

DOI: 10.7652/xjtuxb201303018

分离压对含活性剂液膜流去湿过程的影响

叶学民, 沈雷, 李春曦

(华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 071003, 河北保定)

摘要: 针对纳米尺度下液膜流动中分离压作用的问题,探讨了不同表面活性剂类型和活性剂浓度对分离压及其各分项的影响,由此建立了全面考虑范德华力、Born 斥力及静电斥力的分离压模型。采用 PDECOL 程序对初始厚度均匀一致且表面局部分布活性剂的液膜去湿过程进行了数值模拟,基于分离压模型由简到繁等各形式下的模拟结果,阐明了分离压各分项因素对液膜稳定性的作用机理,着重分析了中强度静电斥力下活性剂浓度对分离压效应和液膜稳定性的影响。结果表明:忽略静电斥力时的分离压会导致液膜失稳,形成静态的去湿结构;分离压对液膜稳定性的影响与活性剂类型及活性剂浓度与静电斥力的关联强度紧密相关。

关键词: 分离压模型;表面活性剂;液膜流;去湿过程

中图分类号: TQ021;O363 **文献标志码:** A **文章编号:** 253-987X(2013)03-0096-06

Effect of Disjoining Pressure on Dewetting of Thin Film Flows Containing Surfactant

YE Xuemin, SHEN Lei, LI Chunxi

(MOE Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment,
North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: For the disjoining pressure in nano-scale film flows, the influences of different type and concentration of surfactant on disjoining pressure were discussed, and a general disjoining pressure model was established including van der Waals forces, Born repulsion and electrostatic repulsion forces. The dewetting processes were simulated by the PDECOL program for an initially uniform film thickness and non-uniform surfactant concentration case. On the basis of the simulation results from the simple and complicated disjoining pressure models, the mechanisms of various components in disjoining pressure were stated. For the moderate electrostatic repulsion case, the effects of surfactant concentration on disjoining pressure and film flow stability were investigated. The results show that the disjoining pressure ignoring electrostatic repulsion forces will lead to unstable film and thus form static dewetting structures, and the effect of disjoining pressure on film stability is closely related to surfactant types and concentration associativity.

Keywords: disjoining pressure; surfactant; film flow; dewetting process

纳米尺度下的薄液膜流动是当前微型化电子器械及磁盘保护系统等研究中的热点问题^[1-2]。对于纳米尺度的薄膜系统,如果忽略重力的作用,则液体

在水平方向上沿表面张力增加的方向流动,这种由表面张力梯度造成的驱动力即为 Marangoni 效应^[2]。表面活性剂是一类能使表面张力显著下降的

收稿日期: 2012-07-01。 作者简介: 叶学民(1973—),男,博士,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972077);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10MG33)。

网络出版时间: 2012-12-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121210.1008.010.html>

物质,浓度越大,表面张力越低,因此表面活性剂的加入可有效改善液膜的流动,该特性已应用于生物医学领域^[3]。然而,过大的表面张力梯度也可能成为液膜流动的不稳定诱因,这方面的研究在近十几年来备受学术界关注^[2-4]。

对于厚度低于 100 nm 的薄液膜流动,不但要考虑液膜表面张力的影响,还要顾及垂直方向上的分离压 Π 对流动稳定性的影响。已有研究表明^[5],若 Π 随液膜厚度的减小而增大,则液膜相对稳定,不会发生破断,反之会加速破断。液膜破断的前提条件是 $d\Pi/dh > 0$,当满足该前提条件时,分离压中的引力作用会放大液膜表面的不均匀程度,使凹陷处迅速变薄,而分离压中的斥力作用逐渐与引力平衡抵消。在分离压与 Marangoni 效应的协同驱使下,液膜表面最终将形成一系列由极薄液层相连的静态波峰,此过程为液膜在固体表面的去润湿过程,简称去湿过程^[6]。由分离压导数引起的去湿过程通常称为“spinodal 去湿”,而由基底缺陷或液膜表面杂质引起的去湿过程称为“异相成核去湿^[2]”。去湿过程是液膜流动失稳的主要表现,对该现象的机理探讨具有重要意义,目前理论分析及实验研究已取得了一定的进展。

1 分离压模型及表面活性剂的影响

微小液滴铺展及泡沫系统稳定性研究中已建立了多种分离压模型^[2-7],最具代表性的如表 1 所示。

表 1 适用于液膜/液滴的分离压模型

时间	作者	分离压模型
1985	Israelachvili	$\Pi = -A/6\pi h^3$
1993	Mitlin	$\Pi = -\frac{A}{6\pi h_{\min}^n} \left[\left(\frac{h_{\min}}{h} \right)^n - \left(\frac{h_{\min}}{h} \right)^m \right]$
1999	Ghatak	
1998	Sharma	$\Pi = -\frac{A}{6\pi h^3} + \frac{S}{l} \exp(-h/l)$
2002	Warner	$\Pi = -\frac{A}{h^3} + \frac{Bl_c}{h^4}$

范德华力是普遍存在于固、液、气态的分子之间或高分子内官能团之间的长程物理力^[7],表达式为 $\Pi = -A/6\pi h^3$,其中 A 为 Hamaker 系数,由三相介电常数决定, $A > 0$;短程力是当液膜厚度小于 10 nm 时,分子间的电子云开始相互交叠,并在空间上产生阻力,即 Born 斥力^[7]。不考虑表面电荷时的分离压由上述 2 种力构成。实验表明^[8],当液膜中含有表面活性剂时, A 为活性剂浓度的函数。基于此,

Marner 等建立了与活性剂浓度相关的分离压模型,并通过模拟指出了该模型对于 spinodal 稳定的液膜有着质的影响^[6],这进一步印证了将活性剂浓度纳入分离压模型当中对于液膜流动分析的必要性。叶学民等建立了活性剂对分子间引力和斥力不同影响的分离压模型,分析了活性剂特性、浓度和液膜厚度比与分离压之间的关系^[9]。

固液两相接触后,交界面上电荷的分离将在两相间形成双电层,从而产生电势。随液膜厚度的减小,具有与固液界面相同负电荷的气液界面在液膜间产生的斥力有助于液膜稳定^[5],特别是当液膜中含有表面活性剂时,液膜表面的电荷密度受到了活性剂浓度的影响。对于非离子型活性剂,其本身并不携带电荷,但液膜表面的活性剂吸附层驱逐了部分界面中原有的 OH^- 根离子,从而使表面电荷密度减小,静电斥力减小^[10-11];对于离子型表面活性剂,液体中的电荷主要是活性剂分子携带的,活性剂浓度越高,表面电荷密度越大^[12]。就阴离子型活性剂而言,其浓度越高,表面沉积的阴离子越多,负电荷越多,静电斥力增强;就阳离子型活性剂而言,其浓度提高,原本的表面负电荷将逐渐被所携带的正电荷中和,结果与非离子型活性剂相似,即静电斥力减小,甚至转为吸引力。研究表明^[5,7,13],静电斥力随液膜厚度的增加呈指数衰减,且与双电层厚度相关。

本文研究涉及到液膜流动中表面活性剂的加入问题,同时建立了包括范德华力、Born 斥力及静电斥力的分离压模型,模型中参数均进行了无量纲处理,即

$$\Pi = -\frac{A}{h^3} + \frac{Bh_{\infty}}{h^4} + Ce^{-h/l} \tag{1}$$

式中: $-A/h^3$ 为范德华力; Bh_{∞}/h^4 为 Born 斥力; C 为静电斥力的强度; h_{∞} 为平衡液膜厚度。 A 、 B 、 C 取值不同时的分离压随液膜厚度的变化如图 1 所示。从图 1 可以看出:除图 1d 之外,均不同程度地存在满足失稳条件的厚度区间;在范德华力和静电斥力形成的分离压峰值两侧,液膜稳定性截然相反(见图 1c),表明失稳与初始液膜厚度紧密相关。通常,图 1a、图 1b 称为不稳定液膜,图 1c 称为亚稳定液膜,图 1d 称为稳定液膜。可见,不同的分离压模型及其分项对液膜稳定性有显著的影响。所以,本文首先对以上几种情形分别进行了模拟,以全面考察分离压中各分项对含活性剂的液膜演化历程的作用,然后在中强度静电斥力下着重分析分离压中各分项(特别是静电斥力)受活性剂浓度影响时的液膜

稳定性。

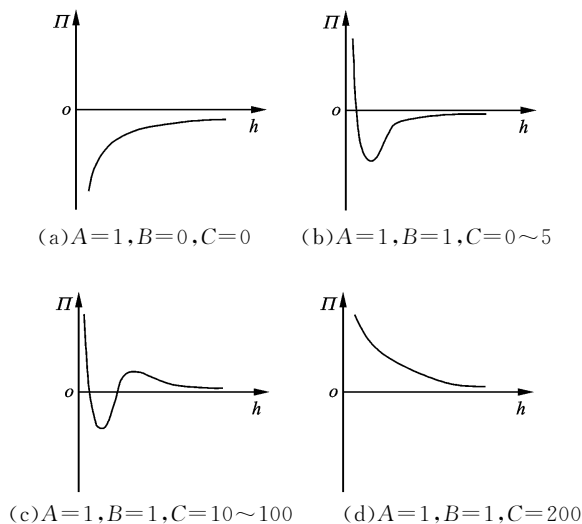


图 1 分离压随液膜厚度的变化

2 控制方程及其求解

通过对液膜二维流动控制方程,包括连续性方程、动量方程及其边界条件的无量纲化,利用润滑理论进行方程组简化,得到液膜内部速度分布方程,再结合运动边界条件及活性剂的对流-扩散方程,可得描述液膜厚度和活性剂浓度的演化方程,具体推导过程参见文献[14],方程无量纲形式如下

$$h_t = \left(M \frac{h^2}{2} \Gamma_x - \frac{1}{3} Ca h^3 h_{xxx} - \frac{1}{3} h^3 \Pi_x \right)_x \quad (2)$$

$$\Gamma_t = \left(M \Gamma \Gamma_x h - \frac{h^2}{2} Ca h_{xxx} - \frac{h^2}{2} \Gamma \Pi_x \right)_x + \frac{\Gamma_{xx}}{Pe} \quad (3)$$

式中: h 、 Γ 、 t 、 x 分别为无量纲的液膜厚度、活性剂浓度、演化时间、水平坐标; M 、 Ca 、 Pe 分别为 Marangoni 数、毛细力数、Peclet 数。各参数的取值范围参照文献[6],即 $M=1$ 、 $Ca=1$ 、 $Pe=100$,分离压模型如式(1)所示,数值求解采用 PDECOL 程序^[13],计算网格均匀划分,网格数为 2 000。

本文重点考察液膜表面局部存在活性剂的情形,因为活性剂可以通过改变表面张力来影响液膜流动,通过影响分离压中静电斥力来改变液膜稳定性。初始条件中假定液膜厚度均匀一致,活性剂位于液膜表面的某处,并以该处为中心向两侧指数衰减,表达式如下

$$h(x, 0) = h_0; \quad \Gamma(x, 0) = e^{-x^2} \quad (4)$$

计算中液膜厚度和活性剂浓度的边界条件为

$$x = 0, h_x = h_{xxx} = 0; \quad \Gamma_x = 0, \Gamma = 1 \quad (5)$$

$$x \rightarrow \infty, h_x = h_{xxx} = 0; \quad \Gamma_x = 0, \Gamma = 0 \quad (6)$$

3 模拟结果及分析

3.1 不考虑分离压时的液膜演化历程

为了对比分离压作用下的液膜演化历程,首先对不考虑分离压的情形进行了模拟,此时液膜演化的驱动力具有表面张力梯度,即存在 Marangoni 力。图 2 为 $t=0 \sim 10^4$ 时液膜厚度和活性剂浓度的演化历程,其中箭头表示演化的走势。在 Marangoni 力的作用下,液膜中心的流体逐渐被驱散至两边,形成显著的凹陷,凹陷中心 $x=0$ 处的液膜厚度不断减小。由图 2 液膜厚度最小值 $h_{\min}(x=0)$ 随时间的变化趋势可知,演化初期,特别是 $t=0 \sim 100$ 时, $h_{\min}$ 下降最快,之后下降速度减慢, $t=2 \times 10^3$ 后 $h_{\min}$ 几乎不再降低,维持在 0.3,此后在中心凹陷两侧的坡面上液体仍被浓度梯度推向上游,导致凹陷角度继续增大。由图 2 还可知, $t > 5 \times 10^3$ 时,活性剂浓度梯度缓慢降低,这也是导致液膜表面变形减缓的原因。可见,仅在 Marangoni 效应下,液膜表面出现了显著变形,但不会破断。

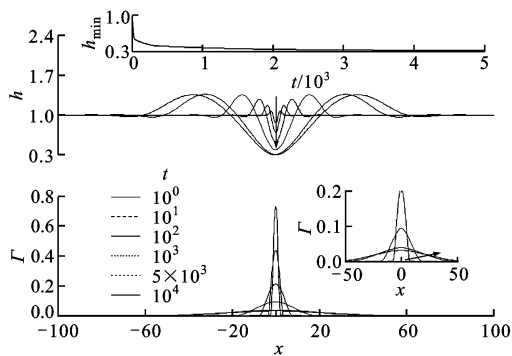


图 2 Marangoni 效应下液膜厚度及活性剂浓度的演化历程

3.2 范德华力对液膜演化的影响

范德华力作用下液膜厚度和活性剂浓度的演化历程如图 3 所示。由于范德华力与液膜厚度的 3 次方成反比,因此它对液膜厚度的变化十分敏感。由图 3 可知,演化初期与图 2 相似,在 Marangoni 效应下, $x=0$ 处液体向两侧流动,并在液膜表面形成凹陷,液膜表面承受着非均匀的分压, $x=0$ 、 $h_{\min}$ 处的分离压最大,并向两侧逐渐递减。在分离压梯度的驱使下,液体向两侧排挤, $x=0$ 处 $h_{\min}$ 迅速减小,液膜表面的活性剂分子运离,活性剂浓度迅速降低。由图 3 还可知,演化后期, $x=0$ 处活性剂浓度明显低于两侧, Marangoni 效应下 h_0 减小,但不足以抵消分离压的不稳定效应。与不考虑分离压时的演化

相比,范德华力下的演化历程极其短暂, $t=1.069\ 9$ 时液膜破断,演化终止。可见,范德华力对液膜稳定性的影响十分显著。

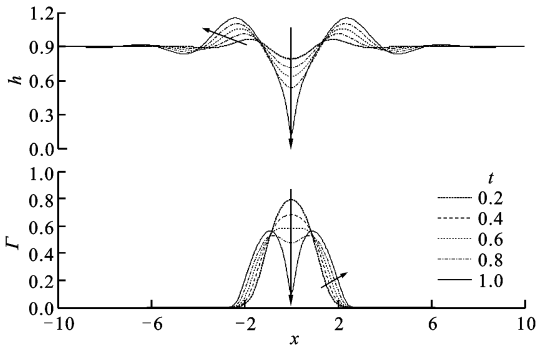


图 3 范德华力作用下液膜厚度及活性剂浓度的演化历程

3.3 Born 斥力对液膜演化的影响

研究表明,分子间的作用力不仅包括范德华力,当液膜厚度低于 10 nm 时,分子间斥力(Born 斥力^[6])开始起作用。范德华力和 Born 斥力下液膜厚度和活性剂浓度的演化历程如图 4 所示,此时对应图 1b 中 $A=B=1, C=0, h_{\infty}=0.1$ 的情形。该演化初期($t=0\sim1$),液膜厚度不在 Born 斥力的作用范围内,因此演化趋势与图 3 初期时相同。随着液膜厚度的减小,Born 斥力的作用逐渐显现,在 $x=0$ 处且 $h_{\min}$ 降至平衡液膜厚度时,Born 斥力与范德华力完全抵消,此后液膜厚度不再减小,也不会发生不稳定的破断,但是形成了厚度为 h_{∞} 的“破洞”。在分离压梯度的作用下,“破洞”半径匀速增大,液体外缘堆积成高度大于初始液膜厚度的波峰,该现象称为去湿过程。去湿过程出现后,活性剂分子仅沉积在去湿区外缘波峰的局部表面。

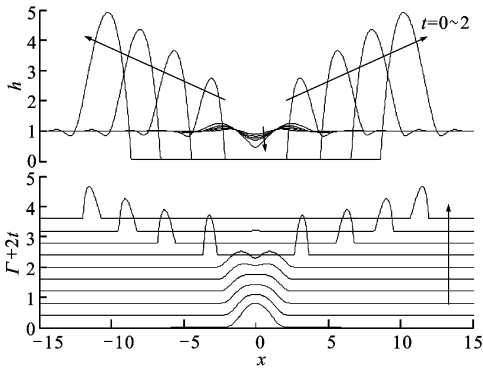


图 4 Born 斥力作用下液膜厚度及活性剂浓度的演化历程

3.4 静电斥力对液膜演化的影响

分离压的作用除了包含范德华力和 Born 斥力

以外,还应考虑表面电荷产生的静电斥力。基于分离压模型的不稳定条件 $d\Pi/dh>0$ 得到的不同静电斥力和初始厚度的液膜稳定性结果如表 2 所示。当 $C=5$ 时,静电斥力强度较弱,即使初始液膜较厚($h_0=1.2$),但仍满足去湿过程发生的条件,此时分离压与 h 的关系见图 1b;当 $C=10\sim100$ 时,静电斥力强度适中,此区间内静电斥力的强度差别显著,但均存在某一临界 h 使得静电斥力强度不稳定(见图 1c);当 $C=200$ 时,静电斥力强度占主导,液膜不再满足去湿过程发生的条件, $h_0=0.5$ 时液膜基本稳定(见表 2),事实上如果继续减小 h ,液膜仍然稳定,满足图 1d 的走势。

表 2 不同静电斥力下初始液膜厚度的稳定性结果

C	$h_0=0.5$	$h_0=0.8$	$h_0=1.0$	$h_0=1.2$
5	+	+	+	+
10	+	+	+	-
30	+	+	-	-
100	+	-	-	-
200	-	-	-	-

注: + 代表不稳定; - 代表稳定。

不同静电斥力强度和初始液膜厚度下液膜的演化历程如图 5 所示。由图 5 可知:当 $C=10$ 且 $h_0=1$ 时,演化初期液膜中心高度缓慢下降;当 $h_{\min}$ 接近 0.5 时,液膜迅速失稳,去湿过程发生;当 $C=30$ 且 $h_0=1$ 时,在静电斥力作用下,即使 $h_{\min}>0.9$,液膜也不会发生去湿过程;当 $C=30$ 且 $h_0=0.8$ 时,液膜出现了去湿过程;当 $C=100$ 时,即使 $h_0=0.8$,液膜也不会失稳,此时液膜表面波动幅度比 $C=30$ 且 $h_0=1.0$ 时更小,该结果与表 2 中的稳定性预测结果一致。

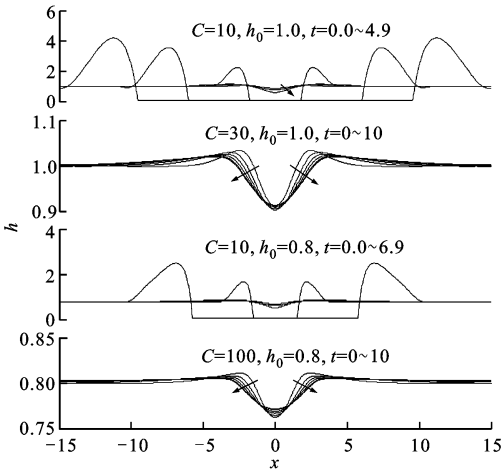


图 5 不同静电斥力强度和初始液膜厚度下液膜的演化历程

3.5 活性剂浓度对分离压的影响

上述研究表明,静电斥力强度对液膜的稳定性产生了质的影响,这种影响与液膜厚度相关。由于活性剂的浓度不均,所以静电斥力强度在各处也不尽相同。参考表2,选取 $C=30$ 时的中等强度静电斥力,来考察不同活性剂类型及浓度下分离压对液膜稳定性的影响机理。式(1)为分离压模型,其中各项系数为活性剂浓度的函数。对于阴离子活性剂,分离压中静电斥力强度随活性剂浓度的升高而增强,而对于非离子型和阳离子型活性剂,结果则相反^[10-12]。根据此特性,定义 $C=30\pm\alpha_2\Gamma$,其中 α_2 表示静电斥力与活性剂浓度相关联的强度。活性剂对范德华力和 Born 斥力的影响参照文献[6],其中表征强度的系数分别定义为 $A=1+\alpha_1\Gamma$, $B=1$ 且 $\alpha_1=1$ 。

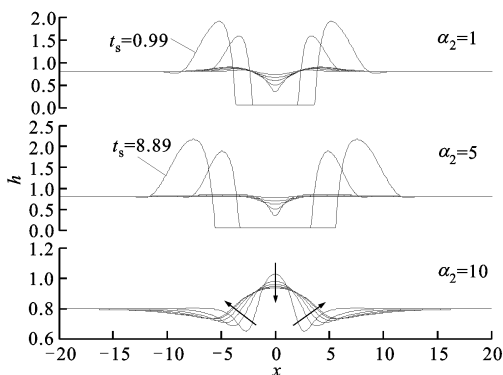


图6 $h_0=0.8$ 时不同阴离子型活性剂浓度下分离压对液膜演化历程的影响

$h_0=0.8$ 时不同阴离子型活性剂浓度下分离压对液膜演化历程的影响如图6所示,其中 $C=30+\alpha_2\Gamma$, α_2 分别为1、5、10。由表2可知,相同条件下,当 $\alpha_2=0$ 时,液膜不稳定。根据式(4)初始条件,活性剂浓度分布呈现出中心向两侧递减的趋势,因此初始时刻的液膜静电斥力强度分布也呈现出同样的情况。 $\alpha_2=1$ 时,静电斥力受活性剂浓度的影响较弱,演化开始后液膜迅速失稳,形成的去湿区及其外缘波峰在 $t_s=0.99$ 时达到滞止状态, t_s 为液膜演化滞止时刻。与相同条件下的图5相比,当活性剂浓度对静电斥力的影响较弱时,失稳无法避免且加速进行。 $\alpha_2=5$ 时,静电斥力受活性剂浓度的影响相对增强,此时去湿过程仍有发生,失稳发生的时间相对延长,即 $t_s=8.89$,因此液膜趋向稳定。 $\alpha_2=10$ 时,静电斥力受活性剂的浓度影响增强,演化初期且 $x=0$ 处较强的静电斥力使得液膜表面迅速突起,受质量守恒的作用,中心突起、两边凹陷。突起的液膜厚度止于范德华力与静电斥力的平衡处,随后液膜

在 Marangoni 力的作用下逐渐趋于平坦,且未发生失稳现象。

$h_0=1.0$ 时非离子、阳离子型活性剂下分离压对液膜演化历程的影响如图7所示,其中 $C=30-\alpha_2\Gamma$ 。 $\alpha_2=0$ 时,液膜中心凹陷,无失稳现象发生。 $\alpha_2=1$ 时,演化过程中液膜的厚度和活性剂浓度的变化不大,演化由 Marangoni 效应所主导。演化后期,液膜突然失稳,在 $t_s=22.4$ 时波形滞止。 $\alpha_2=2$ 时,演化过程与 $\alpha_2=1$ 时相似,只是发生失稳的时间更晚, $t_s=41.7$,表面变形也很小。由此可见:考虑活性剂影响的分离压显著降低了液膜的稳定性;随着静电斥力与活性剂浓度关联程度的增强,液膜不稳定程度有减弱的趋势。

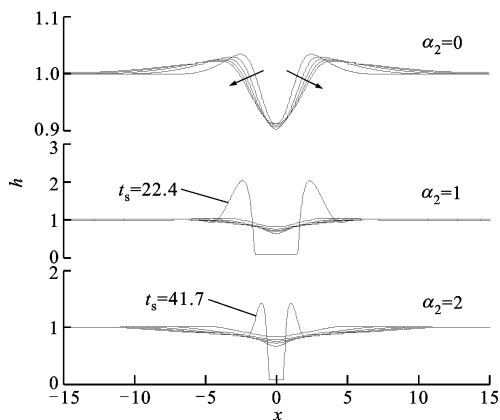


图7 $h_0=1.0$ 时非离子、阳离子型活性剂下分离压对液膜演化历程的影响

4 结 论

本文对初始厚度均匀且局部沉积表面活性剂的薄液膜去湿过程进行了数值研究,通过逐级增加分离压的影响,得到了分离压各分项对液膜稳定性影响的内在机理。考虑到活性剂浓度对液膜表面电荷的影响,将静电斥力的作用纳入分离压模型之中,同时讨论了不同活性剂和活性剂浓度对分离压模型及液膜稳定性的影响,进一步完善了含活性剂的薄液膜流动问题中的分离压模型,主要结论如下。

(1)忽略静电斥力时的分离压会导致液膜失稳,最终形成静态的去湿结构;考虑静电斥力时,液膜稳定性由静电斥力强度和初始液膜厚度共同决定。

(2)分离压对液膜稳定性的影响与活性剂类型及活性剂浓度与静电斥力的关联强度紧密相关。阴离子型活性剂有助于提高液膜的稳定性,降低去湿过程发生的可能性,而非离子、阳离子型活性剂的作用则相反。

参考文献:

- [1] 温诗铸, 黄平. 界面科学与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] CRASTER R V, MATAR O K. Dynamics and stability of thin liquid films [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(3): 1131-1189.
- [3] CRASTER R V, MATAR O K. On autophobing in surfactant-driven thin films [J]. *Langmuir*, 2007, 23(5): 2588-2601.
- [4] AFSAR-SIDDIQUI A B, LUCKHAM P F, MATAR O K. The spreading of surfactant solutions on thin liquid films [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, 106(1/2/3): 183-236.
- [5] BHAKTA A, RUCHKENSTEIN E. Decay of standing foams: Drainage, coalescence and collapse [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1997, 70(18): 1-124.
- [6] WARNER M R E, CRASTER R V, MATAR O K. Dewetting of ultrathin surfactant-covered films [J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(11): 4040-4054.
- [7] 德鲁·迈尔斯. 表面、界面及胶体: 原理及应用 [M]. 吴大诚, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [8] SCHWARTZ L W, ROY R V. Modeling draining flow in mobile and immobile soap films [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, 218(1): 309-323.
- [9] 叶学民, 李春曦. 表面活性剂铺展过程中的分离压特性 [J]. *电力科学与工程*, 2012, 28(5): 21-27.
YE Xuemin, LI Chunxi. Disjoining pressure characteristics in spreading of surfactant [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2012, 28(5): 21-27.
- [10] CLAESSEN P M, KJELLIN M, ROJAS O J, et al. Short-range interactions between non-ionic surfactant layers [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006, 8(47): 5501-5514.
- [11] STUBENRAUCH C, SCHLARMANN J, STREY R. A disjoining pressure study of n-dodecyl- β -D-maltoside foam films [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2002, 4(18): 4504-4513.
- [12] STUBENRAUCH C, KLITZING R V. Disjoining pressure in thin liquid foam and emulsion films: new concepts and perspectives [J]. *Journal of Physics*, 2003, 15(27): 1197-1232.
- [13] SHARMA A. Many paths to dewetting of thin films: Anatomy and physiology of surface instability [J]. *The European Physical Journal: E*, 2003, 12: 397-408.
- [14] 李春曦. 含活性剂液滴的铺展过程研究 [D]. 河北保定: 华北电力大学, 2011.

(编辑 苗凌)

(上接第 63 页)

(3) 采用大风机轮时, 膨胀机降温速度更快, 透平膨胀机出口温度较低, 但是大风机轮会影响气体轴承的稳定性, 实际中要结合流量和稳定性综合考虑, 即选择与进口流量和压力相匹配的风机轮。本实验中, 当风机轮的直径为 30 mm 时, 相对转速在 13 万~14 万 r/min 获得了一152℃的最低温度。

(4) 实验与理论计算结果吻合较好, 表明本文透平膨胀机的逆布雷顿空气制冷系统的动态温降理论模型能够较为准确地模拟实际系统的动态温降过程。

参考文献:

- [1] SATOSHI K. ICE (Inter City Express) の客车内冷房 [J]. *冷冻*, 2001(8): 23-28.
- [2] SPENCE S, DORAN W J, ARTT D W. Design, construction and testing of an air-cycle refrigeration system for road transport [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27(5): 503-510.
- [3] EARTHSHIP. Earthship introduces air cycle refrigeration system [J]. *Japan Air Conditioning, Heating & Refrigeration News*, 2004 (1): 16.
- [4] 林韶宁, 夏葵, 李军, 等. 空气制冷机在飞机空调系统中的应用 [J]. *流体机械*, 2004, 32(10): 46-49.
LIN Shaoning, XIA Kui, LI Jun, et al. Application of air refrigerator in aircraft air conditioning system [J]. *Fluid Machinery*, 2004, 32(10): 46-49.
- [5] 林韶宁, 姚艳霞, 王可, 等. 小型透平逆布雷顿循环空气制冷机的研制 [J]. *低温与超导*, 2004, 32(2): 1-4.
LIN Shaoning, YAO Yanxia, WANG Ke, et al. Development of small turbo Reverse-Brayton cycle air refrigerator [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2004, 32(2): 1-4.
- [6] 赵红利, 侯予, 陈汝刚, 等. -120℃小型逆布雷顿空气制冷机性能的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(8): 986-990.
ZHAO Hongli, HOU Yu, CHEN Rugang, et al. Experimental study on the performance of a small inverse Brayton air refrigerator a -120℃ [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(8): 986-990.

(编辑 苗凌)