

文章编号:1674-2869(2008)04-0001-04

Marangoni 效应对降膜过程液体分布的影响

张 锋^{1,2}, 张志炳², 王志祥¹

(1. 中国药科大学药学院, 江苏 南京 210009; 2. 南京大学化工系, 江苏 南京 210093)

摘 要:采用红外热成像技术测量液膜表面温度分布和流动区域, 确定液膜在固体壁面上的润湿面积, 以分析液体在设备内的分布性能以及液膜表面的温度梯度, 进而明确温度分布与液体分布之间的相互影响关系。实验发现液膜径向温度梯度引起的表面张力梯度, 造成径向 Marangoni 流, 影响液膜在固体壁面上的分布。在 Marangoni 效应的作用下, 加热(冷却)能够减小(扩大)液体在固体壁面上的润湿面积。正体系(冷却降膜)中, 流量能够促进温度梯度造成的 Marangoni 效应, 而在负体系(受热降膜)中, 较大的流量抑制了 Marangoni 效应。

关键词:降膜; 液体分布; 红外热成像; 温度梯度; Marangoni 效应

中图分类号:TQ028.32 **文献标识码:**A

0 引 言

一切温度高于绝对零度的物体都能发出红外辐射能量, 红外辐射能量的大小及波长分布与其表面温度关系密切。因此, 通过测量物体自身辐射的红外能量, 能准确地测定其表面温度。红外辐射理论的出发点是普朗克黑体辐射定律, 其形式如下:

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} [\text{Watt}/\text{m}^2 \mu\text{m}] \quad (1)$$

其中, W_{λ} 是波长 λ 的黑体光谱辐射率, c 为光速, T 为黑体的绝对温度, h 和 k 分别为普朗克常数和波兹曼常数。由方程(1)可知, 所有黑体辐射量主要与辐射波长、物体温度有关, 通过测定辐射量即可确定物体温度。红外热成像技术具有高灵敏度、测量范围广、与目标不接触等诸多优点, 目前主要用于工业制造中的金属探伤、医疗诊断(如癌症的确定)和军事领域。

降膜过程广泛用于在工业过程中, 包括规整填料塔、降膜蒸发器和降膜反应器等。在这些设备中, 液膜的流动特性与降膜传热传质行为相互作用。当前对于液体在固体壁面上的降膜分布性能以及传递性能与液体分布的关系等方面的研究并不充分, 这在一定程度上影响了降膜设备的优化设计和操作。事实上, 液膜的传热和传质会引起流体密度、黏度、表面张力等物理性质的变化, 进而影响流体流动, 而液膜流动特性反过来作用于传热传质来限制这种影响^[1~2]。在降膜流动的研究中, 采用红外热成像技术, 可以精确测定受热降膜

流动的表面温度场, 根据液膜的温度特征确定液体的分布、表面波动性能等参数^[3]。Kahov^[4]采用该技术确认了降膜过程中 Marangoni 流动引起的水平液带结构, 发现传热系数随着雷诺数的增大而减小。本文采用高精度红外热成像技术对竖直平板上的液体降膜进行了实验研究, 分析比较了液膜受热情况与流量对受热降膜分布的影响, 并讨论了不同加热体系中 Marangoni 效应对液膜流动的作用。

1 降膜流动实验装置

实验装置如图1所示, 液体储罐中一定温度的料液由泵输送到高位槽, 经过流量计, 流入高位槽中, 而后在实验板上布膜。所成液膜在实验板上流下, 被加热或冷却后进入集液槽, 最后回到储罐。实验板为光滑的不锈钢板, 实验板的背部设有加热框, 框内通入热水加热实验板来控制板面温度。液膜表面温度分布以及板上的液体分布由红外热像系统拍摄得到。实验中以蒸馏水作为料液, 液膜的起始温度为 t_0 , 加热水温度为 t_h 。料液的物理性质和实验操作参数如表1所示。

表1 料液的物理性质和操作参数

Table 1 Physical characteristics of working fluid and operation parameters

物理性质	操作条件
料液: 蒸馏水	流速 Γ : 0.03~0.37 kg/(m·s)
密度 ρ : 983.9~1 000 kg/m ³	起始温度 t_0 : 3~60 °C

续表 1

物理性质	操作条件
------	------

收稿日期: 2008-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(NO. 20576050)

作者简介: 张 锋(1979-), 男, 宁夏隆德人, 讲师, 博士, 研究方向: 制药分离工程研究。

物理性质	操作条件
黏度 μ : $1.71 \times 10^{-4} \sim 1.63 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	加热温度 t_h : $2 \sim 70^\circ \text{C}$
表面张力 σ : $67.1 \sim 75.4 \text{ dyn/cm}$	雷诺数 $Re = A\Gamma/\mu$: $97 \sim 3141$
导热系数 λ : $0.556 \sim 0.654 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	普朗特数 $Pr = C_p u/\lambda$: $2.9 \sim 12.1$
	Marangoni 数 Ma^* : $0.114 \sim 0.086$

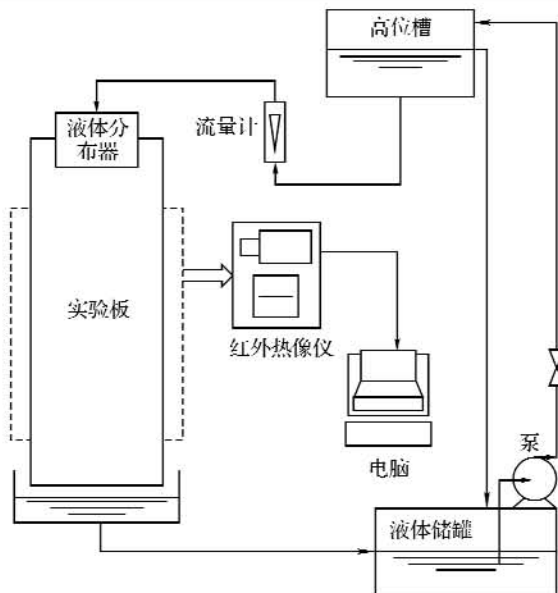


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental system

2 降膜流动实验结果

液膜在加热平壁上流过时,膜内的传热行为导致液膜表面温度不同,另外液体和金属表面的辐射率不同,因此可以根据红外辐射特征确定液膜在固体壁面上的分布并分析其表面的温度分布.冷却、等温和受热降膜的红外图像如图 2 所示,图中颜色的深浅代表了温度的高低,颜色越亮,温度越高,而水平横线表示加热区上沿的位置,该位置以下为传热区.如图 2 所示,冷却液膜在下降过程中逐渐向两侧扩展,而受热液膜明显收缩.这两种液膜径向都存在较大的温度差异,而液膜流向上的温度变化不大,因此可以通过考察液膜的径向温度变化来研究液膜表面温度分布与液体分布的关系.图 2 中间的等温降膜保持了原有的流动形态,液膜宽度变化不大,液膜表面温度较为均匀.由此可见,相同的固体壁面上,相同流量的受热液膜的分布面积要比等温液膜小,而冷却液膜的润湿面积最大.一般情况下,液体在固体壁面上的分布主要由液体与固体间的接触角决定.在同一固体壁面上,接触角的大小主要由液体的表面张力控制,液体的表面张力小时,固液接触角较小,因此液体能够在固体壁面上较好地分布;液体表面张力大时,固液接触角大,液体在固体壁面上的分布面积小.实验中,加热液膜的温度升高,表面张力减小,因此液膜应该能够较好分布,

而非收缩.对于冷却液膜而言,液膜温度降低,表面张力增加,因此液膜分布面积应该比等温液膜小,而不是扩展.由此看来,加热/冷却液膜的收缩/扩展与接触角(液体的表面张力)关系不大.事实上,受热/冷却液膜径向的表面张力梯度是径向温度梯度造成的,而液膜的收缩或扩展是由于表面张力梯度引起 Marangoni 流,来削弱这些温度梯度.这一点也可以由受热收缩液膜在加入极少量的表面活性剂后能够良好分布的实验证明.

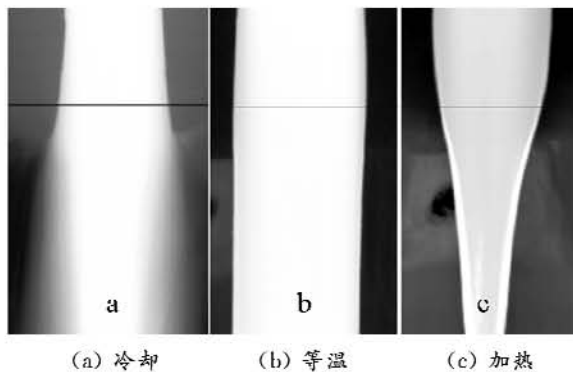


图 2 降膜红外图片

Fig. 2 Infrared images of falling liquid films

液膜径向温度分布曲线如图 3 所示,冷却降膜中央温度高,两侧温度低,因此存在由两侧向中央的温度梯度,由于液体的表面张力随温度的增加而降低,所得的表面张力梯度与温度梯度相反,产生由膜中央向两侧的 Marangoni 流来消除温度梯度,导致液膜的扩展.等温降膜的径向温度基本上均匀,而受热降膜的温度分布与前两者显著不同,受热降膜两侧边缘温度高,中央温度低(图 3c),因此由液膜中央朝向边缘的温度梯度形成相反方向的表面张力梯度使液膜收缩^[5].

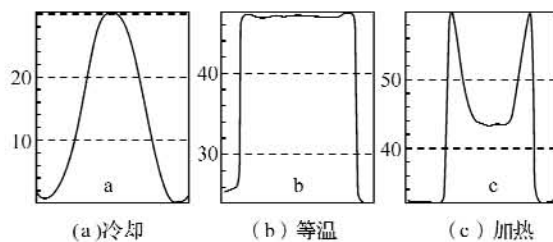
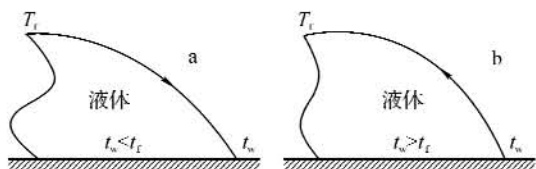


图 3 加热条件对降膜径向温度分布的影响

Fig. 3 Lateral temperature distributions of falling films under different heating conditions

径向 Marangoni 效应对非等温液膜分布有较大影响.受热(冷却)液膜的收缩(扩展)与水平板上非等温液滴的收缩(扩展)非常相似.加热(冷却)水平板上的液滴能够抑制(促进)液滴的扩展^[6].径向 Marangoni 效应对非等温降膜的影响如图 4 所示,冷却降膜的边缘存在较高的表面张力,造成的 Marangoni 效应将中央的液体驱向边

缘,使液膜扩展[图 4(a)].受热降膜的温度梯度由中央到膜的边缘,造成的 Marangoni 流由液膜边缘朝向膜中央以减弱温度梯度[图 4(b)],因此造成液膜的收缩.



(a) 冷却液膜

(b) 加热液膜

图 4 径向 Marangoni 效应影响机理

Fig. 4 Mechanism of lateral Marangoni effect

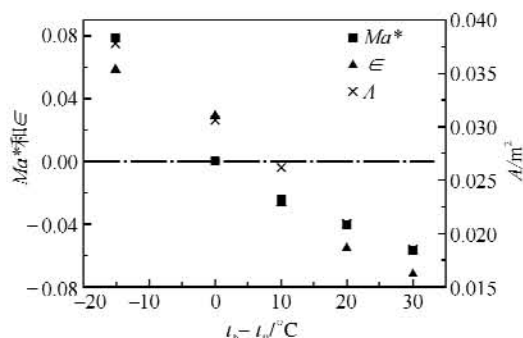
大多数液体的表面张力随着温度线性变化,即 $\sigma = \sigma_0 - \gamma(t - t_0)$, 其中 σ 和 σ_0 分别是温度为 t 和 t_0 时液体的表面张力. 表面张力系数定义为 $\gamma = -\partial\sigma/\partial T$, 对于一般的液体其值为正. 非等温降膜中表面张力梯度的影响可以用修正的 Marangoni 数来表征:

$$Ma^* = \frac{-\gamma\Delta T L}{\mu\alpha} \left(\frac{l_v}{L} \right)^2 = \frac{-\gamma\Delta T \cdot l_v(l_v/L)}{\mu\alpha} \quad (2)$$

上式中, μ 为黏度, $\Delta T = t_w - t_f$, 其中 t_f 是平均膜温. $\alpha = \lambda/(pCp)$ 是热扩散系数, $l_v = (v^2/g)^{1/3}$ 为黏性长度因子, v 是动力学黏度, g 代表重力加速度. 显然对于冷却液膜, $Ma^* > 0$, 对于加热液膜 $Ma^* < 0$, 而等温液膜 $Ma^* = 0$.

降膜设备的传递性能主要由液膜在固体壁面上的分布面积决定, 一般而言, 良好的液膜分布能够提高降膜传递性能. 因此在降膜传递的研究中, 经常采用液膜润湿面积 A 来描述液膜的分布情况. 为了进一步说明 Marangoni 效应对液膜分布的影响, 本文定义了液膜分布因子 $\epsilon = (z_1 - z_0)/2L$ 来表征液膜分布情况. 其中, z_0 和 z_1 分别是加热器上下边沿处液膜的宽度, L 为加热器长度. 显然, 对于扩展的冷却降膜, $\epsilon > 0$; 对于收缩的受热降膜, $\epsilon < 0$. 非等温降膜中的 Marangoni 效应强度由加热温差 ($t_h - t_o$) 决定, 如图 5 所示, Ma^* 数, ϵ 和 A 都随着加热温差的增加而降低. 这说明降膜在固壁上的分布由主要由加热条件决定, 即表面温度梯度引起的 Marangoni 效应能够显著影响非等温降膜的分布. 由图 5 可知, 对于等温液膜 ($t_h - t_o = 0$), $\epsilon > 0$, 说明等温液膜在下降过程中是扩展的, 但其扩展程度要比冷却液膜小.

根据 Zuiderweg^[7] 对于体系中 Marangoni 效应的定义, 受热降膜为 Marangoni 负体系, $Ma^* <$

图 5 Ma^* , ϵ 和 A 随加热温差的变化关系Fig. 5 Variations of Ma^* , ϵ and A with heating temperature differences

注: $t_o = 40^\circ\text{C}$, $\Gamma = 0.18 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

0, $A < A_0$, $\epsilon < 0$; 冷却降膜为 Marangoni 正体系, $Ma^* > 0$, $A > A_0$, $\epsilon > 0$; 而等温降膜为中性体系. 其中 A_0 是相同流量下等温降膜的润湿面积.

除了加热状况外, 液膜在固体壁面上的分布还受液体流量影响. 液体流量对液膜分布的影响是两方面的: 一方面大的液体流量有利于液膜的扩展, 另一方面, 较大的液体流量影响了膜内径向温度分布, 进而影响 Marangoni 效应对液膜的作用. 如图 6 所示, 随着液体流量的增加, 冷却、等温和受热液膜的面积都有增加. 大流量下受热液膜的面积随流量增加较快, 显示了大流量对受热液膜中 Marangoni 效应的抑制作用. 液体流量对 Marangoni 数的影响如图 7 所示, 等温液膜的 Ma 数随着流量的增加逐渐增大, 显示了正体系中流量对 Marangoni 效应的增强; 而对于受热液膜, Ma 数的绝对值随着流量的增大而增大, 证实了负体系中液体流量对 Marangoni 效应的削弱. 对比图 6 和图 7 可知, 对于受热液膜, 流量对润湿面积 A 和 Ma^* 的影响是对应的, $|Ma^*|$ 较大时, A 值相应较小, 而 $|Ma^*|$ 减小时, A 随之增大.

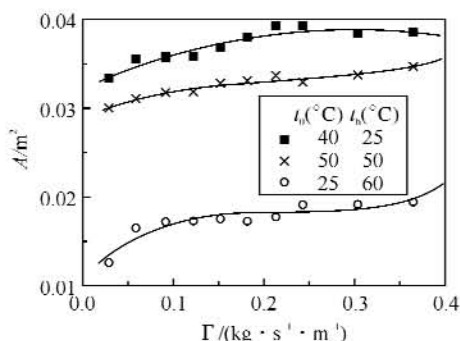


图 6 流量对降膜润湿面积的影响

Fig. 6 Influence of the flow rate on the wetting area of the films

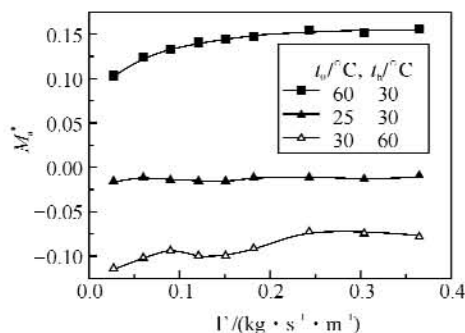


图 7 流量对 Marangoni 数的影响

Fig. 7 Influence of the flow rate on Marangoni number

3 结 语

采用红外热成像的方法能够测量固体壁面上降膜流动过程中,液膜表面温度分布与液体分布之间的关系.加热条件对液膜在固壁上的分布有较大影响.对于受热液膜,有 $Ma^* < 0, A < A_0, \epsilon < 0$; 对于冷却液膜,有 $Ma^* > 0, A > A_0, \epsilon > 0$. 受热(冷却)液膜的这种收缩(扩展)由加热温差($l_h - l_c$)和流体流量决定.较大的加热温度造成受热液膜显著收缩,液膜界面积急剧减小;而较低的冷却温度利于液膜的扩展.流量对 Marangoni 效应也有一定的影响,正体系(冷却液膜)中,流量对 Marangoni 效应存在一定程度的促进作用,而负体系(受热液膜)中,较大的流量能够抑制 Marangoni 效应.

参考文献:

- [1] Frederic K W, Dukler A E. Insights into the hydrodynamics of falling wavy films [J]. AIChE Journal, 1989, 35(2): 187-195.
- [2] Chu K J, Dukler A E. Statistical characteristics of thin, wavy films: Part II, study of the substrate and its wave structure [J]. AIChE Journal, 1974, 20(4): 695-706.
- [3] Al-Sibai F, Lccfken A, Renz U. Local and instantaneous distribution of heat transfer rates through wavy films [J]. International Journal of Thermal Science, 2002, 41, 658-663.
- [4] Kabov O A, Scheid B, Sharina I A, et al. Heat transfer and rivulet structures formation in a falling thin liquid film locally heated [J]. Int J Therm Sci, 2002, 41, 664-672.
- [5] Zhang F, Zhang Z B, Geng J. Study on shrinkage characteristics of heated falling liquid films [J]. AIChE Journal, 2005, 51(11): 2899-2907.
- [6] Ehrhard P, Davis S H. Non-isothermal spreading of liquid drops on horizontal plates [J]. J Fluid Mech, 1991, 229: 365-388.
- [7] Zuiderweg F J, Harmsen A. The influence of surface phenomena on the performance of distillation columns [J]. Chem Eng Sci, 1958, 9(2/3): 89-103.

Influence of Marangoni effect on the liquid distribution of falling liquid films

ZHANG Feng^{1,2}, ZHANG Zhi-bing², WANG¹ Zhi-xiang

(1. Department of Pharmaceutical Engineering, China Pharmaceutical University, Nanjing 210009, China;

2. Department of Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: By using infrared imaging technique, the flow characteristics and temperature distribution of the falling liquid film could be obtained. This makes it very convenient to determine the relationship between the flow and temperature distributions. It is found that heating (cooling) makes the film contracted (extended), increasing (decreasing) the area of the film, due to the existence of lateral temperature gradient and so caused Marangoni effect. For the positive system (cooled films), liquid flow reinforces Marangoni effect is induced by temperature gradient, while larger liquid flow retards Marangoni effect in the negative system (heated films).

Key words: falling liquid film; liquid distribution; infrared imaging technique; temperature gradient; Marangoni effect

本文编辑:张 瑞