

研究论文

## 微通道中气体/离子液体两相流动与分散性能

谭璟, 赵菁菁, 徐建鸿, 骆广生

(清华大学化学工程系, 化学工程联合国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 离子液体在气-液反应与分离过程中有良好的应用前景, 研究气体/离子液体两相体系的微分散过程对于发展新型气-液分散技术和设备具有重要意义。研究了  $N_2/[Bmim]BF_4$  体系在同轴环管微通道中的流动和分散行为。实验结果表明, 在不同的气相和液相流速下,  $N_2/[Bmim]BF_4$  体系分别呈现气泡流、气泡-气柱过渡流、气柱流和气柱-环隙过渡流 4 种流型。通过考察分散相尖端尺寸和气相、液相流速对气-液体系流型的影响, 作出了相应的流型图。通过考察气相、液相流速对稳定气-液分散流型下的气相分散尺寸的影响, 揭示了分散气相行为的机理, 并建立了描述气相分散尺寸的数学模型。

**关键词:** 微通道; 气-液体系; 离子液体; 分散

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.01.007

中图分类号: TQ 021.4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 01—0055—06

## Flow and dispersion performance of gas/ionic liquid systems in microchannels

TAN Jing, ZHAO Jingjing, XU Jianhong, LUO Guangsheng

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Ionic liquids show good prospect in gas-liquid reaction and separation processes. Investigation of flow and dispersion performance of gas/ionic liquid systems is important for the development of technology and devices for gas-liquid dispersion as well as application of ionic liquids in gas-liquid reaction and separation processes. The flow and dispersion performance of  $N_2/[Bmim]BF_4$  in coaxial annular microchannels was investigated. Flow patterns of bubble-flow, bubble-slug-transition-flow, slug-flow and slug-annular-transition-flow were observed. The influence of gas and liquid flow rates on gas-liquid flow pattern was studied in different microchannels and flow pattern maps were determined accordingly. The effects of gas and liquid flow rates on dispersion size were also investigated. The mechanism was discussed and mathematical models were established to predict the dispersion size in different microchannels.

**Key words:** microchannel; gas-liquid system; ionic liquids; dispersion

### 引 言

离子液体是一类具有低熔点, 在温度低于 373.15 K 时呈液态的盐类<sup>[1]</sup>。与常规的有机溶剂和

电解质溶液相比, 离子液体有众多特性, 如常温下具低蒸气压、熔点低、对多种无机物和有机物具有良好的溶解性能等<sup>[2]</sup>。因此, 离子液体作为反应、分离介质, 具有良好的应用潜质。目前, 越来越

2013-07-01 收到初稿, 2013-11-01 收到修改稿。

联系人: 骆广生。第一作者: 谭璟 (1984—), 女, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206081, 21036002); 博士后科学基金项目(02320101076)。

Received date: 2013-07-01.

Corresponding author: Prof. LUO Guangsheng, gsluo@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China(21206081, 21036002).

的研究者将离子液体应用于气-液分离和反应过程<sup>[3-13]</sup>。但是,离子液体的物理性质显著区别于有机溶剂或电解质溶液,如黏度普遍较高(常温下离子液体的黏度通常高于 50 mPa·s),在传统的气/液传质设备中无法操作。因此,发展高效率、低能耗、适用于含离子液体的高黏度体系的新型气-液分散技术和设备,对于将离子液体应用于气-液反应和分离过程具有重要意义。

近年来,气-液微分散微通道技术作为一种实现过程强化的手段,受到了研究者的关注。气/液微通道分散是指气-液两相以一定的方式在微通道内接触,其中气相被液相分割成均一的气泡或气柱的分散形式。研究表明,气泡分散过程能耗低,所形成的气泡单分散性能好,尺寸易于调控<sup>[14]</sup>;与传统的气-液传质过程相比,气-液微分散体系传质速率有显著的提高<sup>[15-17]</sup>;微分散条件下,一些气-液反应的反应速率、转化率和选择性均有显著提高<sup>[18-20]</sup>。因此,新型的气-液微通道分散技术在多孔微球及中空微球的制备<sup>[21]</sup>、气-液<sup>[22]</sup>及气-液-固<sup>[23]</sup>等反应过程强化方面均有广泛的应用前景。针对微通道中气-液两相流动及分散行为,研究者们分别以流动聚焦<sup>[24]</sup>、几何结构破碎<sup>[25]</sup>、错流剪切<sup>[26]</sup>、垂直流剪切<sup>[27]</sup>等方式,实现了微米到毫米量级、尺寸均一的气泡(气柱)的可控制备。

总体而言,气-液体系在微通道中的流动和分散性能已成为一个研究热点。但是,已有研究主要集中于气体在含表面活性剂的水溶液<sup>[28]</sup>和黏度较低的有机溶液<sup>[29]</sup>中的分散过程,而对于气相在离子液体中的流动和分散行为尚有待考察和研究。因此,考察对气体/离子液体体系在微通道内的流动和分散性能对于将该体系应用于微化工系统并实现分离和反应过程的强化具有重要意义。本文考察了同轴环管型微通道中气体/离子液体体系的流动和分散性能,实现了微米级气泡的制备,通过考察液相、气相流量对分散尺寸的影响,建立了预测气相分散尺寸的数学模型。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验体系

实验中所选取的离子液体为 1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([Bmim]BF<sub>4</sub>),属咪唑类离子液体,分析纯,购于上海笛柏化学品技术有限公司;气相为氮气,纯度高于 99.99%(体积分数),购于北京市华元气体化工有限公司。

实验在 25℃,常温下进行。经测定,实验条件下液相[Bmim]BF<sub>4</sub>的物理性质如下:密度为 1.20 g·ml<sup>-1</sup>;黏度为 63.5 mPa·s,由 LVDV-II+PRO 数显黏度计测得;表面张力为 43.2 mN·m<sup>-1</sup>,由 OCAH200 视频光学接触角/表面张力测定仪测得。

### 1.2 微通道设备

实验中采用的微通道设备为同轴环管型微通道,其结构如图 1 所示。同轴环管型微通道设备由流动微槽、带毛细管尖端的玻璃通道和主通道 3 部分构成,上述结构均在 60 mm(长)×40 mm(宽)×2 mm(高)的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基板上,该基板与另一块 60 mm(长)×40 mm(宽)×2 mm(高)的 PMMA 基板以热压黏合法密封。实验时,液相从对称的两侧微槽流入主通道,气相由带毛细管尖端的玻璃通道流入,在主通道中形成气-液两相流动并从出口流出微通道设备。

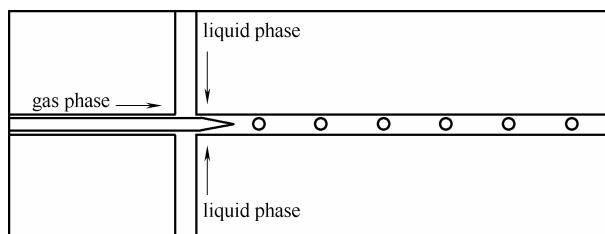


图 1 微通道结构

Fig. 1 Diagram of microchannels

两侧微槽的尺寸均为 20 mm(长)×600 μm(宽)×600 μm(高),由铣刀在 PMMA 基板上加工得到;带毛细管尖端的玻璃通道由内径 500~600 μm 的玻璃毛细管制成,尖端经毛细管控制仪加热拉伸后打磨制成;主通道与分散相通道为同种玻璃微通道。实验中,采用了 3 组尺寸不同的微通道,其毛细管尖端以及主通道的尺寸如表 1 所示。

表 1 同轴环管微通道尺寸参数

Table 1 Parameters of coaxial annular microchannels

| Microchannel code | Diameter of capillary/μm | Diameter of main channel/μm |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|
| No.1              | 76.4                     | 503.2                       |
| No.2              | 116.8                    | 521.2                       |
| No.3              | 184.2                    | 530.2                       |

实验中,气体和液体的输送均由微量注射泵带动锁紧头进样器完成,注射泵的流量范围为 0.1~1000 μl·min<sup>-1</sup>。

### 1.3 在线测试与分析系统

以在线显微摄像平台实现在线测试与分析过

程, 该平台由显微镜、高速摄像头和计算机组成, 其中显微镜的放大倍数为 40, 图像采集频率为 200 帧/秒。

实验中, 采用显微摄像平台观察气-液体系的流动状态, 测定分散气泡/气柱的尺寸。当改变任一操作条件后, 至少等待 5 min 以保证体系流动状态达到稳态。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 气-液两相流型

在同轴环管型微通道中, 通过调整液相和气相的流速, 可得 4 种不同的流型: 气泡流、气泡-气柱过渡流、气柱流和气柱-环隙流过渡流。不同流型的气-液两相流显微照片如图 2 所示。其中, 将分散气相直径小于通道直径的分散流型定义为气泡流; 将分散气相长度 (分散气相轴截面两端的最远距离) 大于通道直径但小于通道宽度 1.5 倍的分散流型定义为气泡-气柱过渡流; 将分散气相长度大于通道宽度 1.5 倍且任意相邻分散气相间均被液膜隔开的分散流型定义为气柱流。从图 2 中可以看出, 对于气泡流、气泡-气柱过渡流和气柱流, 分散气相具有良好的单分散性, 其多分散指数均不大于 5%, 本文中的数据由统计不少于 20 个样本的数据并取其平均值获取。而气柱-环隙流过渡流则属于不稳定的流型。

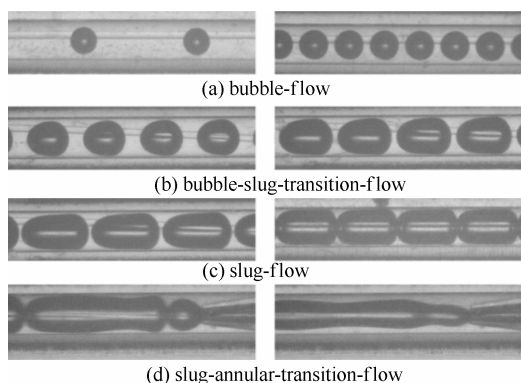


图 2 不同气-液流型显微照片

Fig. 2 Micrograph of different flow patterns of gas-liquid system

实验考察了尺寸如表 1 所示的 3 组微通道中, 气相和液相流量对气-液流型分布的影响, 结果如图 3 所示。从图 3(a)、(b)、(c)中可以看出, 在不同的通道中, 流型图的变化规律类似。在高液相流速下, 当气相流量较低时, 气相容易被高流速的液相剪切分散成气泡; 在此条件下, 增大气相流量, 将导致

分散时间内注入分散气相的量增大, 气泡将逐渐增大, 流型从气泡流转变为气泡-气柱过渡流或气柱流; 当气相流量进一步增大, 气相将更容易突破液封, 流型逐渐转变为气柱-环隙流过渡流。在低气相流速下降低液相流速, 将导致液相对气相的剪切力减小和分散时间的增长, 相应地气相的分散尺寸增大, 流型由气泡流转变为气泡-气柱过渡流; 在此条件下增大气相流量, 流型相应转变为气柱-环隙流过渡流。

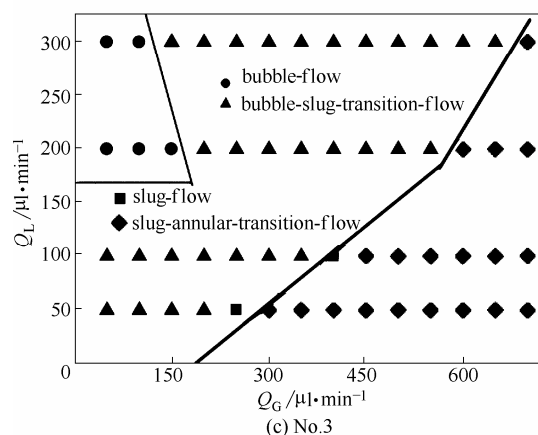
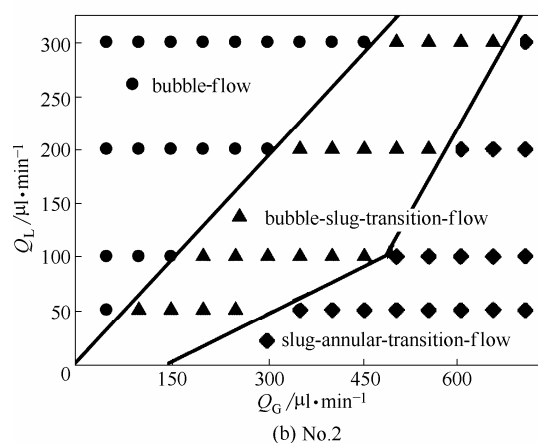
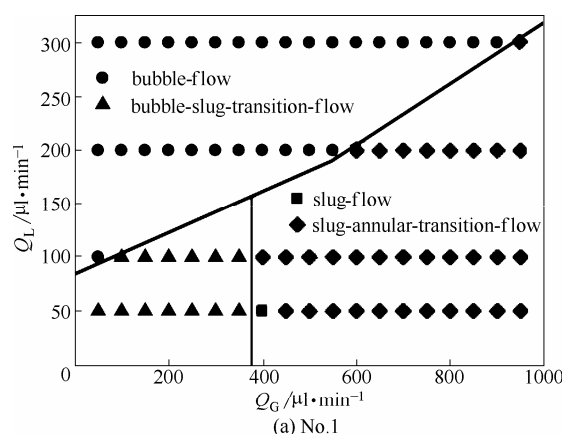


图 3 微通道中气-液两相流型图

Fig. 3 Flow pattern maps of different microchannels

对比图 3(a)、(b)、(c)可知,当主通道尺寸变化不明显时,毛细管尖端的尺寸对流型产生了显著的影响。细尖端更容易得到小尺寸的分散状态。在同样的气、液相流速下,随着尖端尺寸增大,流型逐渐向分散尺寸大的流型过渡(分散尺寸:气泡流<气泡-气柱过渡流<气柱流<气柱-环隙流过渡流)。

## 2.2 分散规律

由于气柱-环隙流过渡流的流动状态相对不稳定,这部分工作中只考察了在气泡流、气泡-气柱分散流和气柱分散流状态下的分散规律。由于在高黏度液体中,气相难以形成对称性良好、轴截面为椭圆的气柱,而容易形成轴截面为子弹形的弹状流[图 2(b)],在此利用轴截面尺寸积分得到所得分散气相的体积,便于比较在不同流型下的分散状态。

实验分别考察了在毛细管尖端尺寸不同的微通道中液相、气相流量对分散气相体积的影响,结果如图 4 所示。从图中可以看出,在毛细管尖端尺寸不同的微通道中,气相的体积均随液相流速的增大而减小,随气相流速的增大而增大。这是由于:随着液相流速的增大,液相对气相的剪切作用增强,分散气泡的形成时间减少,因而所形成的分散气泡体积减小;随着气相流速的增大,在同样的气泡形成时间内注入分散气泡中的气体的量增大,因而所形成的分散气泡体积增大。

## 2.3 描述气相分散尺寸的数学模型

在得到不同微通道中,液相、气相流量影响气相分散尺寸的数据的基础上,通过分析气相分散过程,建立描述气相分散尺寸的数学模型,以预测气相的分散尺寸。

首先,分析气相的分散过程。气相的分散过程可分为气泡生长和界面移动两个部分。在气泡生长阶段,作用于毛细管尖端处的气泡的作用力主要包括:液相的黏性剪切力、气-液相间界面张力和相界面处的压力,如图 5(a)所示。随着气相的注入,气泡体积增大,气-液相间界面处曲率变小,附加压力减小;液相黏性剪切力和气-液相间界面力的相互作用使分散气相在主通道轴向被拉长,在径向被压缩;另一方面,气泡表面积的增加,使液相通过界面对分散气相施加的压力增大。上述作用力的相互作用使气泡断裂和脱落,完成气泡的生长阶段。气泡脱落瞬间,气-液界面曲率半径骤然减小,附加压力瞬间增大,气相侧气相压力不足以使相界面在毛细管尖端(即气相断裂处)维持平衡,在液相侧压力作用下,气-液相界面退回毛细管内,如图 5(b)所示;

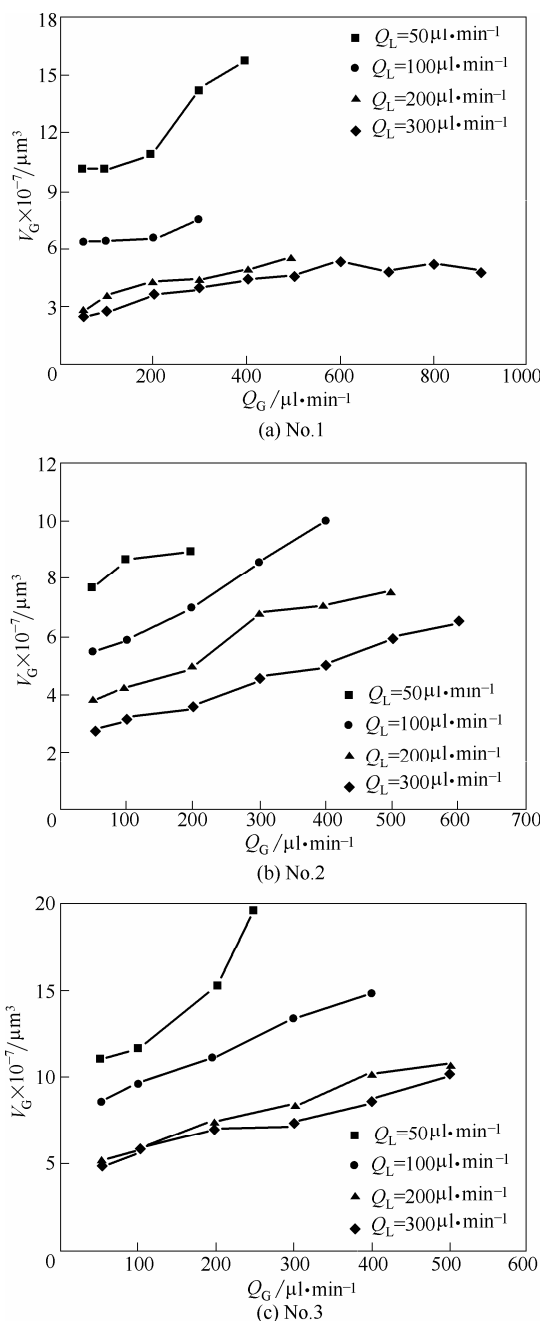


图 4 微通道中气-液两相流量对分散气相体积( $V_G$ )的影响  
Fig. 4 Influence of flow rates of gas and liquid phases on  $V_G$

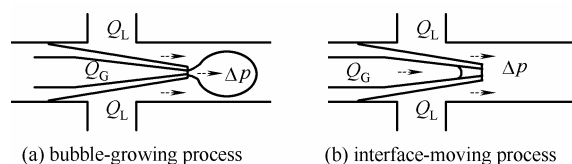


图 5 气相分散过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of bubble dispersion

随着气相的注入,尖端处的压力逐步增大,直至相界面两侧压力重新达到平衡,相界面不再退回;随着气相的进一步注入,相界面重新向尖端方向移动,

直至重新返回尖端,界面移动阶段结束,下一个气泡生成过程开始。

由以上分析可知,气相分散过程与液相黏性剪切力和气-液相间界面力的平衡以及体系的压力变化所导致气-液相界面的变化相关。考虑这两个影响因素,以毛细管数  $Ca$  [式(1)] 表征液相黏性剪切力与气-液界面力的平衡,以气相与液相的流量比  $Q_G/Q_L$  表征在相界面变化过程中气相的注入量,以此建立描述微分散气泡分散尺寸的数学模型,如式(2)所示。

$$Ca = \frac{u_L \mu_L}{\gamma} \quad (1)$$

式中  $u_L$  为液相的流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu_L$  为液相的黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\gamma$  为气-液相间界面张力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

$$d/D = \alpha Ca^\beta (Q_G / Q_L)^\delta \quad (2)$$

式中  $d$  为气泡的当量直径,  $\text{m}$ , 由于所取得的实验数据包括气泡流、气泡-气柱过渡流和气柱流,且相当部分所得的分散气相形状不规则,为统一标准衡量,以与所得分散气相的体积相等的假想球体作为相应的当量直径;  $D$  为毛细管尖端的当量直径,  $\text{m}$ ;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  分别为表征不同影响因素作用方式及强弱的参数,与通道结构及液相与通道壁面的浸润性相关。

分别针对表1中所示的通道 No.1~No.3 所得实验数据,通过多项拟合获得参数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$ , 所得结果如表2所示。模型计算值与实验值的比较如图6所示,从图中可以看出,根据拟合式计算所得值与相同条件下的实验结果符合良好。由此可知,该模型可以较好地描述同轴环管微通道中气体/离子液体体系的微分散过程。对比毛细管尖端尺寸不同的通道参数可知,随着尖端尺寸的减小,液相黏性剪切力和气-液相间界面力的平衡的影响增强。

表2 不同微通道中拟合所得参数

| Table 2 Fitted parameters in different microchannels |          |         |          |
|------------------------------------------------------|----------|---------|----------|
| Microchannel code                                    | $\alpha$ | $\beta$ | $\delta$ |
| No.1                                                 | 3.29     | -0.15   | 0.08     |
| No.2                                                 | 3.06     | -0.07   | 0.10     |
| No.3                                                 | 2.35     | -0.06   | 0.10     |

### 3 结 论

本文研究了  $\text{N}_2/[\text{Bmim}]\text{BF}_4$  体系在同轴环管微通道中的流动和分散性能。实验结果表明,在同轴环管微通道中可以实现稳定的气-液两相流动,在不

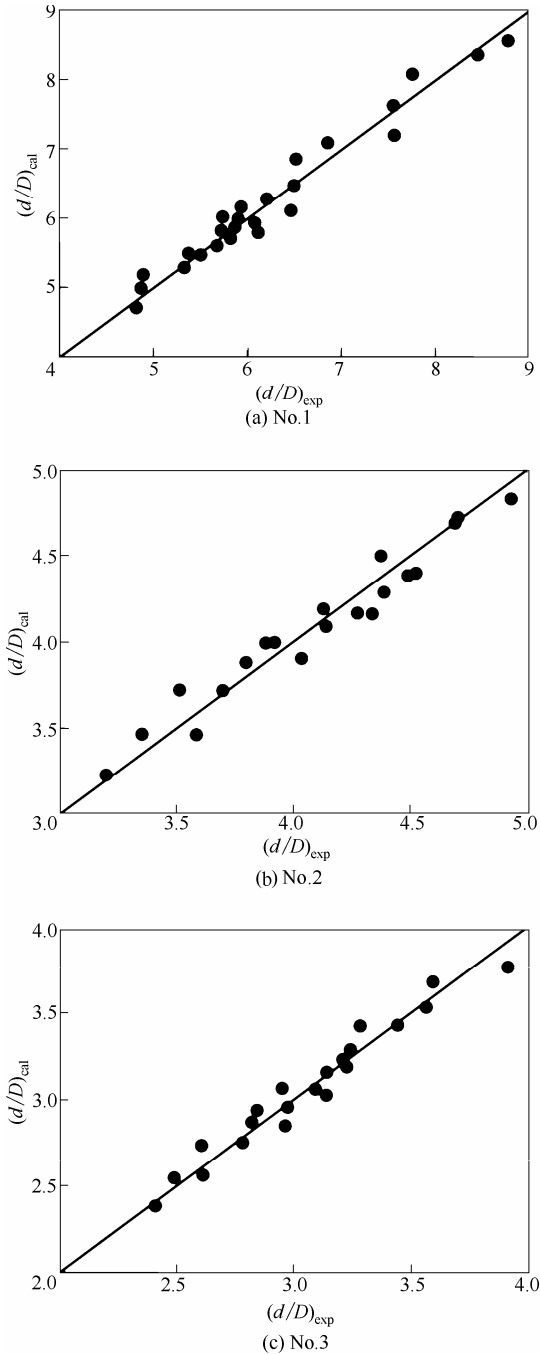


图6 实验值与计算值的比较

Fig. 6 Comparison between experimental data and calculated result

同的气相和液相流速下,  $\text{N}_2/[\text{Bmim}]\text{BF}_4$  体系分别呈现气泡流、气泡-气柱过渡流、气柱流和气柱-环隙流过渡流4种流型。实验考察了通道尖端尺寸、气相和液相流速对  $\text{N}_2/[\text{Bmim}]\text{BF}_4$  体系流动和分散性能的影响,结果表明,尖端尺寸的增大、液相流量的减小和气相流量的增大有助于流动自气泡分散流向气泡-气柱过渡流、气柱流和气柱-环隙流过渡流转变。实验考察了在不同的同轴环管微通道中,气

相和液相流量对气泡分散流、气泡-气柱过渡流和气柱分散流的气相分散尺寸的影响,结果表明,液相流量的增大和气相流量的减小有助于气相分散尺寸的减小。通过分析分散气相形成的机理,建立了描述气相分散尺寸的数学模型,计算值与实验结果符合良好。但是,气相在不同种类和极性的离子液体中的微分散行为,以及气体/离子液体两相体系流动、分散机理的研究尚有待进一步开展。

## References

- [1] Freemantle M. An Introduction to Ionic Liquids[M]. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2010
- [2] Fu Xinmei(付新梅), Dai Shugui(戴树桂), Zhang Yu(张余). Comparison of extraction abilities between ionic liquids and dichloromethane[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* (分析化学), 2006, **34**(5): 598-602
- [3] Lee B C, Stephanie O. Solubilities of gases in the ionic liquid 1-*n*-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonfyl)imide [J]. *J. Chem. Eng. Data*, 2006, **51**(3):892-897
- [4] Anthony J L, Maginn E J, Brenecke J F. Solubilities and thermodynamic properties of gases in the ionic liquid 1-*n*-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2003, **106**(29):7315-7320
- [5] Zhang Y, Yu P, Luo Y N. Absorption of CO<sub>2</sub> by amino acid-functionalized and traditional dicationic ionic liquids: properties, Henry's law constants and mechanisms [J]. *Chem. Eng. J.*, 2013, **214**: 355-363
- [6] Yang Tao(阳涛), Bi Yin(毕崑), Guo Kaihua(郭开华). Carbon dioxide absorption in 1-aminopropyl-3-methylimidazolium bromide aqueous solutions[J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63**(10): 5152-5157
- [7] Liu Weiwei(刘维伟), Hu Song(胡松), Chen Wen(陈文), Xiang Jun(向军), Sun Lushi(孙路石), Su Sheng(苏胜). Synthesis and identification of functional ionic liquids and research on its performance of CO<sub>2</sub> absorption[J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63**(1): 139-145
- [8] Fang Chenggang(方诚刚), Zhang Feng(张锋), Ma Jingwen(马静文), Wang Yuantao(王渊涛), Geng Jiao(耿皎), Zhang Zhibing(张志炳). Performance of CO<sub>2</sub> falling film absorption in mixed aqueous solution of MDEA and amino acid ionic liquid[J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2011, **62**(3): 723-729
- [9] Wang C M, Zheng J J, Cui G K, Luo X Y, Guo Y, Li H R. Highly efficient SO<sub>2</sub> capture through tuning the interaction between anion-functionalized ionic liquids and SO<sub>2</sub> [J]. *Chem. Commun.*, 2013, **49**(12): 1166-1168
- [10] Guo B, Duan E H, Zhong Y F, Gao L A, Zhang X S, Zhao D S. Absorption and oxidation of H<sub>2</sub>S in caprolactam tetrabutyl ammonium bromide ionic liquid [J]. *Energ. Fuel*, 2011, **25**: 159-161
- [11] Lee J K, Kim M J. Hydrogenation of aryl ketones using palladium nanoparticles on single-walled carbon nanotubes in an ionic liquid [J]. *Tetrahedron Lett.*, 2011, **52**(4): 499-501
- [12] Tsyganok A, Holt C M, Murphy S, Mitlin D, Gray M R. Electrocatalytic hydrogenation of aromatic compounds in ionic liquid solutions over WS<sub>2</sub>-on-glassy carbon and Raney nickel cathodes [J]. *Fuel*, 2012, **93**(1): 415-422
- [13] Singh D, Galetto F Z, Soares L C, Rodrigues O E D, Braga A L. Metal-free air oxidation of thiols in recyclable ionic liquid: a simple and efficient method for the synthesis of disulfides[J]. *Eur. J. Org. Chem.*, 2010, **14**: 2661-2665
- [14] Xu J H, Li S W, Chen G G, Luo G S. Formation of monodisperse microbubbles in a microfluidic device [J]. *AIChE J.*, 2006, **52**(6): 2254-2259
- [15] Yue J, Chen G W, Yuan Q, Luo L G, Gonthier Y. Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, **62**(7): 2096-2108
- [16] Tan J, Lu Y C, Xu J H, Luo G S. Mass transfer performance of gas-liquid segmented flow in microchannels [J]. *Chem. Eng. J.*, 2012, **181**:229-235
- [17] Tan J, Lu Y C, Xu J H, Luo G S. Mass transfer characteristic in the formation stage of gas-liquid segmented flow in microchannel [J]. *Chem. Eng. J.*, 2012, **185**:314-320
- [18] Yeong K K, Gavrilidis A, Zapf R, Hessel V. Catalyst preparation and deactivation issues for nitrobenzene hydrogenation in a microstructured falling film reactor [J]. *Catal. Today*, 2003, **81**(4): 641-651
- [19] Chambers R D, Holling D, Spink R C H, Sandford G. Elemental fluorine (XII): Gas-liquid thin film microreactors for selective direct fluorination [J]. *Lab Chip*, 2001, **1**(2): 132-137
- [20] Antes J, Turcke T, Kerth J, Marioth E, Schnurer F, Krause H H, Lobbecke S. Investigation, analysis and optimization of exothermic nitrations in microreactor processes//5th International Conference on Microreaction Technology[C]. France, 2001: 446-454
- [21] Wan J, Bick A, Sullivan M, Stone H A. Controllable microfluidic production of microbubbles in water-in-oil emulsions and the formation of porous microparticles [J]. *Adv. Mater.*, 2008, **20**(17): 3314-3318
- [22] Chambers R D, Spink R C H. Microreactors for elemental fluorine[J]. *Chem. Commun.*, 1999, **10**: 883-884
- [23] Losey M W, Jackman R J, Firebaugh S L, Schmidt M A, Jensen K F. Design and fabrication of microfluidic devices for multiphase mixing and reaction [J]. *J. Micro-electromech. Syst.*, 2002, **11**(6): 709-717
- [24] Garstecki P, Gitlin I, DiLuzio W, Whitesides G M, Kumacheva E, Stone H A. Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(13): 2649-2651
- [25] Yasuno M, Sugiura S, Iwamoto S, Nakajima M, Shono A. Monodispersed microbubble formation using microchannel technique [J]. *AIChE J.*, 2004, **50**(12): 3227-3233
- [26] Xu J H, Li S W, Wang Y J, Luo G S. Controllable gas-liquid phase flow patterns and monodisperse microbubbles in a microfluidic T-junction device [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(13): 133506
- [27] Cubaud T, Tatineni M, Zhong X L, Ho C M. Bubble dispenser in microfluidic devices [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(3): 037302
- [28] Tan J, Li S W, Wang K, Luo G S. Gas-liquid flow in T-junction microfluidic devices with a new perpendicular rupturing flow route [J]. *Chem. Eng. J.*, 2009, **146**(3): 428-433
- [29] Tan J, Du L, Xu J H, Wang K, Luo G S. Surfactant-free microdispersion process of gas in organic solvents in microfluidic devices [J]. *AIChE J.*, 2010, **57**(10): 2647-2656