

非常规介质离子液体中气泡行为研究进展

鲍迪^{1,2}, 张香平¹, 张欣^{1,2}, 董海峰¹, 张锁江¹

(1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要: 离子液体作为一种新型绿色介质, 具有极低的蒸气压、相对高的黏度和结构功能可设计等优势, 特别是其对多种气体具有较高的吸收容量和选择性, 使其在气体分离领域展现了良好的应用前景。然而, 实现离子液体气体分离新技术的工业化, 关键之一就是要对离子液体体系这一非常规介质中的流动性质开展系统研究。本文从气液反应器中最常见的气泡行为出发, 对离子液体体系中的单气泡、多气泡、微通道气泡行为, 分别从实验研究和数值模拟两个角度进行了系统评述, 进一步提出此领域的发展趋势和研究难点。

关键词: 离子液体; 气泡行为; 气体分离; 高速摄像技术; 数值模拟

中图分类号: 06-1

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2015)03-0305-08

引言

气体分离是一个重要的化工单元操作, 广泛应用于资源、环境等多个领域的化工过程。例如, 在资源利用领域中, 天然气、页岩气和生物气中存在的 CO_2 、 H_2S 等杂质气体不仅会降低产品的质量, 增加运输的能耗, 而且会腐蚀运输的管道, 因此需要将目标产物 CH_4 和这些杂质气体分离开。此外, 在环境领域中, 工业生产过程中的 CO_2 、 SO_2 、 NH_3 、 NO_x 等废气, 加剧了酸雨、雾霾、温室效应等环境问题, 将这些废气进行分离、回收或贮存, 则能有效缓解由于大气污染带来的环境问题。现有的气体分离技术主要有溶剂洗涤法、变压吸附法 (PSA)、膜分离法和深冷分离等方法。但通常存在高能耗、高分离成本、原料损失量大、环境污染等缺陷, 因此开发低能耗高效气体分离技术是当前亟待解决的难题。

离子液体 (ionic liquids) 作为一种新型绿色

介质, 近十几年来已成为化学化工领域研究的热点之一。相比于传统有机溶剂, 离子液体具有极低的蒸气压、较高的气体吸收容量、结构功能可设计及腐蚀性低等优势, 在气体分离领域展现了良好的应用前景^[1]。但是, 目前离子液体相关研究主要集中在物性、反应和分离技术, 与流动和传递规律相关研究报道较少, 严重制约了离子液体反应器和设备的放大和工业化应用。不同于分子型介质, 离子液体是由正负离子组成的, 存在特殊的氢键、静电、团簇等相互作用, 从而呈现出复杂的流动和传递规律, 导致适合于水、甘油等分子型溶剂的流体动力学模型难以适用于离子液体这种全离子型介质^{[2]3244}。所以, 开展离子液体体系的流动及传递规律研究, 有望从理论上拓展对全离子型介质放大规律的认识, 为离子液体用于气体分离新技术的工业化应用提供重要的理论基础。

通常来讲, 使用离子液体为吸收剂的气体分

收稿日期: 2015-06-09; 修回日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金 (21425625)

作者简介: 张香平 (1969-), 女, 研究员, 主要从事绿色过程系统集成及气体分离等清洁工艺技术开发。E-mail: xpzhang@ipe.ac.cn

张锁江 (1964-), 男, 研究员, 主要从事离子液体的应用基础研究及绿色过程集成。E-mail: sjzhang@ipe.ac.cn

离技术, 气液接触以气泡的基本形式存在, 是最重要和常见的工况之一。在气液反应器中, 气泡行为则是影响气液传递过程和反应器放大的关键因素。自 20 世纪 60 年代以来, 气泡在液体中的流动行为被广泛地研究, 且发展了一系列模型来预测气泡的各类性质。目前, 气泡行为的研究主要集中在水及常规有机溶剂体系中^[3], 而对于离子液体体系的气泡行为的报道较少。最近, Dong 等^[2]发现离子液体中与水及传统有机溶剂中的气泡行为有所差异, 传统的模型很难对离子液体中的气泡行为进行准确预测。因此, 针对离子液体体系开展的气泡行为和传递规律的研究具有重要的意义和理论价值。

气泡行为, 一般包括单气泡行为和多气泡行为, 涉及气泡直径、速度、变形率、气含率和气液相界面面积等关键参数。这些关键参数既可以通过实验测定, 也可以通过计算流体动力学 (CFD) 的方法来预测。本文从气液反应器中最常见的气泡行为出发, 对近年来离子液体及离子型溶剂体系中的单气泡、多气泡、微通道气泡行为的实验研究和数值模拟进行了系统评述, 总结了气泡行为研究中常用的方法以及影响气泡行为的关键因素, 并进一步提出此领域的发展重点和趋势。

1 离子液体中气泡行为的实验研究

近年来, 已经有相关文献对离子液体体系的气泡行为进行了较为系统的实验研究。一种广泛使用的实验方法是高速摄像技术, 其装置如图 1 所示。该技术通过软件控制高速相机, 按所设定的时间间隔对气泡运动的全过程进行连续拍照, 图像数据存入电脑中进行后续处理。气泡图像的后处理借助计算机软件或编写程序, 在图像中获得气泡的瞬时坐标和轮廓, 并计算得到气泡直径和气泡速度等参数。

1.1 离子液体中的单气泡行为

对于单气泡行为, 通常关注的是气泡速度、

直径、变形率等能够反映单个气泡运动特征的关键参数。气泡的图像分析方法如图 2 所示, 主要用于测量气泡位置和尺寸。在单气泡行为实验中, 气泡通常被假设为椭球体, 通过分析气泡图像, 可以获得气泡的长轴、短轴长度, 并根据式(1)来计算气泡的等效直径:

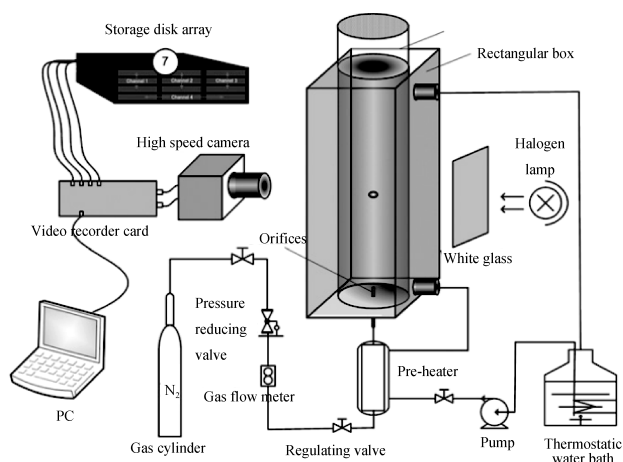


图 1 高速摄像系统示意图

图片来源: 文献[2]3242。

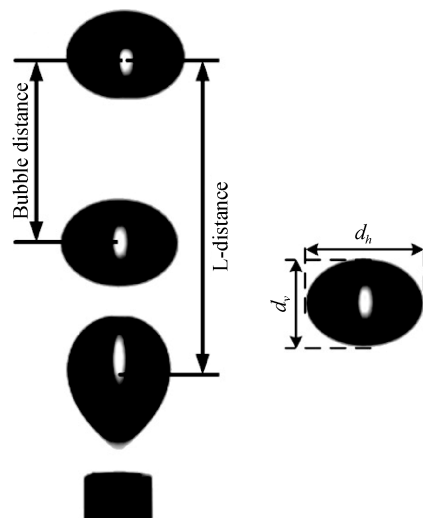


图 2 气泡的图像分析方法

图片来源: 文献[2]3242。

$$d_{eq} = \sqrt[3]{d_h^2 \cdot d_v} \quad (1)$$

气泡速度则是根据两张相邻时刻的图像中气泡位置的差异, 通过式 (2) 计算获得的:

$$V_i = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)\#$$

其中, Δt 为间隔时间, 即两张不同时刻的气

泡图像时间间隔。气泡自脱离孔口之后会经历一小段距离的加速、变形过程, 之后速度和形状会达到稳定状态, 当气泡最终达到稳定状态后, 其 V_i 的平均值即为气泡终端速度 V_{T0} 。

Dong 等^[2]实验研究了静止离子液体中单个气泡的上升及变形过程。实验选取了 [bmim][BF₄]、[bmim][PF₆]、[omim][BF₄] 三种离子液体, 考察了 N₂ 气泡在离子液体中的曳力系数和变形率。实验结果表明, 传统的基于水和常规有机溶剂的气泡曳力系数和变形率的关联式并不适用于离子液体体系。为了更加准确地预测离子液体中的气泡曳力系数和变形率, 作者采用无因次分析的方法对大量的实验数据进行了拟合, 并提出了适用于离子液体体系的曳力系数和变形率的经验公式:

$$C_D = \begin{cases} 22.73Re^{-0.849}Mo^{0.020} & 0.5 \leq Re \leq 0.5 \\ 20.08Re^{-0.636}Mo^{0.046} & 5 \leq Re \leq 50 \end{cases} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{1 + 0.0187(Re \cdot Eo)^{0.67}} \quad (4)$$

以上公式对于高粘度纯离子液体体系具有很好的预测效果, 并广泛应用于离子液体体系多相流数值模拟中, 为离子液体反应器的模拟与放大提供基础数据。但是, 随着液体黏度的降低, 当 Re 增大到超出式(3)的适用范围时, 以上公式的预测效果较差, 说明该公式并不能很好地适用于低黏度的离子液体体系。

为了更加准确预测低黏度离子液体体系气泡行为, 最近, Zhang 等^[4]对黏度范围更大的离子液体体系单个气泡运动过程进行了研究。实验选取了 [bmim][BF₄]、[bmim][NO₃]、[omim][BF₄]、[bpy][BF₄]、[bmim][N(CN)₂] 五种离子液体及其水溶液, 通过改变水含率来调节离子液体的黏度, 并考察了水含率对 CO₂ 气泡行为的影响, 并建立了离子液体体系的气泡速度、直径的预测模型:

$$V_T \left[\frac{d_{eq}^2 (\rho_l - \rho_g)^2}{\rho_l g} \right]^{1/3} = 0.355 Mo^{-0.172} Eo^{0.548} \quad (5)$$

$$d_{eq} \left[\frac{D_o \sigma}{\rho_l g} \right]^{-1/3} = 2.675 Fr_o^{0.028} Mo^{0.016} \quad (6)$$

上述模型对于纯离子液体及离子液体水溶液均有良好的适用性, 通过模型预测得到的气泡速度、直径, 可以进一步根据气泡流型图来确定鼓泡塔内的气液流动形式, 从而为鼓泡塔设计提供理论指导。由式(6)中可以看出, 相比于表面张力, 离子液体黏度对气泡行为的影响更大, 实验结果也证明了这一点。因此, 可以通过添加少量水的方法来使体系快速有效地降黏, 从而极大地改变离子液体体系的气泡行为。

此外, Okuno 等^[5]研究了磁场作用下磁性离子液体 [bmim][FeCl₄] 中 N₂ 气泡的运动轨迹。实验中采用侧边进气的方法, 在玻璃容器的侧边形成 0.5~1 mm 直径的小气泡, 然后在气泡一侧放置一块圆柱形磁铁来提供磁场, 图 3 展示了磁场的存在与否对于气泡运动轨迹的影响。从实验结果可以看出, 由于磁性离子液体在磁场作用下向磁极方向运动, 气泡运动轨迹因此向远离磁极的方向偏离。同时, 作者还提出了气泡运动轨迹的理论预测公式:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{-\mu_0 \chi H_z (\partial H_z / \partial z)} \quad (7)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, χ 为离子液体的体积磁化系数, H_z 为磁场强度。不同于一般的无因次关联式, 上式具有实际的物理意义, 并且能够较为准确地预测磁场下磁性离子液体中的气泡运动轨迹。然而, 对于磁场强化离子液体反应传质过程, 该模型还不能满足工程放大的需求, 需要对磁场中的气泡行为进行深入系统的研究。

1.2 离子液体中的多气泡行为

不同于单气泡行为, 多气泡行为的研究更多关注气含率、气液相界面积、气泡尺寸分布等流动参数。除去高速摄像技术之外, 操作和后处理简单的电导探针技术成为了研究多气泡行为的常用实验手段之一, 由于电导探针具有润湿特性,

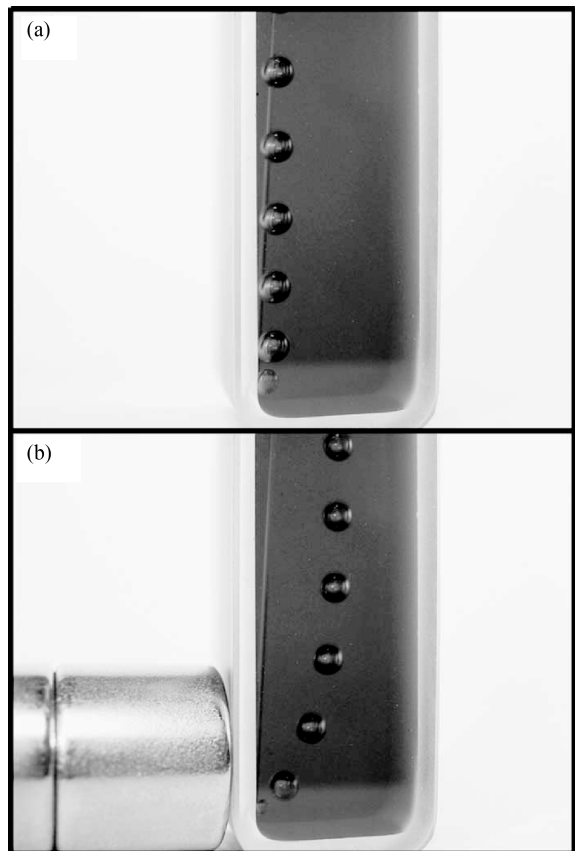


图3 N_2 气泡在磁性离子液体中的运动轨迹: (a)无磁场, (b)有磁场

图片来源: 文献[5]。

该技术仅限于气含率较高的条件下使用。电导探针技术是基于气液两相电导率不同的原理, 通过测量流体电导率的变化进而获得气液两相分布的方法。在此基础上发展起来的电阻层析成像技术 (ERT), 则是通过多点、分布式测量同一截面流体电导率的变化以及重构算法, 来获得不同位置的气含率分布和整个截面的平均气含率。

Kaji 等^[6]分别采用高速摄像技术和电导探针技术对离子液体中的多气泡行为进行了研究。实验装置是一个直径 38 mm、高度 800 mm 的小直径鼓泡塔。实验主要对比了相同条件下, [emim][EtSO₄]离子液体和甘油水溶液 (甘油+15%水、甘油+15%水+1.3%盐) 中的空气气泡的流型和气含率, 发现这两类体系中的气泡流动形式有所不同, 气含率也有较大差异, 如图 4 所示。以上三种体系的密度、黏度、表面张力十分接近, 而电导率

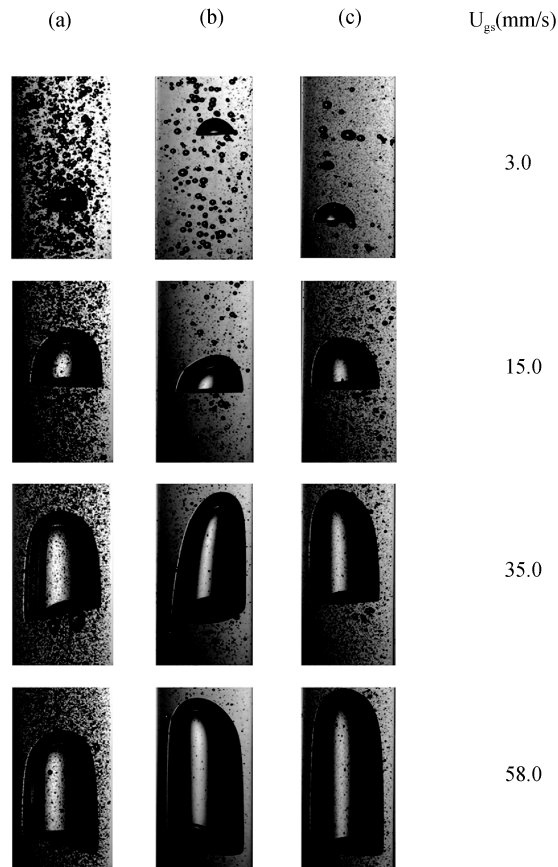


图4 不同气速下(a)[emim][EtSO₄], (b)甘油+15%水, (c)甘油+15%水+1.3%盐中的气泡流型

图片来源: 文献[6]7940。

则有较大的差异。该研究通过比较静液体积和通气后气液体积的体积差得到气含率, 并提出了离子液体气含率 and 无量纲电导率 (Ge^*) 之间的关联式:

$$\varepsilon_g = 2.127Ge^{*4} - 5.063Ge^{*3} + 3.878Ge^{*2} - 0.9446Ge^{*} + 1.002 \quad (8)$$

上式可应用于特定的离子液体[emim][EtSO₄], 但是能否适用于更大种类范围的离子液体体系还需要检验。

然而, 其他研究认为离子液体中的气泡行为应该与和流动有关的参数, 如密度、黏度、表面张力等相关。董海峰^[7]采用 ERT 和高速摄像技术相结合的方法研究了[bmim][BF₄]离子液体中空气的多气泡行为。实验中通过改变表观气速, 观测气含率的变化, 进而判断流型转变的情况。实验结果表明, 随着表观气速的增加, 塔内流型由气泡分布均匀的均匀鼓泡区向气泡聚并频繁的非

均匀鼓泡区过渡, 如图 5 所示。同时, 作者还对比了不同气速下瞬态气含率和平均气含率的相对偏差, 发现在均匀鼓泡区内相对偏差较小; 随着气速增大, 气含率相对偏差明显增大, 塔内流动状态处于过渡区; 气速进一步增大后, 气含率相对偏差趋于稳定, 此时塔内流动过渡到非均匀鼓泡区。此过程也是塔内流型由层流向湍流过渡的过程。

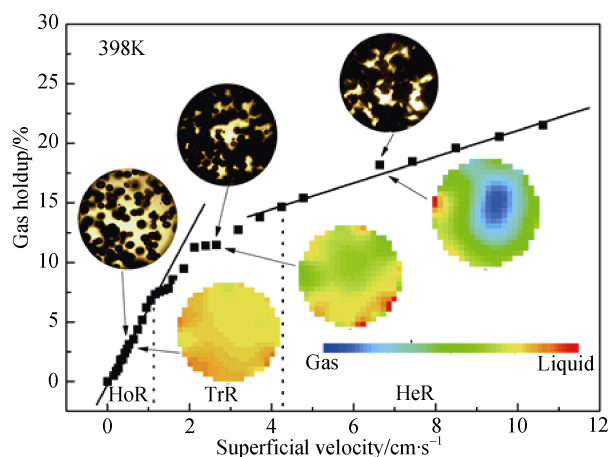


图 5 表观气速对气含率的影响

图片来源: 文献[7]125。

Zhang 等^[8]采用高速摄像技术, 系统研究了 [bmim][BF₄] 离子液体中 N₂ 气泡和 CO₂ 气泡的尺寸及其分布。实验通过测量液位高度变化获得气含率数据, 并根据气泡直径和气含率数据计算气液相界面积。实验结果表明, 增加气速后气泡聚并频率增加, 大气泡所占比例增大。在相同工况下, CO₂ 气泡尺寸小于 N₂ 气泡, CO₂-[bmim][BF₄] 体系的气含率也更高。同时, 作者采用无量纲分析的方法提出了气泡平均尺寸的预测公式:

$$\frac{d_{32}}{d_o} = 33.67 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.103} \left(\frac{\sigma_l^3 \rho_l}{g \mu l^4} \right)^{-0.034} \left(\frac{H}{D} \right)^{0.175} \left(\frac{U_g}{\sqrt{gD}} \right)^{0.278} \quad (9)$$

上式对于 CO₂-[bmim][BF₄] 和 N₂-[bmim][BF₄] 体系均有良好的适用性。然而, 式中出现了轴向高度 H 和塔径 D 等设备相关参数, 使得该式仅适

用于无内构件的圆柱形鼓泡塔。对于其他离子液体体系或者其他类型的鼓泡塔反应器, 可以采用相应的实验数据并根据式(9)的形式重新进行关联, 获得新的气泡平均直径预测公式。

此外, 除了离子液体, Okonkwo 等^[9]采用 ERT 对 NaCl 水溶液中的气泡行为进行了研究。实验考察了 NaCl 浓度对气含率和气相速度的影响, 结果表明, 随着 NaCl 水溶液电导率增加, 反应器内气含率增大, 气相速度降低。作者指出, 出现这种现象是由于随着离子浓度增加, NaCl 水溶液电导率增加的同时, 该体系黏度也会增大, 导致整体气含率增大, 气相速度降低。这与室温离子液体体系中的现象是相似的, 例如, Zhang^{[4]431} 等也指出在含水离子液体体系中, 水含量升高会使体系黏度下降, 气泡速度增大。

1.3 离子液体体系的微通道气泡

近年来, 微通道技术由于传质效率高、设备放大简单等优点而被研究人员广泛关注。最近, 谭璟等^[10]研究了 N₂-[bmim][BF₄] 体系在微通道中的流动和分散行为。实验过程中采用高速摄像技术对截面为 0.6 mm×0.6 mm 的矩形通道中的气泡进行拍摄。相比于宏观气泡的高速摄像装置, 该装置在高速摄像机镜头前加装了一个放大倍数为 40 的显微镜, 微通道水平放置在显微镜镜头下。实验结果表明, 在不同气液流速下, 该体系会呈现 4 种不同的流型, 并根据实验结果绘制了流型图。同时, 为了定量描述 N₂ 在微通道中的分散效果, 采用无量纲分析的方法建立了微气泡尺寸的数学模型:

$$\frac{d}{D} = \alpha Ca^\beta \left(\frac{Q_c}{Q_l} \right)^\gamma \quad (10)$$

其中, α 、 β 、 γ 表示了不同影响因素作用的强弱, 对于不同结构的微通道, 以上参数具有不同的值。

da Silva 等^[11]开发了一种高压流体微通道装置, 微通道为直径 0.1 mm 到 0.665 mm 不等的圆

形孔道, 操作压力最高可达到 30 MPa。基于此装置, 作者研究了高压下 CO_2 -[bmim][PF₆]体系在微通道中的流动行为, 通过高速摄像技术获取了微气泡运动图像, 并对其进行了分析。结果表明, 由于高压下 CO_2 吸收的原因, 随着气泡运动距离的增加, 气泡尺寸会有一定程度的减小, 气泡形状也会由开始的子弹状逐渐变为球形, 如图 6。

微通道气泡行为很大程度上依赖于微通道的结构, 现有的离子液体微通道气泡研究结论只在特定结构的微通道中适用。所以, 对于离子液体体系微通道气泡, 还需要进行系统研究并建立普适性的模型。

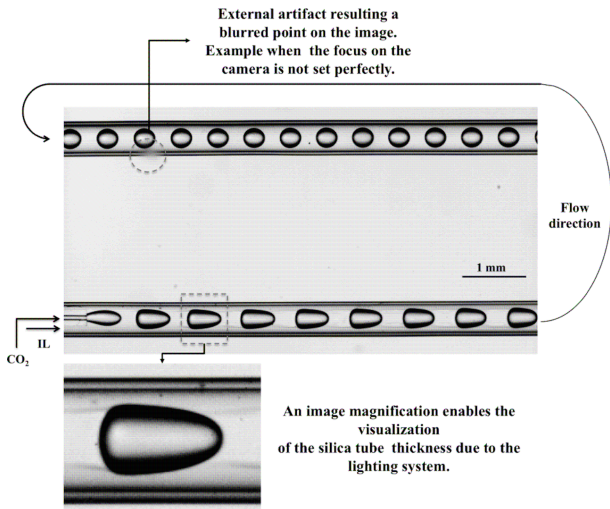


图 6 随运动距离增加微通道内流型的变化

图片来源: 文献[11]1932。

2 离子液体中气泡行为的数值模拟

数值模拟方法主要是采用计算流体力学的基本原理, 通过求解流体质量守恒方程、动量方程等对流-扩散方程, 来获得流体运动性质的方法。质量守恒方程和动量方程通常写作如下形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \tau + \vec{F} \quad (12)$$

相比于实验方法, 数值模拟克服了实验难以直接测量流体内部速度、压力、浓度分布的缺点,

能够对流体内部流动状态直接进行预测; 但是, 由于数学模型中存在一些假设, 数值模拟结果与实验结果会存在一定程度上的偏差, 这时可以通过修正模型变量, 或者对式(12)中的广义源项 $\vec{F}$ 进行修正, 以此来使模拟结果更加精确。

2.1 离子液体中的单气泡行为

在众多的气液两相流模型中, 通常 VOF 方法和 Level-Set 方法被广泛地应用在单气泡行为的数值模拟中, 用来追踪气液相界面。VOF 方法在式(11)、式(12)的基础上添加了一个流体体积分率的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}) = 0 \quad (13)$$

通过以上方程, 可以实现对流体内部相分率的追踪, 结合表面张力模型便可以捕获清晰的相界面。Wang 等^[12]采用 VOF 模型对 [bmim][BF₄]、[bmim][PF₆]、[omim][BF₄] 三种离子液体中单个 N_2 气泡的运动过程进行了模拟。为了准确预测气泡速度, 作者在动量方程中引入了一个描述气液之间相互作用的源项, 其形式如下:

$$\vec{F}_{LG} = 2 \frac{f \rho_g \vec{v} |\vec{v}|}{d_b} \quad (14)$$

$$f = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (15)$$

其中, f 是摩擦因子。这里摩擦因子采用了一个常用的经验关联式, 对于所研究的几种离子液体, 这个关联式是能够较准确地描述气液之间的相互作用, 进而能够获得准确地气泡速度预测结果。对于其他体系或更大范围的离子液体体系, 我们可以通过更改摩擦因子的表达式来获得更为准确的模拟结果。但是, 以上公式还是基于经验关联式发展而来的, 在用于离子液体体系时没有深入的理论基础。

Level-Set 方法则是构造了一个函数 ϕ , 其值为 0 时则为运动界面, 并建立了 ϕ 函数传递方程替换式(13), 其形式如下:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \phi = 0 \text{ #####(16)}$$

该方法中求解的 ϕ 函数直接表征了气液界面, 所以对于一些复杂的界面形状也能够准确模拟; 但是, 由于 ϕ 函数并不能和体积分数一样准确体现物质的量, 所以其守恒性略次于 VOF 方法。Carvajal 等^[13]使用 Level-Set 方法对[bmim][BF₄]、[bmim][PF₆]两种离子液体及与其物性相近的甘油水溶液中的 N₂ 气泡生长、脱离过程进行了数值模拟。文中重点分析了气泡脱离过程, 对气泡速度的变化进行了动态分析。作者指出, 对于低黏度体系, 数值模拟结果会存在一定偏差, 原因是气液界面处的速度梯度很大, 会导致界面发生变形。此外, 还获得了气泡曳力系数的实验与模拟结果, 并与文献中的经验关联式计算结果进行了对比, 结果表明式(3)能够提供较准确的预测结果。

2.2 离子液体中的多气泡行为

不同于单气泡行为的数值模拟, 研究多气泡行为时通常采用的模型基本分为两种: Eulerian 模型和 Lagrangian 模型。这两种模型的区别是对于气泡的处理, Eulerian 模型中, 气泡被视为连续的流体, 与液相使用相似的控制方程; Lagrangian 模型将每个气泡视为颗粒, 并对每个颗粒进行追踪。相比之下, Lagrangian 模型更接近真实情况, 模拟结果也更加精确, 但是随着气泡数目的增加, 计算成本显著增大, 所以, 在 Eulerian 模型能够提供足够精确的结果时, 采用 Eulerian 模型对多气泡行为进行模拟是一个比较好的选择。采用 Eulerian 模型对多气泡行为进行模拟时, 通常通过曳力源项来描述气液两相间的相互作用。对于离子液体体系, Dong 等^{[2]3245}提供了一个较为准确的曳力模型, 并应用于多气泡行为的模拟中。

Wang 等^[14]采用 Eulerian 模型对离子液体吸收 CO₂ 过程进行了模拟。模拟体系液相为[bmim][PF₆]离子液体, 气相为 CO₂ 体积分数为 10%的 CO₂、

N₂ 混合气。作者在考虑气液相间相互作用时, 引入式(3)来对气泡运动过程中的曳力系数进行了修正。模拟考察了不同温度、气速下, 反应器内气含率、气泡尺寸分布以及气液相界面积, 并与实验值取得较好的一致性。

此后, 徐琰等^[15]采用 Eulerian 模型与群平衡模型(PBM)耦合的方法模拟了[bmim][BF₄]-空气体系中的多气泡行为。其中 PBM 可以用来模拟气泡聚并、破碎, 是描述多相流中分散相尺寸分布的通用方法。根据模拟与实验结果的对比, 作者指出当采用式(3)替换传统介质中的曳力系数计算方法时, 离子液体体系中气含率预测的准确性能够有显著地提升, 平均误差能够由 22.8%降低至 8.1%。同时, 模拟结果表明, 随着气速增大, 反应器内气含率升高, 且径向分布更加均匀; 并且气含率沿反应器轴向呈周期分布, 气速增大, 该周期变小。

3 结语

目前, 针对于离子液体体系的气泡行为研究还处于起步阶段, 对于离子液体体系中表现出与常规体系不同的气泡行为, 还缺乏明确的理论解释, 需进一步完善。实验方面, 一是需要开发新技术, 对离子液体体系气液界面进行深入研究, 从微观层次对离子液体体系与常规体系的不同进行解释; 二是基于离子液体的特殊结构, 对外电场、磁场作用下的离子液体的流动行为进行研究, 开发外场调控气泡行为的新方法。模拟方面, 需要摆脱经验关联的传统思维, 建立符合离子液体特征的理论模型, 为离子液体气泡行为的数值模拟建立坚实的理论基础。在此基础之上, 针对工业实例, 研究特定工况下的离子液体体系气泡行为, 为离子液体气液反应装置的工业化应用提供理论指导。

参考文献

- [1] Zhang X P, Zhang X C, Dong H F, et al. Carbon Capture

- with Ionic Liquids: Overview and Progress[J]. *Energy Environmental Science*, 2012, 5: 6668-6681.
- [2] Dong H F, Wang X L, Liu L, et al. The Rise and Deformation of A Single Bubble in Ionic Liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 3240-3248.
- [3] Kulkarni A A, Joshi J B. Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas-Liquid Systems: A Review[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44: 5873-5931.
- [4] Zhang X, Dong H F, Bao D, et al. Effect of Small Amount of Water on CO₂ Bubble Behavior in Ionic Liquid Systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53: 428-439.
- [5] Okuno M, Hamaguchi H O, Hayashi S. Magnetic Manipulation of Materials in a Magnetic Ionic Liquid[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89: 132506.
- [6] Kaji R, Zhao D, Licence P, et al. Studies of the Interaction of Ionic Liquid and Gas in a Small-Diameter Bubble Column[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48: 7938-7944.
- [7] 董海峰. 离子液体反应器内气液两相流动特性的研究[D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2010.
- [8] Zhang X, Dong H F, Huang Y, et al. Experimental Study on Gas Holdup and Bubble Behavior in Carbon Capture Systems with Ionic Liquid[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 209: 607-615.
- [9] Okonkwo A D, Wang M, Azzopardi B. Characterisation of A High Concentration Ionic Bubble Column using Electrical Resistance Tomography[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 31: 69-76.
- [10] 谭璟, 赵菁菁, 徐建鸿, 等. 微通道中气体/离子液体两相流动与分散性能[J]. *化工学报*, 2014, 65: 55-60.
- [11] da Silva N M P, Letourneau J J, Espitalier F, et al. Transparent and Inexpensive Microfluidic Device for Two-Phase Flow Systems with High-Pressure Performance[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2014, 37: 1929-1937.
- [12] Wang X L, Dong H F, Zhang X P, et al. Numerical Simulation of Single Bubble Motion in Ionic Liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65: 6036-6047.
- [13] Carvajal D, Carlesi C, Melendez-Vejar V, et al. Numerical Simulation of Single-Bubble Dynamics in High-Viscosity Ionic Liquids Using the Level-Set Method[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2015, 38: 473-481.
- [14] Wang X L, Dong H F, Zhang X P, et al. Numerical Simulation of Absorbing CO₂ with Ionic Liquids[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2010, 33: 1615-1624.
- [15] 徐琰, 董海峰, 田肖, 等. 鼓泡塔中离子液体-空气两相流的 CFD-PBM 耦合模拟[J]. *化工学报*, 2011, 62: 2699-2706.

Research Progress of Bubble Behavior in Ionic Liquid Systems

Bao Di^{1,2}, Zhang Xiangping¹, Zhang Xin^{1,2}, Dong Haifeng¹, Zhang Suojiang¹

(1. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

Abstract: As a new class of green solvents, ionic liquids (ILs) are very promising for gas separation due to their high capacity and selectivity of gases. Among the research on ILs, the hydrodynamics in IL systems is essential for industrial application. This paper reviews the bubble behavior in IL systems, which is common in reactors for gas separation. The single bubble behavior, multi-bubble behavior and bubble behavior in microchannels are discussed in the aspects of experiment and numerical simulation respectively. Furthermore, the tendency and challenges of research on bubble behavior in IL systems are proposed.

Keywords: ionic liquid; bubble behavior; gas separation; high-speed photography; numerical simulation