

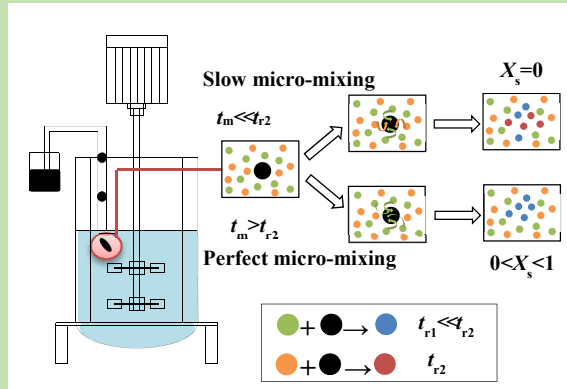
## Micro-mixing characteristics of non-Newtonian fluid in a stirred tank agitated with different impellers

Juan YANG<sup>1,2</sup>, Qinghua ZHANG<sup>1,2\*</sup>, Chao YANG<sup>1,2\*</sup>, Zaisha MAO<sup>1</sup>

1. CAS Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In order to investigate the micro-mixing performance of centripetal turbine in a non-Newtonian fluid system, the parallel competitive reactions of phosphate/iodide/iodate were used to measure the segregation index in a 0.282 m diameter cylindrical oval-bottom baffled stirred tank. The micro-mixing performance was compared among standard six straight blade turbine (DT), down-pumping pitched blade turbine (PBDT), centripetal turbine (CT), and ten dual-impeller combinations. The power numbers of single impellers were measured experimentally. And the influences of injection time, power



consumption of unit volume, impeller type on the segregation index were investigated. The results showed that the power number remained constant with the increase of power, and the power number of DT was roughly twice that of CT and four times of PBDT. With the increase of feeding time, the segregation index decreased gradually to an asymptotic level. With the increase of power consumption per unit volume, the segregation index of the three propellers decreased gradually, and keeps the relative level of DT<CT<PBDT. For the dual-impellers systems, the product distribution was dominated by the upper impeller since the feeding location was at the liquid surface. It was found that the combination of PBDT and DT with both strong shear and intensive circulation was more advantageous among the dual-impeller systems. In the dual CTs with backswept installation of lower propeller enhanced the micro-mixing. Contrast between single and double impellers at the same power consumption per unit volume, most of dual-impeller systems can improve the micro-mixing due to complementary flow pattern.

**Key words:** stirred tank; micro-mixing; non-Newtonian fluid; centripetal impeller; dual-impeller

收稿: 2019-01-30, 修回: 2019-03-01, 网络发表: 2019-03-07, Received: 2019-01-30, Revised: 2019-03-01, Published online: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(编号: 2016YFB0301702); 国家自然科学基金资助项目(编号: 21427814; 21776282); 中科院前沿科学重点项目(编号: QYZDJ-SSW-JSC030)

作者简介: 杨娟(1994-), 女, 重庆市忠县人, 硕士研究生, 化学工程专业, E-mail: yangjuan17@ipe.ac.cn; 通讯联系人, 张庆华, E-mail: qhzhang@ipe.ac.cn; 杨超, E-mail: chaoyang@ipe.ac.cn.

**引用格式:** 杨娟, 张庆华, 杨超, 等. 不同组合桨搅拌槽内非牛顿流体的微观混合特性. 过程工程学报, 2019, 19(5): 865-871.

Yang J, Zhang Q H, Yang C, et al. Micro-mixing characteristics of non-Newtonian fluid in a stirred tank agitated with different impellers (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(5): 865-871, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219128.

# 不同组合桨搅拌槽内非牛顿流体的微观混合特性

杨娟<sup>1,2</sup>, 张庆华<sup>1,2\*</sup>, 杨超<sup>1,2\*</sup>, 毛在砂<sup>1</sup>

1. 中国科学院过程工程研究所, 中国科学院绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学化学工程学院, 北京 100049

**摘要:** 在直径 0.282 m 的搅拌槽内, 以羟乙基纤维素(HEC)水溶液为工作体系, 以磷酸盐-碘化物-碘酸盐平行竞争反应为模型反应, 比较了非牛顿流体体系中向心桨、Rushton 桨、三斜叶桨的功率准数, 考察了加料时间、桨型及双层桨组合对微观混合效果的影响。结果表明, 随功率增大, 功率准数基本不变, Rushton 桨功率准数最大, 是向心桨的两倍、斜叶桨的四倍。随加料时间增大, 离集指数先减小后不变。在实验考察范围内, 单位体积功耗相等的情况下, 单层桨微观混合效果的顺序为 Rushton 桨>向心桨>斜叶桨, 双层桨中高剪切的 Rushton 桨与强循环的斜叶桨组合的微观混合效率最高。

**关键词:** 搅拌槽; 微观混合; 非牛顿流体; 向心桨; 双层桨

**中图分类号:** TQ027.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)05-0865-07

## 1 前言

搅拌槽由于具有相际接触面积大、传热传质效率高等特点, 在化工、制药、冶金及高分子合成等行业中有广泛的用途。搅拌槽内的混合过程是多尺度混合过程。根据研究尺度通常将混合过程分为宏观混合、介观混合和微观混合 3 个阶段<sup>[1]</sup>。而微观混合特性对工业过程中涉及快速复杂反应的体系(如某些沉淀反应和聚合反应等)的产物分布、产品质量及操作稳定性等均有非常重要的影响。

Danckwerts<sup>[2,3]</sup>在 20 世纪 50 年代首次提出离集概念, 并建议用离集强度和离集尺度两个指标衡量混合质量。离集尺度随宏观混合进行而不断减小。随宏观混合进行, 待混合的流体团块尺度逐渐减小, 通过分子扩散实现的微观混合渐次加强。离集强度是某时刻浓度场不均匀程度的指标, 宏观混合阶段保持不变; 在微观混合阶段逐渐减小, 当达到分子级混匀时, 其值为零。只有微观混合顺利进行, 化学反应才能按化学动力学预示的速率进行。微观混合实验研究主要以对微观混合敏感且便于测定的反应体系作模型反应, 用反应器中副产物的收率(即离集指数  $X_S$ )表征微观混合效率。微观混合效率高, 则副产物少,  $X_S \rightarrow 0$ 。模型反应包括 Bourne 等<sup>[4]</sup>提出的  $\alpha$ -萘酚与对氨基苯磺酸重氮盐的偶合反应、Bourne 等<sup>[5]</sup>提出的酸碱中和与氯乙酸乙酯水解反应和 Fournier 等<sup>[6]</sup>提出的碘化物-碘酸盐反应体系, 其中碘化物-碘酸盐反应体系应用最为广泛<sup>[7]</sup>。

搅拌桨是搅拌槽的核心部件, 其构型和操作是影响搅拌反应器性能的重要因素。研制新型高效的搅拌桨一直是搅拌槽研究的热点。随着对搅拌桨桨型研究的逐渐深入, 不断涌现出一些新型高效搅拌桨, 如变截面螺旋

弧叶桨(CBY 桨)<sup>[8]</sup>、穿流桨<sup>[9,10]</sup>、向心桨<sup>[11]</sup>、柔性桨<sup>[9,12,13]</sup>、Fractal 桨<sup>[14]</sup>和双层大叶片组合桨<sup>[15]</sup>等。向心桨使搅拌槽内的流体产生向心流动, 在功率消耗一定时, 向心桨宏观混合效率比三斜叶桨和 Rushton 桨都高<sup>[16]</sup>。虽然向心桨在牛顿流体体系中体现出了较优的性能, 但其用于搅拌非牛顿流体体系中的性能尚不明确。

本工作采用改进的碘化物-碘酸盐模型反应<sup>[17]</sup>, 在羟乙基纤维素(HEC)水溶液的低粘非牛顿体系中比较了向心桨(CT)、Rushton 桨(DT)和 45°下压三斜叶桨(PBTD)在不同操作条件下的微观混合特性, 考察了加料时间、搅拌功率对微观混合的影响, 比较了不同桨组合下微观混合性能, 为新型高效搅拌桨在非牛顿体系工业应用积累实验数据, 为其优化设计和放大提供必要的理论依据。

## 2 实验

### 2.1 实验装置

采用槽径  $T=0.282$  m 的椭圆底有机玻璃搅拌槽, 高为 0.8 m。槽内设置 4 个宽度  $W=T/10$  的标准挡板。实验装置示意图如图 1 所示。图 2 为搅拌槽及三种不同类型桨叶的结构示意图。槽内单层桨液体高度  $H_1=T$ (液体体积 16 L), 双层桨液体高度  $H_2=1.4T$ (液体体积 23 L)。叶轮直径  $D=T/2$ , CT 与 DT 桨圆盘直径为  $0.75D$ , 且桨叶叶片长和宽分别为  $0.25D$  和  $0.2D$ , PBTD 叶片宽为  $0.2D$ , 叶轮与器底间隙  $C=T/3$ 。斜叶桨为三叶片 45°下压桨, 向心桨为 45°向心六叶片。三种桨均按图 2 安装到搅拌轴上, 且顺时针旋转进行搅拌。

### 2.2 实验方法

将 80 g (双层桨 115 g)羟乙基纤维素(HEC)(阿跨龙公司)加入搅拌槽, 加水搅拌 3 h, 完全溶解成黏稠的非

牛顿流体母液后, 再加入  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{--NaH}_2\text{PO}_4$  缓冲溶液, 混合完成后分别加入 KI 和  $\text{KIO}_3$  溶液, 维持槽内温度约为  $20^\circ\text{C}$ 。混合 10 min 后以半间歇方式在液面加料点滴加硫酸溶液。由于硫酸滴加完毕需要一定时间混合完全, 且碘有一定的挥发性, 时间不宜过长, 实验测得在 5~20 min 内吸光度全槽均一旦稳定, 所以在硫酸溶液滴加完成后的 5~20 min 内取样用 UV9100 紫外分光光度计(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)测定溶液在波长 352 nm 处的吸光度。每次实验测量完毕需洗净搅拌槽, 重新制备 HEC 水溶液。各反应物浓度如表 1 所示, 均为分析纯。

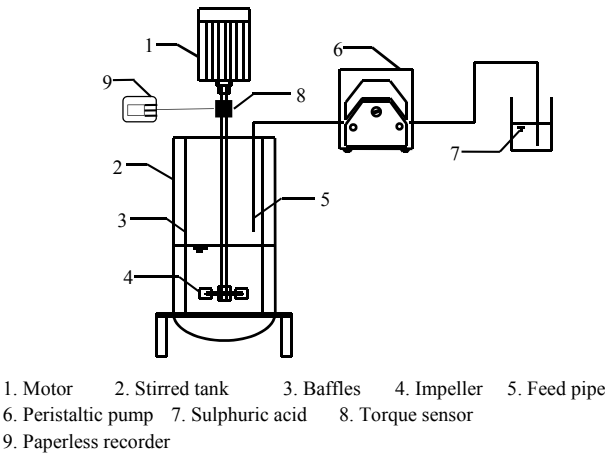


图 1 实验装置示意图  
Fig.1 Schematic of experimental apparatus

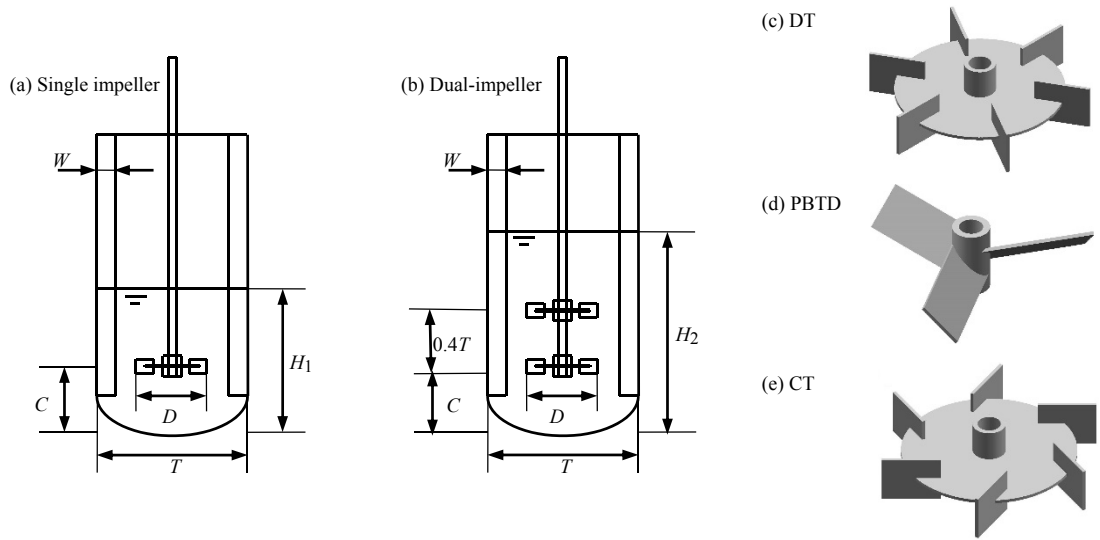
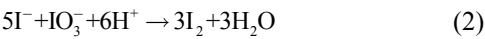
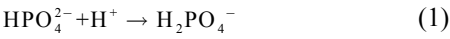


图 2 搅拌槽及搅拌桨结构示意图  
Fig.2 Schematic of experimental unit and impellers

表 1 反应物浓度

Table 1 Reagent concentration					
Reagent	KI	KIO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Concentration/(mol/L)	1.16×10 <sup>-2</sup>	2.33×10 <sup>-3</sup>	0.09	0.02	0.5

滴入硫酸时槽内会发生如下反应:



酸碱中和反应(1)为瞬间反应, 副反应(2)为快速反应。在理想的分子尺度混合均匀的条件下, 由于反应(1)比反应(2)快得多, 注入的酸只被反应(1)所消耗; 在较差的微观混合条件下, 局部浓度过高的酸在消耗磷酸盐离子的同时, 与周围的  $\text{I}^-$  和  $\text{IO}_3^-$  反应生成碘。碘形成被认

为是流体离集状态的一种度量。生成的碘与溶液中过量的  $\text{I}^-$  发生可逆反应(3), 生成  $\text{I}_3^-$  络离子。通过测量吸光度由图 3 的拟合曲线获得  $\text{I}_3^-$  浓度。反应(3)平衡常数  $K_B$  与温度  $T$  的关系如式(4)所示。由平衡常数与各离子浓度的关系[式(5)]及碘质量守恒关系[式(6)]可得反应后的  $\text{I}_2$  浓度。

$$\log_{10} K_B = \frac{555}{T} + 7.355 - 2.575 \log_{10} T \quad (4)$$

$$K_B = \frac{[\text{I}_3^-]}{[\text{I}_2][\text{I}^-]} \quad (5)$$

$$[\text{I}^-] = [\text{I}^-]_0 - \frac{5}{3}([\text{I}_2] + [\text{I}_3^-]) - [\text{I}_3^-] \quad (6)$$

副反应的选择性  $X_s$ (离集指数)为

$$X_s = \frac{Y}{Y_{ST}} \quad (7)$$

$$\text{其中 } Y = \frac{2(n_{I_2} + n_{I_3^-})}{n_{H^+,0}} = \frac{2V([I_2] + [I_3^-])}{V_{\text{injection}}[H^+]_0} \quad (8)$$

$$Y_{ST} = \frac{6[IO_3^-]_0}{6[IO_3^-]_0 + [H_2BO_3^-]_0} \quad (9)$$

式中,  $Y$  为副产物实际收率,  $Y_{ST}$  是副产物最大收率,  $n$  为组分摩尔数(mol),  $V$  为搅拌槽内溶液体积( $m^3$ ),  $V_{\text{injection}}$  为加入的硫酸体积( $m^3$ ),  $X_s$  越小, 表明微观混合越好。

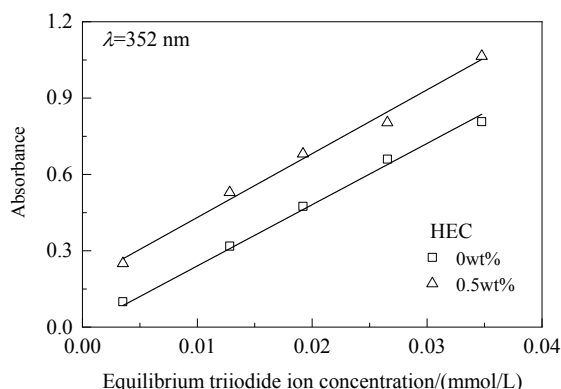


图3 吸光度-浓度校正曲线

Fig.3 Absorbance as a function of triiodide ion concentration

### 2.3 功率及粘度测量

用 SN-1050A-10N 扭矩传感器(北京森索中恒科技发展有限公司)测定搅拌功率。将扭矩传感器安装在搅拌轴上, 通过 XSR21R-1B3USBV0 无纸记录仪(北京森索中恒科技发展有限公司)获得扭矩。联轴器晃动及搅拌会产生不稳定性, 当搅拌体系基本稳定后, 在 1 min 内每 2 s 测一次扭矩, 取多次测量的平均值, 减去相同转速下空载时的扭矩, 即为净扭矩值  $M$ 。

$$P = \omega M = 2\pi N M \quad (10)$$

式中,  $P$  为搅拌功率(W),  $\omega$  为角速度(rad/s),  $M$  为扭矩(N·m),  $N$  为搅拌转速(r/s)。

功率准数  $N_p$  是表征搅拌桨自身性能的无量纲准数:

$$N_p = P / \rho N^3 D^5 \quad (11)$$

式中,  $\rho$  为液体密度( $kg/m^3$ ),  $D$  为叶轮直径(m)。

用 HAAKE MARS 60 流变仪(德国赛默飞世尔科技有限公司)测得实验中非牛顿体系(0.5wt% HEC)流变特性如图 4 所示, 稠度系数  $m=0.6 Pa \cdot s^n$ , 流变指数  $n=0.57$ , 可看出该溶液具有假塑性流变行为。利用幂律模型, 结合搅拌釜内平均剪切速率的 Metzner 方法, 根据文献<sup>[18]</sup>

查得 Metzner 常数  $K_s=11$ , 根据式(12)得到表观粘度  $\eta=90\sim 150 mPa \cdot s$ , 槽内雷诺数  $400 < Re < 1800$ 。

$$\eta = m(K_s N)^{n-1} \quad (12)$$

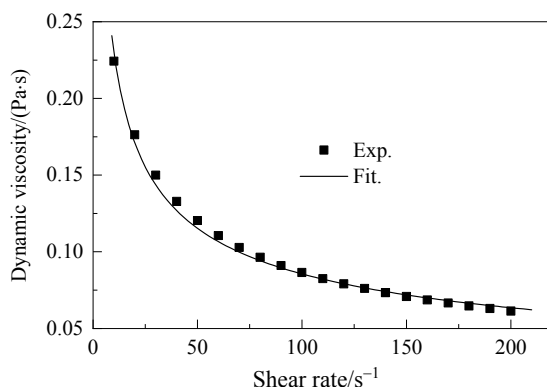


图4 HEC 水溶液的动力粘度随剪切速率的变化

Fig.4 Dynamic viscosity as a function of shear rate for HEC-water solutions

## 3 结果与讨论

### 3.1 进料时间对微观混合的影响

在微观混合实验中, 需消除宏观混合效应对离集指数测定的影响, 常见的方法是在最差的宏观混合条件下确定临界加料时间。为在相同的单位体积搅拌功耗下对比三种桨的微观混合效果, 通过实验测得单层桨实验中 PBTD 转速范围为 288~500 r/min, CT 转速范围为 225~375 r/min, DT 转速范围为 180~300 r/min 时, 三种桨在相应转速范围内既能保证搅拌槽内的混合效果, 又不至于产生表面曝气现象。单斜叶桨在最低转速 288 r/min 下确定  $H_2SO_4$  进料速度。添加足够缓慢时, 单位时间内的进料流量足够低, 酸溶液可以被粗尺度的涡流分散至非常小的尺度, 不至于阻滞微观混合和化学反应,  $X_s$  只依赖于微观混合而不受加料点附近宏观混合的

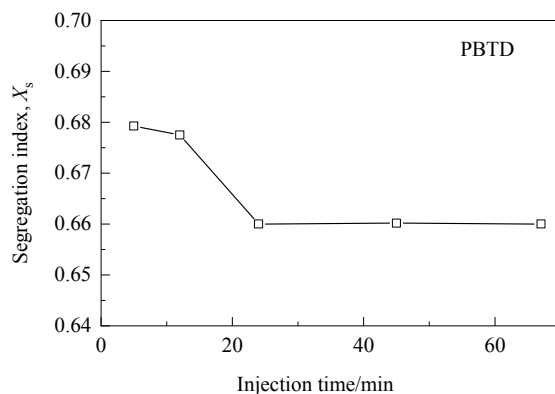


图5 离集指数随加料时间的变化

Fig.5 Segregation index as a function of the injection time

限制。离集指数随加料时间的变化如图 5 所示, 硫酸溶液的加料时间大于 24 min (表面进料 33 mL), 即进料速度应小于 1.37 mL/min, 产物分布已不再随进料时间的延长而降低, 实验中均取进料速度为 1.37 mL/min。

### 3.2 桨型对微观混合的影响

为研究三种搅拌桨的混合性能, 测量了不同转速下的功耗, 计算得到相应的功率准数如图 6 所示。由图可知, 本实验条件下( $400 < Re < 1800$ ), 三种桨的功率准数在不同功耗下基本保持恒定。DT 桨的功率准数远大于 CT 桨和 PBTD 桨, 约为 CT 桨的 2 倍、PBTD 桨的 4 倍。通常功率准数小能作为低功耗的判断依据, 但需与搅拌时间、搅拌效果等一并考虑后才能判断搅拌器性能<sup>[19]</sup>。

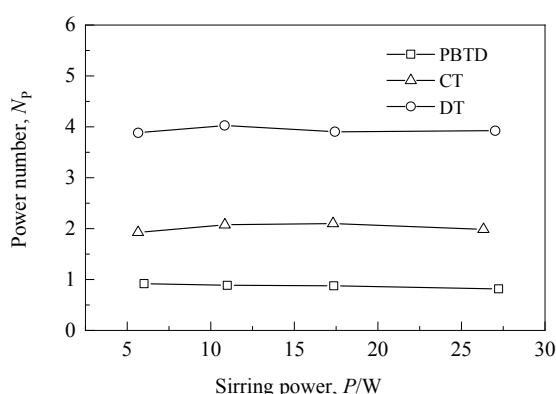


图 6 三种桨的功率准数

Fig.6 Power number of the three impellers

对向心桨宏观混合特性的实验研究<sup>[16]</sup>指出, CT 桨与 DT 桨宏观混合时间相当, 但功耗更低。为直观对比搅拌桨的微观混合性能, 在相同单位体积功耗( $P_v$ )下比较离集指数。图 7 为离集指数随搅拌功耗的变化。随搅拌功耗增加, 三种桨型的离集指数都逐渐降低, 微观混合增强。这是由于随功耗增加, 搅拌施加于单位体积被搅拌液体的外力增大, 槽内液体流动增强, 伴随卷吸变形的分子扩散过程增强, 微观混合速度变快。搅拌功耗相同时, DT 桨的微观混合效果最好, CT 桨次之, PBTD 桨最差。对比文献<sup>[16]</sup>可以发现, 向心桨在非牛顿流体体系中的微观混合效果并未表现出在牛顿流体体系中优于 DT 的优良宏观性能。这是由于六直叶涡轮桨作为一种径向流搅拌桨, 产生强烈的径向排出流, 具有较强的剪切能力, 使其在假塑性流体的中功耗下粘度更低, 增强槽内流体湍动程度。而斜叶桨是一种轴流式搅拌桨, 产生明显的轴向流动, 功耗主要用于流体循环, 使其在本实验体系中搅拌能力不佳。向心桨产生的流型介于两者之间, 微观混合效果也介于两者之间。而在牛顿流体体系中, 向心桨使流体在整个搅拌槽内的整体循环增

强, 物料更易分散, 所以牛顿流体体系中 CT 桨的宏观性能比 DT 桨好。

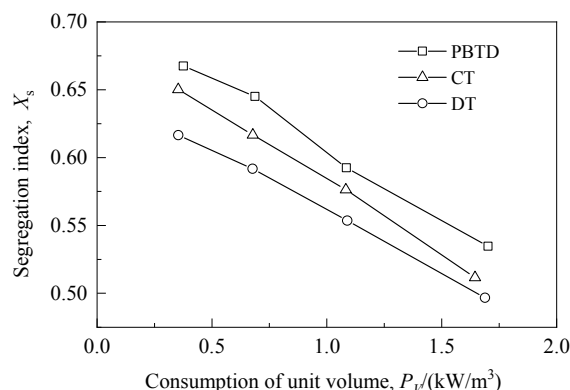


图 7 桨型对离集指数的影响

Fig.7 Effect of impeller type on segregation index

### 3.3 不同桨组合对微观混合的影响

为研究不同双层桨型组合对微观混合的影响规律, 分别用三种桨作为上层桨, 研究 10 种桨组合的混合效果。图 8 为上层桨为斜叶桨的三种桨组合的微观混合效果。由图可知, 组合桨 PBTD-DT 的离集指数最小, 其次为 PBTD-CT 和 PBTD-PBTD。随功率增大, 组合桨 PBTD-DT 的优势越明显。这是由于上层桨 PBTD 可与 DT 形成整个搅拌槽内的大循环, 当下层桨为具备强剪切能力的 DT 桨时, 有助于提高整个槽内的混合程度, 增强微观混合。

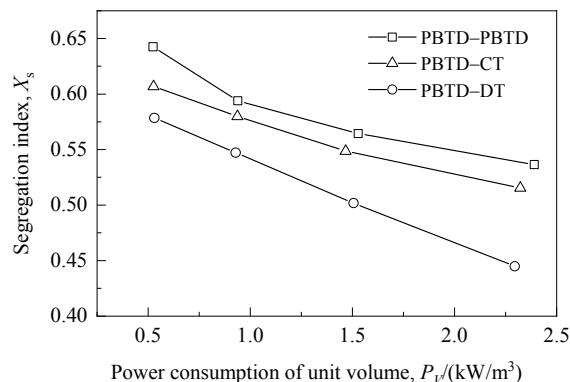


图 8 PBTD 为上层桨时桨组合对离集指数的影响

Fig.8 Effect of combination with PBTD as upper impeller on segregation index

图 9 为上层桨为向心桨的 4 种桨组合的微观混合效果, 其中 CT/CT 为下层向心桨叶片后掠安装, 反向 CT 实际上成为了径向桨。在低功耗下几种组合的微观混合效果相差不大, 随功耗增大, 几种桨组合的离集指数  $CT-PBTD < CT/CT < CT-DT < CT-CT$ , 表明相同功耗下, 强循环的 PBTD 桨能有效防止流型分区, 对加强整

个槽内微观混合的作用很大。CT-CT 的混合效果最差,这是由于两个向心桨按相同方向安装时,造成流型分区严重,而当将下层 CT 桨叶片后掠安装时,能使上下两层桨较好地将整个搅拌槽内液体连通,明显改善混合效果。

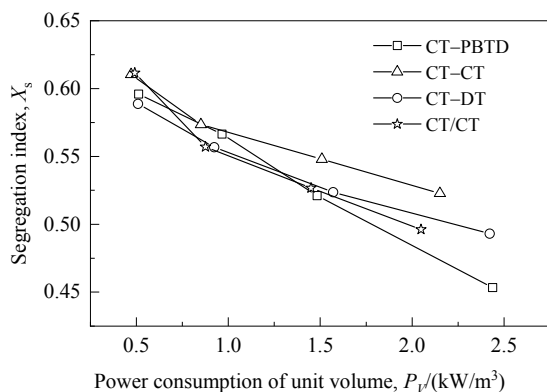


图9 CT 为上层桨时桨组合对离集指数的影响

Fig.9 Effect of combination with CT as upper impeller on segregation index

DT 桨为上层桨的微观混合实验结果如图 10 所示。在较高功耗下,桨组合 DT-PBTD 的离集指数最低,DT-DT 和 DT-CT 的离集指数相当。结果进一步验证了强剪切桨叶与强循环桨叶配合使用是双层桨混合的最佳组合。这是因为上层桨 DT 在液面加料点附近能产生较强湍流。

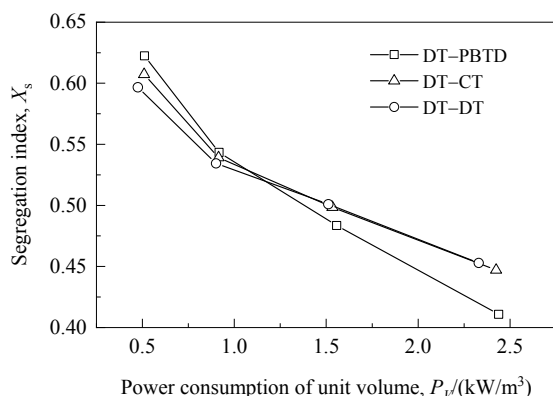


图10 DT 为上层桨时桨组合对离集指数的影响

Fig.10 Effect of combination with DT as upper impeller on segregation index

由图 8~10 可知,低功耗下桨组合为 PBTD-DT 时离集指数最小,高功耗下 DT-PBTD 组合的离集指数最小。这是由于实验选择在液面加料,上层桨的桨型将直接影响液面处流体的流动,特别在高功耗下液面流动情况的差别更明显,导致上层桨为 DT 的双层桨组合离集指数更小。实验范围内组合桨 PBTD-PBTD 的离集指数

最大,微观混合最差。

在单位体积功耗相同的条件下,双层桨组合 PBTD-CT 和 PBTD-DT 比单层桨 PBTD 的混合效果好,双层桨组合 CT-PBTD, CT/CT, CT-DT 比单层桨 CT 的混合效果好,双层桨组合 DT-PBTD, DT-DT, DT-CT 比单层桨 DT 的混合效果好。

## 4 结论

通过碘化物-碘酸盐平行竞争反应体系实验研究了搅拌槽内不同桨型及其组合的微观混合特性,得到如下结论:

(1) 随加料时间增大,离集指数先减小后保持不变。加料时间恒定后,可消除宏观混合对产物分布的影响。

(2) 随功率增大,三种桨的功率准数基本保持恒定,Rushton 桨(DT)最大,向心桨(CT)其次,45°下压三斜叶桨(PBTD)最小;随单位体积功耗增大,三种桨的离集指数逐渐减小,且相同单位体积功耗下  $DT < CT < PBTD$ ;向心桨在非牛顿流体体系中的性能比在牛顿流体中差。

(3) 在液面加料时双层桨混合效果主要受上层桨影响;强剪切的 DT 桨与高循环的 PBTD 桨组合的微观混合效果最好;双层 CT 桨时,下层桨反向安装会增强微观混合;大多数情况下,由于流型互补,单位体积功耗相同时双层桨的混合效果比单层桨好。

## 参考文献

- [1] Mao Z S, Yang C. Micro-mixing in chemical reactors: a perspective [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(4): 381-390.
  - [2] Danckwerts P V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures [J]. Applied Science Research, 1952, 3(4): 279-296.
  - [3] Danckwerts P V. The effect of incomplete mixing on homogeneous reactions [J]. Chemical Engineering Science, 1958, 8(1): 93-102.
  - [4] Bourne J R, Kozicki F, Rys P. Mixing and fast chemical reaction. I: test reactions to determine segregation [J]. Chemical Engineering Science, 1981, 36(10): 1643-1648.
  - [5] Bourne J R, Yu S. Investigation of micromixing in stirred tank reactors using parallel reactions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(1): 41-55.
  - [6] Fournier M C, Falk L, Villermaux J. A new parallel competing reaction system for assessing micromixing efficiency—experimental approach [J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(22): 5053-5064.
  - [7] Cheng J C, Feng X, Cheng D, et al. Retrospect and perspective of micro-mixing studies in stirred tanks [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(1): 178-190.
  - [8] 闵健, 高正明, 蒋勇, 等. 多层桨搅拌槽内的微观混合特性 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(5): 495-498.
- Min J, Gao Z M, Jiang Y, et al. Micromixing characteristics in a stirred tank with multiple impellers [J]. The Chinese Journal of

- Process Engineering, 2005, 5(5): 495–498.
- [9] Gu D, Liu Z, Xu C, et al. Solid-liquid mixing performance in a stirred tank with a double punched rigid-flexible impeller coupled with a chaotic motor [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 118: 37–46.
- [10] 王能勤, 梁正祥, 张桂昭. 穿流式搅拌桨: CN88219019.9 [P/OL]. 1988–11–19.  
Wang N Q, Liang Z X, Zhang G Z. Punched impeller: CN88219019.9 [P/OL]. 1988–11–19.
- [11] 杨超, 王涛, 毛在砂, 等. 一种产生向心流动的搅拌桨装置: CN102049208A [P/OL]. 2011–05–11.  
Yang C, Wang T, Mao Z S, et al. An agitator device for generating centripetal flow: CN102049208A [P/OL]. 2011–05–11.
- [12] 刘作华, 杨鲜艳, 谢昭明, 等. 柔性桨与自浮颗粒协同强化高黏度流体混沌混合 [J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2794–2800.  
Liu Z H, Yang X Y, Xie Z M, et al. Chaotic mixing performance of high-viscosity fluid synergistically intensified by flexible impeller and floating particles [J]. CIESC Journal, 2013, 64(8): 2794–2800.
- [13] 刘仁龙, 李爽, 刘作华, 等. 穿流-柔性组合桨强化搅拌槽中流体混沌混合特性 [J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4736–4742.  
Liu R L, Li S, Liu Z H, et al. Chaotic mixing enhanced by punched-flexible impeller in stirred vessel [J]. CIESC Journal, 2015, 66(12): 4736–4742.
- [14] Mule G M, Kulkarni A A. Mixing of medium viscosity liquids in a stirred tank with fractal impeller [J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2016, 50(6): 914–921.
- [15] Liu B, Zhang Y, Zheng Y, et al. Micromixing simulation of novel large-double-blade impeller [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 66: 62–69.
- [16] 李挺, 贾卓泰, 张庆华, 等. 几种单层桨搅拌槽内宏观混合特性的比较 [J]. 化工学报, 2019, 70(1): 42–48.  
Li T, Jia Z T, Zhang Q H, et al. Comparison of macro-mixing characteristics of stirred tank with different impellers [J]. CIESC Journal, 2019, 70(1): 42–48.
- [17] Pinot J, Commenge J M, Portha J F, et al. New protocol of the Villermaux-Dushman reaction system to characterize micromixing effect in viscous media [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 118: 94–101.
- [18] 陈志平, 章序文, 林兴华. 搅拌与混合设备设计选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 31–33.  
Chen Z P, Zhang X W, Lin X H. Handbook for design and selection of stirring and mixing equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 31–33.
- [19] 陈志希, 谢明辉, 周国忠, 等. 24种搅拌器的功率曲线 [J]. 化学工程, 2010, 38(3): 38–43.  
Chen Z X, Xie M H, Zhou G Z, et al. Power curve of 24 types of mixers [J]. Chemical Engineering, 2010, 38(3): 38–43.