

## 综述与专论

## 微通道气液两相流研究进展

王长亮, 靳遵龙, 王永庆, 王定标  
(郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 介绍了国内外微化工发展背景及发展现状, 微通道内气液两相流流动气泡特性和传质特性。微通道中(横向及竖向微通道)气液两相流流型划分主要有泡状流、弹状流、环状流、搅拌流等。气泡形成过程中流体挤压力对气泡表面进行破坏致使分离, 表面张力则在整个过程中维持着气泡形状及长度。着重介绍了微通道内气泡形成过程及经验长度计算, 比较了不同研究者提出的经验公式中气液相表观速度比和气泡长度的关系, 得出气泡长度均随气液相表观速度比的增加而增加, 但依据研究者实验条件不同增加趋势也不尽相同。传质方面, 研究基本集中在气液相比表面积较大的泡状流、环状流上, 而气液表观速度、当量直径、压强等都会影响传质系数。微通道气液两相流虽然在传热、传质方面有很大的应用前景, 但仍存在研究手段单一、理论数据不完善等问题, 指出在未来的研究中研究者们要扩大领域范围, 为传质传热的实际应用提供更可靠的理论依据。

**关键词:** 微通道; 气液两相流; 流型; 气泡长度; 传质

**中图分类号:** TQ021.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6613 (2017) s1-0001-07

**DOI:** 10.16085/j.issn.1000-6613.2016-2382

## Research progress of gas-liquid two-phase flow in micro-channels

WANG Changliang, JIN Zunlong, WANG Yongqing, WANG Dingbiao

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**Abstract:** Detailed description of the background and application of the micro-chemicals, Bubble characteristics and mass transfer in micro-channels are also reviewed. Introduce the gas-liquid two-phase flow pattern, formation process and influencing factors of it in micro-channels (horizontal and vertical micro-channels). Focus on the introduction of the bubble formation and empirical formula of bubbles length. Compared the relationship between gas-liquid flow ratio and the bubble length in empirical formula of various researches. The results show that the bubble length increases with the increase of velocity gas-liquid flow ratio, but the increasing trend is not the same according to the experimental conditions of the researchers. For mass transfer, the study basically focused on the bubble flow and the annular flow which have larger specific surface area. Although gas-liquid two-phase flow in micro-channels has a great application prospects in the heat transfer, mass transfer. there are still some problems like research method singleness and theoretical data is not perfect. It is pointed out that in the future research, the researchers should expand the scope of the field and provide a more reliable theoretical basis for the practical application of mass transfer.

**Key words:** micro-channel; gas-liquid two-phase flow; flow pattern; bubble length; mass transfer

随着 20 世纪 80 年代微机电系统 (MEMS) 在美国的首次提出<sup>[1]</sup>, 计算机技术的不断发展, 电子设备体积趋小化, 功率和集成度的大幅度提高, 以及导弹、卫星和军用雷达对高性能模块和高可靠性大功率器件的要求, 致使自然科学的一个重要发展

收稿日期: 2016-12-22; 修改稿日期: 2017-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金 (21676257) 及中国博士后科学基金 (2016T90678, 2014M552011) 项目。

第一作者: 王长亮 (1994—), 硕士研究生。联系人: 王永庆, 副教授, 研究方向为微尺度气液传递强化研究。E-mail: wangyq@zzu.edu.cn。

趋势是向微型化、精细化发展。

微化工正是顺应化工领域内发展需要而日渐兴起的科技前沿领域。微化工是以微机电系统设计思想及化学化工基本原理为基础,移植集成电路和微传感器制造技术的一种高新技术,涉及多个交叉学科,如化学、机械、电子、材料等<sup>[2]</sup>。国外研究率先起步,如1997年德国拜耳公司成功开发出微米级高硼硅玻璃微通道反应器,2003年美国康宁公司研发的Advanced-Flow微反应器<sup>[3]</sup>,可用于特种化学、精细化工等行业。国内微化工技术起步稍晚,但在国家的支持和大量研究工作者的不懈努力下很快步入世界前列,2001年中国科学院大连化学物理研究所率先在中国成立了微化工技术研究组,其开发出的微反应器达到世界先进水平,随后国内许多高校陆续展开相关领域研究,如清华大学<sup>[4-5]</sup>、华东理工大学<sup>[6-7]</sup>等,2013年西安万德能源化学股份有限公司研发的硝酸异辛酯微反应器产量居全国首位<sup>[8]</sup>。由此可见,安全高效的微化工已经成为极具发展潜力的应用领域。

微通道的特征尺度一般小于1mm,道内流动可忽略重力影响,流体力学特征和传质特性都将产生很大的变化,如单位面积上的传热,传质能力有了很大的增强,可达到 $25000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,较常规尺度高1~2个数量级<sup>[9]</sup>,同时由于比表面积的增长使得反应的热量可以在短时间内释放,避免了局部过热的现象。因而在气体吸收、脱附、氟化等气-液反应过程有着广泛的应用。但由于其内部行为的复杂性,还更待研究探索。

## 1 微通道内气液两相流流型

由于微通道尺度的微小化,流体力学特性的改变,其流型与常规尺度相比会有很大的差别,研究者通过大量的实验、模拟观察发现,随着气相和液相表观流速的变化,微通道内会出现多种流型,如泡状流、弹状流、环形流等。早期的研究中,TRIPLETT等<sup>[10]</sup>试验观察到了泡状流、Taylor流和搅拌流,其中弹状-环状流较为特殊如图1,并将流型图和关联式计算得出的结果比较,发现有的关联式不适用于微通道内气液两相流。

由于研究者在模拟或实验中的使用的通道结构尺寸、两相流体性质和初始条件设置的不同,以及过渡流型的界定和分析比较困难,观察到的流型必然会有有一定的区别,命名自然也有差异。CHEN等<sup>[11]</sup>观测到的氮气-水在玻璃微通道中的两相流流型

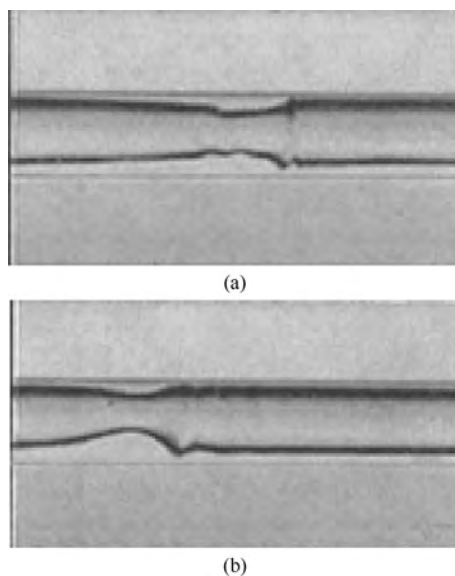


图1 TRIPLETT等<sup>[10]</sup>观测到的不同速度下的弹状-环状流流型

有泡状流、弹状流、气泡-火车弹状流(bubble-train slug flow)、搅拌流和环状流,与TRIPLETT等<sup>[10]</sup>不同之处在于没有观察到弹状-环状流,而是观察到了气泡火车弹状流。类似的SERIZAWA等<sup>[12]</sup>主要研究了空气-水两相在 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 管中的流动,以及蒸汽-水两相在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 管中流动,观测到的流型为:分散的泡状流(dispersed bubbly flow)、弹状流(slug flow)、液环流(liquid ring flow)、液团流(liquid lump flow)等。分散的泡状流中的气泡在直径小于微通道直径的情况下,由于气液面压力差足够大,可以阻止气泡扭曲变形,故始终为球形。还发现两种特别的流型:歪斜肉串流(skewed barbecue),因形似歪斜的烤鸡架而得名,这与CHEN等<sup>[11]</sup>发现的成串泡状-弹状流现象相似;溪状流(rivulet flow)流动形态如溪流的流动,液膜将液团的流动连在一起。同时该作者还指出了在低流速下气柱和管壁之间会出现直接接触现象,证实了壁面条件对流型存在影响。BARAJAS等<sup>[13]</sup>研究了1.6mm水平微管的流动,观察4种不同物质的流型。如波状层流(wavy-stratified)、活塞流、柱状流等,其中柱状流与泰勒流相类似。综上所述可以看出,微通道中气液两相流流型大体一致,但由于条件影响会出现个别特殊的流型。

微通道方向不一定限制水平,同时有竖直管及倾斜管。由于重力方向等参数的改变,流动性质会发生一定的变化。如LIU等<sup>[14]</sup>研究了在直径为1.47mm、2.37mm和3.04mm微通道内空气-水

气液两相流流型，观测到了与水平管不同的成串的泡状弹状流、翻腾流及环状流如图 2。BISWAS 等<sup>[15]</sup>报道了表面张力占主导的毛细管内，并流向下的气液两相流中会出现分层流，认为分层流是由表面张力引起的，而 GALBIATI 等<sup>[16]</sup>认为竖直微通道中分层流是一种不稳定的流型，进口条件和通道结构等都会致使分层流出现。

流型的影响因素较多，如通道结构、流体速度、表面张力等。CUBAUD 等<sup>[17]</sup>研究了十字形微通道中稳态均匀气液两相流流型及  $200\mu\text{m}$  和  $525\mu\text{m}$  方形微通道气液流型，发现气液两相流的流型不依赖于微通道的尺寸，而会受到表面张力会影响。袁希钢等<sup>[18]</sup>也在 T 形结构微通道中对气液两相流流型的模拟中，通过选取水、质量分数为 10% 以纯溶液和纯乙醇液体进行模拟得出表面张力会对流型图产生较

大的影响，在黏度不同的丙三醇溶液中，观察的流型图几乎没有变化，即黏度对气泡形状的作用很小，而表面张力占主导作用。LEE 等<sup>[19]</sup>研究了微通道表面润湿性对内径为  $1.46\sim 1.80\text{mm}$  的圆形微截面微通道汽液两相流流型转变的影响，将普适性的流型图中加入了润湿性的考虑，提高了流型图的准确性，有利于后来研究者对流型的研究预测。

## 2 微通道气液两相流气泡（液滴）形成及长度

### 2.1 气泡（液滴）形成

气泡（液滴）研究是微流体研究应用的基础，气泡和液滴对于流体的影响很大，对流体传质传热起促进作用，同时也可能堵塞流体，因此对这方面的研究十分必要。DAI 等<sup>[20]</sup>将其微通道内 Taylor

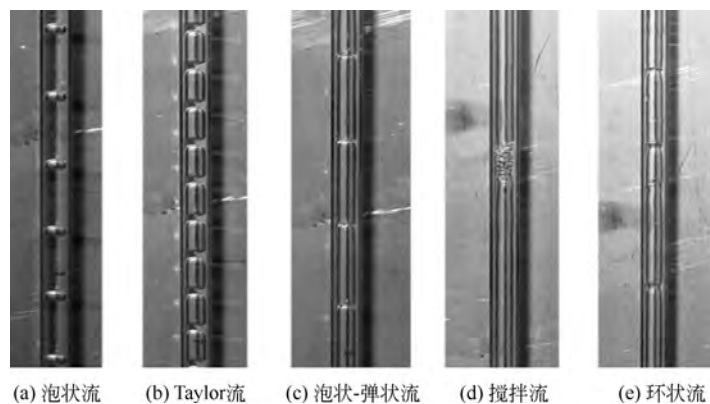


图 2 LIU 等<sup>[14]</sup> 观察直径  $1.47\text{mm}$  微通道内气液两相流流型

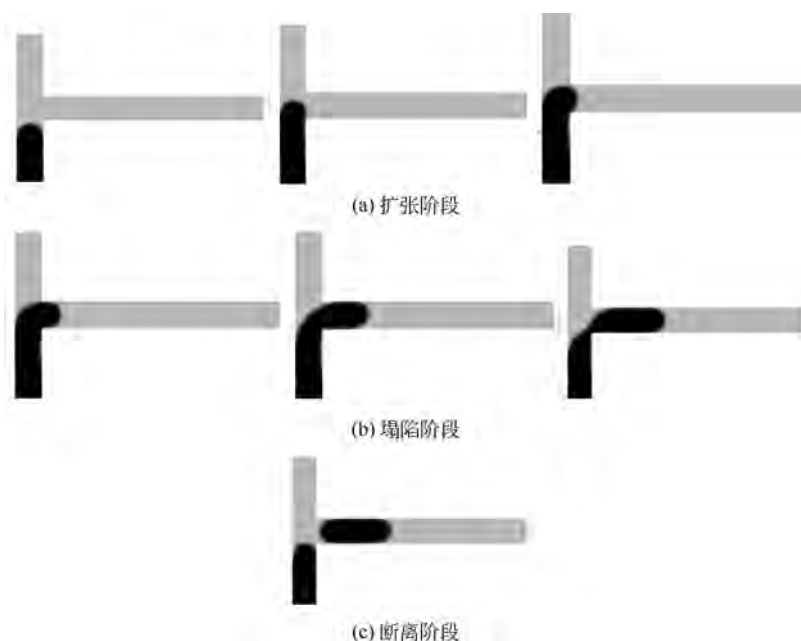


图 3 Taylor 气泡的形成阶段

气泡的形成划分为 3 个阶段：扩张阶段 (expansion)、塌陷阶段 (collapse)、挤压脱离阶段 (pinching off)。扩张阶段内气相逐渐在纵向扩张，如图 3(a)，接触区域逐渐被气相占据，当气相流动到交叉口时，液相被完全阻塞，接着液相开始挤压气相，塌陷阶段开始，如图 3(b)，表面张力及液体进口处压力起主要作用，剪切力较两者小 1~2 个数量级，影响较小。此时气泡底部和壁面接触，气泡主体向通道出口流动，并逐渐拉长致使在气泡的后端出现颈部，最后颈部断裂，气泡在很短的时间内发生分离，在主流道内形成 Taylor 气泡，即挤压脱离阶段，如图 3(c)。

王琳琳等<sup>[21]</sup>采用相场方法，在湿壁面条件下气液两相微通道模拟研究中，得到 Taylor 气泡，将其过程划分为四个阶段：气泡进入气液混合阶段、阻塞阶段、塌陷阶段及脱离阶段，气泡分离过程同 DAI 等<sup>[20]</sup>观察到的基本相符，同时分析了气泡形成过程中黏性力的作用时间较短，塌陷阶段影响基本可忽略，而流体挤压力在整个过程中对气泡表面进行破坏致使分离，表面张力则在整个过程中维持着气泡形状及长度。

## 2.2 气泡长度

气弹长度是泰勒流的重要参数，微通道中弹状流传热、传质、压降高度依赖气弹长度的大小。而气弹长度并不像其他流动参数如流体性质，表面速度等初始可设置，因此很难精确控制。现有的研究中研究者得出的关于气弹长度的经验公式等也存在明显的非一致性，因此在气液两相流方面系统的研究是更加必要的。现有的 CFD 模拟中主要针对单个的气弹单元，假定气弹和液滴长度是已知的。研究者们同样也会使用单相模型或两相 VOF 模型来研究气泡形状、气弹速度、薄膜厚度等重要参数。QIAN 等<sup>[22]</sup>在 T 形微通道的模拟中得出在整个微通道流道中气弹长度是不统一的，尤其是在微通道截面尺寸超过 1mm 时，当气液流速增加时这种非一致性更加显著，气弹长度同时受进口结构的影响，而液相的密度黏度等参数的影响是几乎可以忽略的，表面张力、表面黏附力对气弹长度影响其次。GUO 等<sup>[23]</sup>在 T 形微通道的模拟和实验的对比中得到，在同种液体流速下模拟计算的气弹长度总是要比试验中的长度长一点，尤其是当液体流速较低的时候，这是由于实验装置气密性的缘故，实际的气体流速要比设定值低一些，同时得出了气泡长度随气液相表观速度的增加而

不均匀增长的规律。

GARSTECKI 等<sup>[24]</sup>认为在低毛细管数的情况下，气泡（液滴）的断裂主要是由于分散相几乎堵住了整个流道的截面，压降导致连续相流体的阻力激增，气泡的颈部在液体的挤压下塌缩至断裂，最终生成气泡。并给出了夹断脱离气泡的长度尺寸公式，如式(1)、式(2)。

$$L \approx w + d \frac{Q_{in}}{Q_{out}} \quad (1)$$

$$\frac{L}{w} = 1 + \alpha \frac{Q_{in}}{Q_{out}} \quad (2)$$

式中， $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$  分别为分散相和连续相体积流量。 $\alpha$  是由微通道几何结构决定的常数，关系式不受流体参数的影响。关系式适用于毛细管数小于 0.02 的情况，同时忽略惯性力和泄露等影响，所以 GARSTECKI 等<sup>[24]</sup>的模型公式的适用性比较小。随着摩擦系数的增大，剪切力开始扮演重要的角色，后来很多研究者在此基础上修正了 Garstecki 的关联式，如 STEIJN 等<sup>[25]</sup>运用微观粒子图像速度测量方法 ( $\mu$ -PIV) 实时测量了 T 形微通道内气泡生成过程中周围流体受阻的情况，证明了关联式的正确性，YAO 等<sup>[26]</sup>拓宽了其适用范围，其考虑了气泡生成过程中的惯性力作用，在 Garstecki 关联式的基础上考虑惯性力的影响从而引入了韦伯数，如式(3)。

$$L_B/w = j_G/j_L + 1.37We^{-0.349} j_G/j_L \quad (3)$$

式中， $j_G$ 、 $j_L$  分别为气液相表观速度， $w$  为通道宽度。另一类则是包含  $Re$ 、 $Ca$ 、 $We$ 、 $\varepsilon$  等量纲为 1 参数的纯经验关联式，将更多的参数考虑在内。

竖直管中，夏国栋等<sup>[27]</sup>研究了垂直及倾斜上升管内 Taylor 气泡长度在弹状流发展过程中的变化情况，得出 Taylor 气泡长度份额随倾角的减小而增大，对管内倾斜上升气液弹状流流动的不全面性作了补充。由于研究者采用的通道条件、结构流体性质等差异，各种预测式之间还存在着较多的差异，尚未得到较好的一致性。

研究者各自依据自身实验条件归纳了不同的气泡长度经验公式，在此基础上进行了整理归纳，气泡长度计算公式对比曲线如图 4。

通过曲线可以观察到，气泡长度随气相表观速度的增加而增加，依据研究者不同实验条件增加趋势也不尽相同。GARSTECKI 等<sup>[24]</sup>、STEIJN 等<sup>[25]</sup>、CUBAUD 等<sup>[28]</sup>及 XIONG 等<sup>[29]</sup>等的图像吻合性较好，相同气液流量比下，气泡长度相差不大，除

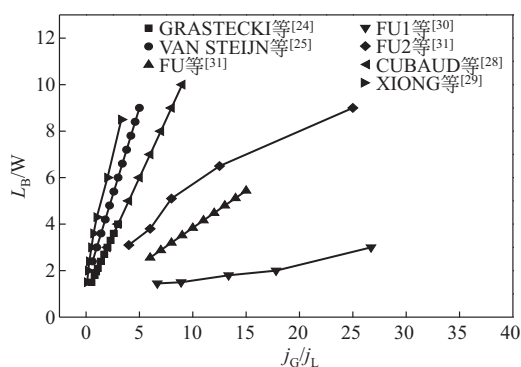


图 4 气泡长度对比曲线

CUBAUD 等<sup>[28]</sup>用的十字形微通道外, GARSTECKI 等<sup>[24]</sup>、STEIJN 等<sup>[25]</sup>、XIONG 等<sup>[29]</sup>的都为 T 形微通道。关联式虽都为线性关系, 但微通道尺寸不同, 常数系数  $\alpha$  大小不同, 故图像会存在差异。此外 VAN STEIJN<sup>[25]</sup>考虑了流动中的泄露, 因而气泡的尺寸会比理论的值有所增大。而 XIONG 等<sup>[29]</sup>试验中, 微通道较高的高宽比也决定了相同气液流量比下气泡尺寸会比较大。但同时这些关联式只适合在  $Ca < 0.02$  且忽略惯性力的情况下, 故而缺少流体性质, 剪切力等因素对气泡长度的影响, 存在一定的局限性。FU 等<sup>[30-31]</sup>的研究中图像分布差异较大, FU1<sup>[30]</sup>采用  $N_2$ -水, FU2<sup>[31]</sup>为不同浓度的  $N_2$ -SDS-Water, 由此可见液体性质对于气泡形成及长度有着重要的影响。

### 3 微通道气液两相流传质

前面所讨论的气泡流型、长度等是气液两相流行为的基础, 微通道内气液传质过程是化工领域常见的操作单元, 是化工生产的关键环节, 直接决定生产效率。微通道内的流体流型多为层流, 通过扩散传质<sup>[32]</sup>, 但因其尺寸的微小化, 两相接触面面积大幅提高, 传质效率有了极大的提高。因而在气体的吸收, 吸附, 萃取加氢等过程都有着良好的前景。目前的研究也主要集中在这些方面。

微通道内气液相传质研究主要集中在对弹状流和环状流上, 因为这两种流型气液相比表面积大且流型容易实施和控制。TORTOPIDIS 等<sup>[33]</sup>研究考察了 4mm 通道内  $CO_2$ - $H_2O$  气液两相流流动过程的质量传递, 气液相表观速度为  $U_{GS} = 0.1 \sim 30 \text{ms}^{-1}$ ,  $U_{LS} = 0.01 \sim 1 \text{ms}^{-1}$ , 实验结果验证了流型密切影响着传质速率的大小, 分层流的传质系数最低, 环状流的传质系数最高, 并随气相表观速度的增加而增加, 而弹状流中却不受表观速度的影

响, JEPSEN 等<sup>[34]</sup>提出的能量耗散率公式, 如式(4), 同样达到很好的适用性, 传质系数同能量耗散率有着密切的关系。

$$\epsilon = (U_{LS} + U_{GS})(\Delta P / \Delta L) \quad (4)$$

式中,  $U_{GS}$ 、 $U_{LS}$  分别为气相、液相表观速度。

付涛涛等<sup>[35]</sup>在研究竖直放置 Y 形和 T 形微通道内  $CO_2$ -蒸馏水气液两相流的传质行为中发现不同的流型中, 液环流时的液侧体积传质系数最大, 显著强化了传质, 比宏观设备高了 1~2 个数量级。YUE 等<sup>[36]</sup>研究了在当量直径为  $667 \mu\text{m}$  的矩形微通道中的传质行为, 用  $CO_2$  在水和  $NaHCO_3/Na_2CO_3$  缓冲溶液中的吸收来测液侧体积传质系数, 同 TORTOPIDIS 等<sup>[33]</sup>一样得到传质系数与气相表观速度的关系, 同时指出在固定液相表观速度下, 液侧体积传质系数和表面积随气相表观速度的增加而增加, 而在气相表观速度固定的情况下, 液侧体积传质系数和液侧传质系数随液相表观速度的增加而增加。作者还提出了关于预测  $CO_2$ - $H_2O$  液侧体积传质系数的经验关系式, 如公式(5)、式(6)。

弹状流

$$Sh_L \times a \times d_h = 0.084 Re_G^{0.213} Re_L^{0.937} Sc_L^{0.5} \quad (5)$$

弹状-环状流和扰动流:

$$Sh_L \times a \times d_h = 0.058 Re_G^{0.344} Re_L^{0.912} Sc_L^{0.5} \quad (6)$$

式中,  $d_h$  为内径,  $Sc$  为施密特数, 其标准差小于 23%。

除了流型、气液两相表观速度对传质的重要影响外, NIU 等<sup>[37]</sup>在直径为 1mm 的圆形通道内进行的气液两相流研究中, 观察了  $CO_2$  在聚乙二醇二甲醚中的吸收过程, 不仅得出液侧体积传质系数跟表观气速和表观液速的关系, 还将传质系数与压降、无因次数进行了关联, 如式(7)、式(8)。

$$K_L \times a = 0.017 (d_p/d_z)_{ip}^{0.9} \quad (7)$$

$$Sh_L \times a \times d_h = 0.116 Re_G^{0.39} Re_L^{0.7} Sc_L^{0.5} \quad (8)$$

式中,  $K_L a$  为液侧体积系数;  $d_p/d_z$  为压力梯度,  $\text{kPa/m}$ 。另外 NIU 等<sup>[37]</sup>在直径为 0.5mm、1mm、2mm 的梯形微通道内的化学吸收过程实验得出, 当量直径、液相化学组成及两相温度压强等因素同样对传质都有影响<sup>[38]</sup>。

Taylor 流之所以在传质方面有很大优势, 取决于其独特的流动模式, Taylor 流中气泡和液弹间隔排列, 一层液膜将相邻的液弹链接起来, 使得微通道内的反混减少, 而且液弹的内部循环也增强了传质效果<sup>[39]</sup>。在实际过程强化中, 乐军等<sup>[40]</sup>以  $CO_2$ - $H_2O$  为模型体系, 通过对  $CO_2$  吸收过程

与常规气-液接触设备的比较发现,液侧体积传质系数提高了1~2个数量级。ZANFIR等<sup>[41]</sup>在降液膜微反应器内进行了CO<sub>2</sub>吸收实验,实验结果表明该反应在50s内,CO<sub>2</sub>的转化率达到100%,并得到了CO<sub>2</sub>转化率的数学模型,在保证高转化率的情况下,同时极大的缩短了时间周期。

传质过程并不单独存在,同时还会伴随气液反应、换热等过程,因而过程本身复杂,两相传质研究难度较大。近年来两相流软件模拟得以兴起,摆脱实验,观测条件的限制,以达到可更全面更准确的理论数据研究。不管使用何种方法我们都可以看出微反应器的优越传质特性、巨大发展空间及良好应用前景。

#### 4 前景展望

微通道是微反应器、微接触器、微换热器等设备的基本组成,主要特点是特征尺寸小,比表面积大,从而导致传热、传质推动力的增加,大大强化传质传热过程。但相应机理研究较少仍不完善,因此深入开展两相流行为研究势在必行。气泡形成方面,不同的微通道内气泡的生成机理不同,不同结构,不同尺寸条件都会产生不同的实验结果,还需要对各种结构尺寸的微通道内气泡形成进行整理归纳,并建立物理模型,预测气泡的形成尺寸;微通道内流体方面,目前的研究通常是牛顿流体,对于非牛顿流体研究甚少,故可以扩充气液物系到非牛顿流体-气体;传质等方面,不光要大量积累实验数据,同时还要致力于创建传质多维数学物理模型等多种研究手段,多方面充分完善传质理论。近些年来格子 Boltzmann 方法受到广泛的关注,该方法与传统的流体模拟方法不同,它基于分子动理论,通过跟踪粒子分布函数的输运而后对分布函数求矩来获得宏观平均特性<sup>[42]</sup>,其为气液两相流体计算模拟提供了新的途径,但同时理论模型尚不完善,更待深入研究。

#### 符号说明

- $a$ ——微通道半宽, m  
 $Ca$ ——毛细管数, 量纲为1数  
 $d_p/d_z$ ——压力梯度, kPa/m  
 $d_h$ ——内径, m  
 $j_G, j_L$ ——气体、液体表观速率, m/s  
 $K_{L,a}$ ——液侧体积传质系数, s<sup>-1</sup>  
 $L, L_B$ ——气泡长度, m  
 $P$ ——压强, kPa

- $Q_{in}, Q_{out}$ ——分散相和连续相体积流量  
 $Re$ ——雷诺数  
 $Sh$ ——舍伍德数  
 $Sc$ ——施密特数  
 $U_{GS}, U_{LS}$ ——气相、液相表观速度, m/s  
 $w$ ——微通道宽度, m  
 $We$ ——韦伯数  
 $\alpha$ ——宽径比,  $\alpha = d/w$ , 量纲为1

下角标

- L——液相  
 G——气相

#### 参 考 文 献

- [1] JAN Fluitman. Microsystems technology: objectives [J]. Elsevier Science S. A, 1996, 56 (1-2): 151-166.  
 [2] 林忠华, 胡国清, 刘文艳, 等. 微机电系统的发展及其应用 [J]. 纳米技术与精密工程, 2004, 2 (2): 117-123.  
 LIN Zhonghua, HU Guoqing, LIU Wenyan, et al. Development and Application of Micro-Electro-Mechanical System [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2004, 2 (2): 117-123.  
 [3] 孟晶, 许春华. 微化工: 开启高效精益生产新模式 [J]. 中国橡胶, 2015, 31 (21): 13-14.  
 MENG Jing, XU Chunhua. Start new lean production mode [J]. China Rubber, 2015, 31 (21): 13-14.  
 [4] LI Shaowei, XU Jianhong, WANG Yujun, et al. Micromixing scale controlling and its effect on micro-mixing performance [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (13): 3620-3626.  
 [5] 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 [J]. 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 [J]. Modern Chemical Industry, 2006, 26 (3): 19-23.  
 [6] WU Wwei, QIAN Gang, ZHOU Xing-gui, et al. Peroxidation of methyl ethyl ketone in a microchannel reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (18): 5127-5132.  
 [7] 涂善东, 周帼彦, 于新海. 化学机械系统的微小化与节能 [J]. 化工进展, 2007, 26 (2): 253-261.  
 TU Shandong, ZHOU Jinyan, YU Xinhai. Microminaturization of chemo-mechanical system and energy conservation [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26 (2): 253-261.  
 [8] 过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热 [J]. 力学进展, 2000, 30 (1): 1-6.  
 GUO Zengyuan. Frontier of heat transfer-microscale heat transfer [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30 (1): 1-6.  
 [9] 乐军, 陈光文, 袁权等. 微通道内气-液传质研究 [J]. 化工学报, 2006, 57 (6): 1296-1303.  
 LE Jun, CHEN Guangwen, YUAN Quan, et al. Mass transfer in gas-liquid flow in micro-channels [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57 (6): 1296-1303.  
 [10] TRIPLETT K A, GHIAASIAN S M, ABDEL-KHALIK SI, et al. Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: Two-phase flow patterns [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25 (3): 377-394.  
 [11] CHEN W L, TWU M C, PAN C. Gas-liquid two-phase flow in micro-channels [J]. International Journal of Multiphase

- Flow, 2002, 28 (7): 1235-1247.
- [12] SERIZAWA A, FENG Z, KAWARA Z. Two-phase flow in microchannels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26: 703-714.
- [13] BARAJAS A M, PANTON R L. The effect of contact angle on two-phase flow in capillary tubes [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 19, 337-346.
- [14] LIU Dingsheng, WANG Shudong. Flow pattern and pressure drop of upward two-phase flow in vertical capillaries [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47 (2): 243-255.
- [15] BISWAS J, GREENFIELD P F. Two phase flow through vertical capillaries-existence of a stratified flow pattern [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, 11 (4): 553-563.
- [16] GALBIATI L, ANDREINI P. Flow pattern transition for vertical downward two-phase flow in capillary tubes. Inlet mixing effects [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1992, 19 (6): 791-799.
- [17] CUBAUD T, HO C M. Transport of bubbles in square micro-channels [J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16 (12): 4575-4585.
- [18] 袁希钢, 宋文琦. T 型结构微通道气液两相流型的数值模拟 [J]. *天津大学学报*, 2012, 45 (9): 758-763.  
YUAN Xigang, SONG Wenqi. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow pattern in T-junction microchannel [J]. *Journal of Tianjing University*. 2012 (45): 758-763.
- [19] LEE C Y, LEE S Y. Influence of surface wet-ability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008 (34): 706-711.
- [20] DAI L, CAI W, XIN F. Numerical study on bubble formation of a gas-liquid flow in a T-junction micro-channel [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2009, 32 (12): 1984.
- [21] 王琳琳, 李国君, 田辉, 等. T 型微通道内气液两相流数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45 (9): 65-69.  
WANG Linlin, LI Guojun, TIAN Hui, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in a T-junction micro-channel [J]. *Journal of Xi'an JIAOTONG University*, 2011, 45 (9): 65-69.
- [22] QIAN Dongying, LAHAL Adeniyi. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction micro-channel [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61 (23): 7609-7625.
- [23] GUO Fang, CHEN Bin. Numerical study on Taylor bubble formation in a micro-channel T-junction using VOF method [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2009 (21): S51-S58.
- [24] GARSTECKI P, FUERSTMAN M J, STONE H A, 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.
- [25] STEIJN V V, KREUTZER M T, KLEIJN C R. Mu-PIV study of the formation of segmented flow in micro-fluidic T-junctions [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007 (62): 7505-7514.
- [26] YAO C Q, ZHAO Y C, YE C B, et al. Characteristics of slug flow with inertial effects in a rectangular micro-channel [J]. *Chemical Engineering*, 2013, 95: 246-256.
- [27] 夏国栋, 刘亮, 马重芳, 等. 气液两相弹状流动的实验研究-液弹长度及 Taylor 气泡长度份额 [J]. *北京工业大学学报*, 2000, 26 (2): 35-38.  
XIA Guodong, LIU Liang, MA Zhongfang, et al. An experimental study on gas liquid two-phase slug flow-liquid slug length and the fraction of Taylor [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2000, 26 (2): 35-38.
- [28] CUBAUD T, TATINENI M, ZHONG X, et al. Bubble dispenser in microfluidic devices [J]. *Physical Review E*, 2005 (72): 631-641.
- [29] XIONG R, CHUNG J N. Bubble generation and transport in a microfluidic device with high aspect ratio [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33 (8): 1156-1162.
- [30] FU T, MA Y, FUNFSCHILLING D, et al. Squeezing-to-dripping transition for bubble formation in a microfluidic T-junction [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65 (12): 3739-3748.
- [31] FU T, FUNFSCHILLING D, MA Y, et al. Scaling the formation of slug bubbles in microfluidic flow-focusing devices [J]. *Microfluid and Nanofluidics*, 2010, 8 (4): 467-475.
- [32] 聂晶尧, 宋宏宇, 袁向前, 等. 微通道中两相流压降与传质的研究 [J]. *化学反应工程与工艺*, 2007, 23 (4): 309-314.  
NIE Jingyao, SONG Hongyu, YUAN Xiangqian, et al. Study on two-phase flow pressure drop and mass transfer in parallel micro-channels [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2007, 23 (4): 309-314.
- [33] TORTOPIDIS P, BONTZOGLU V. Mass transfer in gas-liquid flow in small-diameter tubes [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52 (14): 2231-2237.
- [34] JEPSEN C J. Mass transfer in two-phase flow in horizontal pipelines [J]. *AIChE Journal*, 1970, 16 (5): 705-711.
- [35] 付涛涛, 朱春英, 王东继, 等. 微通道内气液传质特性 [J]. *化工进展*, 2011, 30 (s2): 65-69.  
FU taotao, ZHU Chunying, WANG Dongji, et al. Mass transfer characteristics for gas-liquid two-phase flow in microchannels [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30 (s2): 65-69.
- [36] YUE J, CHEN G, YUAN Q, et al. Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62 (7): 2096-2108.
- [37] NIU H N, PAN L W, SU H J, et al. Flow pattern, pressure drop, and mass transfer in a gas-liquid concurrent two-phase flow microchannel [J]. *Reactor Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 28 (7): 1621-1628.
- [38] NIU H N, PAN L W, SU H J, et al. Effects of design and operating parameters on CO<sub>2</sub> [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64 (16): 3697-3708.
- [39] BURNS J R, RAMSHAW C. The intensification of rapid reactions in multiphase systems using slug flow in capillaries [J]. *Lab on A Chip*, 2001, 1 (1): 10-15.
- [40] 乐军, 陈光文, 袁权, 等. 微通道内气-液传质研究 [J]. *化工学报*, 2006, 57 (6): 1296-1303.  
LE Jun, CHEN Guangwen, YUAN Quan, et al. Mass transfer in gas-liquid flow in microchannels [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2006, 57 (6): 1296-1303.
- [41] ZANFIR M, GAVRIILIDIS A. Carbon dioxide absorption in a falling film microstructured reactor: experiments and modeling [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2005, 44 (6): 1742-175.
- [42] 何雅玲, 李庆, 王勇等. 格子 Boltzmann 方法的工程热物理应用 [J]. *科学通报*, 2009, 54 (18): 2638-2656.  
HE Yaling, LI Qing, WANG Yong, et al. Lattice Boltzmann method and its applications in engineering thermophysics [J]. *Science Bulletin*, 2009, 54 (18): 2638-2656.