查询区大小为 32×32 像素,两个相邻查询区 50% 重叠。空间分辨率为 $1.28 \text{ mm} \times 1.28 \text{ mm}$ 。

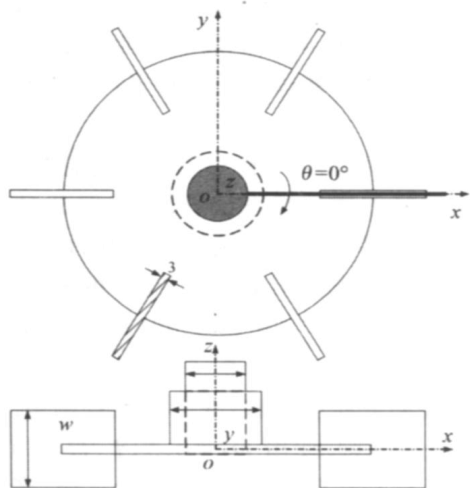


图 1 PIV 系统实验装置图

Fig. 1 Schematic illustration of the PIV system

2 结果与讨论

为了消除脉动速度的影响,得到准确的速度场,需要确定最佳的样本张数^[7]。在 PIV 处理过后的瞬态速度场中随机抽取多个瞬时速度值进行平均,抽取瞬时速度的位置在 $t = 20$ 时 $r/R = 1.23, 2z/w = 1$ 的位置处,结果如图 2 所示。在样本张数小于 100 之前,时均速度和均方根速度波动都很大;在样本张

数大于 300 之后,时均速度和均方根速度基本不随样本数的变化而变化,因此,每个相位处的样本张数为 300。

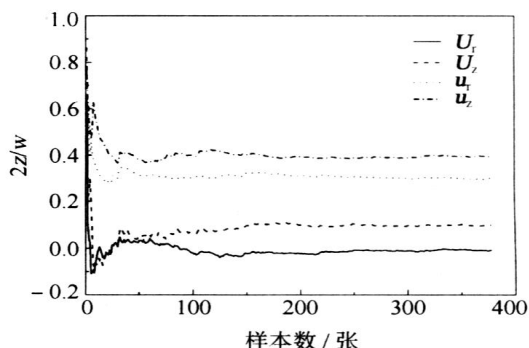


图 2 时均速度和均方根随样本数的变化

Fig. 2 Variation of velocity, RMS with sample number

2.1 Rushton 桨流场的研究

2.1.1 速度场 $D_1 = 0.33 T$ 的 Rushton 桨的搅拌槽内不同径向位置处的径向速度剖面图如图 3 所示。随着径向距离的增加,桨叶对流体的推动作用减弱,径向速度的最大值变小,且波形变宽。径向速度的最大值所对应的轴向位置并不是在桨叶中心位置 $2z/w = 0$ 处,而是出现在桨叶中心偏上的位置。径向距离越大,速度最大值对应的 $2z/w$ 值越大;最大速度所对应的 $2z/w$ 位置的连线并不是沿桨叶径向方向平行,而是向上方倾斜。此现象与文献 [1] 和 [8] 的研究结果一致,是由于桨叶边界不对称分布和边界条件不同引起的^[9]。

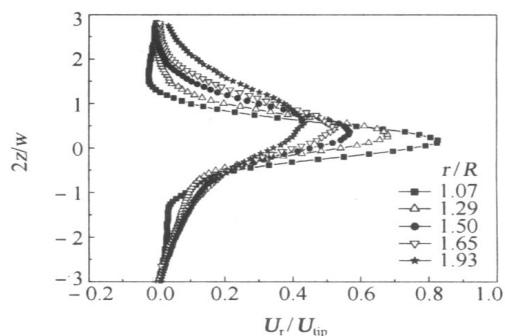


图 3 不同位置的径向速度剖面图

Fig. 3 Profiles of radial velocity at different locations

2.1.2 湍流动能 湍流动能是流场的重要参数,它的定义为

$$k/ U_{tip}^2 = \frac{1}{2} (\overline{U^2} + \overline{V^2} + \overline{W^2}) / U_{tip}^2 \quad (1)$$

其中 U_{tip} 代表叶端线速度, $\overline{U^2}, \overline{V^2}, \overline{W^2}$ 分别代表径向、轴向、切向 3 个方向上的脉动速度平方的

平均值。

由于目前的实验使用 2D-PIV,只能测得径向与轴向两个方向上的速度分布。文献[1]的研究表明,采用 2D-LDA 与 3D-LDA 计算出的湍流动能最大误差在 20 %左右,文献[10]的研究表明,在有挡板的搅拌槽中,2D-PIV 和 3D-PIV 测量计算出来的桨叶附近的湍流动能几乎没有差别。因此可以 2D-PIV 计算全槽的湍流动能分布。假设

$$\overline{W^2} = \frac{1}{2} (U^2 + V^2), \tag{2}$$

可将(1)式简化为:

$$k/U_{tip}^2 = \frac{3}{4} (U^2 + V^2)/U_{tip}^2 \tag{3}$$

通过(3)式即可由径向与轴向两个方向上的脉动速度求出湍流动能 k/U_{tip}^2 。

湍流动能沿着径向方向变化情况如图 4 所示。在桨叶中心 $2z/w = 0$ 、桨叶上下两端 $2z/w = 1$ 、 $2z/w = -1$ 三处的变化趋势相似:离开桨叶后湍流动能增加,在达到一个峰值后,随着径向距离的增加而减小,直至在壁面处消散^[11]。在桨叶下端,湍流动能在离开桨叶之后迅速增加到峰值,此峰值比其他两处的峰值要小的多,随后湍流动能几乎呈直线分布;在桨叶中心,湍流动能离开桨叶后,在 $r/R = 1.3$ 附近达到最大值。由于两尾涡在桨叶中心附近汇合,此处的湍流动能最高,为 0.12,相对于文献[1]的数据偏大,且最大位置处也比文献[1]的靠近桨叶,但在远离桨叶之后,与文献[1]的数据吻合的很好;尾涡形成之后向着径向方向的斜上方发展运动,所以在桨叶上端 $2z/w = 1$ 处湍流动能的峰值持续了从 $r/R = 1.3$ 到 $r/R = 1.7$ 宽范围分布。

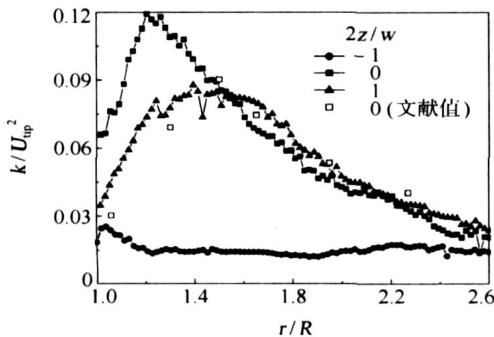


图 4 湍流动能随径向变化

Fig. 4 Relationship between axial distance and turbulent kinetic energy

2.2 不同桨径的 Rushton 桨流场的研究

2.2.1 桨叶直径对径向射流偏角的影响 不同桨

叶直径的径向射流角实验值及拟合公式如图 5 所示。由拟合的公式计算可得 $D_1 = 0.33 T$ 的 Rushton 桨的径向射流偏角为 5.2° , $D_2 = 0.4 T$ 时为 5.7° , $D_3 = 0.5 T$ 时则为 6° 。由于流体被 Rushton 桨的桨叶排出之后,沿径向方向形成射流,此股射流在槽壁附近分成上下两股流动,因此,桨叶与槽壁之间的距离会因径向射流的偏角产生影响。对比结果表明,不同桨径的 Rushton 桨产生的射流偏角随着桨叶直径的增大而略有增大。

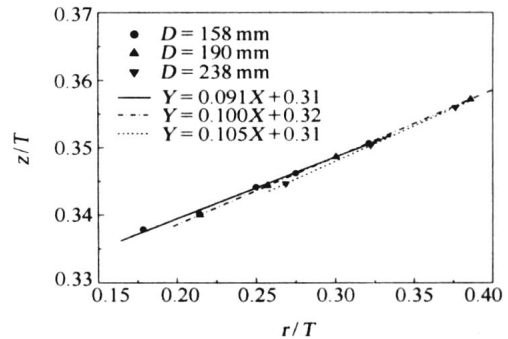


图 5 Rushton 涡轮桨径向射流偏角

Fig. 5 Radial jet angle of Rushton turbine

2.2.2 桨叶直径对湍流动能的影响 不同桨叶直径的湍流动能分布如图 6 所示。湍流动能在桨叶附近呈双峰分布,且桨叶上端的湍流动能峰值大于桨叶下端的湍流动能峰值,这种现象和文献[1]的研究

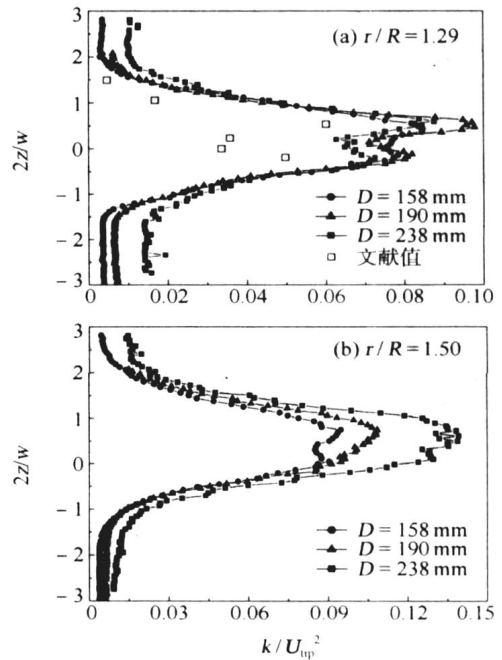


图 6 湍流动能剖面图

Fig. 6 Turbulent kinetic energy profiles

成果一致。与文献[1]的数据比较发现,湍流动能的分布的形状近似,在主体区的数据基本一致,但在桨叶附近本实验的数据比文献[1]的大。由于 PIV 实验中,两次激光脉冲的时间间隔 t 对速度有很大的影响,实验中应根据所测量流场的速度对 t 进行适当调整,本实验以全槽的平均速度作为调整 t 的依据,桨叶附近的速度大于全流场的平均速度,因此,在桨叶附近测量到的速度可能存在误差^[12]。

在桨叶附近,不同桨叶直径的 Rushton 桨产生的湍流动能,大小、形状基本相同,在离开桨叶一段距离后,由于槽壁的影响,湍流动能开始产生差别。

表 1 三种不同直径的桨叶的操作参数

Table 1 Operating parameters for different impellers

桨叶	D/mm	w/mm	Re	$N/(\text{r/s})$	$U_{\text{tip}}/(\text{m/s})$	P/W	$Q_r/(\text{m}^3/\text{s})$	N_Q	$v_{\text{avg}}/(\text{s}^{-1})$	$v_{\text{max}}/(\text{s}^{-1})$
D_1	158	31.6	6.2×10^4	2.5	1.24	9.23	0.0074	0.75	67	108
D_2	190	38	6.2×10^4	1.73	1.03	7.69	0.0095	0.80	50	88
D_3	238	47.6	6.2×10^4	1.10	0.82	6.10	0.0117	0.79	30	51

区产生对传质和分散有非常好效果的高剪切速率。平均剪切速率和最大剪切速率都是桨叶直径的函数,在 Re 一定时,桨叶转速随着随着桨叶直径的增大而减小,因此全槽的平均剪切速率和最大剪切速率均随着桨叶直径的增大而减小。实验结果计算出 Rushton 桨的排出量准数为 0.75 ± 0.05 ,文献[13]研究了 D/T 在 $0.2 \sim 0.4$ 之间的 Rushton 桨,其排出量准数在 $0.73 \sim 0.89$ 之间。在同一搅拌槽中, Re 数相同的情况下,不同直径的搅拌桨产生的速度无因次化后基本没有差别;但桨叶直径越大,搅拌槽需要的输入功率越小,桨叶产生的全槽的平均剪切速率和最大剪切速率越小,但桨叶排出量增大。

3 结论

(1) Rushton 桨叶产生的径向射流并不是沿桨叶径向方向平行,而是向上方倾斜,其倾斜偏角为 $5^\circ \sim 6^\circ$ 。

(2) 湍流动能在桨叶中心、桨叶上下两端三处沿着径向方向变化一致:离开桨叶后湍流动能增加,达到一峰值后,随着径向距离的增加而减小。两个尾涡在桨叶中心附近汇合,此处的湍流动能峰值最大;尾涡形成之后向着径向方向偏上的位置运动,因此在桨叶上端附近,湍流动能存在一个宽度很大的峰值。

(3) Re 一定,同一搅拌槽内,不同直径的 Rushton

$D_3 = 0.5 T$ 的 Rushton 桨,在 $r/R = 1.50$ 处,受槽壁影响,径向射流分成上下两股,产生较大的脉动速度,因此湍流动能偏大;而 $D_1 = 0.33 T$ 和 $D_2 = 0.4 T$ 的 Rushton 桨在 $r/R = 1.50$ 处时正处于搅拌槽中间位置,湍流动能差别不大。

2.2.3 桨叶直径对其他参数的影响 三种不同直径的桨叶的操作参数具体如表 1 所示。由表中数据可知,可通过改变桨叶直径来改变输入功率和排出量,在 Re 一定时,大桨叶以较小的输入功率产生大的排出量,小桨叶则以较大的输入功率产生小排出量。

桨叶附近存在很大的速度梯度,因此桨叶在此

ton 桨产生的流场速度几乎没有差别,但是大桨叶以较小的输入功率,产生高排液量和低剪切速率,小桨叶则用较大的输入功率,产生低排液量和高剪切速率;径向射流偏角随着桨径的增大而增大;在桨叶附近,不同直径的 Rushton 桨的湍流动能基本相同,在近壁区,桨叶直径对湍流动能有影响。

符号说明

- C ——搅拌桨离底高度,mm
- D ——搅拌桨直径,mm
- H ——液位高度,mm
- k ——湍流动能, m^2/s^2
- N ——转速, r/s
- N_Q ——桨叶排出流量准数
- P ——输入功率,W
- Q_r ——桨叶排出流量, m^3/s
- r ——搅拌桨半径,mm
- R ——搅拌槽半径,mm
- Re ——雷诺数
- t ——激光脉冲的时间间隔,s
- T ——搅拌槽直径,mm
- u_r ——径向均方根速度, m/s
- U_r ——径向速度, m/s
- u_z ——轴向均方根速度, m/s
- U_{tip} ——叶端线速度, m/s
- U_z ——轴向速度, m/s

v_{avg} —— 平均剪切速率, s^{-1}

v_{max} —— 最大剪切速率, s^{-1}

w —— 桨叶高度, mm

z —— 离桨叶中心轴向高度, mm

参考文献:

- [1] WU H, PATTERSON G K. Laser-Doppler Measurement of Turbulent-flow Parameters in a Stirred Mixer [J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44: 2207 - 2221.
- [2] WERNERSSON E S, TRAGARCH C. Scale-up of Rushton Turbine Agitated Tanks [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54: 4245 - 4256.
- [3] SHARP K V, ADRIAN R J. PIV Study of Small-Scale Flow Structure around a Rushton Turbine[J]. Fluid Mechanics and Transport Phenomena, 2001, 21: 766 - 778.
- [4] BUGA Y S, ESCUDIÉ R, LINÉ A. Experimental Analysis of Hydrodynamics in Axially Agitated Tank [J]. AIChE Journal, 2002, 48: 463 - 475.
- [5] ESCUDIÉ R, LINÉ A. Experimental Analysis of Hydrodynamics in Radially Agitated Tank[J]. AIChE Journal, 2003, 49: 585 - 603.
- [6] KHAN F R, RIELLY C D, BROWN D A R. Angle-Resolved Stereoscopic PIV Measurements close to a down Pumping Pitched-Blade Turbine[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 2799 - 2806.
- [7] GAO D, ACHARYA S, WANG Y, et al. Flow field around Rushton Turbine in stirred tank by particle image velocimetry measurement [J]. Chinese J Chem Eng, 2004, 12(6): 843 - 850.
- [8] LEE K C, YIANNESKIS M. Turbulence Properties of the Impeller Stream in a Rushton Turbine [J]. AIChE Journal, 1998, 44: 13 - 24.
- [9] 樊建华, 饶麒, 王运东, 等. 涡轮桨搅拌槽内流场的数字 PIV 测量[J]. 清华大学学报, 2003, 43(12): 1605 - 1608.
- [10] 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]. Bologna, AIDIC, Italy: Fotograf Palermo Press, 2006: 407 - 414.
- [11] YOON H S, HILL D F, BALACHANDAR S, et al. Reynolds number scaling of flowing a Rushton turbine stirred tank: Part I Mean flow, circular jet and tip vortex scaling [J]. Chem Eng Sci, 2005, 60: 3169 - 3183.
- [12] 聂毅强, 包雨云, 施力田. 改进的 PIV 技术在测量搅拌槽内流场中的应用 [J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(1): 7 - 10.
- [13] COOPER R G, WOLF P W. Velocity Profiles and Pumping Capabilities for Turbine Type Impeller [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1968, 45: 94 - 108.

Particle image velocimetry (PIV) study of the flow structure in a stirred tank

WU Ying MIN Jian LI ZhiPeng GAO ZhengMing

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

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) has been used to study the flow field in a stirred tank with a Rushton turbine. Particle images were captured at six different blade positions and the velocity fields and turbulent kinetic energy distribution profiles for different impeller diameters obtained. It was shown that radial jet flow of the Rushton turbine along the radial direction is tilted towards the top. Varying the impeller diameter had no effect on either the velocity or turbulent kinetic energy of the impeller stream, but did affect on the input power, shear velocity, pumping capability and radial jet angle.

Key words: stirred tank; flow structure; scale up; particle image velocimetry (PIV)