



黏性流体中气泡上升运动行为的实验研究

周 宸, 林文博, 王勇军, 张先明, 陈世昌, 陈文兴

(浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 杭州 310018)

摘 要: 为了探究气泡在黏性流体中的运动变化从而进一步研究起泡脱挥机理, 采用高速摄影法测定了气泡在静置流体中的上升运动行为及其形变特性, 考察气泡在上升运动过程中脱离时间、等效脱离直径、瞬时速度及纵横比等参数的变化, 并分析气泡在不同进气流量下的运动轨迹及聚结、分离过程。研究表明: 在黏性流体中气泡的运动轨迹趋于直线型上升, 相较于水中的“S”型上升轨迹更加稳定; 在高流量下气泡在水中呈现双气泡、三气泡聚集态, 而在黏性流体中进气流量达到 0.6 L/min 时气泡才出现聚结现象。随着进气流量增加, 气泡脱离时间减小, 脱离孔口时直径增大, 同时瞬时速度增加。通过观察气泡上升运动行为能够为起泡脱挥理论分析提供一定的实验基础。

关键词: 黏性流体; 高速摄影法; 气泡; 运动行为; 聚结

中图分类号: O357.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2021) 11-0780-06

Experimental study on the upward motion of bubbles in viscous fluids

ZHOU Chen, LIN Wenbo, WANG Yongjun, ZHANG Xianming, CHEN Shichang, CHEN Wenxing

(National Engineering Lab for Textile Fiber Materials and Processing Technology,
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to explore the motion changes of bubbles in the viscous fluid and further study the foam-devolatilization mechanism, the author used high-speed photography to determine the upward motion and deformation characteristics of bubbles in static fluids. Changes in parameters such as the detachment time, equivalent detachment diameter, instantaneous velocity and aspect ratio of bubbles during the upward motion were investigated, and the motion trajectory, aggregation and separation processes of bubbles under different air inflows were analyzed. Our study indicates that the bubbles tend to rise perpendicularly in viscous fluids, which is more stable than the “S”-shaped upward trajectory in water. At higher flow rates, bubbles show double-bubble and tripe-bubble aggregation states in water. The bubbles don't aggregate unless the air inflow in viscous fluids reaches 0.6 L/min. With the increase of inflow rate, the bubble detachment time decreases, the diameter increases and the instantaneous velocity increases, when it is detached from the aperture. A certain experimental basis can be provided for theoretical analysis of foam-devolatilization, through the observation of the upward motion of bubbles.

Key words: viscous fluid; high-speed photography; bubble; motion behavior; coalescenc

0 引 言

气液两相运动不仅在自然界随处可见, 在材料、化工、能源、食品等工业生产过程中也具有广泛应

用。气泡流体体系涉及气泡与流体间的相互作用, 包括气泡间的接触、聚并和破碎等复杂的运动行为, 工业生产中丰富的气泡运动行为对气液两相间热质传递性能至关重要^[1-2]。Grace 等^[3]根据大量实验数

收稿日期: 2021-02-10 网络出版日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51803187)

作者简介: 周 宸(1996—), 男, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 主要从事聚合反应工程方面的研究。

通信作者: 陈世昌, E-mail: scchen@zstu.edu.cn

据绘制了静止单气泡在上升过程中的形状相图。Kang 等^[4]对横流中的气泡上升运动进行了实验研究,结果表明随着流速增大,气泡整体尺寸减小。薄宇轩等^[5]关注到静水中气泡间垂直距离对运动行为的影响,孔口流量越大使气泡间距离减小,气泡趋向于无序上升,且增加了碰撞聚结的几率。一般认为,气泡在黏性流体中的生长及运动过程受到浮力、表面张力、黏性力等多种力的综合作用^[6]。Iwata 等^[7]通过可视化实验研究了气泡在明胶溶液凝胶化过程中的形变特性,发现黏性力的增加使气泡速度降低同时变得扁平化。Sattari 等^[8]以蒸馏水和聚合物溶液作为不同液相研究时发现,在低黏度液相中黏度对气泡直径几乎没有影响,而在高黏度液相中气泡直径随黏度增加而增大。Xu 等^[9]基于实验基础提出了一个新的参数模型,能够较好地表征气泡在非牛顿流体中的形状变化。

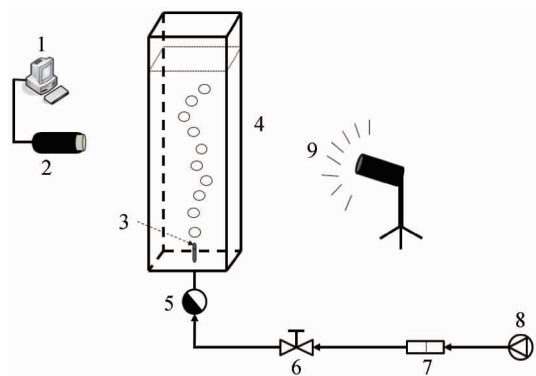
以水和低黏流体为代表性液相,其内部气泡运动行为在气体混合、传热和分离等基本单元操作过程中普遍存在,受到了研究者的密切关注,因而有大量研究报道了静水中单气泡的生长运动规律,而有关黏性体系中的多气泡脱挥过程等研究关注较少。本文使用高速摄影法研究了水和羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC)溶液中气泡上升过程的复杂变化,通过数字图像处理测定了气泡脱离时间、等效脱离直径、瞬时速度与纵横比等参数,并分析气泡在不同进气流量下的运动轨迹及聚结、分离过程。

1 实验装置

本文设计了可视化的气液体系气泡运动行为观察实验平台,如图1所示。实验平台中装置主要组成部分为气泡发生器、实验箱体、高速摄影系统与照明系统。为了便于可视化研究气泡运动过程,箱体采用有机玻璃制成,尺寸为60 mm×60 mm×180 mm(壁面厚度为3 mm),在底面中心有一固定直径和高度的气泡生成孔口,气体流量通过玻璃转子流量计控制。

羧甲基纤维素钠是一种可溶性粉末,其水溶液为非牛顿流体,流变特性表现为剪切变稀,制备方法简单,通常被用作聚合物溶液的实验模拟物质^[10]。本文分别采用水和CMC(5000~15000 mPa·s)溶液作为液相,氮气作为气相(纯度为99.99%),液相高度保持160 mm。所用CMC溶液经旋转流变仪(Anton Paar MCR301)测得动力黏度为0.050 Pa·s,

水的动力黏度在本研究环境中为0.001 Pa·s。使用高速摄像机捕捉气泡的生长运动过程,获得的图像通过数据传输到计算机,再根据数字图像处理分析获得气泡运动瞬时速度及运动轨迹等行为特征。



1.计算机;2.高速摄像机;3.气孔;4.箱体;5.单向止回阀;
6.流量控制器;7.稳压阀;8.气泵;9.光源

图1 气泡发生装置及高速摄像系统示意

2 结果与分析

2.1 气泡运动形态及轨迹分析

气泡在浮力作用下逐渐上升,受到阻力和浮力双重影响,气泡上下表面存在一较大的压力差,从而引发振荡变形^[11]。图2为实验中所观察到气泡在水中上升运动时形状变化的照片,由图2可知,在低流量(0.1 L/min)下,气泡以单气泡形式独立上升,形状和运动轨迹较为均匀和稳定。随着流量增加,气泡体积增大,并开始出现多气泡“聚结”现象,即多个气泡在上升运动中还未达到融合状态前的一个过渡阶段;当进气流量为0.2 L/min时,气泡以双气泡形式螺旋上升,继续增大进气流量,气泡出现三个及以上的聚结形态。进气流量不同导致多气泡体系对液相扰动差异明显,气泡上升过程受到不对称的湍流涡影响而表现出多种聚结状态。

将液相由水换成黏性较大的CMC溶液时,气泡运动受黏性力束缚表现出与水相中明显不同的动力学行为^[12]。Abbassi 等^[13]采用数值模拟的方法研究了黏性流体中尾流效应对气泡上升运动行为的影响,表明高流速下尾流效应将导致尾随气泡加速并最终与前导气泡聚并。图3为CMC溶液中不同进气流量下气泡上升的照片。图3表明,在低流速下,液相体系的黏性力阻碍了气泡头部的上升运动,气泡从刚脱离气孔时的圆球形转变为规则的椭球形,表面受到轻微的振荡形变,在稳定上升过程中运动轨迹接近直线型;气体流量上升至0.6 L/min,气

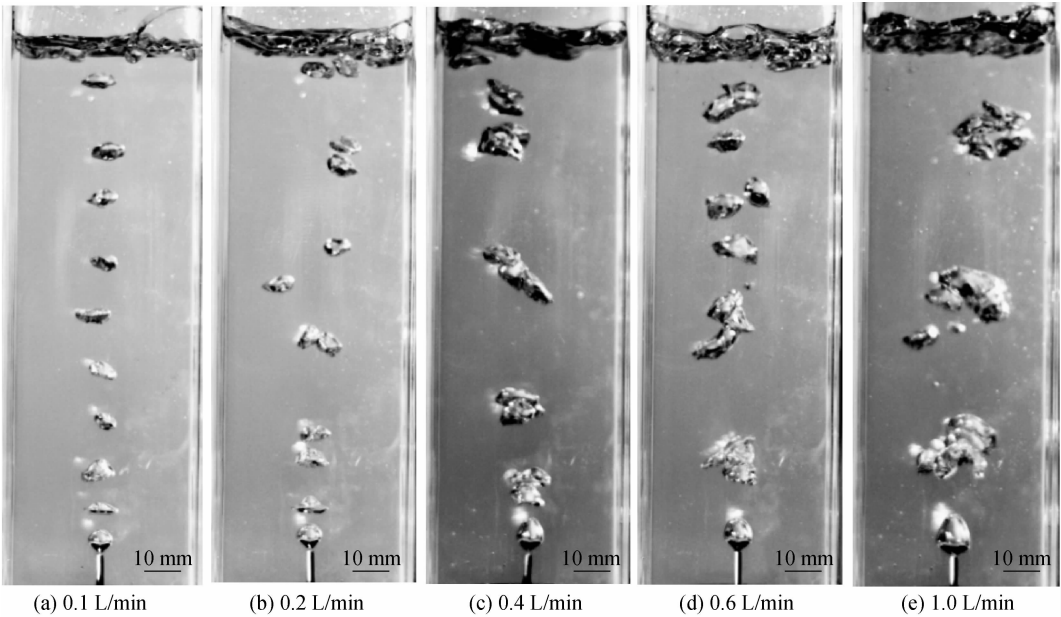


图 2 不同流量下气泡在水中上升状态照片

泡脱离气孔的频率加快,相邻气泡之间的垂直距离缩短,导致尾随气泡受到显著的尾流效应影响,并逐渐追赶上前导气泡,开始出现聚结现象;在高流速下,气泡表现出不同生成模式。如图 3(e)所示,当

进气流量为 1.0 L/min 时,气泡在孔口附近出现双气泡脱离形式,其原因是第一个气泡脱离孔口后气孔表面难以保持液相平衡,尾随气泡受到尾涡的强烈卷吸作用^[14]而被裹入底部。

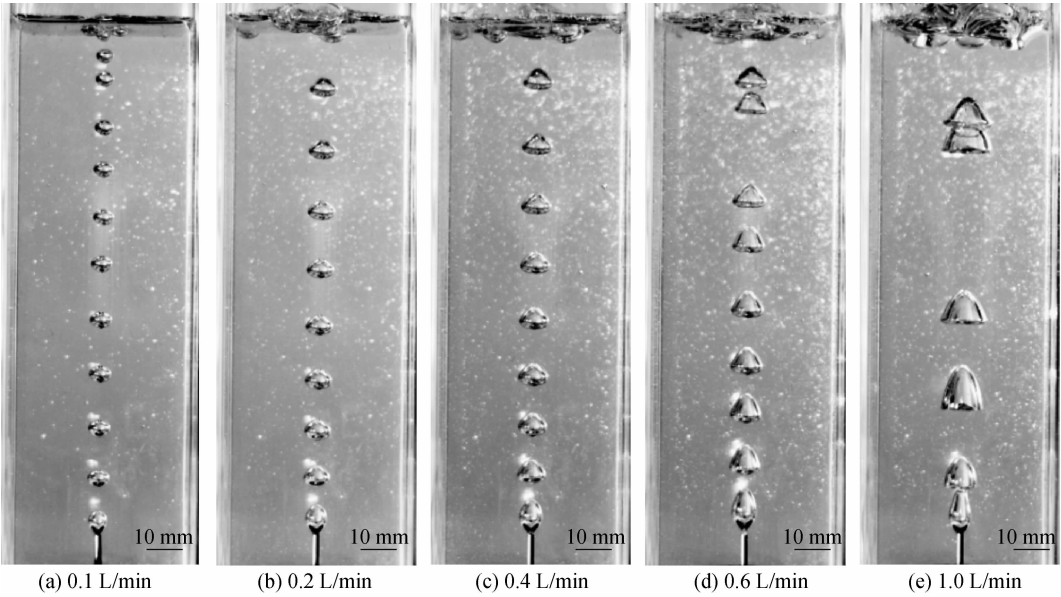


图 3 不同流量下气泡在 CMC 溶液中的上升状态照片

进一步分析气泡形态随运动时间的演变过程,在高气体流量(1.0 L/min)下气泡在 CMC 溶液中聚结过程如图 4 所示,前导气泡受阻力影响以球帽状率先脱离孔口,尾随气泡在巨大的卷吸作用下被拉长,0.05 s 后双气泡完全脱离孔口,两个气泡联合上升,随后发生聚结形成一个新的大气泡,同时受到浮力和尾涡效应影响加速上升,并于 0.25 s 时与前一个大气泡的液面接触,最终两者聚结融合在一起,

这与 Feng 等^[15]在研究高黏液体中双气泡运动行为时所发现的聚并现象一致。

图 5 和图 6 显示了低流量下(0.1 L/min)气泡在两种不同液相中的运动轨迹,从图中可以看到不同时刻气泡在脱离孔口时都有一定程度的左右振荡,这是因为前一个气泡对流场的扰动影响了下一个气泡的受力。在黏性流体中,气泡轨迹经过短暂的波动逐渐发展成近直线型稳定上升,说明液相黏

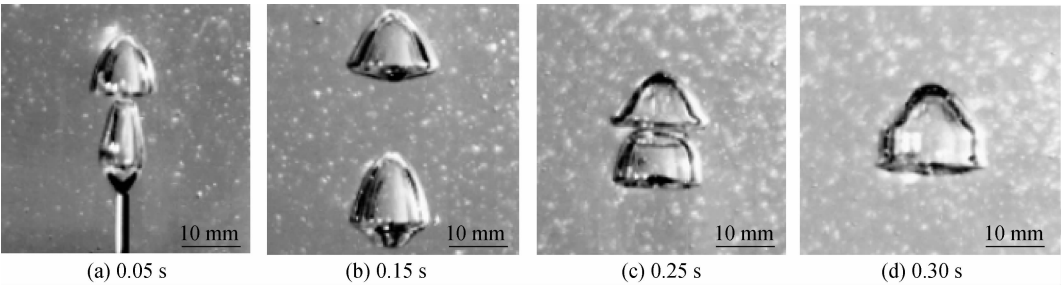


图 4 高气体流量(1.0 L/min)下气泡在 CMC 溶液中不同时间点的聚结状态照片

性与气泡运动受到的阻力具有显著的正相关作用，在水中气泡由于受到的阻力较小，呈现出“S”型的运动轨迹。

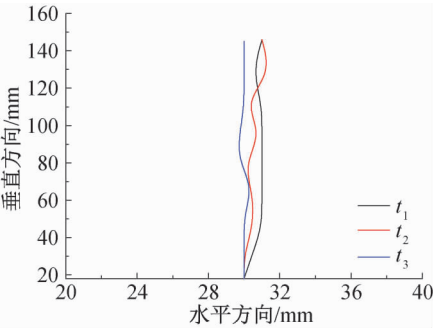


图 5 CMC 溶液中气泡运动轨迹

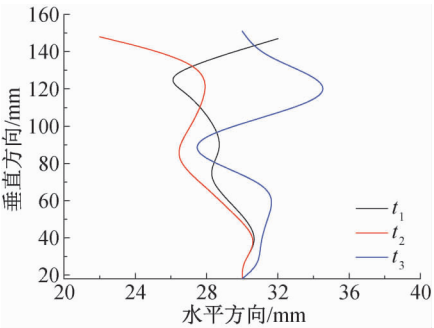


图 6 水中气泡运动轨迹

2.2 气泡生长过程分析

为获取气泡在生长运动过程中的尺寸变化，需要对其进行预定义，结果如图 7 所示，根据图像处理软件获取气泡的宽度和高度分别记为 d_x 、 d_y 。

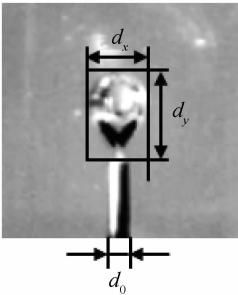


图 7 单个气泡尺寸示意

由于气孔的实际直径为已知 $d=2\text{ mm}$ ，可通过式(1)和式(2)的比例关系得到气泡的实际宽度 x

和高度 y ：

$$\frac{d}{d_0} = \frac{x}{d_x} = \frac{y}{d_y} \tag{1}$$

$$\begin{cases} x = \frac{d_x d}{d_0}, \\ y = \frac{d_y d}{d_0} \end{cases} \tag{2}$$

等效气泡脱离直径计算公式为：

$$D = \sqrt{xy} \tag{3}$$

气泡纵横比 E 通常定义为高度与宽度之比，即：

$$E = \frac{y}{x} \tag{4}$$

气泡脱离液相的时间决定了气液体系的分离效率。本文将气泡脱离时间定义为第一个气泡与下一个气泡脱离孔口的时间间隔。图 8 为气泡在两种不同液相中的气泡脱离时间，从图中可以看出，在静水中气泡脱离时间随着流量增大而减小，呈现线性负增长趋势，黏度增加，脱离时间增大。根据图像分析，气泡在孔口生长过程中由于受到表面张力作用而呈半球形，随着气体不断注入，气泡向上拉伸，颈部开始向内凹陷，最终体积胀大到一定值后脱离孔口。图 9 给出了气泡脱离气孔时的等效直径变化。在低流量下，黏度对于等效气泡脱离直径无明显影响，而在高流量下不同流体中气泡等效直径之差随流量增加而递增，这是因为与水作为液相相比，黏度大大增加，气泡在高黏体系中的生长运动主要受黏性力控制，所需克服的阻力增大。

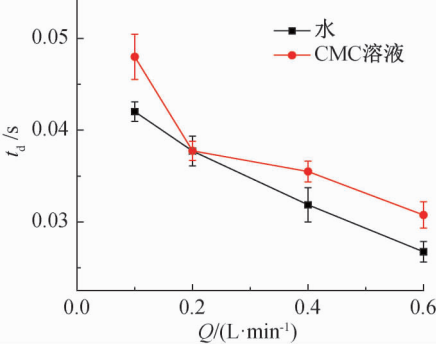


图 8 不同液相中气泡脱离时间变化曲线

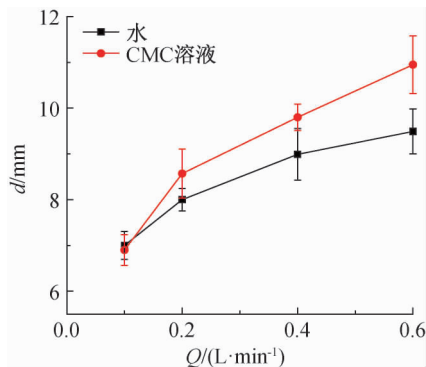


图9 不同液相中等效气泡脱离直径变化曲线

图10和图11分别为不同流量下气泡在CMC溶液及水中的瞬时速度。瞬时速度为气泡垂直方向位移与单位气泡脱离时间之比,结果表明进气流量上升使气泡瞬时速度增大。在低流量下,气泡在黏性溶液中受到阻力作用更大,瞬时速度相比水中气泡略小。而在高流量下,气泡生成频率加快,多气泡体系中气泡间相互作用更加明显,破坏了流场的对称性,导致气泡瞬时速度产生波动。由图10可知,当流量为0.4 L/min时,气泡由椭球形向球帽形转变,导致气泡表面的受力变化,瞬时速度开始出现不同程度的震荡。由图11可知,气泡在水中的瞬时加速度远大于黏性流体中的气泡,在流量为0.2 L/min时,最大瞬时加速度甚至达到了0.53 m/s,这是因为当气泡以两个及以上聚结态上升时,气泡形变严重使得振动幅度增大。

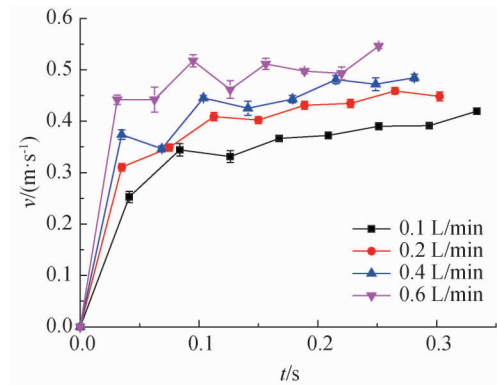


图10 CMC溶液中气泡瞬时速度变化曲线

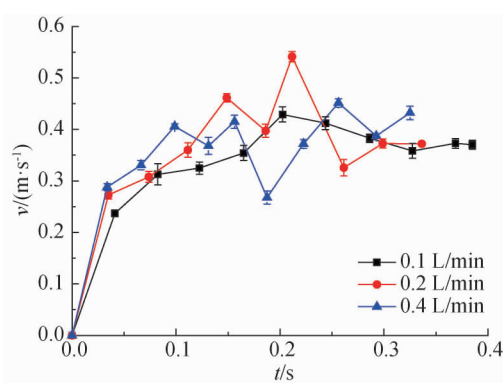


图11 水中气泡瞬时速度变化曲线

气泡在上升过程中主要受到浮力、表面张力、黏性力等作用,其形状会发生不同程度的转变。图12给出了气泡在黏性流体中上升运动时不同时间纵横比 E 的变化。在低流量下气泡脱离频率较小,相邻气泡之间垂直距离大,气泡纵横比在稳定上升后几乎保持不变,维持在0.7左右,气泡呈规则的椭球形。随着流量增加,气泡上升过程中在尾部形成尾涡,对周围流场产生扰动,尾随气泡在尾涡作用下加速上升,导致气泡上下压差难以保持平衡,由椭球形向球帽形转变,纵横比波动幅度增大。

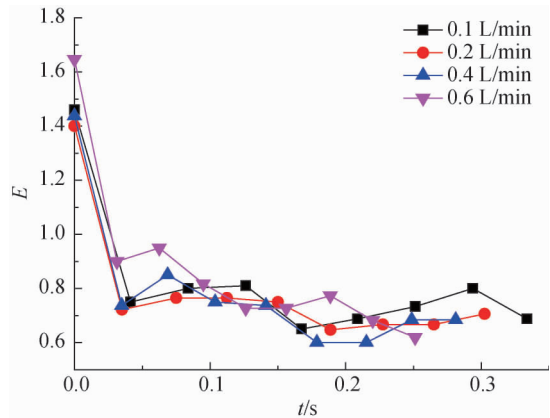


图12 CMC溶液中气泡纵横比随时间变化曲线

3 结 论

本文采用高速摄影法比较研究了气泡在黏性溶液和水中的运动行为,观察到不同流量下气泡形态、运动轨迹以及聚结现象,通过图像处理获得气泡上升过程中脱离时间、脱离直径、瞬时速度及纵横比等特征参数,主要结论如下:

- a) 气泡在低流量下以单气泡形式上升,随着流量的增大,水中气泡趋向于多气泡形式联合上升,在黏性明显的CMC溶液中气泡运动更加稳定,当流量为0.6 L/min时才发生聚结现象。
- b) 气泡脱离时间随进气流量增加而减小,气泡等效脱离直径则相反;气泡等效脱离直径之差在两种黏度流体中随着流量增加而递增。
- c) 气泡在上升过程中速度呈现出先增大后趋于稳定的现象,同时气泡由起始的圆球形发展为椭球形,纵横比明显减小。

参考文献:

[1] Li X, Wang W, Zhang P, et al.. Interactions between gas-liquid mass transfer and bubble behaviours [J]. Royal Society Open Science, 2019,6(5): 190136.
[2] Aboulhasanzadeh B, Tryggvason G. Effect of bubble

- interactions on mass transfer in bubbly flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 390-396.
- [3] Grace J R, Wairegi, T, Nguyen, T H. Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1976, 54(3): 167-173.
- [4] Kang C, Zhang W, Mao N, et al. Effects of the wake flow on bubble patterns downstream of a cylindrical nozzle[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 145: 128-140.
- [5] 薄宇轩, 吴珏, 马骏, 等. 气泡在静水中上升行为特性可视化实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2020, 35(6): 743-749.
- [6] Wang S P, Zhang H, Liu Y L, et al. Bubble dynamics and its applications [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(6): 975-991.
- [7] Iwata S, Saiki Y, Nagumo R, et al. Experimental investigation of a rising bubble in aqueous gelatin solution under gelation process [J]. Nihon Reorogi Gakkaishi, 2018, 46(3): 107-115.
- [8] Sattari A, Hanafizadeh P. Bubble formation on submerged micrometer-sized nozzles in polymer solutions: An experimental investigation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 564: 10-22.
- [9] Xu F S, Midoux N, Li H Z, et al. Characterization of bubble shapes in non-newtonian fluids by parametric equations[J]. Chemical Engineering and Technology, 2019, 42(11): 2321-2330.
- [10] Zhao Y, Xu Z, Wang B, et al. Scale inhibition performance of sodium carboxymethyl cellulose on heat transfer surface at various temperatures: Experiments and molecular dynamics simulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 457-463.
- [11] 李文强, 焦守华, 唐珂, 等. 静水中单气泡运动特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(9): 1652-1659.
- [12] 郭容, 蔡子琦, 高正明. 黏性流体中单气泡的运动特性[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(6): 916-921.
- [13] Abbassi W, Besbes S, Elhajem M, et al. Numerical simulation of free ascension and coaxial coalescence of air bubbles using the volume of fluid method (VOF) [J]. Computers and Fluids, 2018, 161: 47-59.
- [14] 田震, 成有为, 王丽军, 等. 温度与压力对单孔气泡形成过程的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3337-3345.
- [15] Feng J J, Li X C, Bao Y Y, et al. Behaviour and dynamics of two bubbles in conjunct condition in high-viscosity liquids[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2016, 94(8): 1583-1591.

(责任编辑:唐志荣)