



微尺度气液液三相流研究进展

骆广生*, 王凯, 徐建鸿, 吕阳成, 王玉军, 张吉松

化学工程联合国家重点实验室; 清华大学化学工程系, 北京 100084

*通讯作者, E-mail: gsluo@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-09-25; 接受日期: 2014-10-24; 网络版发表日期: 2014-12-22

doi: 10.1360/N032014-00260

摘要 微尺度下的气液液三相流动是近年来微流控、微化工、微分析等领域的重要内容. 关于微尺度下的气液液三相流研究主要集中在新型微分散设备和技术, 分散尺寸调控规律, 微通道内流动与传递特性, 以及气液液三相微流体在反应、分离、材料制备中的应用等方面. 已有的研究表明, 微尺度气液液三相流相对于液液、气液两相流过程表现出了更复杂的分散规律和独特的流动、传递、反应特性. 本文主要针对以上几个方面的研究进展进行综述, 并对其未来的发展方向进行了展望.

关键词
气液液
微流体
传递强化
多相反应
核壳材料

1 引言

气液液三相体系普遍存在于化学、化工、材料等众多反应和分离领域中, 是复杂多相过程研究的重要对象. 近年来, 随着微流体^[1]、微化工^[2]、流动化学^[3]和微分析^[4]等相关领域的发展, 针对气液液三相体系的研究也扩展到了微米尺度^[5,6]. 微尺度气液液三相流一般是指流道或分散尺度为 1 μm ~1 mm 之间的流动体系, 但这一尺度范围也并非绝对. 相对于研究工作较为充分的气液、液液等两相体系^[7-9], 虽然针对微尺度气液液三相流动基本规律和三相微流体应用的研究工作还处于起步阶段^[2,10], 但是初步的结果也表明微尺度下三相流体在传质强化、停留时间控制、流体混合控制以及材料结构调控等方面体现出了独特的优势, 这些新特点吸引了研究者的广泛关注, 也使得针对微尺度气液液三相流的研究成为相关领域的重要内容.

本文主要综述了微尺度气液液三相流的形成与调控规律、气液液三相微流体的流动与传递特性和微尺度三相流在化学合成与材料制备中的应用等方面的研究进展, 分析总结了微尺度气液液三相流的优

势和特点, 并对其未来的发展方向进行了展望.

2 气液液三相流在微通道内的形成与调控

2.1 气液液三相微流体形成方式

在微通道中通过机械破碎的方法获得气液液三相流体系主要有两种方式: (1) 通过单一微结构元件经一次分散在下游通道内形成气液液三相流; (2) 利用多个串联或并联的微分散结构分步形成气液液三相流. 采用单一微结构元件的优势在于设备结构简单, 一个典型的三相流体分散结构是十字型交叉微通道^[11]及其衍生结构^[12]. 如图 1(a)所示, 在十字型微通道中气、水、油三相流体经过 3 个加料通道在同一位点汇合, 三相之间在各自黏性力和惯性力的作用下克服界面张力的束缚发生破碎, 由浸润通道壁面的一相作为连续相, 其余两相以液滴或者气泡的形式分散在连续相之中. 十字型微通道一般主要用于形成液滴和气泡独立存在的气液液三相流动体系^[12], 而 Yue 等发现在体系界面张力满足多重乳液的形成条件时^[13]十字型微通道内也可以形成液滴包覆气泡的气液液双重乳液体系^[14]. 一种专门用于形成气液液

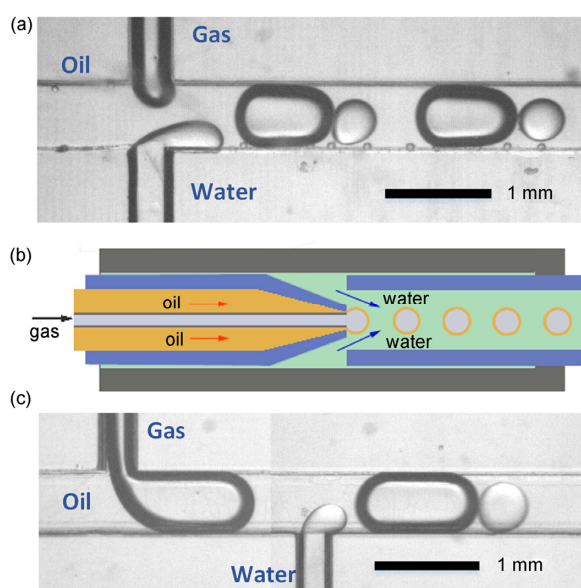


图 1 几种典型的气液液三相微分散结构. (a) 十字型微通道; (b) 双重同轴微通道; (c) 双 T 型微通道

双重乳液体系的微通道结构是双重同轴型微分散结构, 如图 1(b)所示, 这种微分散结构既包括 3 层嵌套的毛细管通道^[15], 也包括毛细管尖端对置的同轴水力学聚焦结构^[16]. 在双重同轴型微分散结构中气相作为内相, 不浸润下毛细管的流体作为中间相一同在连续相内破碎形成液滴包覆气泡的多重分散体系.

采用组合微结构元件的优势在于过程的调控更便利, 同时可以实现物料的分批加入. 目前文献报道的组合微分散结构主要有并联水力学聚焦微通道^[17]、串联双 T 型微通道^[18]、水力学聚焦 T 型串联微通道^[19]和串联同轴微通道^[20]等. Hashimoto 等^[17]在并联水力学聚焦微通道结构中使液滴和气泡在平行的微结构中分别形成, 再将两股两相流体汇合就在微通道内获得了气液液三相体系, 其中液滴和气泡的直径及其数量比可以独立调节. 与并联的微分散机理不同, 串联的双 T 型微通道中先进行形成两相流再在其基础上形成三相流, 如图 1(c)所示. Wang 等^[18]发现, 利用气液体系的高表面张力可以借助第一级 T 型微通道形成的微气柱强化第二级液滴的分散. 而当第一级获得分散尺度较小的微气泡时, 还可以在第二级通道内将含有气泡的液体进行剪切分散, 从而形成内核含有多个气泡的多重液滴. Wan 等^[19]通过水力学聚焦通道与 T 型微通道相结合实现了这一过程, 这种

具有多个内核的双重乳液结构在仅具有单分散单元的双重同轴微通道内不容易获得. 与之类似, Xu 等^[20]通过串联同轴微通道也制备了多内核气液液双重乳液, 实现了对气液液双乳液结构更精确的调控. 然而, 两级的分散之间会互相干扰, 而且难以制备出气泡的薄液层包覆结构, 气液液双乳液的结构调控范围还有待进一步拓宽.

除了基于机械破碎的方法, 基于流体的相变行为也是一种有效的获得气液液三相流体尤其是气液液双重乳液的有效方式, 而且借助气液相变过程中明显的体积变化进一步增强了液滴和气泡分散尺寸的调控范围. Yang 等^[21]设计了一个由 CO_2 和烷烃气体构成分散相, NaOH 水溶液作为连续相的微分散过程, 通过 NaOH 水溶液对 CO_2 的吸收作用使气相中的烷烃达到饱和蒸汽压后以液膜形式析出, 从而制备了微分散的气液液双重乳液. 这种方法的巧妙之处在于利用简单的两相流分散结构获得了三相流动体系, 并且降低了乳液的分散尺寸. Wang 等^[22]进一步发展了这一方法, 设计一步双重并流剪切微通道实现了稳定的气液液三相流动, 且更容易进行调控.

2.2 微通道内气液液三相流型

由于三相体系具有很高的自由度, 在微通道内气液液三相体系具有复杂的流型, 而且在区分三相流型的时候已经不能采用简单的气液或液液两相体系的依靠分散相形貌(柱状流、液滴流等)划分的方法, 还要进一步考虑液滴与气泡之间的位置关系. 目前针对微通道内三相流型变化及其出现判据的报道非常少, 部分报道的流型如图 2 所示. Wang 等^[11]报道了十字型微通道下游的三相流型, 定义了“气泡-液滴分散流”、“气泡-液液平行流”、“液滴-气液平行流”等三相流型, 通过连续相和分散相 Ca 数、 We 数和相比之间的相互关系建立了流型分布图表. 除了这几种流型外, Yue 等^[14]在十字型微通道内还发现了气液液双重乳液流型, 利用微通道内流体的表观流速, 研究者也给出了流型分布图. Rajesh 等^[23]研究了双 T 型微通道内气液液三相流型并且重点针对“气泡-液滴分散流”中不同的液滴气泡形貌及其数量比定义了“气柱-液滴”、“气柱-液柱”、“气泡-液柱”等三相流型, 利用连续相和分散相 We 数给出了流型分布图. 与十字型微通道类似利用串联双 T 型微通道通过系统界面张力的选择也可以获得气液液双重乳液流型, 甚至获

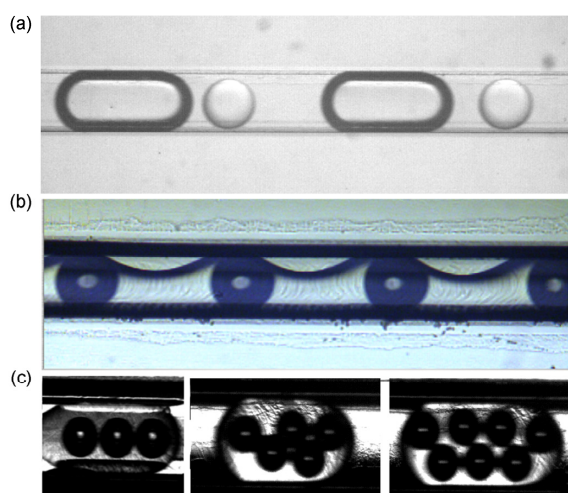


图 2 几种典型的气液液三相流型。(a) 气泡-液滴分散流; (b) 气泡-液液平行流; (c) 气液液双重乳液流

得气泡部分被液体包覆的 Janus 流体颗粒^[24]。Xu 等^[20]研究了串联同轴微通道内的气液液双重乳液气相内核数量的变化规律, 实现了不同结构双乳液的可控制备。

2.3 微尺度三相分散模型与数值模拟

为了实现气液液三相微流体在化学、化工、材料等诸多领域的可控应用, 对三相体系内液滴、气泡分散尺寸的认识尤其是定量化的调控规律十分重要。可能由于针对微尺度气液液三相流的研究刚刚起步, 目前定量化的液滴气泡分散尺寸模型报道还很不充分。Wang 等^[11,18]基于三相分散过程中气泡对液滴的剪切作用, 通过气泡和液滴分散频率之间的定量关系(式(1)), 建立了十字型微通道和串联双 T 型微通道内的液滴、气泡平均体积模型。

$$V_w = \frac{Q_w}{Q_G} \cdot \frac{V_G}{\text{Int}(f_w^* / f_G) + 1} \quad (1)$$

该模型耦合了液液、气液两相微分散模型, 对于微尺度三相流型和液滴气泡分散尺寸具有一定预测能力。Xu 等^[20]研究了串联同轴微通道内液滴、气泡直径的变化规律, 借鉴同轴微通道内液滴形成过程的机理分析, 建立了预测液滴和气泡尺寸的数学模型(式(2)和(3)), 为实现双乳液结构调控提供了指导。

$$\frac{d}{d_i} = k(Ca)^\alpha \quad (2)$$

$$\frac{d}{d_i} = k \left(\frac{Q_d}{Q_c} \right)^\alpha (Ca)^\beta \quad (3)$$

除了数学模型外, 通过计算流体力学(CFD)、格子波尔兹曼方法(LBM)等模拟手段对多相流动过程进行模拟也是微尺度相关研究工作的重点^[25]。2006 年 Zhou 等^[26]报道了第一篇水力学聚焦微通道内双重乳液形成的模拟工作, 他们使用自己开发的相场模型和 CFD 模拟预测了多重液滴的形成区域。Park 等^[27]使用类似的方法研究了同轴水力学聚焦结构中三相体系的形成过程, 通过模拟计算了不同操作条件下的分散尺寸变化规律。由于三相体系的复杂性和刚刚起步的研究, 目前针对三相流动过程的模拟报道较少。

3 微尺度气液液三相流的流动和传递特性

3.1 惰性相的流体分割作用

微通道内的气液液三相流体在流动过程中有其特殊性, 相对于两相体系, 三相体系中的一相可以作为惰性相(不参与传递和反应的组分)用于改变流体流动的流动特性, 由于氮气、空气等气体化学性质稳定且廉价易得, 使得气体在三相体系的应用中常常作为惰性组分使用。Nightingale 等^[28]发现, 在传统的液液两相微通道中, 实现精确的液滴融合进而引发化学反应的过程是难以实现的, 而增加了惰性气柱之后, 由于气柱严格限制了液滴的空间位置, 使得精确的液滴融合得以简便的实现。惰性气相的存在不仅使液滴的运动更规律, 而且在流动过程中也能起到防止聚并的作用, 增加了流体的稳定性。Ismagilov 等^[29]在蛋白质的结晶研究中使用了惰性气柱分隔毛细管中的液滴, 这种分隔作用使得液滴在漫长的结晶过程中能够始终保持稳定。

3.2 惰性相对于传质的强化作用

从宏观现象来看惰性相的加入改变了微通道内的流型, 而 Assmann 等^[30]发现, 惰性气柱的加入进一步改变了液相内部的微观流场, 他们使用 μ -PIV 测量并对比了微通道内液液两相流和气液液三相流中液滴内部的环流情况, 结果发现, 三相流中液滴内部的环流并不规则, 这种不规则的流动可以强化物质传质过程。Su 等^[31]使用煤油 TBP-醋酸-水体系系统研究了不同气液液三相流型下液液两相之间的传质系数

变化规律, 实验结果表明, 气液液三相体系的体积传质系数可以达到 $3.8\sim30.6\text{ s}^{-1}$, 相对于液液两相流的传质系数提高 2 个数量级. Tan 等^[32]在针对 H_2O_2 的萃取研究中采用惰性气相强化了传质过程, 考察了液滴气泡独立存在的三相体系和气液液双重乳液体系的传质性能, 结果表明, 气液液双重乳液体系也具有显著的传质强化效果, 体积传质系数可以达到 $0.2\sim21.9\text{ s}^{-1}$, 较液液两相体系传质系数提高 10~30 倍.

4 气液液三相微流动过程的应用

4.1 结晶控制

微通道内气液液三相体系的研究始于 2005 年 Ismagilov 等^[33]对于毛细管内蛋白质结晶过程的研究, 研究者从微分析的角度设计了一根毛细管内多个液滴同时实现不同结晶过程的方案. 值得注意的是, 结晶过程并非在流动条件下进行, 研究者仅通过流动过程实现了惰性气泡对于结晶液滴的分割, 防止长时间结晶过程中不同组成的液滴相互接触产生聚并^[29]. 他们通过这种方法不仅在单一毛细管内实现了多个液滴的同时结晶过程, 还通过平行放大策略发展了并联结晶毛细管设备^[34], 大大提高了分析效率.

4.2 气液液三相化学合成

在化学、化工领域气液液三相微流体主要用于强化化学合成过程, 2005 年 Onal 等^[35]报道了第一篇毛细管反应器内三相反应的文章, 使用氢气泡作为气相, 催化剂水溶液作为液体分散相, 针对连续相内不饱和醛类的选择性加氢过程进行了研究. 他们在毛细管内获得了规则的“气泡-液滴分散流”, 基于这种规则流动准确获得了停留时间和传质速率参数, 建立了反应动力学模型. Zhang 等^[36]利用惰性的氮气气泡能够强化液液传质过程的特点, 强化了环己酮肟正辛烷溶液与发烟硫酸之间的贝克曼重排反应, 在惰性气泡的作用下, 反应的表现速率和反应产物的选择性明显得到提高. Tan 等^[37]利用气液液三相微反应器实现了 H_2O_2 合成过程中的氧化和萃取两个过程的耦合, 这一耦合过程不仅提高了氧化和萃取过程的速率还简化了反应和萃取装备.

4.3 核壳和多孔微球材料

在可控制备多气泡包覆双乳液的基础上, 研究者在中间相中加入可以固化的体系, 实现了核壳和多孔材料的制备. Stone 等^[38]在下游通道中引入了反应性的无机前驱体(硅烷和钛醚), 通过溶胶凝胶反应制备出无机硅和无机钛中空微球. Wan 等^[39]在水相中加入了经紫外光照射引发聚合反应的丙烯酸胺单体, 通过离线固化初步制备得到了多孔水凝胶微球, 并在原子力显微镜下对多孔微球的弹性力进行了表征. 结果显示, 这些水凝胶微球相较于实心的固体聚丙烯酰胺颗粒有较低的相对弹性模量. Lee 等^[40]采用分散有硅纳米颗粒的甲苯作为中间相, 随着制备出来的双乳液油膜中甲苯的挥发, 包裹在气泡周围的分散有纳米颗粒的油相经历一个从液相到固相的转换, 形成具有纳米颗粒堆积壳层的中空微球. Chen 等^[15]通过使用可由紫外光引发聚合反应的单体 HDDA 作为油相, 成功制备出了具有薄壳层的中空聚合物微球.

5 结论和展望

微尺度气液液三相流基本规律是微化工、微分析等众多领域的研究基础, 同时也是近年来的微流控领域的重要内容之一, 目前针对微尺度气液液三相流的研究工作还处于起步阶段, 一些初步的研究结果表明, 气液液三相体系在流动控制、传质与反应强化、新型材料制备等方面表现出了优势. 我们认为, 未来针对微尺度气液液三相流的研究内容还将主要包括如下几个方面: (1) 微通道内气液液三相流动体系中中介尺度结构的解析. 目前虽然已经有报道表明三相体系的局部流场、浓度场特征相对于两相体系发生了明显的变化, 但这一领域仍然缺少系统的研究工作, 微通道内流体界面附近流场、浓度场的解析能够进一步从微观机理的角度阐释三相体系的流动和传递特性的本质原因; (2) 新型微分散技术和微分散设备. 基于微通道内气液液三相体系流动过程微观机理的探讨, 可以进一步发展新型高效的微分散技术和微分散设备, 如设计高效的微分散结构, 发展电场、超声场强化的微分散设备等; (3) 微尺度气液液三相流的流动和传递模型建立. 当前针对微尺度气液液三相流的研究大多针对微通道内的新现象, 针

对气液液三相流的量化、模型化方面的研究还很欠缺, 基于 CFD、LBM 等计算机模拟技术的发展, 构建三相的流动和传递模型能够进一步提高三相流动过程的可设计性和可控性; (4) 气液液三相微流体的深化

应用. 气液液三相微流动体系在反应停留时间控制、强化混合传递等方面具有优势, 未来针对气液液三相体系的反应和材料制备等方面的研究仍可加强, 气液液三相微反应系统的开发十分关键.

致谢 本工作得到国家自然科学基金(U1463208, 91334201, 21322604, 21106076)资助, 特此致谢.

参考文献

- 1 Koster S. Microfluidics: from fundamental research to industrial applications. *J Phys D Appl Phys*, 2013, 46: 110301
- 2 骆广生, 王凯, 徐建鸿, 王玉军, 吕阳成. 微化工过程研究进展. 中国科学: 化学, 2014: 1404–1412
- 3 Illg T, Lob P, Hessel V. Flow chemistry using milli- and microstructured reactors: from conventional to novel process windows. *Bioorgan Med Chem*, 2010, 18: 3707–3719
- 4 Nguyen NT. Micro-magnetofluidics: interactions between magnetism and fluid flow on the microscale. *Microfluid Nanofluid*, 2012, 12: 1–16
- 5 Wootton R, Demello AJ. Microfluidics exploiting elephants in the room. *Nature*, 2010, 464: 839–840
- 6 陈光文, 赵玉潮, 袁权. 微尺度下液-液流动与传质特性的研究进展. 化工学报, 2010: 1627–1635
- 7 Zhao CX, Middelberg A. Two-phase microfluidic flows. *Chem Eng Sci*, 2011, 66: 1394–1411
- 8 谭璟, 徐建鸿, 吕阳成, 骆广生. T 形微通道中气泡分散流的传质性能. 中国科学: 化学, 2012: 340–346
- 9 陈光文, 赵玉潮, 乐军, 董正亚, 曹海山, 袁权. 微化工过程中的传递现象. 化工学报, 2013: 63–75
- 10 骆广生, 王凯, 徐建鸿, 吕阳成, 王玉军. 微化工系统内多相流动及其传递反应性能研究进展. 化工学报, 2010: 1621–1626
- 11 Wang K, Lu YC, Qin K, Luo GS, Wang T. Generating gas-liquid-liquid three-phase microflows in a cross-junction microchannel device. *Chem Eng Technol*, 2013, 36: 1047–1060
- 12 Khan SA, Duraiswamy S. Microfluidic emulsions with dynamic compound drops. *Lab Chip*, 2009, 9: 1840–1842
- 13 Shah RK, Shum HC, Rowat AC, Lee D, Agresti JJ, Utada AS, Chu LY, Kim JW, Fernandez-Nieves A, Martinez CJ, Weitz DA. Designer emulsions using microfluidics. *Mater Today*, 2008, 11: 18–27
- 14 Yue J, Rebrov EV, Schouten JC. Gas-liquid-liquid three-phase flow pattern and pressure drop in a microfluidic chip: similarities with gas-liquid/liquid-liquid flows. *Lab Chip*, 2014, 14: 1632–1649
- 15 Chen R, Dong PF, Xu JH, Wang YD, Luo GS. Controllable microfluidic production of gas-in-oil-in-water emulsions for hollow microspheres with thin polymer shells. *Lab Chip*, 2012, 12: 3858–3860
- 16 Brugarolas T, Park BJ, Lee MH, Lee D. Generation of amphiphilic Janus bubbles and their behavior at an air-water interface. *Adv Funct Mater*, 2011, 21: 3924–3931
- 17 Hashimoto M, Garstecki P, Whitesides GM. Synthesis of composite emulsions and complex foams with the use of microfluidic flow-focusing devices. *Small*, 2007, 3: 1792–1802
- 18 Wang K, Lu YC, Tan J, Yang BD, Luo GS. Generating gas/liquid/liquid three-phase microdispersed systems in double T-junctions microfluidic device. *Microfluid Nanofluid*, 2010, 8: 813–821
- 19 Wan JD, Stone HA. Microfluidic generation of a high volume fraction of bubbles in droplets. *Soft Matter*, 2010, 6: 4677–4680
- 20 Xu JH, Chen R, Wang YD, Luo GS. Controllable gas/liquid/liquid double emulsions in a dual-coaxial microfluidic device. *Lab Chip*, 2012, 12: 2029–2036
- 21 Yang L, Wang K, Mak S, Li YK, Luo GS. A novel microfluidic technology for the preparation of gas-in-oil-in-water emulsions. *Lab Chip*, 2013, 13: 3355–3359
- 22 Wang W, Chen R, Xu J, Wang Y, Luo G. One-step microfluidic approach for controllable production of gas-in-water-in-oil (G/W/O) double emulsions and hollow hydrogel microspheres. *RSC Adv*, 2014, 4: 16444–16448
- 23 Rajesh VM, Buwa VV. Experimental characterization of gas-liquid-liquid flows in T-junction microchannels. *Chem Eng J*, 2012, 207: 832–844
- 24 王凯, 吕阳成, 秦康, 骆广生, 王涛. 双 T 型微通道内气液液三相分散规律. 化工学报, 2013: 470–475
- 25 付宇航, 赵述芳, 王文坦, 金涌, 程易. 多相/多组分 LBM 模型及其在微流体领域的应用. 化工学报, 2014: 2535–2543
- 26 Zhou C, Yue P, Feng JJ. Formation of simple and compound drops in microfluidic devices. *Phys Fluids*, 2006, 18: 92105

- 27 Park JM, Anderson PD. A ternary model for double-emulsion formation in a capillary microfluidic device. *Lab Chip*, 2012, 12: 2672–2677
- 28 Nightingale AM, Phillips TW, Bannock JH, de Mello JC. Controlled multistep synthesis in a three-phase droplet reactor. *Nat Commun*, 2014, 5: 3777
- 29 Chen D, Li L, Reyes S, Adamson DN, Ismagilov RF. Using three-phase flow of immiscible liquids to prevent coalescence of droplets in microfluidic channels: criteria to identify the third liquid and validation with protein crystallization. *Langmuir*, 2007, 23: 2255–2260
- 30 Assmann N, von Rohr PR. Extraction in microreactors: intensification by adding an inert gas phase. *Chem Eng Process*, 2011, 50: 822–827
- 31 Su YH, Chen GW, Zhao YC, Yuan Q. Intensification of liquid-liquid two-phase mass transfer by gas agitation in a microchannel. *AIChE J*, 2009, 55: 1948–1958
- 32 Tan J, Liu ZD, Lu YC, Xu JH, Luo GS. Process intensification of H₂O₂ extraction using gas-liquid-liquid microdispersion system. *Sep Purif Technol*, 2011, 80: 225–234
- 33 Zheng B, Ismagilov RF. A microfluidic approach for screening submicroliter volumes against multiple reagents by using preformed arrays of nanoliter plugs in a three-phase liquid/liquid/gas flow. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 2520–2523
- 34 Adamson DN, Mustafi D, Zhang J, Zheng B, Ismagilov RF. Production of arrays of chemically distinct nanolitre plugs via repeated splitting in microfluidic devices. *Lab Chip*, 2006, 6: 1178–1186
- 35 Onal Y, Lucas M, Claus P. Application of a capillary microreactor for selective hydrogenation of α,β -unsaturated aldehydes in aqueous multiphase catalysis. *Chem Eng Technol*, 2005, 28: 972–978
- 36 Zhang J, Wang K, Lin X, Lu Y, Luo G. Intensification of fast exothermic reaction by gas agitation in a microchemical system. *AIChE J*, 2014, 60: 2724–2730
- 37 Tan J, Dong C, Lu YC, Xu JH, Luo GS. Coupling process of oxidation and extraction in a gas-liquid-liquid microdispersion system for H₂O₂ synthesis. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 51: 1834–1845
- 38 Wan JD, Stone HA. Coated gas bubbles for the continuous synthesis of hollow inorganic particles. *Langmuir*, 2012, 28: 37–41
- 39 Wan J, Bick A, Sullivan M, Stone HA. Controllable microfluidic production of microbubbles in water-in-oil emulsions and the formation of porous microparticles. *Adv Mater*, 2008, 20: 3314–3318
- 40 Lee MH, Prasad V, Lee D. Microfluidic fabrication of stable nanoparticle-shelled bubbles. *Langmuir*, 2010, 26: 2227–2230

Gas/liquid/liquid three-phase flow at micrometer scale

Guangsheng Luo^{*}, Kai Wang, Jianhong Xu, Yangcheng Lv, Yujun Wang, Jisong Zhang

Key Laboratory of Chemical Engineering; Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^{*}Corresponding author (email: gsluo@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Gas-liquid-liquid three-phase flow at micrometer scale is an important issue in the research of microfluidics, microstructured chemical system, μ -TAS, and some other fields. The research topics on the gas-liquid-liquid three-phase microflow are mainly focused on new devices and techniques of microdispersion, scaling laws of dispersed particles, flow and transport properties in microchannels, and the application of gas-liquid-liquid three-phase microflows in reaction, separation and material preparation processes. The results show the gas-liquid-liquid three-phase microflows have more complicated dispersed rules and unique flow, transport and reaction performances, compared with the gas-liquid and liquid-liquid two-phase processes. The research progress of gas-liquid-liquid three-phase microflows are summarized and the future development directions are suggested.

Keywords: gas/liquid/liquid, microfluidics, transport enhancement, multi-phase reaction, core-shell material