天津大学学报 第35卷 第2期 2002年3月
JOURNAL OF TIANJIN UNIVERSITY Vol. 35 No. 2 Mar. 2002

激光纹影仪观测传质过程中RBM对流结构*

沙 勇[1]，成 弘[1]，孙志发[1]，余国琮[1]，王 勇[2]，张泽庭[2]
(1. 天津大学化工研究所，天津 300072；2. 北京化工大学，北京 100029)

摘 要：建立以激光为光源的纹影仪装置，用激光纹影仪在线监测不同有机溶剂各种传质过程中产生的RBM(Rayleigh-Bénard-Marangon)现象，同时拍摄了传质过程中出现的RBM现象状态，定性分析了不同影响因素的影响，其成果将有助于进一步的理论分析.

关键词：RBM现象；质量传递；激光；纹影仪
中图分类号：TQ028.15 文献标识码：A 文章编号：0493-2137(2002)02-0155-04

在质量传递过程中，由于物质在相界面上的传递而导致相界面上产生表面张力梯度和密度梯度，并由此引发的界面对流现象被称为RBM现象[1](即Rayleigh-Bénard-Marangoni现象). 这种现象的重要特征在于界面运动的流体力学不稳定性，只要有传质发生，这种不稳定性就持续存在. 更为重要的是，传质过程中RBM现象的出现增强了传质效率，因此引起了广大研究者的注意.

迄今为止绝大多数研究RBM现象的实验工作，借助于气液吸收、解吸及萃取操作进行，因为这些气液或液液传质过程有着明确可视的相界面，为观察现象提供了方便. 通常情况下，研究者利用光学系统如纹影仪等连续可视的设备观测相界上RBM现象及其对流结构，Imaishi[2]、Suciu[3]及Okhotsimskii[4]等分别应用不同物系进行了简单观测气液传质时RBM对流有序结构的实验，Zhang等[5]通过液-液系统研究了双组分扩散引发的界面湍动现象. 本文建立的激光纹影仪克服了普通纹影仪的缺点，可以方便地直接在线监测RBM对流结构，并且可记录对流结构的变化过程. 作者通过考察不同有机溶剂不同传质过程中的RBM现象，分析了不同影响因素对传质过程RBM现象的影响.

1 实验装置

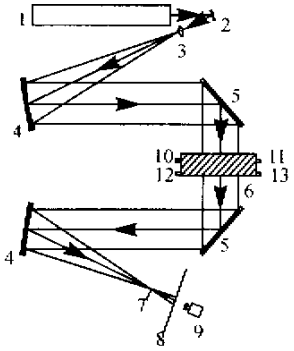
由于纹影仪可以观测流场折射率的细微变化，同时光对流动介质无影响，并且可借助于摄影设备来拍摄或连续记录流体细微流动[6]，故被广泛用来研究流体流动. 但是普通光源纹影仪的测量受到线光源强度和宽度以及方向的限制，而且由于光源强度的限制，只能通过高灵敏度的底片才能拍摄照片，照片记录的也只是RBM对流的瞬间形态，不能反映对流结构演化发展过程的细微变化.

采用激光作为纹影仪的光源，继承了光对研究区域无影响的优点，还具备普通光源纹影仪不可比拟的优点. 激光光源是圆形的，使纹影系统对垂直于光轴平面内各个方向上的折射率梯度具有相同的灵敏度，不会遗漏必要的信息. 此外，激光具备强光强，使纹影像面具备足够的照度，解除了线光源宽度和灵敏度之间的矛盾. 由于激光具有良好相干性和单色性，有进一步利用傅里叶光学理论分析纹影像面光强分布的可能性，从而将问题的定性研究转为定量分析[7].

试验用He-Ne激光器1为光源，发出的激光经反射镜2折射通过扩束镜3，再经凹面镜4转变为平行光；平行光经平面反射镜5，反射后透过实验盒6，再经平面反射镜5反射至凹面镜4汇聚；汇聚光由刀口7成像于屏幕8. 试验盒上下表面装有光学玻璃，保证激光的良好透过，实验盒置于纹影仪两面平面反射镜5光路之间. 实验时将实验盒水平放置，当实验盒中有机溶剂液层因吸收或解吸发生RBM对流时，盒内液膜产生折射率的变化，从而在屏幕上产生清晰的纹影图像. 通过CCD摄像头9可连续记录RBM对流的全过程，图像资料可由录像机储存于录像带或直接存储于计算机硬盘内，同时亦可拍成照片保存.

* 收稿日期：2001-07-11.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(20076032).
作者简介：沙 勇(1971—)，男，博士研究生.

有机溶剂传质 RBM 现象观测在液相流动和静止状态下进行，分别在静止实验盒和流动实验盒进行．液相静止传质实验盒是底部为 190 mm × 190 mm 且高为 40 mm 的正方形容器；液相流动传质实验盒为底部 280 mm × 100 mm 且高为 30 mm 的长方形封闭通道，气液接触方式为并流，流道宽度为 100 mm．两个实验盒均由不锈钢制造，上下表面覆盖有光学玻璃，内部形成封闭的气液接触空间．液相流动传质观测实验时，液相流动状态为严格层流状态，在光学玻璃下表面上从通道底部一端流向另一端，气体在通道上部缓慢与液相并流通过通道．液相静止传质观测实验时，将有机溶剂置入静止吸收盒底部，吸收或解吸气体由实验盒上部封闭空间通过．



1 — He-Ne 激光器；2 — 反射镜；3 — 扩束镜；4 — 凹面反射镜；5 — 平面反射镜；6 — 实验盒；7 — 刀口；8 — 屏幕；9 — CCD 摄像头；10 — 气体入口；11 — 气体出口；12 — 液体入口；13 — 液体出口

图 1　激光纹影仪观测 RBM 效应光路示意

Fig. 1　Experimental sketch chart of laser Schlieren device to observe RBM effect

实验用 He-Ne 激光器为 HN1200 型，波长 633 nm，TEM00 模，功率不小于 40 mW．采用的有机溶剂纯度为分析纯级，CO_2 气体含量为 99.99%，氮气含量为 99.99%；进口气体温度和液体温度经预处理后相同，均为 293 K；压力为常压．流动实验盒流动方向上宽度与液膜厚度比、静止实验盒宽度与液膜厚度比在 20 或 20 以上，可认为壁效应对流动无影响．为消除有机溶剂蒸发给传质试验带来的影响，气体在进入试验盒前通过鼓泡法先预饱和有机溶剂蒸汽．为防止解吸试验过程中 N_2 组分向液相的扩散传质，解吸溶剂用 N_2 预饱和．试验过程中，精心控制气体流量，使之在对溶剂液体表面无流动影响的状态下通过实验盒．

2　丙酮、乙醇传质过程中 RBM 现象

在传质过程中控制 RBM 现象发生的控制参数是 Ra 数和 Ma 数，这两个无因次数定义如下：

$$Ma = \frac{d\Delta\sigma}{D\mu}; \qquad Ra = \frac{d^3 g\Delta\rho}{D\mu}$$

当传质过程中液体表面张力增大，即 $\Delta\sigma > 0$ 且 $Ma > 0$ 时，表面张力梯度将引发 Marangoni 不稳定性，同样当传质过程中液体表面密度增大，即 $\Delta\rho > 0$ 且 $Ra > 0$ 时，垂直方向上的密度梯度导致的重力梯度将引发 Rayleigh-Bénard 不稳定性，这两种不稳定性均导致宏观可测的流体流动．

在有机溶剂吸收和解吸 CO_2 时，气相流经吸收盒前，尽管通过鼓泡法先预饱和有机溶剂蒸汽，但是气体的流动仍不可避免地引起吸收盒内溶剂的挥发．为了鉴别溶剂挥发带来的影响，先进行纯溶剂的蒸发实验，观察由溶剂挥发引起的 RBM 现象．

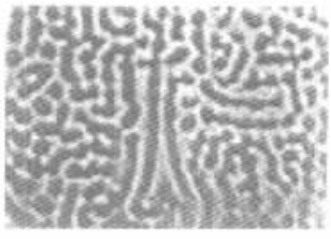
在对丙酮和乙醇进行的纯溶剂挥发实验中，溶剂的自然挥发没有引发界面 RBM 现象，只有在一个临界气量以上，溶剂表面才出现互相交织的细长滚筒型对流结构，并且随着 N_2 吹扫速度的增加，细长滚筒型对流结构的交织结构变密．这是由于吹扫气速增加，表面溶剂蒸发速率增大，增强了 RBM 效应强度的原因．因此，在开始进行解吸和吸收 CO_2 实验时，N_2 或 CO_2 气量被控制在这个临界气量以下，实验结果均认为是排除了溶剂蒸发的影响，可以认为对流结构只是由吸收或解吸传质过程引起的．在以下的实验过程中，液膜的厚度均为 5 mm．

2.1　丙酮解吸 CO_2 过程 RBM 现象观测

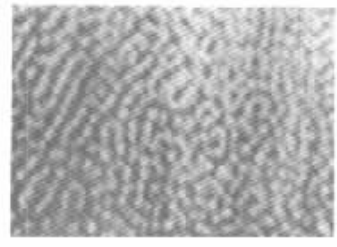
丙酮解吸 CO_2 时，$Ra < 0$，$Ma > 0$，这时传质过程中液层的不稳定性由 Marangoni 效应引发，而系统是 Rayleigh-Bénard 稳定的．

在静止预饱和 CO_2 的丙酮通过 N_2 吹扫解吸 CO_2 刚开始时，RBM 对流结构开始出现．对流结构为明显的细胞状对流结构，但排列不规则．对流结构密度分布不均，几何尺度也大小不一，对流结构有合并和分裂的趋势，如图 2a 所示，气流方向为从上到下，N_2 流量为 0.08 m^3/h．随着 N_2 气量的增大，对流结构趋于混乱，几何尺度变小，难于分辨，但仍可观测到剧烈的界面对流发生．在试验中，尽管气速被控制在不影响液体表面静止状态的程度以下，在大气量下，气体流动方向对液体表面产生的对流结构有拖曳作用，即细胞状对流结构沿气体流动方向有规则排序的趋势，这说明对流

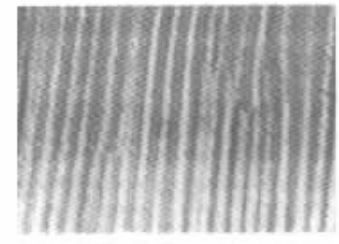
结构对外力的影响十分敏感,由图 2a 中间局部可以看出. 在严格层流下的丙酮一维流动吸收 CO_2 时,对流结构在液体流动方向上排列成规则的滚筒型,如图 2b 所示. 实验时气液并流,流动方向为从上到下,N_2 流量为 0.08 m^3/h 液相流速为 0.003 89 m/s. 这证明了外力对 RBM 现象的影响十分巨大. 典型的静止纯丙酮溶剂蒸发 RBM 对流结构如图 2c 所示,N_2 气流方向为从左到右,流量为 0.16 m^3/h.



(a) 静止丙酮 CO_2 饱和溶液解吸 CO_2



(b) 流动丙酮 CO_2 饱和溶液解吸 CO_2



(c) 静止纯丙酮溶液蒸发

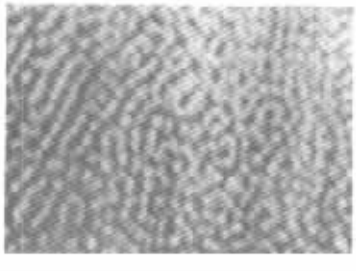
图 2　丙酮传质过程纹影图像

Fig. 2　Schlieren image during gas/liquid mass transfer in acetone

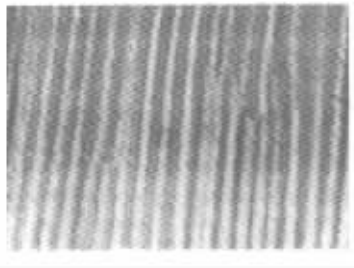
2.2　乙醇吸收 CO_2 过程 RBM 现象观测

乙醇吸收 CO_2 时,$Ra>0$,$Ma<0$,这时传质过程中液层的不稳定性由 Rayleigh-Bénard 效应引发,而系统是 Marangoni 稳定的.

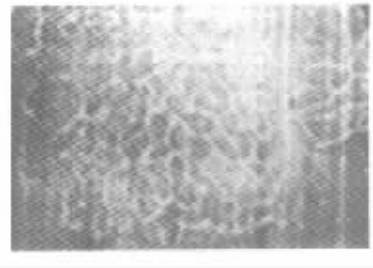
如图 3a 所示,静止乙醇吸收 CO_2 时,界面 RBM 对流结构为细胞状,与丙酮解吸 CO_2 时对流结构相似,同时与丙酮解吸 CO_2 时相似,多边形对流结构也有分支与聚并的现象,实验时 CO_2 流动方向为从上到下,CO_2 流量 0.04 m^3/h. 在严格层流下的乙醇一维流动并流吸收 CO_2 时,对流结构在液体流动方向上排列成规则的滚筒型,结合丙酮流动解吸 CO_2 时滚筒型的产生,说明了对流结构沿液体流动方向取向的优先性,如图 3b 所示,气液流动方向为从上到下 CO_2 流量 0.04 m^3/h 液体流速为 0.003 89 m/s. 典型的静止纯乙醇溶剂蒸发 RBM 对流结构如图 2c 所示,N_2 气流方向为从左到右,N_2 流量为 0.16 m^3/h.



(a) 静止纯乙醇溶液吸收 CO_2



(b) 流动纯乙醇溶液吸收 CO_2



(c) 静止纯乙醇溶液蒸发

图 3　乙醇传质过程纹影图像

Fig. 3　Schlieren image during gas/liquid mass transfer in ethanol

3　结　论

1) 通过使用激光纹影仪在线观测 RBM 现象,可以更加准确清晰的观测界面对流现象,具体研究 RBM 对流结构的变化过程. 由于 RBM 对流结构是一个非线性演化过程,实验得到的成果将有助于进一步的理论分析.

2) 尽管丙酮解吸 CO_2 与乙醇吸收 CO_2 时 RBM 现象出现的机理不同,前者由表面张力梯度引发,后者由密度梯度引发,但其宏观表现却相类似. 具体表现为,在静止流体中为细胞状流动,在流动流体中为沿流体

流动方向取向的滚筒型流动.

3) 外力作用对 RBM 对流结构的形态有一定的影响,如高的气相流动状态对界面对流结构有拖曳作用,液相流动状态 RBM 对流结构与静止液相 RBM 对流结构有着显著区别.

4) 在传质过程中,看似静止的流体表面实际上由于 RBM 对流的产生,液相溶质静止膜扩散的假设并不成立,若欲得到与实际传质结果相符的预测结果,必须考虑 RBM 现象对传质的增强作用.

符号说明:

Ra—— 无因次 Rayleigh 数,$Ra = \frac{d^3 g \Delta\rho}{D\mu}$;

Ma—— 无因次 Marangoni 数,$Ma = \frac{d\Delta\sigma}{D\mu}$;

$\Delta\sigma$—— 液相表面与主体的表面张力差,N/m;

$\Delta\rho$—— 液相表面与主体的密度差,kg/m^3;

D—— 溶质扩散系数,m^2/s;

d—— 液膜厚度,m;

g—— 重力加速度,9.81 m/s^2;

μ—— 溶剂粘度,kg/(m · s).

参考文献:

[1] Sherwood T K, Pigford R L, Wilke C K. Mass transfer [M]. New York: Mc Graw-Hillinc, 1975.

[2] Imaishi N, Fujinawa K. An optical study of interfacial turbulence accompanying chemical absorption [J]. International Chemical Engineering, 1980, 20(2): 226－232.

[3] Suciu D G, Smigelschi O, Ruckenstein E. Some experiments on the Marangoni effect[J]. AIChE, 1967, 13: 1120－1124.

[4] Okhotsimskii A, Hozawa M. Schlieren visualization of natural convection in binary gas-liquid systems[J]. Chem Eng Sci, 1998, 53: 2547－2573.

[5] Zhang S H, Wang Z M, Su Y F. Mass transfer and interfacial turbulence in a laminar film/Study of transferring two solutes separately and simultaneously through liquid-liquid interface [J]. Trans IChemE, 1990, 68: 84－92.

[6] Davies T P. Schlieren photography-short bibliography and review [J]. Optics and Laser Technology, 1981(2): 37－42.

[7] 周　革. 全息纹影摄影应用于分析透明介质光学非均匀性的研究——原理与实验[D]. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 1985.

Observation of Rayleigh-Bénard-Marangoni Flow Patterns in Mass Transfer by the Laser Schlieren Device

SHA Yong[1], CHENG Hong[1], SUN Zhi-fa[1], YU Guo-cong[1], WANG Yong[2], ZHANG Ze-ting[2]

(1. Chemical Engineering Research Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A laser Schlieren device was established to observe Rayleigh-Bénard-Marangoni effect produced in mass transfer of different organic solvents. A recorder and a camera recorded RBM flow patterns when ethanol absorbed CO_2 and saturated acetone desorbed CO_2 by N_2. The qualitative analysis of the experiment results was carried out. The results will help to further facilitate of the theoretical analysis.

Keywords: Rayleigh-Bénard-Marangoni effect; mass transport; laser; schieren device