



厦门大学学报(自然科学版)
Journal of Xiamen University(Natural Science)
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 液滴传质过程 Marangoni 对流的引发
作者: 祁江羽, 杨杰, 沙勇
收稿日期: 2018-06-01
网络首发日期: 2018-09-21
引用格式: 祁江羽, 杨杰, 沙勇. 液滴传质过程 Marangoni 对流的引发. 厦门大学学报(自然科学版). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20180919.0908.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

液滴传质过程 Marangoni 对流的引发

祁江羽, 杨杰, 沙勇

(厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005)

✉通信作者 ysha@xmu.edu.cn

摘要 对在丙酮-甲苯-水体系中由于传质而引发的 Marangoni 效应进行数值模拟, 比较了二维和三维模型模拟计算结果的差异, 主要考察丙酮相对质量浓度、界面平均流动速度等参数在传质过程中的变化。结果表明, 两种模型计算结果差异较大, 三维模型中 Marangoni 对流引发的更加充分, 更贴适于实际情况。随后在三维模型中, 分别考察了 Gibbs 吸附层与丙酮初始质量浓度对传质的影响, 与文献结果对比发现液-液界面中 Gibbs 吸附层的影响可以忽略, 而丙酮初始质量浓度越高, Marangoni 对流的引发时间越早, 强度越强。

关键词 Marangoni 效应; 计算流体力学; 对流扩散; 传质; 数值模拟

中图分类号 O 362

文献标志码 A

DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.201806001

Initiation of Marangoni Convection in Mass Transfer of Liquid Drop

QI Jiangyu, YANG Jie, SHA Yong✉

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract Marangoni effect induced by mass transfer process in the acetone-toluene-water droplet was numerically simulated. Concentration and interface average velocity of 2-D and 3-D models were compared. The results showed that the calculation of the two models was quite different, and the convection simulated by the three-dimensional model was more close to the actual situation. Marangoni effect is a phenomenon that occurs in three dimensions, so it is not reasonable to simplify this three-dimensional phenomenon to a two-dimensional phenomenon. For the three-dimensional droplet model, the effect of Gibbs adsorption layer and initial acetone concentration on mass transfer was tested. The results were compared with the experimental studies from literature. The comparison showed that the influence of Gibbs adsorption layer appearing in the liquid-liquid interface could be ignored. For liquid droplets with different initial acetone concentration, the higher initial concentration corresponded to the shorter critical time and the stronger intensity of the Marangoni convection.

Key words Marangoni effect; computational fluid dynamics; convection diffusion; mass transfer; numerical simulation

在两相传质的相界面处, 由于质量和热量的传递, 常常会使界面结构发生变化, 并在界面产生有对流运动的界面湍动。其中因表面张力梯度引发的流体力学不稳定性而产生的对流, 称作 Marangoni 对流。界面对流的产生往往会使相间传递过程受到影响^[1], 其中由于出现 Marangoni 对流而对传质过程产生的作用称为传质过程的 Marangoni 效应。目前针对 Marangoni 效应的相关实验研究虽然能观测到肉眼无法识别的小尺度界面对流现象^[2-3], 但很难获得发生 Marangoni 效应时浓度场和速度场的分布。随着计算机的发展, 数值模拟成为了一种研究 Marangoni 效应的机理及其对传质过程的影响的有效手段^[4]。

通过数值模拟研究液-液传质体系中的 Marangoni 效应时, 为了提高计算效率, 通常在模型的空间维度上进行简化操作。Grahm^[5]对两个互不相溶的水平液层进行了二维的数值模拟, 结果表明界面附近的质量传递主要受分子扩散控制。Petera 等^[6]运用有限元方法模拟了二维单液滴模型中的非稳态传质过程, 结果表明计算得到的传质通量等参数与实验结果对比存在一定的偏差。Mao 等^[7]利用轴

对称坐标系研究了液-液传质中 Marangoni 效应对传质的影响, 结果表明发生 Marangoni 效应时, 传质系数并不总是增强的。但是 Marangoni 效应是在空间上发生的一种界面湍动现象, 对空间维度进行简化处理往往会忽略掉一部分 Marangoni 对流发展的信息, 而三维模拟则能给出准确的预测数值。Yuan 等^[8] 研究了在树枝状凝固模型中引入自然对流时的二维模拟和三维模拟的区别, 结果表明二维和三维不仅在对流生长率上有所差异, 而且预测的对流生长形态也有很大不同。并且, 目前对于液滴内发生的 Marangoni 对流的研究仍然较少^[9]。

另外, 目前对于 Marangoni 效应不稳定性的研究, 较少考虑界面吸附现象的影响, 而溶液表面的吸附作用会导致表面浓度与溶液主体浓度产生差别, 即表面过剩^[10]。Brain^[11] 在研究引发 Marangoni 效应的临界情况时考虑了 Gibbs 吸附层的影响, 并认为临界 Marangoni 数是引发 Marangoni 对流的判据。Kang 等^[12] 在振荡理论的基础上, 针对二维平界面气液传质模型提出了一种考虑 Gibbs 吸附层的稳定性方程, 结果表明, 减小 Schmidt 数和 Biot 数可以增加液层的稳定性, 在对流初始阶段, 由于 Gibbs 吸附层对于传质的影响, 系统是稳定的。

研究液滴中的传质过程, 不仅要考虑维度对数值模拟结果的影响, 也要考虑表面过剩现象对传质过程产生的影响。本文中以丙酮-甲苯-水为研究体系, 采用二维和三维数值模拟方法研究了丙酮从甲苯相向水相传质过程中引发的 Marangoni 效应。同时研究了 Gibbs 吸附层、液滴初始溶质质量浓度对 Marangoni 效应的影响。

1 理论模型

1.1 物理模型

本文分别采用三维和二维模型对直径为 2 mm 的丙酮-甲苯液滴进行数值模拟, 物理模型如图 1 所示。其中三维模型采用四面体网格进行划分, 网格尺度为 0.025 mm, 网格数目为 227895; 二维模型采用 O 型切分法进行划分, 网格尺度为 0.05 mm, 网格数目为 2697。两种模型中丙酮的初始质量浓度均为 ρ_{A0} , 液滴外侧为水相, 水相中丙酮初始质量浓度为 0, 丙酮由甲苯相扩散至水相, 由于扩散过程中的不均一性导致液滴界面产生浓度梯度, 进一步产生液滴界面张力梯度, 从而引发 Marangoni 效应。

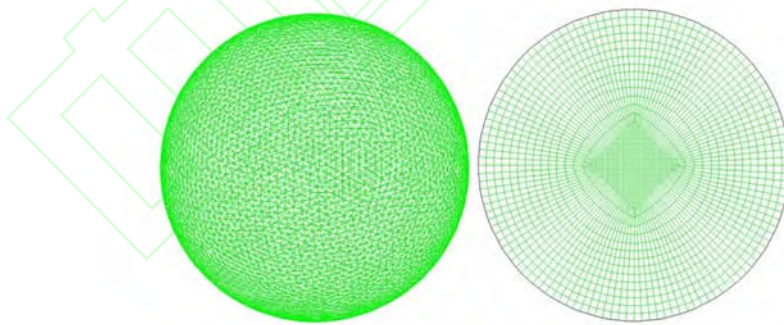


图 1 三维液滴(左)、二维液滴(右)的物理模型
Fig.1 Physical configuration of 3-D droplets (left) and 2-D droplets (right)

1.2 控制方程

对于本文所采用的液滴传质 Marangoni 模型, 可以用连续性方程、Navier-Stokes 方程(动量方程)和质量传递方程进行描述。通过将这三组方程进行联立求解, 我们可以获得传质过程中流场的流速、压力和溶质质量浓度分布规律。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) + \vec{F} \quad (2)$$

质量传递方程

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho_A - D_A \nabla^2 \rho_A = 0 \quad (3)$$

式(1)-(3)中： ρ 表示混合物的密度，单位 kg/m^3 ； t 表示时间，s； S_m 表示质量源相， $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$ ； \vec{u} 表示 x, y, z 方向的速度，m/s； p 表示压力，Pa； μ 表示粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； \vec{F} 表示动量源相， $\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{m}^2)$ ； ρ_A 表示丙酮的质量浓度， kg/m^3 ； D_A 表示丙酮的扩散系数， m^2/s 。

本文研究对象为低浓度的丙酮-甲苯-水体系，该体系可视为稀释体系，在质量传递过程中的数学描述可以做相应的简化。在质量传递模型中，液-液界面处必须满足以下两个边界条件：1) 界面浓度阶跃的热力学平衡条件；2) 界面扩散的连续性条件。因此边界条件如下所示：

$$\rho_{Ad} = K \rho_{Ac} \quad (4)$$

$$D_{Ad} \nabla \rho_{Ad} \cdot \vec{n} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = D_{Ac} \nabla \rho_{Ac} \cdot \vec{n} \quad (5)$$

式(4)-(5)中： ρ_{Ad} 表示分散相（甲苯）中丙酮的质量浓度，单位 kg/m^3 ； ρ_{Ac} 表示连续相（水）中丙酮的质量浓度， kg/m^3 ； K 为丙酮在两相间的分配系数； D_{Ad} 表示分散相（甲苯）中丙酮的扩散系数， m^2/s ； D_{Ac} 表示连续相（水）中丙酮的扩散系数， m^2/s ； $\nabla \rho_{Ad}$ 表示分散相（甲苯）中丙酮的质量浓度梯度， kg/m^4 ； $\nabla \rho_{Ac}$ 表示连续相（水）中丙酮的质量浓度梯度， kg/m^4 ； \vec{n} 为垂直于传质界面的单位法向量； Γ 为 Gibbs 吸附层中单位表面上的丙酮质量过剩量， kg/m^2 。

在稀溶液中，根据 Gibbs 等温吸附式^[13] 可得：

$$\Gamma_m = -\frac{c^o}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial c} \right)_T \quad (6)$$

其中： Γ_m 为单位表面上的丙酮摩尔过剩量， mol/m^2 ； R 是理想气体常数， $8.3145 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T 为界面温度，K； σ 为界面张力，N/m； c^o 为界面浓度， mol/m^3 。

而引发 Marangoni 对流的作用力则需要通过界面张力计算获得，以三维模型为例，计算步骤如下：

球面的方程为：

$$x^2 + y^2 + z^2 = H^2$$

在球上 $M(x_0, y_0, z_0)$ 处，单位法向量 \vec{n} 用式(7)表示：

$$\vec{n} = \left[\frac{x_0}{H} \quad \frac{y_0}{H} \quad \frac{z_0}{H} \right] = [\cos \alpha \quad \cos \beta \quad \cos \gamma] \quad (7)$$

平行于界面的力 $\vec{F}_s^{(t)}$ ，即引发 Marangoni 效应的作用力，用式(8)表示：

$$\vec{F}_s^{(t)} = [\vec{n} \times (\nabla \sigma)] \times \vec{n} \quad (8)$$

在相同温度下，界面张力 σ 只是浓度的函数，即：

$$\nabla \sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial c} \nabla c$$

因此，可以得到：

$$\vec{F}_s^{(t)} = \frac{\partial \sigma}{\partial c} [\vec{n} \times (\nabla c)] \times \vec{n}$$

又有

$$\vec{n} \times (\nabla c) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \cos\alpha & \cos\beta & \cos\gamma \\ \frac{\partial c}{\partial x} & \frac{\partial c}{\partial y} & \frac{\partial c}{\partial z} \end{vmatrix}$$

$$= \left(\cos\beta \frac{\partial c}{\partial z} - \cos\gamma \frac{\partial c}{\partial y} \right) \vec{i} + \left(\cos\gamma \frac{\partial c}{\partial x} - \cos\alpha \frac{\partial c}{\partial z} \right) \vec{j} + \left(\cos\alpha \frac{\partial c}{\partial y} - \cos\beta \frac{\partial c}{\partial x} \right) \vec{k}$$

最终, 边界处 x, y, z 方向的作用力如式(9)~(11)所示:

$$F_x^{(t)} = \frac{\partial \sigma}{\partial c} \left(\left(\cos\gamma \frac{\partial c}{\partial x} - \cos\alpha \frac{\partial c}{\partial z} \right) \cos\gamma - \left(\cos\alpha \frac{\partial c}{\partial y} - \cos\beta \frac{\partial c}{\partial x} \right) \cos\beta \right) \quad (9)$$

$$F_y^{(t)} = \frac{\partial \sigma}{\partial c} \left(\left(\cos\alpha \frac{\partial c}{\partial y} - \cos\beta \frac{\partial c}{\partial x} \right) \cos\alpha - \left(\cos\beta \frac{\partial c}{\partial z} - \cos\gamma \frac{\partial c}{\partial y} \right) \cos\gamma \right) \quad (10)$$

$$F_z^{(t)} = \frac{\partial \sigma}{\partial c} \left(\left(\cos\beta \frac{\partial c}{\partial z} - \cos\gamma \frac{\partial c}{\partial y} \right) \cos\beta - \left(\cos\gamma \frac{\partial c}{\partial x} - \cos\alpha \frac{\partial c}{\partial z} \right) \cos\alpha \right) \quad (11)$$

1.3 物性参数

计算过程使用的物性参数如表 1 所示, 数据来自文献^[14]。

表1 温度为298 K时的物性参数表
Table.1 Physical properties at temperature of 298K

相	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度/($10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	丙酮扩散系数/($10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
甲苯相	862.30	5.520	2.90
水相	997.02	8.903	1.25

根据文献^[14] 的实验数据, 采用指数函数拟合甲苯相的界面张力与丙酮浓度的关系, 用以下方程表示:

$$\sigma = 0.0025 + 0.03285 \exp(-0.0145 \rho_{\text{Ad}})$$

在 298 K 时丙酮在两相间的分配系数 $K=0.63$, 这与 Wegener 的实验数据^[15] 相符合。

2 计算结果及分析

2.1 二维和三维模型比较

本节对丙酮初始质量浓度 $\rho_{\text{A}0}=3.75 \text{ kg/m}^3$ 时二维和三维模型的模拟结果进行比较, 主要考察流场信息的演化以及丙酮初始质量浓度等参数随时间的变化情况。

图 2 为丙酮初始质量浓度为 3.75 kg/m^3 的三维模型的演化图。由图可得, 随着液滴界面的丙酮向水相扩散, 液滴界面的平均流动速度逐渐增大并达到一个最大值约为 3.5 mm/s 。由于传质过程导致的浓度梯度, 液滴界面张力产生梯度, 从而引发 Marangoni 效应。在 $t=0.1 \text{ s}$ 时, 界面出现一连串的小涡流包, 如图 2(a)所示, Marangoni 效应引发后将下层高浓度液体带到表面更新了表面的低浓度液体, 使得液滴界面的丙酮质量浓度上升, 增大了界面传质推动力, 界面平均传质通量开始升高, 同时, 下层液体向上卷动带来了表面液体流动的阻力, 因此液滴界面的平均流动速度快速下降。在 $t=0.2 \text{ s}$ 时, 小涡流包逐渐增大并且占据了液滴界面的大部分空间, 如图 2(b)所示, 此时, 液滴界面的丙酮质量浓度达到一个极大值, 界面平均流动速度不再下降而是缓慢的回升, 这是由于 Marangoni 效应引发的小涡流包卷动加快了界面流动速度。对流发展稳定后, 虽然 Marangoni 对流仍然加快了表面更新, 但是由于表面更新速度低于液滴界面丙酮向水相的扩散速度, 因此界面丙酮质量浓度开始下降, 界面平均传质通量随之降低, 如图 2(c)所示, 在 $t=0.5 \text{ s}$ 时, 此时界面处不再有新的涡流包产生, 已经生成的小涡流包通过融合成大涡流包, 使得 Marangoni 对流不断向液滴内部深入。在 $t=1.0 \text{ s}$ 时, 如图 2(d)所

示，可以发现此时对流区域的整体丙酮质量浓度已经比较低，界面张力梯度减少，Marangoni 对流开始减弱，Marangoni 力小于液滴的黏滞阻力，液滴界面流动速度开始下降。在 $t=5.0$ s 时，如图 2(e)所示，此时液滴中的平均传质通量和液滴界面的平均流动速度都下降到一个很低的值。

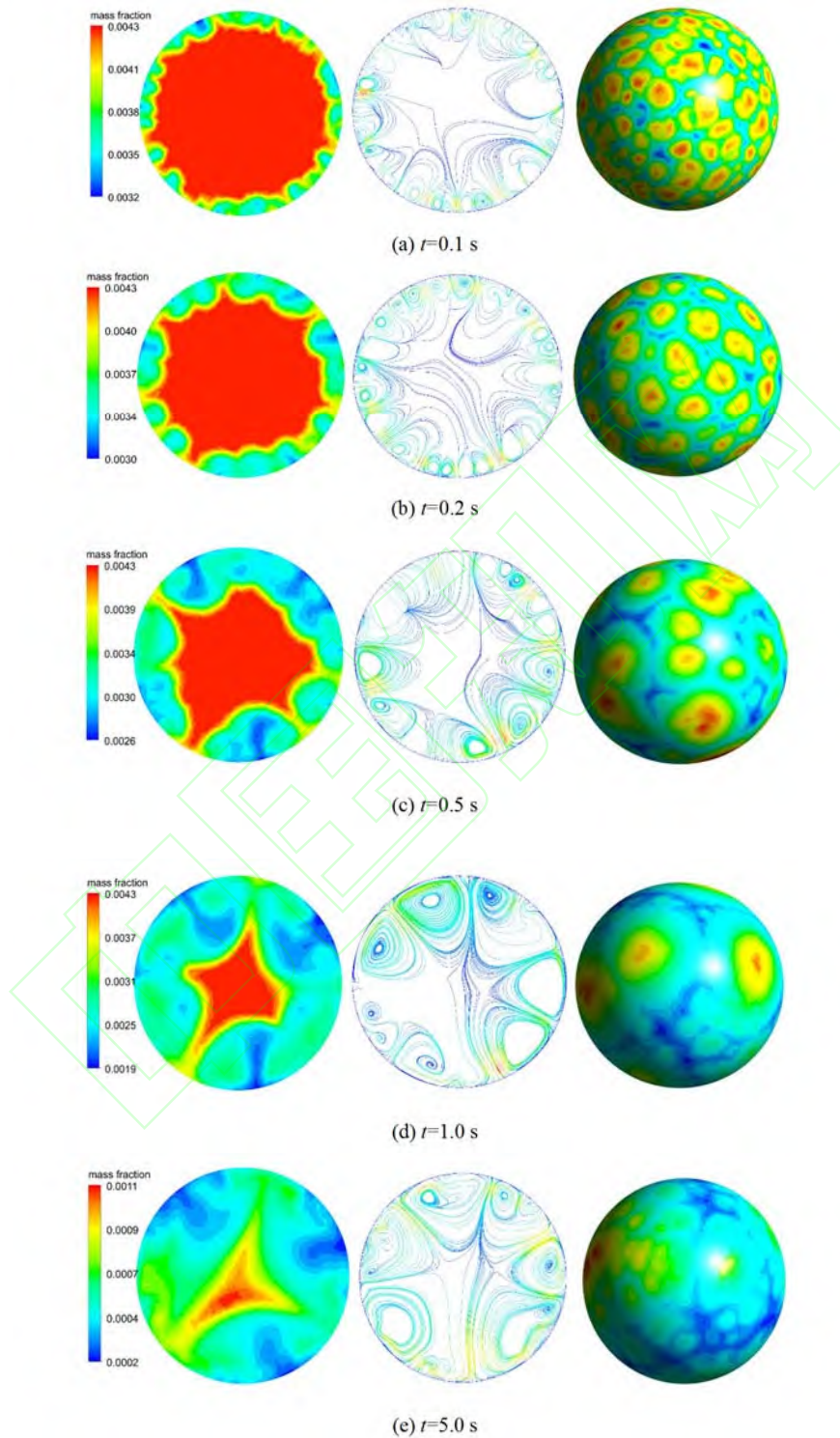


图 2 三维模型中切面质量浓度场（左）、切面流函数（中）、表面质量浓度场（右）随时间演化图
 Fig.2 Massconcentration field in section (left), stream function in section (middle) and surface mass concentration field(right) evolution over time in three-dimensional model

图 3 为丙酮初始质量浓度为 3.75 kg/m^3 的二维模型演化图。从图中可以看出，二维模型和三维模型的演化主要有以下几点不同：1) 二维模型的浓度场更为规整。在对流引发的初始阶段，即图 3(a)，界面处的涡流胞分布相较于三维模型要更加均匀，这是由于二维模型只有 x 和 y 方向 Marangoni 力的作用，而三维模型在 x , y , z 方向上都有 Marangoni 力的作用，因此从切面图来看，三维模型的浓度场没有二维模型的浓度场那么规整；2) 二维模型的 Marangoni 对流发展较慢，并且最大界面流动速度约为 2.7 mm/s 。这是由于二维模型忽略了 z 方向的 Marangoni 力作用，因此 Marangoni 对流的发展比三维模型更慢、更不充分。

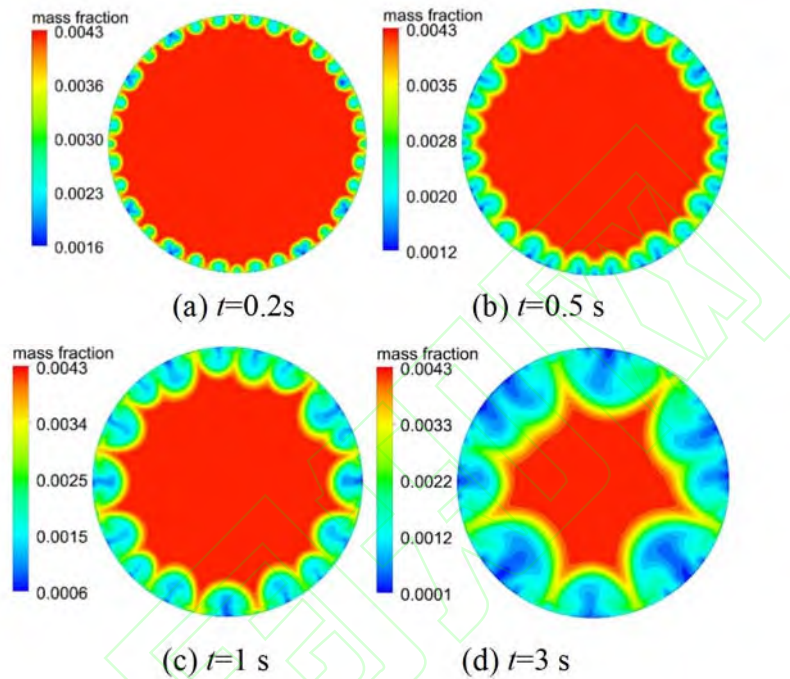


图 3 二维模型中浓度场随时间演化图
Fig.3 Concentration field evolution over time in two-dimensional model

通过图 4 可以从具体的流场数据来对比二维模型和三维模型模拟结果的差异。图 4(a)~(c)分别为分散相中丙酮相对质量浓度、界面平均流动速度和传质通量随时间的变化图。其中，丙酮相对质量浓度为 $\rho^* = \rho_{Ad}/\rho_{A0}$ ； t_c 为 Marangoni 效应发生的临界时间。从图 4 可以看出相较于二维模拟，三维模拟得到的结果中传质速率更快，引发的 Marangoni 效应更强，Marangoni 对流发生的临界时间也更早，更符合实验的结果。因此，在研究液滴中的 Marangoni 效应时，应该使用三维模型进行数值模拟分析。

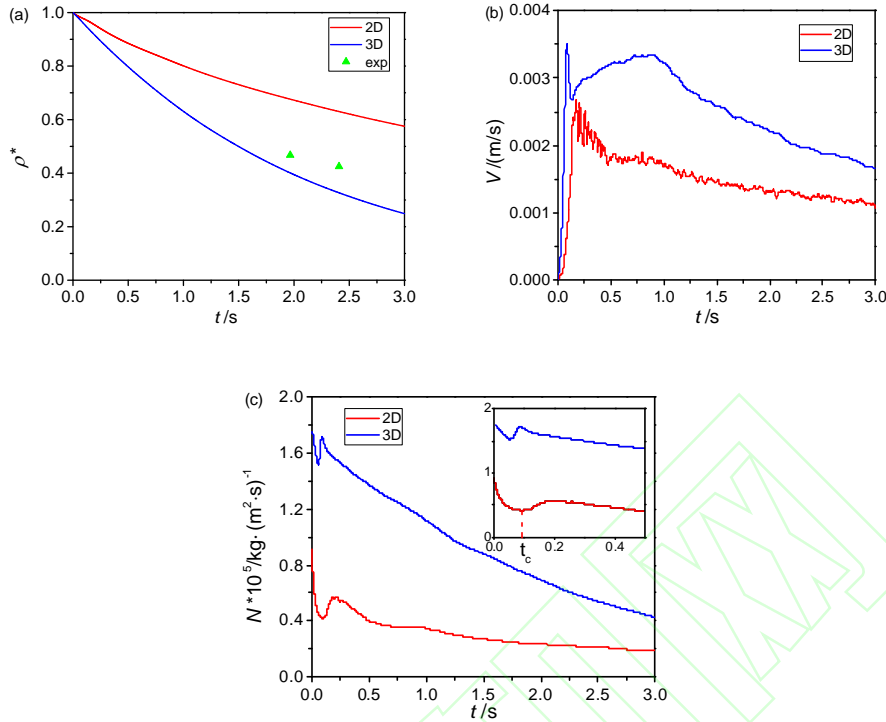


图 4 在两种模型中分散相丙酮相对质量浓度(a)、界面平均流动速度(b)和传质通量(c)随时间变化关系
 Fig.4 Relative mass concentrations of acetone in dispersed phase(a), mean interface convection velocity(b), and mass transfer flux(c) changed over time in two models

2.2 Gibbs 吸附层的影响

从 2.1 节可以看出三维模型的模拟结果更接近实际传质过程，接下来采用三维液滴模型考察 Gibbs 吸附层对液滴传质过程的影响。

图 5(a)和(b)分别为丙酮相对质量浓度和界面平均流动速度随时间变化在有无 Gibbs 吸附层两种情况下的对比图。由图 5(a)可以看出，丙酮相对质量浓度的变化和文献^[15]中的模拟结果以及实验值的比较接近。Gibbs 吸附层对于整个过程的影响很小，有无 Gibbs 吸附层的丙酮相对质量浓度变化曲线非常接近。由图 5(b)的界面平均流动速度变化也可以看出，两者速度几乎是一致的。总的来说，在液-液界面中，Gibbs 吸附层对于 Marangoni 效应的影响没有气-液界面中那么大。因此研究液-液传质引发的 Marangoni 效应时基本上可以忽略 Gibbs 吸附层的影响。

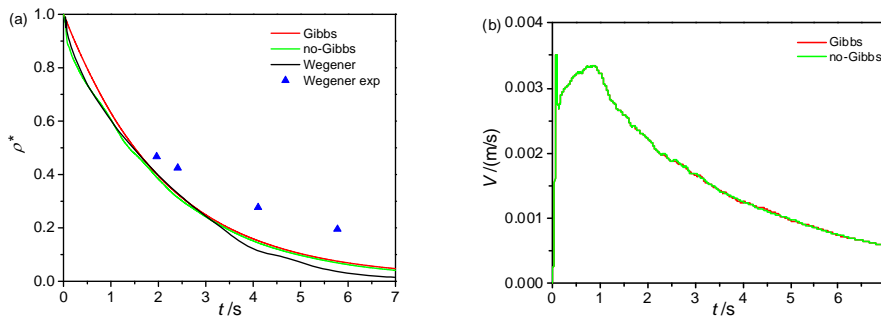


图 5 Gibbs 吸附层对丙酮相对质量浓度(a)、界面平均流动速度(b)的影响
 Fig.5 Influence of Gibbs adsorption layer on relative mass concentration of acetone (a) and average interface velocity (b)

2.3 不同丙酮初始质量浓度的影响

对于液滴传质过程，另一项重要影响因素为初始溶质质量浓度^[16]，而通过实验研究，难以测定对流引发的临界时间、传质通量等参数，此时就需要结合数值模拟，来进一步确定初始溶质质量浓度变化对传质过程产生的影响。

图 6 是不同丙酮初始质量浓度下三项参数随时间变化图。在图 6(a)对比可得，相对质量浓度的变化的计算结果与实验值基本符合。而从图 6(b)可已看出，变化曲线经历了两次上升与下降的过程，所以在整个传质过程中，根据界面平均流动速度的变化可分为 4 个阶段：初始阶段，引发阶段，稳定阶段，衰减阶段。初始阶段中，在 Marangoni 力的作用下，界面平均流动速度不断增加，Marangoni 对流还未发生；引发阶段中，Marangoni 对流产生后带动下层液体往界面卷动形成涡流包，下层液体向上卷动带来了表面液体流动的阻力，因此界面流动速度有一个快速下降的过程；稳定阶段中，界面处的涡流包不断地增多和融合，界面流动速度开始回升；衰减阶段中，由于界面张力梯度减小，Marangoni 效应减弱，界面流动速度持续下降，并最终趋于平稳。对于传质通量，由图 6(c)可知，初始阶段时，随着液-液两相浓度差的减小，传质量不断减少；而后在引发阶段，由于 Marangoni 对流促进了表面更新，传质量显著增加；在稳定阶段和衰减阶段，由于 Marangoni 效应不断减弱，相应的传质量持续减少。

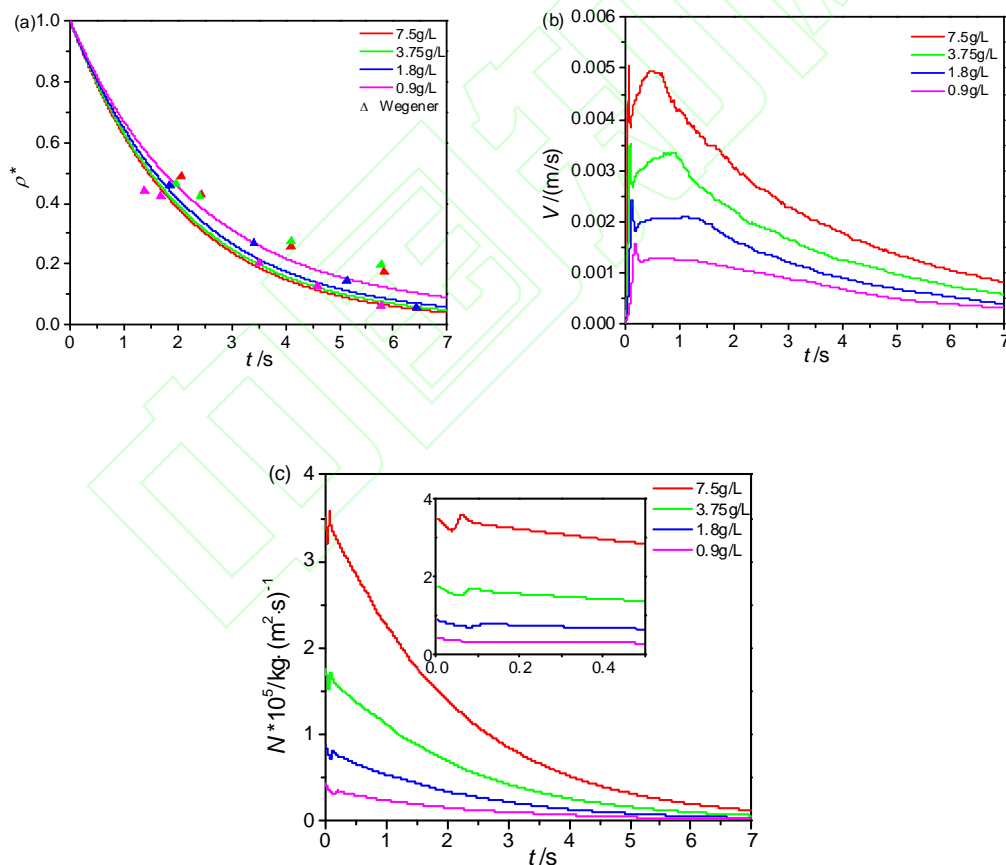


图 6 不同溶质初始质量浓度下丙酮相对质量浓度(a)、界面平均流动速度(b)、传质通量(c)随时间变化图

Fig.6 Relative mass concentrations of acetone (a), interface velocity (b), and mass flux (c) changed over time in different initial mass concentrations of solute

图 7 为不同丙酮初始质量浓度下引发 Marangoni 效应的临界时间。从图中可以看出，丙酮初始质量浓度为 0.9, 1.8, 3.75 和 7.5 kg/m^3 时，引发 Marangoni 对流的临界时间分别为 0.124, 0.079, 0.055

和 0.038 s, 丙酮初始质量浓度越高, Marangoni 效应引发的时间越早。

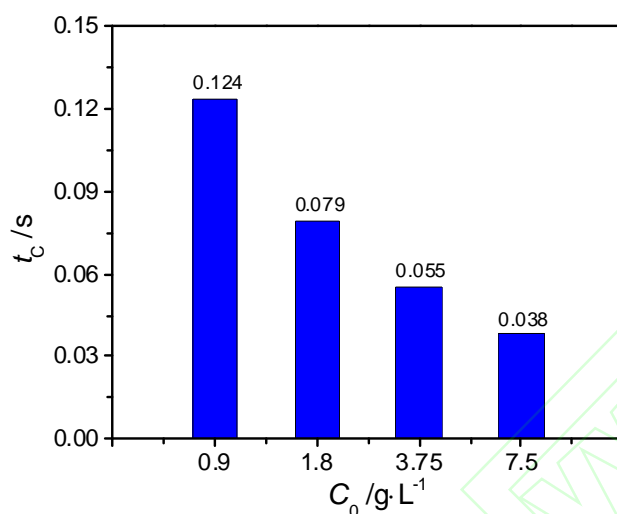


图 7 不同丙酮初始质量浓度下引发 Marangoni 效应的临界时间
Fig.7 Critical time of inducing Marangoni effect at different initial mass concentration of acetone

3 结 论

对于液滴中由液-液传质所引发的 Marangoni 效应, 二维模型和三维模型在模拟结果上有很大的差别, 经与实验结果对比可知三维模型更加符合实际的情况。因为 Marangoni 对流是一个三维空间里的现象, 所以简单的忽略一个维度进行研究是不可取的。

同时考察了 Gibbs 吸附层, 丙酮初始质量浓度对于丙酮-甲苯-水液滴体系的影响。由计算结果可得, Gibbs 吸附层对于液滴中的 Marangoni 效应影响很小, 对于浓度场和速度场几乎没有影响, 并且丙酮初始质量浓度越高, 引发 Marangoni 对流的临界时间越早, 对流强度也更强。在整个传质过程中, 对流可分为初始, 引发, 稳定, 衰减 4 个阶段, 其主要原因是 Marangoni 对流促进了表面更新, 影响了液-液传质过程的发展。

参考文献:

- [1] 余国琮, 袁希钢. 化工计算传质学导论[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011: 263-264.
- [2] BUFFONE C, SEFIANE K. Investigation of thermocapillary convective patterns and their role in the enhancement of evaporation from pores [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30(9): 1071-1091.
- [3] SCZECH R, ECKERT K, ACKER M. Convective instability in a liquid-liquid system due to complexation with a crown ether [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2008, 112(32): 7357-7364.
- [4] 钟亦兴, 卓亚运, 王振风, 等. 正庚烷-丙酮混合物蒸发过程中的 Marangoni 对流[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 364-369.
- [5] GRAHN A. Two-dimensional numerical simulations of Marangoni-Bénard instabilities during liquid-liquid mass transfer in a vertical gap [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(11): 3586-3592.
- [6] PETERA J, WEATHERLEY L R. Modelling of mass transfer from falling droplets[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(16):4929-4947.
- [7] MAO Z S, CHEN J. Numerical simulation of the Marangoni effect on mass transfer to single slowly moving drops in the liquid-liquid system [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(8): 1815-1828.
- [8] YUAN L, LEE P D. Dendritic solidification under natural and forced convection in binary alloys: 2D versus 3D simulation [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18(5): 055008.
- [9] 汪洋, 陈杰, 王智慧, 等. 多相传质过程中的 Marangoni 效应[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 124-132.
- [10] 宋世谟, 王正烈, 李文斌. 物理化学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 202-203.
- [11] BRIAN P. Effect of Gibbs adsorption on Marangoni instability [J]. AIChE Journal, 1971, 17(4): 765-772.
- [12] KANG K H, CHOI C K, HWANG I G. Onset of solutal Marangoni convection in a suddenly desorbing liquid layer [J]. AIChE Journal, 2000, 46(1): 15-23.
- [13] ADAMSON A W, GAST A P. Physical Chemistry of Surfaces [M]. New York: John-Wiley and Sons, 1967:82-83.
- [14] MISEK T, BERGER R, SCHROTER J. Standard test systems for liquid extraction studies [J]. European Federation of Chemical Engineering, 1985, 46(2):46-49.

- [15] WEGENER M, GRUNIG J, STUBER J, et al. Transient rise velocity and mass transfer of a single drop with interfacial instabilities—experimental investigations [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(11): 2967-2978.
- [16] ZHENG H, REN W, CHEN K, et al. Influence of Marangoni convection on mass transfer in the n-propyl acetate/acetic acid/water system [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 111: 278-285.

