

Y 型微通道两相流内部流动特性¹⁾

刘赵森²⁾ 刘丽昆 申峰

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要 利用显微粒子图像测速技术、高速度数码显微系统及数值模拟方法研究了 Y 型微通道内液滴的形成. 主要考虑了 Y 型角度 (45° , 90° , 135° , 180°)、两相流量大小等因素的影响. 发现在挤压机制中, Y 型微通道内分散相液滴的形成主要受到来自连续相的剪切作用, Y 型角度越小, 分散相所受到的剪切作用越大. 在液滴生成过程中, 连续相速度剖面呈非对称抛物线型分布. 当 Y 型角度小于 180° 时, 角度的变化对液滴直径大小影响较小, 但角度的减小会加快液滴的生成时间. 当 Y 型角度为 180° 时, 生成的液滴体积最大且生成时间最长. 毛细数对液滴直径和生成时间的变化同时产生影响, 连续相毛细数的增大使得连续相在两相交汇位置处对分散相的作用力更集中, 导致分散相更易破裂.

关键词 微流控, Y 型微通道, Y 型角度, 显微粒子图像测速技术, 数值模拟

中图分类号: O368 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-228

引言

微流控芯片实验室可将化学或生物实验室微缩到一块数平方厘米的芯片上^[1], 而微流控芯片在化学和生物医学的多相流研究领域中有广泛的应用, 如化学合成、生物制药、药物筛选, 以及食品和化妆品行业中的乳化技术等^[2-4]. 与常规方法相比, 用微通道产生的微滴具有较高的均一性, 而且生成过程快, 频率高^[5-14].

不同的应用领域中由于微流控芯片作用不同, 对所形成液滴大小的要求也就不同. 因此, 针对不同结构的微通道, 合理控制和预测不同工况条件下液滴尺寸大小及生成周期, 对工业应用有着重要的指导意义. 制约着生成液滴大小的因素有很多, 如分散相黏度^[15]、两相流动速度比值^[16]、微通道尺寸^[17]、壁面对两相流的润湿性^[18]等. 不同的交汇方式, 两相流型也存在差异, Zhao 等^[11]在 T 型入口处观察到了弹状流、单分散油滴、小滴群、光滑界面平行流、波动界面平行流、混乱细条纹流等流型. Cubaud 等^[19]研究了十字聚焦型微通道内液液两相流的流型, 观测到螺旋型、喷射型、滴状型、管状型、滑移型 5 个流型. Dessimoz 等^[20]发现同样条件下 Y 型入口的微通道中容易形成平行流. 骆广生等^[21]提出液液非

均相体系的流动与混合行为主要有 3 种形式: 平行流、弹状流、滴状流.

对于微通道内部两相液体流动状态, 也有学者利用显微测速系统, 针对不同的两相交汇结构进行了实验研究. Steijn 等^[22]通过显微粒子成像测速系统对 T 型结构微通道内气泡形成过程中流动区域进行了观测. 分别观察了微通道不同平面深度下连续相酒精的速度分布, 并发现气泡快速收缩发生在颈缩半径为通道宽度的四分之一处. King 等^[23]利用 T 型微通道, 观察到在不同液滴移动速度下液滴内部的速度变化, 发现当液滴移动速度较快时, 液滴内部速度呈现内循环流动.

根据微通道几何构型、尺寸的不同, 可以将其设计和改进成各种用途的微元器件, 其中 T 型结构和聚焦型结构微通道是比较有效的方式, 目前的研究成果较多. 而关于 Y 型微通道的研究多集中于两相混合后的流型分析, 对于液滴大小、形成周期的影响因素还缺少系统研究. 因此本研究以不同角度的 Y 型微通道为研究对象, 对液滴形成的大小及其影响因素进行分析, 并从微通道内部速度矢量分布情况来进一步解释不同情况下液滴形成周期、大小存在差异的原因.

2013-07-11 收到第 1 稿, 2013-08-01 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (11072001, 11002007) 和北京市教委中青年骨干教师资助项目.

2) 刘赵森, 教授, 主要研究方向: 微流体力学、计算流体力学、流固耦合分析. E-mail: lzm@bjut.edu.cn

1 实验材料和方法

1.1 微通道尺寸及形状

本文实验所用微通道的材质为聚二甲基硅氧烷 (PDMS). 主要加工方式为在微通道模板上浇注聚二甲基硅氧烷, 随后待聚二甲基硅氧烷凝固后脱模, 最后将脱模后的聚二甲基硅氧烷与基板密封 (plasma-treat), 加工粗糙度 $\leq 0.2\mu\text{m}$. 连续相、分散相微通道长均为 12 mm, 主通道长 20 mm; Y 型微通道 Y 型角度 (α) 分别为 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$; 微通道截面为 $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ 的矩形截面, 如图 1 所示.

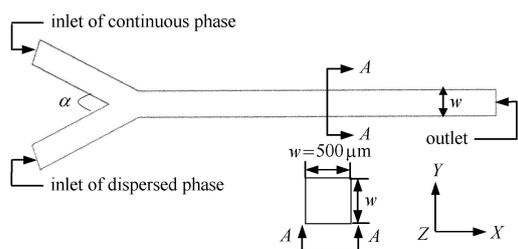


图 1 Y 型微通道示意图

Fig. 1 Sketch of Y-junctions microchannel

1.2 实验装置

显微粒子图像测速技术 (micro-PIV) 是基于图像分析的无扰动流场测量技术, 实验装置图如图 2 所示. 实验中采用直径为 $3.2\mu\text{m}$ 的示踪粒子, 为避免示踪粒子粘连在微通道壁面上, 向添加示踪粒子的液体中加入 0.2% 的吐温 20 (Tween20). 显微镜放大倍数为 5 倍, 激光强度为 770. 此外实验中还利用高速摄影技术对 Y 型微通道内两相流动现象进行了图像

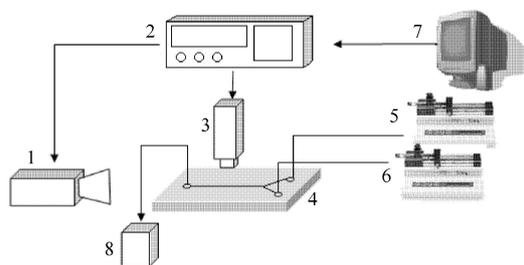


图 2 Micro-PIV 实验装置图

- 1 激光发生器; 2 激光控制及同步器; 3 CCD 和显微镜;
- 4 微芯片; 5 分散相微注射泵; 6 连续相微注射泵;
- 7 数据采集和分析系统; 8 回收系统

Fig. 2 Sketch of the Micro-PIV

- 1 laser generator; 2 laser control and synchronizer; 3 CCD and microscope; 4 microchannel chip; 5 dispersed phase microinjection pump; 6 continuous phase microinjection pump; 7 data acquisition and analysis system; 8 collector

采集, 每秒保存 250 帧. 分散相液体为液体石蜡, 连续相液体为无水乙醇, 实验测量的液体性质参数见表 1. 实验在室温 (20°C) 及常压条件下进行.

表 1 20°C 时分散相、连续相液体的黏度、密度及界面张力

Table 1 Viscosity, density and interfacial tension at a temperature of 20°C

| Sample | $\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\gamma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$ |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| dispersed phases : paraffin oil | 29.8 | 848 | 1.5 |
| continuous phases : absolute ethyl alcohol | 1.2 | 790 | |

1.3 数值计算方法

本文利用计算流体力学软件 CFD-ACE+ 进行三维数值模拟. 采用结构化六面体网格进行模拟, 选用 Y 型角度为 90° 微通道模型进行网格依赖性验证, 其中连续相入口流量 $400\mu\text{L}/\text{min}$, 分散相入口流量 $2\mu\text{L}/\text{min}$, 不同网格量下计算所得液滴直径及生成周期结果如表 2 所示. 在其他条件相同的情况下, 网格数为 209 200 与网格数为 78 000 计算所得的液滴直径及生成周期的相对误差在 0.6% 以内, 可见本模拟对网格的依赖性不大, 因而可以采用网格数为 78 000 进行数值模拟. 其余 Y 型角度的网格数集中在 7 万至 8 万之间.

表 2 网格依赖性比较

Table 2 Comparison of grid independence

| Grid number | Droplet diameter/ μm | Relative error/ % | Droplet generation cycle/s | Relative error/ % |
|-------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| 209 200 | 463.97 | 0.576 | 1.401 | 0.286 |
| 78 000 | 466.642 | | 1.397 | |

本文采用流体体积模型对微通道内两相流动进行分析. 连续方程和动量方程如下

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

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

两相界面的运动通过基于分别代表一个计算单元中连续相和分散相体积分数 α_c 和 α_d 的分布来表示, 其中 $\alpha_c = 1$ ($\alpha_d = 0$) 代表连续相, $\alpha_d = 1$ ($\alpha_c = 0$) 代表分散相. 因此, 在一个计算单元中两相交界面依

赖于 α_d 和 α_c 在 0 至 1 中的取值大小. 在两相发生混合的单元中, 式 (1) 和式 (2) 中两相混合的密度和黏度可由下式来计算

$$\rho = \alpha_d \rho_d + (1 - \alpha_d) \rho_c \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_d \mu_d + (1 - \alpha_d) \mu_c \quad (4)$$

体积分数 α_d 可通过解体积分数的连续方程来得到

$$\frac{\partial \alpha_d}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_d = 0 \quad (5)$$

边界条件为壁面无滑移, 且微通道内部液体可视为不可压缩非定常流动, 采用速度入口并控制出口为自由出口. 分散相不浸润通道壁, 接触角为 150° .

2 结果与讨论

2.1 Y 型微通道内液液两相流流型特征

在正交 T 型微通道中随连续相毛细数 ($Ca_c = \eta v / \gamma$, η 和 v 分别是连续相的黏度和速度, γ 为二相介质间的界面张力) 的变化, 微液滴的形成过程表现出挤压、滴流和喷射这 3 种不同的机制 [6-8,24-25]. 当连续相毛细数值较小时, 液滴是在分散相对连续相的流动阻力和其内部表面张力相互作用的情况下形成的. 此时, 液滴的形成成为挤压机制 [25]. 当连续相毛细数不断增大超过某一临界值后, 液滴的形成进入滴流机制 [6], 此机制下, 液滴的形成是液滴内部的表面张力和其所受的剪切力相互作用的结果 [26]. 而最新的研究表明在挤压和滴流机制之间, 存在着一个明显的过渡机制 [6,8,27].

本文验证了在 Y 型微通道下, 随连续相毛细数的增长液滴先后经历了挤压、过渡和滴流这 3 种不同的形成机制. 对应不同的机制, 可得到不同的流型, 而分散相毛细数 (Ca_d) 的变化对液滴的形成机制没有直接的影响. 在挤压机制下, 分散相形成段塞流 (图 3(c)), 其液滴长度 $L > 2w$ (w 为主通道的宽度). 在过渡机制下, 形成的弹状流液滴呈卵石型 (图 3(b)), 而滴流机制下的液滴流液滴近似圆球 (图 3(a)). 此外通过实验还观察到柱状流 (图 3(d)) 及并行流 (图 3(e)). 柱状流为不稳定流型, 随着稳定时间延长, 此流型会逐渐向稳定流型并行流转变. Y 型微通道内典型流型如图 3 所示, 以 Y 型角度为 90° 为例.

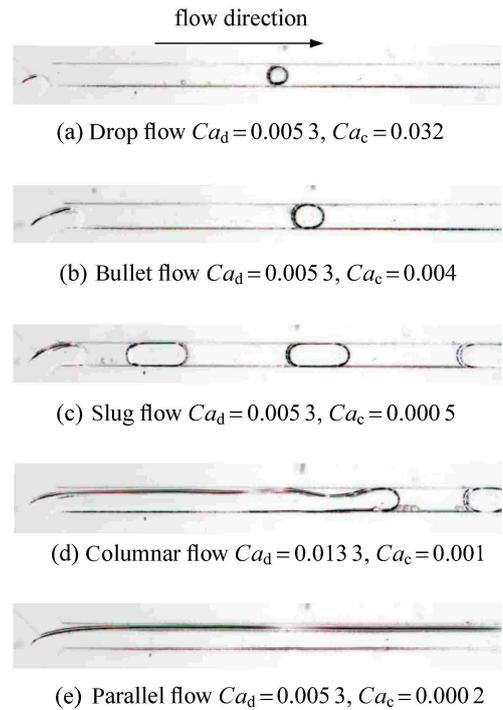


图 3 高速摄影技术拍摄的 Y 型微通道内液液两相典型流型图 ($\alpha = 90^\circ$)

Fig. 3 Flow patterns in Y-junctions microchannel taken by high speed digital microscopic system ($\alpha = 90^\circ$)

2.2 液滴破裂过程中两相液体的速度及压力分布

图 4 为分别利用高速摄影、显微粒子图像测速技术及数值模拟得到的 Y 型微通道内液滴在挤压机制下的破裂过程及对应的连续相速度矢量图, 以 Y 型角度为 45° 为例. 由于两相液体以一定角度相向交汇, 导致连续相液体速度在交汇处大部分发生偏转, 剩下一部分液体还保持原来的速度方向. 进入主通道后, 连续相速度方向相切于两相界面, 随着分散相逐渐进入主通道, 连续相速度矢量保持与两相界面相切, 直至分散相破裂. 说明 Y 型微通道内分散相液滴的破裂除受到其内部的表面张力外主要受到来自连续相的剪切作用. 由图 4 可知, 数值模拟结果与实验结果能够较好吻合, 验证了利用数值模拟方法进行微尺度下两相流研究的可靠性. Y 型角度不同, 两相液体在交汇处所成角度也存在差异, 如图 5 所示. 随着 Y 型角度的减小, 在交汇处连续相速度方向发生偏转的比例逐渐减小, 来自连续相流量的速度矢量在两相交汇处与两相界面所成角度逐渐减小, 即来自连续相流量的剪切作用更显著.

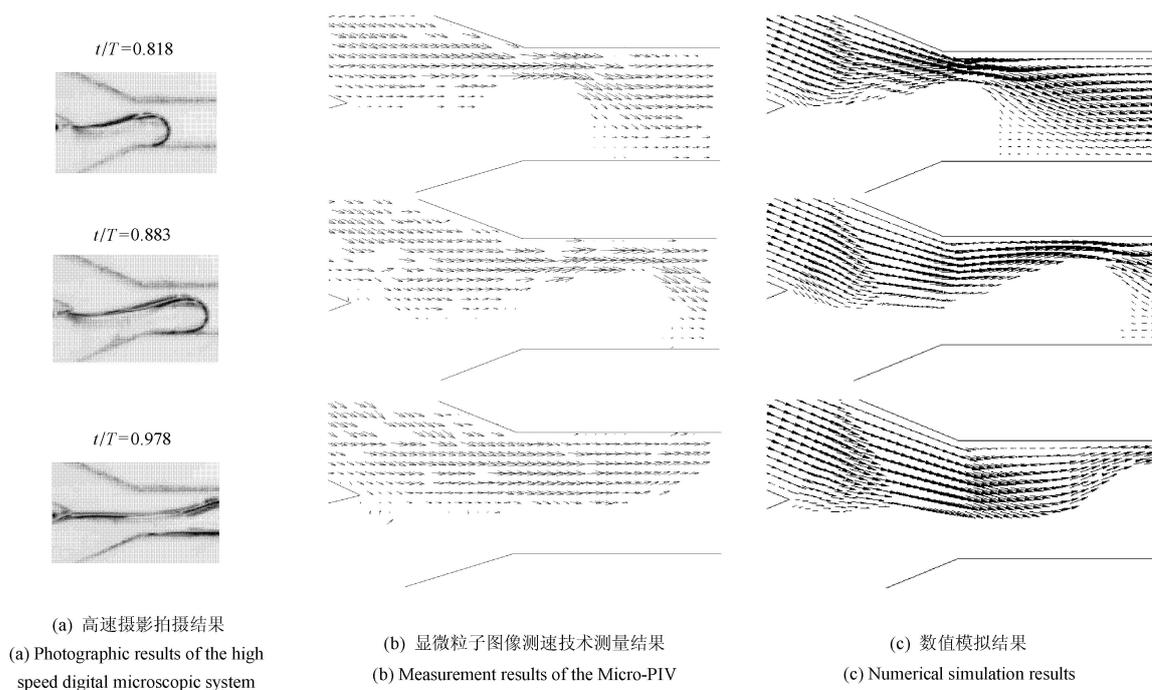


图 4 Y 型微通道内液滴破裂过程及对应的连续相速度矢量图 ($\alpha = 45^\circ$, $Ca_d = 0.0027$, $Ca_c = 0.016$)

Fig.4 The in-plane velocities in the continuous phase of droplets formation in Y-junctions microchannel ($\alpha = 45^\circ$, $Ca_d = 0.0027$, $Ca_c = 0.016$)

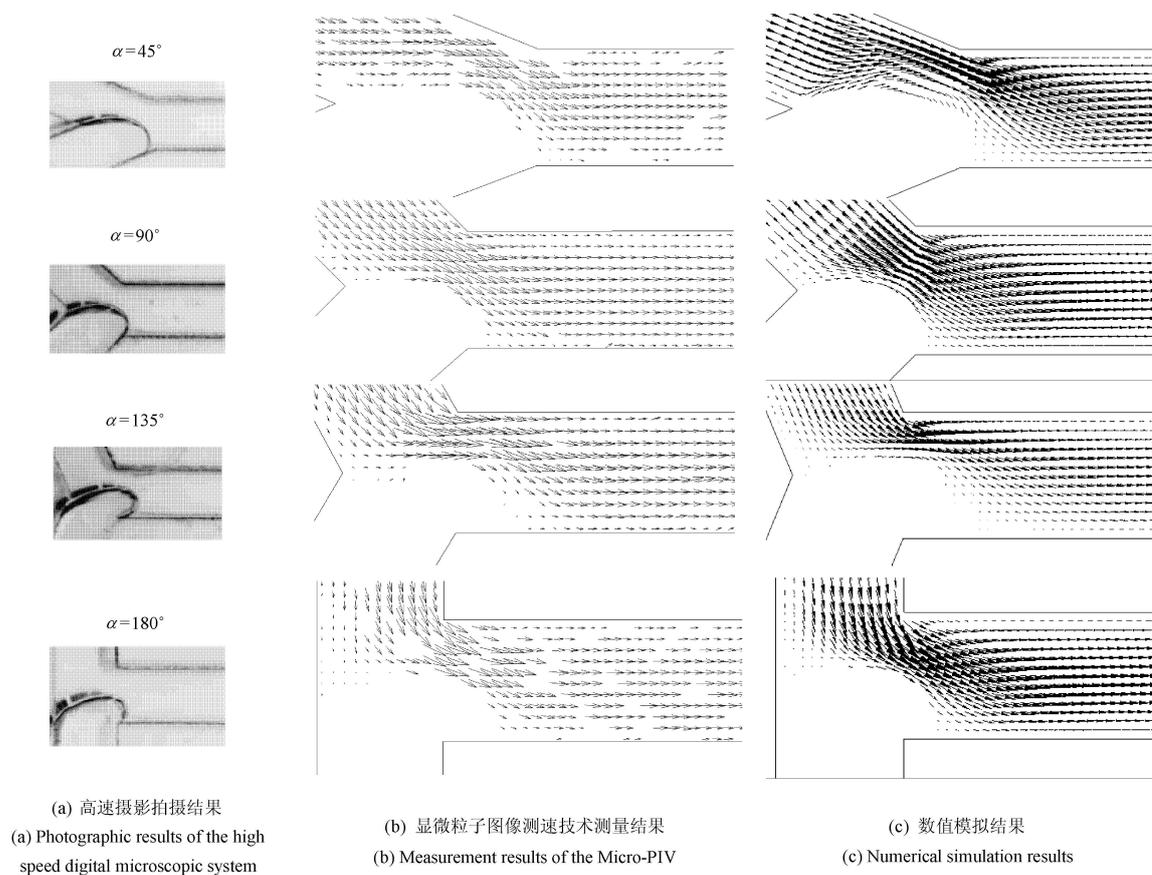


图 5 不同角度 Y 型微通道内两相液体交汇处连续相速度矢量图 ($Ca_d = 0.0027$, $Ca_c = 0.016$)

Fig.5 The in-plane velocities in the continuous phase of the junction of two phase liquid in various Y-angles of Y-junctions microchannel

($Ca_d = 0.0027$, $Ca_c = 0.016$)

图 6 为 Y 型微通道主通道横截面内, 由显微粒子图像测速技术测量的连续相液体随分散相液滴逐渐形成过程中的速度曲线. 图 7 为对照显微粒子图像测速技术实验, 通过数值模拟方法得到的在液滴破裂过程中, 微通道内两相液体的压力云图, 用以解释连续相速度剖面发生变化的原因, 以 Y 型角度为 45° 为例. 首先由图 6 观察到当分散相开始进入主通道时, 连续相速度剖面同微通道内液体单向流动时的泊肃叶 (Poiseuille) 分布一致, 速度大小保持抛物线型, 即通道中间速度最大, 其大小达到连续相液体入口速度 (0.02 m/s), 靠近通道壁面的速度最小 (接近 0 m/s). 而随着时间的增加, 分散相逐渐进入主通道中, 连续相速度剖面虽然还保持为抛物线型, 但是抛物线的顶点速度变大, 增大的幅度达到连续相入口速度的 10% (约为 0.022 m/s), 曲线更陡峭. 结合图 7 观察到在液滴生成过程中, 液滴头部的压力

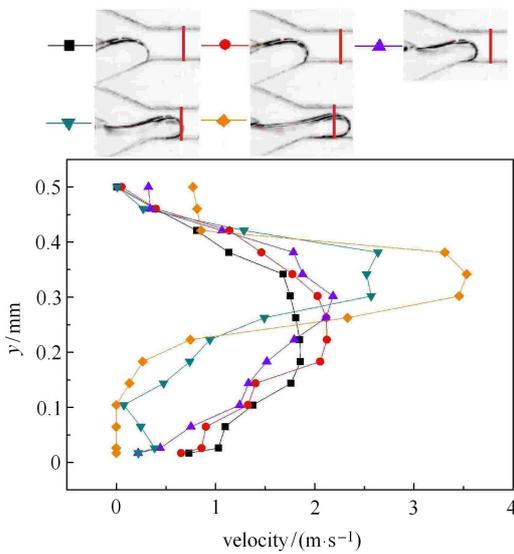


图 6 显微粒子图像测速技术测量的 Y 型微通道主通道距离两相交汇 $600 \mu\text{m}$ 处横截面上的连续相速度剖面 ($\alpha = 45^\circ, Ca_d = 0.0027, Ca_c = 0.016$)

- 分散相完成上一液滴破裂后; ● 分散相液滴开始进入主通道中;
- ▲ 分散相开始填充主通道; ▼ 分散相发生颈缩, 且其头部距离两相交汇处 $600 \mu\text{m}$;
- ◆ 分散相继续发生颈缩, 且分散相液滴头部达到最大直径

Fig. 6 Micro-PIV measurements of velocities profiles for continuous phase in main channel ($\alpha = 45^\circ, Ca_d = 0.0027, Ca_c = 0.016$)

- after the dispersed phase droplets breakup; ● dispersed droplets begin to enter the main channel;
- ▲ dispersed phase starts to fill the main channel; ▼ dispersed phase begins to necking and the distance between its head and two-phase intersection is $600 \mu\text{m}$;
- ◆ dispersed phase continues necking and the diameter of the droplets head reaches its maximum

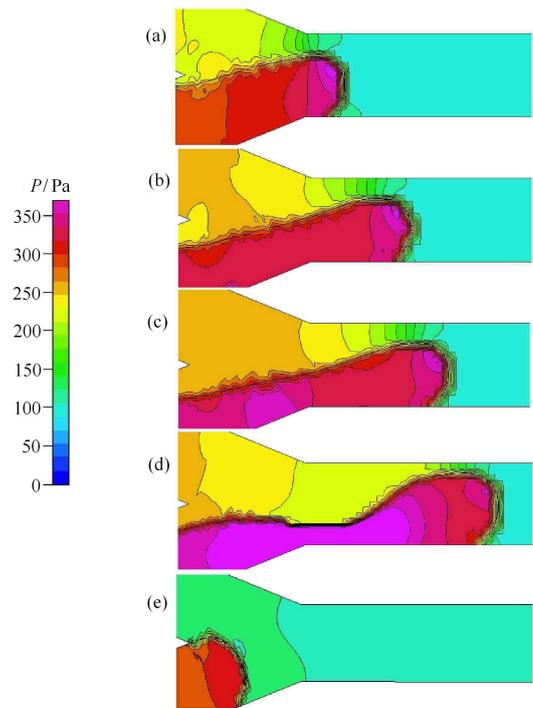


图 7 数值模拟液滴生长过程中, Y 型微通道内两相流压力云图 ($\alpha = 45^\circ, Ca_d = 0.0027, Ca_c = 0.016$)

Fig. 7 The pressure cloud picture of two-phase flow in Y-junctions microchannel during the droplet generated by using numerical simulation ($\alpha = 45^\circ, Ca_d = 0.0027, Ca_c = 0.016$)

最大, 同时与之相对应的主通道内连续相压力也有所增大, 说明分散相向主通道运动的同时挤压着靠近其头部的连续相液体, 因此使得受到挤压的连续相液体中间速度变大, 解释了连续相速度抛物线顶点速度变大的原因. 而对于与分散相头部相切的连续相液体, 速度剖面中的速度抛物线顶点向上壁面移动, 且峰值变大; 当主通道的某一横截面内同时被连续相和分散相占据时, 连续相的最大速度达到最大值, 增大幅度约为连续相入口速度大小的 2 倍左右 (约为 0.035 m/s), 且速度抛物线顶点继续向上壁面移动 (图 6). 这说明连续相受到来自分散相的挤压作用更大, 才导致其速度变大. 此外由图 7(a)~7(c) 可知, 随着连续相在两相交汇处压力的增大, 液滴开始发生颈缩, 且在分散相通道与主通道交点处液滴内部的压力逐渐由 310 Pa 增大至 370 Pa , 且交点处的最大压力面积发生扩散, 最后在压力最大位置的中心处发生破裂. 而在两相交汇位置处, 连续相液体的内部压力随着分散相开始进入主通道而变大, 变化幅度约为 100 Pa ; 当液滴开始颈缩后, 连续相内部压力继续增大至 250 Pa ; 当液滴即将发生破裂时, 连续相内部压力不再继续增大, 而是发生小幅度减小, 压力

降至 225 Pa (图 7(d)); 随着分散相液滴完成破裂后, 连续相在分散相颈缩附近的压力继续下降至 100 Pa (图 7(e)), 此后进入液滴生成的下一周期, 说明液滴的生成伴随着两相流压力的周期性变化。

2.3 液滴直径及生成时间的影响因素分析

图 8 为经过高速摄影拍摄后, 利用 ImageJ 软件对图形进行测量, 得到的不同 Y 型角度微通道在不同两相毛细数下生成的液滴直径。当 Y 型角度小于 135° 时, 液滴大小不受 Y 型微通道角度的影响而变化。但是当 Y 型角度增大到 180° 时即为对流 T 型微通道, 液滴直径较 Y 型微通道大, 增大的幅度在 2% 以内。说明在乳化、混合过程中利用 Y 型微通道可得到体积更小的液滴, 以使其乳化、混合效果最好。此结论与 Steegmans 等^[28]利用微通道深度较其宽度小很多的 Y 型微通道得到的结论一致。两相流毛细数的变化同样对液滴直径有着重要影响, 当分散相毛细数不变, 连续相毛细数增大 25% 左右时, 液滴直径减小幅度约为 3.4%~3.7%; 当连续相毛细数不变, 分散相毛细数增大 25% 时, 液滴直径相应增大 1.7%~2%。两相毛细数对液滴大小的影响主要在于: 当两相液体相遇后, 在两相交汇处形成分散相/连续相界面, 分散相在压力推动和连续相剪切力作用下与连续相同步向前运动, 当界面张力不足以维持连续相施加的剪切力时, 分散相断裂生成独立的液滴。而当连续相毛细数增大时, 其自身的黏性力作用增强, 分散相受到来自连续相的剪切作用相对增大, 因此分散相更容易破裂, 形成的液滴更小, 且连续相比分散相对液滴直径的影响作用更大。

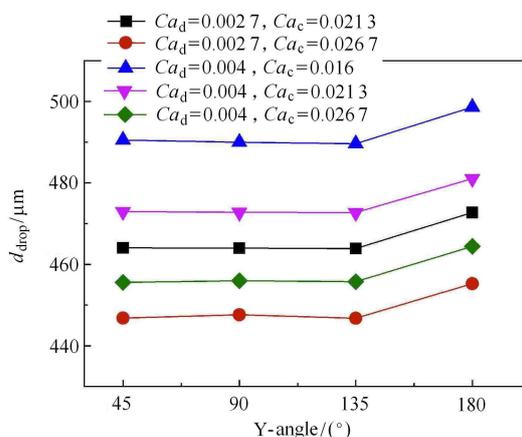


图 8 微通道不同 Y 型角度下生成液滴的直径 (高速摄影拍摄结果)

Fig. 8 The diameter of the droplets in different angles of Y-junctions microchannel (results by high speed digital microscopic system)

图 9 为经过高速摄影拍摄后, 所得的不同 Y 型角度的微通道在不同两相毛细数下生成液滴的时间。虽然 Y 型角度对液滴直径的影响很小, 但其对液滴生成时间的影响作用更大。随着 Y 型角度的增大液滴生成的时间更长, 图 5 中不同角度 Y 型微通道内两相液体交汇处连续相不同的速度矢量分布可解释此原因。随着 Y 型角度的减小, 来自连续相流量的速度矢量在两相交汇处与两相界面所成角度逐渐减小, 即来自连续相流量的剪切作用更显著, 导致了两相界面的失稳, 随后液滴破裂。微液滴的主要生成过程是如何施加足够大的作用力以扰动连续相与分散相之间存在的界面张力使之达到失稳。通常分散相某处施加的力大于其界面张力时, 该处微量液体会突破界面张力进入连续相中形成液滴^[29]。图 9 中两相毛细数对液滴生成时间的影响, 可以说明液滴形成的机制。当分散相毛细数或连续相毛细数增大时, 导致两相液体黏性力增大, 使得两相界面的不稳定性增强, 因而液滴破裂生成的时间更短。

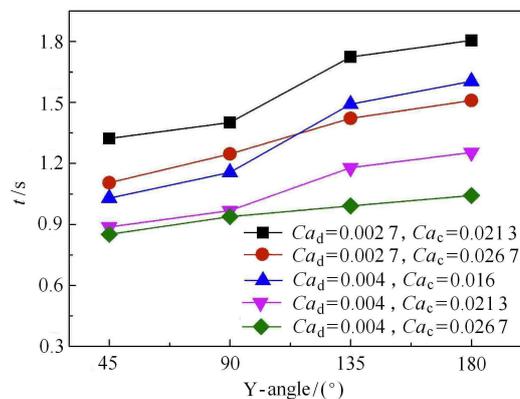


图 9 微通道不同 Y 型角度下生成液滴的时间 (高速摄影拍摄结果)

Fig. 9 The time of generate a droplets in different angles of Y-junctions microchannel (results by high speed digital microscopic system)

图 10 为不同连续相毛细数下, Y 型微通道内分散相液滴破裂前连续相速度矢量图, 以 Y 型角度为 90° 为例。从图 10(a) 中可以观察到, 当连续相毛细数较小时, 两相交汇处连续相的速度矢量除一部分指向主通道方向, 还有一小部分在两相界面上产生一个很小的涡。而随着连续相毛细数的增大, 这个涡逐渐消失, 连续相在遇到分散相时速度矢量角度逐渐变小, 直至与两相界面相切, 如图 10(b) 所示。此外, 连续相毛细数的增大使得分散相破裂的位置更靠近两相交汇位置, 颈缩长度更短。说明连续相毛细数的增大不仅增强了其内部的黏性力, 还使得连续

相在两相交汇位置处对分散相的作用力更集中, 导致分散相颈缩长度更短、更易破裂. 因此从两相流内部流动情况解释了不同连续相毛细数下, 分散相形成液滴的大小以及生成周期的不同.

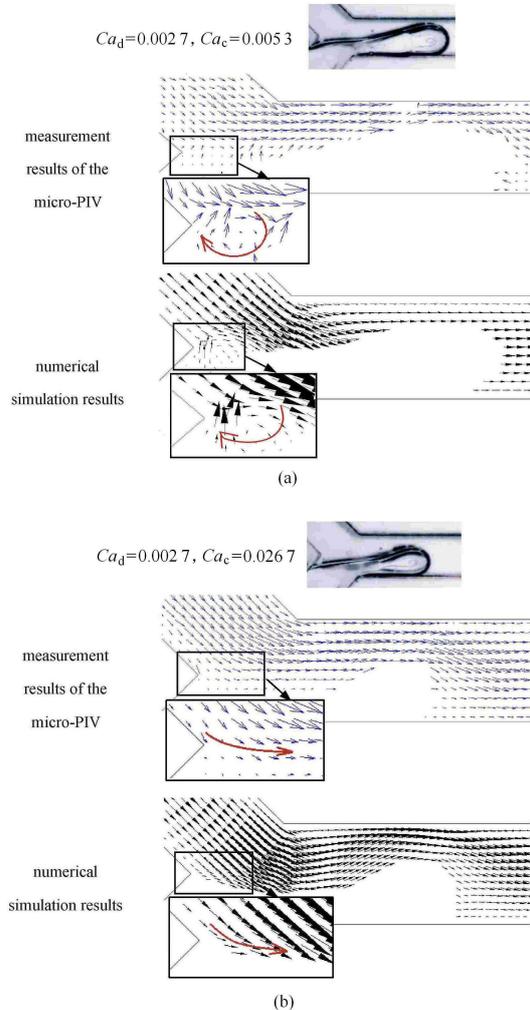


图 10 液滴破裂前连续相速度矢量图 ($\alpha = 90^\circ$)

Fig. 10 The in-plane velocities in the continuous phase before the droplet break-up ($\alpha = 90^\circ$)

3 结论

(1) Y 型微通道中, 随连续相毛细数的增大, 液滴先后经历了挤压、过渡和滴流这 3 种不同的形成机制. 在挤压机制中, 分散相液滴的破裂除受到自身的表面张力外, 来自连续相的剪切作用效果明显, Y 型角度越小, 分散相所受到的剪切作用越大.

(2) 液滴生成过程中, 当主通道中同时填充两相液体时, 连续相速度剖面呈非对称抛物线型分布且最大速度达到最大. 而液滴的破裂过程伴随着两相液体内部压力的周期性变化, 在液滴破裂瞬间, 其分散

相颈缩部分的压力值达到最大.

(3) 当 Y 型角度小于 180° 时, 角度的变化对液滴直径大小影响较小, 但角度的减小加快了液滴的生成时间. 当 Y 型角度为 180° 时, 生成的液滴体积最大且生成时间最长.

(4) 毛细数同时影响着液滴直径大小和生成时间. 当连续相毛细数增大或分散相毛细数减小时, 液滴直径减小; 当分散相毛细数或连续相毛细数增大时, 液滴生成时间变短. 连续相毛细数的增大使得连续相在两相交汇位置处对分散相的作用力更集中, 导致分散相颈缩长度更短、更易破裂.

参 考 文 献

- 1 王澎, 陈斌. T 型微流控芯片中微液滴破裂的数值模拟. 化工学报, 2012, 64(4): 999-1003 (Wang Peng, Chen Bin. Numerical simulation of micro-droplet breakup in T-shaped micro-fluidic chip. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2012, 64(4): 999-1003 (in Chinese))
- 2 Li SB, Ma YG, Zhu CY, et al. Turbulent characteristic of liquid around a chain of bubbles in non-newtonian fluid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(5): 883-888
- 3 Shao HW, Lü YC, Wang K, et al. An experimental study of liquid-liquid microflow pattern maps accompanied with mass transfer. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(1): 18-26
- 4 魏丽娟, 朱春英, 付涛涛, 等. T 型微通道内液滴尺寸的实验测定与关联. 化工学报, 2013, 64(2): 517-523 (Wei Lijuan, Zhu Chunying, Fu Taotao, et al. Experimental measurement and correlation of droplet size in T-junction microchannels. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2013, 64 (2): 517-523 (in Chinese))
- 5 Garstecki P, Fuerstman, MJ, Stone, HA, et al. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-Scaling and mechanism of break-up. *Lab on a Chip*, 2006, 6: 437-446
- 6 Menech MD, Garstecki P, Jousse F, et al. Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 595: 141-161
- 7 Xu JH, Li SW, Tan J, et al. Correlation of droplet formation in T-junction microfluidic devices: From squeezing to dripping. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, 5: 711-717
- 8 Christopher GF, Noharuddin NN, Taylor JA, et al. Experimental observations of the squeezing-to-dripping transition in T-shaped microfluidic junctions. *Physical Review E*, 2008, 78: 036317
- 9 Graaf SVD, Nisisako T, Schroën CGPH, et al. Lattice boltzmann simulations of droplet formation in a T-shaped microchannel. *Langmuir*, 2006, 22: 4144-4152
- 10 Steegmans MLJ, Schroën CGPH, Boom RM. Generalised insights in droplet formation at T-junctions through statistical analysis. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64: 3042-3050
- 11 Steegmans MLJ, Schroën KGPH, Boom RM. Characterization of emulsification at flat microchannel Y junctions. *Langmuir*, 2009, 25: 3396-3401
- 12 Qian D, Lawal A. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel. *Chemical Engineering Science*,

- 2006, 61: 7609-7625
- 13 Adzima BJ, Velankar SS. Pressure drops for droplet flows in microfluidic channels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(8): 1504-1510
 - 14 Zhao YC, Chen GW, Yuan Q. Liquid-liquid two-phase flow patterns in a rectangular microchannel. *AIChE Journal*, 2006, 52(12): 4052-4046
 - 15 Nie ZH, Seo MS, Xu SQ, et al. Emulsification in a microfluidic flow-focusing device: Effect of the viscosities of the liquids. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, 5: 585-594
 - 16 He PY, Barthes-Bièsel D, Leclerc E. Flow of two immiscible liquids with low viscosity in Y shaped microfluidic systems: effect of geometry. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9: 293-301
 - 17 Tarchichi N, Chollet F, Manceau JF. New regime of droplet generation in a T-shape microfluidic junction. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2013, 14: 45-51
 - 18 Murshed SMS, Tan SH, Nguyen NT, et al. Microdroplet formation of water and nanofluids in heat-induced microfluidic T-junction. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6: 253-259
 - 19 Cubaud T, Mason TG. Capillary thread and viscous droplets in square microchannels. *Physics of Fluids*, 2008, 20(5): 053302
 - 20 Dessimoz AL, Cavin L, Renken A, et al. Liquid liquid two phase flow patterns and mass transfer characteristics in rectangular glass microreactors. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(16): 4035-4044
 - 21 骆广生, 徐建鸿, 李少伟等. 微结构设备内液-液两相流行为研究及其进展. *现代化工*, 2006, 26(3): 19-23 (Luo Guangsheng, Xu Jianhong, Li Shaowei, et al. Research and development of two-liquid phase flow in micro-structured devices. *Modern Chemical Industry*, 2006, 26(3): 19-23 (in Chinese))
 - 22 Steijn V, Kreutzer MT, Kleijn CR, et al. μ -PIV study of the formation of segmented flow in microfluidic T-junctions. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 7505-7514
 - 23 King C, Walsh E, Grimes R. PIV measurements of flow within plugs in a microchannel. *Microfluid Nanofluid*, 2007, 3: 463-472
 - 24 Xu JH, Luo GS, Li SW, et al. Shear force induced monodisperse droplet formation in a microfluidic device by controlling wetting properties. *Lab on a Chip*, 2006, 6(1): 131-136
 - 25 Cristini V, Tan YC. Theory and numerical simulation of droplet dynamics in complex flows-a review. *Lab on a Chip*, 2004, 4(4): 257-264
 - 26 Thorsen T, Roberts RW, Arnold FH, et al. Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device. *Physical Review Letters*, 2001, 86(18): 4163-4166
 - 27 Glawdel T, Elbuken C, Ren CL. Droplet formation in microfluidic T-junction generators operating in the transitional regime: I. Experimental Observations. *Physical Review E*, 2012, 85 (1): 016322
 - 28 Steegmans MLJ, Schroën KGP, Boom RM. Microfluidic Y-junctions: a robust emulsification system with regard to junction design. *American Institute of Chemical Engineers*, 2010, 56(7): 1946-1949
 - 29 陈九生, 蒋稼欢. 微流控液滴技术: 微液滴生成与操控. *分析化学*, 2012, 40(8): 1293-1300 (Chen Jiusheng, Jiang Jiahuan. Droplet microfluidic technique: Mirodroplets formation and manipulation. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2012, 40(8):1293-1300 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN Y-JUNCTION MICROCHANNEL¹⁾

Liu Zhaomiao²⁾ Liu Likun Shen Feng

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Droplets formed in different Y-angles (45°, 90°, 135°, 180°) and flow flux of two-phase in Y-junction microchannels are studied by making use of micro-PIV, high speed digital microscopic system and numerical simulation in this paper. It is found that the shearing action impels the formation of dispersed phase droplet in the squeezing mechanism, and the smaller Y-angle results in the bigger shearing action suffered by dispersed phase. The continuous phase velocity profile is asymmetric parabolic distribution in droplet generation process. When Y-angle is less than 180°, it does not affect the droplet diameter size but will speed up the droplet generation as it decreases. The droplet size and generated cycle will be the largest in the case of Y-angle being 180°. It is indicated that Capillary number affects droplet size and generation time simultaneously. The increasing capillary number of continuous phase will make the acting force from continuous phase to dispersed phase more intensive in the junction of the two phases in the in-plane velocities in the continuous phase and lead to dispersed droplet rupture more easily.

Key words microfluidics, Y-junction microchannels, Y-angle, high-speed digital microscope system, numerical simulation

Received 11 July 2013, revised 1 August 2013.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11072001, 11002007) and PHR (IHLB).

2) Liu Zhaomiao, professor, research interests: microfluid mechanics, computational fluid dynamics, and fluid-structure interaction analysis.

E-mail: lzm@bjut.edu.cn