

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.012

基于 PIV 的四斜叶桨搅拌反应器中 非牛顿流体流场研究

孙先朋

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要:针对机械搅拌反应器内非牛顿流体混合效率问题,对机械搅拌反应器内非牛顿流体流场特性进行了研究。采用非接触式流场测试 PIV 技术,对试验规模四斜叶桨搅拌反应器内非牛顿流体流场进行了测量,讨论和分析了不同溶液浓度和不同搅拌速度对机械搅拌反应器内流场分布的影响。研究表明:搅拌速度不仅可以影响流体间对流强度,而且会改变流体流场结构;溶液浓度对流场结构影响不大,但影响桨叶下部高流速区域大小和流体的最大速度。

关键词:搅拌反应器;非牛顿流体;流场;粒子图像测速

中图分类号:TF351.5⁺2;TH69

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0511-05

Non-Newtonian fluid flow field in a 4PBT stirred reactor based on PIV

SUN Xian-peng

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the mixing efficiency of non-Newtonian fluids in a mechanical stirred reactor, the flow field characteristics of non-Newtonian fluids in a mechanical stirred reactor were studied. The non-contact flow field measurement particle image velocimetry technique was applied to measure the flow field of non-Newtonian fluids in a four pitch blade turbine stirred reactor of experimental scale. The effects of different concentration and stirring speed on the flow field distribution in a mechanical stirred reactor were discussed and analyzed. The results indicate that the stirring speed not only affects the convection intensity between fluids, but also changes the flow field structure of fluids. Solution concentration has little influence on the flow field pattern, but it affects the size of the high velocity region in the lower part of the impeller and the maximum velocity of the fluid.

Key words: stirred reactor; non-Newtonian fluid; flow field; particle image velocimetry(PIV)

0 引 言

厌氧消化是生产可持续能源和处理畜牧废物、城市固体废物和污水处理厂污泥等最成熟、最具有成本效益的工艺之一^[1]。影响厌氧消化效率的关键因素是混合。一方面,适当的混合有利于保持温度的恒定,确保菌群的活性,进而提高消化作用效率;另一方面,厌氧消化的底物是粘度随剪切速率增大而减小的非牛顿流体^[2-3],这种具有流变性质的非牛顿流体对混合效果要求较高。

搅拌反应器内流场分布特性是评价其混合效果的重要指标。因此,针对搅拌反应器内流场的研究对于分析其混合效果,进而提高反应器工作效率十分必要。

目前,针对搅拌反应器内流场的研究主要包括试验研究和数值模拟。由于非牛顿流体复杂的流变性质和现有湍流模型适用范围的局限性,针对非牛顿流体的数值模拟计算过程中很容易导致无法收敛。另外,数值模拟在求解复杂的方程过程中,存在建模误差和计算误差,其结果可靠性受到质疑^[4]。

收稿日期:2018-12-18

作者简介:孙先朋(1990-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事机械搅拌反应器内非牛顿流体混合特性方面的研究。E-mail:837082434@qq.com

随着试验分析手段的不断提高,粒子图像测速技术(PIV)已取得较大进展^[5],并已被广泛地应用于搅拌设备的流场测量^[6-10]。王璐璐等^[11]以甘油和水混合物作为试验流体,采用 PIV 技术研究了改进型 INTER-MIG 桨搅拌槽内流场;张敏革等^[12]运用 PIV 测量了双螺带螺杆搅拌桨搅拌聚合物溶液流场,发现了搅拌转速以及溶液浓度对搅拌槽内整体大循环特征影响不大。

但以上研究主要集中在粘度恒定的流体和大型搅拌桨低速搅拌,对小型搅拌桨以及搅拌粘度随剪切速率变化而变化的非牛顿流体流场的研究不是很多。因此,对于非牛顿流体流场的测量仍然是研究搅拌反应器的难点。

本文以四斜叶桨挡板搅拌反应器为研究对象,测量并分析溶液浓度和搅拌速度对反应器内部流场分布的影响。

1 试验部分

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。



图 1 PIV 实验装置图

1—电机;2—扭矩仪;3—槽和 4PBT45 (pitched blade turbine);4—支撑架;5—PIV 设备

试验装置包括搅拌设备和 PIV 系统。搅拌设备由

表 1 搅拌桨的尺寸参数

桨拌桨	桨片直径 D/mm	桨片宽度 W/mm	桨片厚度 b/mm	轴孔直径 d/mm
四斜叶桨	100	35	3	16

为了防止搅拌桨反光,影响拍摄效果,本研究在搅拌桨表面涂一层亚光黑漆,削弱激光的反射,减少测量误差。

1.2 CMC 溶液的制备及其流变性质

在试验中,透明的 CMC 溶液被用作非牛顿流体,其不同浓度的溶液都按如下方式制备:(1)把室温的 5 L 水倒入桶内;(2)用 20 cm 宽、4 cm 高的矩形搅拌桨搅拌水,通过控制搅拌速度使溶液混合充分,同时尽量减少空气中的气泡进入水中;(3)将 CMC 粉末以不大于 5 g/min 的速度加入到水中;(4)搅拌桨搅拌溶液 1 h ~ 2 h 之后,将搅拌桨取出,并将桶密封,将溶液在室温下放置 24 h。

三相变频 0.75 kW 的电机、搅拌轴、搅拌桨和搅拌槽构成。搅拌桨的旋转速度利用 L800-0015G-T4 变频器控制,其误差在 $\pm 0.5 \text{ r/min}$ 。

搅拌槽采用由透明有机玻璃组成的四挡板均匀分布的平底圆柱形容器,容器和四斜叶桨的相对位置如图 2 所示。

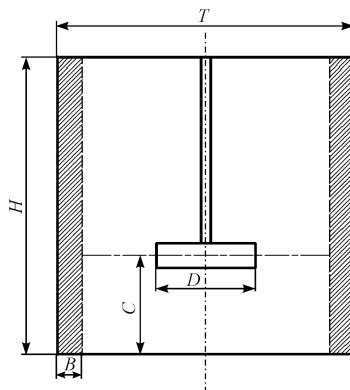


图 2 搅拌桨和槽的相对位置

T —容器直径; H —液体高度; B —挡板宽度; C —搅拌桨离底高度; D —搅拌桨直径

搅拌槽尺寸遵循以下规则: $T = H = 3D$, $B = 0.25D$, $C = D$ 。在本试验中, $D = 100 \text{ mm}$ 。

因为搅拌槽是圆柱形平底容器,为了使 PIV 激光束通过有机玻璃曲面的折射率最小化,圆柱形容器被放置并固定在 350 mm × 350 mm × 330 mm 方形有机玻璃容器中,形成内圆外方的容器。

为了减少激光散射对拍摄区域的影响,本研究用水填充夹层区域。容器的位置和激光扫过面与 PIV 相机正交,忽略水—有机玻璃界面和有机玻璃—空气界面的折射。

四斜叶桨由有机树脂材料 3D 打印制成,尺寸参数如表 1 所示。

非牛顿流体在流动时,其内部的应力状态非常复杂,不仅存在剪切应力,还存在法向应力。本研究对 3 种浓度(0.2%、0.3%和 0.4%,按质量分数计算)的羧甲基纤维素(CMC)溶液进行了流变测量,运用 TA 品牌的流变仪测量了羧甲基纤维素(CMC)溶液粘度,发现羧甲基纤维素(CMC)溶液粘度随剪切速率的升高而降低。

流变参数如表 2 所示。

表 2 CMC 溶液的流变参数

溶液	$K/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	n	$\gamma / (\text{range} \cdot \text{s}^{-1})$
0.4% CMC	0.447	0.56	115 ~ 12,000
0.3% CMC	0.184	0.64	140 ~ 12,000
0.2% CMC	0.044	0.75	140 ~ 12,000

溶液的流变参数符合非牛顿流体的幂律模型,剪切应力 τ 为:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ — 剪切应力; K — 稠度系数; $\dot{\gamma}$ — 平均剪切速率; n — 流变指数,无量纲。

1.3 粒子图像测速系统

该试验使用美国 TSI 公司 PIV 系统。该系统主要由脉冲激光器、光臂、激光脉冲同步器、200 万像素的 CCD 摄像机等元件组成,同时配备了一个嵌入 HART 相关算法,最小查询区域可达 4×4 像素的数据采集、分析和显示的 Insight 3G 软件。高强度的脉冲激光由脉冲激光器产生,经导光臂引导形成厚度约为 1 mm 片光源,照亮流场中的待测区域。通过与片光源面垂直放置的 CCD 摄像机精确地拍下时间间隔为 Δt 的 2 次脉冲激光曝光时的粒子图像,根据粒子位移和曝光时间间隔,利用 Insight 3G 软件可分析出流场中各点的速度矢量。

1.4 PIV 测量的拍摄剖面

因 PIV 激光照射区域和 CCD 相机的拍摄区域的局限性,为了能够清晰地拍摄到搅拌容器内主要区域的流场流动,试验分为 4 个拍摄区域,如图 3 所示。

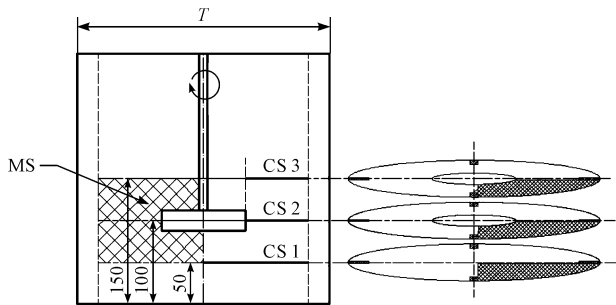


图 3 PIV 试验拍摄区域

图 3 中:CS1、CS2 和 CS3 是不同离底高度的横截面;MS 是中间部分垂直截面。四斜叶桨旋转方向从顶部观察时顺时针旋转。对于 CS1、CS2 和 CS3 横截面测量时,CCD 相机从容器底部拍摄,由于四斜叶桨的遮挡,CS2 和 CS3 不能得到一个完整的四分之一横截面。

2 PIV 试验结果及分析

2.1 搅拌速度的影响

本研究在 0.4% 浓度的羧甲基纤维素(CMC)溶液中改变搅拌桨转速,得到了 6 种不同转速下流场的绝对速度云图和流线,如图 4 所示。

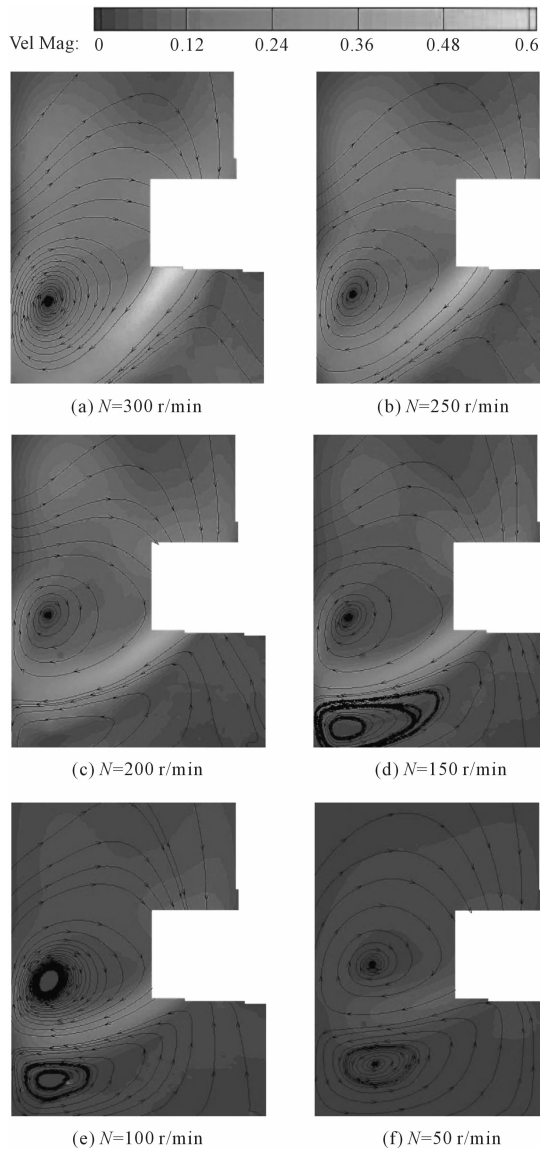


图 4 不同转速搅拌 $C=0.4\%$ CMC 溶液的流场

从图 4 中可以得出:流体在搅拌桨的搅拌下,在搅拌容器中形成轴向大循环流,流体从液面流向搅拌桨,经过搅拌桨后形成高流速区域,其最大速度为 0.6 m/s,冲击容器底部,在挡板和壁面作用下,液体沿着壁面流向液面。随着转速的降低,高流速区域向上移动,流速变得越来越小。当搅拌速度从 250 r/min 到 200 r/min 时,流场结构发生明显变化。主涡旋向上移动并在其下方产生一个反向小涡旋。随着搅拌桨转速继续降低,两个涡流位置继续向上移动。其原因是:(1)随着搅拌桨转速的降低,搅拌容器内平均剪切速率减小,非牛顿流体粘度增大,因此流场速度减小,不利于混合;(2)随着搅拌速度的降低,搅拌桨的轴向推力减少,同时非牛顿流体粘度增大,使高流速方向向径向偏移,产生两个循环流。不利于容器底部流体的混合,易形成死区。

2.2 CMC 溶液浓度的影响

在 300 r/min 搅拌速度下,本文测量了不同浓度的羧甲基纤维素(CMC)溶液,得出了流场的绝对速度云图和流线,如图 5 所示。

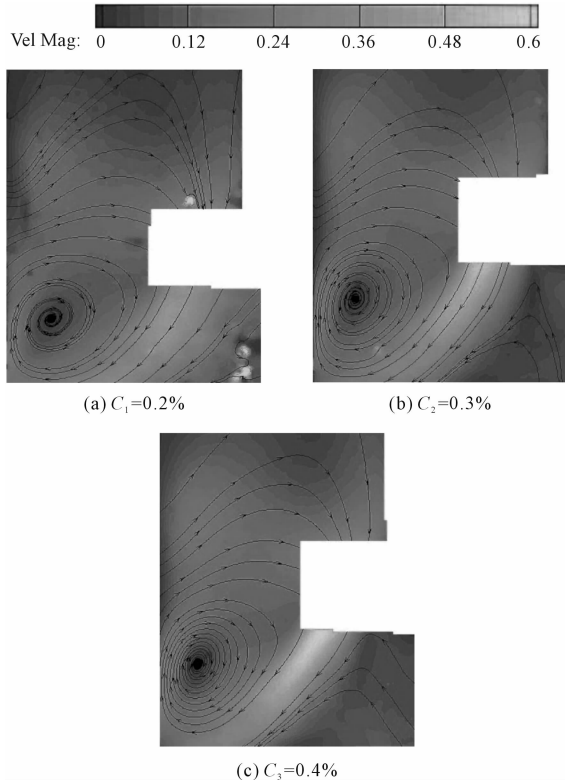


图 5 在 $N=300$ r/min 搅拌不同浓度 CMC 溶液的流场

从图 5 中可以得出:流场分布和流线在宏观上大致相似。随着羧甲基纤维素(CMC)溶液浓度的增加,其粘度也随之增大,在相同搅拌速度下搅拌浆下部的高流速区域变小,降低了容器底部非牛顿流体的混合效果。由于高浓度的羧甲基纤维素(CMC)溶液具有更明显的非牛顿流体性质,在相同剪切速率下其粘度变化较大,导致容器内流体速度和剪切速率差距较大,降低了流场的平均流速,不利于非牛顿流体的混合。

2.3 不同横截面的流场分布

在搅拌速度为 300 r/min 时,搅拌 0.3% 浓度羧甲基纤维素(CMC)溶液,横截面流场的绝对速度云图和流线如图 6 所示。

从图 6 中可以得出:CS1 横截面在主涡旋下面和高流速区域,在搅拌浆推动作用下流体流动方向是从中心流向边缘且流速比较大。CS2 和 CS3 横截面在主

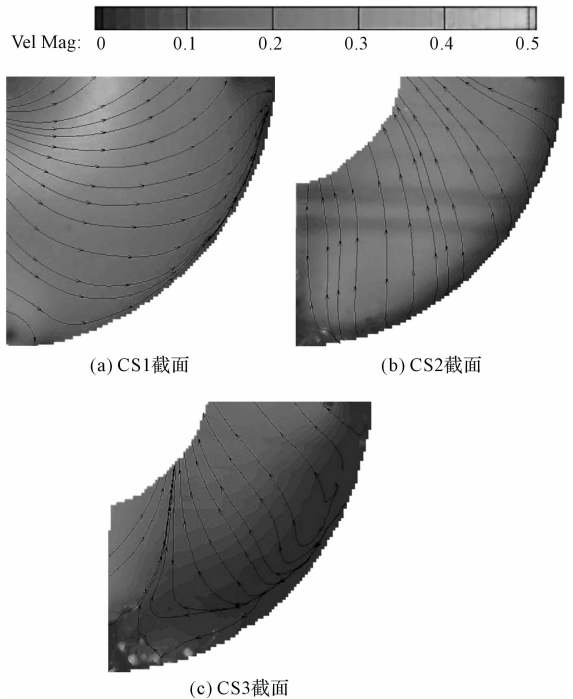


图 6 在 $N=300$ r/min 搅拌 $C=0.3\%$ CMC 溶液不同横截面的流场

涡旋之上并逐渐远离高流速区域,其流体流动方向是从边缘流向中心且流速逐渐降低。横截面的流场情况与 MS 截面流场情况是一致的。通过横截面的流场分布还可以得出,带有挡板的圆桶搅拌器打破了圆桶搅拌的大环流,增强了垂直方向流体间的对流,明显提高了搅拌混合效果。

3 结束语

本文对 3 种浓度(0.2%、0.3% 和 0.4%)的羧甲基纤维素(CMC)溶液的流变特性进行了测量,并对其搅拌流场进行了 PIV 试验。通过流变试验发现羧甲基纤维素(CMC)溶液是剪切变稀的非牛顿流体,分析出溶液的流变参数,符合幂律模型。

PIV 测量结果表明:四斜叶桨在搅拌羧甲基纤维素(CMC)溶液时,流场中呈现轴向大循环特征,这些特征有利于溶液的混合;溶液浓度在高转速下对流场的结构影响不大。然而搅拌浆的转速(从 50 r/min 到 300 r/min)对流场结构影响较大。尤其在低转速时,大大降低了混合效果。

(下转第 543 页)

本文引用格式:

孙先朋. 基于 PIV 的四斜叶桨搅拌反应器中非牛顿流体流场研究[J]. 机电工程, 2019, 36(5): 511-514, 543.

SUN Xian-peng. Non-Newtonian fluid flow field in a 4PBT stirred reactor based on PIV[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(5): 511-514, 543.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>