

研究论文

刚柔组合搅拌桨与刚性桨调控流场结构的对比

刘作华^{1,2}, 曾启琴¹, 杨鲜艳¹, 刘仁龙¹, 王运东², 陶长元¹

(¹重庆大学化学化工学院, 重庆 400044; ²清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要: 高黏度流体处于层流状态时, 普遍存在的混合隔离区, 降低了流体的混合效率。减小或消除隔离区, 是实现流体高效混合的基本途径。采用实验研究与数值模拟相结合的方法, 对刚性六直叶涡轮桨(刚性桨)和刚柔组合六直叶涡轮桨(组合桨)的流场结构进行研究, 对比分析了两种桨叶在相同功耗($3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$)时的轴向、径向和切向的速度矢量图、速度云图以及速度分布散点图。结果表明, 刚性桨的能量集中在桨叶尖端部分, 远离桨叶区域的流体速度很小甚至为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 而组合桨可将能量从桨叶尖端扩散至全槽, 使槽内流体均具有一定的流速, 提高了混合效率, 且显色实验与数值模拟结果一致, 组合桨体系的混合隔离区在短时间内就可消除, 混合良好, 而刚性桨体系的混合隔离区始终存在, 混合效果不佳。

关键词: 混合; 混沌; 搅拌槽; 刚柔组合桨; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.06.018

中图分类号: TQ 027.2

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 06—2078—07

Flow field structure with rigid-flexible impeller and rigid impeller

LIU Zuohua^{1,2}, ZENG Qiqin¹, YANG Xianyan¹, LIU Renlong¹, WANG Yundong², TAO Changyuan¹

(¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; ²Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Isolated mixing region often appears in the high-viscosity fluid with laminar flow in a stirred vessel, reducing fluid mixing efficiency. Diminishing or eliminating isolated mixing region improves the mixing efficiency and reduces mixing energy consumption. Experimental and computational studies were carried out to compare the flow field structures with rigid Rushton turbine impeller (rigid RT impeller) and rigid-flexible Rushton turbine impeller (combination RT impeller). Analyses were carried out on axial, radial and tangential velocity vector plots, velocity contours and velocity distribution scatter plots at the same time power consumption ($3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$) with these two impellers. Results show that the energy concentrates at the tip of rigid RT impeller and the fluid velocity away from the impeller is small, even at $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, while for combination RT impeller, the energy distributes well in the stirred tank so that the fluid gains certain velocity everywhere. The numerical simulation results agree with experimental results. The combination RT impeller improves mixing efficiency by eliminating isolated mixing regions, while rigid RT impeller presents a poor mixing efficiency since isolated mixing regions always exist.

2013-09-04 收到初稿, 2014-01-06 收到修改稿。

联系人及第一作者: 刘作华 (1973—), 男, 教授。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CBA01203); 清华大学化学工程联合国家重点实验室开放课题 (SKL-ChE-12A02); 中央高校基本科研业务费跨学科类重大项目 (CDJZR12228801); 重庆市自然科学基金重点项目 (CSTC2012JJB00006)。

Received date: 2013-09-04.

Corresponding author: Prof. LIU Zuohua, liuzuohua@cqu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2012CBA01203), the State Key Laboratory of Chemical Engineering (SKL-ChE-12A02), the Interdisciplinary Class Major Projects of Central Universities (CDJZR12228801) and the Key Natural Science Fund of Chongqing (CSTC2012JJB00006).

Key words: mixing; chaos; stirred vessel; rigid-flexible impeller; numerical simulation

引言

搅拌是流体混合常用的操作单元,它广泛应用于橡胶、食品、石油和造纸等行业^[1-7]。搅拌槽内物料的混合程度及其功率消耗是影响产品质量和设备作业效率的关键因素。当物料黏度较高时,搅拌槽内的流动状态往往为过渡流,甚至为层流,此时流场结构包含桨叶上下方不参与对流流动的混合隔离区和混合较充分的混沌区^[8-12]。隔离区内流体的混合主要是通过分子扩散来实现的,混合效率低,混沌区内能量按对流传递的方式进行,混合良好。Lamberto 等^[13]研究表明,减小混合隔离区是提高混合效率的有效途径。

随着非线性理论与混沌理论的发展,人们开始利用混沌现象来调控流场结构,以强化流体的混合性能。通过采用变速搅拌、偏心搅拌、往复搅拌、偏心射流等方法,可以破坏系统的混合隔离区,引发混沌混合,有效地提高流体的混合效率^[14-17]。Kato 等^[18]通过周期性地改变桨叶的转动方向,对搅拌槽流体的混合情况进行了研究,结果表明,这种变速搅拌有助于增强搅拌槽内流体的扰动,提高混合效率。Szymon 等^[19]发现双层组合偏心搅拌桨可以强化层流状态下流体的混合,提高混合效率。刘作华等^[20-21]对偏心射流搅拌反应器内流场的分形维数和最大 Lyapunov 指数的变化规律进行了研究,发现流场的耦合有助于强化流体混合性能。以上这些方法主要是从搅拌器的运动方式着手,在流体内部引发混沌,从而提高混合效率,但其混合效果受周期性转速的变化和搅拌器偏心位置的影响。而相关研究表明,刚-柔耦合形式的组合搅拌桨可通过其柔性端与周围流体相互作用,从涡街中汲取能量,强化流体混合,实现节能操作^[22-24]。刘旺玉等^[25]设计了柔性风力发电机桨叶,明显提高了风能的利用效率。Campbell 等^[26]研究了柔性涡轮机内流-固耦合运动行为,发现柔性桨变形可诱发桨叶与流体耦合运动。刘作华等^[27]提出了刚柔组合桨(以下简称组合桨),并对其形成的混合隔离区及混合效率进行了研究,发现组合桨有助于强化流体的混合。搅拌槽内流体的混合效率与流场结构密切相关,目前关于组合桨在高黏度流体中的流场结构的数值模拟几乎没有报道。

本文在实验研究的基础上,采用 CFD 分析软件

Fluent 6.3 对无挡板搅拌槽内甘油溶液的流场结构进行考察,对比分析了六直叶刚柔组合桨和六直叶涡轮桨的混合效率,旨在探究一种能提高高黏度流体混合效率的新方法。

1 反应器的结构与数值计算方法

1.1 反应器结构

利用 CFD 软件对无挡板圆柱形平底有机玻璃槽内甘油溶液的层流流场进行数值计算。搅拌槽结构如图 1(a)所示,槽体直径 $T=0.20$ m,高 $H=0.23$ m,液面高度 $h=0.15$ m。配置单层桨,桨叶离底距离 $C=0.07$ m,按顺时针旋转。

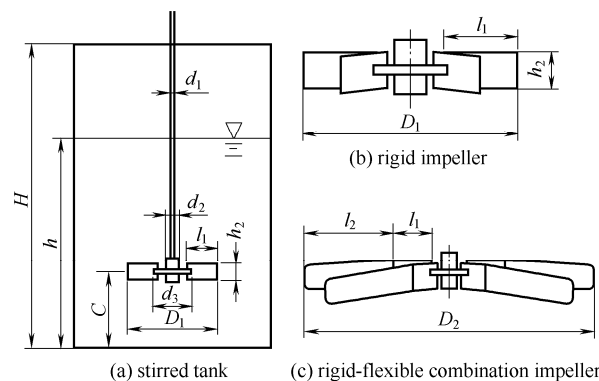


图1 搅拌槽结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of stirred tank

实验采用刚性六直叶涡轮桨[图 1(b)]和刚柔组合六直叶涡轮桨[图 1(c)],转轴直径 $d_1=0.012$ m,桨叶小圆柱直径 $d_2=0.02$ m,叶轮圆盘直径 $d_3=0.05$ m,厚度 $\delta=0.002$ m,刚性桨长度 $l_1=0.018$ m,直径 $D_1=0.07$ m;组合桨长度 $l_1+l_2=0.058$ m,直径 $D_2=0.15$ m。

1.2 计算方法

用于模拟计算的工作介质为甘油溶液,其密度 $\rho=1250$ kg·m⁻³,动力黏度 $\mu=1.2$ kg·(m·s)⁻¹,流体流动始终处于层流状态。搅拌槽内流体流动的基本守恒定律包括质量守恒定律,动量守恒定律和能量守恒定律,这些守恒方程的数学描述便是控制方程^[28]。在进行数值计算分析时,流体控制方程必须满足

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p_1 \mathbf{I}) = \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{v}$ 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; p_1 为压力, Pa; ρ 为液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性力张量, Pa; $\mathbf{I}$ 为单位张量; F 为外力, N。

使用 Fluent 专用前处理器 Gambit 对搅拌槽模型进行网格划分, 将桨叶区域划分为旋转子域, 其余区域划分为静止子域, 两个子域间通过界面(物理含义为内部虚拟面)传递速度, 从而达到旋转区域影响静止区域的目的。同时为达到好的模拟结果, 需要对旋转子域进行网格细化, 具体结果如图 2 所示。网格采用的是非结构化网格, 两种模型的网格节点数都在 30 万左右, 单元数在 170 万左右, 网格质量达到 0.8 以上。

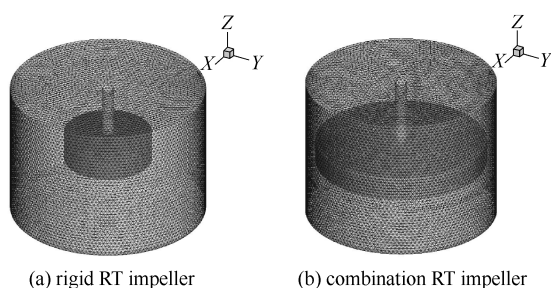


图 2 搅拌槽网格划分示意图

Fig.2 Mesh of stirred tank

网格导入 Fluent 后, 使用 Check 和 Smooth 命令进行网格检查及改善, 选择稳态的隐式分离求解算法, 并设定 Z 方向上的重力加速度为 $-9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 采用黏性模型中 Laminar 模型, 所使用的介质为甘油溶液。

设定叶轮区为动区域, 普通区为静区域; 定义搅拌槽壁面为静止壁面, 搅拌轴和搅拌桨叶表面为动壁面; 由于采用 MRF 方法进行模拟, 所以动区域内的介质与搅拌桨同速进行旋转, 这样桨叶相对于叶轮区的介质为静止, 同时设置普通区域内的介质是静止的; 定义叶轮区和普通区的结合面为内部面 interface。设定控制求解参数为标准格式压力; 压力速度耦合选择求解压力耦合方程组的半隐式方法; 动量为二阶迎风格式。选择初始条件为 0, 设定一定的迭代步数, 进行迭代计算, 直至收敛。为了验证计算结果与网格单元数的相关性, 比较网格单元数分别为 132 万、168 万、201 万、229 万时, 搅拌槽中 $Z=0.1 \text{ m}$ 、 $Y=0 \text{ m}$ 、 X 从 -0.1 m 到 0.1 m 的直线上的轴向速度散点如图 3。结果显示网格单元数对计算结果影响较小, 本文模拟时确定单元数在 170 万左右。

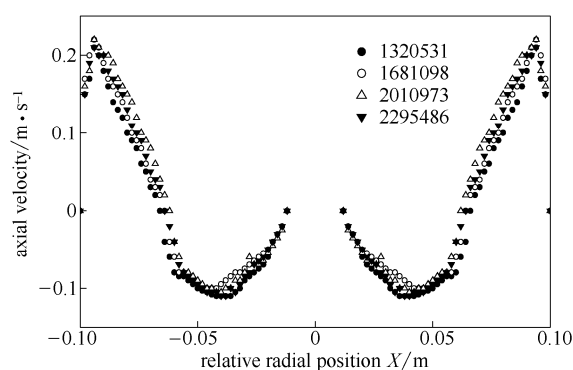


图 3 网格单元数对轴向速度的影响

Fig.3 Influence of grid cells on axial velocity

2 结果与讨论

2.1 宏观流动特性分析

2.1.1 垂直方向速度场 流体的宏观运动可以有效地反映流体内部的运动规律, 通过对流场的模拟计算得到搅拌槽内组合桨、刚性桨在功耗 $P_v = 3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的流场分布。为了直观地描述流体混合效果, 截取槽内的 X-Z 垂直面, 图 4 和图 5 分别为垂直方向的综合速度矢量图和速度分布云图。

从图 4 可以看出, 六直叶涡轮桨属于轴对称径向流搅拌桨, 在搅拌槽中所形成的流场成轴对称分布。旋转的桨叶在离心力的作用下把动量传递给它周围的流体, 使流体开始流动。由于高速流体与周围静止或低速流之间存在较大的速度梯度, 流体受到强烈的剪切而形成旋涡。旋转桨叶在叶轮区产生径向射流, 最大速度出现在桨叶尖端, 此处也是动能最大的地方, 介质所受扰动最激烈。桨叶尖端的水平射流在流动的过程中夹带周围流体迅速向搅拌槽边缘扩展, 撞击到槽壁后, 分为两股, 一部分沿壁面向上流动, 一部分沿壁面向下流动, 形成两个循环涡流流向中心轴。

比较刚性桨和组合桨垂直方向速度矢量图可以看出, 刚性桨引发的流场整体速度较小, 较大区域流体的速度处在 $0 \sim 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 混合只是依靠介质的自由扩散, 混合效率低; 而组合桨几乎使全槽内流体的速度都达到 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 此时对流传递为主要的能量传递方式, 可高效混合。

图 5 的速度云图清楚地刻画出刚性桨与组合桨的宏观速度分布, 其中代表高速的高亮度区域集中在叶片和叶轮的边缘, 这与前面的速度矢量图相符。从图 5 可以看出, 相同单位体积功耗下, 组合桨搅拌槽内介质的速度明显高于刚性桨, 组合桨

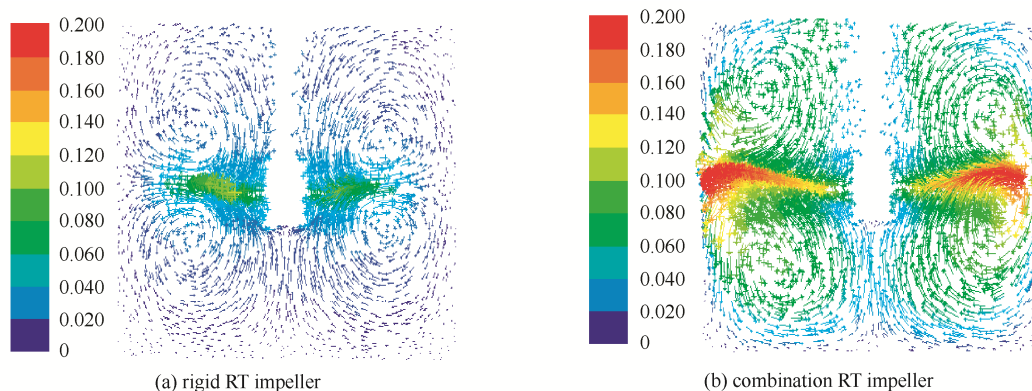


图4 X-Z平面综合速度矢量图

Fig.4 Integrated velocity vector diagram of X-Z plane

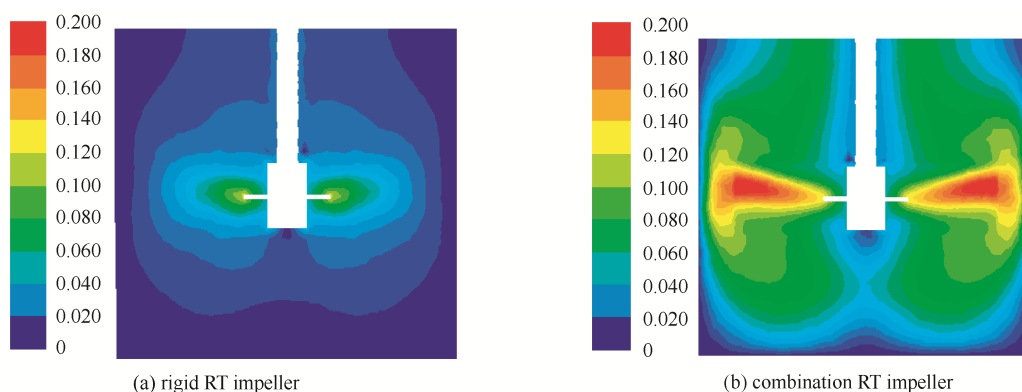


图5 X-Z平面综合速度云图

Fig. 5 Integrated velocity nephogram of X-Z plane

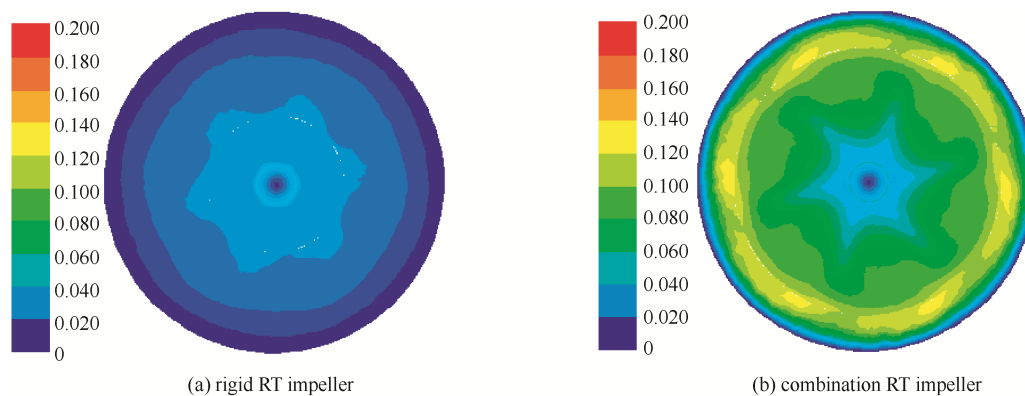


图6 Z=0.03 m平面综合速度云图

Fig. 6 Integrated velocity nephogram of Z = 0.03 m plane

可使介质达到的最大速度为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而刚性桨最大速度只有 $0.095 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，且组合桨的高速区域面积大于刚性桨。结合实验现象，分析其原因是组合桨叶片的扰动能够促进能量从桨叶尖端向槽内流体传递，更多的流体获得较高的速度，流体整体混合效果得以增强。

2.1.2 水平方向速度场 图6为搅拌槽桨叶中心面

$Z = 0.03 \text{ m}$ 处的综合速度云图，从另一个角度剖析了搅拌槽内的流场结构。从图6中可以看出，刚性桨、组合桨所产生的速度场是对称分布的。在速度大小方面，图6(b)中代表高速的高亮度区域面积明显大于图6(a)，组合桨的高速区域面积要大于刚性桨的高速区域面积。刚性桨搅拌槽内只有在桨叶周围流体速度较大，远离桨叶的流体速度很小，而组

合桨搅拌槽内的流体速度分布均匀,促进了能量传递,增强了混合效果。

2.2 时均速度分布

图 7~图 9 分别展示了刚性桨、组合桨搅拌槽中 $Z=0.1\text{ m}$ 、 $Y=0\text{ m}$ 、 X 从 -0.1 m 到 0.1 m 的直线上的轴向速度、径向速度、整体速度散点图。从图 7 可以看出,刚性桨和组合桨的轴向速度分布均是左右对称的,其速度的变化趋势和大小比较接近。而在图 8 中的刚性桨与组合桨的径向速度比较中,槽内组合桨的径向速度普遍大于刚性桨,尤其是远离桨叶的地方,这是因为组合桨对流体的扰动增强了径向流,使得搅拌槽壁面附近的流体也能够获得一定的速度,强化了流体内部能量传递行为。

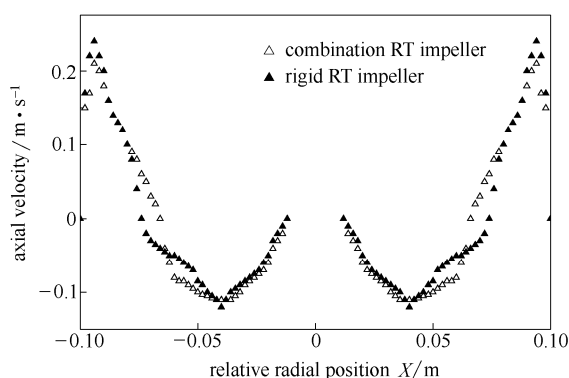


图 7 轴向速度散点图

Fig.7 Scatter plot of axial velocity

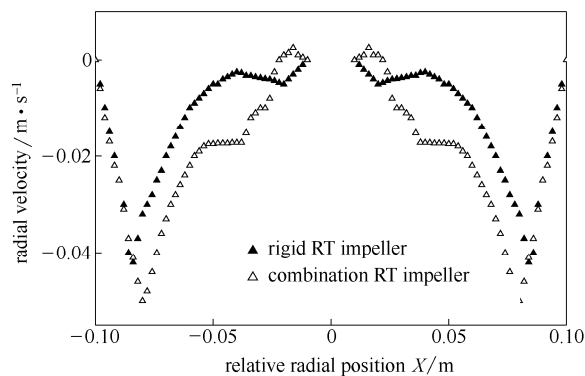


图 8 径向速度散点图

Fig.8 Scatter plot of radial velocity

通过分析刚性桨与组合桨流体整体速度特性曲线图 9 可以发现,两种桨叶产生的流体运动都是轴对称的,且在桨叶尖端周围流速最大(刚性桨在径向位置为 0.3 、 0.7 m 处,组合桨在径向位置为 0.15 、 0.85 m 处)。随着与桨叶尖端距离的增大,流体流速逐渐减小。但相对于刚性桨,组合桨的作用范围明显增大,可提升远离桨叶尖端区域的流体的

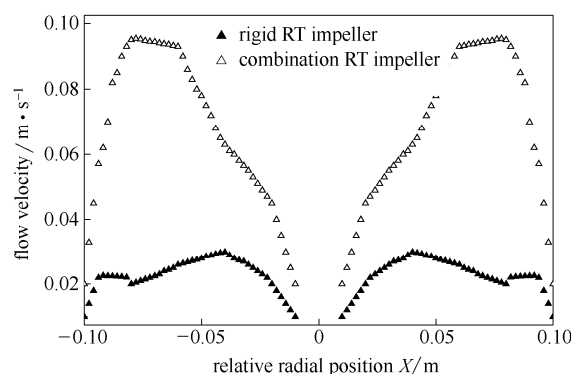


图 9 速度散点图

Fig.9 Scatter plot of velocity

流动特性,使全槽内的速度增加。

2.3 刚柔组合桨的混合性能

指示剂溴百里酚蓝在酸性溶液中呈现不同颜色,现象明显、操作简单,广泛应用于确定高黏度流体混合效果的实验中。为了对比刚性桨和组合桨的混合性能差异,实验考察了在相同功耗 ($P_v=3\text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$) 下,分别使用刚性桨和组合桨时搅拌槽内混合隔离区的演变情况。

从图 10 和图 11 可以看出,搅拌一段时间后,在桨叶的上下方会形成 2 个圆环状蓝色区,该区域内物料没有混合,即为混合隔离区,且随着搅拌时间的增加,隔离区逐渐减小。对比发现,刚性桨搅拌槽中混合隔离区的面积大于柔性桨,在搅拌 12 min 后,槽内的混合隔离区依然存在,物料没有达到完全混合均匀。然而,组合桨在搅拌 2 min 后,槽中混合隔离区就消失了,全槽流体处在混沌混合状态中,物料达到完全混合。

数值模拟可知刚性桨体系的能量集中在桨叶尖端,槽内其他区域的流速很小甚至为 0,而组合桨可将能量从桨叶尖端扩散至全槽,使槽内流体均具有一定的流速,提高了混合效率,这与显色实验结果一致,二者均表明组合桨更有利于高黏度流体的高效混合。

3 结 论

刚柔组合桨对流体的扰动作用可有效地把能量从桨叶尖端扩散至搅拌槽内,同时破坏了存在于桨叶上下两侧的混合隔离区,使槽内流体均具有一定的流速,而刚性桨体系的能量主要集中在桨叶尖端,流体混合效果不佳,所以组合桨更有利于高黏度流体混合,本文数值模拟与实验研究结果一致。

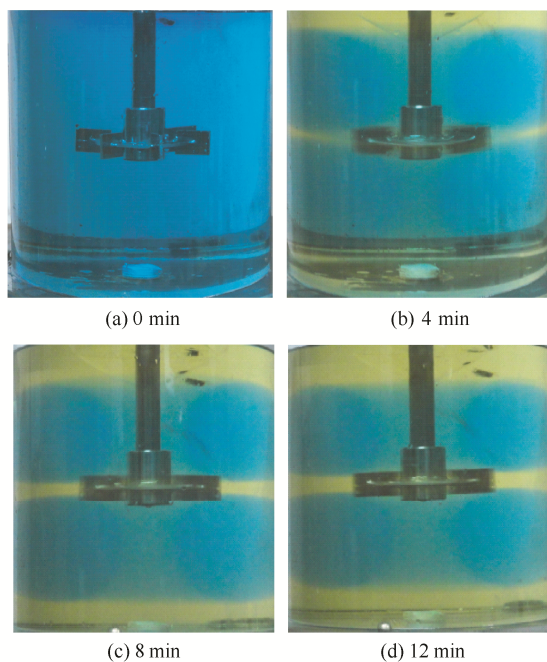


图 10 刚性桨搅拌槽中混合隔离区的演变过程

Fig.10 Evolution of isolated mixing regions in rigid RT impeller stirred tank

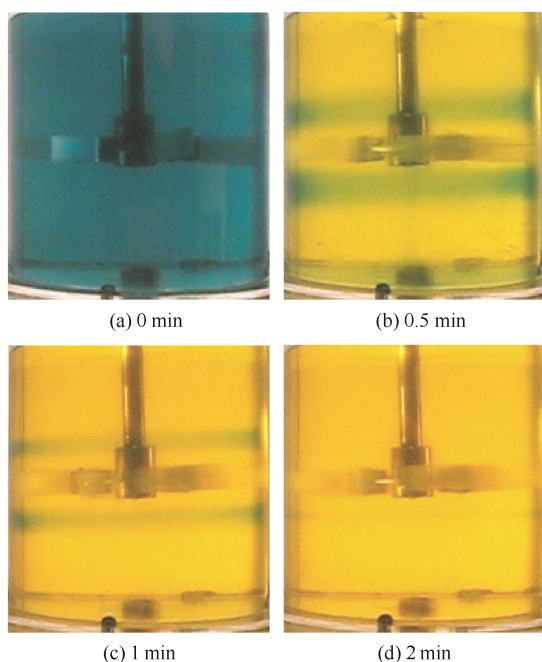


图 11 组合桨搅拌槽中混合隔离区的演变过程

Fig.11 Evolution of isolated mixing regions in combination RT impeller stirred tank

符 号 说 明

C ——桨叶离槽底距离, m
 D ——桨叶直径, m
 D_1 ——刚性六直叶桨直径, m

D_2 ——柔性六直叶桨直径, m
 d_1 ——转轴直径, m
 d_2 ——桨叶小圆柱直径, m
 d_3 ——叶轮圆盘直径, m
 E ——总能量, J
 F ——外力, N
 H ——搅拌槽高度, m
 h ——液面高度, m
 I ——单位张量
 l_1 ——刚性桨叶长度, m
 l_2 ——柔性桨叶长度, m
 N ——叶轮转速, $r \cdot \min^{-1}$
 P_v ——搅拌功率, kW
 p_1 ——压力, Pa
 T ——搅拌槽直径, m
 $\mathbf{v}$ ——速度矢量, $m \cdot s^{-1}$
 δ ——桨叶厚度, m
 μ ——液体黏度, $Pa \cdot s$
 ρ ——液体密度, $kg \cdot m^{-3}$
 τ ——黏性力张量

References

- [1] Chen Zhiping (陈志平), Zhang Xuwen (章序文), Lin Xinghua (林兴华). Handbook of Stirring and Mixing Equipment Design Selection (搅拌与混合设备设计选用手册) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
- [2] FanYurun (范毓润), Lu Zhumin (卢著敏). Periodic and aperiodic chaotic mixing between eccentric cylinders [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (6): 660-663
- [3] Rao Qi (饶麒), Fan Jianhua (樊建华), Wang Yundong (王运东), Fei Weiyang (费维扬). DPIV measurement and CFD simulation of viscous fluid flow in stirred tank agitated by Rushton turbine [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, **55** (8): 1374-1379
- [4] Yang W, Wang Y, Chen J, Fei W. Computational fluid dynamic simulation of fluid flow in a rotating packed bed [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **156**: 582-587
- [5] David P, Liu Z, Franco M. Analysis of KL_a measurement methods in stirred vessels: the role of experimental techniques and fluid dynamic models [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2010, **8** (1): 1-38
- [6] Hu Yinyu (胡银玉), Liu Zhe (刘喆), Yang Jichu (杨基础), Cheng Yi (程易). Liquid mixing in eccentric stirred tank [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (10): 2517-2522.
- [7] Yang Fengling (杨锋苓), Zhou Shenjie (周慎杰), Zhang Cuixun (张翠勋). Recent development of chaotic mixing of stirred tank [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2008, **27** (10): 1538-1543
- [8] Yianneskis M, PoPiolek Z, Whitelaw J H. An experimental study of the steady and unsteady flow characteristic of stirred reactors [J].

- Journal of Fluid Mechanics*, 1987, **175**: 537-555
- [9] Costes J, Coudere J P. Study by laser Doppler anemometry of the turbulent flow induced by a Rushton turbine in a stirred tank: influence of the size of the units (1): Mean flow and turbulence [J]. *Chemical Engineering Science*, 1988, **43** (10): 2751-2764
- [10] Shi Litian (施力田), Gao Zhengming (高正明), Min Jian (闵健). Large eddy simulation for mixing time in stirred tank with dual Rushton turbines [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (7): 1747-1752
- [11] Yek W M, Noui-Mehidi M N, Parthasarathy R, Bhattacharya S N, Wu J, Ohmura N, Nishioka N. Enhanced mixing of Newtonian fluids in a stirred vessel using impeller speed modulation [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2009, **87** (6): 839-846
- [12] Yang Yiwei (杨弋纬), Wang Jiajun (王嘉骏), Gu Xueping (顾雪萍), Feng Lianfang (冯连芳). The application of chaotic mixing in polymer blending [J]. *Polymer Materials Science and Engineering* (高分子材料科学与工程), 2012, **28** (3): 186-189
- [13] Lamberto D J, Alvarez M M, Muzzio F J. Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54**: 919-942
- [14] Peter R, Dirk W B. New miniature stirred-tank bioreactors for parallel study of enzymatic biomass hydrolysis [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **106**: 138-146
- [15] Somnath R, Sumanta A. Scalar mixing in a turbulent stirred tank with pitched blade turbine: role of impeller speed perturbation [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, **90**(7): 884-898
- [16] Andre C, Demeyre J F, Gatumel C, Berthiaux H, Delaplace G. Dimensional analysis of a planetary mixer for homogenizing of free flowing powders: mixing time and power consumption [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **198/199**: 371-378
- [17] Yang Fengling (杨锋玲), Zhou Shenjie (周慎杰), Wang Guichao (王贵超). Detached eddy simulation of the macro-instability in eccentrically stirred tanks [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2012, **2** (6): 228-234
- [18] Kato Y, Tada Y, Takeda Y, Nagatsu Y, Iwata S, Iwaishi S, Kajihara S, Lee Y, Koh S. Effects of unsteady mixing in turbulent agitated vessel [J]. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2009, **35**, 152-157
- [19] Szymon W, Lukasz J. Effect of eccentricity on laminar mixing in vessel stirred by double turbine impellers [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, **89** (11): 2268-2278
- [20] Liu Zuohua (刘作华), Ning Weizheng (宁伟征), Sun Ruixiang (孙瑞祥), Zhou Xiaoxia (周小霞), Tao Changyuan (陶长元). Fractal flow structure in air jet-stirred reactor with double impeller [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2011, **62** (3): 628-635
- [21] Liu Zuohua (刘作华), Yang Xianyan (杨鲜艳), Xie Zhaoming (谢昭明), Liu Renlong (刘仁龙), Tao Changyuan (陶长元), Wang Yundong (王运东). Chaotic mixing performance of high-viscosity fluid synergistically intensified by flexible impeller and floating particles [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64** (8): 2794-2800
- [22] Liu Fangfang (刘芳芳), Yang Canjun (杨灿军), Su Qi (苏琦), Wang Donghai (王东海), Zhang Yizhong (张译中). Simulation analysis and experimental research on the movements of biomimetic fin [J]. *Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2010, **46** (19): 24-29
- [23] Ren Luquan (任露泉), Liang Yunhong (梁云虹). Coupling Bionics (耦合仿生学) [M]. Beijing: Science Press, 2012
- [24] Zhang Yonghua (章永华). Theoretic and experimental research on propulsion flexible biomimetic undulatory robotic fin [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008
- [25] Liu Wangyu (刘旺玉), Zhang Xin (张鑫), Liu Xifeng (刘希凤), Gong Jiaxing (龚佳兴). Bionic design and performance study for flexible blades of wind turbine [J]. *Journal of Machine Design* (机械设计), 2010, **27** (5): 7-10
- [26] Campbell R L, Paterson E G. Fluid-structure interaction analysis of flexible turbomachinery [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, **27**(8): 1376-1391
- [27] Liu Zuohua (刘作华), Zeng Qiqin (曾启琴), Wang Yundong (王运东), Sun Ruixiang (孙瑞祥), Ning Weizheng (宁伟征), Tao Changyuan (陶长元). Study on laminar mixing enhanced by flexible impeller in high-viscosity fluid stirred tank [J]. *China Science Paper* (中国科技论文), 2012, **7** (3): 185-189
- [28] Juan M P, Amelia C R, Susana E Z. Mathematical modeling of the heat transfer and flow field of liquid refrigerants in a hydro fluidization system with a stationary sphere [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, **99**: 3303-3313