

1-8-2019

Coalescence Characteristics of Droplets Containing Surfactants on Topographic Substrates

Xuemin Ye

Key Laboratory for Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Yuxi Lin

Key Laboratory for Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Lifang Lu

Key Laboratory for Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Chunxi Li

Key Laboratory for Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Coalescence Characteristics of Droplets Containing Surfactants on Topographic Substrates

Abstract

Abstract: The droplet motion evolution model was established based on the lubrication theory for two identical surfactant-containing droplets *on the topographic substrate*. The coalescing process of the droplets on topographic substrate was simulated, and the effects of spacing, wave number and base height on the characteristics of coalescing were examined. The results show that *the two droplets meet and superimpose each other under the capillary force, and finally form a "new" droplet at t_f . The dynamics of droplet over time are divided into five stages; while the surfactant concentration experiences the three stages in a short period; increasing spacing a extends the coalescing time of droplets; whereas increasing the wave number k leads droplet coalescing to be unstable; raising base height D shortens the coalescing time.*

Keywords

coalescence, surfactant, initial spacing, wave number, base height, 'new'droplet

Recommended Citation

Ye Xuemin, Lin Yuxi, Lu Lifang, Li Chunxi. Coalescence Characteristics of Droplets Containing Surfactants on Topographic Substrates[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2982-2990.

波纹状基底上含表面活性剂液滴的聚并特征

叶学民, 林瑜茜, 卢丽芳, 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, 保定 071003)

摘要: 针对两个相同的含表面活性剂液滴在波纹基底上的聚并行为, 基于润滑理论建立了液滴运动演化模型, 模拟了液滴在波纹基底波峰上的聚并历程, 探讨了液滴初始间距, 波数和基底高度对聚并特征的影响。结果表明: 两液滴在毛细力驱动下逐渐相遇并叠加, 最终在 t_f 时聚并形成一“新”液滴。液滴随时间的变化分为5个不同阶段; 表面活性剂浓度在短时间内完成三个阶段变化; 增大间距 a 将延长液滴聚并时间; 增大波数 k 会使液滴的聚并趋向于不稳定; 基底高度 D 的增大将缩短液滴聚并所需时间。

关键词: 聚并; 表面活性剂; 初始间距; 波数; 基底高度; “新”液滴

中图分类号: TP311.51 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 08-2982-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808020

Coalescence Characteristics of Droplets Containing Surfactants on Topographic Substrates

Ye Xuemin, Lin Yuxi, Lu Lifang, Li Chunxi

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

Abstract: The droplet motion evolution model was established based on the lubrication theory for two identical surfactant-containing droplets on the topographic substrate. The coalescing process of the droplets on topographic substrate was simulated, and the effects of spacing, wave number and base height on the characteristics of coalescing were examined. The results show that the two droplets meet and superimpose each other under the capillary force, and finally form a “new” droplet at t_f . The dynamics of droplet over time are divided into five stages; while the surfactant concentration experiences the three stages in a short period; increasing spacing a extends the coalescing time of droplets; whereas increasing the wave number k leads droplet coalescing to be unstable; raising base height D shortens the coalescing time.

Keywords: coalescence; surfactant; initial spacing; wave number; base height; “new” droplet

引言

液滴聚并是与体系界面性质、界面迁移和相间扩散等诸多因素有关的复杂过程^[1-2]。固体表面上的液滴聚并过程不仅受液滴性质控制, 还与基底形

状密切相关; 因工艺水平限制或人为构造等因素影响^[3], 实际基底存在明显的非平整性。随研究尺度的缩小, 基底表面粗糙度及微结构将对聚并过程产生重要影响, 揭示其运动特征及内在机理对乳状液稳定性、喷墨打印、涂层工艺、多相流、微/纳米颗粒合成及功能材料制备等领域具有重要的现实意义^[4-6]。

目前, 关于液滴聚并现象的研究已取得许多进展。Rykazewski 等^[7]指出当液滴在微结构超疏水



收稿日期: 2017-01-04 修回日期: 2017-03-28;
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11202079);
作者简介: 叶学民(1973-), 男, 邢台, 博士, 教授,
研究方向为流体动力学理论及应用; 林瑜茜(1992-),
女, 邵武, 硕士生, 研究方向为流体动力学理论及应用;
卢丽芳(1992-), 女, 硕士, 朔州, 研究方向为流
体动力学理论及应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 2982 •

表面发生珠状凝结时, 将有纳米至微米尺度的“卫星”液滴在主液滴周围形成, 二者的聚并有利于增强传热; 王靖涛等^[8]将波谱边界元素法引入微通道内液滴聚并的研究, 为研究微通道聚并提供了新方法; 邓楠楠等^[9]提出了液滴吞噬液滴触发液滴融合法和手术式触发液滴融合法, 为液滴在微通道中的聚并提出了新思路; 王凯等^[10]利用微流控技术研究了纳米颗粒体系在微通道内的液滴聚并, 表明加入疏水纳米颗粒会使聚并率缓慢下降, 而亲水纳米颗粒则可大幅提高液滴聚并率; Raymond 等^[11]采用原子力显微镜研究了可变形油滴在表面活性剂水溶液中的动态受力曲线, 指出两油滴相互靠近的速率对受力曲线有较大影响; 郭兰磊等^[12]对 DCAT21 表面/界面张力仪进行改造, 通过测量液滴间的相互作用力发现液滴接触后, 聚合物分子的空间阻碍效应和成膜作用将抑制液滴聚并。Dubash 等^[13]分析了导电液滴在均匀电场中的聚并现象, 发现液滴粘度、周围流体粘度及电场强度均会影响聚并过程; Gu 等^[14]通过改变电场强度和电极几何尺寸的方法使液滴按需求实现高精度聚并; 王洪萍等^[15]通过微观研究与宏观实验相结合的方法研究了超声波作用下液滴的运动与聚并特性, 指出提高超声波频率将延长液滴聚并时间; Liu 等^[16]运用格子-玻尔兹曼方法模拟了液滴聚并过程, 表明液滴只有在接触角足够大的超疏水表面上聚并后才会自发“跳跃”; 廖强等^[17]开展了倾斜均匀表面上等直径水滴的聚合过程可视化实验, 指出液滴聚合可加快液滴的运动, 使下滑临界半径减小。

虽然上述研究分析了诸多因素对液滴聚并过程的影响, 但均为平整光滑基底情形; 而已有研究表明^[18-19], 基底的非平整性将在很大程度上影响液滴的运动学特征, 这也必将影响液滴聚并过程, 然而目前这方面尚未有文献报道。为此, 本文针对非平整基底上的液滴聚并, 将非平整基底简化为波纹基底, 同时为避免讨论目前尚无统一结论的“液桥”^[20-21]问题, 采用润滑理论建立两液滴在预置液膜上的聚并模型, 借助数值计算模拟含表面

活性剂液滴在波纹基底上的聚并历程, 分析其聚并特性, 探讨液滴初始间距、波数和基底高度对聚并现象的影响。

1 理论模型

1.1 演化方程组

如图 1 所示, 无滑移、无渗透波纹状基底函数为 s^* , 基底高度为 D^* , 该基底上均匀铺有一厚度为 b^* 的预置液膜, 并在其上放置两相同含表面活性剂的液滴, 液滴物性与预置液膜相同, 且液滴与预置液膜为相切状态。假设液滴为不可压缩牛顿流体, 动力粘度 μ^* 和密度 ρ^* 为常数, 液膜自由表面外为无黏性气体, 液膜初始最大厚度 H^* 与流动方向尺度 L^* 相比非常小, 即 $\varepsilon=H^*/L^* \ll 1$, 上标*代表有量纲量, 因此适用于润滑理论^[22]。

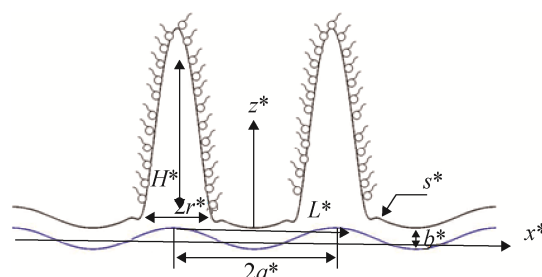


图 1 波纹基底含可溶性表面活性剂液滴初始状态示意图
Fig. 1 Coalescing of two droplets laden insoluble surfactant on a corrugated substrate

依据润滑理论可得演化方程组^[23-24]:

$$u_x + w_z = 0 \quad (1)$$

$$u_{zz} = p_x \quad (2)$$

$$p_z = 0 \quad (3)$$

$$G_t + (u_s G)_x = \frac{1}{Pe} G_{xx} \quad (4)$$

表面张力关系式为

$$\sigma = 1 - MG \quad (5)$$

边界条件为

$$u = w = 0, z = s \quad (6)$$

$$u_z = \sigma_x, z = h + s \quad (7)$$

$$p = -C(h_{xx} + s_{xx}), z = h + s \quad (8)$$

$$h_t + u_s(h_x + s_x) = w_s, z = h + s \quad (9)$$

式中：气液界面处的 Peclet 数 $Pe = U^* L^* / D_s^*$ ，Marangoni 数 $M = \alpha_G G_m^* / S^*$ ，毛细数 $C = \varepsilon^2 \sigma_m^* / S^*$ 。

结合式(1)~(9)，通过积分运算可得液膜厚度和表面活性剂分子浓度的演化方程组

$$h_t = [-\frac{C}{3} h^3 h_{xxx} - \frac{C}{3} h^3 s_{xxx} + \frac{M}{2} h^2 G_x]_x \quad (10)$$

$$G_t =$$

$$\frac{G_{xx}}{Pe_s} - [\frac{C}{2} h^2 G h_{xxx} + \frac{C}{2} h^2 G s_{xxx} - M h G G_x] \quad (11)$$

式(10)右侧三项分别代表毛细力作用、波纹基底作用和活性剂浓度引起的 Marangoni 效应；式(11)右侧第一项为活性剂扩散速率影响，其余三项影响与式(10)相同。

1.2 数值模拟

数值求解采用开源程序 PDECOL 进行求解，该程序采用 Gear 时间法和有限元法对时空进行离散，是求解抛物线型偏微分方程的高效算法^[25-26]，可广泛应用于科学、工程模拟、计算、模型开发和数学软件的开发研究。计算选取一维区域 $-10 < x < 10$ ，并对网格数为 1 000、2 000 和 3 000 进行了无关性验证。结果表明，网格数为 2 000 时迭代偏差仅为 0.18%，而网格数取 3 000 时，偏差几乎不变，但计算时长显著增加。因此，在考虑计算精度和计算时长的前提下，将计算区域划分为 2 000 网格数的均匀网格。

文中无量纲参数数量级范围为 $C=10^{-4} \sim 10^{-1}$ ， $M=0 \sim 10^2$ ， $Pe_s=10^{-2} \sim 10^4$ ，具体取值如下： $C=0.03$ ， $Pe_s=100$ ， $G_0=0.9$ ， $M=0.1$ ， $b=0.1$ 。

模拟初始条件为：

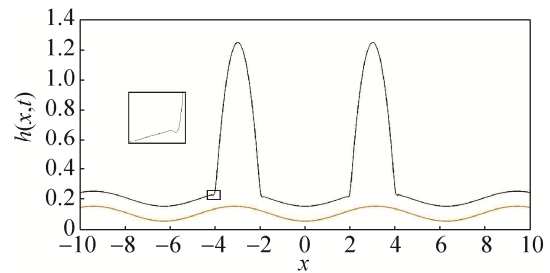
$$h(x, 0) = (1 + b - |x - a|^2)[F(1 - |x - a|) - F(-1 - |x - a|)] + b[F(|x - a| - 1) + F(-1 - |x - a|)] + D - s(x) \quad (12)$$

$$s(x) = D / 2[\sin(k_0 x) + 1] \quad (13)$$

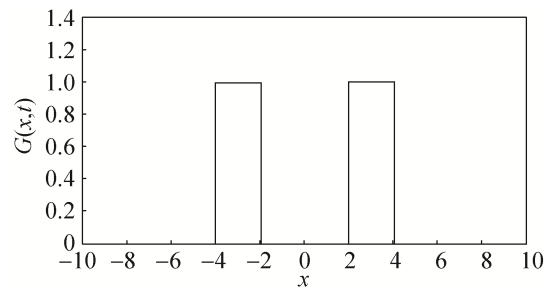
$$G(x, 0) = G_0[F(1 - |x - a|) - F(-1 - |x - a|)] \quad (14)$$

式中： $F(x) = 0.5[1 + \tanh(100x)]$ 为海氏阶跃函数。其中，基底高度 $D=0.1$ ；波数为 $k_0=1$ ； a 为两

液滴间的初始间距。图 2 为初始时刻的液膜厚度和表面活性剂浓度分布。



(a) 液膜厚度



(b) 表面活性剂浓度分布

图 2 初始时刻下的液膜厚度和表面活性剂浓度分布
Fig. 2 Distribution of the film thickness and surfactant concentration at initial time

需特别说明的是，液滴初始布置时为与预置液膜相切，两者之间过渡平滑，将在接触面处形成一小凹陷(如图 2 所示)，这与实际情况相吻合^[27]。

铺展过程中保证活性剂总摩尔质量守恒，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G dx = 1 \quad (15)$$

程序中的边界条件为

$$h_x(\infty, t) = h_{xxx}(\infty, t) = 0, G_x(\infty, t) = 0 \quad (16)$$

2 结果和分析

实际过程中两液滴在基底聚并时为随机分布状态，为突出分析基底不平整对聚并过程的影响，下文假设两液滴对称布置于波纹基底波峰处。下文首先分析含活性剂液滴的聚并历程，阐述其特征，后讨论液滴间距、波数和波纹基底厚度的影响。

2.1 液滴聚并过程

图 3(a)为液滴在 $t=0 \sim 4 \times 10^4$ 内的聚并过程。式(10)

表明, 聚并过程主要由毛细力、基底作用和 Marangoni 效应控制。液滴在初始时呈对称抛物线型分布^[24], 然后在 Marangoni 力和毛细力驱动下缓慢进行聚并, 最终形成一个“新”液滴; 这与 Liu 等^[16]模拟的平整基底聚并过程类似。因两液滴在初始时对称分布, 且大小、形状及受力状况均一致, 因此其厚度剖面在聚并过程也沿纵轴对称, 为此, 选用 $x=0$ 处液滴的厚度 $h|_{x=0}$ 作为研究聚并特征的重要参数, 其随时间的变化如表 1 所示。

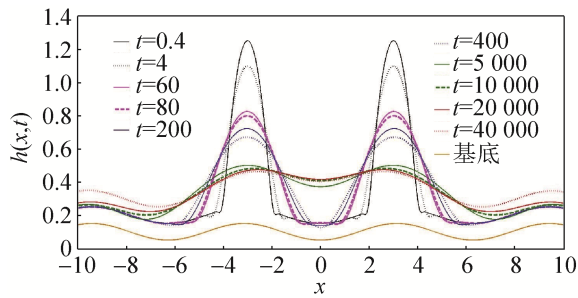
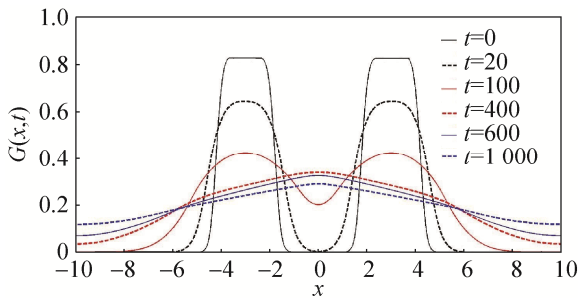
(a) 液滴外形 $t=0\sim 4\times 10^4$ (b) 活性剂浓度 $t=0\sim 10^3$

图 3 液滴聚并过程中的特征参数变化

Fig. 3 Evolution of characteristic parameters in coalescing process of droplets

表 1 $h|_{x=0}$ 随时间变化的不同阶段

Tab. 1 Different stages of the variation of the center film thickness with time

区间	$t=0\sim 4$	$t=4\sim 80$	$t=80\sim 400$	$t=400\sim 2\times 10^4$	$t>2\times 10^4$
趋势	不变	增大	减小	增大	减小

由图 3(a)可知, 液滴聚并过程大致分为五个阶段。阶段 I: $t=0\sim 4$, 两相邻波峰处液滴沿波纹基底从波峰至波谷处开始缓慢铺展, 但铺展范围比较小, 铺展前沿尚未接触, 故未对 $x=0$ 处预置液膜造成影响, 因此 $h|_{x=0}$ 高度保持不变。这与图 4^[28]液滴

聚并动态变化图中 $t=0$ ms 时刻相一致。阶段 II: $t=4\sim 80$, 相邻铺展前沿在波谷处开始接触, $x=0$ 处呈类波峰的凸起结构, $h|_{x=0}$ 有所增高, 直至铺展前沿完全叠加, $h|_{x=0}$ 达到极大值。阶段 III: $t=80\sim 400$, 铺展前沿叠加过程已基本结束, 液滴凹陷处随铺展进行沿波纹状基底到达该波谷处并开始叠加, 使 $h|_{x=0}$ 再次开始减小, 直至该凹陷结构叠加完成, 此时 $h|_{x=0}$ 达到极小值, 这一时刻为液滴开始聚并时刻 t_s 。阶段 II~III 符合图 4 中 $t=0\sim 3.5$ ms 变化过程。阶段 IV: $t=400\sim 2\times 10^4$, 液滴开始在 Marangoni 力和毛细力的共同驱动下叠加, 波峰处液滴不断沿波纹状基底向波谷汇聚, 并在 $x=0$ 处形成隆起, 随时间持续, $h|_{x=0}$ 逐渐增大, 直至两液滴聚并完成、并形成一个“新”液滴, $h|_{x=0}$ 达到最大值, 这一时刻为液滴完成聚并时刻 t_f 。这与图 4 中 $t=3.5\sim 17.5$ ms 过程液滴形态变化一致。阶段 V: $t>2\times 10^4$, 阶段 IV 中形成的“新”液滴开始向两侧铺展, $h|_{x=0}$ 降低, 液滴外侧的液膜厚度开始增大。该情况与图 4 中 $t>17.5$ ms 变化规律类似。总之, 在液滴聚并过程中, 阶段 IV 为液滴主体的聚并阶段。液滴厚度分布在整个过程均保持对称, 最终两液滴将聚并成一“新”液滴, 然后作为整体向两侧铺展。

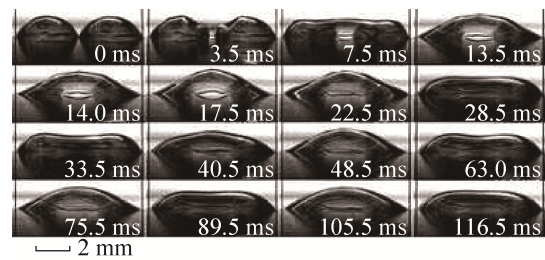
图 4 液滴聚并动态过程^[28]Fig. 4 Droplet Coalescing process^[28]

图 3(b)为液滴聚并过程中活性剂浓度 G 的变化。当液滴开始聚并时, 活性剂浓度迅速向两侧扩散, 浓度剖面由对称双矩形演变为双波峰结构, 后演变为单峰结构; 其后因活性剂浓度逐步均匀, 波峰趋于平缓。活性剂在扩散过程中完成了一次“类似”于液滴的“聚并”历程。该过程分为三个阶段: 阶段 I: $t=0\sim 4$ 时, 此时活性剂只分布在两液滴表

面，液滴间只进行铺展运动，活性剂不相互扩散，因此活性剂浓度曲线保持水平，即 $G|_{x=0}=0$ ；在该过程中，活性剂浓度分布由双矩形迅速演化为双波峰结构。阶段 II： $t=4\sim 300$ 时，液滴开始聚并，活性剂分子于波谷中聚集，波峰高度逐渐降低而 $G|_{x=0}$ 升高，在此期间，活性剂分布由双波峰结构向单波峰结构转变。阶段 III： $t>300$ 时，可认为活性剂已完成“聚并”，活性剂浓度开始向两侧扩散，并逐渐趋于均匀，因此 $G|_{x=0}$ 下降而两侧浓度开始升高。 $G|_{x=0}$ 随时间的变化如表 2 所示。

表 2 $G|_{x=0}$ 随时间变化的不同阶段
Tab. 2 Different stages of the variation of the surfactant concentration at $x=0$ with time

区间	$t=0\sim 4$	$t=4\sim 300$	$t>300$
趋势	不变	增大	减小

通过对比液滴和活性剂的聚并过程可发现，活性剂浓度梯度形成的 Marangoni 效应在早期有利于两相邻液滴铺展前沿汇聚，但后期的单波峰结构将形成由中心向两侧的张力梯度，驱使液滴主体部分向两侧铺展，阻碍其向 $x=0$ 处聚集，抑制聚并的进行。

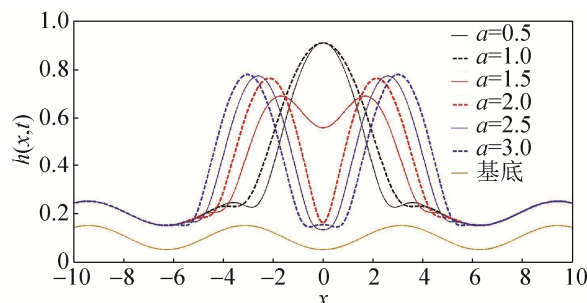
2.2 主要特征参数的影响

2.2.1 液滴间距

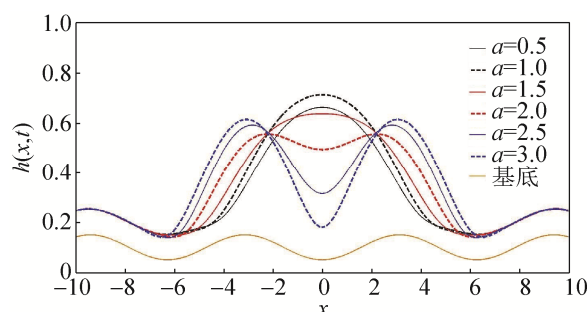
为研究液滴初始间距 $2a$ 对聚并特征的影响，图 5 给出了 $a=0.5\sim 3.0$ 内不同时刻下的液滴轮廓图。图 5(a)~(b)表明，当 $2a\leq r(a=0.5)$ 时，即将两液滴交叠置于同一波谷处，液滴迅速完成聚并；而当 $2a>r$ 时，随 a 增大，两液滴需“走过”更长路程才能开始聚并，因此在其他条件相同情形下，将较晚完成聚并；同时液滴在铺展过程中向外侧铺展范围增大，可参与聚并的物质比例减少，最终形成的“新”液滴厚度更小，覆盖范围更广泛， $h-x$ 曲线更平缓。

液滴间距对活性剂浓度的“聚并”也存在类似影响。如图 5(c)~(d)，当 $2a\leq r$ 时，液滴中的活性剂迅速完成聚并开始向外侧扩散，活性剂浓度有所降低而影响范围增大；当 $2a>r$ 时，随 a 增大，活

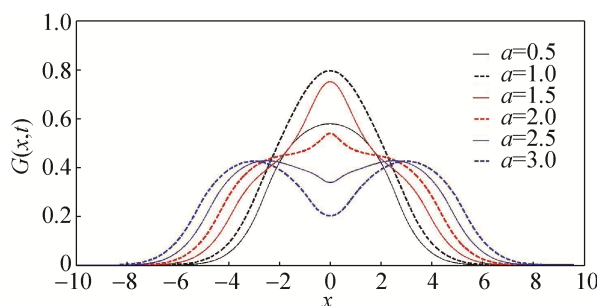
性剂分子向中心汇集须跨越的路程更远，趋于均匀的时间更长，液滴向外扩散范围变广，“新”液滴外形更为光滑平坦，完成“聚并”后的浓度分布更均匀， $G-x$ 曲线相对平缓。



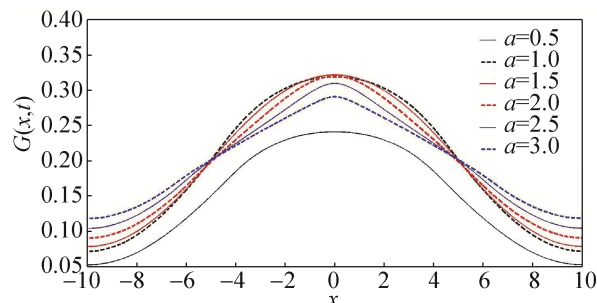
(a) $t=100 < t_s(a=3)$ 时的液滴高度



(b) $t=1000 > t_s$ 时的液滴高度



(c) $t=100 < t_s$ 时的活性剂浓度分布



(d) $t=1000 > t_s$ 时的活性剂浓度分布

图 5 间距 a 对液滴高度和活性剂浓度分布的影响
Fig. 5 Effect of droplet spacing a on the droplet profile and surfactant concentration distribution.

图6为不同液滴初始间距下开始和完成聚并时刻 t_s 和 t_f 的变化。由图6可知,当 a 增加时, t_s 和 t_f 均有所增大,尤其是当 $a > 2.0$ 后更为明显,其可能原因是此时初始液滴放置不发生重叠,两液滴在聚并初期无接触,需要更长时间进行铺展,因此造成聚并时间大幅度延长。其总体变化趋势为 $t_s \sim a^{4.5253}$ 和 $t_f \sim a^{5.0877}$ 。

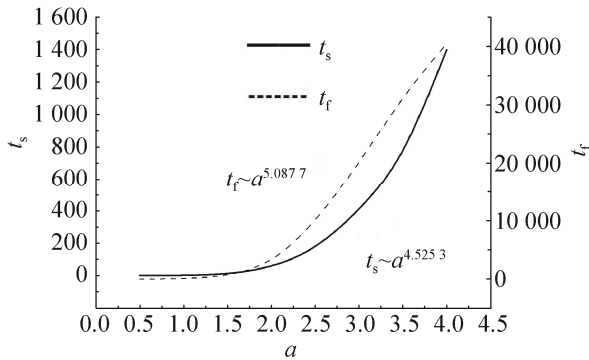
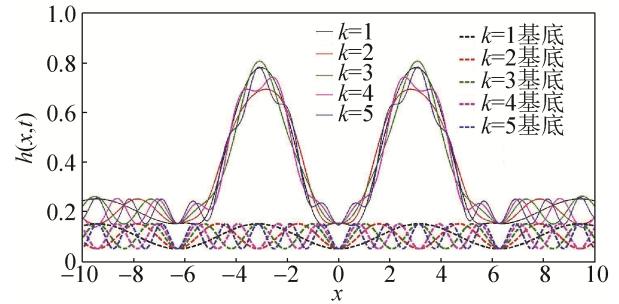


图6 初始间距 a 值对 t_s 和 t_f 的影响
Fig. 6 Effect of a values on t_s and t_f

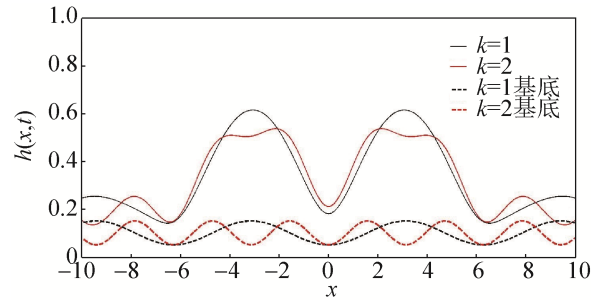
2.2.2 基底波数

基底波数 k 是描述基底不平整性的重要参数,势必将影响液滴的聚并过程。如图7(a)~(b)所示,随 k 增加,波纹基底呈周期性变化,相同距离内波峰数量增加,液滴由最初对称置于波纹基底波峰变为横跨多个基底波峰,液滴运动趋于不稳定。当 $t < t_s$ 时,提高 k 导致液滴表面形状变化剧烈,液滴凹陷处加深,铺展前沿处的子波数显著增多,液滴运动规律与裴建军等^[18]模拟非平整基底液膜铺展现象相一致;当 $t > t_s$ 时,液滴聚并过程中的不稳定性随 k 增大而增强,液滴最高处波动明显且高度降低,铺展前沿子波数增多。

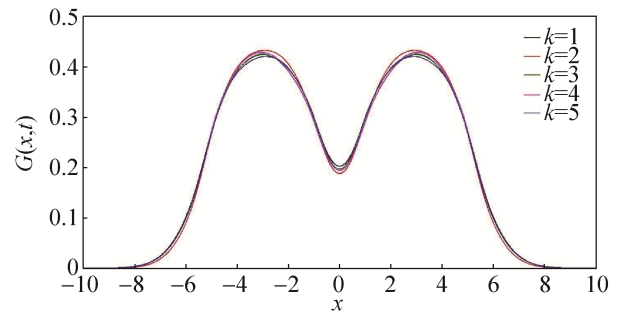
图7(c)~(d)表明,表面活性剂浓度梯度随 k 提高而有小幅增大,使Marangoni效应增强,但因基底不平整性导致毛细力变化,二者的综合并未影响液滴的聚并时间。因此上述研究表明, k 的增大将影响液滴稳定性,导致液滴聚并过程中波动增强,但并未对聚并时间造成影响。



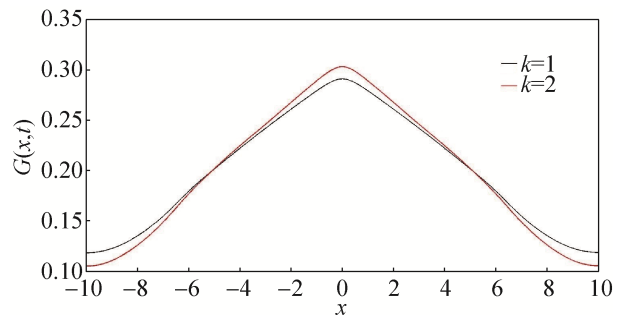
(a) $t=100 < t_s(k=1)$ 时的液滴高度



(b) $t=1000 > t_s$ 时的液滴高度



(c) $t=100 < t_s$ 时的活性剂浓度分布



(d) $t=1000 > t_s$ 时的活性剂浓度分布

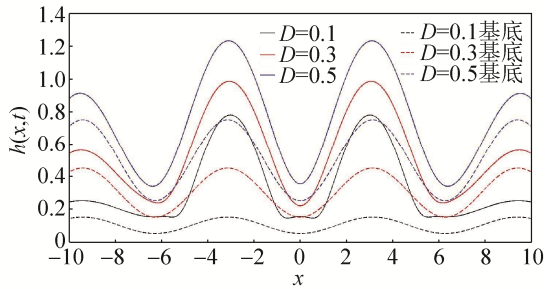
图7 波数 k 对液滴高度和活性剂浓度分布的影响
Fig. 7 Effect of wave number k on the droplet thickness and surfactant concentration distribution.

2.2.3 基底高度的影响

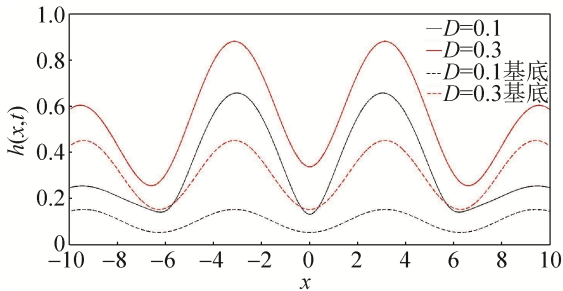
与平整基底的聚并不同,由于波纹状基底存在由波峰至波谷的高度差,因此基底高度 D 也将影响液滴的聚并过程。图8为 $D=0.1\sim 0.5$ 、不同时刻

下的液滴轮廓图和活性剂浓度分布。如图 8(a)~(b), 提高 D 将导致基底峰谷高度差增加, 由此基底不平整度增加, 毛细力强度增强, 促进液滴聚并。当 $t < t_s$ 时, 随 D 增加, 液滴高度升高, 两液滴间形成夹角变小, 导致切向速度增加, 液滴铺展速度明显升高, 加快了液滴铺展前沿在 $x=0$ 处的汇聚; 当 $t > t_s$ 时, 增加 D 将提高毛细力作用, 加速了液滴聚并, 缩短了液滴聚并时间。

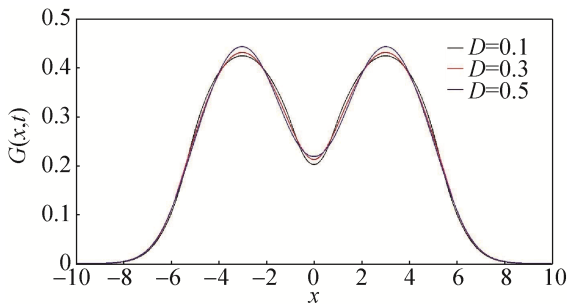
图 8(c)~(d)表明, 聚并过程中随 D 增大, 活性剂浓度升高, 由式(5)可知, 表面张力与活性剂浓度成反比, 因此表面张力减小, 促进液滴实现聚并; 而形成“新”液滴后, 基底不平整度增大会减弱活性剂浓度梯度, 从而导致表面张力增大, 活性剂铺展变得缓慢。这与李春曦等^[24]模拟的非平整基底铺展过程所得结论一致。



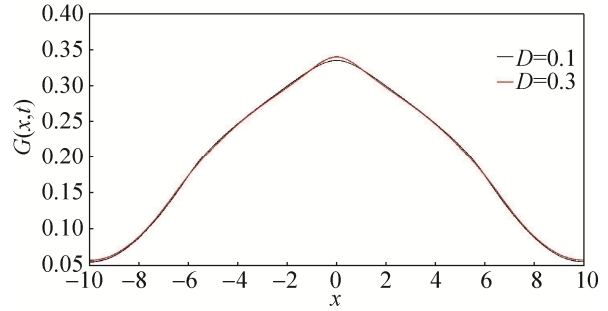
(a) $t=100 < t_s (D=0.1)$ 时的液滴高度



(b) $t=500 > t_s$ 时的液滴高度



(c) $t=100 < t_s$ 时的活性剂浓度分布



(d) $t=500 > t_s$ 时的活性剂浓度分布

图 8 基底高度 D 对液滴高度和活性剂浓度分布的影响
Fig. 8 Effect of base height D on the droplet thickness and surfactant concentration distribution.

不同 D 影响下的 t_s 和 t_f 如图 9 所示, 随 D 增大, t_s 和 t_f 均降低, 表明两个相邻液滴在更短时间里可实现聚并获得一个“新”的液滴。当 $D > 0.4$ 后, t_s 和 t_f 迅速减小趋近于零, 其可能原因是当 D 过大时, 初始液滴运动速度极大, 在毛细力作用下迅速完成聚并。 t_s 和 t_f 的总体变化趋势满足 $t_s \sim D^{-1.644}$ 和 $t_f \sim D^{-2.242}$ 。参数对聚并时间的影响如表 3 所示。

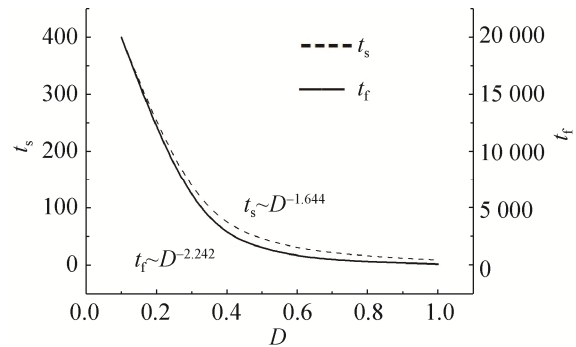


图 9 基底高度 D 值对 t_s 和 t_f 的影响

Fig. 9 Effect of D values on t_s and t_f

表 3 增大参数对液滴聚并时间的影响

Tab. 3 Effect of increasing parameters on the coalescence of droplets

参数	特征时间	
	t_s	t_f
a	增大, $t_s \sim a^{4.5253}$	增大, $t_f \sim a^{5.0877}$
k	不变	不变
D	减小, $t_s \sim D^{-1.644}$	减小, $t_f \sim D^{-2.242}$

3 结论

(1) 两含活性剂液滴置于波纹状基底上, 液滴

将沿波纹基底铺展, 直至相邻液滴铺展前沿相遇, 随后液滴主体部分也相互叠加, 在 t_f 时刻聚并完成形成一个“新”液滴, 之后“新”液滴将继续铺展, 厚度分布逐渐变均匀, 液滴中心高度 $h|_{x=0}$ 完成由不变→增大→减小→增大→减小的变化; 伴随液滴的聚并, 活性剂浓度剖面在短时间内完成由双矩形结构→双波峰结构→单波峰结构的变化; 活性剂浓度梯度形成 Marangoni 效应, 在早期有利于两相邻液滴铺展前沿汇聚, 但单波峰结构将形成由中心向两侧的张力梯度, 驱使液滴主体部分向两侧铺展, 阻碍其向 $x=0$ 处聚集, 抑制聚并的进行。

(2) 增大初始间距 a 会延长聚并完成所需时间 t_f , 且液滴将在“途中”更多地向外铺展, 聚并形成的“新”液滴更扁平、覆盖范围更广泛; a 对活性剂分子“聚并”特征的影响与对液滴聚并的影响类似。增大波数 k 会使波纹状基底的不平整度提高, 导致液滴表面形状变化剧烈, 铺展前沿处的子波数显著增多, 从而使得液滴的聚并趋向于不稳定, 液滴聚并过程中波动性增强; 活性剂分子“聚并”时波动略有增加。增大基底高度 D 会使波纹基底高度差增加, 加快液滴运动切向速度, 缩短了聚并完成所需时间 t_f ; 随 D 增大, 活性剂浓度升高, 表面张力减小, 促进液滴聚并。

参考文献:

- [1] 胡学铮, 陈焯璞, 倪邦庆, 等. 界面现象与液滴聚并[J]. 物理化学学报, 1998, 14(2): 136-141.
Hu Xuezheng, Chen Yepu, Ni Bangqing, et al. Interfacial Phenomenon and Coalescence [J]. Acta Physico-chemica Sinica, 1998, 14 (2): 136-141.
- [2] 罗小明, 王洪萍, 何利民, 等. 超声波作用下油中水滴的运动与变形特性[J]. 石油学报石油加工, 2014, 30(5): 895-901.
Luo Xiaoming, Wang Hongping, He Limin, et al. Movement and Deformation Characteristics of Water Droplets in Oil under Ultrasonication [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 30(5): 895-901.
- [3] 李春曦, 陈朋强, 叶学民. 连续凹槽基底对含非溶性活性剂薄液膜流动特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 224703.
Li Chunxi, Chen Pengqiang, Ye Xuemin. Effect of Periodic Grooving Topography on Dynamics of Insoluble Surfactant-laden Thin Film Flow [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 224703.
- [4] 张宇明, 曹其新. 一种时变非线性系统的自适应逆控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 760-763.
Zhang Yuming, Cao Qixin. Simulation of Adaptive Inverse Control for Time-varying Nonlinear System [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 760-763.
- [5] 袁江涛, 杨立, 孙嵘, 等. 机动军事目标动力排气系统喷雾降温的三维仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 330-334.
Yuan Jiangtao, Yang Li, Sun Rong, et al. Three-Dimensional Simulation on Mist Cooling in Power Machine Exhaust System in Motive Military Target [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2): 330-334.
- [6] 王传礼, 丁凡, 张凯军. 稀土超磁致伸缩转换器的动态特性仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 379-381.
Wang Chuanli, Ding Fan, Zhang Kaijun. The Study on Simulation of Dynamic Characteristic of Rare-earth GMA [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(3): 379-381.
- [7] Rykaczewski K, Scott J H J, Rajauria S, et al. Three Dimensional Aspects of Droplet Coalescence During Dropwise Condensation on Superhydrophobic Surfaces [J]. Soft Matter (S1744-683X), 2011, 7(19): 8749-8752.
- [8] 王靖涛, 韩俊杰, 陶君, 等. 利用波谱边界元素法研究微通道内液滴、气泡的变形和聚并[J]. 化工进展, 2011(增 2): 26-29.
Wang Jingtao, Han Junjie, Tao Jun, et al. Numerical Study of Deformation and Coalescence of Droplets or Bubbles Inmicrochannels by Spectral Boundary Element Method [J]. Chemical Industry Progress, 2011(S2): 26-29.
- [9] 邓楠楠, 汪伟, 巨晓洁, 等. 微流控技术操控微尺度液滴及其聚并的研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2015, 45(1): 7-15.
Deng Nannan, Wang Wei, Ju Xiaojie, et al. Recent Advances in Microfluidic Manipulation and Coalescence of Microscale Droplets [J]. Scientia Sinica Chimica, 2015, 45(1): 7-15.
- [10] 王凯, 易诗婷, 周倩倩, 等. 微通道内纳米颗粒对液滴聚并的影响规律[J]. 化工学报, 2016(2): 469-475.
Wang Kai, Yi Shiting, Zhou Qianqian, et al. Effect of Nano-particles on Droplet Coalescence in Microchannel Device [J]. CIESC Journal, 2016(2): 469-475.
- [11] Dagastine R R, Webber G B, Manica R, et al. Viscosity Effects on Hydrodynamic Drainage Force Measurements

- Involving Deformable Bodies[J]. *Langmuir* (S0743-7463), 2010, 26(26): 11921.
- [12] 郭兰磊, 李静, 祝仰文, 等. 模拟乳状液中微小液滴间的相互作用力[J]. *高等学校化学学报*, 2016, 37(2): 361-366.
Gou Lanlei, Li Jing, Zhu Yangwen, et al. Interaction Forces Between Simulated Mini Liquid Droplets of Emulsions [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2016, 37(2): 361-366.
- [13] Dubash N, Mestel A J. Breakup Behavior of a Conducting Drop Suspended in a Viscous Fluid Subject to an Electric Field[J]. *Physics of Fluids* (S1070-6631), 2007, 19(7): 319-345.
- [14] Hao G, Duits M H G, Frieder M. Droplets Formation and Merging in Two-phase Flow Microfluidics[J]. *International Journal of Molecular Sciences* (S1422-0067), 2011, 12(4): 2572-2597.
- [15] 王洪萍. 超声波作用下液滴运动与聚并特性研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
Wang Hongping. Investigation of the Movement and Coalescence Characteristics of Droplets under the Effect of Ultrasonic [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [16] Liu X, Cheng P, Quan X. Lattice Boltzmann Simulations for Self-propelled Jumping of Droplets after Coalescence on a Superhydrophobic Surface[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer* (S0017-9310), 2014, 73(73): 195-200.
- [17] 廖强, 邢淑敏, 朱恂, 等. 倾斜均质表面上等径水滴聚合过程的可视化实验[C]. 2006 中国工程热物理学会多相流学术会议, 2006: 431-434.
Liao Qiang, Xing Shumin, Zhu Xun, et al. Experimental Investigation on Coalescence of Equal-size Water Drops on Inclined Homogeneous Surface [C]. 2006 China Society of Engineering Thermophysics Multiphase Seminar, 2006: 431-434.
- [18] 裴建军. 非平整基底上含不溶性表面活性剂溶液的流动特性[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
Pei Jianjun. Flow Characteristics of the Solution with Insoluble Surfactant on Topographic Substrates [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [19] 陈朋强. 不溶性表面活性剂液膜在非平整基底上的流动特征[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
Chen Pengqiang. Flow Characteristics of Thin Film Containing Insoluble Surfactant over Topography Surface [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [20] Chireux V, Fabre D, Risso F, et al. Oscillations of a Liquid Bridge Resulting from the Coalescence of Two Droplets[J]. *Physics of Fluids* (S1070-6631), 2015, 27(6): 865-929.
- [21] Chen G, Tan P, Chen S, et al. Coalescence of Pickering Emulsion Droplets Induced by an Electric Field[J]. *Physical Review Letters* (S0031-9007), 2013, 110(6): 640-647.
- [22] 赵亚溥. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Zhao Yabo. Physical Mechanics of Surfaces and Interfaces [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [23] 王松岭, 李春曦, 叶学民. 含表面活性剂液滴的受热铺展特性[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(14): 63-70.
Wang Songling, Li Chunxi, Ye Xuemin. Spreading of A Liquid Drop Containing Insoluble Surfactant Driven by Thermocapillary [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2011, 31(14): 63-70.
- [24] 李春曦, 裴建军, 叶学民. 波纹状基底上含不溶性表面活性剂液滴的铺展过程[J]. *化工学报*, 2013, 64(9): 3308-3316.
Li Chunxi, Pei Jianjun, Ye Xuemin. Spreading of Liquid Droplet Containing Insoluble Surfactant over Corrugated Topography Surface [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(9): 3308-3316.
- [25] Matar O K. Nonlinear Evolution of Thin Free Viscous Films in the Presence of Soluble Surfactant[J]. *Physics of Fluids* (S1070-6631), 2002, 14(12): 4216-4234.
- [26] Warner M R E, Craster R V, Matar O K. Fingering Phenomena Created by a Soluble Surfactant Deposition on a Thin Liquid Film[J]. *Physics of Fluids* (S1070-6631), 2004, 16(8): 2933-2951.
- [27] Yuan F, Ma M, Ren L, et al. Possible Future Climate Change Impacts on the Hydrological Drought Events in the Weihe River Basin, China[J]. *Advances in Meteorology* (S1687-9309), 2016(3): 1-14.
- [28] 邢淑敏. 均质表面上液滴聚合的可视化实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Xing Shumin. Visual experimental study on droplet coalescence on homogeneous surface[D]. Chongqing: Chongqing university, 2006.