

行星式搅拌层流混合强化的模拟与试验研究

陆金刚 周游游 孙 帅 孙靖晨 杨 鼎 刘海龙

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要 本文针对行星式层流搅拌流场及其混合性能分别开展了数值计算和可视化试验研究。数值计算结果表明, 在行星式搅拌方案中, 搅拌桨周期性掠过搅拌槽内大部分区域, 打破了常规中心搅拌方案流场的对称性, 减少了流场中的环流区, 扩大了流动高速区。此外, 增加搅拌桨的自转速度可以加大流场中高、低速区之间的速度相对差值。可视化试验结果表明, 行星式层流搅拌方案可以促进不同区域流体的物质交换, 混合隔离区面积显著减小, 搅拌罐内上、下层流体的混合过程存在差异。增加搅拌桨的自转速度, 可以进一步改善流体的混合效果, 最终, 搅拌罐内的流体可以得到充分混合。

关键词 行星式搅拌; 层流混合; 激光诱导荧光; 混合隔离区; 混合度

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2024)11-3362-07

Simulation and Experimental Research on Mixing Enhancement in Laminar Regime for a Planetary Mixer

LU Jingang ZHOU Youyou SUN Shuai SUN Jingchen YANG Ding LIU Hailong

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract This article conducts numerical simulations on the planetary laminar stirring flow field and visualization experiments on its mixing performance, respectively. The numerical simulation results show that in the planetary stirring scheme, the stirring blade periodically sweeps over most of the area inside the stirring tank, breaking the symmetry of the flow field under conventional central stirring scheme, reducing the circulation area, and expanding the high-velocity flow area. In addition, increasing the rotational speed of the stirring blade can increase the relative difference between the high and low velocity zones in the flow field. The visualization experiment results show that the planetary laminar flow stirring scheme can promote material exchange of fluids in different regions, significantly reduce the area of the mixing isolation zone, and the mixing process of the upper and lower fluids in the stirring tank are different. Increasing the rotational speed of the stirring blade can further improve the mixing effect of the fluid, and ultimately, the fluid in the stirring tank can be fully mixed.

Key words planetary stirring; laminar mixing; laser-induced fluorescence (LIF); isolated mixing region (IMR); mixing degree

0 引 言

作为工业生产中最常见的基本操作单元之一, 搅拌技术旨在促使搅拌槽内的介质达到均质混合、促进传热和传质反应的发生, 广泛应用于化学工业、食品加工、废水处理等领域^[1,2]。

常见的搅拌类型主要分为以下几种: 机械搅拌, 气体搅拌, 电磁搅拌以及超声波搅拌等。其中, 机械搅拌根据介质流体的形态又可分为层流搅拌和湍流搅拌两种形式。湍流搅拌可以实现介质的快速混

合, 但该方法能量耗损大且不适用于处理某些特殊流体^[3,4]。如在生物工程中, 当被搅拌的流体为高分子聚合物或者其内部含有大量的细胞或蛋白质结构时, 若搅拌桨的转速过快, 极强的剪切应力则可能破坏其内部结构^[5]。此外, 当被搅拌流体自身的粘度较大时, 如采用湍流搅拌则会不可避免地大幅提升能耗, 这对搅拌设备的强度性能提出了较高的要求^[6]。然而在低速层流搅拌中, 由于流体分子

收稿日期: 2024-01-12; 修订日期: 2024-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No.12202163); 国家自然科学基金 (No.51876086); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金)(No.BK20220513); 江苏大学高级人才科研启动基金 (No.21JJDG023)

作者简介: 陆金刚 (1989-), 男, 讲师, 博士, 主要从事流体力学、流体机械研究。

通信作者: 刘海龙, 教授, leo@ujs.edu.cn。

的重复拉伸和折叠, 搅拌槽内部将产生混沌混合区域 (chaotic mixing region, CMR) 和混合隔离区域 (isolated mixing region, IMR) 两种区域^[7,8], IMR 内的流体介质被禁锢在环形区域内, 不与周围流体产生质量交换, 从而严重影响了搅拌效率。因此, 对 IMR 结构的可视化及其形成机理探究, 并据此合理引入扰动, 打破 IMR 结构, 是高效层流混合技术研究领域的关键。对此, 部分国内外学者进行了有益地探索。Nagata^[9] 通过试验手段观察到了 IMR 结构。研究发现, IMR 结构是搅拌槽内流体的主要流动和次要流动之间的相互“竞争”形成的, 且其区域内、外流体之间长期无法进行有效的物质交换。Ottino^[10] 等研究了层流搅拌模式下搅拌槽内的流场结构。研究发现, 强化层流搅拌效果的基本原则为通过扰乱原始流场的对称性, 引发流体发生拉伸或折叠等无序运动, 进而提升搅拌效果。从这一角度出发, 部分学者通过改变搅拌容器或桨叶的几何参数^[11,12], 或者在搅拌槽内合理设置几何挡板结构, 借助挡板的存在破坏流场的结构对称性, 从而实现均匀混合^[6]。

行星搅拌器在搅拌物料时, 搅拌桨一方面围绕自身的轴自转, 另一方面围绕搅拌釜中心公转, 因其具有复杂的运动轨迹与复合的搅拌性能, 在打破层流混合中的 IMR 结构的应用中体现了巨大的潜力。Yamagata 等^[13] 采用了行星式搅拌模式, 通过搅拌容器的自转和公转结合, 达到了强化混合的目的。戴新锐等^[14] 通过数值计算, 从流场分布、速度分布等方面, 对偏心自转、自转加公转两种搅拌方式进行比较。结果发现, 自转加公转方式通过混沌混合, 大大缩短了反应时间, 提高了净化效率, 减小了能耗。杨伶等^[15] 使用 POLYFLOW 软件计算了双臂行星式搅拌釜内高黏聚合物熔体的三维等温流场。结果表明, 搅拌釜内高黏熔体形成了全釜循环流动, 提高转速能有效减小不良混合区, 且能明显缩短混合时间。王晓瑾等^[16] 利用 FLUENT 软件模拟了新型行星式搅拌釜内高黏固液两相流的流场, 分析了不同转速条件下搅拌釜不同截面的速度场和浓度场。结果表明, 搅拌釜内的组合桨形具有较好的搅拌混合效果; 增加搅拌时间可较大改善搅拌釜内固体颗粒浓度分布, 整个釜内的浓度梯度减小。

本文采用 ANSYS FLUENT 数值计算软件, 基于滑移网格技术, 对不同转速下的常规中心布置搅拌桨方案以及行星式搅拌方案下的流场进行数值计算并分析二者差异。根据数值计算结果, 利用二维平面激光诱导荧光技术, 对不同转速下两种搅拌方

案的混合性能进行可视化研究, 验证数值计算结果并进一步分析影响流体混合性能的因素。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型及控制方程

如图 1 所示, 搅拌槽为无盖圆柱体, 其尺寸为: 直径 $D=154$ mm, 高度 $H=90$ mm。搅拌桨叶采用四叶片直桨式, 其直径 $d=50$ mm, 高度 $w=10$ mm, 厚度 $b=5$ mm。搅拌桨偏心放置。工作介质为甘油, 因其黏度高, 搅拌过程中惯性力和质量力远小于黏性力, 因此忽略重力的影响。假设工作介质不可压缩, 则质量守恒方程和动量守恒方程分别为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

其中, \mathbf{u} 是速度矢量, p 是压力, ρ 是流体密度, μ 是流体黏度。

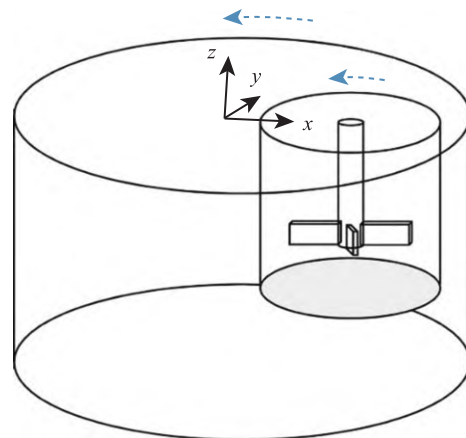


图 1 行星搅拌计算模型

Fig. 1 Schematic description of a planetary stirrer model

1.2 网格划分及计算方法

如图 2 所示, 采用 ANSYS ICEM 软件对搅拌槽进行六面体网格划分, 对行星搅拌桨区域进行四面体网格划分。尽管未在此处列出, 我们对网格无关性作了检测, 并得到了很好的收敛性, 最终搅拌槽网格总数为 1526227, 搅拌桨区域网格总数为 1158086。

计算求解层流流动, 搅拌槽上表面定义为自由液面, 侧面、底面及搅拌桨定义为无滑移壁面, 采用滑移网格技术, 定义搅拌槽和搅拌桨区域的交界面。搅拌槽绕中心轴的公转速度为 n_0 , 搅拌桨的自转速度为 n_1 。甘油密度为 $\rho = 1261$ kg·m⁻³, 黏

度为 $\mu = 1.493 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算采用二阶迎风格式的 SIMPLE 算法。

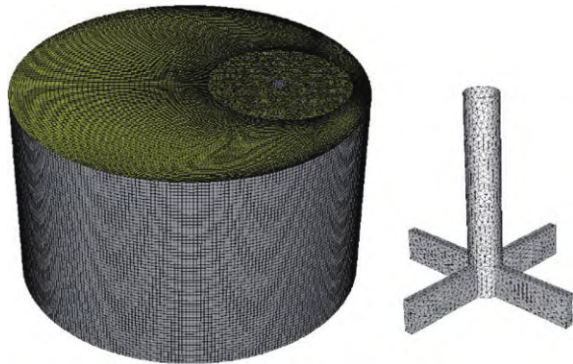


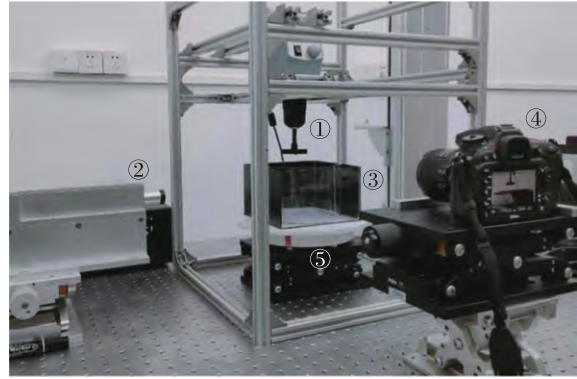
图 2 网格划分
Fig. 2 Mesh discretization

2 试验方案

为了验证数值计算结果的准确性, 本文还设计了基于二维平面激光诱导荧光技术的可视化试验平台, 如图 3 所示。搅拌器悬挂固定在铝型材支架上, 圆柱型搅拌槽材料为透明有机玻璃, 置于电动转盘上。激光器与搅拌槽保持同一水平高度。为了降低光线折射对试验结果的影响, 将搅拌槽置于与其外切的方形有机玻璃柱体内, 缝隙内填满与搅拌介质相同的液体 (本文为甘油)。为了进一步减小搅拌槽壁面反射光线的影响, 将方形柱体三面涂黑, 在激光照射的两个相对平面分别留下一道窄缝以供激光片光源穿过。搅拌桨与搅拌槽偏心布置, 分别设定电动圆盘的转速 (公转速度 n_0) 和搅拌器转速 (自转速度 n_1), 形成行星式搅拌方式。试验启动前, 沿着搅拌罐壁自下而上注入荧光剂。试验开启后, 由于流场的对流、扩散作用, 荧光剂将随之迁移。在激光光源的照射下, 荧光剂中的荧光成分受激发跃迁的同时发出荧光而被相机捕捉。因此, 所拍摄图像中明亮的部分即为充分混合区域, 暗部区域 (黑色) 即为混合隔离区 (IMR)。为了定量描述行星式搅拌方案的混合性能, 这里引入混合度 M_D 的概念, 即:

$$M_D = 1 - \frac{x_{\text{IMR}}}{x_{\text{Mixing region}}} \quad (3)$$

式中, x_{IMR} 为混合隔离区的像素点数, $x_{\text{Mixing region}}$ 为整个搅拌区域的总像素点数。首先对试验图像进行裁剪, 将搅拌罐外缘等背景噪声剔除, 聚焦于搅拌区域。随即对图片进行灰度化处理, 选取合适的阈值将其转化为二值图 (其中黑色为混合隔离区, 白色为混沌混合区), 计算黑色像素点占所有像素点的比值, 继而求得混合度。



1. 搅拌器; 2. 激光器; 3. 搅拌罐; 4. 相机; 5. 转盘

图 3 可视化试验台示意图

Fig. 3 Schematic description of the visualization experiment platform

3 结果与讨论

3.1 数值计算结果

作为对比, 本文也计算了相同条件下搅拌桨中心布置的搅拌槽内的流场。如图 4(a) 所示为转速 $n_1 = 100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间 $t=3600 \text{ s}$, $y=0 \text{ mm}$ 截面上的速度云图及流线图。由图可知, 高速区相对集中在桨轴附近, 并沿轴呈对称分布。低速区主要分布在远离桨轴的壁面区域, 且面积远大于高速区。该截面上的流线图也沿桨轴对称分布, 且呈“蝴蝶”状。此外, 该截面存在 6 个较大且相对独立的环流区域。环流区域内的流体介质不与周围流体产生质量交换, 降低了槽内介质的混合效果。当采用行星式搅拌方案时 (公转转速 $n_0 = 10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 自转转速 $n_1 = 100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 如图 4(b) 所示, 之前严格对称的流场结构被打破, 速度峰值出现在搅拌桨的外缘处。由于行星搅拌桨周期性地沿搅拌罐壁面掠过, 因此靠近壁面处的速度也相对较高。低速区出现在搅拌桨与搅拌罐壁面之间。此外, 多个较大的环流区域也随之消失, 只剩下一个位于罐底且远离搅拌桨的环流区域。这表明罐内的流体介质将不会被禁锢在狭小的空间里, 而是不断地与周围流体进行质量交换, 罐内的混合效果将得到明显的提升。

图 5 所示为相同时刻, 相同转速条件下, $z = -45 \text{ mm}$ 截面上的速度云图及速度矢量图。可以看到, 当搅拌桨中心布置时 (图 5(a)), 高速区集中在以搅拌桨为中心的圆周内, 速度沿径向快速降低, 在搅拌罐壁面处为零。这表明罐内流体只在以搅拌桨为直径的有限圆周区域内进行搅拌混合, 搅拌效果较差。当采用行星式搅拌方案时 (图 5(b)), 高速区域范围明显扩大, 且远远大于低速区域。低速区不再位于搅拌罐壁面处, 而是被夹于不同高速区之间

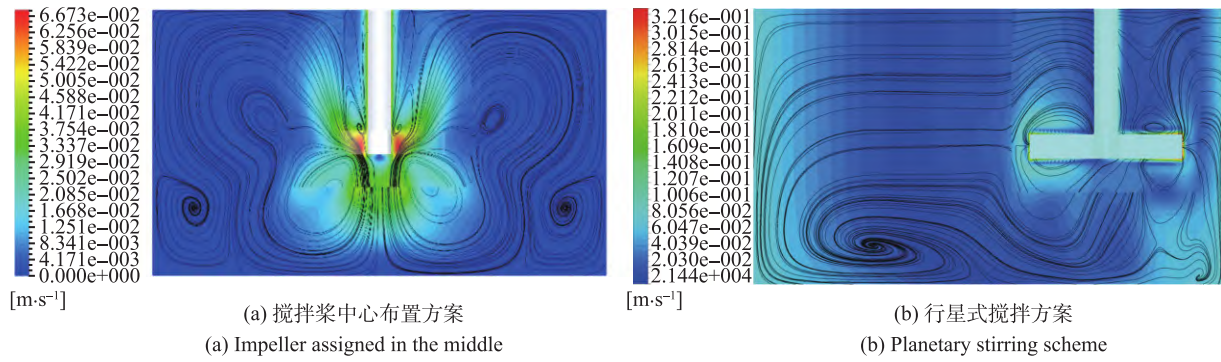


图 4 $y = 0$ mm 截面速度云图及流线图
Fig. 4 Velocity contour and streamlines in plane $y = 0$ mm

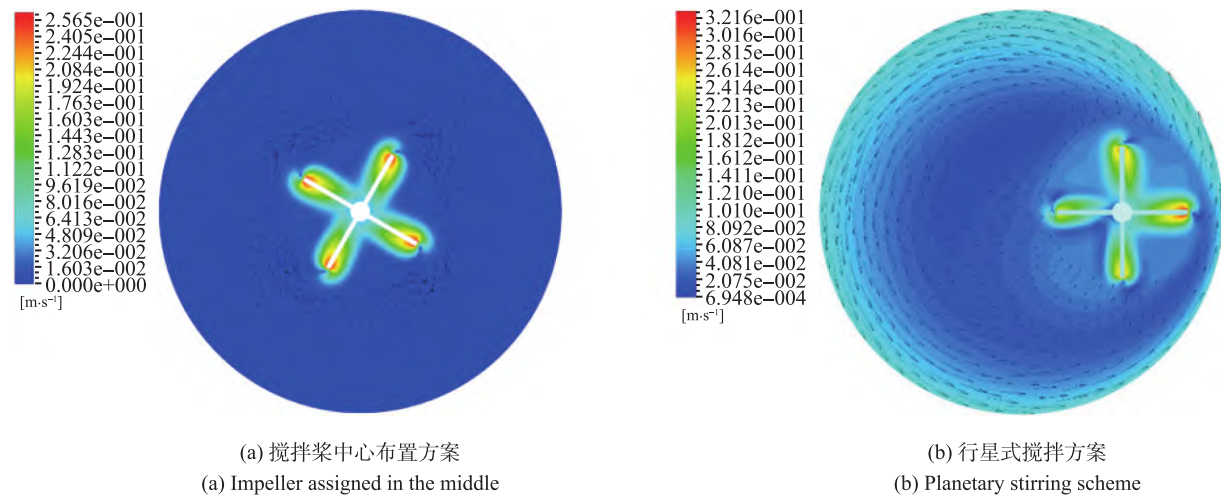


图 5 $z = -45$ mm 截面速度云图及速度矢量图
Fig. 5 Velocity contour and vectors in plane $z = -45$ mm

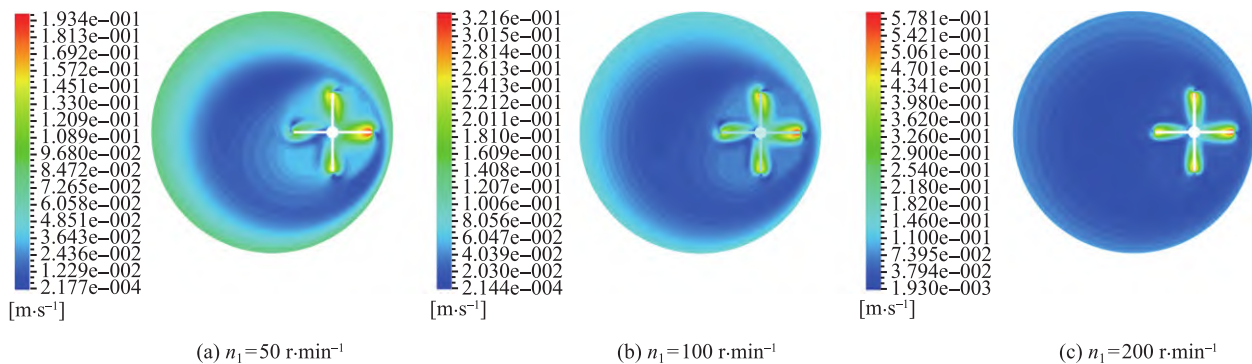


图 6 不同转速下行星式搅拌 $z = -45$ mm 截面速度云图
Fig. 6 Velocity contours in plane $z = -45$ mm under various impeller rotational speeds for the planetary stirring

(这与图 4(b) 结果一致), 不同区域之间的速度差异促进了流体之间的互相流动混合。

图 6 所示为行星搅拌方案下, $t=3600$ s, 不同自转速度下, $z = -45$ mm 截面上的速度云图。由图可知, 随着自转速度增大, 高速区的速度峰值也随之增大, 但是速度分布规律比较类似, 差异表现

在搅拌桨附近的主高速区与搅拌罐壁面处的次高速区之间的速度差, 自转速度越高, 两者差异越大。由上面分析可知, 不同区域之间的速度差异会促进流体之间的流动混合。即在层流混合时, 不同于标准的中心布置搅拌桨方案, 行星搅拌方案随着自转速度的提升, 混合效果也有望得到显著提升。

3.2 试验结果

图 7 所示为搅拌时间 $t=3600$ s 时, 不同搅拌方案、不同搅拌转速下可视化试验的结果。其中, 图 7 (a) 为搅拌桨中心布置的方案, 转速 $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 可以看到在搅拌桨上下左右对称分布着四个未混合区域, 并且未混合区域占据了整个视窗的大部分面积。由上面数值计算结果分析可知, 这是由于搅拌桨中心布置, 工作介质黏度较高, 流场结构对称且十分稳定, 高速区集中在中心搅拌桨附近区域, 导致流场中大部分区域不与周边流体产生物质交换, 形成所谓“死区”。图 7(b) 为行星式搅拌方案, 公转转速 $n_0 = 10 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 自转转速 $n_1 = 100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 随着搅拌桨周期性沿搅拌罐壁掠过, 原本对称稳定的流场结构被打破, 不同区域的流

体不断进行着质量交换, 混合隔离区面积也随之不断缩小。进一步加大自转速度至 $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ (图 7(c)), 可以看出, 混合效果进一步增强, 混合隔离区几乎完全消失, 搅拌罐内液体得到充分混合。

为了进一步探究行星式搅拌方案的作用机理和混合过程, 图 8 展示了不同时刻, 公转转速 $n_0 = 10 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 自转转速 $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的行星式搅拌方案可视化试验结果。可以看出, 搅拌开始初期 ($t=113$ s) 沿着搅拌桨上下对称分布大小不一的四处混合隔离区, 随着搅拌的进行, 各部分的未混合区域面积不断缩小。值得注意的是, 搅拌桨上方区域的混合速率要高于下方。并且, 二者混合方式也不同, 上方区域由外至内, 逐层混合, 下方区域则整体浸润式混合, 这可能是由于二者所受边界作用

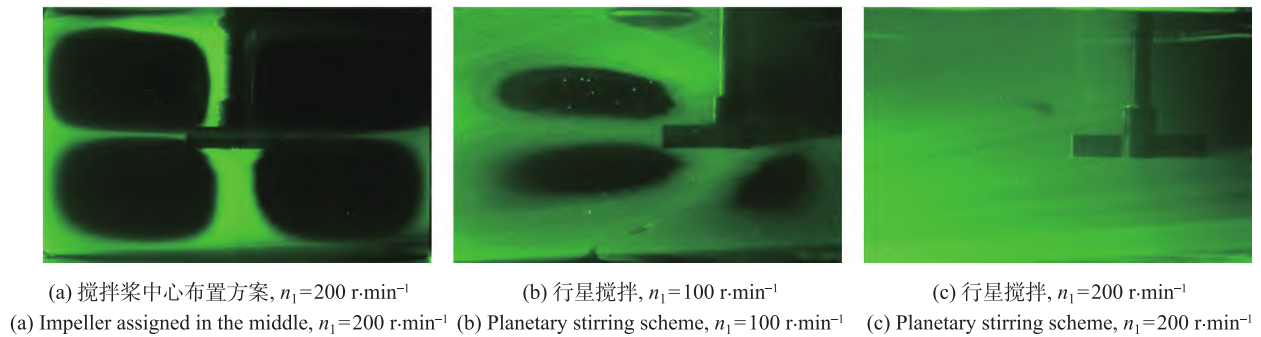


图 7 $t=3600$ s 时, 不同搅拌方案、不同搅拌转速下可视化试验的结果

Fig. 7 When $t=3600$ s, visualization results under various mixing schemes and various rotational speeds

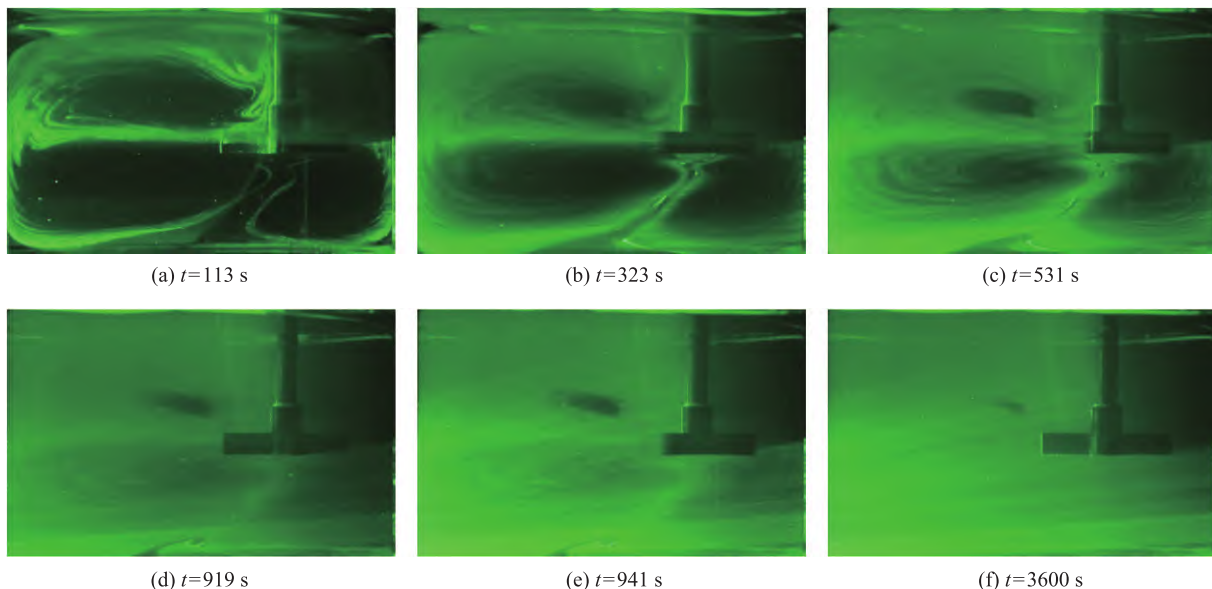


图 8 不同时刻下, 行星式搅拌, $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 可视化试验结果

Fig. 8 Visualization results for the planetary stirring scheme, $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, under various time periods

不同导致, 上方区域毗邻自由液面, 下方区域则受到搅拌罐底部固体壁面的作用。最终, 所有区域未混合区几乎完全消失, 表明该转速下, 行星式搅拌方案罐内液体得到充分混合。

图 9 所示为不同搅拌方案、不同转速下混合度随时间的变化图。可以看出, 搅拌初期 ($t < 20 \text{ min}$), 三种方案混合度均迅速升高, 并且行星式搅拌, $n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 方案的斜率最大, 中心搅拌方案的斜率最小, 表明前者搅拌速率最快。三种方案的混合度在 $t = 60 \text{ min}$ 内均逐渐变得平缓且不再变化。最终, 中心搅拌方案的混合度值为 $M_D = 29.7\%$, 表明其混合性能较差。而行星式搅拌方案, 自转速度 $n_1 = 100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 尽管转速低于中心搅拌方案, 混合度可达 $M_D = 52.6\%$, 较前者提升了 77% 。提高行星式搅拌方案的转速 ($n_1 = 200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 混合度迅速提升, $t = 20 \text{ min}$ 时, 混合过程基本完成, 混合度 $M_D = 99.8\%$, 表明搅拌区内液体已几乎达到完全混合。

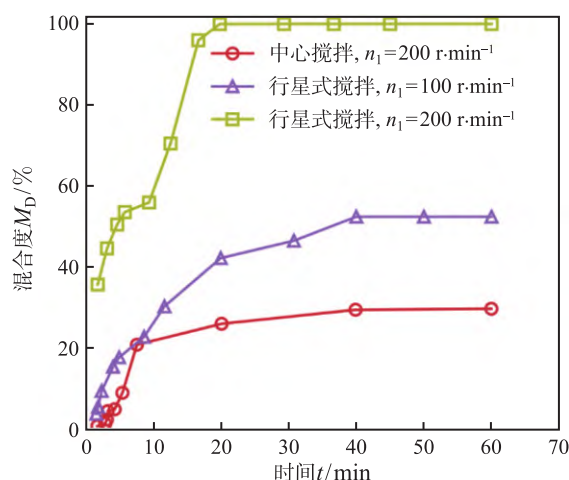


图 9 不同搅拌方案, 不同转速下, 混合度随时间的变化

Fig. 9 The evolution of mixing degree over time under different mixing schemes and rotational speeds

4 结 论

本文针对行星式层流搅拌, 计算了不同转速下的流场分布, 基于此, 设计了可视化试验, 研究分析了不同转速下行星搅拌的混合过程及效果, 得到了如下主要结论:

1) 在行星式搅拌方案中, 搅拌桨周期性掠过搅拌槽内大部分区域, 打破了常规中心搅拌方案流场的对称性, 减少了流场中的环流区, 扩大了流动高速区。

2) 增加搅拌桨的自转速度可以加大流场中高、

低速区之间的速度差值。

3) 行星式层流搅拌方案可以促进不同区域流体的物质交换, 混合隔离区面积显著减小, 搅拌罐内上、下层流体的混合过程存在差异。增加搅拌桨的自转速度, 可以进一步改善流体的混合效果。

参 考 文 献

- [1] 赵述芳, 王文坦, 胡银玉, 等. 搅拌釜内液-液混合溶析沉淀法制备纳米姜黄素颗粒 [J]. 化工学报, 2013, 64(3): 841-848
ZHAO Shufang, WANG Wentan, HU Yinyu, et al. Liquid Mixing and Curcumin Nanoparticle Preparation in Stirred Tanks [J]. CIESC Journal, 2013, 64(3): 841-848
- [2] Cybulski O, Dygasi M, Mikulak-Klucznik B, et al. Concentric Liquid Reactors for Chemical Synthesis and Separation [J]. Nature, 2020, 586(7827): 57-63
- [3] 杨锋琴, 周慎杰. 搅拌固液悬浮研究进展 [J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2233-2248
YANG Fengling, ZHOU Shenjie. Progress of Solid-Liquid Suspension in Stirred Vessel [J]. CIESC Journal, 2017, 68(6): 2233-2248
- [4] Salehiyan R, Choi W J, Lee J H, et al. Effects of Mixing Protocol and Mixing Time on Viscoelasticity of Compatibilized PP/PS Blends [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2014, 26(3): 311-318
- [5] Bulnes A D, Alvarez M. The Simplest Stirred Tank for Laminar Mixing: Mixing in a Vessel Agitated by an Off-Centered Angled Disc [J]. AIChE Journal, 2013, 59(8): 3092-3108
- [6] 刘海龙, 曹宇, 丁学翀, 等. 搅拌槽内液相层流荧光可视化及高效混合技术 [J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5042-5048
LIU Hailong, CAO Yu, DING Xuechong, et al. Mixing Enhancement Technique for Laminar Flow in Stirred Tank [J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 5042-5048
- [7] Hashimoto S, Ito H, Inoue Y. Experimental Study on Geometric Structure of Isolated Mixing Region in Impeller Agitated Vessel [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5173-5181
- [8] Soto W, Punke E, Nishiguchi M. Evolutionary Perspectives in a Mutualism of Sepioid Squid and Bioluminescent Bacteria: Combined Usage of Microbial Experimental Evolution and Temporal Population Genetics [J]. Evolution, 2012, 66(5): 1308-1321
- [9] Nagata S, Yanagimoto M, Yokoyama T. A Study on the Mixing of High-viscosity Liquid [J]. Chemical Engineering, 1957, 21(5): 278-286
- [10] Ottino J, Leong C, Rising H, et al. Morphological Structures Produced by Mixing in Chaotic Flows [J]. Nature, 1988, 333(6172): 419-425
- [11] Ameer H. Energy Efficiency of Different Impellers in Stirred Tank Reactors [J]. Energy, 2015, 93: 1980-1988
- [12] Ameer H. Agitation of Yield Stress Fluids in Different Vessel Shapes [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016, 19(1): 189-196
- [13] Yamagata T, Sugisawa H, Fujisawa N. Experimental Study on Laminar Mixing in Planetary Mixer [J]. Experiments in Fluids, 2021, 62: 1-12
- [14] 戴新锐, 李春林, 王仕博, 等. 行星式搅拌桨强化搅拌的模拟仿真及节能机理分析 [J]. 冶金能源, 2022, 41(2): 3-7

- DAI Xinrui, LI Chunlin, WANG Shibo, et al. Simulation and Energy-Saving Mechanism Analysis of Planetary Stirring Impeller for Strengthening Mixing [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2022, 41(2): 3-7
- [15] 杨伶, 彭炯, 王晓瑾. 行星式搅拌釜内三维流场的数值模拟 [J]. *化工进展*, 2011, 30(S1): 42-48
- YANG Ling, PENG Jiong, WANG Xiaojin. Numerical Simulation of Three-Dimensional Flow Field in the Planetary Stirred Tank [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(S1): 42-48
- [16] 王晓瑾, 彭炯, 杨伶, 等. 行星式搅拌釜内高黏固液两相流的数值研究 [J]. *计算机与应用化学*, 2011, 28(10): 1249-1254
- WANG Xiaojin, PENG Jiong, YANG Ling et al. Numerical Research of Solid-Liquid Two-Phase Flow in the Planetary Mixer for High Viscosity Fluid [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2011, 28(10): 1249-1254