

研究简报

气液传质界面湍动现象投影观察

沙 勇, 李樟云, 林芬芬, 吐 松, 肖宗源, 叶李艺
(厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005)

关键词: 投影; 界面湍动; 传质; Marangoni 对流; Rayleigh-Bénard 对流

中图分类号: TQ 028

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2010)04-0844-04

Shadowgraph observation on interfacial turbulence phenomena in gas-liquid mass transfer

SHA Yong, LI Zhangyun, LIN Fenfen, TU Song, XIAO Zongyuan, YE Liyi

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: In gas-liquid mass transfer processes, interfacial turbulence may occur due to the surface tension gradient and the density gradient produced by mass transfer near the interface. The interfacial turbulence can enhance the mass transfer since it intensifies the movement of interfacial fluid. By means of the shadowgraph optical method, the interfacial turbulence patterns vertical to the interface were observed directly in the volatilization process of binary systems. The images of the amplified interfacial turbulence showed the variation of concentration and the fluid movement under the interface. Two patterns of interfacial turbulence were observed in the experiments: plume and vortex. With the plume, the interfacial fluid moved slowly and penetrated the liquid deeply. With the vortex, the interfacial turbulence occurred in the vicinity of the liquid interface and the fluid moves quite fast. A qualitative analysis was carried out based on the mechanism of Rayleigh-Bénard convection induced by density gradient and Marangoni convection induced by surface tension gradient.

Key words: shadowgraph; interfacial turbulence; mass transfer; Marangoni convection; Rayleigh-Bénard convection

引 言

在相际质量传递过程中, 界面处液体物化性质由于物质传递发生改变, 如产生密度梯度和界面张力梯度, 使界面流体发生流动的现象即为界面湍动。通常由界面处流体密度梯度引发的界面湍动称为 Rayleigh-Bénard 对流, 而由界面表面张力梯度

引发的界面湍动, 称为 Marangoni 对流^[1]。

由于传质过程中发生的界面湍动在临近界面处发生, 其浓度场和速度场难以测量, 目前多利用纹影法、投影法、干涉法等光学测试手段, 对其湍动形态进行观察, 为了解界面湍动提供直接视觉证据。利用蒸发、吸收、解吸、萃取等传质手段, 不同的研究者对界面湍动进行了直接光学观察, 考察

2009-07-13 收到初稿, 2009-12-30 收到修改稿。

联系人及第一作者: 沙勇 (1971—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20606027)。

Received date: 2009-07-13.

Corresponding author: SHA Yong, ysha@xmu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20606027).

了不同传质条件下的界面湍动结构, 获取的形态众多, 结构复杂^[27]。对于气-液界面传质导致的界面湍动, 其光学观察多集中在研究界面平面内出现的细胞形、六边形、滚筒形等规则或不规则形态, 通常为湍动充分发展后的形态, 尺度偏大^[69], 而对于实际应用中更重要的界面湍动向主体相渗透的时空观察, 十分匮乏, 尚需大量设计精巧的实验以揭示其内在的规律。

传质过程中产生的界面湍动为强非线性传质流动耦合现象, 是非线性理论良好的研究对象^[10], 并且界面湍动促进了流体表面更新, 可对宏观传质设备传质产生显著影响^[11], 对其的深入研究有着理论和实际上的需要。

本文利用放大界面区域的投影法, 观察有机溶剂水溶液挥发过程中, 由界面向液相主体渗透的界面湍动结构, 获取直接视觉资料。

1 实验装置及方法

投影法观察传质导致的界面湍动结构实验配置如图1所示, 点光源发出的光首先经过实验盒, 然后投影在屏幕上。如果实验盒内液体介质由于传质出现浓度梯度或界面湍动, 则介质中各处对光的折射、反射将产生差异, 光线通过实验盒内液体介质后, 会发生不同角度的偏转, 将在屏幕上产生明暗不均的投影图像, 通过照相机或摄像设备即可记录此投影图像。

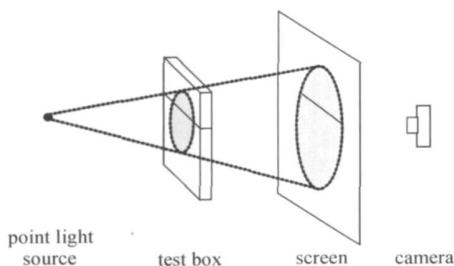


图1 投影光学实验配置

Fig. 1 Configuration of optical experiment

通用的投影观测方法是在光源与实验介质之间加一凸透镜, 把发散光汇聚成平行光, 然后通过观测介质, 成像在屏幕, 此平行光投影成像与光通过介质区域的大小相同。本文实验则采用LED点光源发出的发散光成像, 在屏幕上得到的是光实际通过实验盒介质区域的放大图像, 可实时记录传质导致的放大界面湍动投影图像^[12]。

实验盒由两块光学平板玻璃构成, 两侧和底部密封, 形成一内部空间长为0.1 m、高为0.2 m、间距 2×10^{-3} m的狭长容器。实验时将实验盒垂直放置, 置于光源与屏幕之间, 往两块光学平板玻璃之间的狭缝空间中注入有机溶剂与水形成的双组分溶液, 精心控制由实验盒顶部从上往下吹入, 然后由两块玻璃之间两侧上部缝隙流出的 N_2 气流, 使之流动对实验盒内的液体表面无扰动影响, 即可在屏幕上获取实验盒中双组分溶液由于有机溶剂挥发而发生的界面湍动投影图像, 以及界面湍动在界面向下向液相主体发展的时空演化过程。

实验在常温常压下进行, 使用的有机溶剂均为分析纯, 水为去离子水, 实验液层高度为0.1 m; N_2 在进入吸收盒之前先通过水罐预饱和和水分, 以排除溶液水分蒸发的干扰。

2 实验结果及讨论

2.1 10% (mol) 异丙醇水溶液

10% (mol) 异丙醇的水溶液通入 N_2 使异丙醇挥发过程中, 界面处流体表面张力和密度均增大, 因此密度梯度导致的 Rayleigh-Bénard 对流和表面张力梯度导致的 Marangoni 对流, 均可导致界面湍动的发生。不同时间界面下涡流湍动的投影图像如图2所示, 当异丙醇挥发开始, 整个界面立即出现由界面往下的规则有序半圆形小涡流结构, 其排列整齐, 随着传质的进行, 小涡流结构逐渐相互作用、融合成较大的涡流结构, 逐渐向液相主体侵入。投影图像中气-液界面处的粗黑条纹缘于界面液体与玻璃介质之间的表面作用, 不为平坦液面所致。

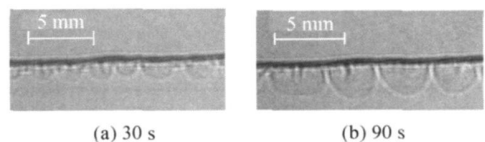


图2 气液界面下涡流结构

Fig. 2 Vortex patterns under gas liquid interface

借助于直径约 4×10^{-5} m 空心玻璃微珠为示踪物观察, 如图3(a)所示, 单个半圆形涡流由一对方向相反的循环流动构成, 两个流动在界面处相向流动, 汇聚后向界面下流动, 然后分支成两个方向相反的流动, 分别返回至界面, 涡流结构中间的竖直粗黑条纹即为向下汇聚流动的投影图像特征。

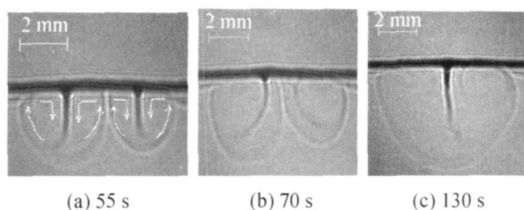


图 3 小涡流结构融合过程

Fig 3 Merging between two small vortexes

两个小涡流结构在不同时间下相互作用、融合成一个大涡流结构的过程，如图 3 所示，合并主要是两涡流临近的两个分支循环流动相互作用、湮灭，两涡流间隔较远的两个分支循环流动扩展所致。

此涡流结构界面湍动的显著特征是传质开始后，在整个界面下涡流即刻出现，在小涡流未合并成显著的大涡流之前，其涡流内部流体运动迅速且靠近界面。

2.2 10% (mol) 丙酮水溶液

10% (mol) 丙酮的水溶液通入 N_2 使丙酮挥发的过程，界面处流体表面张力和密度均增大，因此密度梯度导致的 Rayleigh-Bénard 对流和表面张力梯度导致的 Marangoni 对流，均可导致界面湍动的发生。丙酮挥发开始后，对比于初始状态 [图 4 (a)]，10 s 后界面区域粗黑条纹整体向下发展约 $5 \times 10^{-4} m$ [图 4 (b)]，然后界面区域逐渐出现多个向下发展的羽状对流结构，多个羽状对流结构相互作用、融合 [图 4 (c)]，逐渐向液相主体深入发展，最终可到达容器底部 [图 4 (d)]。

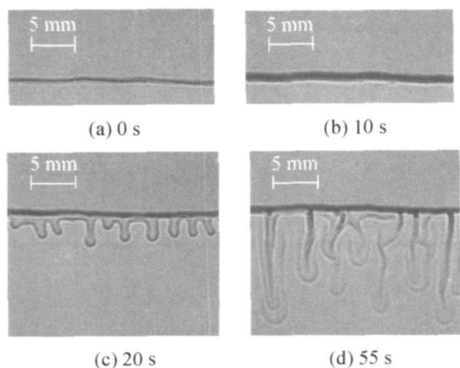


图 4 气液界面下羽状结构

Fig 4 Plume patterns under gas liquid interface

此羽状对流结构界面湍动明显不同于涡流结构界面湍动，在界面处结构发展较为平缓，而且与涡流湍动相比，羽状湍动在界面处运动较弱，尽管其初始发生在界面附近，但其末端主要在液相主体区

域发展。

考虑到羽状对流结构是 Rayleigh Bénard 对流的特征形式，因此丙酮在水溶液中的挥发过程出现的界面湍动主要是 Rayleigh Bénard 形式的对流，而异丙醇从水溶液挥发中出现的涡流状界面湍动则主要是 Marangoni 形式的对流。

3 结 论

通过采用点光源发出的发散光投影成像，获取传质界面区域界面湍动的放大投影图像，可清晰记录传质导致的界面湍动时空演化过程。利用此投影方法，对异丙醇和丙酮从水溶液挥发过程中，由界面向液相主体发展的两种不同类型界面湍动进行了观察，结果显示涡流结构界面湍动在界面附近发生、发展，且运动迅速，对界面流体影响较大；而羽状结构界面湍动，尽管发生在界面附近，但在界面附近结构演化平缓，主要依赖羽状末端向液相主体区域发展。通过此投影方法获取的界面湍动信息，可为进一步深入的理论研究和实际应用提供帮助。

References

- [1] Sha Yong (沙勇), Cheng Hong (成弘), Yu Guocong (余国琮). Marangoni effect in the mass and heat transport processes *Progress in Chemistry* (化学进展), 2003, 15 (1): 9-17
- [2] Sha Y, Ye L. Unordered roll flow patterns of interfacial turbulence and its influence on mass transfer. *J. Chem. Eng. Japan*, 2006, 39 (3): 267-274
- [3] Linde H, Velarde M G, Waldhelm W, Wierschem A. Interfacial wave motions due to Marangoni instability. *J. Colloid Interface Sci.*, 2001, 236 (2): 214-224
- [4] Pertler M, Haberl M, Rommel W, Blass E. Mass transfer across liquid-phase boundaries. *Chem. Eng. Proc.*, 1995, 34 (3): 269-277
- [5] Sun Z F, Yu K T, Wang S Y, Miao Y Z. Absorption and desorption of carbon dioxide into and from organic solvents: effects of rayleigh and Marangoni instability. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, 41 (7): 1905-1913
- [6] Shi Y, Eckert K. Orientation dependent hydrodynamic instabilities from chemor Marangoni cells to large scale interfacial deformations. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2007, 15 (5): 748-753
- [7] Liu C, Zeng A, Yuan X, Yu G. Experimental study on mass transfer near gas liquid interface through quantitative Schlieren method. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2008, 86 (2): 20F-207
- [8] Okhotsimskii A, Hozawa M. Schlieren visualization of

- natural convection in binary gas-liquid systems. *Chem. Eng. Sci.*, 1998, 53 (14): 2547-2573
- [9] Agble D, Mendes Tatis M A. The effect of surfactants on interfacial mass transfer in binary liquid-liquid systems. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, 43 (6): 1025-1034
- [10] Kim M C, Choi Ch K, Yoon D Y, Chung T J. Onset of Marangoni convection in a horizontal fluid layer experiencing evaporative cooling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, 46 (17): 5775-5784
- [11] Proctor S J, Biddulph M W, Krishnamurthy K R. Effects of Marangoni surface tension forces on modern distillation packings. *AIChE J.*, 1998, 44 (4): 831-835
- [12] Settles G S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. New York: Springer, 2001: 147-155