

研究简报

竖直流动皂膜中解吸导致的
Marangoni 对流观察

沙 勇, 李樟云, 江桂仙, 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: Marangoni 对流; 传质; 纹影; 皂膜

中图分类号: TQ 028

文献标识码: A

文章编号: 0438- 1157 (2010) 05- 1123- 04

Observation on Marangoni convection induced
by desorption in falling soap film

SHA Yong, LI Zhangyun, JIANG Guixian, 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, Marangoni convection may occur due to the surface tension gradient produced by mass transfer near the interface. With a falling soap film tunnel and the Schlieren optical method, the Marangoni convection patterns along the film surface were observed directly in the desorption process of acetone from the falling soap film. The Schlieren images showed the regular roll convection in the thin falling soap film during the acetone desorption. The hydraulic characteristics were determined experimentally by measuring the variation of acetone concentration in the film and the surface tension of the soap liquid. The results show that the acetone concentration gradient vertical to the falling direction is very small because the thickness of the soap film is in the order of 10^{-6} m. The variation of acetone concentration along the falling film is large, so there is a significant surface tension gradient, resulting in the Marangoni roll convection. The experimental results and a qualitative analysis may be helpful to understand the mechanism of Marangoni convection near the interface in the mass transfer.

Key words: Marangoni convection; mass transfer; Schlieren; soap film

引 言

在相际质量传递过程中, 界面处流体物化性质由于物质传递而发生改变, 如产生界面张力梯度, 使界面流体发生流动的现象即为 Marangoni 对流。Marangoni 对流发生在近界面处, 有着能够增强传质的实际应用价值, 而且其为强非线性传质-对流

耦合机理过程, 对于非线性科学有着重要的理论价值^[1]。

目前对传质过程中 Marangoni 对流现象的研究, 大多借助于水平液层或垂直降膜吸收、解吸、萃取等传质过程, 采用投影、纹影等光学方法对其形态进行直接观察, 或通过测量传质系数获取其对传质的影响效果^[4]。Marangoni 对流由界面张力

2009- 07- 20 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- 20.

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

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

变化引发, 在液层内发展, 但限于实验和近界面处观测的困难, 通常实验采用的液膜/层厚度或深度较大, 一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ m 量级^[2,5]。传质导致的 Marangoni 对流为界面对流现象, 与相际传质界面区域物化性质变化直接有关, 如能够对在微观尺度液膜/层内发生的 Marangoni 对流进行实验观测, 将有助于了解其流体动力学特性和相际传质过程中的界面传递特性。

本文利用竖直皂膜水洞实验方法和纹影光学方法, 通过丙酮从垂直层流下降皂膜中解吸, 首次获取了微米尺度厚度液膜内出现的 Marangoni 对流滚筒结构纹影图像, 并定性分析了垂直下降皂膜解吸过程 Marangoni 对流的成因。

1 实验装置及方法

1.1 竖直皂膜水洞

皂膜水洞实验方法被广泛利用于实验模拟二维流动, 其使用一张层流流动的平坦皂膜, 有两个自由表面, 皂膜厚度通常为 10^{-6} m 量级; 由于皂膜极薄, 可认为在皂膜内没有速度梯度, 流动为在皂膜平面内的二维运动^[6,8]。本文实验使用的竖直皂膜水洞实验装置如图 1 所示, 整个装置的支撑框架为铁架, 皂膜框架由直径 7×10^{-4} m 的尼龙线构成, 其扩张段、平行段和收缩段通过直径 1.04×10^{-4} m 的尼龙线牵引至铁支撑框架形成, 皂膜框架下悬挂重物以保持框架竖直。

实验时皂液由恒流泵从皂液储罐输送至皂膜框

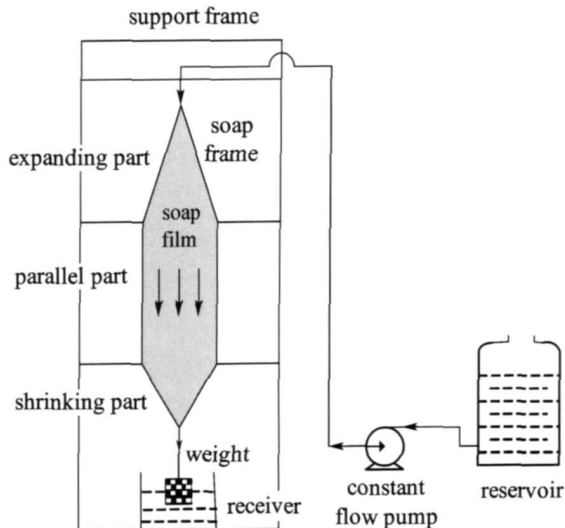


图 1 竖直下降皂膜水洞实验示意图

Fig. 1 Sketch of falling soap film tunnel

架顶端, 沿框架成膜, 并顺序经过扩张段、平行段, 在平行段为层流, 可达到稳定的速度和液膜厚度, 然后经过收缩段流至底部皂液接收槽。实验采用的皂膜扩张段长 0.6 m, 平行段长 0.6 m、宽 0.04 m, 收缩段长 0.3 m。

实验使用 0.236% (质量) 的十二烷基硫酸钠水溶液作为皂液, 此浓度即为 25 °C 时十二烷基硫酸钠水溶液临界胶束浓度值^[9], 此时十二烷基硫酸钠由于表面作用将主要分布在皂膜的两个表面上^[8], 皂液中丙酮质量浓度为 15%。实验过程中皂液流量为 $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 在此流量下通过高速摄影拍摄示踪粒子位移方法, 测得平行段皂膜流速为 $4.672 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 皂膜在平行段的暴露时间为 0.1284 s; 皂膜厚度由皂膜流量、平行段宽度和流速计算获取, 其值为 $2.676 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。

实验在 25 °C、常压下进行, 丙酮在皂膜流动过程中自然挥发至周边静止空气, 浓度逐渐降低。皂膜皂液丙酮浓度通过 WYA-2S 型数字阿贝折射仪测量皂液折光率, 然后利用事先实验绘制的皂液丙酮浓度与折光率标准曲线获取, 皂液的表面张力值则通过 Sigma 701 型界面张力仪直接测量。

1.2 纹影观察光路安排

实验采用高灵敏度的纹影光学方法^[10], 对皂膜平行段上由于丙酮解吸出现的 Marangoni 对流结构进行观察。实验光路图如图 2 所示, 点光源发出的散射光经直径 0.15 m、焦距 1.5 m 的凹面镜转变为平行光, 平行光再经相同规格的凹面镜汇聚后, 经刀口进入照相机镜头成像。实验时, 将皂膜平行段皂膜表面垂直置于纹影光路中的平行光光路中, 如丙酮解吸导致的 Marangoni 对流出现, 原本平行通过稳定层流皂膜的光线将发生折射、散射或反射, 即可使用照相机获取从明暗均一转变为明暗不均的纹影图像。

2 实验结果与讨论

图 3 为实验获取的流动皂膜纹影图像, 如图 3 (a) 所示, 在未加入丙酮的对比流动皂膜上, 皂膜表面明暗均一; 而在有丙酮解吸发生的皂膜上, 在平行段上部、中部、下部均出现了与流动方向平行的滚筒状结构, 图 3 (b) 即为平行段中部区域出现的典型滚筒状 Marangoni 对流纹影图像, 两竖直黑条之间为平行段皂膜, 宽度为 0.04 m, 黑条缘于皂液与尼龙线之间的表面作用, 光线折射特别

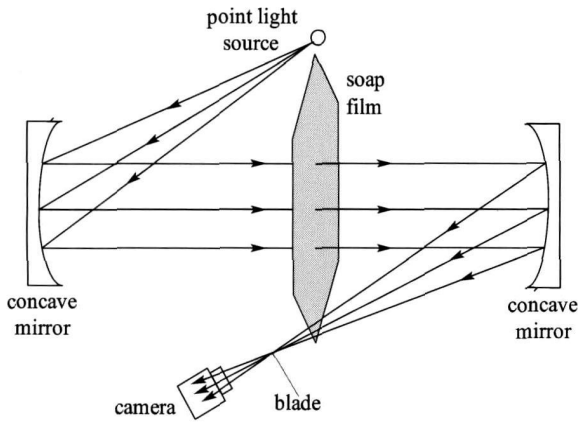
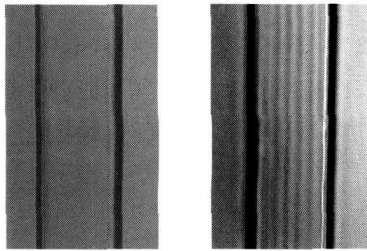


图 2 纹影光路图

Fig. 2 Sketch of Schlieren optical system



(a) without desorption (b) with desorption

图 3 竖直接流皂膜纹影图像

Fig. 3 Schlieren images on falling soap film

强烈所致。

皂膜下降过程中丙酮不断向空气中挥发, 使皂液沿竖直接流方向丙酮浓度不断减小, 而皂膜表面张力则沿流动方向不断增大, 实验获取的皂膜顶端和底部储液槽中皂液丙酮浓度 (质量) 分别为 15% 和 6.85%, 对应的表面张力值分别为 $32.69 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $33.88 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

由于皂膜垂直向下流动, 纹影图像不会是由重力导致的 Rayleigh-Bénard 对流造成; 丙酮浓度沿液膜流动方向的变化尽管可以导致光线折射率的变化, 但是其纹影图像应是皂膜明暗度沿竖直方向连续变化, 而不是如图 3 (b) 所示的竖直明暗相间的滚筒状结构。低浓度下物质在液体中的扩散系数数量级通常为 $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 由此可估计丙酮在皂膜平行段暴露时间内的扩散距离 = $\sqrt{\text{扩散系数} \times \text{暴露时间}} = \sqrt{10^{-9} \times 10^{-1}} \text{ m} = 10^{-5} \text{ m}$, 由于皂膜厚度仅为 $2.676 \times 10^{-6} \text{ m}$, 因此沿皂膜平面法向方向皂膜内浓度变化很小, 可近似为浓度均一, 相应的法向表面张力变化也很小。但是从皂膜顶部到底部的表面张力差为 $1.19 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot$

m^{-1} , 表面张力变化较之法向表面张力变化较大。由于沿皂膜平面方向表面张力梯度可以引发 Marangoni 对流^[1-12], 因此可认为纹影图像中滚筒状结构为沿皂膜流动方向上表面张力梯度引发的 Marangoni 对流结构。

Marangoni 对流的发生, 显示此时的皂膜流动不是皂膜平面内的二维运动, 在皂膜内部, 流体流动存在垂直于皂膜表面的速度分量, 为三维运动。由于皂膜极薄, Marangoni 对流在皂膜内的发生, 可认为 Marangoni 对流能够存在于极近界面区域。

3 结 论

通过竖直接流皂膜水洞和纹影光学实验方法, 利用丙酮从垂直下降皂膜的解吸传质过程, 首次获取了在微米尺度厚度液膜中由于传质出现的 Marangoni 对流纹影图像, 表明 Marangoni 对流为沿流动方向的竖直排列滚筒状结构。沿皂膜流动方向上由于丙酮解吸造成的表面张力梯度, 是 Marangoni 对流的成因。Marangoni 对流在微米级厚度皂膜传质过程中的发生, 显示 Marangoni 对流能够在界面微观区域发生, 本文研究结果将有助于深入了解 Marangoni 对流发生机理, 以及其对相际界面区域传质过程的影响。

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] 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
- [3] Okhotsimskii A, Hozawa M. Schlieren visualization of natural convection in binary gas-liquid systems. *Chem. Eng. Sci.*, 1998, 53 (14): 2547-2573
- [4] Shi Y, Eckert K. Orientation-dependent hydrodynamic instabilities from chem-Marangoni cells to large scale interfacial deformations. *Chinese J. Chem. Eng.*, 2007, 15 (5): 748-753
- [5] 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): 201-207
- [6] Beizaie M, Gharib M. Fundamentals of a liquid (soap) film tunnel. *Experiments in Fluids*, 1997, 23 (2): 130-140
- [7] Zhu L, Peskin C S. Interaction of two flapping filaments in a flowing soap film. *Physics Fluids*, 2003, 15 (7): 1954

- 1960
- [8] Vorobieff P, Ecke R E. Fluid instabilities and wakes in a soap-film tunnel. *Am J Phys*, 1999, 67 (5): 394-399
- [9] Pavan P C, Gomes G A, Valim J B. Adsorption of sodium dodecyl sulfate on layered double hydroxides. *Microporous Mesoporous Mat.*, 1998, 21 (4/5/6): 659-665
- [10] Settles G S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*. New York: Springer, 2001: 147-155
- [11] Sha Yong (沙勇), Cheng Hong (成弘), Yu Yihong (于艺红), Yu Guocong (余国琮). The stability analysis of Marangoni effect in mass transfer of the falling film. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, 54 (10): 1361-1368
- [12] Smith M K, Davis S H. Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers. *J. Fluid Mechanics*, 1983, 132: 119-162