

T 型微通道内液滴生成特性的实验研究

马化杰¹ 李磊¹ 种道彤¹ 徐峰² 刘继平¹ 严俊杰¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安交通大学生物医学工程与生物力学研究中心, 西安 710049)

摘要 本文通过实验研究了 T 型微通道内液滴的生成特性, 获得了 T 型微通道内分散相流量、连续相流量以及微通道直径变化对液滴生成特性的影响规律。实验结果表明: 在低 Ca 数下, T 型微通道内液滴的特征尺寸随分散相流量的增大而增大, 随连续相流量的增大而减小, 随微通道直径的减小而减小。其生成频率随分散相流量、连续相流量的增大而增大, 随微通道直径的增大而减小。

关键词 T 型微通道; 液滴生成; 特征尺寸; 生成频率

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)12-2284-04

Experimental Study on Formation Characteristics of Droplets Generated in T-shaped Microchannels

MA Hua-Jie¹ LI Lei¹ CHONG Dao-Tong¹ XU Feng² LIU Ji-Ping¹ YAN Jun-Jie¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Biomedical Engineering and Biomechanics Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract In this paper, the formation characteristics of droplets generated in T-shaped microchannels are studied, and the influence of dispersed phase flux, continuous phase flux and microchannel diameter on the formation of the droplets is analyzed. The experimental results show that at low capillary number, the feature size of the droplets in T-shaped microchannels increases with the increasing of the dispersed phase flux, decreases with the increasing of the continuous phase flux, and decreases with the decreasing of the microchannel diameter. The generation frequency increases with the increasing of the dispersed phase flux and the continuous phase flux, and decreases with the increasing of the microchannel diameter.

Key words T-shaped microchannels; droplet formation; feature size; generation frequency

0 引言

微流控技术是 20 世纪末逐渐产生和发展的一种新型技术, 它是指在直径为微米级或纳米级的微通道内对纳升至皮升体积的流体进行操纵, 从而实现对极微量样品或试剂的处理及利用。该技术促进了反应体积和反应产物的小型化, 具有效率高、控制精准等特点, 因此在化学分离、药物控释、食品行业、农业等领域具有广阔的应用前景^[1]。由微通道连接而成的微通道网络是微流控技术的结构特征, 而 T 型微通道则是微通道网络中最基本的结构单元之一^[2], 因此研究 T 型微通道内液体流动特性及液滴生成特性对明确微流控技术的内在机理以及促进其应用具有重要意义。

T 型微通道乳化法是制备单分散液滴的可靠方

法。该方法在 1997 年由日本学者 Nakajima 提出^[3], 其原理是在尺寸均匀的 T 型微通道内, 将分散相 (如油相) 压入连续相 (如水相) 中, 在剪切力和界面张力等力作用下, 分散相会形成尺寸均匀的液滴分散到连续相中^[4]。Demenech 等^[5]利用 CFD 方法对 T 型微通道内分散相液体的破裂过程进行了模拟, 获得了液体流量、 Ca 数和黏性比对液滴形成的影响规律。Kashid 等^[6]对 T 型通道内流动型式、分散相液滴大小以及流道压差分布进行了理论研究和实验验证。利用 T 型微通道乳化法制备液滴的方法虽然受到各国学者的广泛关注, 但是由于微通道内流体混合过程较为复杂, 许多问题尚有待进一步研究。

利用 T 型微通道制备单分散性液滴是当前各国

收稿日期: 2012-12-22; 修订日期: 2013-11-22

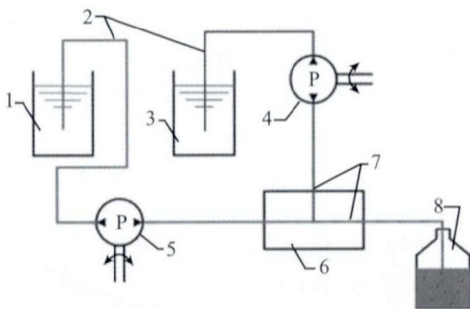
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51006081); 中央高校基本科研业务费专项资金和国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.2009CB219803)

作者简介: 马化杰 (1987-), 男, 陕西渭南人, 硕士, 主要从事电厂热力系统及气液两相流研究。通信作者: 种道彤, 副教授, E-mail: dtchong@mail.xjtu.edu.cn.

学者研究的热点。目前国内外学者在该领域的研究主要集中在理论分析和数值模拟等方面,而相关的实验验证则缺乏系统性和全面性,尤其是关于 T 型微通道内液滴生成频率的研究和报导很少。本文设计搭建了利用 T 型微通道生成液滴的实验系统,研究了低 Ca 数下,柱塞状分散相液滴特征尺寸(即分散相液柱的轴向长度 L)和生成频率随连续相流量和分散相流量的变化规律,以及微通道直径对液滴生成特性的影响作用,并得到了液滴无量纲特征尺寸的实验关联式。

1 液滴生成实验系统

图 1 为本文设计的 T 型微通道内液滴生成实验系统。在恒流注射泵 4 和 5 的作用下,连续相 1(水相)和分散相 3(油相)分别流经连接软管 2 后进入 T 型微通道 7 的两个入口。分散相在 T 型微通道的交叉处被连续相流体剪切,形成单分散性液滴,该液滴与连续相混合后通过软管流入收集装置 8。



1. 连续相(水相) 2. 连接软管 3. 分散相(油相) 4, 5. 恒流注射泵
6. PDMS 模块 7. T 型微通道 8. 收集装置

图 1 T 型微通道内液滴生成实验系统图

Fig. 1 T-shaped microchannel experimental system for droplets generation

本实验系统的主要装置是恒流注射泵和包含在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 模块中的 T 型微通道。实验中连续相和分散相流量范围均为 $0.1\sim 6\text{ mL/h}$, 并可通过设置注射泵参数进行调节。实验采用的 T 型微通道截面为圆形, 直径分别为 $400\ \mu\text{m}$ 和 $600\ \mu\text{m}$, 连续相为蒸馏水, 分散相为添加了油溶红的植物油。实验中的液滴特征尺寸和生成频率用高清数码相机 (索尼 DCR-HC43E PAL) 记录和分析。

2 液滴生成特性

在 T 型微通道内, 两相接触区域较为狭窄, 液滴在受限区域内形成, 其主要形成过程如下: 刚生成的液滴头很快填满两相接触区域, 并在主通道中继续

续发展。同时, 该液滴头阻碍了连续相的流动, 使其只能在分散相和壁面之间的薄膜内流动, 从而使连续相上游压力(积压力)增加, 并驱动两相界面向下游发展, 最终夹断分散相头部形成柱塞状液滴^[7-8]。上述液滴形成机理一般发生在毛细数 $Ca < 0.002$ ^[7] 的情况下, 该区域称为“挤压区”。

在上述液滴形成过程中, 分散相液滴主要受到上游积压力的作用。此外, 它还受到黏性力和界面张力等力的作用, 但是由于积压力比其他力大很多, 因此它是促使分散相液滴头部发展并最终夹断脱离的主要作用力。在截面为矩形的 T 型微通道内, 积压力 F_p 的计算公式如下^[7,8]:

$$F_p \approx O(\mu_c Q_c w_c^2 / \varepsilon^3) \quad (1)$$

式中, Q_c 为连续相流量; w_c 为下游微通道宽度; ε 为分散相液滴头部与壁面之间的薄膜厚度, μ_c 为连续相的动力黏性系数。

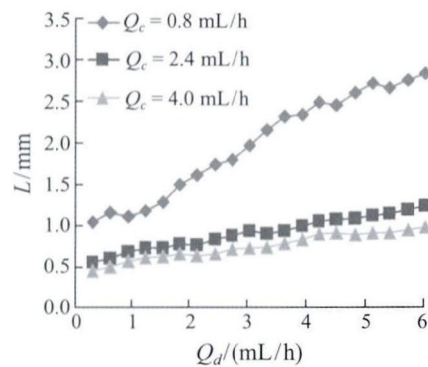
本文中 Q_d 为分散相流量, Q_c 为连续相流量, L 为液滴的特征尺寸, d 为微通道直径, f 为液滴生成频率, 频率的单位为 min^{-1} (每分钟生成的液滴数)。

2.1 分散相流量对液滴特征尺寸及生成频率的影响

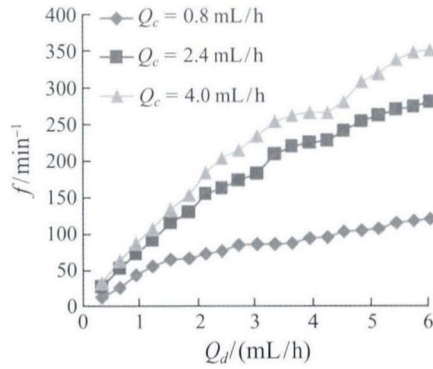
图 2 为液滴特征尺寸及生成频率随分散相流量的变化关系, 其中 $d = 600\ \mu\text{m}$, $Q_d = 0.3\sim 6.0\text{ mL/h}$, $Q_c = 0.8\text{ mL/h}$, 2.4 mL/h , 4.0 mL/h 。

由图 2(a) 可知, 连续相流量不变时, 随着分散相流量的增大, 液滴特征尺寸不断增大, 二者之间呈近似线性关系。这是因为在连续相流量不变时, 随着分散相流量增大, 液滴上游的积压力变化不大, 但是单位时间内进入混合区域的分散相液体的体积增加, 因此液柱的长度也随之增大。

由图 2(b) 可知, 连续相流量不变时, 随着分散相流量的增大, 液滴生成频率也不断增大。原因如下: 连续相流量不变时, 分散相流量越大, 从分散相通道进入混合区域的液滴头部的动量越大, 分散相液滴和壁面之间的薄膜厚度 ε 变小, 上游积压力则



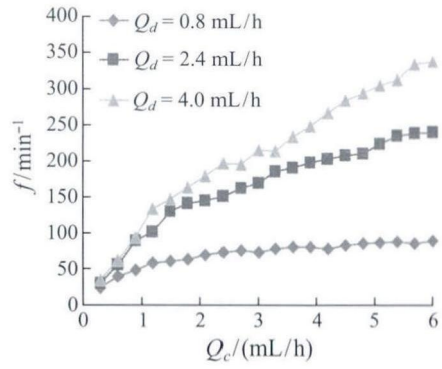
(a) 特征尺寸变化



(b) 生成频率变化

图 2 液滴特征尺寸和生成频率随分散相流量的变化

Fig. 2 Relationship between the droplets feature size, generation frequency and the dispersed phase flux



(b) 生成频率变化

图 3 液滴特征尺寸和生成频率随连续相流量的变化

Fig. 3 Relationship between the droplets feature size, generation frequency and the continuous phase flux

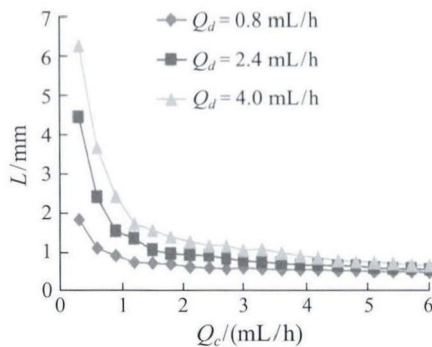
相应增大, 因此该积压力挤压分散相颈部并使之断裂的时间变短 (效率变高), 从而使分散相液滴的生成频率增大。

2.2 连续相流量对液滴特征尺寸及生成频率的影响

图 3 为液滴特征尺寸及生成频率随连续相流量的变化关系。图中 $Q_d = 0.8 \text{ mL/h}$, 2.4 mL/h , 4.0 mL/h , $Q_c = 0.3 \sim 6 \text{ mL/h}$ 。

由图 3 可知, 分散相流量不变时, 随着连续相流量的增大, 液滴的特征尺寸减小, 生成频率增大。原因是在分散相流量不变时, 随着连续相流量的增大, 液滴上游的积压力 F_p 不断变大, 该积压力挤压剪断液滴颈部的能力变大, 剪断颈部所需的时间变短, 因此液滴的特征尺寸变小, 生成频率增大。

值得注意的是, 液滴特征尺寸随着连续相流量增大而变化的趋势并不是线性的, 其变化速率不断减小, 最后基本保持恒定。原因是当连续相流量小于分散相流量时, 积压力剪断液滴颈部耗时较长, 此时连续相流量对液滴体积影响较大。随着连续相流量逐渐增大, 积压力剪断液滴颈部所用的时间已经足够短, 在分散相流量恒定的条件下, 液滴的特征尺寸随之变化的幅度则明显减小。

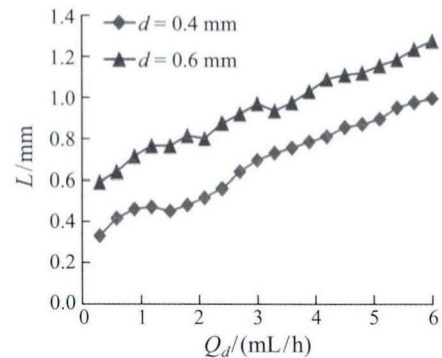


(a) 特征尺寸变化

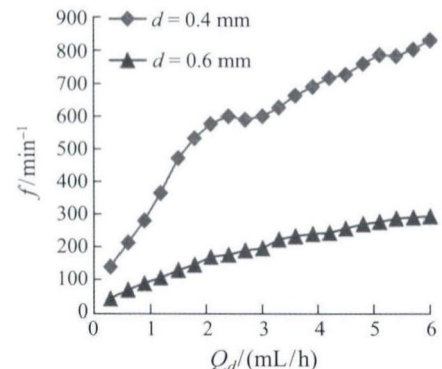
2.3 微通道直径对液滴特征尺寸及生成频率的影响

图 4 为 T 型微通道 $d = 400 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m}$ 时, 液滴特征尺寸及生成频率随 Q_d 和 Q_c 的变化关系。

由图 4 可知, 在相同分散相流量和连续相流量下, 和较大直径微通道内的液滴相比, 较小直径微通道内液滴的特征尺寸变小, 而生成频率明显变大。原因如下: 当 T 型微通道直径变小时, 在其交叉区域处, 液滴的颈部厚度小, 且微通道较窄, 引起较大的上游积压力, 连续相挤压分散相液滴颈部的能力较强, 效率较高。因此, 当微通道直径变小时, 其中的液滴特征尺寸减小, 而生成频率显著增大。



(a) $Q_c = 2.4 \text{ mL/h}$, 液滴特征尺寸变化



(b) $Q_c = 2.4 \text{ mL/h}$, 液滴生成频率变化

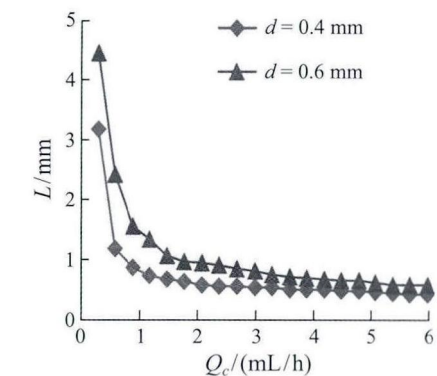
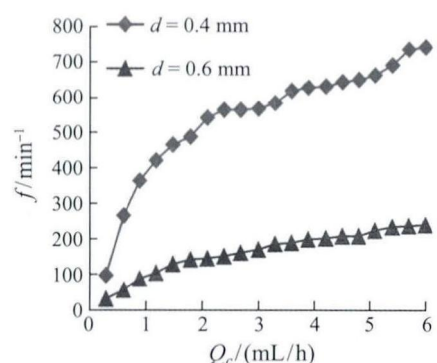
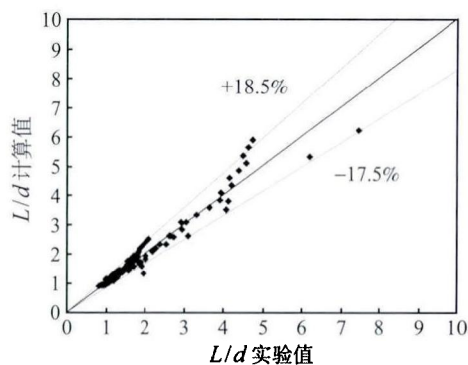
(c) $Q_d = 2.4$ mL/h, 液滴特征尺寸变化(d) $Q_d = 2.4$ mL/h, 液滴生成频率变化

图 4 不同微通道直径下液滴特征尺寸和生成频率随分散相和连续相流量的变化

Fig. 4 Relationship between the droplets feature size, generation frequency and the dispersed phase flux (continuous phase flux) in microchannels with different diameters

2.4 T 型微通道内液滴特征尺寸的实验关联式及误差分析

在低毛细数下, T 型微通道内液滴主要以“挤压状”机理形成, 该流型下形成的液滴呈柱塞状, 形状规则, 尺寸均匀, 可用无量纲化后的特征尺寸(即无量纲轴向长度 L/d) 来描述。Demenech^[5] 和 Garstecki^[8] 等人提出在低 Ca 数下, 挤压状流型生成的柱塞状液滴无量纲特征尺寸 L/d 与分散相和连

图 5 液滴无量纲特征尺寸 L/d 计算值与实验值的相对误差
Fig. 5 Comparison between the calculated and experimental value of the droplet dimensionless feature size L/d

续相的流量比呈线性关系。在此基础上, 对本文中的实验数据进行分析, 可得到挤压状流型下液滴无量纲特征尺寸的实验关联式:

$$\frac{L}{d} = 0.8 + 0.67 \frac{Q_d}{Q_c} \quad (2)$$

通过实验得到的 L/d 值和利用实验关联式计算出的 L/d 值相对误差如图 5 所示, 比较结果表明, 二者的误差基本在 $\pm 18.5\%$ 以内。

3 结 论

本文设计搭建了利用 T 型微通道制备单分散性液滴的实验系统, 对低 Ca 数下 T 型微通道内柱塞状液滴生成特性进行了实验研究, 获得了分散相流量、连续相流量、微通道直径对液滴的特征尺寸和生成频率的影响规律。本文主要结论如下: 液滴的特征尺寸随着分散相流量的增大而增大, 二者变化呈近似的线性关系; 随连续相流量的增大而减小, 其变小的速率不断减缓。液滴的生成频率随着分散相和连续相流体流量的增大而增大。当 T 型微通道直径减小时, 液滴的特征尺寸变小, 其生成频率却显著提高。最后, 对实验数据进行分析 and 拟合, 得到了挤压状流型下柱塞状液滴无量纲特征尺寸的经验关联式。

参 考 文 献

- [1] Ralf S, Martin B, Thomas P, et al. Droplet Based Microfluidics [J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75: 016601
- [2] Nicolas L, Flavie S, Pierre G, et al. Some Recent Advances in the Design and the Use of Miniaturized Droplet-Based Continuous Process: Applications in Chemistry and High-Pressure Microflows [J]. Lab on a Chip, 2011, 11: 779-787
- [3] Kawakatsu T, Kikuchi Y, Nakajima M, et al. Regular Sized Cell Creation in Microchannel Emulsification by Visual Microprocessing Method [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1997, 74(3): 317-321
- [4] Todd T, Richard W R, Frances H A, et al. Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device [J]. Phys Rev Lett, 2001, 86: 4163-4166
- [5] Demenech M, Garstecki P, Jousse F, et al. Transition From Squeezing to Dripping in a Microfluidic T-shaped Junction [J]. J Fluid Mech, 2008, 595: 141-161
- [6] Madhvanand N K, David W A. Hydrodynamics of Liquid-Liquid Slug Flow Capillary Microreactor: Flow Regimes, Slug Size and Pressure Drop [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 131: 1-13
- [7] XU Jianhong, LI Shaowei, TAN Jing, et al. Correlation of Droplet Formation in T-Junction Microfluidic Devices: From Squeezing to Dripping [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2008, 5: 711-717
- [8] Piotr G, Michael J F, Howard A S, et al. Formation of Droplets and Bubbles in a Microfluidic T-Junction—Scaling and Mechanism of Break-up [J]. Lab on a Chip, 2006, 6: 437-446