

# 组合桨微波反应釜内流动混合特性数值模拟

## Numerical simulation of flow mixing characteristics in microwave reactor with combined impeller

张 玉<sup>1,2</sup>      金光远<sup>1,2</sup>      崔政伟<sup>1,2</sup>      宋春芳<sup>1,2</sup>      陈海英<sup>1,2</sup>

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>    JIN Guang-yuan<sup>1,2</sup>    CUI Zheng-wei<sup>1,2</sup>    SONG Chun-fang<sup>1,2</sup>    CHEN Hai-ying<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu

214122, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Jiangnan, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**针对微波反应釜搅拌混合均匀性问题,设计具有不同桨型组合的双层搅拌结构微波反应釜,其组合方式上下桨为推进式搅拌桨 A100(A1)、上桨 A200 下桨 A100(A2)和上桨 A100 下桨 A200(A3)。基于计算流体力学 CFD(Computational Fluid Dynamics)方法,采用层流模型、组分扩散模型和多重参考系方法对微波反应釜内醇油混合液的流动混合特性进行数值模拟,获得了具有 3 种不同组合桨反应釜内混合液的流动特性和不同加料位置下的混合时间特征。结果表明:组合桨 A1 釜内上下桨间存在一个轴向速度趋近于零的环流面,该面影响了釜内混合液的轴向流动混合;而组合桨 A2、A3,改善了该环流面上的轴向速度分布,其最大轴向速度分别是组合桨 A1 的 1.22、2.28 倍,增强了上下桨间混合液的轴向迁移能力;加料点的位置会影响反应釜内混合液的混合时间,在理想加料点 B 加料时,组合桨 A3 的混合时间最短。

**关键词:**微波反应釜;组合桨;组分扩散;混合时间;计算流体力学;环流

**Abstract:** In order to investigate mixing uniformity in microwave reactor, the microwave reactors with dual stirring structure were designed, combined by the upper and lower impellers A100(A1), the upper impeller A200 and lower impeller A100(A2), and the upper impeller A100 and lower impeller A200(A3). Based on Computational Fluid Dynamics (CFD) method, laminar model, component diffusion model and multi-reference frame method (MRF)

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:21606109);中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:JUSRP51634B);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(编号:SJCX18\_0629)

**作者简介:**张玉,男,江南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**金光远(1979—),女,江南大学副教授,硕士生导师,博士。

E-mail:gyuanjin@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:**2018-08-02

were used to simulate flow mixing characteristics of the alcohol-oil mixture in these microwave reactors. The flow characteristics of the alcohol-oil mixture and mixing time characteristics at different feeding positions in these microwave reactors were obtained. The results showed that there was a circulation flow surface with axial velocity approaching zero between the upper and lower impellers in microwave reactor with combined impeller A1, which affected the axial flow mixing of the mixture. The combined impeller A2 and A3 improved the axial velocity distribution on circulation flow surface, with the maximum axial velocity 1.22 times and 2.28 times of the combined impeller A1, respectively. Meanwhile it enhanced the axial migration capability of mixture between the upper and lower impeller. The position of the feeding point could affect the mixing time of mixture in microwave reactor. The combined impeller A3 obtains the shortest mixing time at the ideal feeding point B. The study provided a practical theoretical reference for the design, selection and application of the microwave reactor combined impellers.

**Keywords:** microwave reactor; combined impeller; component diffusion; mixing time; computational fluid dynamics; circulation flow

微波加热与传统加热相比,具有升温速率快、反应时间短、产物转化率高、对环境无污染等优点<sup>[1-2]</sup>,被广泛用于食品干燥、高温冶金、化学反应等实际工程中。利用微波加热可以克服生产制备生物柴油化学反应中反应速率慢、醇/油两相接触差、能耗高等缺点<sup>[3]</sup>。目前国内外学者对微波反应器的研究主要集中在改变微波反应器内壁形状<sup>[4-6]</sup>、馈源位置及分布<sup>[7]</sup>、微波功率<sup>[8]</sup>等方面,缺少对微波反应器搅拌混合性能的分析。搅拌作为微波反应器中一个重要的组成单元,不仅可以增大物料与微波的接触面积,提高化学反应速率,而且还可以增加温度分布均匀性。如何选用合适的搅拌桨来提供适当的流场进而提高微波反应器混合效率,是微波反应器研究的重点<sup>[9]</sup>。计算流体力学以数学模型为基础,通

过高性能计算机模拟实际工况运行,给出试验所不能得出的流动细节,是分析微波反应釜搅拌混合性能优劣的主要工具<sup>[10-11]</sup>。

国内外许多学者就提高反应釜搅拌性能做出了大量的研究。Zhu等<sup>[12]</sup>设计了一种新型带绞龙的微波反应釜,通过Comsol模拟和实际运行比较发现:与不带绞龙旋转的微波反应釜相比,带绞龙旋转搅拌的反应釜中温度均匀性大大提高;面对强放热反应釜在实际运行中出现物料混合不均、散热性能较差的问题,周俊超等<sup>[13]</sup>利用Fluent模拟了不同盘管离底高度下反应釜内速度流场,通过比较不同径向位置下流体速度的大小来获得最优离底高度;刘方等<sup>[14]</sup>通过改变搅拌转速、桨径和叶片倾角等参数,优化了聚酯合成搅拌反应釜的结构,经优化后的反应釜在实际运行中大大缩短了聚酯反应的时间;汪博恺等<sup>[15]</sup>研究了黏度对微波反应釜搅拌桨功率的影响,得出在较高黏度下三叶推进式搅拌桨功耗更低。

本研究拟设计不同桨型组合的双层搅拌结构微波反应釜,基于计算流体力学CFD方法,采用层流模型和组分扩散模型对具有不同推进式桨型组合的双层搅拌桨在微波反应釜内无微波作用时的流动混合特性进行数值模拟和分析,考察了由推进桨型A100和A200不同组合方式下反应釜内甲醇和菜籽油反应混合液的流动特征,及加料点位置对流动混合时间的影响规律,以期为用于酯化反应的微波反应釜中搅拌桨的设计、选型和应用提供具有实际意义的理论依据。

## 1 计算模型

### 1.1 反应釜及搅拌桨结构

计算采用以W·RAT-20型微波反应釜为模拟对象,其釜径 $T=80\text{ mm}$ 、液位高度 $H=120\text{ mm}$ 、无挡板设计,反应釜模型及坐标系如图1所示。所使用的推进式桨参数特征及其双层组合型式如图2所示,具体参数见表1。其中双层三叶推进式组合桨(A1)是由Lightnin公司生产的A100型轴流上推式桨组合而成,A1的改进型A2与A3只是将相对应的上、下层桨改为Lightnin公司生产的A200型轴流上推式桨,保持桨间距 $h=40\text{ mm}$ 与离底高度 $c=20\text{ mm}$ 不变。

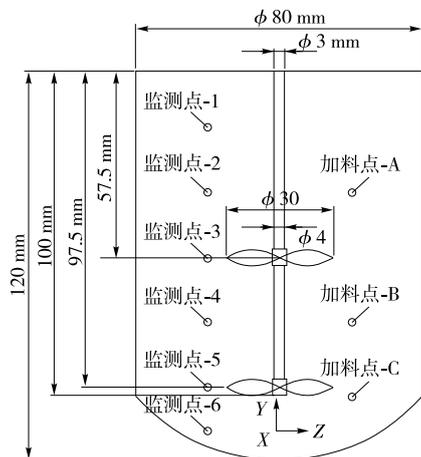


图1 反应釜结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of reactor structure

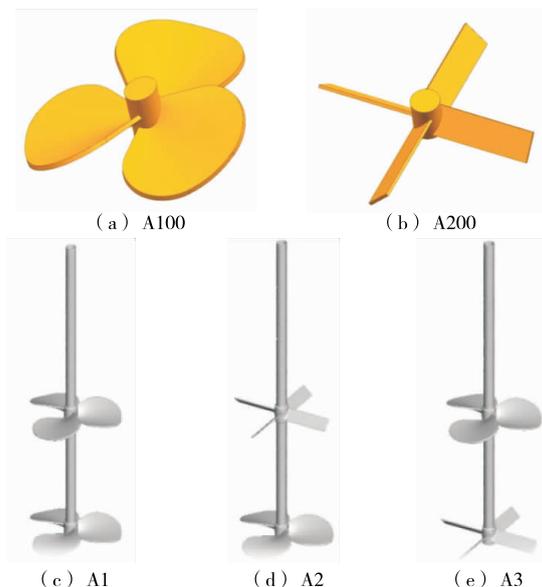


图2 2种原型桨及3种组合方式

Figure 2 Two original impellers and three combinations

表1 桨参数

Table 1 Impeller parameters

| 叶型   | 叶片数 | 叶片倾角/(°) | 直径/mm |
|------|-----|----------|-------|
| A100 | 3   | 45       | 30    |
| A200 | 4   | 45       | 30    |

### 1.2 搅拌混合液及槽内流态

搅拌混合液为摩尔比6:1的甲醇和菜籽油反应混合液,经测定密度 $\rho=876\text{ kg/m}^3$ ,黏度 $\mu=0.016\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;搅拌转速 $N=-360\text{ r/min}$ 。根据雷诺数公式[式(1)],得 $Re=295.65$ ,属层流。

$$Re = \frac{\rho ND^2}{60\mu} \quad (1)$$

## 2 数学模型

本设计主要研究的是双层三叶推进式搅拌桨及其改进型式在反应釜内的流动特性,需遵守流体力学物理守恒方程,即满足连续性方程和动量方程。在模拟示踪剂扩散过程和预测混合时间方面,也需满足组分扩散方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

式中:

$u, v, w$ ——速度矢量 $\mathbf{V}$ 在 $x, y, z$ 方向的分量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \times (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \times (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \times (\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z, \quad (5)$$

式中:

$p$ ——流体微元上的压力;

$\tau_{ij}$ —— $j$  方向的黏性应力作用在垂直于  $i$  轴的平面上的分量;

$f_x, f_y, f_z$ ——单位质量体积力在  $x, y, z$  方向的分量。

组分扩散方程:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \nabla \times (\rho c_s \mathbf{V}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial z} \right] + S_s, \quad (6)$$

式中:

$c_s$ ——组分  $s$  的体积浓度, %;

$\rho c_s$ ——组分  $s$  的质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$D_s$ ——组分  $s$  的扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$S_s$ ——系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的组分  $s$  的质量, 即生产率,  $\text{kg}$ 。

### 3 数值模拟方法

#### 3.1 网格划分及无关性检验

在 Unigraphics (UG) 中建立反应釜几何模型, 导入 ICEM-CFD (计算流体力学前处理软件) 中进行网格划分。由于非结构化四面体网格在处理弯曲曲面时具有优良的适应性, 因此选用非结构化四面体网格对反应釜模型进行网格划分, 并对浆表面及附近区域做加密处理。以具有组合浆 A1 的反应釜为例进行网格无关性分析, 采用 7 套不同数量的网格 ( $5.60 \times 10^5, 6.40 \times 10^5, 7.80 \times 10^5, 8.80 \times 10^5, 9.40 \times 10^5, 1.10 \times 10^6, 1.33 \times 10^6$ ) 进行稳态流场计算得到网格数对转矩的影响, 如图 3 所示。当网格数量  $> 8.80 \times 10^5$  时, 组合浆转矩的误差  $< 1\%$ , 因此网格数量选择  $8.80 \times 10^5$ 。具有组合浆 A2、A3 反应釜的网格数量分别为  $9.80, 9.90 \times 10^5$ 。

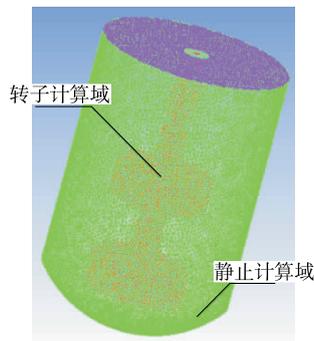
#### 3.2 边界条件

运用 CFD 中多重参考系模型 (MRF) 将反应釜分为 2 个计算域: 转子计算域与静止计算域。转子计算域包括浆和搅拌轴; 静止计算域包括壁面在内的区域, 两者用交界面 (interface) 进行数据交换。将转子计算域设为旋转运动条件, 转速为  $-360 \text{ r}/\text{min}$ ; 静止计算域为静止条件; 搅拌浆相对于转子计算域的速度为  $0 \text{ r}/\text{min}$ , 为旋转无滑移壁面边界条件; 釜壁为静止无滑移壁面边界条件; 不考虑自由液面特征, 将釜口液面设为对称面边界。

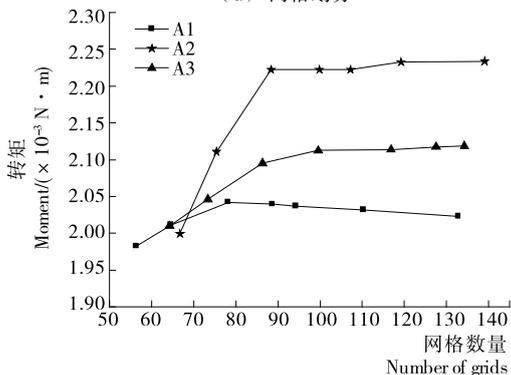
#### 3.3 计算方法

因  $Re = 295.65$ , 故选择层流模型; 考虑重力影响; 速度—压力耦合采用 SIMPLE 算法; 压力离散选择 Standard 格式; 动量离散选择二阶迎风格式, 松弛因子保持不变; 收敛残差设为  $10^{-8}$ , 计算收敛后获得稳态流场。

将稳态收敛的流场作为初始条件进行浓度场计算。选用同组分的醇油混合液作为示踪剂, 启动组分传输模型, 激活组分扩散方程, 但不打开化学反应选项, 确保反应釜内单



(a) 网格划分



(b) 网格无关性

图 3 网格划分及无关性检验

Figure 3 Meshing grid and independence check

相多组分间只进行单纯的物料混合。运用 Fluent 中补丁函数, 以加料点为圆心, 做半径为  $5 \text{ mm}$  的球体, 将其浓度定义为 1, 其他部分浓度为 0, 将浓度收敛残差设定为  $10^{-6}$ , 时间步长为  $0.015 \text{ s}$ , 开始进行迭代计算。

为研究不同加料点对混合时间的影响, 本研究选取 3 个加料点, 如表 2 所示。其中加料点 A 位于上层浆的上部, 加料点 B 位于上下浆之间, 加料点 C 位于下层浆下部。3 个加料点分别位于反应釜的上、中、下区域。在釜内设置 6 个不同的监测点, 通过监测点浓度随时间的变化曲线, 来确定混合时间。6 个监测点与 3 个加料点基本覆盖整个反应釜, 如图 1 所示。规定轴向速度沿  $z$  轴正向为正, 反之为负; 径向速度由搅拌浆指向釜壁为正, 反之为负; 切向速度与搅拌浆旋转方向一致为正, 反之为负。

## 4 结果分析

### 4.1 流动特性

#### 4.1.1 $yz$ 平面内速度分布

图 4 表示具有 3 种组合浆的反

表 2 加料点和监测点坐标

Table 2 Feeding points and monitoring points coordinates

| 加料点 | 坐标                | 监测点 | 坐标                  |
|-----|-------------------|-----|---------------------|
| A   | (0.0, 20.0, 67.5) | 1   | (0.0, -20.0, 87.5)  |
|     |                   | 2   | (0.0, -20.0, 67.5)  |
|     |                   | 3   | (0.0, -20.0, 47.5)  |
| B   | (0.0, 20.0, 27.5) | 4   | (0.0, -20.0, 27.5)  |
|     |                   | 5   | (0.0, -20.0, 7.5)   |
| C   | (0.0, 20.0, 5.0)  | 6   | (0.0, -20.0, -10.0) |

反应釜在  $yz$  平面内的速度矢量图。从图 4 中看出, 3 种组合桨在反应釜内总的流型是以上下桨为中心形成的上下循环涡流, 上下桨间存在方向与  $y$  轴平行的环流面 ( $z=22\text{ mm}$ ), 环流面<sup>[16-17]</sup>的存在会导致反应釜中上下桨对流体的搅拌作用限制在各自半层内, 阻碍混合液的轴向流动, 影响全釜的混合效果。组合桨 A3 下层桨附近的涡旋较组合桨 A1、A2 而言, 循环涡流偏上, 涡径较大, 其射出的流体速度与  $y$  轴呈一定的夹角, 使流体产生轴向运动, 有利于打破组合桨 A1 中

上下桨间环流面对流体轴向迁移的阻碍作用。

4.1.2  $xy$  平面内速度分布 图 5 为具有组合桨 A1 的反应釜在竖直高度  $z=22\text{ mm}$  时,  $xy$  平面内合速度和轴向速度分布。观察图 5(a) 可知, 合速度在  $xy$  平面内呈圆环状分布, 由搅拌中心沿釜径方向速度先增加再减小。由图 5(b) 中  $xy$  平面内轴向速度分布可知, 该位置流体的轴向速度接近为 0, 说明流体在该位置时基本无轴向运动, 导致该平面对上下桨间混合液的轴向迁移起阻碍作用, 不利于全釜内混合液的混合。

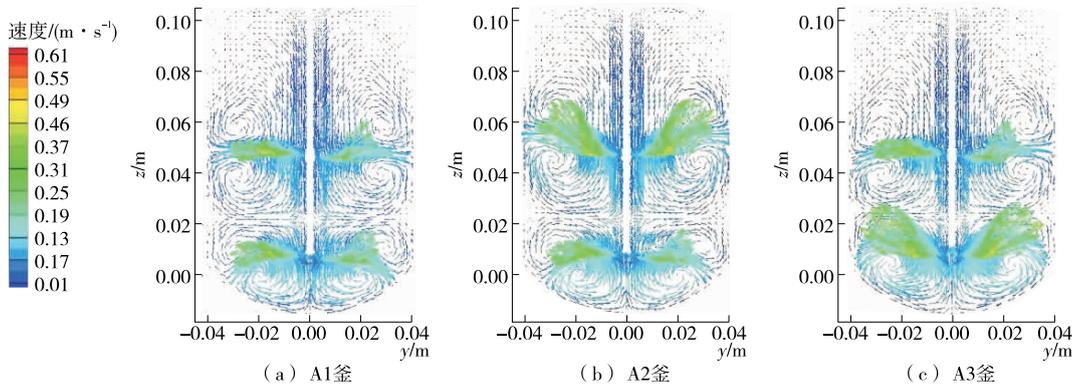


图 4 3 种组合桨反应釜内速度矢量图

Figure 4 Velocity vector plots of microwave reactor with different combined impellers

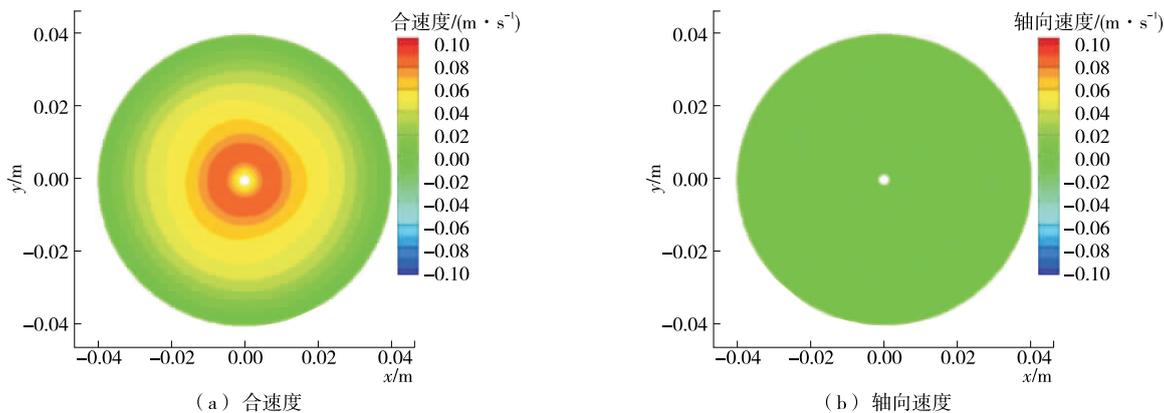


图 5 组合桨 A1 反应釜在水平面  $z=22\text{ mm}$  时速度云图

Figure 5 Velocity contour in axial plane with  $z=22\text{ mm}$  in microwave reactor with combined impeller A1

为进一步比较组合桨 A1 环流面位置处的速度分布特点, 取环流面内径向位置 ( $x=0, z=22\text{ mm}, y$  为  $-40\sim 40\text{ mm}$ ) 合速度、轴向、径向、和切向分速度, 如图 6 所示。环流面处轴向速度趋近于 0; 径向速度呈左右对称分布, 结合图 4(a), 混合液从釜壁流向搅拌轴, 速度绝对值先增大再减小, 在径向  $y=\pm 20\text{ mm}$  近桨尖区域处达到最大; 切向速度为负, 说明流体与组合桨同向旋转, 切向速度绝对值由近轴区域向釜壁方向先增后减。

3 种组合桨在环流面位置处 ( $x=0, z=22\text{ mm}, y$  为  $-40\sim 40\text{ mm}$ ) 的轴向速度分布, 如图 7 所示。与组合桨 A1 的轴向速度相比, 组合桨 A2 和 A3 的轴向速度明显加强。改进后的组合桨 A2 ( $v_2=5.56\times 10^{-3}\text{ m/s}$ ) 和 A3 ( $v_3=1.04\times 10^{-2}\text{ m/s}$ ) 的最大轴向速度分别是 A1 ( $v_1=4.56\times 10^{-3}\text{ m/s}$ ) 的 1.22, 2.28 倍, 有助于促进上下桨间混合液的轴向迁移, 增

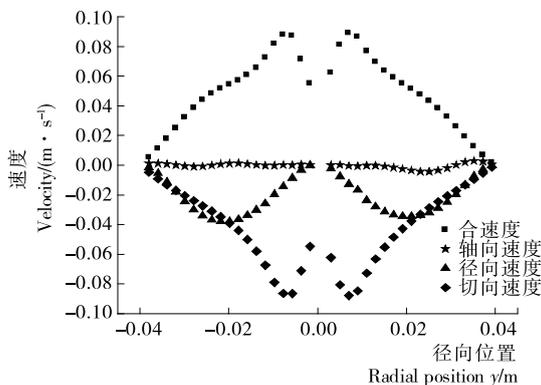


图 6 组合桨 A1 反应釜内速度分布

Figure 6 Velocity distribution in microwave reactor with combined impeller A1

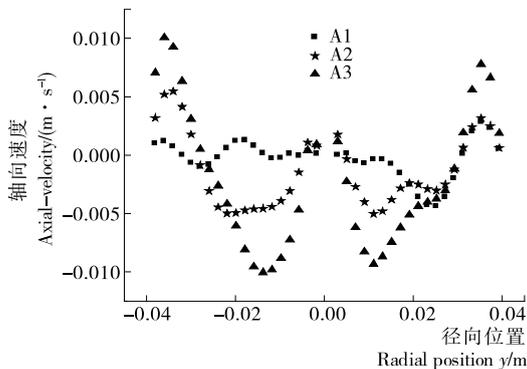


图 7 3 种组合浆反应釜内同一位置处轴向速度分布

Figure 7 Axial velocity distribution in microwave reactor with different combined impellers

强釜内流体的混合搅拌效果。

#### 4.2 示踪剂浓度扩散过程

在反应釜中添加示踪剂,示踪剂会跟随混合液运动扩散,当釜内任一位置的示踪剂浓度相等时,认为已达到均匀混合。图 8 为具有组合浆 A1 的反应釜在加料点 A 加入示踪剂时,示踪剂在釜内随时间流动扩散的过程。

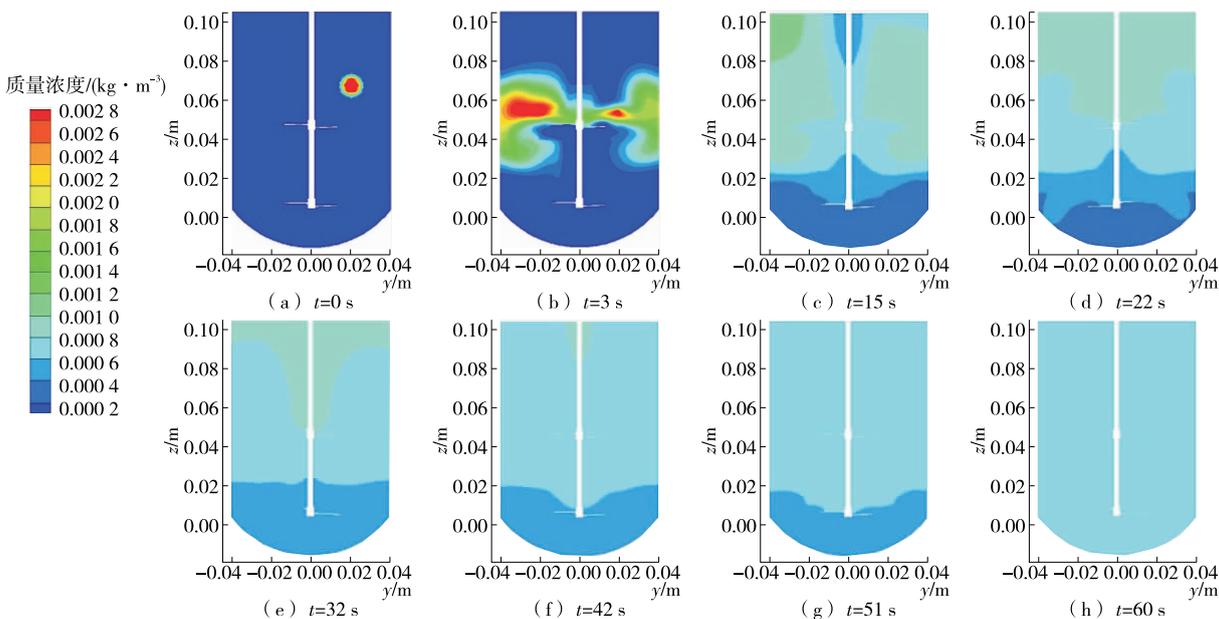


图 8 不同混合时刻组合浆 A1 反应釜内示踪剂浓度分布

Figure 8 Distribution of tracer concentration in microwave reactor with combined impeller A1 at different mixing time

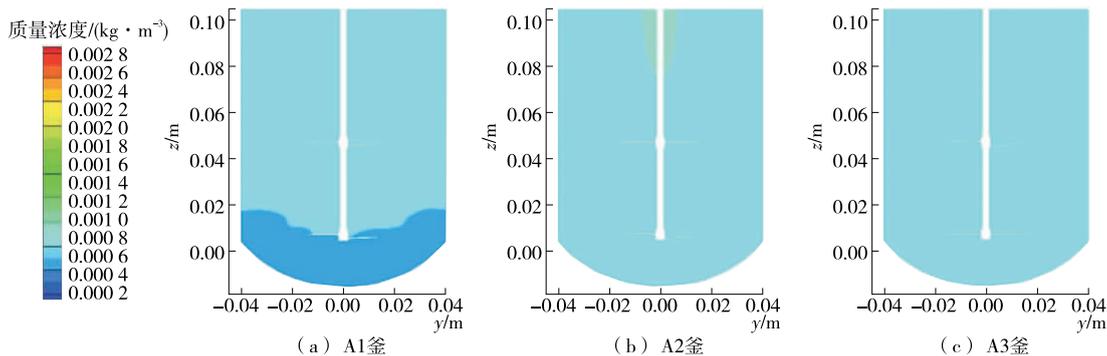


图 9  $t=51$  s 时反应釜内示踪剂浓度分布

Figure 9 Distribution of tracer concentration at  $t=51$  s in microwave reactor with different combined impellers

如图 8(b)所示, $t=3$  s 时,示踪剂由初始位置被上层浆的循环涡流[图 4(a)]携带扩散,趋向形成循环涡状结构,说明主体混合液的流动对示踪剂的扩散起主要作用;随着搅拌继续, $t=15$  s 时,示踪剂主要在反应釜上层浆区进行扩散,同时少量示踪剂进入反应釜下层浆区,上下浆间开始出现分层现象( $z=22$  mm);当搅拌进行到  $t=22$  s 以后,在图 8(d)~(e)中,上下浆间示踪剂浓度的分层现象明显,不同浓度的示踪剂分别在反应釜上层浆区与下层浆区内进行混合;在搅拌混合的后期( $t=42$  s 以后),如图 8(f)~(g)所示,上层高浓度区的示踪剂依靠浓度差在上下循环涡流的携带下继续向下层低浓度区扩散,分层面高度逐渐降低,釜内上层浆区与下层浆区间的示踪剂浓度差逐渐减小,最终釜内上、下浆区示踪剂浓度一致,达到均匀混合。

为比较 3 种组合浆对示踪剂浓度扩散的影响,取相同时刻  $t=51$  s 时反应釜浓度分布云图分析,如图 9 所示。在搅拌混合的后期,组合浆 A2、A3 釜内的示踪剂浓度与 A1 相比,上下浆间示踪剂浓度无分层现象,基本达到均匀混合,而组合浆 A1 上下浆间依然存在分层现象,仍需要一定的时间达到均匀混合。

根据以上分析,随着搅拌的进行,釜内示踪剂浓度扩散出现分层面,分层面的发生和迁移与前面讨论的上下浆间存在轴向速度趋近于零的环流面,有着密切的关系。环流面的存在制约着示踪剂浓度扩散时分层面的发生发展,影响全釜的混合效果。与组合浆 A1 相比,组合浆 A2 与 A3,在环流面区域提高了流体的轴向速度,加快了示踪剂浓度扩散,改善了全釜的混合效果。

#### 4.3 监测点浓度响应特征

为了考察反应釜内不同高度位置处示踪剂浓度扩散的响应历程,及加料点位置对示踪剂浓度扩散的影响,以监测点浓度与反应釜最终混合浓度的比值作为  $y$  轴,绘制组合浆 A1 釜内监测点浓度的时间响应曲线,如图 10 所示,加料点位置分布见图 1。

当加料点位于组合浆上层浆上部加料时,如图 10(a)所示。结合图 8 示踪剂浓度随时间分布可知,初始阶段示踪剂主要在反应釜上层浆区进行扩散,所以位于上层浆区的监测点 1~4 都有明显的高于均匀混合时的浓度峰值,其中监测点 2 因与加料点 A 位于同一高度,扩散距离最近,响应浓度最大。当浓度响应曲线到达峰值后,示踪剂随着上层循环涡流的携带扩散,再缓慢降低至稳定值。而位于反应釜下部的监测点 5、6,由于距离加料点较远,示踪剂由上层浆区扩散至下层后,经下层浆循环涡流的携带扩散,其浓度从零增加平缓缓慢上升至稳定值,全釜示踪剂浓度达到一致,完成均匀混合。

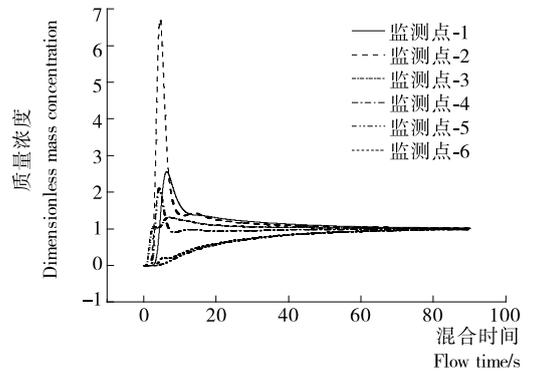
当加料点位于组合浆上下浆间加料时,如图 10(b)所示。示踪剂可以同时受上下浆循环涡流的影响,减小环流面对釜内上下浆交界处混合液流动混合的影响,所以浓度响应曲线是 3 个加料点中最快达到收敛的。

当加料点位于组合浆下层浆下部加料时,如图 10(c)所示。示踪剂首先在釜底区域扩散,再向釜中部和上部扩散,所以位于釜底的监测点 5、6,其浓度响应曲线先达到峰值再缓慢收敛,而位于中上部的监测点 1~4,其浓度响应曲线平缓缓慢上升至稳定值。综上所述,由 3 个加料点的浓度响应曲线分布显示,理想加料点为上下浆间的加料点 B。

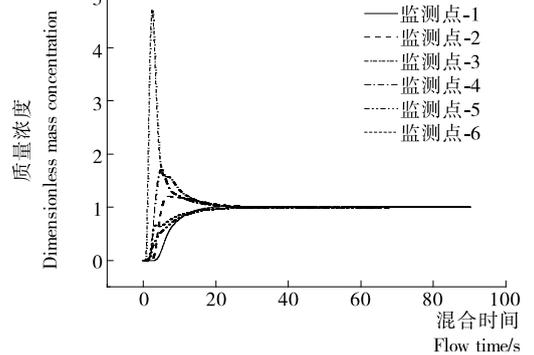
#### 4.4 混合时间

混合时间<sup>[18]</sup>是指从搅拌开始至达到规定混合程度所消耗的时间,国际上通常采用 95% 规则,即从数值模拟开始至示踪剂达到最终稳定值 $\pm 5\%$ 所用的时间。由上述监测点浓度响应曲线分析可知,在组合浆上下浆间加料时,各监测点的浓度响应曲线能达到最快的收敛,故分析在理想加料点 B 加料的条件下,3 种组合浆对反应釜中监测点混合时间的影响,如表 3 所示。

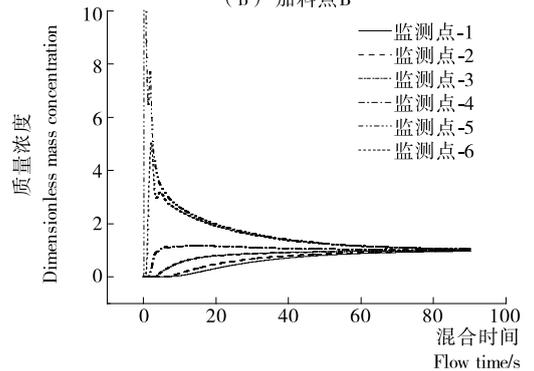
由表 3 可知,各监测点混合时间的差值中组合浆 A3 最



(a) 加料点 A



(b) 加料点 B



(c) 加料点 C

图 10 不同加料点下组合浆 A1 反应釜内浓度响应曲线  
Figure 10 Tracer concentration response curve at different feeding points in microwave reactor with combined impeller A1

小(2.94 s),组合浆 A2 其次(17.31 s),组合浆 A1 最大(17.88 s),说明组合浆 A3 对釜内示踪剂的混合能力最强,釜内各处几乎同时达到均匀混合。以各监测点中最长的混合时间作为反应釜中液液混合的时间,来确定最优组合浆。与组合浆 A1(38.85 s)相比,组合浆 A2(34.47 s)和 A3(20.52 s)均缩短了反应釜中液液混合的时间,但组合浆 A3 更为显著。

表 3 3 种组合浆反应釜内各监测点混合时间

Table 3 Mixing time of six monitoring points in microwave reactor with different combined impellers

| 反应釜  | 监测点-1 | 监测点-2 | 监测点-3 | 监测点-4 | 监测点-5 | 监测点-6 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 釜 | 32.73 | 28.59 | 23.31 | 20.97 | 37.26 | 38.85 |
| A2 釜 | 24.45 | 24.18 | 22.89 | 17.16 | 32.58 | 34.47 |
| A3 釜 | 20.16 | 20.52 | 19.32 | 17.58 | 18.18 | 18.47 |

## 5 结论

(1) 通过层流模型对组合浆 A1 釜内流场和速度场分析得出,组合浆 A1 上下桨间存在一个轴向速度趋近于零的环流面,该环流面阻碍了上下桨间混合液的轴向迁移流动,影响全釜的混合效果。与组合浆 A1 相比,组合浆 A2 与 A3 显著增强了环流面区域中流体的轴向速度,最大轴向速度分别是 A1 的 1.22, 2.28 倍,改善了该区域混合液轴向迁移流动。

(2) 利用组分扩散模型成功模拟了示踪剂随混合液流动扩散的过程,验证了上下桨间环流面对示踪剂的混合扩散起阻碍效果。相同时刻下,组合浆 A2、A3 对示踪剂的混合效果优于组合浆 A1。

(3) 加料点的位置会影响反应釜内示踪剂的混合时间,理想加料点为上下桨间的加料点 B。在理想加料点加料的条件下,组合浆 A3 釜内液液混合时间最短,对于提高微波反应釜搅拌效率,节约能源具有重要的实际意义。

(4) 利用 CFD 对 3 种组合浆在实验室规模下微波反应釜中混合机理进行初步探索,未考虑化学反应对模拟结果的影响,在今后模拟混合过程中需结合反应机理,通过产物质量考察搅拌浆对液液混合的影响。

### 参考文献

- [1] 万子岸,高飞,王辉,等.微波加热技术在材料制备中的研究进展[J].现代化工,2017(12):50-53.
- [2] 钱志强,张慧芳,王世栋,等.微波技术在吸附分离中的应用研究进展[J].化工新型材料,2018,46(2):272-274.
- [3] 孙培永,张利雄,姚志龙,等.新型反应器和过程强化技术在生物柴油制备中的应用研究进展[J].石油学报:石油加工,2008,24(1):1-8.
- [4] 曹湘琪,姚斌,郑勤红,等.凹弧面内筒壁对微波反应器加热效率及均匀性的影响[J].现代制造工程,2016(9):13-16.
- [5] 钟汝能,姚斌,向泰,等.腔体内壁脊形凹槽对微波反应器加热效率及均匀性的影响[J].食品与机械,2017,33(4):81-85.
- [6] 杨继孔,郑勤红,曹湘琪,等.高功率矩形微波反应器加载圆柱

形负载的仿真优化[J].云南师范大学学报:自然科学版,2014,34(6):14-18.

- [7] DOMINGUEZ T E, PLAZA G P, DIAZMORCILLO A, et al. Optimisation of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2007, 29(1): 149-162.
- [8] ROMANO V R, MARRA F, TAMMARO U. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3): 233-241.
- [9] 贺强. 钨矿机械活化碱煮设备性能仿真分析[D]. 赣州:江西理工大学,2013:1-9.
- [10] ZHANG Jin-jin, GAO Zheng-ming, CAI Ya-ting, et al. Power consumption and mass transfer in a gas-liquid-solid stirred tank reactor with various triple-impeller combinations[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 170: 464-475.
- [11] CHENG Dang, FENG Xin, CHENG Jing-cai, et al. Experimental study on the dispersed phase macro-mixing in an immiscible liquid-liquid stirred reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 126(APR): 196-203.
- [12] ZHU Hua-cheng, YE Jing-hua, GULATI T, et al. Dynamic analysis of continuous-flow microwave reactor with a screw propeller[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1 456-1 461.
- [14] 周俊超,车圆圆,吴可君,等.基于CFD模拟的强放热反应釜盘管空间排布的优化设计[J].高校化学工程学报,2015(1):27-34.
- [15] 汪博恺,金光远,崔政伟,等.微波反应器的搅拌叶轮性能数值分析及对比[J].热能动力工程,2017(s1):91-96.
- [16] 梁瑛娜,高殿荣,拜亮.双层浆搅拌槽内层流流场与混合时间的数值模拟[J].机械工程学报,2015,51(16):185-195.
- [17] 梁瑛娜,高殿荣,拜亮.偏心组合浆搅拌槽内层流混合过程的数值模拟[J].化工进展,2014,33(12):3 203-3 209.
- [18] 方德明,陈涛,杨象岳,等.基于CFD流场分析的反应釜搅拌器结构改进[J].轻工机械,2014,32(2):95-98.

## 《食品与机械》

中国食品科学技术学会会刊  
CSCD 核心期刊 中文核心期刊

**更专业** 权威论坛 基础研究 安全与检测  
机械与控制 包装与设计 贮藏与保鲜

**更实用** 提取与活性 研究进展 开发应用  
市场分析 学术争鸣

月刊 国内邮发代号:42-83 每期 20 元  
国际邮发代号:BM3355 每期 12 美元

地址:长沙市天心区赤岭路 45 号长沙理工大学内  
电话:0731-85258200 85258201  
邮编:410076  
网址:http://ifoodmm.com  
E-mail:foodmm@vip.sina.com

## 2019 年《食品与发酵工业》征订启事

邮发代号:2-331(月刊)

《食品与发酵工业》创刊于 1970 年,由中国轻工业联合会主管,中国食品发酵工业研究院、全国食品与发酵工业信息中心主办。

《食品与发酵工业》是北大中文核心期刊、科技部中国科技核心期刊和中科院中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,被美国化学文摘(CA)、英国食品科技及工艺文摘(FSTA)等数据库收录。

**刊载内容:**食品与发酵工业相关的原辅料、工艺、包装、机械、检测、安全、流通、综合利用等方面的研究报告以及国内外食品与发酵科技发展动态和产业创新等综述性文章。

定价:50 元/期,在编辑部订阅全年享 8 折优惠。

地址:北京市朝阳区酒仙桥中路 24 号院 6 号楼 111 室

电话:010-53218337/8/9

邮编:100015

E-mail:ffeo@vip.sina.com

http://sf1970.cnif.cn

国内统一刊号:CN11-1802/TS  
国际标准刊号:ISSN0253-990X  
广告发布登记号:京朝工商广登字第20170155号

