

剪切流场中双重乳液稳态形变

张程宾 于程 刘向东 金瓯 陈永平

Steady deformation characteristics of double emulsion droplet in shear flow

Zhang Cheng-Bin Yu Cheng Liu Xiang-Dong Jin Ou Chen Yong-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204704 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平衡接触角对受热液滴在水平壁面上铺展特性的影响

Influence of equilibrium contact angle on spreading dynamics of a heated droplet on a horizontal plate

物理学报.2016, 65(10): 104704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104704>

液滴撞击液膜过程的格子 Boltzmann 方法模拟

Lattice Boltzmann simulation of the droplet impact onto liquid film

物理学报.2016, 65(8): 084702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084702>

液滴碰撞液膜润湿壁面空气夹带数值分析

Numerical analysis on air entrapment during droplet impacting on a wetted surface

物理学报.2015, 64(22): 224704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224704>

液滴在梯度微结构表面上的铺展动力学分析

Spreading dynamics of liquid droplet on gradient micro-structured surfaces

物理学报.2015, 64(15): 154705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154705>

粗糙纳通道内流体流动与传热的分子动力学模拟研究

Molecular dynamics simulation on fluid flow and heat transfer in rough nanochannels

物理学报.2014, 63(21): 214706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214706>

剪切流场中双重乳液稳态形变*

张程宾¹⁾ 于程¹⁾ 刘向东²⁾ 金瓯²⁾ 陈永平^{1)2)†}

1) (东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

2) (扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127)

(2016年5月18日收到; 2016年8月9日收到修改稿)

建立了不可压缩双重乳液界面行为的理论模型, 并可视化实验验证了所建立模型的正确性. 基于所建立的理论模型, 数值模拟研究了剪切流场中双重乳液的形变机理, 探讨了内外液滴半径比及各相工质黏度对其形变特性的影响规律. 研究表明: 在剪切流场中, 双重乳液的稳态形变程度随着毛细数的增大而加剧, 且内液滴抗形变能力比外液滴更强; 随着内外液滴半径比的增大, 双重乳液内外液滴间相互作用增强, 导致内液滴形变程度增大, 同时内液滴抗形变效应逐渐凸显, 造成外液滴形变程度减小; 双重乳液自身黏性是液滴形变的一种阻力, 随着内、外液滴黏度的升高, 双重乳液整体形变程度均减小, 并且乳液外液滴相黏度变化对双重乳液稳态形变程度的影响更为明显.

关键词: 双重乳液, 剪切流, 形变特性, 可视化

PACS: 47.57.jb, 47.85.Np

DOI: 10.7498/aps.65.204704

1 引言

W1/O/W2 双重乳液是一种油相(O)液滴包裹水相(W1)液滴后在水相(W2)连续相流体中形成的一种多相复合界面体系, 在生物、医药、化工、食品等领域有着广泛的应用^[1-3]. 特别是, W1/O/W2 双重乳液是乳液微封装法制备惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)靶用微球的基础材料^[4,5], 已成为国家能源战略的重要研究对象之一. 值得注意的是, 乳液微封装法制备 ICF 靶用微球工艺过程中广泛存在外流场内双重乳液的形变行为, 并对微球最终形貌与制备品质产生重要影响. 因此, 准确掌握外流场中双重乳液的形变机理及其相关工艺参数的影响规律, 对于优化和提高靶用微球的制备品质具有重要的理论指导价值. 同时, 诸如 W1/O/W2 双重乳液这类多相复合界面体系中各相流体界面的行为规律与相关机理也一直是多相流与界面科学的研究热点^[6-8], 因此对外

流场内双重乳液的形变行为开展深入研究也具有重要的学术意义.

自 20 世纪 90 年代以来, 随着液滴微流控技术的快速发展, 国内外研究人员对不包裹内液滴的单乳液在外流场中的界面行为开展了卓有成效理论和实验研究, 阐明了流场内表面张力、黏性力和惯性力等主要控制力对单乳液形变的影响规律^[9], 发现了受限和非受限空间内外流场中单乳液的三种不同的破碎流型并给出了破碎临界条件^[10,11], 揭示了外流场内单乳液非稳态形变波动机理^[12], 为双重乳液界面行为的研究奠定了基础.

然而, 近期的研究发现, 与单乳液相比, 双重乳液内部增加了内外液滴间的相互作用, 造成双重乳液在外流场中出现了不同于单乳液的界面行为: 如 Smith 等^[13]采用 Level-Set 方法数值模拟研究了双重乳液在受到瞬时剪切作用后所出现的拉伸和回缩行为, 并发现由于受到外部包裹相流体的保护作用, 内液滴的拉伸和回缩行为要比整体液滴进行得迟缓, 并且与单乳液三种破碎模式不同, 双

* 国家自然科学基金(批准号: 51306033)和江苏省自然科学基金(批准号: BK20130621, BK20140488)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ypchen@seu.edu.cn

重乳液仅会出现两种中间拉断式的破碎流型; Hua等^[14]和Patlazhan等^[15]则分别采用浸入边界元法和Level-Set法分别研究了剪切流场中双重乳液稳态形变特性, 研究表明, 双重乳液内液滴的形变倾斜角度总大于或等于外液滴的倾斜角度, 剪切流场受限程度增加, 双乳液液滴形变量增加, 且双乳液液滴形变行为与单乳液形变行为之间的差异也越大; Wang等^[16]采用边界积分法数值模拟研究了双重乳液在线性拉伸流中的稳态形变特性, 发现双重乳液在外流场的驱动下会出现内液滴有序释放的行为, 并且这种释放行为会因为内液滴个数以及初始分布位置的不同而出现差异. 除此之外, Gao和James^[17]还采用扩散界面法对比模拟研究了单乳液和双重乳液在部分润湿表面的非稳态铺展行为, 发现由于内液滴的存在, 双重乳液在非稳态铺展过程中出现了不同的中部断裂方式, 并且还绘制了相应的非稳态铺展流型图. 以上研究均表明, 与单乳液相比, 内外液滴间的相互作用导致双重乳液界面行为规律与机理更为复杂.

综上所述, 尽管针对不同外加流场和边界条件下双重乳液的界面行为特性与规律已有一定数量的理论研究报道, 但对内外液滴在双重乳液形变过程中的相互作用机理仍未建立完整认识, 对相关工艺参数的影响规律缺乏系统探讨, 因此双重乳液在外流场中的形变行为机理尚有待深入揭示. 为此, 本文基于VOF (volume of fluid) 相界面追踪方法, 建立了剪切流场内不可压缩W1/O/W2双重乳液界面行为的理论模型并进行了数值求解; 研究了双重乳液形变机理, 探讨了相关工艺参数对其形变特性的影响规律; 分析了内外液滴在双重乳液形变过程中的相互作用机理. 同时, 本文还通过开展双重乳液在剪切流场中形变的可视化实验验证了所建立理论模型的合理性.

2 数学建模及模型验证

2.1 数学模型

图1(a)为W1/O/W2双重乳液在Couette装置剪切流场内产生形变的示意图. 如图所示, 一个不可压缩W1/O相液滴悬浮在互不相溶的W2相连续流体当中, 而W2相流体则充注于一个三维尺寸为长 W , 宽 H 、间距 h 的Couette剪切流装置内. 该装置通过相互平行的两块平板在各自平面内以相

同的速度 U 反向滑动而在板间 W_2 相流体中产生剪切率为 $G = 2U/h$ 的稳定剪切流场. 在该剪切流场的作用下, 双重乳液将产生形变乃至破碎等界面行为.

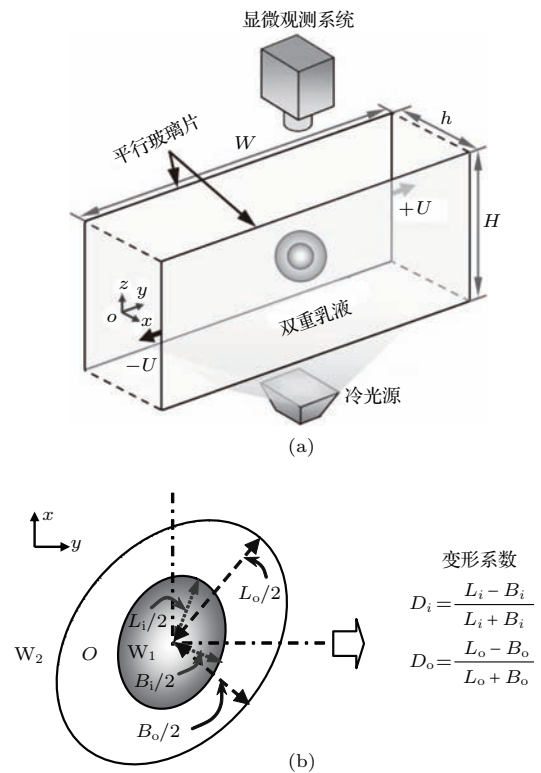


图1 剪切流场下双重乳液形变研究示意图 (a) 可视化实验及计算区域示意图; (b) 双重乳液形变参数示意图
Fig. 1. Schematic of deformed double emulsion drop in steady shear flow: (a) Schematic of experimental setup and computational domain; (b) schematics of deformation parameters for the inner droplet and outer one, respectively.

为了建立定量表征双重乳液稳态形变形貌的数学模型, 本文采用保持质量守恒性较好的VOF方法刻画双重乳液相界面的形貌^[18]. 定义每个计算网格中 W_1, O, W_2 三相的体积比函数分别为 α_{w1}, α_o 和 α_{w2} , 则有 $\alpha_{w1} + \alpha_o + \alpha_{w2} = 1$. 据此, 整个流场计算区域满足以下控制方程:

体积比函数方程

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

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v})$$

$$= -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}}; \quad (3)$$

式中, t 为时间, \mathbf{v} 为速度, p 为速度, g 为重力加速度. 流体密度 ρ 和黏度 μ 可由下式计算

$$\rho = \sum \alpha_i \rho_i, \quad (4)$$

$$\mu = \sum \alpha_i \mu_i. \quad (5)$$

界面张力源项 \mathbf{F}_{vol} 采用连续表面力方法计算^[19]:

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{0.5(\rho_i + \rho_j)}, \quad (6)$$

式中, 第 i 相和第 j 相的界面曲率为

$$k_i = \frac{\Delta \alpha_i}{|\nabla \alpha_i|}, \quad \kappa_j = \frac{\Delta \alpha_j}{|\nabla \alpha_j|}, \quad (7)$$

其中, $i, j = 1, 2, 3$ (1, W2 相流体; 2, O 相流体; 3, W1 相流体).

在剪切流场中, 液滴形变过程主要受到惯性力、黏性力及相界面张力的作用. 为衡量各相参数及各种作用力间的相对大小, 本文特引入以下参数进行表征: Reynolds 数 $Re = \rho_1 G R_o^2 / \mu_1$, 表征惯性力与黏性力之间的相对大小; Capillary 数 $Ca = G \mu_1 R_o / \sigma_{12}$, 表征黏性力和相界面张力之间的相对大小, 其中 R_o 为双重乳液外液滴半径, σ 为界面张力系数; 黏度比 $\lambda_{ij} = \mu_i / \mu_j$; 密度比 $\beta_{ij} = \rho_i / \rho_j$, 界面张力系数比 $\omega_{ij} = \sigma_i / \sigma_j$. 此外, 如图 1(b) 所示, 引入 Taylor 形变系数 D_o, D_i 分别表征双重乳液外液滴和内液滴轮廓的形变程度^[20].

2.2 数值求解方法与边界条件

如图 1(a) 所示, 模拟计算采用空间区域的几何尺寸为 $W \times H \times h = 20R_o \times 8R_o \times 6R_o$, 其中 R_o 为外液滴半径. 应用正方形规格化网格对该计算区域进行网格划分, 连续相流体与滑动板内壁间采用无滑动边界条件处理, 其他边界则采用周期性边界条件处理. 模型中控制方程采用有限体积差分法进行离散求解. 求解时, 压力场和速度场的耦合采用 SIMPLE 算法, 动量方程采用二阶迎风差分格式离散, 相界面采用分段线性界面重构法进行几何重构. 控制方程经离散后, 采用 Gauss-Seidel 方法进行迭代求解. 模拟计算开始前, 采用不同网格尺寸和计算时间步长进行网格独立性检测, 确保得到模拟结果对网格密度和计算时间步长不再敏感.

2.3 模型验证

为验证本文所建立数学模型的合理性, 采用本文数学模型模拟计算了剪切流场内单乳液液滴的 Taylor 形变参数. 我们知道, Taylor^[21] 基于单乳液液滴在黏性流场内的静力学分析提出了经典的液滴小形变理论并得到了单乳液液滴形变系数 $D = (L - B)/(L + B)$ 在小 Capillary 数 ($Ca \ll 1$) 下的理论解, 即

$$D = \frac{19\lambda + 16}{16\lambda + 16} Ca, \quad (8)$$

式中, λ 为液滴与连续相流体的黏度比. 目前, Taylor 解的正确性已经获得广泛认可. 图 2 给出了 Taylor 形变参数的模拟结果与 Taylor 解的比较, 可见本文数值模拟结果与 Taylor 解符合较好, 特别是在 $Ca \leq 0.1$ 的情况下. 表明本文所建立的模型能够有效地预测剪切流场中乳液的稳态形变特性.

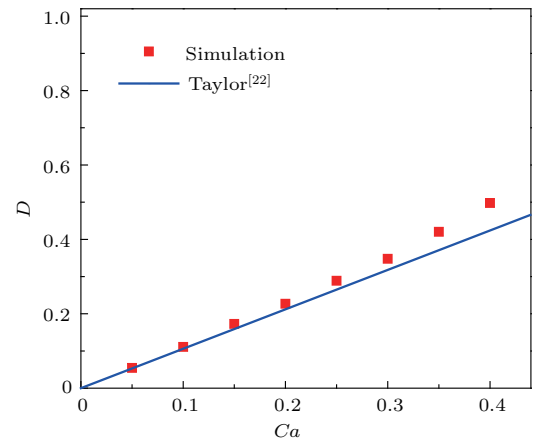


图 2 单乳液液滴稳态形变系数的模拟结果与 Taylor 解对比
Fig. 2. Comparison of single-phase droplet deformation between simulation result and Taylor theory.

为进一步验证本文所建立的数学模型, 搭建了剪切流场中双重乳液形变特性的可视化观测实验装置, 如图 1(a) 所示. 装置通过两个平行的玻璃片反向等速运动而在玻璃片间产生稳定的剪切流场, 并利用焦距可调的显微观测系统实现液滴稳态形变轮廓的拍摄. 实验中, 采用自制的 flow-focusing 型^[21] 双重乳液制备装置产生所需的实验液滴, W₁, O, W₂ 三相流体分别为去离子水 (20 °C 下 $\mu_3 = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_3 = 998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、Ucon 润滑油 (20 °C 下 $\mu_2 = 0.125 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_3 = 991 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和不同分子量的硅油混合物 (20 °C 下 $\mu_3 = 5.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,

$\rho_3 = 989 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 各相间的界面张力由DCAT21界面张力仪测得: $\sigma_{32} = 0.024 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $\sigma_{21} = 0.003 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. 图3对比了不同 Ca 情况下数值模拟和实验中双重乳液 Taylor 形变参数. 由图可知, 本文数值模拟计算得到的双重乳液不仅在形貌上(大小和形状)与实验观测得到的图像一致, 并且

内、外液滴的稳态 Taylor 形变参数也与实验数据符合较好. 这表明本文所建立的模型能够有效地预测剪切流场中乳液的稳态形变特性. 另外, 从图3中还可看出, 双重乳液内液滴和外液滴的 Taylor 形变参数随着 Ca 增加而呈现单调增加, 这主要是由于剪切力增强促使了内外液滴的形变.

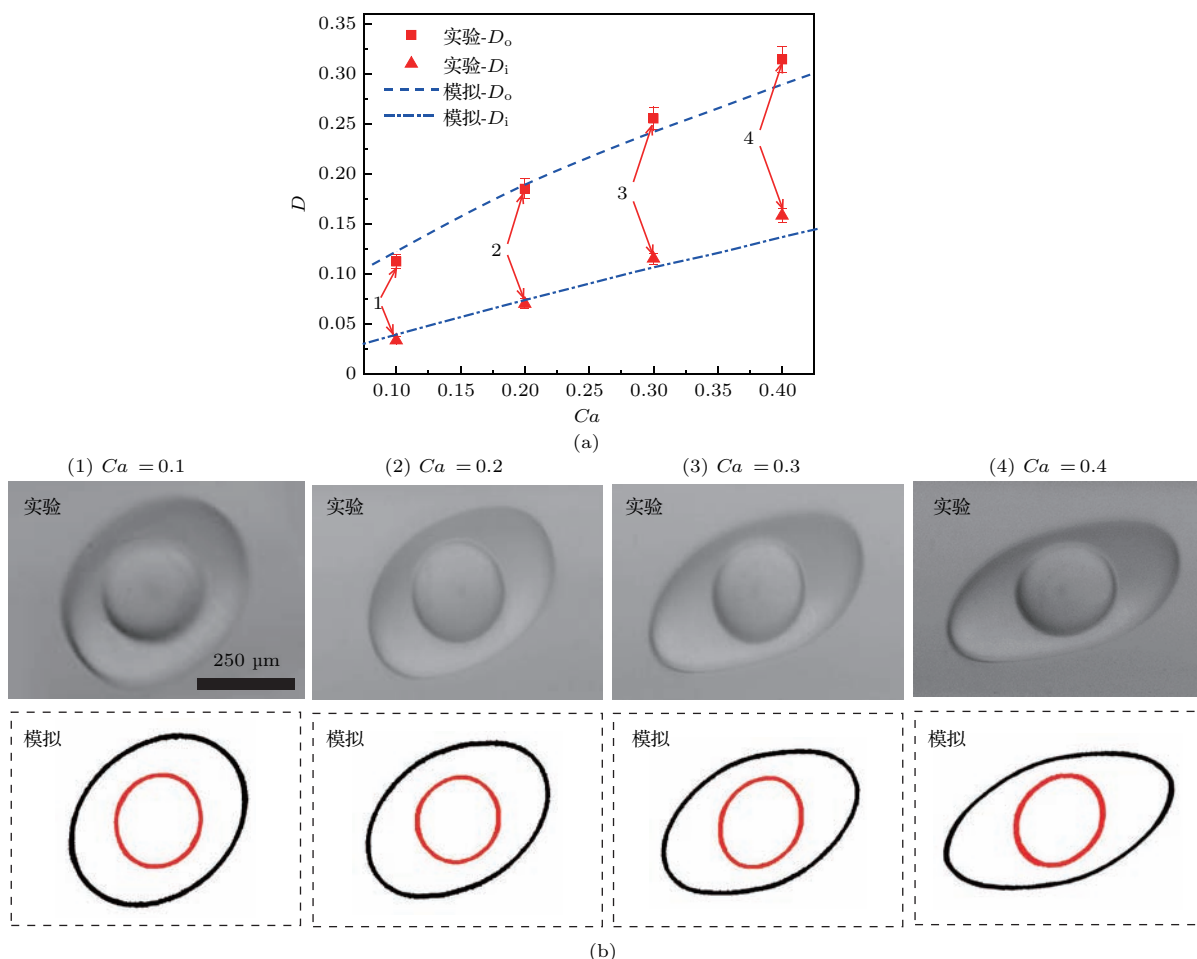


图3 (网刊彩色) 数值模拟和实验中双重乳液稳态形变参数的对比 (a) 双重乳液形变参数随 Ca 变化; (b) 数值模拟和实验中双重乳液形貌对比

Fig. 3. (color online) Comparison of steady deformation of double emulsion droplet between experiment and simulation: (a) Steady deformation of double emulsion droplet vs Ca ; (b) comparison of droplet morphology for double emulsion between experiment and simulation.

3 模拟结果分析与讨论

利用所建立的理论模型, 研究了剪切流条件下, $Re = 0.05$, $R_o = 250 \mu\text{m}$, $\omega_{ij} = 1$, $\beta_{ij} = 1$ 时双重乳液的稳态形变特性, 探讨了无量纲剪切强度 (Ca 数)、内外液滴半径比 (k) 及各相黏度间相对大小 (λ_{32} , λ_{21}) 对双重乳液稳态形变的影响规律. 值得注意的是, 在本文研究的 Re 数范围内, 惯性力的作用很小, 液滴形变主要受到黏性力和界面张力的控制 [23].

3.1 液滴稳态形变区域的流场及压力场分析

图4和图5分别给出了不同 Ca , k , λ_{32} 和 λ_{21} 值下双重乳液内外液滴的稳态形变轮廓及其区域内的速度场与压力场分布. 由图可知, 在黏性剪切力和界面张力的共同作用下, 液滴形变为椭球形, 液滴内部的流体产生旋流, 且流动速度由液滴内部向液滴外界面逐渐增大, 在外界面处流场速度方向基本与界面相切.

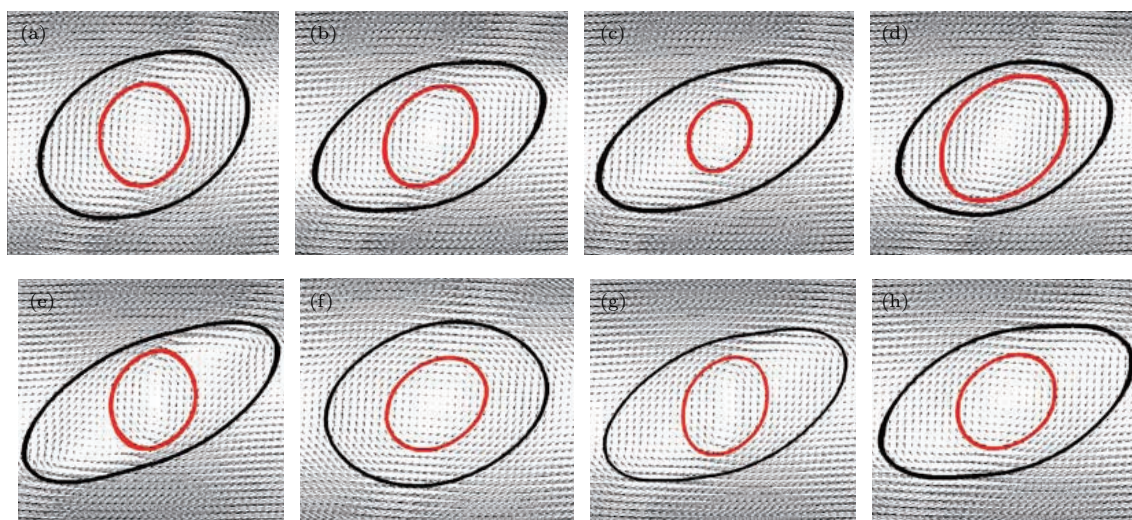


图4 (网刊彩色) 双重乳液稳态变形形状及速度场分布 (a) $Ca_{out} = 0.2, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (b) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (c) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.3, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (d) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.7, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (e) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 0.2$; (f) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 5.0$; (g) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.3, \lambda_{32} = 0.2, \lambda_{21} = 1$; (h) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.7, \lambda_{32} = 5.0, \lambda_{21} = 1$

Fig. 4. (color online) Steady deformation and velocity field of double emulsion droplet: (a) $Ca_{out} = 0.2, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (b) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (c) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.3, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (d) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.7, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (e) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 0.2$; (f) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 5.0$; (g) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.3, \lambda_{32} = 0.2, \lambda_{21} = 1$; (h) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.7, \lambda_{32} = 5.0, \lambda_{21} = 1$.

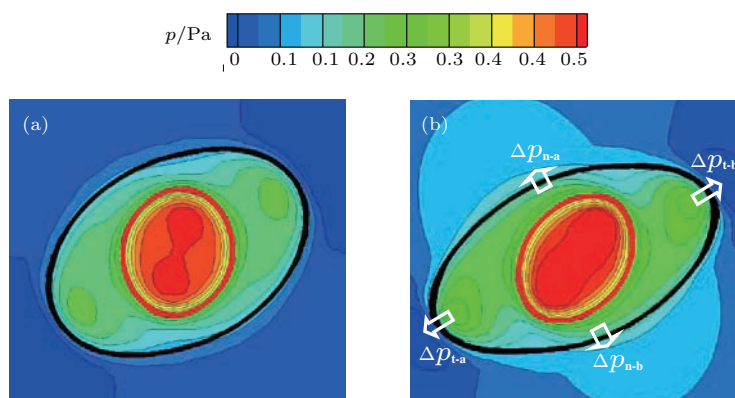


图5 (网刊彩色) 双重乳液稳态变形区域压力场分布 (a) $Ca_{out} = 0.2, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (b) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$

Fig. 5. (color online) Pressure distribution of double emulsion droplet: (a) $Ca_{out} = 0.2, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$; (b) $Ca_{out} = 0.4, k = 0.5, \lambda_{32} = 1, \lambda_{21} = 1$.

由压力场分布图可以看出, 双重乳液内、外界面张力的作用下, 整个液滴区域具有较高的压力. 特别是在相同的界面张力系数比下 ($\omega_{ij} = 1$), 内液滴轮廓界面具有更小的曲率半径, 使其界面上具有更大的界面张力, 因此内液滴内部区域压力达到最高, 其抵抗形变的能力比外液滴要强. 此外, 如图5(b)所示, 在椭球状液滴短轴方向和长轴方向的外界面处存在两个明显压力梯度区 $\Delta p_{n-a}, \Delta p_{n-b}$ 和 $\Delta p_{t-a}, \Delta p_{t-b}$, 且 $\Delta p_{n-a} (\Delta p_{n-b}) < \Delta p_{t-a} (\Delta p_{t-b})$. 则由 Young-Laplace 方程可知, 与这些压力梯度区域所对应的相界面 (即变形双重乳液短轴方向的外

轮廓界面和长轴方向的外轮廓界面) 应具有较大和较小的曲率半径, 这也正体现了双重乳液椭球形变轮廓与形变区域压力场分布特性间存在的内在联系.

3.2 影响液滴稳态形变的因素

3.2.1 内外液滴半径比的影响

图6给出了不同内外液滴半径比下双重乳液外液滴及内液滴的形变系数 D_o, D_i 随 Ca 数的变化. 由图可知, 随着 Ca 数的增加, 黏性剪切力相对

于界面张力逐渐增大, 导致内液滴及外液滴形变程度 (D_i, D_o) 同时增大. 对比不同 k 下的 D_o, D_i 可以发现, 随着 k 值的增大, 外液滴形变程度减小, 内液滴形变程度增大. 这说明随着 k 值增大, 内液滴在双重乳液整体中所占的体积份额增大, 造成内外液滴间相互作用增强, 从而使内液滴界面受到来自外液滴界面更强的压迫作用, 形变程度增大. 另一方面, 由于内液滴抵抗形变的能力比外液滴要强, 因此内外液滴间相互作用增强使内液滴抗形变的效应反作用与外液滴界面, 从而造成外液滴形变程度减小.

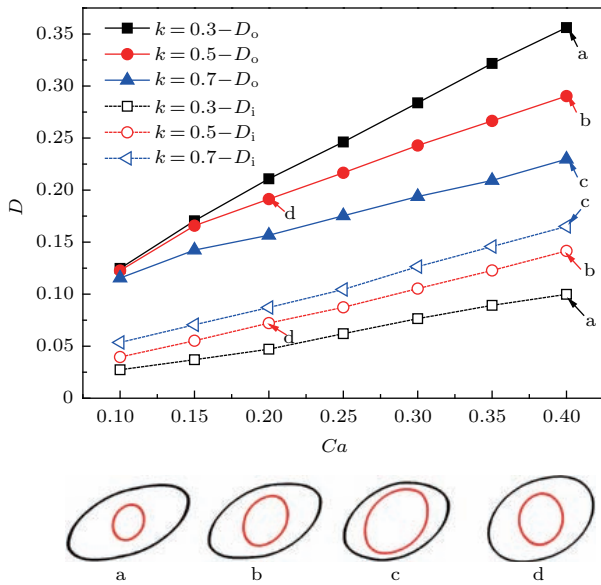


图6 (网刊彩色) 不同 k 值下稳定形变系数随 Ca 的变化 ($\lambda_{32} = \lambda_{21} = 1$)
 Fig. 6. (color online) Effects of Ca and k on the steady deformation of double emulsion droplet ($\lambda_{32} = \lambda_{21} = 1$).

3.2.2 各相流体黏度的影响

图7和图8给出了双重乳液外液滴O相流体与连续相流体W2间黏度比 λ_{21} 及内液滴W1相与外液滴O相流体黏度比 λ_{32} 对双重乳液稳态形变特性的影响. 如图4(b), 图4(e), 图4(f)和图7所示, 随着 λ_{21} 增大, 双重乳液整体的稳态变形轮廓由细长椭圆状转变为短扁椭圆状, 外液滴的形变程度减小. 同时, 包裹在内液滴外的外液滴O相流体黏度相对升高, 造成施加在内液滴上的黏性剪切力相对增大, 导致内液滴的形变程度随着 λ_{21} 的增大而增大. 此外, 如图4(b), 图4(g), 图4(h)和图8所示, λ_{32} 的增大(即内液滴黏度的相对升高)同样会使外液滴的形变程度减小, 但影响程度明显要弱于 λ_{21} 增大所产生的影响. 由此可见, 除了界面张力之外,

双重乳液自身的黏性也是阻碍液滴形变的一种重要因素, 并且外液滴相黏度变化对乳液形变程度的影响更为明显.

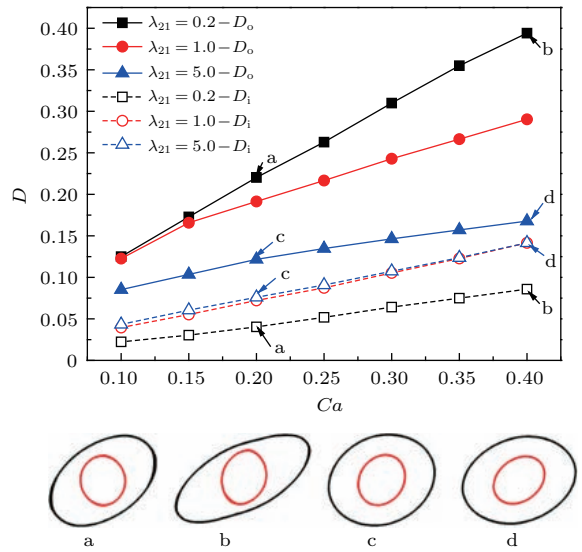


图7 (网刊彩色) 黏度比 λ_{21} 对液滴变形特性的影响 ($k = 0.5, \lambda_{32} = 1$)
 Fig. 7. (color online) Effect of viscosity ratio λ_{21} on the steady deformation of emulsion droplet ($k = 0.5, \lambda_{32} = 1$).

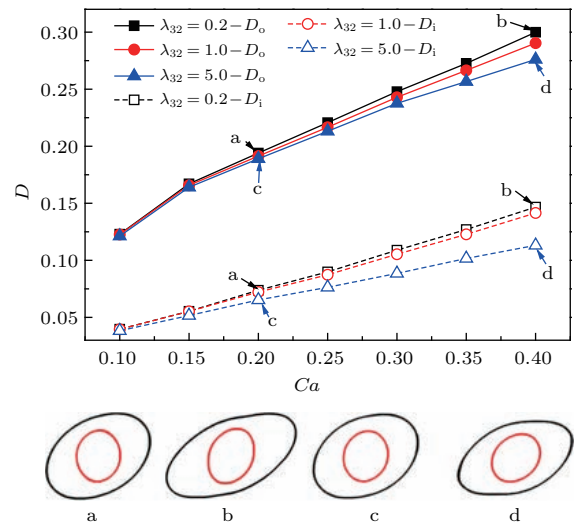


图8 (网刊彩色) 黏度比 λ_{32} 对液滴变形特性的影响 ($k = 0.5, \lambda_{21} = 1$)
 Fig. 8. (color online) Effect of viscosity ratio λ_{32} on the steady deformation of emulsion droplet ($k = 0.5, \lambda_{21} = 1$).

4 结论

本文基于VOF相界面追踪方法, 建立了剪切流场内不可压缩W1/O/W2双重乳液界面行为的理论模型, 并通过可视化实验观测验证了所建理论

论模型的合理性. 基于该理论模型, 本文数值模拟研究了双重乳液形变机理并探讨了相关工艺参数对其形变特性的影响规律. 研究表明: 1) 在剪切流场中, 双重乳液形变为椭球形, 且其稳态形变程度随着 Ca 数的增大而加剧, 并且, 较之外液滴, 内液滴抵抗形变的能力更强; 2) 随着内外液滴半径比 k 的增大, 双重乳液内外液滴间的相互作用增强, 造成内液滴内液滴形变程度增大, 同时内液滴抗形变效应逐渐凸显, 导致外液滴形变程度减小; 3) 双重乳液自身的黏性是阻碍液滴形变的一种重要因素, 随着内外液滴相黏度的升高, 双重乳液整体形变程度均减小, 并且乳液外液滴相黏度变化对双重乳液稳态形变程度的影响更为明显.

参考文献

- [1] Lee D, Weitz D A 2008 *Adv. Mater.* **20** 3498
- [2] Shum H C, Zhao Y J, Kim S H, Weitz D A 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **123** 1686
- [3] Zhao Y J, Zhao X W, Hu J, Xu M, Zhao W J, Sun L G, Zhu C, Xu H, Gu Z Z 2009 *Adv. Mater.* **21** 569
- [4] Bychkov V, Modestov M, Law C K 2015 *Prog. Energy Combust. Sci.* **47** 32
- [5] Moreau L, Levassort C, Blondel B, de Nonancourt C, Croix C, Thibonnet J, Balland-Longeau A 2009 *Laser Part. Beams* **27** 537
- [6] Xu W, Lan Z, Peng B L, Wen R F, Ma X H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 216801 (in Chinese) [徐威, 兰忠, 彭本利, 温荣福, 马学虎 2015 物理学报 **64** 216801]
- [7] Huang H, Hong N, Liang H, Shi B C, Chai Z H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 084702 (in Chinese) [黄虎, 洪宁, 梁宏, 施保昌, 柴振华 2016 物理学报 **65** 084702]
- [8] Mei M F, Yu B M, Luo L, Cai J C 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 076862
- [9] Stone H A 1994 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **26** 65
- [10] Renardy Y 2008 *Int. J. Multiphase Flow* **34** 1185
- [11] Guido S 2011 *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **16** 61
- [12] Sibillo V, Pasquariello G, Simeone M, Cristini V, Guido S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 054502
- [13] Smith K A, Ottino J M, de la Cruz M O 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 204501
- [14] Hua H, Shin J, Kim J 2014 *Int. J. Heat Fluid Flow* **50** 63
- [15] Patlazhan S, Vagner S, Kravchenko I 2015 *Phys. Rev. E* **91** 063002
- [16] Wang J T, Liu J X, Han J J, Guan J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 066001
- [17] Gao P, James J F 2011 *J. Fluid Mech.* **682** 415
- [18] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C A 1992 *J. Comput. Phys.* **100** 335
- [19] Hirt C W, Nichols B D 1981 *J. Comput. Phys.* **46** 201
- [20] Renardy Y, Cristini V 2001 *Phys. Fluids* **13** 2161
- [21] Taylor G I 1934 *Proceedings of the Royal Society of London Series A* **146** 501
- [22] Chen Y P, Wu L Y, Zhang L 2015 *Int. J. Heat Mass Transfer* **82** 42
- [23] Stone H A, Leal L G 1990 *J. Fluid Mech.* **211** 123

Steady deformation characteristics of double emulsion droplet in shear flow^{*}

Zhang Cheng-Bin¹⁾ Yu Cheng¹⁾ Liu Xiang-Dong²⁾ Jin Ou²⁾ Chen Yong-Ping^{1)2)†}

1) (School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(Received 18 May 2016; revised manuscript received 9 August 2016)

Abstract

The manipulation of double emulsion droplet via shear flow field is widely encountered in microfluidic devices. However, the interface evolution and hydrodynamics behavior of double emulsion droplet in shear flow is less understood till now. In this paper, a theoretical model of double emulsion droplet in a Couette flow device is developed and numerically analyzed to characterize the interface behavior of incompressible double emulsion droplet, which is also verified by a visualization experiment. Based on this model, the mechanisms underlying the steady deformation of double emulsion droplet under shear are investigated, and the effects of radius ratio of inner droplet to the outer one and viscosities of working fluids on the steady deformation are discussed. The results indicate that the steady deformation of double emulsion droplet in the shear increases with the rise in capillary number, and the deformation resistance of inner droplet is larger than that of the outer droplet. With increasing the radius ratio of inner droplet to the outer one, the interaction between the inner and outer droplets becomes great and thus the deformation degree of the inner droplet is increased. In addition, the effect of big deformation resistance by the inner droplet tends to be obvious, leading to decreasing the deformation degree of outer droplet. The viscosities of both inner and outer droplets provide a resistance for the deformation of double emulsion droplet. With the rises in viscosities of inner and outer droplets, the deformation degree of integral double emulsion droplet decreases. In addition, the effect of outer droplet viscosity on the steady deformation is more obvious than that of the inner droplet.

Keywords: double emulsion droplet, shear flow, deformation characteristics, visualization

PACS: 47.57.jb, 47.85.Np

DOI: [10.7498/aps.65.204704](https://doi.org/10.7498/aps.65.204704)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51306033) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK20130621, BK20140488).

† Corresponding author. E-mail: ypchen@seu.edu.cn