

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.006

2 斜叶-框式组合桨釜内流场实验研究

高晓斌¹, 包健², 刘龙炜¹, 杨其洲¹, 周勇军¹

(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:为将2斜叶-框式组合桨高效应用于实际工程,课题组以不同质量分数的甘油-水溶液为搅拌介质,通过粒子图像测速技术(PIV)对该改进型框式组合桨搅拌釜内的流动特性进行实验研究,分析了桨间距、顶桨直径和搅拌介质黏度变化对釜内流场产生的影响。研究表明:随着桨间距的增加,2桨叶间流体的循环效果先增强后减弱,桨间距 $C_2 = 0.52H$ 时2桨叶配合最佳;顶桨直径 $D_1 = 250$ mm时形成2个涡合能力较好的涡流,此时釜内流体的整体混合情况较好;随着黏度的增大,2桨叶间扰动增强,整个搅拌釜内速度分布变得更加均匀,表明改进型框式组合桨更适用于黏度较高的溶液中。研究结果可为2斜叶-框式组合桨在聚酯合成工业实际工程生产中提供相关参考。

关键词:2斜叶-框式组合桨;粒子图像测速;流场特性;桨间距

中图分类号:TQ027;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)05-0038-06

Experimental Investigation of Flow Dynamics in Stirred Tank with Two-Pitched Blade-Frame Type Combined Impellers

GAO Xiaobin¹, BAO Jian², LIU Longwei¹, YANG Qizhou¹, ZHOU Yongjun¹

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

Abstract: In order to efficiently apply two-pitched blade-frame type combined impellers in practical engineering, the flow characteristics of glycerol-water solution of different mass fractions in the stirred tank with improved frame type combined impellers were experimentally studied by using particle image velocimetry (PIV). The effects on the flow field arising from the distance between two impellers, the diameter of the top impeller as well as the viscosity of stirring medium were investigated. The experimental results show that the circulating effect of fluid between two blades increases first and then decreases with the increase of the impeller spacing. When the impeller spacing $C_2 = 0.52H$, the two blades cooperated best. The two vortexes of converging capacity are formed when the top impeller diameter $D_1 = 250$ mm, and the overall mixing of the fluid in the tank is better. With the increase of the viscosity, the disturbance between the two blades increases, and the velocity distribution in the whole stirred tank becomes more uniform, suggesting that the improved frame type combination impeller is more suitable for solutions with higher viscosity. The research results provide a reference for the application of the two-pitched blade-frame type combined impellers in polyester synthetic industry practical engineering.

Keywords: two-pitched blade-frame type combined impellers; PIV (Particle Image Velocimetry); flow field characteristic; impeller spacing

收稿日期:2023-02-24;修回日期:2023-05-30

基金项目:国家自然科学基金(52175171)。

第一作者简介:高晓斌(1999),男,甘肃天水人,硕士,主要研究方向为搅拌技术与装备。E-mail:2352065741@qq.com

搅拌是过程工业常用的单元操作,广泛应用于石油、冶金、制药、聚合物和食品等行业^[1-2]。仅在三大人工合成高分子聚合物材料的生产过程中,搅拌设备就占据了相关设备总数的85%以上^[3]。搅拌桨作为聚酯合成反应釜中极其重要的部件,桨叶的合理设计与优化可提高搅拌效率并缩短聚酯合成反应时间。因而,研究搅拌釜内流体流动特性,有助于了解搅拌混合过程机理,对搅拌桨叶的结构优化设计、提高生产效率等具有重大意义^[4-6]。

粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术具有对流场无干扰、测量精度高、多点测量和可测瞬态流场等优点^[7],被广泛地应用到搅拌设备的流场测量^[8-10]。付勤民等^[11]采用粒子图像测速技术对双层改进型INTER-MIG桨搅拌槽内流体进行实验研究,实验结果表明转速增加引起桨叶附近湍动增强,但整体流型变化不大;袁建平等^[12]以黄原胶为搅拌介质,采用PIV技术研究了4斜叶桨带挡板搅拌槽内流场流动情况,发现搅拌转速不仅改变流场的流型,也改变流场的流速、湍动能及涡量的分布和大小;周勇军等^[13]对框式组合桨进行模拟分析,并利用PIV技术进行实验验证,研究结果表明桨间距的增加导致2桨间对流减弱,不利于2桨间流体的混合,当桨间距与釜内径的比值为0.77时,搅拌釜内的整体流动情况较好;方玉建等^[14]利用PIV技术对Lin-A315桨搅拌槽内非牛顿流体的内流特性进行研究,发现当非牛顿流体的质量分数较低时宜选择中等转速,当非牛顿流体的质量分数较高时宜选择高转速以有利于溶液混合和能源节约。但是,国内外对于2斜叶-框式桨组合使用的实验研究鲜有报道。

综上,课题组采用PIV实验对2斜叶-框式组合桨搅拌釜内的流场特性进行实验研究,重点考察桨间距、顶桨直径和搅拌介质黏度变化的影响,以期能为聚酯合成工业搅拌桨参数优化提供参考。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

实验采用的搅拌釜底部为不锈钢标准椭圆形封头,筒体为圆柱形透明有机玻璃,为避免圆柱形筒体壁

面对激光产生折射,故将搅拌釜置于900 mm × 900 mm × 1 000 mm的透明有机玻璃方槽中进行实验,并保证方槽内清水液面与搅拌釜内介质液面平齐。此外还需用黑色遮光布将方槽除激光入射面和相机拍摄面以外的部分遮住,防止在拍摄平面产生明亮的光斑,从而造成较大的实验误差。实验前需将方槽内气泡消除,同时用黑色的哑光漆对改进型框式组合桨和搅拌轴表面进行均匀喷涂,防止激光照射其表面时形成散射光对拍摄结果造成不利影响。

图1为2D-PIV系统的连接示意图,双脉冲激光器前后发射出的A、B 2束激光在搅拌釜内呈现出2个明亮的平面,同时CCD相机在很短时间内连续拍摄到A帧和B帧的示踪粒子图像,通过专用的Insight 4G软件计算出示踪粒子的位移,然后计算出每个粒子的速度,最后通过Tecplot后处理软件得到实验所测量区域的流场分布。

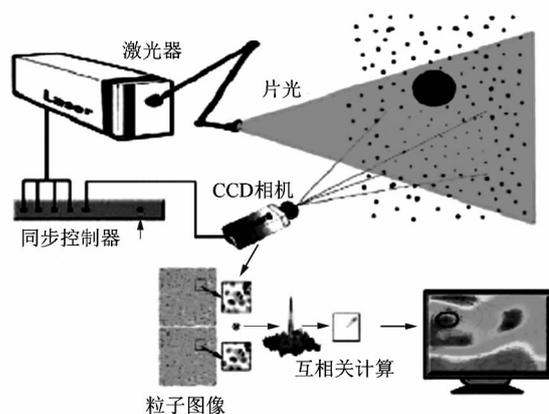


图1 2D-PIV系统连接示意图

Figure 1 2D-PIV system connection diagram

1.2 搅拌系统结构尺寸

搅拌釜整体结构与尺寸如图2所示。搅拌釜内径 T 为430.0 mm、高度 H 为675.0 mm、壁厚 δ 为10.0 mm,釜内液面高度为 h 。

组合桨由顶桨2斜叶桨和底桨框式搅拌桨组成,其直径分别用 D_1 和 D_2 表示。底桨离釜底距离为 C_1 ,2桨层间距为 C_2 ,搅拌转速 N 为61.8 r/min,2斜叶桨倾斜角度 α 为 60° ,组合桨桨叶宽度均为 b 、厚度均为 w 。此外框式桨底部刮板处为标准半椭圆,搅拌釜及桨叶主要尺寸如表1所示。

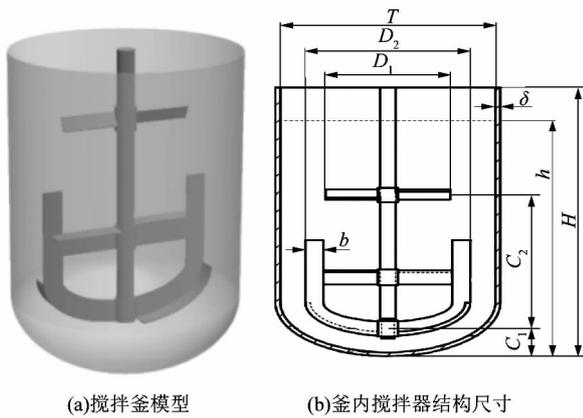


图 2 搅拌釜模型与尺寸

Figure 2 Model and size of stirred tank

表 1 搅拌釜及桨叶主要参数表

Table 1 Main parameters of stirred tank and impellers

mm							
T	H	h	δ	C_1	D_2	w	b
430.0	675.0	605.0	10.0	59.5	330.0	2.0	36.0

1.3 实验方法

实验首先以纯水为搅拌介质,当 $C_1 = 0.09H$ 时考察不同桨间距对釜内流动特性的影响,确定出最佳桨间距。选择最佳桨间距,以纯甘油为搅拌介质,考察顶桨直径 D_1 分别为 200, 250 和 300 mm 的 3 种工况下釜内流体流动状态,确定出最佳顶桨直径。选择最佳桨间距和顶桨直径,改变搅拌釜内甘油-水溶液的质量分

数,研究黏度变化对釜内流型分布的影响,垂直坐标 z 对搅拌釜高度 H 做无因次化处理为 z/H , 径向坐标 r 对搅拌釜半径 R 做无因次化处理为 r/R , 其中 $R = 215$ mm。通过 NDJ-5S 数显黏度计测量不同质量分数甘油-水溶液的黏度,不同质量分数下甘油-水溶液的密度及黏度值如表 2 所示。

表 2 不同质量分数下甘油-水溶液的密度及黏度值

Table 2 Density and viscosity of glycerol-water solution with different mass fractions

甘油质量 分数/%	温度/ ℃	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	介质黏度/ ($mPa \cdot s$)
70	20	1.168	57.6
80	20	1.198	156.8
90	20	1.228	339.2
100	20	1.261	1 205.6

2 结果与讨论

2.1 桨间距对搅拌釜内流动特性的影响

图 3 所示为不同桨间距下纯水的实验流型,纵坐标 z/H 均表示轴向无因次高度,横坐标 r/R 均表示径向无因次半径。从图中可以看出,当桨间距 $0.44H \leq C_2 < 0.52H$ 时,随着桨间距的增大,2 桨叶间的漩涡区域增大,涡心位置开始向釜壁方向移动,且桨间流体的相互作用减弱,致使 2 桨间的流体处于 1 个大循环当中,仅在近壁处有少量流体脱离漩涡;此外随着桨间距的增大,上层桨叶端右上侧漩涡逐渐增大,这是由于上

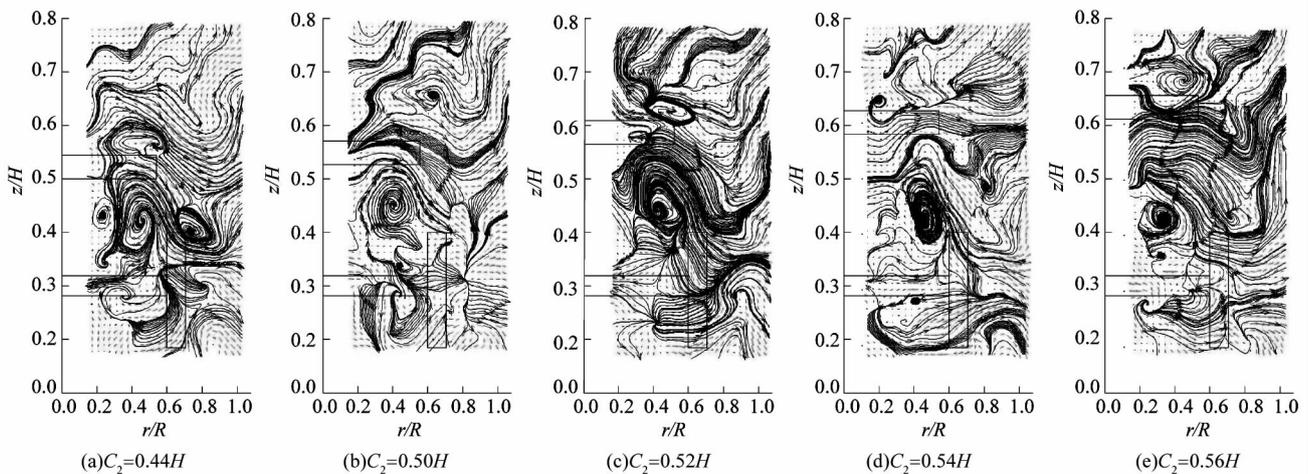


图 3 不同桨间距下纯水的实验流型

Figure 3 Experimental flow streamline of pure water with different impeller spacing

层桨叶的上移带动泵送流体的上移,上部流体动能增加,使得流体斜向右上方运动至 $r/R=0.6$ 处动能减弱后才在上层桨叶的泵吸作用下向下流动并在其叶端产生漩涡,这也使得上部区域流体整体混合效果增加。当桨间距 $0.52H < C_2 \leq 0.56H$ 时,2桨叶间的漩涡变小,循环范围减小,上层桨叶下侧区域流体出现“平行流”,致使上层桨叶的上下部分区域流体分离,使得釜内整体混合效果变差。综合考虑,当桨间距 $C_2 = 0.52H$ 时,釜内的整体流动情况较好。

2.2 顶桨直径对釜内流动特性的影响

图4为不同顶桨直径下纯甘油的实验流型,从图中可以看出,釜内流型皆以 $z/H=0.28$ 为分界线,并在其上部出现1个较大的“椭圆形”漩涡。当顶桨直径 $D_1=200$ mm时,“椭圆形”漩涡的循环区域仅到 $z/H=0.78$ 处。当桨径增大至250 mm时,“椭圆形”漩涡的椭圆长径增大、短径减小,其长径的增大使整个漩涡延

伸至近液面处,使得 $z/H=0.28$ 上部区域流体几乎全部进入循环混合状态,而其短径的减少使得涡心变窄,循环死区减小。当桨径增大到300 mm时,“椭圆形”漩涡在顶桨下侧部分的“短径”沿轴向持续减小,致使整个漩涡变为“倒梨形”,并在 $z/H=0.78$ 位置时流体脱离漩涡继续向左上方运动至近液面处平行流向搅拌轴,这不利于上部区域流体的整体混合。当顶桨直径 D_1 为200 mm和250 mm时,底桨处流体沿右上方向流动至 $z/H=0.27 \sim 0.29$ 位置处时仍然保持倾斜向上的流势,这使得在 $z/H=0.28$ 处的下部区域流体与其上部区域流体直接形成“连接”,釜内流体间可以相互混合;而桨径 $D_1=300$ mm时,底桨处流体沿右上方向流动至 z/H 为 $0.27 \sim 0.29$ 位置处时几乎处于平行流动,使得上、下部流体在 $z/H=0.28$ 附近产生分离,不利于釜内流体间的整体混合。上述分析表明顶桨直径为250 mm时,釜内的整体流动情况较好。

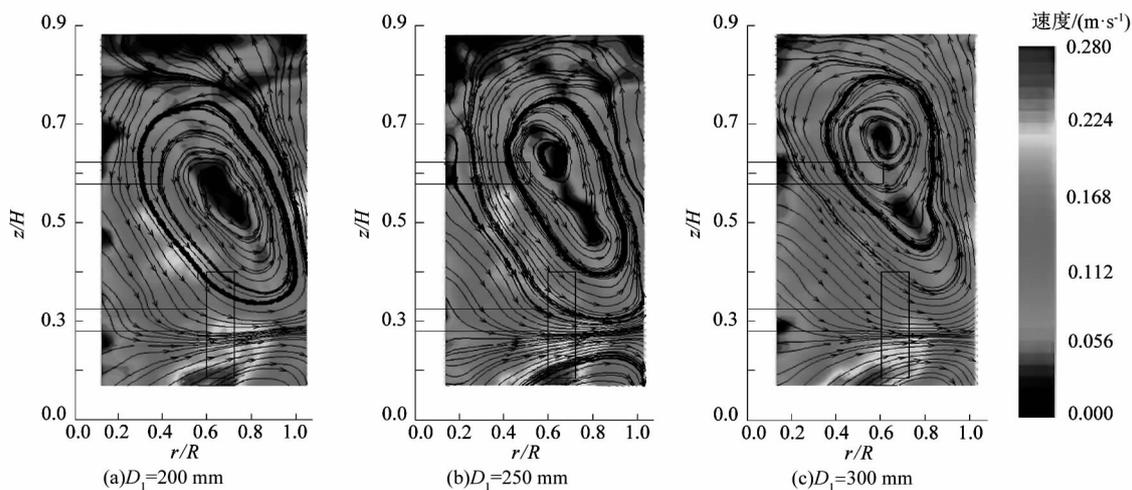


图4 不同顶桨尺寸下纯甘油的实验流型

Figure 4 Experimental flow streamline of pure glycerin with different top impeller sizes

2.3 黏度对釜内流动特性的影响

2.3.1 黏度对流体流型的影响

图5为不同黏度下甘油-水溶液的实验流型,观察图(a)和(b)可以发现,当介质黏度较低时,釜内流体流型较为紊乱,流体间的相互撞击造成动能耗散,导致釜内高速区域面积较小且分布比较集中;另外搅拌釜各区域之间无明显的“连接流”,这也不利于釜内流体的整体循环。如图5(c)所示,当溶液黏度 $\mu = 339.2$ mPa·s时,釜内存在2个明显的漩涡,且其之间存在

“连接流”,使2个漩涡所处区域液体有较好的混合效果,但在 $z/H=0.60$ 以上且 $r/R=0.56$ 以内区域的液体脱离2个主漩涡皆沿轴向向上运动,从而使此区域流体流速较低。如图5(d)所示,当介质黏度为1205.6 mPa·s(纯甘油)时,釜内形成了很好的循环,下桨叶排出流体与壁面碰撞后一部分向上运动,与上桨叶排出流体汇合后在 $z/H=0.3$ 的上部区域形成1个跨度比较大的漩涡,且与其下部区域之间存在较好的“连接流”,此时整个釜内流体处于大循环中,使得釜内混

合效果达到最佳。从图中还可以看出随着黏度的增大,釜内高速区域面积增大,流速分布更加均匀,釜内流型呈现出规律变化,局部小漩涡减少,逐渐形成主要

的大漩涡,并且 2 层桨叶间扰动增强,对釜内流体整体混合有利。

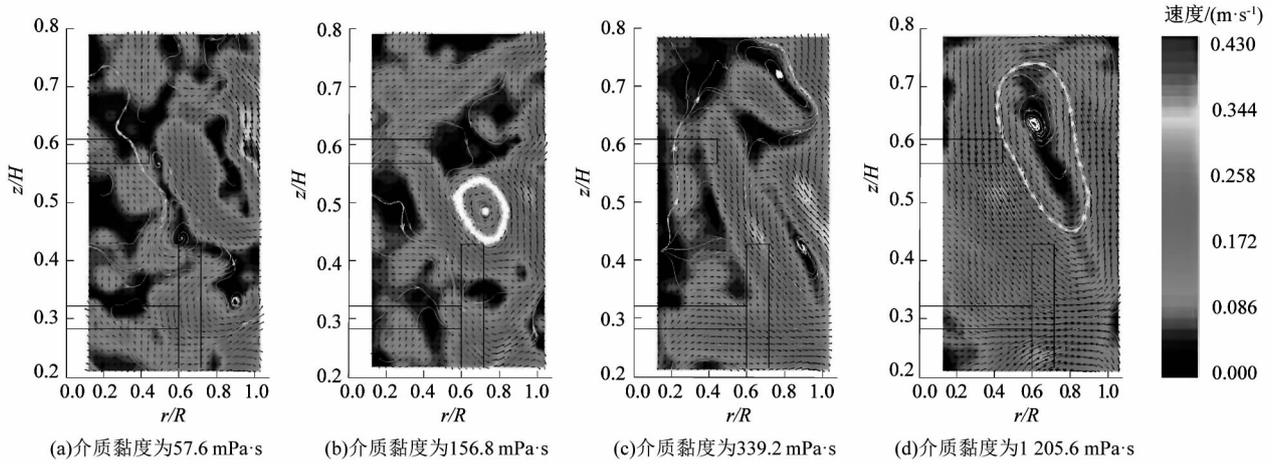


图 5 不同黏度下甘油-水溶液实验流型

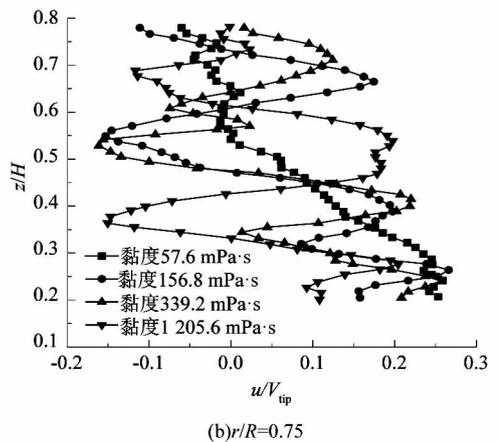
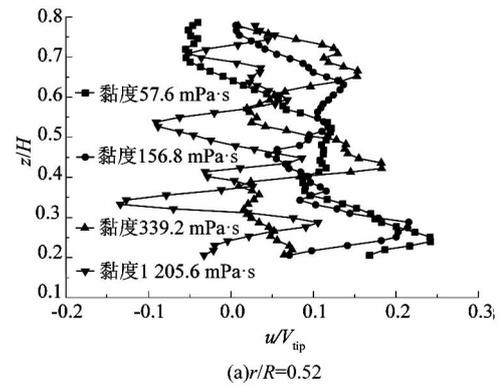
Figure 5 Experimental flow streamline of glycerol-water solution with different viscosity

2.3.2 黏度对速度分布的影响

为进一步研究黏度对流场内流动特性的影响,分别选取釜内不同径向位置 $r/R = 0.52, 0.75$ 和 0.99 处流体的径向速度进行定量分析,并对径向速度进行无量纲化处理。采用 u 表示流场中的径向速度,桨叶的叶端点速度 $V_{tip} = \pi DN/60$, 单位为 m/s , 式中 D 在顶桨处取 D_1 、在底桨处取 D_2 。

如图 6 所示为不同径向位置处的无量纲化处理径向速度分布图。从图中可以看出当介质黏度为 $1205.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,在顶桨区附近径向速度分布主要为负值,在底桨区附近径向速度分布主要为正值,说明此时釜内流体处在 1 个大循环中;当溶液黏度减小时,沿轴向分布的径向速度出现强烈的波动。如图 6(a) 所示,当介质黏度为 $339.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,在顶桨叶以下区域其径向速度分布近似于黏度为 $1205.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,且整体速度大于 0;当介质黏度降至 $156.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,虽然 2 桨间速度出现波动,但整体速度仍然大于 0,说明此时该径向位置处未进入循环区;而当介质黏度降至 $57.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,径向速度沿轴向的分布出现了强烈正负波动,说明局部区域出现了小循环。如图 6(c) 所示,在近壁处,当介质黏度降至 $339.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 时,2 桨位置处依然呈现正/负峰值,说明此时近壁处流体依然处于

釜内循环中;但当介质黏度继续降低时,近壁处的径向速度波动十分强烈,流体与壁面碰撞较为激烈,这也表明该框式组合桨不适用于低黏度流体的混合。



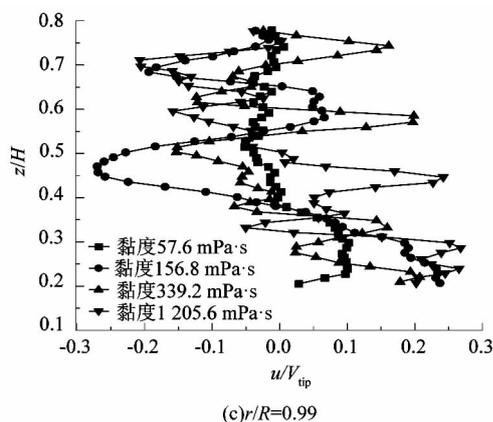


图6 无因次化径向速度分布

Figure 6 Dimensionless radial velocity distributions

3 结论

课题组利用 PIV 技术对 2 斜叶-框式桨搅拌釜内流动特性进行实验研究,考察了桨间距、顶桨直径和搅拌介质黏度对流场的影响,得到以下结论:

1) 2 斜叶-框式组合桨搅拌釜内以 $C_2 = 0.52H$ 为临界桨间距,小于该值时,随着桨间距变大,上层桨叶的上部流体由紊乱到产生上部整体循环的漩涡,并与下部流体直接产生“连接流”;大于该值时,随着桨间距增大,2 桨间的轴向流动逐渐减弱,径向流动逐渐增强,釜内出现分区流动现象,不利于釜内液体整体混合。

2) 顶桨直径的变化对釜内流型产生了较为明显的影响。当 $D_1 = 250$ mm 时, $z/H = 0.28$ 处上部区域流体几乎全部进入循环形成 1 个大漩涡,且漩涡的涡合能力较强,另外上下部流体间有连接流动,釜内流体处于相互混合状态;顶桨直径增大或减小时,近液面部分流体脱离大漩涡斜向上流动,不利于釜内整体循环,且当 $D_1 = 300$ mm 时釜内流体在 $z/H = 0.28$ 处出现“平行流”,釜内流体间产生分离。

3) 黏度对搅拌釜内流型的影响比较大。黏度较低时,釜内出现多个涡合能力较差的小漩涡,不利于整

体混合;随着黏度的增大,釜内流体形成大的循环,且流速分布更加均匀,说明 2 斜叶-框式组合桨不适用于低黏度流体。在黏度为 $339.2 \sim 1205.6$ mPa·s 时,釜内流体有良好的混合效果。

参考文献:

- [1] 杨锋苓,梁国林,张翠勋,等. 疏水 Rushton 搅拌桨的减阻性能[J]. 化工进展,2022,41(9):4682-4690.
- [2] 刘作华,周毅林,熊黠,等. 逆流桨强化搅拌槽内流体混沌混合及流场结构失稳研究[J]. 化工学报,2022,73(1):222-231.
- [3] 梁开一. 斜轴式搅拌反应釜内部流动特性及流固耦合研究[D]. 甘肃:兰州理工大学,2021:1.
- [4] 杨阳,赵建平. EPS 聚合反应釜内混合过程的数值模拟[J]. 轻工机械,2012,30(6):1-4.
- [5] LI X J, GUAN X P, ZHOU R T, et al. CFD simulation of gas dispersion in a stirred tank of dual rushton turbines[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering,2017,15(4):20160221.1-13.
- [6] 罗松,周启兴,周清泉. 六斜叶搅拌槽混合特性研究[J]. 机电工程技术,2022,51(11):178-180.
- [7] 厉鹏,刘宝庆,金志江. 搅拌釜内流场实验研究与数值模拟的进展[J]. 化工机械,2010,37(6):799-804.
- [8] KATJA J, SVEN W, ALEXANDER S, et al. Particle image velocimetry compared to CFD simulation of stirred vessels with helical coils[J]. Chemie Ingenieur Technik,2017,89(4):401-408.
- [9] JIN J, FAN Y. PIV experimental study on flow structure and dynamics of square stirred tank using modal decomposition[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2020,37(5):755-765.
- [10] 时雅滨,魏学龙,田明,等. 基于 Fluent 的硫酸钾结晶器实验验证及优化设计[J]. 化学工程,2020,48(7):11-15.
- [11] 付勤民,周勇军,薛亚运,等. 搅拌釜内双层改进型 INTER-MIG 桨流场实验研究[J]. 轻工机械,2016,34(6):46-50.
- [12] 袁建平,房洪芹,孙先朋,等. 四斜叶桨搅拌槽内部流场 PIV 试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(4):48-54.
- [13] 周勇军,袁名岳,孙存旭. 改进型框式组合桨搅拌釜内流场特性[J]. 化工进展,2019,38(12):5306-5313.
- [14] 方玉建,张敏,孙先朋,等. 机械搅拌槽内非牛顿流体流特性研究[J]. 机械工程学报,2021,57(20):244-253.