

表面活性剂溶液界面拉压驱动液滴浸润性响应¹⁾

陈 聪^{*,†} 王 进^{*,2)} 纪文杰^{†,**} 秦威广^{*,†} 王育人^{†,**} 蓝 鼎^{†,**,3)}

^{*}(青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东青岛 266520)

[†](中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

^{**}(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 液体表面的流体铺展在许多工程领域中具有广泛的应用前景。本文提出通过挡板对底液表面的拉压实现液滴的动态浸润响应, 以正十六烷为受驱动液滴、十二烷基硫酸钠溶液为基底溶液组成浸润实验体系。挡板向外拉伸时, 表面活性剂分子面密度降低, 铺展系数增大, 液滴铺展; 挡板向内挤压时, 表面活性剂分子面密度增大, 铺展系数减小, 液滴收缩。挡板往复运动实现了液滴的浸润性响应调控, 这一工作为实现界面液膜的调节提供了新的思路。

关键词 浸润性, 表面张力, 表面活性剂

中图分类号: O647 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-22-559

RESPONSE OF THE DROPLET WETTABILITY DRIVEN BY INTERFACIAL TENSION OF SURFACTANT SOLUTION¹⁾

CHEN Cong^{*,†} WANG Jin^{*,2)} JI Wenjie^{†,**} QIN Weiguang^{*,†} WANG Yuren^{†,**} LAN Ding^{†,**,3)}

^{*}(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China)

[†](National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^{**}(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Fluid spreading on liquid surfaces has a wide range of applications in many engineering fields. In this paper, it is proposed that the dynamic wetting response of droplets can be realized by the pulling and pressing of the baffle on the surface of the substrate. The infiltration experimental system was composed of n-hexadecane as the driven droplet and sodium dodecyl sulfate solution as the base solution. When the baffle is stretched outward, the molecular areal density of the surfactant decreases, the spreading coefficient increases, and the droplets spread. When the baffle is squeezed inward, the molecular areal density of the surfactant increases, the spreading coefficient decreases, and the droplets shrink. The reciprocating motion of the baffle realizes the wettability response regulation of the droplet, which provides a new idea for the adjustment of the interface liquid film.

Keywords wettability, surface tension, surfactant

润湿是一种液体在固体表面上的扩散现象^[1], 而浸润性是指液体对固体表面(或液体)表面润湿程度的描述。关于表面浸润现象的本质此前已

经进行相关的研究^[2], 不同表面的润湿特性是诸多工业领域和高新技术的应用关键, 如表面自清洁^[3]、表面减阻^[4]、抑制结霜结冰^[5]、油墨喷

2022-10-08 收到第 1 稿, 2022-11-09 收到修改稿。

1) 山东省重点研发计划(2019GGX102023)和中国科学院先导项目(XDA17030100, Y820081XD1, Y820082XD1)资助。

2) 王进, 副教授, 主要从事材料表面工程的研究。E-mail: wangjin@qut.edu.cn

3) 蓝鼎, 副研究员, 主要从事自组有序结构材料: 自组装机理与材料特性研究。E-mail: landing@imech.ac.cn

引用格式: 陈聪, 王进, 纪文杰等. 表面活性剂溶液界面拉压驱动液滴浸润性响应. 力学与实践, 2023, 45(1): 67-74

Chen Cong, Wang Jin, Ji Wenjie, et al. Response of the droplet wettability driven by interfacial tension of surfactant solution. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(1): 67-74

印^[6]、水力定向输运^[7]、强化冷凝换热^[8]等。一般固体表面的浸润状态分为两种：部分浸润（或称为不完全浸润），液滴以一个确定的接触角覆盖部分基底；另一种情况则称为完全浸润，即液滴在固体表面完全铺展，形成厚度均匀薄液层，此时的接触角为 0° 。液滴除了会在固体表面铺展还会在液体表面铺展，事实上，将不溶性油滴加到清洁的水溶液表面上时，可能表现出三种不同的浸润状态^[9]。通常将铺展系数 S 作为系统浸润性的判据^[10]，用以区分不同的浸润状态，第一种（ $S < 0$ ）状态被称为部分浸润状态或部分铺展状态。在这种情况下，液滴以“透镜”的形式稳定停留于溶液表面，简单的直链烷烃通常在纯净的水面呈现这种状态。第二种状态（ $S > 0$ ）为油滴铺展成一层均匀的薄膜，并覆盖整个表面。这种薄膜有足够的厚度，可以形成两个界面，即薄膜-溶液和薄膜-空气界面，这两个独立的界面有各自的界面张力，这种状态被称为完全浸润状态或完全铺展状态。第三种状态（ $S > 0$ ）是油滴在水溶液表面铺展形成一个纳米级的单分子膜，其余的油（过量的油）就以一个或多个“透镜”的形式存在于水溶液表面，并且单分子膜和“透镜”保持平衡。当油滴被放置在表面活性剂溶液上时，这种情况是最常见的，称之为伪不完全浸润状态，也被称为伪部分铺展状态^[11]。

当含有活性剂的液滴或溶液放置在固体表面或预置液膜表面上，液滴或溶液将出现铺展（润湿）或憎水（去湿）现象。表面活性剂的分子一头含有极性（亲水性）基团，另一头含有非极性基团，能够定向排列于两相之间的界面层，改变界面的表面张力进而影响铺展、润湿及粘附等过程。因此当表面活性剂分散在水溶液中，活性剂分子聚集于水面上，形成所谓的单分子膜。表面活性剂分子在界面会发生吸附，这是由其特殊的分子结构和在溶液表面特殊的定位排列方式所决定的^[12]。当有新的表面产生时，溶液表面活性剂浓度偏离平衡，导致表面区域的表面活性剂浓度降低。而溶液体相浓度较高，由于浓度差导致表面活性剂分子由体相向表面扩散。在到吸附平衡过程中，吸附量 Γ 逐渐增加，界面张力随着时间变化，即所谓的表面张力的动态变化^[13]。由于铺展的双亲

分子量是一定的，故通过对界面的拉伸压缩改变平均分子面积的大小可以使得表面活性剂分子的分布发生改变^[14]。使得其在界面的分布密度发生变化，液滴所处的环境表面张力发生改变，从而实现正十六烷液滴形态的控制。这一方法有望在二维纳米晶体制备中得到应用。目前，液-液界面组装纳米粒子常用特殊诱导分子、无机盐诱导、有机小分子诱导以及两相混合在界面自然成膜的界面组装^[15-18]。但形成的无缺陷二维单晶薄膜面积较小，需要有新的方法来实现理想的大面积无缺陷薄膜。与原子分子体系不同的是，二维胶体体系中扮演“温度”这一角色的是胶体粒子的面积占比（结构化温度）^[19]。因此，在制备过程中可通过调控面积分数来实现重熔和结晶，从而改善胶体晶体质量。而通过拉-压的方式有望改变二维纳米晶体“温度”，实现二维晶体的重熔与再结晶，以此提高二维纳米晶体的质量。

本文研究了正十六烷在十二烷基硫酸钠（sodium dodecyl sulfate, SDS）溶液上的浸润现象。这两种互不相溶的液体组成的系统通过挡板对基底溶液表面的压缩-拉伸，观察挡板拉-压过程中溶液表面浸润状态的变化情况。发现液滴的浸润性响应规律，从而为改变界面二维晶体结构的“温度”提供一种可行的方法。

1 实验装置及实验方法

实验中使用上海阿拉丁生物化学技术有限公司的正十六烷（分析纯，98%）作为液滴相，国药集团化学试剂有限公司的十二烷基硫酸钠（化学纯）作为水溶液的溶质，通过将十二烷基硫酸钠溶解在去离子水中来制备 SDS 溶液。

预先配置 11.46 mmol/L 的 SDS 溶液作为基底溶液，在长 15 cm 宽 10 cm 高 4 cm 如图 1 中所示的矩形水槽中添加 SDS 溶液。基底溶液的液面高度与水槽中挡板下边缘的所在高度平齐，因此挡板的力恰好能完全作用在液面上。该矩形水槽放置在镜头正下方，在液面滴加 10 μL 的正十六烷，为避免实验过程中液滴在液面的漂移，采用与基座固连的铜丝对正十六烷进行钉扎（见图 1）。通过调节挡板间距，对基底溶液表面进行压缩-拉伸。为了获得正十六烷铺展-收缩的整

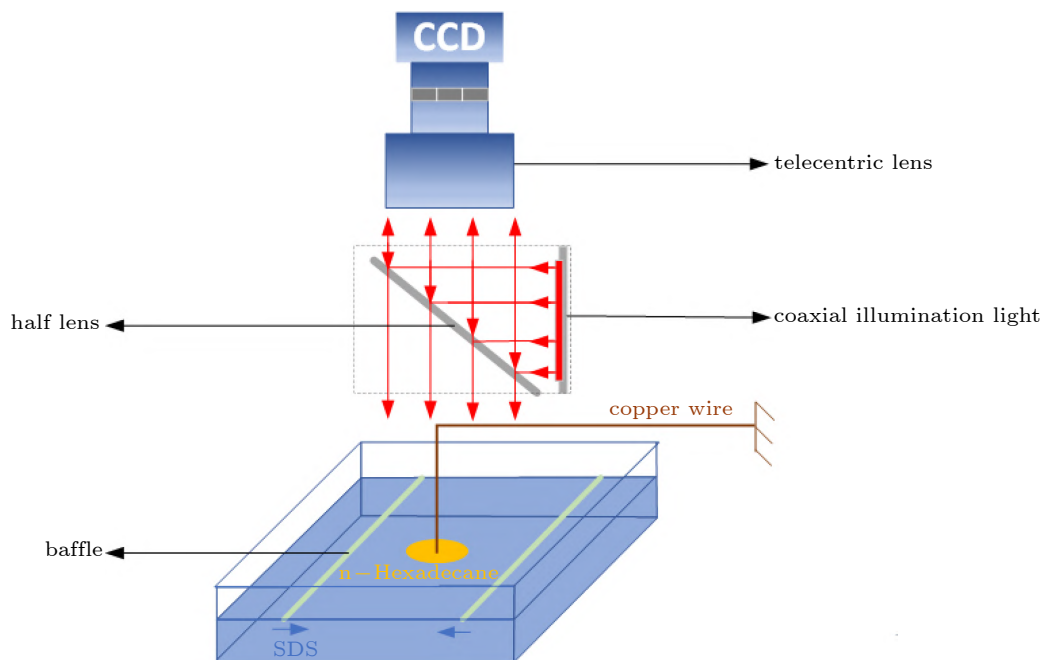


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental device

个动态响应过程，这里搭建了由 CCD 相机和远心镜头组成的一套实验观察装置，其用于捕捉整个浸润性的动态响应过程，装置及基本光路图如图 1 所示。使用平行光源和远心镜头可以清晰地获取液滴浸润变化过程。

2 结果与讨论

正十六烷浸润性由铺展系数 S 来控制，其表达式为

$$S = \sigma_A - \sigma_B - \sigma_{AB} \quad (1)$$

其中 $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_{AB}$ 分别表示气-液体 A 的界面张力、气-液体 B 的界面张力、液体 A-B 的界面张力^[20-21]。本实验使用的是光学接触角测量仪通过悬滴法与计算机软件结合方法来测得基本物性参数，通过注射器挤出一个合适的液滴，仪器配备的相机捕捉到液滴悬挂图像（图 2），通过计算机确定液滴轮廓的坐标并拟合 L-Y 方程： $\sigma = \frac{\Delta\rho g}{H}(ds)^2$ ， $H = H(ds/de)$ 并计算出表面张力。其中， σ 为测得的表界面张力值； $\Delta\rho$ 为液体间密度差； g 为重力加速度； de 表示液滴达到最大后，直径最大处的长度，在测量中基准线需放在针头下方且液滴最上方的位置，取顶点处做一直径为 ds 。测得正十六烷的表面张力为 27.36 mN/m，

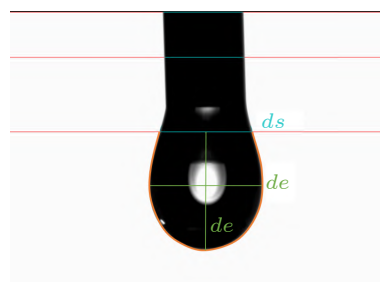


图 2 测量表面张力的计算机软件界面

Fig. 2 Computer software interface for measuring surface tension

不同浓度 SDS 溶液表/界面张力如表 1 所示。

通过表 1 计算得出当 SDS 浓度分别为 6 mmol/L, 8 mmol/L, 10 mmol/L, 11.46 mmol/L 时铺展系数为 -0.74, 2.35, 1.2, 1.94。通常在室温下 SDS 达到饱和和胶束浓度大约在 7~8 mmol/L^[22]。表 1 可知当浓度大于 8 mmol/L 时表面张力趋于稳定，此时溶液达到饱和和胶束浓度以上，界面的 SDS 浓度趋于稳定。这是因为 SDS 溶液达到临界胶束浓度后，气液界面吸附达到饱和，表面活性剂分子不再在表面继续富集。但值得注意的是，正十六烷-SDS 溶液之间的界面张力随 SDS 溶液浓度增加而增大，这应该是表面活性剂分子在液液界面的吸附方式发生了变化，其微观机制有待于进一步研究。得出的铺展系数表明，在临界胶

束浓度附近液体的铺展系数发生较大的变化, 这表明液滴会呈现出不同的铺展状态, 这一点在我们之前的工作中已经有明确的实验结果^[23]。我们

后续实验中选 11.46 mmol/L 浓度, 是为了获得一个合适的液滴初始状态, 使得我们的实验有比较明显的状态变化。

表 1 表/界面张力 σ (mN/m)
Table 1 Surface/interfacial tension σ (mN/m)

SDS solution concentration	6 mmol/L	8 mmol/L	10 mmol/L	11.46 mmol/L
surface tension	33.27	36.38	35.78	36.96
interfacial tension with n-Hexadecane	6.65	6.67	7.22	7.66

2.1 拉-停过程的动态响应

图 3 显示了在浓度为 11.46 mmol/L 的 SDS 溶液上拉-停过程的正十六烷铺展状态图像, 其中, (a) ~ (c) 为挡板拉开过程中液滴状态, (d) ~ (f) 为挡板静止时液滴状态, 比例尺为 10 mm。注意到挡板向外拉伸的过程正十六烷浸润面积增大(图 3(a)~图 3(d))。随之挡板停止移动, 液滴出现回缩现象直到处于一个稳定的平衡状态(图 3(d)~图 3(f))。挡板一直在液滴的纵向间移动, 导致液滴的纵向和横向响应变化不一致, 所以分别对液滴的纵向直径 D_1 和横向直径 D_2 进行了分析。图 4 记录了挡板在拉-停这一过程中, 液滴的横向直径 D_2 , 纵向直径 D_1 , 两挡板之间距离 L 随时间的演化关系。

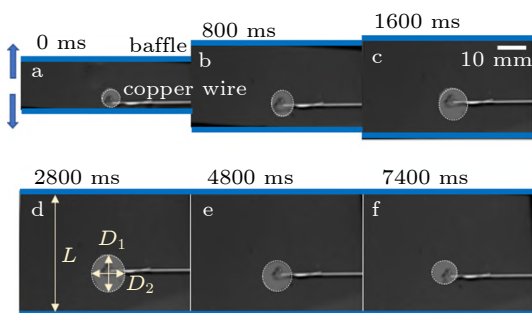


图 3 挡板的拉-停实验过程图

Fig. 3 Experimental process of pull-stop of baffle

由图 4 可知, 挡板间距由初始的 34.38 mm 达到最大值 72.22 mm 的同时, 液滴纵向和横向的初始直径 8.42 mm, 8.14 mm 分别也铺展到最大值 16.88 mm, 14.13 mm。挡板停止移动后, 液滴直径逐渐减小, 纵向横向直径分别缩小到 10.39 mm, 10.26 mm, 而后处于一个稳定的平衡状态。

很显然, 挡板停止移动时, 液滴出现了回缩

现象。根据铺展直径与时间的演变关系, 整个过程可分为三个阶段。如图 4 所示, 挡板在拉伸阶段也就是第 1 阶段, 液滴铺展呈线性扩展, 速度是 0.0139 m/s。正十六烷液滴纵向直径 D_1 与横向直径 D_2 平均铺展速度分别是 0.0029 m/s 和 0.0024 m/s, 二者铺展速度以前者为大, 这是因为正十六烷液滴纵向直径 D_1 与挡板运动方向平行, 而横向直径 D_2 与之垂直。在第 2 和第 3 阶段, 挡板停止移动, 液滴出现回缩, 回缩过程其液滴速度出现衰减, 可以分为两个阶段, D_1 和 D_2 在第 2 和第 3 阶段速度分别为 0.0018 m/s, 0.0007 m/s 和 0.0012 m/s, 0.0008 m/s。

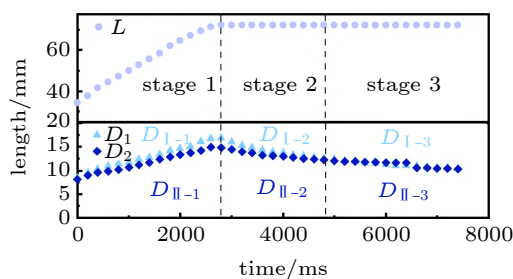


图 4 拉-停实验铺展直径 D 和挡板间距 L 随时间的演化规律图

Fig. 4 Evolution of spreading diameter D and baffle spacing L with time in pull-stop experiment

在对铺展问题的研究中, 一个铺展过程包含多种力的作用, 例如重力、黏性力、惯性力等, 液滴铺展直径对铺展时间呈现标度律幂指数关系, 通常利用标度来研究铺展动力学过程的力学作用机制和物质的空间分布特征。图 5 给出了铺展与回缩过程中液滴直径随时间的标度关系, 以此来分析铺展与回缩主导机制。

将铺展直径对时间的演化规律进行分段拟合, 并根据铺展直径对时间的幂指数关系, 浸润过程可以分为三个阶段(图 5), 这里发现液滴铺展的

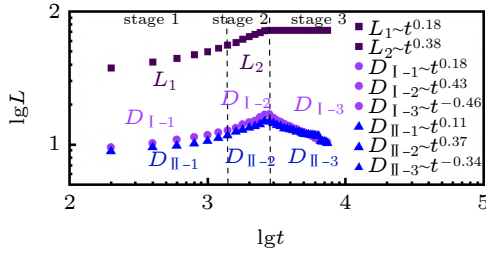


图 5 拉-停实验正十六烷铺展直径 D 和两挡板距离 L 与时间的标度关系，用双对数坐标表示
 Fig. 5 The scale relationships in the pull-stop experiment are expressed in double logarithmic coordinates. D represents spreading diameters of n-hexadecane and L represents the distance between the two baffles

力学机制在不同阶段发生了改变。我们拟合出各个阶段的液滴直径对时间的标度律关系 $D(t) \sim t^n$ ，阶段 1, 2, 3 中正十六烷纵向直径 D_1 和横向直径 D_2 对时间的标度律幂律指数分别是 $n_1 = 0.18, 0.11; n_2 = 0.43, 0.37; n_3 = -0.46, -0.34$ ；在 1 和 2 阶段挡板间距对时间的标度律幂律指数分别是 $n_1 = 0.18, n_2 = 0.38$ 。

液滴浸润性调控是通过改变空气-溶液表面的活性剂浓度实现的，可以利用 Henry 等温吸附方程^[24]对该表面状态进行描述。

$$\pi = K_B T \Gamma \quad (2)$$

其中 π 为表面压， $\pi = \gamma_{\max} - \gamma$ ， γ_{\max} 和 γ 分别表示溶剂和溶液的表面张力， Γ 为表面浓度，表面压与表面浓度成正比关系。根据实验中不同阶段标度律幂律指数的差异，认为表面浓度变化可分为两个阶段，第 1 阶段为挡板拉伸，挡板附近的表面浓度降低并偏离初始的平衡浓度，产生界面

张力梯度（图 6(a)）；此后，伴随着表面活性剂分子快速向低浓度区域表面吸附，浓度分布状态快速过渡到第 2 阶段（图 6(b)），此时认为表面活性剂分子以分段常数浓度分别在接触线前后呈阶跃式分布^[25]。

表面浓度以 $\Gamma = \frac{M}{r^2}$ 变化驱动液滴铺展，铺展标度律关系为 $R \sim t^{1/4}$ ^[26]；当表面浓度在接触线前后以分段常数呈阶跃式分布时，铺展标度律幂指数为 $1/2$ ^[27]。表面浓度的分布差异使液滴铺展在不同阶段具有不同的标度律幂指数，实验结果显示，在第 1 阶段液滴直径标度律接近于 $R(t) \sim t^{1/4}$ ，说明在第 1 阶段实验体系中存在表面浓度梯度，其表面状态分布接近于图 6(a) 所示；在第 2 阶段标度律近似于 $R(t) \sim t^{1/2}$ ，可以认为在第 2 阶段中，表面浓度在接触线前后呈阶跃式分布（图 6(b)），不同阶段表面浓度的分布导致液滴浸润状态的改变。

第 3 阶段挡板停止移动后，正十六烷气-液界面以及正十六烷-底液界面张力均没有变化，铺展系数 S 的改变取决于底液的气-液界面张力的变化。挡板的运动虽然使得底液的气-液界面表面活性剂分子分布发生变化，但并不改变底液表面活性剂浓度。当挡板停止运动后，界面表面活性剂分子通过吸附-脱附过程逐渐恢复到初始状态。挡板拉开的过程使得正十六烷液滴周围界面活性剂分子浓度降低，挡板停止运动后，活性剂分子重新在界面吸附使得界面活性剂分子浓度增大，导致溶液的气-液界面张力减小，铺展系数 S

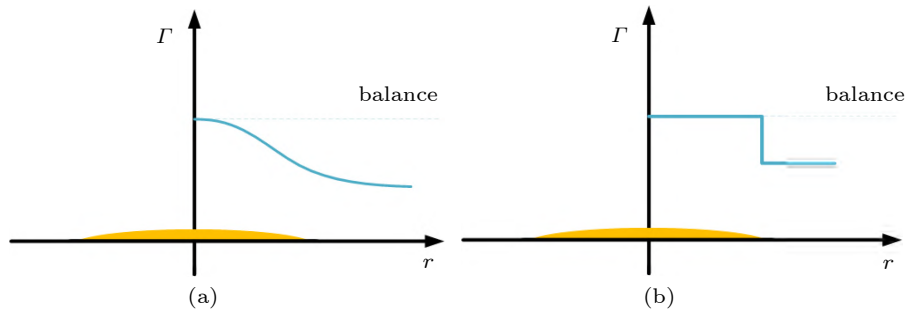


图 6 表面浓度与表面距离的关系。实线表示浓度分布，虚线表示平衡状态。(a) $\Gamma = \frac{M}{r^2}$ (M 表面活性剂总质量)；

$$(b) \text{ 阶跃式分布为 } \Gamma = \begin{cases} M_1, r < R \\ M_2, r > R \end{cases}$$

Fig. 6 Relationship between surfactant concentration Γ and distance on surface. The solid line represents concentration distribution, and the dotted line represents equilibrium state. (a) $\Gamma = \frac{M}{r^2}$ (M is total mass of surfactant);

$$(b) \text{ step-type distribution as } \Gamma = \begin{cases} M_1, r < R \\ M_2, r > R \end{cases}$$

减小,液滴直径收缩,直到液面恢复到初始浓度,表面张力梯度消失,液滴处于稳定平衡状态。

2.2 拉-压过程的动态响应

我们认为拉伸会使得挡板附近局部区域的液体表面活性剂分子浓度的分布降低,导致表面张力增大,液滴进行铺展,同理,我们推测在压缩过程应恰好相反,表面浓度升高,液滴出现回缩现象。可以通过压缩响应实验对该机制进行间接验证。此外,液滴浸润性的响应特性应随着表面浓度的变化实现可逆改变,为了进一步验证这一过程的微观机制,又进行了拉-压动态响应周期实验。如果液滴表面的浸润性可以随着挡板的往复移动实现可逆的铺展与回缩,就进一步验证了本文中基于表面浓度改变实现浸润性调控的基本原理及其可靠性。

图7显示了拉-压过程正十六烷的铺展状态图像。挡板拉开过程(由图7(a)到图7(c)),液滴浸润面积逐渐增大,两个挡板向中间移动(图7(d)到图7(f)),液滴开始逐渐变小。重复这一实验过程,进行了5个周期的循环,液滴铺展直径 D_1 , D_2 以及挡板间距 L 随时间的演化关系如图8所示。

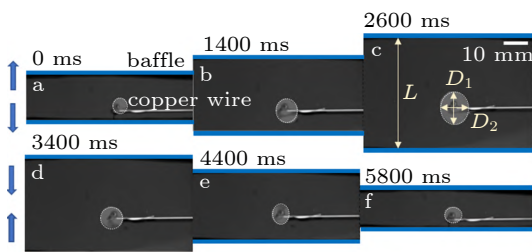


图7 两挡板拉-压实验过程图

Fig. 7 Pull-pressure test process of two baffles

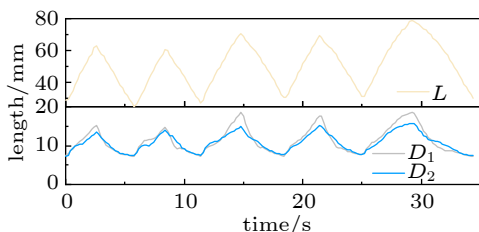


图8 拉-压周期实验正十六烷铺展直径 D 和两挡板距离 L 随时间的变化关系

Fig. 8 The relationship between the spreading diameter D of n-hexadecane and the distance L between the two baffles with time in the tension-compression cycle experiment

从图8中实验结果显示,通过对挡板的控制实现了液滴可调的铺展和收缩,这五个周期当中

正十六烷与挡板拉-压过程的响应趋势始终保持一致。

如图8所示,在第一个周期当中两挡板的初始间距由28.84 mm拉开到最大值63.22 mm,同时正十六烷也随之铺展,液滴直径 D_1 和 D_2 分别由7.36 mm和7.19 mm逐渐增大到最大值15.29 mm和13.38 mm。之后将挡板移动回原位,液滴直径 D_1 和 D_2 逐渐减小到7.24 mm和7.44 mm,此时两挡板的距离 L 为25.14 mm。在挡板拉开的过程中,挡板的速度为0.014 m/s,液滴直径 D_1 和 D_2 变化速度为3 mm/s和2.2 mm/s。在挡板压缩过程中,挡板的速度为12 mm/s,液滴直径 D_1 和 D_2 变化速度为1.8 mm/s和1.7 mm/s。五个周期中一共经历了34.4 s,在第一个周期中经历了5.8 s,后四个周期分别经历了5.6 s,7 s,6.6 s,9.4 s。在后四个周期当中挡板拉开过程的速度、液滴纵向直径变化速度、横向变化速度基本分别在0.0012 m/s~0.0014 m/s,0.0029 m/s~0.0030 m/s,0.0022 m/s~0.0023 m/s范围之内。挡板压缩过程中挡板速度的大致范围为0.0012 m/s~0.0014 m/s,液滴纵向直径变化速度大致范围为0.0018 m/s~0.0020 m/s,横向变化速度大致为0.0017 m/s~0.0018 m/s,速度则一直比较均匀。周期实验中,液滴与挡板位置的变化具有一致性,发现液滴具有较好的跟随性,两个挡板通过拉-压实现液滴的浸润变化响应。挡板在液面往复移动时,表面活性剂分子在表面的分布(图9)发生改变。界面张力和正十六烷的浸润状态随之改变。

界面张力是一种界面性质,通过界面张力的改变调控正十六烷的浸润状态,正十六烷在溶液表面没有完全铺展开,液滴以透镜的形式停留在液体表面(图9(a)),这种状态下表面活性剂分子在水面密度较高,随着两个挡板向外拉开时,空气-水表面积增大(图9(b)),水面密度降低,因此溶液的气-液界面张力增大,铺展系数 S 增大,液滴铺展。在挡板的压缩过程中,情况正好相反,当挡板压缩液面后其面积减小(图9(c)(d)),表面活性剂分子的表面密度增加,气-液界面张力和铺展系数 S 减小,液滴收缩。液面面积的变化导致了表面活性剂分子的界面分布发生了变化,进而引起了宏观尺度上浸润性的改变^[24,28-29]。

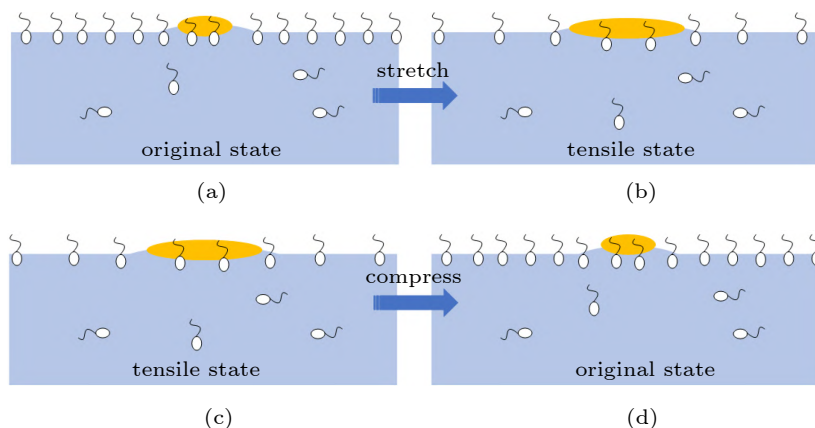


图 9 表面活性剂分子在表面的分布。(a) (b) 拉伸过程，正十六烷浸润面积变大；(c) (d) 压缩过程，正十六烷浸润面积变小。

Fig. 9 The distribution of surfactant molecules on the surface. (a)(b) The n-hexadecane infiltration area becomes larger during the stretching process; (c)(d) the n-hexadecane infiltration area becomes smaller during the compression process

在此尤其要注意的是，浓度为 11.46 mmol 的 SDS 溶液，其静态的气液界面表面活性剂分布密度处于饱和状态。压缩的过程是提高气液界面表面活性剂分子的排列有序度^[24]，因此在挤压状态下其面密度还能进一步提高。在液液界面表面活性剂分子吸附不变的情况下，铺展系数会发生变化，使得液体浸润状态发生改变。液液界面表面活性剂分子吸附不变这一假设是基于挡板的作用只发生在 SDS 溶液气液界面上，当液滴铺展收缩过程中，液液界面表面活性剂分子的吸附状态是否变化也是一个值得研究的问题。表面活性剂溶液界面拉压驱动液滴浸润状态的变化，本质上是将传统胶体化学中用 LB 方法（Langmuir-Blodgett）研究表面活性剂界面分布的拓展，这一操控液滴形态的方法在未来的应用还需要更深的研究，最直观的启示是发展一套能动态获取气液界面、液液界面张力的方法是定量判断铺展系数的关键。

3 结论

本文进行了十二烷基硫酸钠溶液表面的挤压—拉伸来控制正十六烷的浸润状态的实验，研究了正十六烷的浸润性变化。通过挡板对底液的拉—压，实现了正十六烷的可控铺展和回缩。研究发现，正十六烷液滴具有较好的响应速度和跟随性，挡板在移动过程中，液滴铺展半径与挡板间距具有高度一致性和同步性。通过对表面活性剂浓度的分布的改变，使得溶液表面张力发生变化，

从而实现液滴的浸润性响应调控。这一方法改变了液体界面二维薄膜的“温度”，能实现界面二维薄膜的重熔与再结晶，有望成为提高二维纳米结构质量的手段。

参 考 文 献

- 滕新荣. 表面物理化学. 北京: 化学工业出版社, 2009
Teng Xinrong. Surface Physical Chemistry. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese)
- 刘建林. 表面浸润的内在机制: 最小作用量原理. 力学与实践, 2009, 31(5): 85-88
Liu Jianlin. The intrinsic mechanism of surface infiltration: the principle of minimum action. *Mechanics in Engineering*, 2009, 31(5): 85-88 (in Chinese)
- 刘云鸿, 李光吉, 陈超等. 超疏水PET织物的制备及其抗菌性能. 化工学报, 2014, 65(65): 1517-1525
Liu Yunhong, Li Guangji, Chen Chao, et al. Preparation and antibacterial activity of superhydrophobic PET fabric. *J Chem Ind Eng*, 2014, 65(65): 1517-1525 (in Chinese)
- 李晶, 赵世才, 李强等. 类水稻叶多尺度表面构筑与各向疏水性. 科学通报, 2017, 62(16): 1766-1773
Li Jing, Zhao Shicai, Li Qiang, et al. Fabrication of biomimetic multi-scale surface of rice leaf and anisotropic superhydrophobic properties. *Chin Sci Bull*, 2017, 62(16): 1766-1773 (in Chinese)
- Hou Y, Yu M, Shang Y, et al. Suppressing ice nucleation of supercooled condensate with biphilic topography. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 075902
- Trimbach DC, Al-Hussein M, de Jeu WH, et al. Hydrophilic elastomers for microcontact printing of polar inks. *Langmuir*, 2004, 20: 4738-4742
- Ding Y, Jia L, Peng Q, et al. Critical sliding angle of water droplet on parallel hydrophobic grooved surface. *Colloid Surf A-Physicochem Eng Asp*, 2019, 585: 124083

- 8 Ding Y, Jia L, Zhang Y, et al. Investigation on R141b convective condensation in microchannel with low surface energy coating and hierarchical nanostructures surface. *Appl Therm Eng*, 2019, 155: 480-488
- 9 Wilkinson K, Bain C, Matsubara H, et al. Wetting of surfactant solutions by alkanes. *Chemphyschem: A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 2005, 6: 547-555
- 10 Harkins WD. A general thermodynamic theory of the spreading of liquids to form duplex films and of liquids or solids to form monolayers. *Journal of Chemical Physics*, 1941, 9(7): 552-568
- 11 Brochardwyart F, Dimeglio JM, Quere D, et al. Spreading of nonvolatile liquids in a continuum picture. *Langmuir*, 1991, 7(2): 335-338
- 12 李本刚, 陈正国. 表面活性剂溶液动态表面张力及吸附动力学研究. *化学进展*, 2005(2): 233-241
Li Bengang, Chen Zhengguo. Advance on the study of dynamic surface tension and adsorption kinetics of surfactant solution. *Prog Chem*, 2005(2): 233-241 (in Chinese)
- 13 李干佐, 牟建海, 隋华. 表面活性剂溶液的动态表面张力与吸附动力学研究(待续). *日用化学工业*, 1999(4): 21-27
Li Ganzuo, Mu Jianhai, Sui Hua. Dynamic surface tension and adsorption kinetics of surfactant solution (to be continued). *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 1999(4): 21-27 (in Chinese)
- 14 德鲁迈尔斯. 表面、界面和胶体——原理及应用. 北京: 化学工业出版社, 2004
Myers D. Principle and Application of Surface and Interface and Colloid. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese)
- 15 Duan H, Wang D, Kurth D, et al. Directing self-assembly of nanoparticles at water/oil interfaces. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43(42): 5639-5642
- 16 Kumar A, Mandal S, Mathew SP, et al. Benzene and anthracene-mediated assembly of gold nanoparticles at the liquid-liquid interface. *Langmuir*, 2002, 18(17): 6478-6483
- 17 Hu J, Han G, Ren B, et al. Theoretical consideration on preparing silver particle films by adsorbing nanoparticles from bulk colloids to an air-water interface. *Langmuir*, 2004, 20(20): 8831-8838
- 18 Reincke F, Hickey SG, Kegel WK, et al. Spontaneous assembly of a monolayer of charged gold nanocrystals at the water/oil interface. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43(4): 458-462
- 19 张会军, 章琪, 王峰等. 利用胶体系统研究玻璃态. *物理*, 2019, 48: 69-81
Zhang Huijun, Zhang Qi, Wang Feng, et al. Glassy physics is studied using colloidal systems. *Physics*, 2019, 48: 69-81 (in Chinese)
- 20 Bonn D, Ross D. Wetting transitions. *Rep. Prog. Phys.*, 2001(64): 1085
- 21 Bergeron V, Langevin D. Monolayer spreading of polydimethylsiloxane oil on surfactant solutions. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76: 3152
- 22 印永嘉. 物理化学简明手册. 北京: 高等教育出版社, 1998
Yin Yongjia. Concise Handbook of Physical Chemistry. Beijing: Higher Education Press, 1998 (in Chinese)
- 23 赵文景, 王进, 秦威广等. 基于 Marangoni 效应的液-液驱动铺展过程. *物理学报*, 2021, 70(18): 210-215
Zhao Wenjing, Wang Jin, Qin Weiguang, et al. Liquid-liquid-driven spreading process based on Marangoni effect. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(18): 210-215 (in Chinese)
- 24 Manikantan H, Squires T. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows. *J Fluid Mech*, 2020, 892: 1
- 25 Berg S. Marangoni-driven spreading along liquid-liquid interfaces. *Physics of Fluids*, 2009, 21: 398
- 26 Espinosa FF, Shapiro AH, Fredberg JJ, et al. Spreading of exogenous surfactant in an airway. *J App. Phy*, 2009(75): 2028-2039
- 27 Santiago-Rosanne M, Vignes-Adler M, Velarde MG. On the spreading of partially miscible liquids. *J. Colloid interface sci*, 2001(234): 375-383
- 28 Ji WJ, Lan D, Li WB, et al. Wall-confined spreading dynamics on the surface of surfactant solution. *J. Phys. Chem. Lett*, 2022(13): 4315-4320
- 29 黄晓波. 表面张力驱动对流的实验研究. *力学进展*, 1989, 19(3): 353-364
Huang Xiaobo. Experimental study of surface-tension driven convection. *Advances in Mechanics*, 1989, 19(3): 353-364 (in Chinese)

(责任编辑: 胡漫)