

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160751

涡轮桨搅拌槽内流场特性的 V3V 实验

鲍苏洋¹, 周勇军¹, 王璐璐¹, 辛伟², 陶兰兰²

(¹南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; ²江苏省特种设备安全监督检验研究院国家化工设备质量监督检验中心, 江苏 苏州 215600)

摘要: 用体三维速度测量技术 (volumetric three-component velocimetry measurements, V3V) 实验研究了涡轮桨搅拌槽内桨叶附近流场。通过速度数据得到三维流场特性, 确定尾涡三维结构; 分析了叶片后方 30° 截面轴向、径向和环向速度沿径向分布规律; 对比了 V3V 和 2D-PIV (particle image velocimetry) 径向和轴向速度, 发现速度分布吻合较好, 特别是尾涡所在的射流区。用 2D-PIV 方法对尾涡发展规律进行研究, 发现受流体自由液面影响, 尾涡轨迹向上倾斜, 并与水平方向成 10°, 上、下尾涡运动轨迹不对称, 下尾涡运动比上尾涡稍快, 衰减亦较快, 这与 V3V 实验结果一致; 叶片后方 60° 尾涡依然清晰可见。用 V3V 和 2D-PIV 方法对桨叶附近湍流各向同性假设进行了分析, 发现桨叶区和尾涡所在位置湍动能被各向同性假设近似法高估了 25%~33%, 桨叶区和尾涡所在位置趋向于各向异性。

关键词: V3V; PIV; 尾涡; 涡轮桨; 流场; 各向同性

中图分类号: TQ 022

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 11—4580—07

V3V study on flow field characteristics in a stirred vessel with Rushton turbine impeller

BAO Suyang¹, ZHOU Yongjun¹, WANG Lulu¹, XIN Wei², TAO Lanlan²

(¹College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; ²National Quality Supervision & Inspection Center of Chemical Equipment, Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Suzhou 215600, Jiangsu, China)

Abstract: The flow field nearby standard Rushton impeller in a stirred vessel was investigated by volumetric three-component velocimetry (V3V) measurements, which about 18000 vectors were captured in a cubic volume of approximately 140 mm in height by 140 mm in width by 100 mm in depth. The characteristics of three-dimensional flow field and the structure of trailing vortices were derived from velocity data. The distributions of radial, axial and tangential velocities in 30° cross-section behind the impeller were analyzed and the distributions of radial and axial velocities by V3V were in good agreement with these by 2D-PIV (particle image velocimetry), especially for trailing vortices in the region of discharge streams. The 2D-PIV study on development of trailing vortices shows that the trailing vortices had an upward inclination at an angle of 10° to the horizontal line as a result of influence by the liquid free surface. The traces of movement were asymmetrical between upper and lower trailing vortices in a way that the movement and decay of the lower vortex were slightly faster than the upper one, which is consistent with the V3V results. Further, trailing vortices were still visible at 60° angle behind the impeller blade. Compared results of both V3V and 2D-PIV to that of pseudo-isotropic approximation, the normalized turbulent kinetic energy (k/V_{tip}) by pseudo-isotropic approximation was overestimated

2016-05-31 收到初稿, 2016-06-27 收到修改稿。

联系人: 周勇军。第一作者: 鲍苏洋 (1991—), 男, 硕士研究生。

Received date: 2016-05-31.

Corresponding author: ZHOU Yongjun, zhouyj@njtech.edu.cn

25%—33% at locations of trailing vortices and the impeller, where turbulence tends to be anisotropic.

Key words: V3V; PIV; trailing vortex; Rushton impeller; flow field; isotropy

引 言

涡轮桨搅拌槽广泛应用于化工、生物、制药等工业过程^[1-2]。桨叶附近射流为流体提供动力,尾涡是湍流来源的一种,对流体混合过程十分有利^[3-5]。因此,研究涡轮桨搅拌槽内流场特性及尾涡的位置、结构和发展规律是十分有意义的。

近年来,对涡轮桨搅拌槽内流场的 CFD、2D-PIV 和 3D-PIV 实验研究已有大量报道。李志鹏等^[6-7]用 PIV 和 LES (large eddy simulation) 方法研究了涡轮桨搅拌槽内的流动特性,发现尾涡向槽底运动,上尾涡在桨叶后方 30°时已开始衰减;程先明等^[8]用 PIV 技术对 Rushton 搅拌桨尾涡发展轨迹进行了研究,发现尾涡在桨叶后方 30°前后基本耗散完毕;Zhao 等^[9]研究了桨叶形状对尾涡的影响,发现 Rushton 桨尾涡在桨叶后方 50°时仍然可见,且上下尾涡最大位移皆不会超过叶片宽度的一半;Escudie 等^[10-11]用 2D-PIV 方法对 Rushton 搅拌桨的尾涡特性进行了探讨,与三维测试结果相比,二维测试结果涡尺寸较小,但涡心运动轨迹基本相同;Liu 等^[12]和 Pan 等^[13]用 2D-PIV 方法研究了双层涡轮桨搅拌槽内流场特性,并得到了平行流、合并流和分离流 3 种流形情况下的尾涡发展轨迹;Chara 等^[14]用 2D-PIV 和分离涡模拟 (detached eddy simulation) 方法,对带挡板 Rushton 桨搅拌槽内尾涡在不同 Reynolds 数情况下分布情况进行了探讨,模拟得到 Rushton 桨尾涡三维结构图;Khan 等^[15]用三维 PIV 方法测量了下吸式四斜叶桨搅拌槽内流场量,用三维 PIV 和 2D-PIV 方法对桨叶附近湍流各向同性假设进行了分析,发现在涡的中心位置,严格计算得到湍动能比二维预测值略大;宋戈^[16]用三维 PIV 方法研究了涡轮桨搅拌槽内湍流特性,二维 PIV 技术在各向同性假设基础上得到的湍动能比三维 PIV 结果高估 28%左右,并且发现桨叶射流区及尾涡位置趋于各向异性。

2D-PIV 只能测得径向速度和轴向速度,无法实现对环向速度的测量。V3V 方法可以实现对 140 mm×140 mm×100 mm 流体三维速度的测量,该技术已经在流体动力学^[17-19]研究方面得到了成功应用,技术准确性十分可靠。V3V 技术捕捉到的流场的三维结构,有利于理解尾涡促进流体混合过程。

Sharp 等^[20-21]用 V3V 技术对 Rushton 桨周围湍流流场进行了探讨,用 V3V 和 2D-PIV 方法对比了尾涡的鉴别方法,但对于 Rushton 桨叶附近速度分布和湍流特性的 V3V 研究未见报道。

本实验用 2D-PIV 和 V3V 方法,研究在 $N=1.67 \text{ s}^{-1}$ 情况下涡轮桨搅拌槽内桨叶附近流场的流动特性,分析了尾涡的结构及发展规律,探讨了湍流各向同性假设的可行性,以期增强对涡轮桨搅拌槽流场特性的认识,为工业化生产提供参考。

1 实验装置和方法

实验采用不锈钢标准椭圆封头和圆柱形透明有机玻璃组成的搅拌槽,直径 $T=420 \text{ mm}$,配置标准六直叶涡轮桨,桨叶直径 $D=0.48T$,工作介质为水,液面高度 $H=550 \text{ mm}$,如图 1 所示。为避免圆柱形玻璃槽外部对激光的折射,将搅拌槽放置在一个立方体有机玻璃槽内,立方体透明玻璃槽和搅拌槽之间充满水且液面高度和搅拌槽内水面保持齐平。为减弱搅拌轴和桨叶对激光的反射作用,将其喷上黑色哑光漆。搅拌槽内流体 Reynolds 数用式

(1) 计算

$$Re = \frac{ND^2}{\nu} = 66007 \quad (1)$$

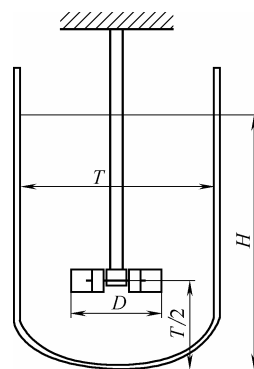


图 1 搅拌槽结构

Fig.1 Scheme of stirred tank

如图 2 所示,激光器和相机之间保持 90°,流场区域由波长为 532 nm、单脉冲能量 380 mJ 的两条激光通过共线通道照亮,光锥由两个成 90°的-25 mm 的柱面透镜生成,柱面透镜将光发散到竖直方向和水平方向,以此形成 1 个长 140 mm、宽 140 mm、深 100 mm 的测量区域。流体中加入平均直径

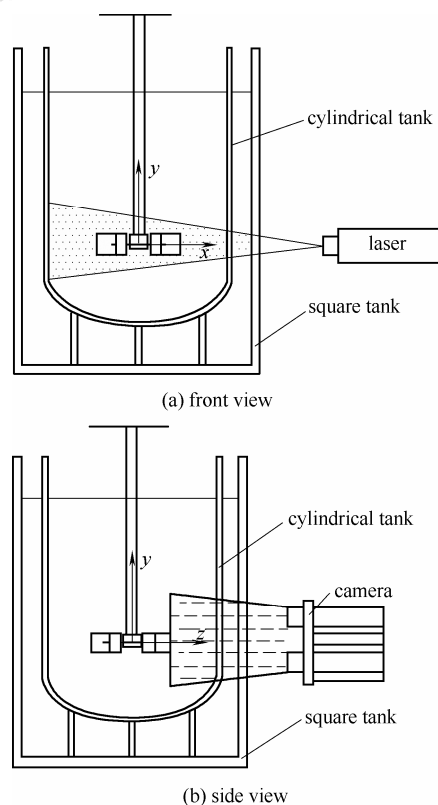


图 2 搅拌槽主视图和左视图

Fig.2 Front view and side view of stirred tank

为 $50\ \mu\text{m}$ 、密度与水相同的示踪粒子。V3V 探头由 3 个 400 万像素 (2048×2048) 的 CCD 相机组成, 将轴编码器和 TSI 公司的 610036 同步器连接, 实现 V3V 相机组、激光器的同步触发, 同步器的分辨率为 $1\ \text{ns}$, 并通过安装在 128G 内存 DELL 600054-64 服务器上的 Insight V3V 4G 软件控制, 并进行后处理。

在 t 和 $t+\Delta t$ 时刻, 通过同步器触发激光器和 3 个相机分别进行一次采集, 每次采集 3 张照片, 通过照片先确定粒子在 XOY 平面位置; 由于 3 个相机位置不同, 同一粒子在 3 个照片中位置不同, 匹配得到三角形, 再将此三角形同标定得到的三角刻度对比, 确定粒子在 Z 方向位置; 基于 Ohmi 等^[22]的松弛法和 Pereira 等^[23]的改进方法将测量区域粒子分成群, 根据周围粒子运动规律确定粒子配对可能性, 将粒子群配对可能性进行迭代计算, 直到收敛。通过 V3V 实验的圆盘校准实验, 发现速度校准误差仅为 0.806% , 速度测量十分可靠。

2 实验结果与讨论

2.1 整体流形分析

本实验对如图 2 的测量区域进行 V3V 测量, 配对得约 18000 个矢量。由 V3V 速度数据可知, 流体

最大速度 $V_{\max}=0.87V_{\text{tip}}$ (叶尖速度), Rushton 桨叶附近的射流以径向射流和环向流动为主, 桨叶后角度 $\theta=30^\circ$ 最大径向速度 $u_{\max}=0.69V_{\text{tip}}$, 最大环向速度 $w_{\max}=0.8V_{\text{tip}}$, 最大轴向速度 $v_{\max}=0.25V_{\text{tip}}$ 较小, 这是由涡轮桨浆型决定的。V3V 测得 $\theta=30^\circ$ 截面速度分布情况与宋戈^[16]的三维 PIV 速度分布规律基本一致。

由图 3 桨叶前端速度等值面和垂直切面图可以看出, 速度等值面成阶梯形, 桨叶前端速度突变明显, 径向射流十分显著; 且随着 θ 增大, 等值面沿径向向外扩展; 速度等值面左右两侧速度区别明显, 等值面前端区域为前叶片径向射流, 速度较大, 且有明显向上的速度, 尾涡受到周围流体的裹挟作用, 会同时具有向上的轴向速度。由于尾涡涡心速度很小, 速度等值面在所在尾涡位置 ($2z/W=0.5$, $r/R=1.3$) 成近似柱面状, 并将尾涡结构包裹在等值面内部。

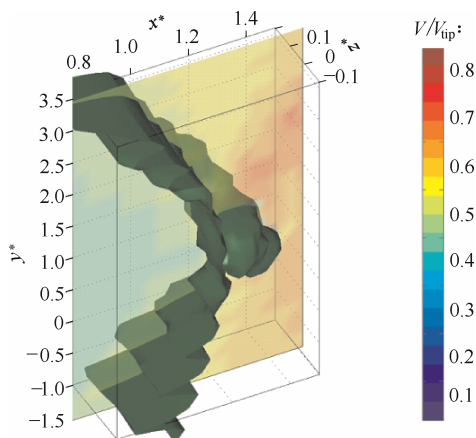
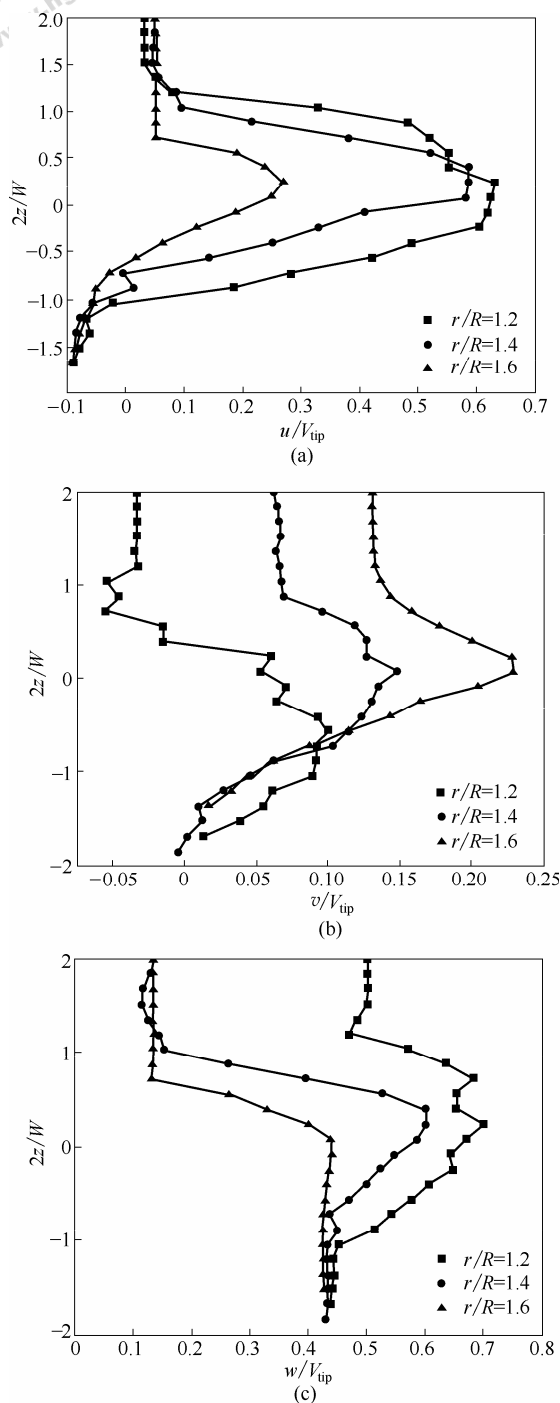
图 3 速度等值面和垂直切面图 ($Re=66007$)Fig.3 A isosurface and a vertical slice of normalized velocity ($Re=66007$)

图 4 为不同径向位置 V3V 速度分布, 从图可看出, 径向速度 u 和环向速度 w 最大高度在 $2z/W=0.3$ 位置, 随着 r/R 增大, 径向速度呈衰减趋势, 在 $r/R=1.2\sim 1.4$ 区域衰减较小, 在 $r/R=1.4\sim 1.6$ 位置 u 衰减明显, 从 $r/R=1.2\sim 1.6$, u 衰减 57% 。

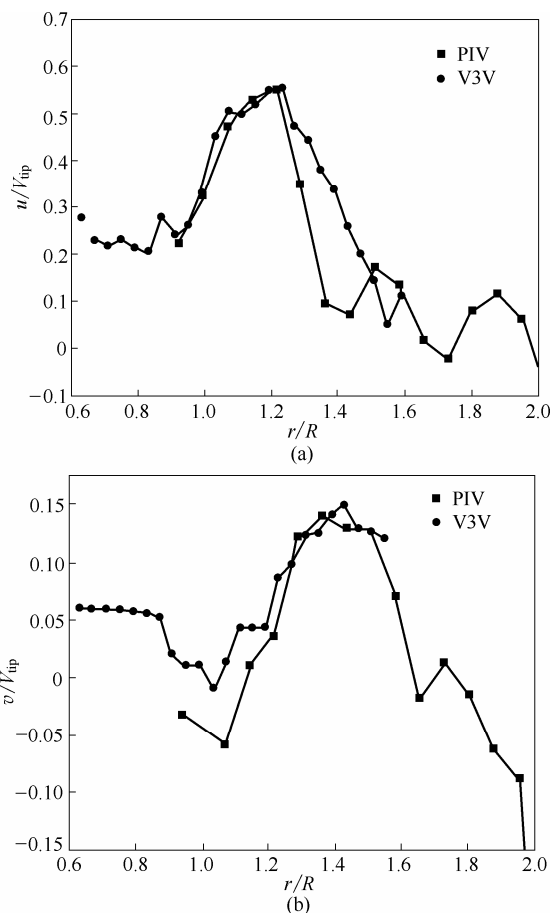
轴向速度 v 有明显增大的趋势, 主要是由于径向射流遇搅拌釜体后分流, 部分流体沿釜体向上运动, 另一部分向釜体底部运动, 无挡板搅拌槽对流体扰动较小, 运动过程中能量损失较小, 流体运动到釜体壁面时部分能量转化为轴向速度, 对 v 提升起到明显作用。因此, 并不能盲目通过设置挡板促进搅拌槽内流体的混合效果, 尤其是在对流体轴向速度有要求的搅拌设备中。

图4 不同径向位置 V3V 速度分布 ($Re=66007$, $\theta=30^\circ$)Fig.4 V3V velocity profiles for different radial location ($Re=66007$, $\theta=30^\circ$)

随着 r/R 增大, w 有明显的衰减趋势, 桨叶上、下方 w 衰减并不对称, 这是因为本实验采用的桨叶离底距离较小, 且搅拌槽为椭圆封头, 桨叶上、下方流体结构本身并不对称。但是 w 过大容易形成流体混合死区, 因此可以在略低于桨叶水平位置的釜体上设置挡板, 以改善流体混合效果。

图 5 为 V3V 和 PIV 标准化径向、轴向速度对

比 ($2z/W=0$, $\theta=30^\circ$, $Re=66007$), 由图可以发现, 在 $r/R=0.9\sim 1.6$ 的 V3V 和 PIV 测量重合区域速度整体吻合较好, 尤其是在 $r/R=1.2\sim 1.3$ 位置, 两实验结果轴向、径向速度差别非常小, 这是由于该区域流体为前桨叶产生的射流, 受搅拌槽内流体湍流程度影响很小。在 $r/R=1.3\sim 1.5$ 位置, 由于径向速度衰减较快, 环向速度相对较大, 使两次测量结果径向速度差增大, 但整体速度及其变化趋势一致。因此, V3V 和 2D-PIV 测量方法本身都十分可靠。

图5 V3V 和 PIV 标准化径向、轴向速度对比 ($2z/W=0$, $\theta=30^\circ$, $Re=66007$)Fig.5 Normalized radial and axial velocity from V3V and 2D-PIV ($2z/W=0$, $\theta=30^\circ$, $Re=66007$)

2.2 尾涡 V3V 结果与分析

图 6 为转速 $N=1.67\text{ s}^{-1}$ ($Re=66007$) 涡量等值面和竖直切面图。由图可以看出, 涡对等值面近似成圆柱面, 上下尾涡涡量等值面轴线基本保持平行, 但下尾涡较靠外, 是因为下尾涡运动比上尾涡稍快, 且下尾涡涡量耗散较快, 上尾涡涡量较下尾涡涡量略大; 涡量最大位置出现在 $\theta=30^\circ$ 位置, 尾涡涡量等值面轴线显然与水平面不平行, 而是与其成一定

的角度,即尾涡有明显向上运动的趋势,这与 Kendra 等^[20]的结果有明显的突破,且符合 PIV 测量结果的尾涡运动趋势。径向射流遇筒体壁面分流,分别沿上、下两方向运动,在桨叶上部和下部分别形成了两个大型的椭圆形涡旋,尾涡右上方和右下方两涡量较大区域正是两涡旋中心位置。

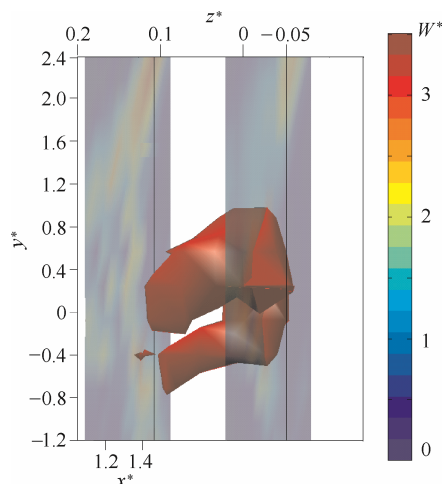


图 6 涡量等值面和竖直切面图 ($Re=66007$)

Fig.6 Isosurface and vertical slices of vorticity ($Re=66007$)

2.3 尾涡的 2D-PIV 分析

图 7 为桨叶后方不同角度处涡量云图。结果表

明,在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,上下尾涡涡量大小没有明显差异,叶片产生的尾涡并不会在 30° 左右时即耗散完全,而是在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间尾涡涡量最大;且 60° 时,前叶片产生的尾涡依然清晰可见, $\theta > 60^\circ$ 时,尾涡基本耗散完毕。

图 8 为 Rushton 桨尾涡涡心发展轨迹比较,由图可以看出,上下尾涡运动轨迹不对称,下尾涡运动比上尾涡稍快,但其衰减也较快;由于受流体自由液面影响, Rushton 桨产生的径向射流并不是沿桨叶径向水平运动,而是向上倾斜,角度在 10° 左右;涡对的轴向速度在 30° 附近出现明显的衰减,上下尾涡涡心轴向运动轨迹基本平行。 $\theta=35^\circ$ 时,尾涡的轴向速度明显下降,尾涡涡心轴向位置始终不会超出叶片宽度,这是由涡轮桨桨型决定的。

2.4 各向异性分析

湍动能 k 的严格计算公式需要 3 个速度分量的均方根,量纲 1 的湍动能 k/V_{tip}^2 定义为

$$k/V_{tip}^2 = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)/V_{tip}^2 \quad (2)$$

基于各向同性假设的量纲 1 的湍动能 k/V_{tip}^2 定义为

$$k/V_{tip}^2 = \frac{3}{4}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)/V_{tip}^2 \quad (3)$$

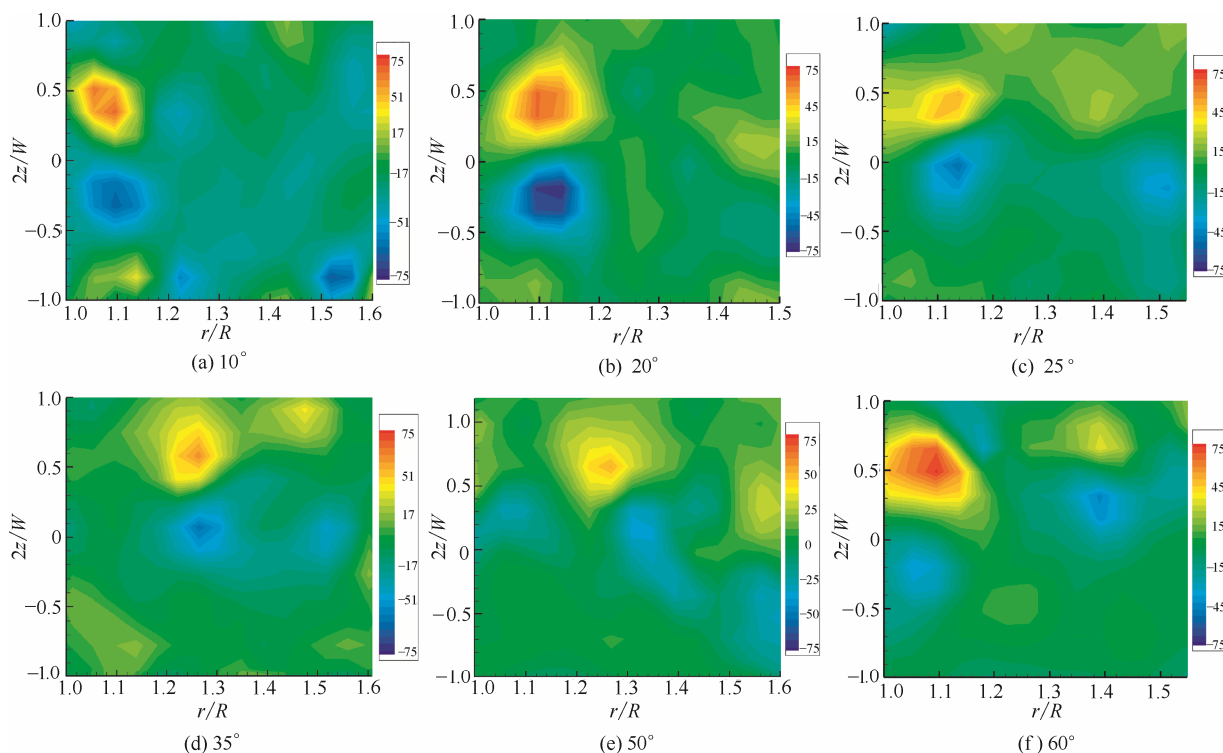


图 7 桨叶后方不同角度处涡量云图

Fig.7 Contours of trailing vortices located at different angle behind an impeller blade

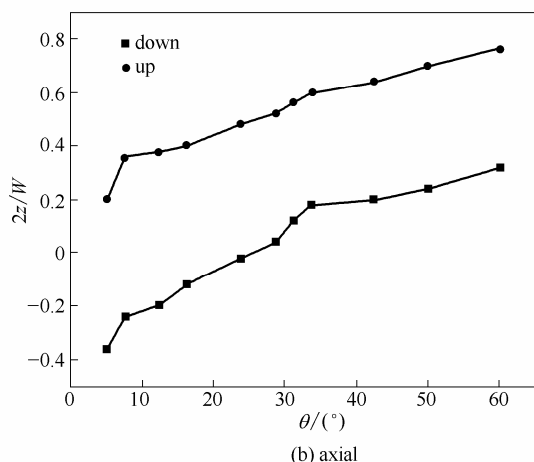
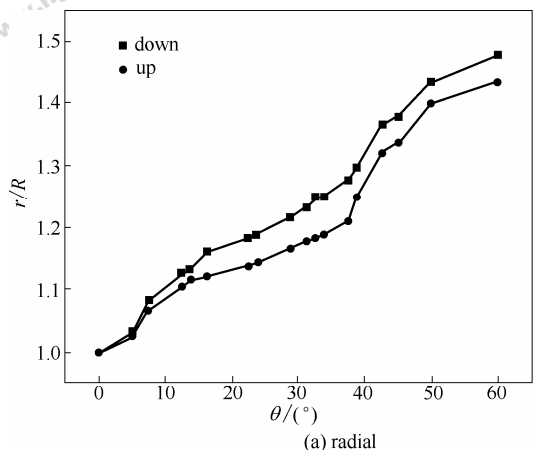
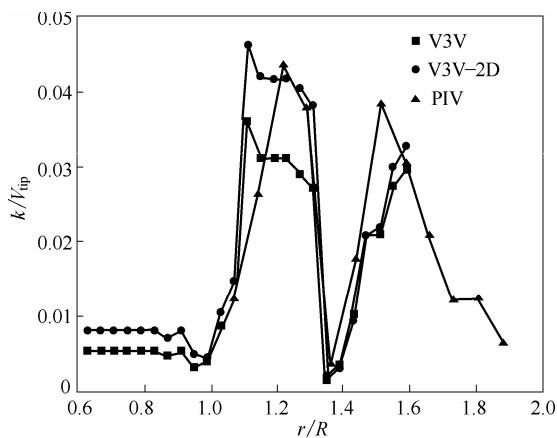


图 8 Rushton 桨尾涡发展轨迹比较

Fig.8 Comparison of trailing vortices of Rushton impeller

本研究分别用 V3V (u, v, w) 速度根据式 (2), 用 V3V(u, v) 速度和 2D-PIV (u, v) 速度根据式 (3) 计算得量纲 1 的湍动能。图 9 为湍动能分布比较 ($2z/W=0, \theta=30^\circ, Re=66007$)。从图可看出, 用 V3V(u, v) 速度和 2D-PIV (u, v) 速度, 基于各向

图 9 湍动能分布比较 ($2z/W=0, \theta=30^\circ, Re=66007$)Fig.9 Normalized turbulent kinetic energy for three methods
($2z/W=0, \theta=30^\circ, Re=66007$)

同性假设计算得到的湍动能在测量重合区吻合非常好, 这说明 V3V 和 2D-PIV 测量方法本身没有问题。但在桨叶附近和尾涡所处的射流区, 基于各向同性假设计算湍动能较用 V3V (u, v, w) 直接计算得到湍动能大 25%~33%, 而其余位置误差很小, 基本小于 10%。因此, 在叶片附近和尾涡所在湍流区域趋于各向异性, 其余位置则满足各向同性假设。在叶片附近和尾涡所在各向异性湍流区, 2D-PIV 的基于各向同性假设预测环向速度及湍动能方法不可靠。

3 结 论

(1) 应用 V3V 方法测量了涡轮桨附近区域的三维流场, 得到了尾涡涡对的三维结构; 分析了桨叶附近流体的 u, v, w 沿径向分布情况, 发现 $\theta=30^\circ$ 时 V3V 速度分布和宋戈^[16]三维 PIV 速度分布规律一致; 对比了 V3V 和 2D-PIV 的 u, v 分布规律, 发现在桨叶射流区速度吻合最好; 由于搅拌槽为椭圆封头, 上下结构不对称, 桨叶上、下方环向速度不对称, 下方环向速度较大, 可以在低于桨叶高度位置设置挡板, 以避免混合死区存在。

(2) 用 2D-PIV 方法对涡轮桨搅拌槽内尾涡的发展规律进行研究, 发现涡轮搅拌桨尾涡在 $\theta=60^\circ$ 时依然清晰可见, 由于受自由液面影响, 尾涡轴向速度向上, 下尾涡径向速度比上尾涡稍快, 衰减亦较快; 受射流速度减小影响, 涡对的轴向速度在 $\theta=35^\circ$ 附近出现明显的衰减。

(3) 用 V3V(u, v, w) 速度根据式 (2), 用 V3V(u, v) 和 2D-PIV (u, v) 速度根据式 (3) 计算得量纲 1 的湍动能。发现桨叶附近和尾涡所处的射流区, 基于各向同性假设计算湍动能较用 (u, v, w) 直接计算得到湍动能大 25%~33%, 而其余位置差别小于 10%。因此, 在叶片附近和尾涡所在湍流区域趋于各向异性, 其余位置则满足各向同性假设。在叶片附近和尾涡所在各向异性湍流区, 基于各向同性假设预测环向速度的 2D-PIV 方法不可靠。

符 号 说 明

- D —— 桨叶直径, m
- H —— 液面高度, m
- k —— 湍动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
- N —— 桨叶转速, s^{-1}
- R —— 涡轮桨桨叶半径, m
- Re —— Reynolds 数

r ——坐标系径向坐标, m
 Δr ——尾涡涡对径向距离, m
 T ——搅拌槽直径, m
 u ——轴向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\bar{u}^2$ ——径向脉动速度平方的均值
 V ——流体速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 V_{tip} ——叶端线速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 v ——径向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\bar{v}^2$ ——轴向脉动速度平方的均值
 W ——桨叶叶片宽度, m
 W^* ——标准化角流量
 w ——环向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\bar{w}^2$ ——环向脉动速度平方的均值
 x^* —— x/R
 y^* —— $2y/W$
 Z ——坐标系轴向坐标, m
 z^* —— z/R
 Δz ——尾涡涡对轴向距离, m
 θ ——桨叶后角度, ($^\circ$)
 ν ——流体运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 下角标
 max ——最大值

References

- [1] 刘敏珊, 张丽娜, 董其伍. 涡轮桨搅拌槽内混合特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2009, **30**(10): 1700-1702.
LIU M S, ZHANG L N, DONG Q W. Numerical research of mixing characteristics in a stirred tank with turbine impellers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, **30**(10): 1700-1702. $\bar{v}^2$
- [2] 苗一, 潘家祯, 闵健, 等. 涡轮桨搅拌槽内混合过程的大涡模拟[J]. 华东理工大学学报, 2006, **32**(5): 623-628.
MIAO Y, PAN J Z, MIN J, *et al.* Large eddy simulation of mixing process in stirred tank with Rushton turbine [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2006, **32**(5): 623-628.
- [3] LIU X H, BAO Y Y, LI Z P, *et al.* Analysis of turbulence structure in the stirred tank with a deep hollow blade disc turbine by time-resolved PIV [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, **18**(4): 588-599.
- [4] SHARP K V, ADRIAN R J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine [J]. AIChE Journal, 2001, **47**(4): 766-778.
- [5] FENTIMAN N, LEE K, PAUL G, *et al.* On the trailing vortices around hydrofoil impeller blades [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1999, **77**(8): 731-740.
- [6] LI Z P, BAO Y Y, GAO Z M. PIV experiments and large eddy simulations of single-loop flow fields in Rushton turbine stirred tanks [J]. Chemical Engineering Science, 2011, **66**(6): 1219-1232.
- [7] 李志鹏, 高正明. 涡轮桨搅拌槽内单循环流动特性的大涡模拟[J]. 过程工程学报, 2007, **7**(5): 900-904.
LI Z P, GAO Z M. Large eddy simulation of single loop flow field in a Rushton impeller stirred tank [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, **7**(5): 900-904.
- [8] 程先明, 李志鹏, 高正明, 等. 涡轮桨搅拌槽内流动及尾涡特性研究[J]. 北京化工大学学报, 2009, **36**(6): 16-21.
CHENG X M, LI Z P, GAO Z M, *et al.* Characteristics of flow fields and trailing vortices in a stirred tank with a Rushton turbine [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2009, **36**(6): 16-21.
- [9] ZHAO J, GAO Z M, BAO Y Y. Effects of the blade shape on the trailing vortices in liquid flow generated by disc turbines [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, **19**(2): 232-242.
- [10] ESCUDIE R, BOUYER D, LINE A. Characterization of trailing vortices generated by a Rushton turbine [J]. AIChE Journal, 2004, **50**(1): 75-86.
- [11] ESCUDIE R, LINE A. A simplified procedure to identify trailing vortices generated by a Rushton turbine [J]. AIChE Journal, 2007, **53**(2): 523-526.
- [12] LIU X H, BAO Y Y, LI Z P, *et al.* Particle image velocimetry study of turbulence characteristics in a vessel agitated by a dual Rushton impeller [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, **16**(5): 700-708.
- [13] PAN C M, MIN J, LIU X H, *et al.* Investigation of fluid flow in a dual Rushton impeller stirred tank using particle image velocimetry [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, **16**(5): 693-699.
- [14] CHARA Z, KYSELA B, KONFRST J, *et al.* Study of fluid flow in baffled vessels stirred by a Rushton standard impeller [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, **272**(part 3): 614-628.
- [15] KHAN F R, RIELLY C D, BROWN D A R. Angle-resolved stereo-PIV measurements close to a down-pumping pitched-blade turbine [J]. Chemical Engineering Science, 2006, **61**(9): 2799-2806.
- [16] 宋戈. 涡轮桨搅拌槽内湍流特性的三维 PIV 实验研究[D]. 北京化工大学, 2012.
SONG G. The experiment investigation of fluid characteristics in the stirrer tank using STEREO PIV [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [17] FLAMMANG B E, LAUDER G V, TROOLIN D R, *et al.* Volumetric imaging of shark tail hydrodynamics reveals a three-dimensional dual-ring vortex wake structure [J]. Proceedings: Biological Sciences, 2011, **278**(1725): 3670-3678.
- [18] CHENG B, SANE S P, BARBERA G, *et al.* Three-dimensional flow visualization and vorticity dynamics in revolving wings [J]. Experiments in Fluids, 2013, **54**(1423): 1-12.
- [19] KALMBACH A, BREUER M. Experimental PIV/V3V measurements of vortex-induced fluid-structure interaction in turbulent flow — a new benchmark FSI-PfS-2a [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, **42**(4): 369-387.
- [20] SHARP K V, HILL D, TROOLIN D, *et al.* Volumetric three-component velocimetry measurements of the turbulent flow around a Rushton turbine [J]. Experiments in Fluids, 2010, **48**(1): 167-183.
- [21] HILL D, TROOLIN D, WALTERS G, *et al.* Volumetric 3-component velocimetry (V3V) measurements of the turbulent flow in stirred tank reactors [C]// Proc. 14th Intern. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 2008: 1-12.
- [22] OHMI K, LI H. Particle-tracking velocimetry with new algorithms [J]. Measurement Science and Technology, 2000, **11**(6): 603-616.
- [23] PEREIRA F, STÜER H, GRAFF E C, *et al.* Two-frame 3D particle tracking [J]. Measurement Science and Technology, 2006, **17**(7): 1680-1692.