

表面活性剂液滴过渡沸腾的 Marangoni 效应与二次液滴形成*

唐修行¹⁾ 陈泓樾¹⁾ 王婧婧¹⁾ 王志军²⁾ 臧渡洋^{1)†}

1) (西北工业大学物理科学与技术学院, 超常条件材料物理与化学教育部重点实验室, 西安 710129)

2) (西北工业大学材料学院, 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(2023 年 6 月 1 日收到; 2023 年 8 月 18 日收到修改稿)

表面活性剂液滴撞击不同温度基底的动力学过程, 在传热、冷却和打印等领域均有广泛涉及. 本文利用高速摄影技术对表面活性剂 SDS, CTAB 和 Triton X-100 的水溶液液滴撞击热铝板的过程进行观测, 研究不同表面活性剂液滴撞击热铝板动力学过程. 实验发现, 处于过渡沸腾的表面活性剂液滴, 在蒸发的最后阶段会形成一个处于非浸润状态的二次液滴. 分析表明, 液滴撞击基底后, 液滴的三相接触线和液滴顶部产生温度梯度, 三相接触线附近的表面活性剂分子浓度显著大于液滴顶部. 由浓度梯度驱动的 Marangoni 效应使上层液体得以保持, 并在蒸发的最终阶段, 逐渐收缩为球形, 形成二次液滴, 在底部气泡爆炸产生的冲击下脱离基底并起跳. 二次液滴的半径随初始液滴浓度升高而增大, 最终达到饱和半径. 该项工作阐明了二次液滴形成过程中表面活性剂的作用, 为理解 Leidenfrost 效应的物理机制以及调控沸腾传热提供了参考.

关键词: 热基底, 表面活性剂, Leidenfrost 效应, 二次液滴

PACS: 68.03.-g, 68.03.Fg, 68.35.Ja

DOI: 10.7498/aps.72.20230919

1 引言

液滴撞击热壁面的现象, 在内燃机燃烧、喷雾冷却和喷墨打印等工业过程中有广泛涉及^[1-3]. 撞击时, 固液界面存在剧烈的相互作用. 环境、基底温度和结构、液滴性质和组分, 对液滴撞击动力学都有重要影响^[4-7]. 研究液滴与热基底之间的相互作用, 阐明撞击过程的动力学规律, 对实现有效传热具有重要意义. 当液滴撞击不同温度的壁面时, 根据液滴的蒸发寿命和液滴运动状态, 可以发现 4 种不同的蒸发状态: 薄膜蒸发、核沸腾、过渡沸腾和薄膜沸腾^[8-10]. 常温下, 撞击液滴在基底表面铺展, 逐渐蒸发, 即薄膜蒸发. 当壁面温度达到某一临界温度时, 固液界面产生气泡, 气泡爆炸扰动

液气界面, 并最终使气液界面破裂, 导致微小液滴剧烈飞溅, 即核沸腾^[8]. 在更高温度的壁面上, 液滴部分与基底接触, 部分被液滴产生的蒸气托起, 即过渡沸腾. 当基底温度超过 T_L (Leidenfrost 温度) 时, 液滴被自身产生的蒸气托起, 悬浮在基底上, 液滴寿命增加, 即薄膜沸腾, 这是著名的 Leidenfrost 效应^[10].

学者已对液滴撞击热壁面的动力学过程进行了一定的研究^[11,12]. Celestini 等^[11]发现在 Leidenfrost 液滴蒸发过程中, 当剩余液滴的半径减小至某一临界值时, 气膜厚度和宽度相等, 润滑近似失效, 剩余液滴就会起跳. Sun 等^[12]得出了 Leidenfrost 液滴蒸发的两个动力学过程, 大液滴因为液滴内污染物发生积聚并降低蒸发速率, 最终爆炸; 小液滴在 Leidenfrost 现象的最后阶段起跳. 研究

* 国家自然科学基金 (批准号: 11972303, 12272314) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dzyang@nwpu.edu.cn

发现, 加入表面活性剂可以增强水的沸腾传热能力^[13-15]. Morgan 等^[16] 使用十二烷基磺酸钠 (SLS) 的水溶液进行研究, 发现表面活性剂通过降低表面张力提高沸腾传热系数. Hetsroni 等^[17] 的实验结果表明, 表面活性剂的加入可以增强沸腾传热能力, 并且存在最佳的强化传热浓度. Sham 等^[18] 发现, 当表面张力降低时, 气泡尺寸减小, 气泡数量增加, 这是沸腾传热增强的原因. Wang 等^[19] 证明了表面活性剂增强沸腾传热的机制, 即气泡喷射和气泡爆炸过程增强了表面活性剂溶液中的沸腾传热, 而不是低表面张力. 因此, 加入表面活性剂, 增强沸腾传热, 可以有效影响液滴撞击热壁面的动态过程. 目前研究者已经对不同组分液滴的 Leidenfrost 现象作出了大量报道^[20-22], 但人们对表面活性剂如何影响液滴的过渡沸腾动态过程还缺乏深刻认识, 需要进一步探究.

为研究表面活性剂液滴撞击热基底, 尤其是过渡沸腾过程中, 表面活性剂对液滴动力学过程的影响, 本文选取十二烷基硫酸钠 (SDS)、十六烷基溴化氨 (CTAB) 和曲拉通 X-100 (Triton X-100) 三种表面活性剂的水溶液液滴撞击热基底. 通过分析表面活性剂分子的再分布, 并结合高速摄影所得图像, 研究不同表面活性剂对液滴撞击动力学行为的影响. 本文发现了表面活性剂液滴处于过渡沸腾时, 液滴蒸发的最后阶段, 会产生二次液滴, 脱离基底并起跳.

2 实验装置以及方法

液滴撞击加热壁面的实验装置如图 1 所示. 铝合金基底水平固定在加热台上, 将针头直径为 0.7 mm 的微量移液器固定在调节支架上. 使用高速摄像机拍摄液滴的撞击和蒸发过程, 相机与水平面成 4°俯拍. 实验时环境温度为 (25 ± 2) °C, 相对湿度为 $60\% \pm 4\%$, 主要装置具体信息见表 1.

表 1 实验中的主要仪器

Table 1. Main instruments in the experiment.

名称	型号	功能(误差)
恒温加热台	C-MAG HP	0—(500±1) °C
高速摄像机	Photron Fastcam Mini UX100	10^3 — 2×10^3 f/s
光源	KM-FL120120-W	—
热电偶温度计	ES1310	0—(500±0.1) °C

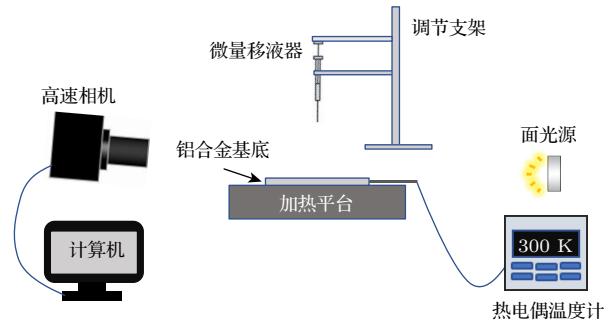


图 1 液滴撞击热壁面实验装置

Fig. 1. Experiment setup for droplet impacting on the hot substrate.

本文使用的水采用超纯水系统 (EPED, 中国) 制备, 铝合金基底 (厚度为 1 mm) 购自中国鸿年金属材料公司, 采用聚二甲基硅氧烷乳液消泡剂 (粤万, 中国), 其他材料包括阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠 (SDS, 其临界胶束浓度 CMC 为 9.0×10^{-3} mol/L)、阳离子表面活性剂十六烷基溴化氨 (CTAB, CMC 为 0.8×10^{-3} mol/L)、非离子表面活性剂曲拉通 X-100 (Triton X-100, CMC 为 0.2×10^{-3} mol/L)、氯化钾 (KCl) 和无水乙醇, 均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司.

实验前, 调节恒温加热台的温度并用温度计测量基底的实际温度. 采用背光法拍摄液滴撞击和蒸发过程. 通过控制支架上的调节螺栓, 使液体缓慢流出并形成液滴, 当液滴的重力大于表面张力时液滴下落, 针头与铝合金基底固定为 10 mm, 液滴撞击基底时的速度约为 0.45 m/s.

3 实验结果与分析

3.1 不同液滴的 Leidenfrost 现象

为研究不同组分液滴撞击热基底的 Leidenfrost 现象, 选择纯水、10% 乙醇水溶液、20% KCl 水溶液和 4 CMC SDS 的水溶液液滴进行撞击热基底实验. 经实验测量, 纯水液滴 T_L 为 189 °C, 4 CMC SDS 液滴 T_L 为 150 °C, 10% 乙醇液滴 T_L 为 181 °C, 20% KCl 液滴 T_L 为 226 °C.

图 2 为当基底温度高于 T_L 时, 液滴撞击热基底的 Leidenfrost 现象. 图 2(a) 为纯水液滴撞击 200 °C 基底的动态过程. 液滴在接触热基底后产生多次反弹, 随后脱离基底, 悬浮在基底上. 图 2(b) 为 10% 乙醇水液滴撞击 200 °C 基底的过程, 与纯水液滴撞击过程相似. 图 2(c) 为 20% KCl 水液滴

撞击 250 °C 基底的过程. 液滴接触基底后, 在反弹过程中出现明显的小液滴溅射, 基底残留 KCl 晶体, 最终悬浮在基底上. 图 2(d) 为 SDS 液滴撞击 200 °C 热基底的过程, 反弹过程中, 在 9.4 ms 处液滴顶部出现了小液柱, 经过多次弹跳最终悬浮在基底上. 图 2(e) 为 4 种液滴接触半径 r (液滴与基底的接触半径) 随时间的变化. r 第 1 次为 0

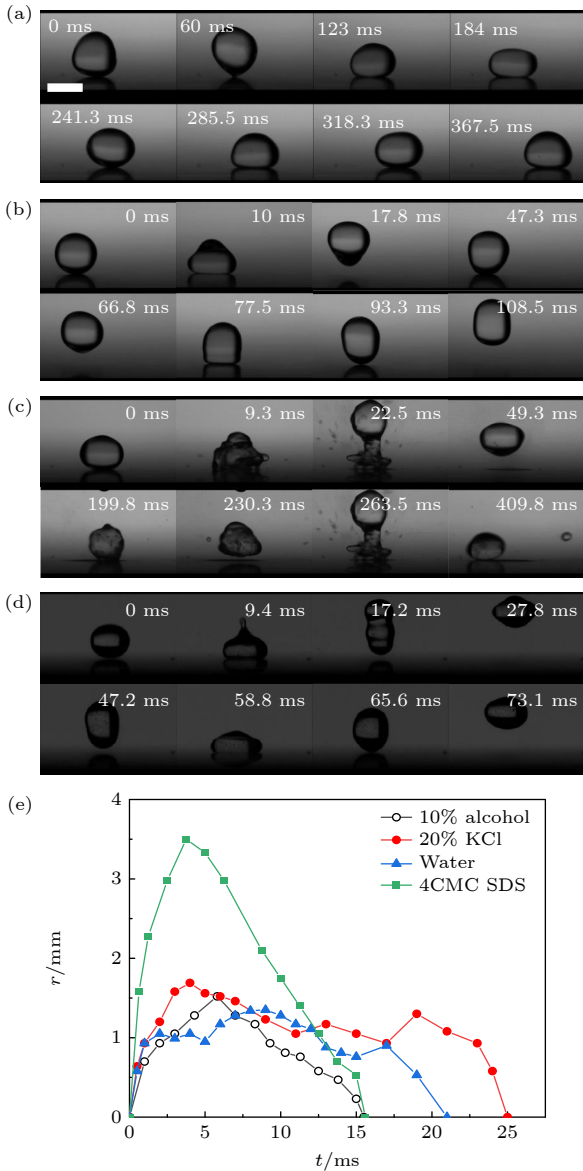


图 2 4 种液滴的 Leidenfrost 现象 (a) 纯水; (b) 10% 乙醇水溶液; (c) 20% KCl 水溶液; (d) 1 CMC SDS 水溶液. (e) 3 种液滴第一次撞击基底时接触半径随时间变化. r 减小为 0 时, 液滴反弹脱离基底, 标尺为 2 mm

Fig. 2. Leidenfrost phenomenon of four droplets: (a) Pure water; (b) 10% ethanol aqueous solution; (c) 20% KCl aqueous solution; (d) 1 CMC SDS aqueous solution. (e) Contact radius varies with time when droplets hit the substrate for the first time. When r decreased to 0, the droplets bounced off the base, and the scale bar represents 2 mm.

表示液滴开始接触热基底, 第 2 次为 0 表示液滴反弹脱离基底. 由图 2(e) 可知, 与纯水液滴相比, SDS 液滴与基底的接触时间 τ_c 缩短, 这是因为从同尺寸管径针头释放的液滴, SDS 液滴尺寸更小 ($\tau_c \sim \sqrt{\rho R^3 / \sigma}$, 其中 ρ 为液滴的密度, R 为液滴的半径, σ 为液滴的表面张力)^[23]. 而由于其表面张力降低, 使液滴与基底的接触时间延长. KCl 液滴与基底的接触时间 τ_c 比纯水液滴长, 这可能因为 KCl 液滴蒸发时固液界面的 KCl 结晶, 导致液滴与基底的黏附力增大, 使液滴与基底的接触时间延长.

液滴内的不同组分对液滴撞击热基底的 Leidenfrost 现象有显著影响, 加入表面活性剂除了会影响液滴的最大接触半径和接触时间之外, 还改变了 T_L . 为说明表面活性剂的浓度和种类对 T_L 的影响, 本工作研究了纯水、SDS、CTAB 和 Triton X-100 液滴撞击热基底的动力学过程. 图 3(a) 展示了 3 种表面活性剂液滴的表面张力随表面活性剂浓度的变化, 3 种液滴的表面张力变化趋势一致且最终达到的饱和表面张力相近. 图 3(b) 展示了

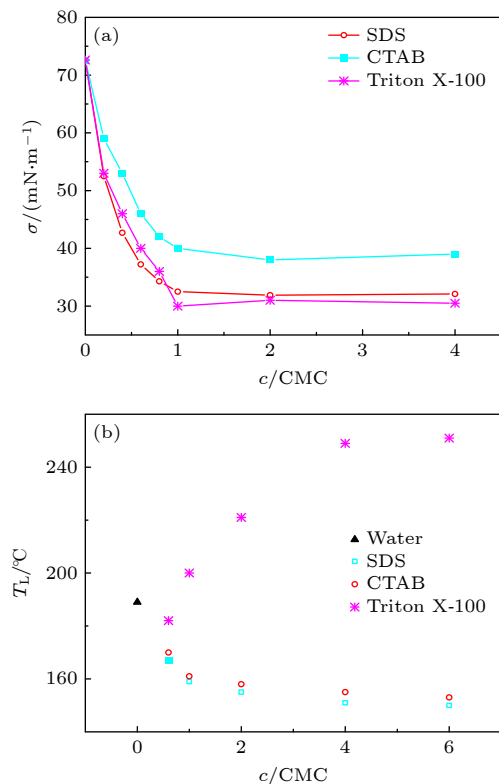


图 3 表面活性剂浓度对液滴性质的影响 (a) 表面张力; (b) T_L

Fig. 3. Influence of surfactant concentration on droplet properties: (a) Surface tension; (b) T_L .

3种不同表面活性剂的 T_L 随浓度的变化, SDS 和 CTAB 液滴的 T_L 随浓度增加降低, Triton X-100 液滴的 T_L 随浓度升高而升高, 3种表面活性剂液滴最终都会达到饱和 T_L . Zhang 等^[24] 也发现了相似的结果, 同时非离子表面活性剂 PEG-1000 的加入也会使液滴的 T_L 升高. 这些实验表明离子型表面活性剂可能对降低 T_L 有显著作用, 而非离子表面活性剂会使 T_L 升高.

3.2 不同液滴的过渡沸腾

为探索不同组分液滴撞击热基底的过渡沸腾动力学过程, 本文选择纯水、KCl 水溶液、乙醇水溶液和 SDS 的水溶液液滴撞击 140 °C 铝合金基底. 图 4 展示了 4 种液滴撞击低于 T_L 热基底的全过程. 纯水液滴的撞击过程如图 4(a) 所示. 液滴撞击基底后不再脱离基底. 固液界面产生大气泡, 伴随液滴蒸发和气泡爆炸, 纯水液滴最终消失. 图 4(b) 和图 4(c) 展示了 20% 的 KCl 液滴和 10% 的乙醇水液滴的撞击过程, KCl 液滴蒸发过程与纯水液滴相似, 最后在基底留下污渍; 而乙醇液滴蒸发伴随大量微小液滴溅射. 图 4(d) 展示了 SDS 液滴撞击热基底后的过程, 随着液滴的蒸发, 液滴体积逐渐变小, 收缩成二次液滴, 并最终起跳. 图 4(e) 展示了 4 种液滴接触半径 r 随时间变化, SDS 液滴接触半径 r 第 2 次为 0 表示液滴起跳, 其他 3 种液滴第 2 次为 0 表示液滴完全蒸发. 由图 4(e) 可知, 与水滴和 KCl 液滴相比, 加入 SDS 后, 初始液滴在热基底上的存在时间明显缩短 (从 ~2000 ms 到 ~500 ms), 这是因为 SDS 的加入提高了液滴的沸腾传热效率, 使液滴蒸发所需时间显著降低. 另一方面, 水滴和 KCl 液滴与热基底的接触半径明显大于 SDS 液滴. 这是因为在过渡沸腾状态, 水滴和 KCl 液滴产生大量大气泡, 与基底实现了更大面积的接触.

SDS 液滴撞击热基底的动态过程, 即产生二次液滴, 与其他不同组分液滴存在明显区别. Chaves 等^[25] 报道了液滴过渡沸腾条件下另一类型的二次液滴形成的机理: 气泡液膜爆炸导致射流破碎, 二次液滴为气泡爆炸产生的微小液滴, 即图 4(c) 中的微小液滴溅射. 而本文中二次液滴是指处于过渡沸腾的表面活性剂液滴, 在蒸发的最后阶段, 剩余液滴收缩为球形, 脱离基底并起跳.

SDS 液滴在过渡沸腾的最后阶段, 产生二次

液滴并起跳这一特殊现象十分有趣. 为验证该现象在表面活性剂液滴中的普遍性, 如图 5 所示, 实验还选择了其他两种表面活性剂, 即阳离子表面活性剂 CTAB 和非离子表面活性 Triton X-100, 探究不同类型表面活性剂液滴的过渡沸腾的动力学过程. 图 5(a)–(c) 展示了 3 种表面活性剂液滴撞击

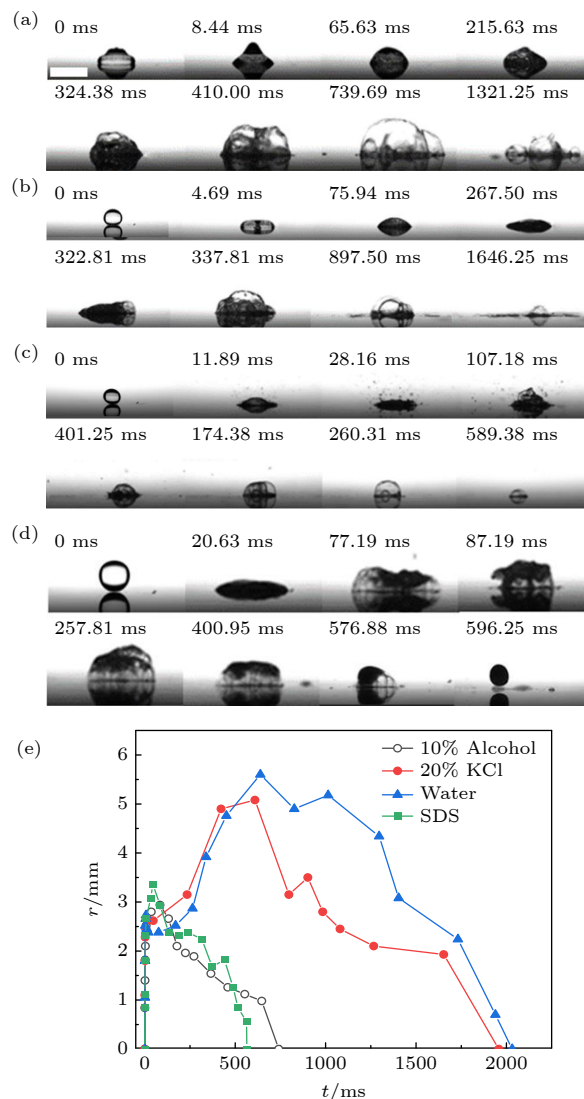


图 4 4种液滴过渡沸腾的过程 (a) 纯水液滴; (b) 20% KCl 水液滴; (c) 10% 乙醇水液滴; (d) 4 CMC SDS 液滴. (e) 4种液滴接触半径随时间变化. SDS 液滴的 r 降为 0 指二次液滴起飞, 其他液滴降为 0 代表液滴完全蒸发. 标尺为 5 mm

Fig. 4. Transition boiling process of four droplets: (a) Pure water; (b) 20% KCl aqueous solution; (c) 10% ethanol aqueous solution; (d) 4 CMC SDS aqueous solution. (e) Contact radius of the four droplets varies with time. The r of SDS droplet decreased to 0 indicated that the secondary droplet took off, the other droplets indicated that the droplets completely evaporated. The scale bar represents 5 mm.

温度为 140 °C 铝合金基底的过程. 液滴撞击基底后铺展, 伴随蒸发, 剩余液体向顶部聚集, 形成上层液体并被气泡托起, 最终产生二次液滴并起跳. 3 种类型的表面活性剂液滴撞击热基底后均产生了二次液滴, 说明表面活性剂类型对二次液滴的起跳没有显著影响. 图 5(d) 为撞击后 3 种液滴的接触半径 r 的变化, r 第 2 次为 0 均表示液滴起跳. 3 种表面活性剂液滴蒸发能力相近, 因此, 蒸发所需时间没有明显差异.

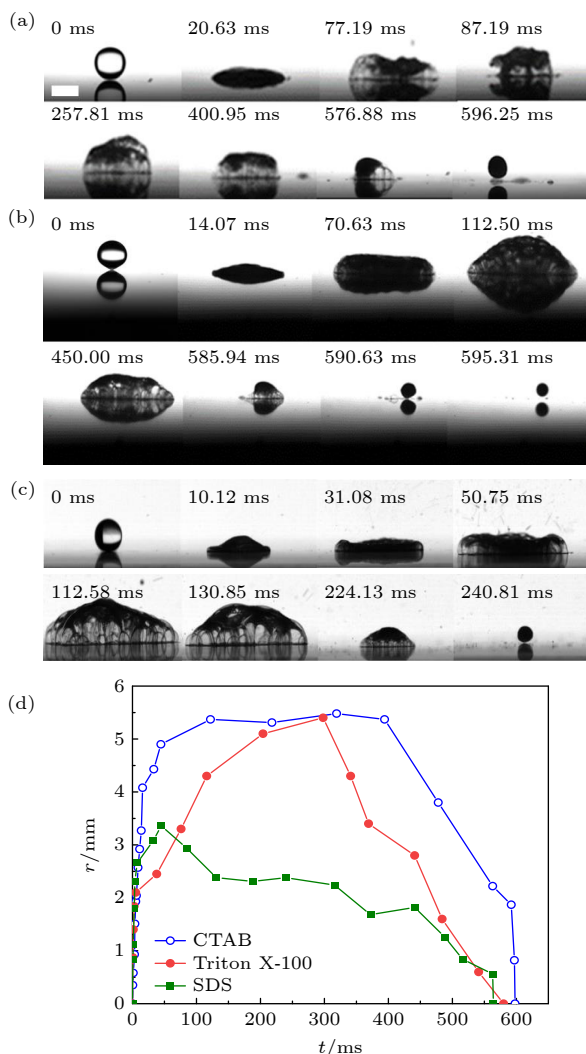


图 5 二次液滴形成 (a) 1 CMC 的 SDS 液滴, 140 °C; (b) 1 CMC 的 CTAB 液滴, 140 °C; (c) 4 CMC 的 Triton X-100 液滴, 140 °C. (d) 3 种液滴接触半径随时间变化. r 第 2 次为 0 代表二次液滴起跳. 标尺为 2 mm

Fig. 5. Formation of secondary droplets: (a) 1 CMC SDS droplets at 140 °C; (b) 1 CMC CTAB droplets at 140 °C; (c) 4 CMC Triton X-100 droplets at 140 °C. (d) Contact radius of the three droplets varies with time, the r of SDS droplets decreased to 0 indicated that the secondary droplets took off. The scale bar represents 2 mm.

不同浓度的表面活性剂液滴撞击温度为 140 °C 的铝合金基底, 产生二次液滴的半径 R 如图 6 所示. 二次液滴半径与表面活性剂浓度有关, 当表面活性剂浓度低于 1 CMC 时, SDS 和 CTAB 液滴的二次液滴半径随表面活性剂浓度的升高而增大, 当浓度高于 1 CMC 后, 二次液滴的尺寸达到饱和. Triton X-100 液滴的二次液滴在 2 CMC 以后才出现.

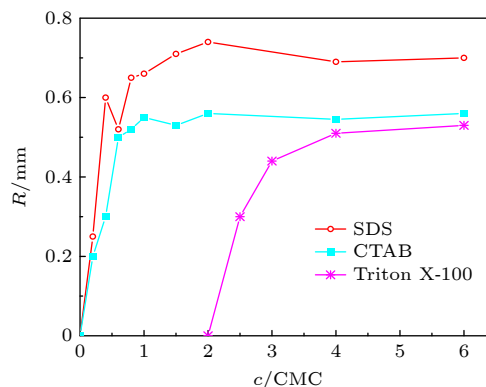


图 6 二次液滴半径 R 随表面活性剂浓度的变化趋势

Fig. 6. Variation trend of the secondary drop radius with surfactant concentration.

3.3 二次液滴的产生机理

为验证表面活性剂的起泡作用在二次液滴的形成过程中是否起主要作用, 本文在 CTAB (4 CMC) 溶液中加入 0.4% 体积分数的消泡剂, 分析加入消泡剂后液滴撞击热基底的现象与未加入消泡剂时的区别. 图 7(a) 为 3 种 4 CMC 表面活性剂溶液和 3 种 4 CMC 表面活性剂溶液中加入消泡剂剧烈振荡 5 次的结果. 所有溶液初始高度均为 10 mm, 柱状图两种颜色分别为溶液的高度和振荡后产生泡沫的高度. 未加入消泡剂前, 表面活性剂溶液振荡后有大量气泡形成, 其中 Triton X-100 溶液振荡后气泡高度明显少于其他 2 种表面活性剂. 加入消泡剂后, 3 种溶液经过剧烈振荡后, 只产生了少量气泡, 并且气泡迅速溃灭. 图 7(b) 展示了添加消泡剂的 3 表面活性剂液滴撞击热基底的动态过程. 与未加入消泡剂时相比, 3 种表面活性剂液滴在蒸发过程中产生的气泡, 数量减少且体积更大. 另外, 液滴蒸发时未在顶部聚集产生明显的上层液体, 最终没有二次液滴产生. 这些结果进一步肯定了表面活性剂对二次液滴的产生起着关键作用.

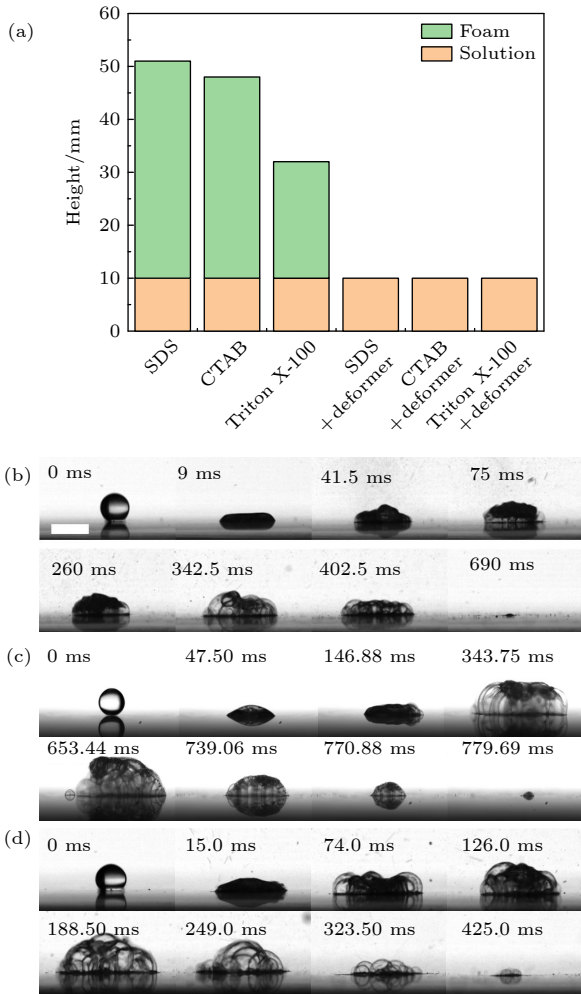


图7 表面活性剂液滴加入消泡剂 (a) 3种表面活性剂溶液中加入消泡剂剧烈振荡的结果; (b) 加入消泡剂的SDS液滴撞击热基底; (c) 加入消泡剂的CTAB液滴撞击热基底; (d) 加入消泡剂的Triton X-100液滴撞击热基底. 标尺为5 mm

Fig. 7. Addition of defoamer to surfactant solution: (a) Result of three surfactant solutions added defoamer shaken vigorously; (b) SDS droplet with defoamer impacted on the hot substrate; (c) CTAB droplet with defoamer impacted on the hot substrate; (d) Triton X-100 droplet with defoamer impacted on the hot substrate. The scale bar represents 5 mm.

为进一步阐明表面活性剂分子对二次液滴形成的作用机制. 图8(a)展示了表面活性剂液滴撞击热基底的动力学过程. 液滴撞击热基底后, 三相接触线附近温度高于液滴顶部温度. 因此, 三相接触线附近表面活性剂溶解度增大, 使得三相接触线附近的表面活性剂浓度明显大于液滴顶部浓度. 因此, 由浓度梯度导致的Marangoni对流使上层液体得以保持^[26]. 另外, 表面活性剂的加入提高了气泡的形核率, 使气泡尺寸降低^[27,28], 大量小气泡的产生托起液滴, 使液滴进入部分悬浮、部分接触的

过渡状态^[29]. 在过渡沸腾的最后阶段, 上层液体逐渐收缩为球形并处于悬浮状态. 最终, 上层的球形液滴起跳, 脱离基底.

加入消泡剂后, 表面活性剂分子被消泡剂的油性小液滴(聚二甲基硅氧烷乳液)所吸附. 因此, 水相、液-固和液-气界面附近的表面活性剂分子, 与未加入消泡剂时相比显著减少, 无法形成明显的浓度梯度, 极大程度上削弱了Marangoni效应(图8(b)). 同时, 由于大量表面活性剂分子被消泡剂液滴消耗, 从而削弱了表面活性剂诱发气泡形核的作用, 产生的气泡尺寸增大^[30]. 因此加入消泡剂后, 无法产生显著的Marangoni流动, 上层液体下沉, 直至被热基底的发泡过程消耗用尽, 最终无二次液滴产生.

蒸发的最后阶段, 底部小气泡的尺寸在 10^{-4} m量级, 气泡爆炸释放的能量可能为二次液滴起跳提供驱动力. 在忽略黏性耗散的情况下, 气泡表面能转化为二次液滴动能, 即

$$\sigma \cdot \Delta S = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

其中, ΔS 为气泡的表面积, m 为液滴质量, v 为二次液滴初速. 计算得到二次液滴初速约为 10^{-1} m/s. 而实验测得4 CMC的SDS、CTAB和Triton X-100二次液滴起跳速度分别0.14, 0.16和0.10 m/s, 这与(1)式的估算结果一致. 因此可以推断, 气泡爆炸释放的能量直接导致了二次液滴起跳.

为验证表面活性剂产生二次液滴这一现象是否普遍, 本文对3种表面活性剂液滴撞击 140°C 基底的实验均重复了20次, 其中SDS液滴实验中有18次出现了二次液滴, CTAB液滴出现19次, Triton X-100液滴出现12次. 因此, 表面活性剂液滴在过渡沸腾状态下产生二次液滴具有良好的重复性.

在撞击热基底及后续蒸发过程中, 液滴总会出现沸腾发泡现象, 能否在发泡过程中形成并保持气泡的上层液体, 是出现二次液滴的关键. 不管热基底的亲疏性如何, 表面活性剂液滴落向基底后, 三相接触线的温度都高于顶部, 必然导致表面活性剂的浓度梯度和Marangoni效应, 所以基底的亲疏水性对二次液滴的形成过程没有显著影响. 另外, 基底的导热性只影响液滴的过渡沸腾温度, 但不影响产生二次液滴的动力学过程. 基底的粗糙度可能影响气泡形核密度^[24], 进而影响产生的气泡数量和尺寸, 对二次液滴的起跳过程产生一定影响.

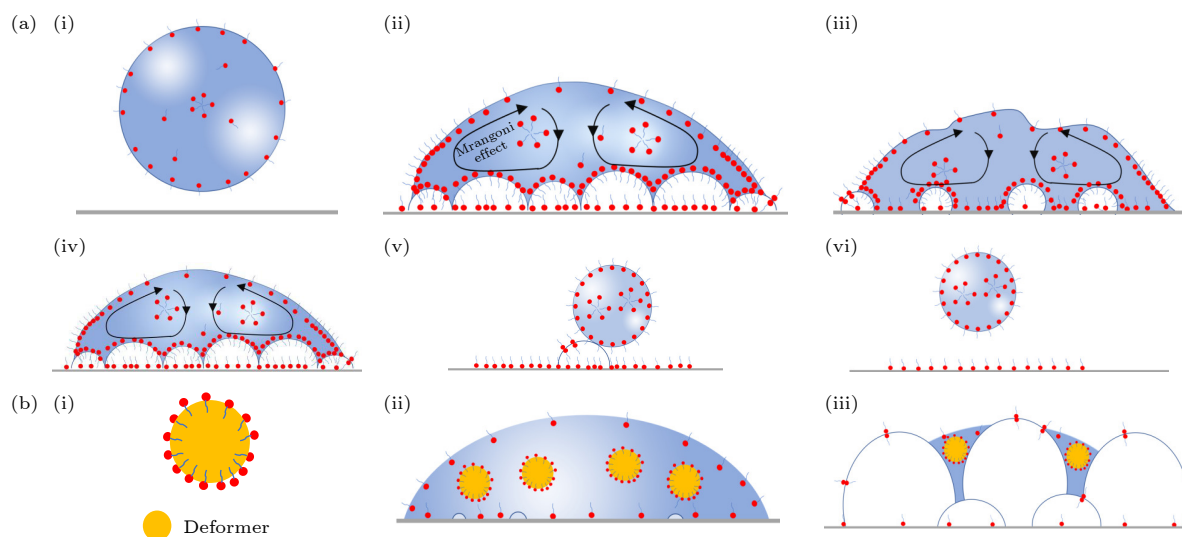


图 8 表面活性剂和消泡剂分子导致的液滴动态行为示意图 (a) 表面活性剂液滴撞击热基底的动态过程 (i) 下落的液滴; (ii) 液滴产生浓度梯度; (iii) 固液界面气泡生长; (iv) 气泡支撑上部液体; (v) 剩余液体收缩为二次液滴; (vi) 二次液滴起跳. (b) 添加消泡剂分子后的动态过程 (i) 单个消泡剂液滴吸附表面活性剂分子; (ii) 大液滴中的表面活性剂分子被消泡剂大量消耗, 液滴表面无显著浓度梯度; (iii) 顶部液体无法聚集, 箭头方向为 Marangoni 流动方向

Fig. 8. Schematic of dynamic droplet behavior caused by surfactant and defoamer molecules. (a) Dynamic process of surfactant droplet impacting on hot substrate: (i) Falling droplet; (ii) formation of concentration gradient; (iii) bubbles growth at the solid-liquid interface; (iv) bubbles held up the top liquid; (v) the remained liquid shrunk into secondary droplet; (vi) the secondary droplet detached from the substrate. (b) Dynamic process after adding defoamer molecules: (i) A single defoamer drop adsorbed surfactant molecules; (ii) the surfactant molecules in the large droplets were consumed in large quantities by defoamers, there was no significant concentration gradient on the droplet surface; (iii) the top liquid failed to aggregate. Arrows showed the direction of Marangoni flow.

4 结 论

本文采用 SDS, CTAB 和 Triton X-100 三种表面活性剂, 利用高速摄影技术对表面活性剂液滴撞击热铝合金基底的动力学现象进行了实验研究, 得到以下结论:

1) 处于过渡沸腾的表面活性剂液滴, 在蒸发的最后过程, 会产生二次液滴并起跳. 二次液滴起跳的驱动力是底部气泡爆炸产生的冲击力.

2) 表面活性剂种类和浓度影响液滴的 Leidenfrost 温度. 液滴撞击基底后, 三相接触线的表面活性剂分子浓度大于液滴顶部. 由浓度梯度驱动的 Marangoni 效应使上层液体得以保持, 对二次液滴的形成起决定作用.

3) 当表面活性剂浓度小于 1 CMC 时, SDS 和 CTAB 液滴产生的二次液滴半径随表面活性剂浓度升高而增加, 最终达到饱和尺寸.

本研究阐明了二次液滴形成过程中表面活性剂的作用, 有助于更好地认识表面活性剂液滴撞击热基底动力学过程, 为理解 Leidenfrost 效应的物理机制以及改进沸腾传热提供了参考.

参考文献

- [1] Zhong L S, Guo Z G 2017 *Nanoscale* **9** 6219
- [2] Zang D Y, Tarafdar S, Tarasevich Y Y, Choudhury M D, Dutta T 2019 *Phys. Rep.* **804** 1
- [3] Ma L Q, Chang J Z, Liu H T, Liu M B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054701 (in Chinese) [马理强, 常建忠, 刘汉涛, 刘谋斌 2012 物理学报 **61** 054701]
- [4] Girard F, Antoni M, Sefiane K 2010 *Langmuir* **26** 4576
- [5] Quéré D 2013 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **45** 197
- [6] Liang G T, Guo Y L, Shen S Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024705 (in Chinese) [梁刚涛, 郭亚丽, 沈胜强 2013 物理学报 **62** 024705]
- [7] Lü S, Tan H S, Wakata Y, Yang X J, Law C K, Lohse D, Sun C 2021 *PNAS* **118** e2016107118
- [8] Cossali G E, Marengo M, Santini M 2008 *Int. J. Heat Fluid Flow* **29** 167
- [9] Shirota M, van Limbeek M A J, Sun C, Prosperetti A, Lohse D 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 064501
- [10] Tran T, Staat H J, Prosperetti A, Sun C, Lohse D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 036101
- [11] Celestini F, Frisch T, Pomeau Y 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 034501
- [12] Lü S, Mathai V, Wang Y J, Sobac B, Colinet P, Lohse D, Sun C 2019 *Sci. Adv.* **5** eaav8081
- [13] Wu X W, Ni Y X, Zhu J, Burrows N D, Murphy C J, Dumitrica T, Wang X J 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 10581
- [14] Zhao L, Seshadri S, Liang X C, Bailey S J, Haggmark M, Gordon M, Helgeson M E, de Alaniz J R, Luzzatto-Fegiz P, Zhu Y Y 2022 *ACS Central Sci.* **8** 235

- [15] Prasad G V V, Dhar P, Samanta D 2022 *Int. J. Heat Mass Tran.* **189** 122675
- [16] Morgan A I, Bromley L A 1949 *Ind. Eng. Chem.* **41** 2767
- [17] Hetsroni G, Zakin J L, Lin Z, Mosyak A, Pancallo E A, Rozenblit R 2001 *Int. J. Heat Mass Tran.* **44** 485
- [18] Sham A, Notley S M 2016 *J. Colloid Interface Sci.* **469** 196
- [19] Wang J, Li F C, Li X B 2016 *Int. J. Heat Mass Tran.* **101** 800
- [20] Kwon H M, Bird J C, Varanasi K 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 201601
- [21] Huang C K, Carey V P 2007 *Int. J. Heat Mass Tran.* **50** 269
- [22] Liang G T, Shen S Q, Guo Y L, Zhang J L 2016 *Int. J. Heat Mass Tran.* **100** 48
- [23] Denis R, Clanet C, Quéré D 2002 *Nature* **417** 811
- [24] Zhang P P, Peng B X, Yang X, Wang J M, Jiang L 2020 *Adv. Mater. Interfaces* **7** 2000501
- [25] Chaves H, Kubitzek A M, Obermeier F 1999 *Int. J. Heat Fluid Flow* **20** 470
- [26] Vakarelski I U, Patankar N A, Marston J O, Chan D Y C, Thoroddsen S T 2012 *Nature* **489** 274
- [27] Zhang B J, Park J, Kim K J 2013 *Int. J. Heat Mass Tran.* **63** 224
- [28] Ahn H, Hwan K M 2013 *Int. J. Air-Cond. Refrig.* **21** 1
- [29] Bertola V 2009 *Int. J. Heat Mass Tran.* **52** 1786
- [30] Cheng L X, Mewes D, Luke A 2007 *Int. J. Heat Mass Tran.* **50** 2744

Marangoni effect of surfactant droplet in transition boiling and formation of secondary droplet*

Tang Xiu-Xing¹⁾ Chen Hong-Yue¹⁾ Wang Jing-Jing¹⁾

Wang Zhi-Jun²⁾ Zang Du-Yang^{1)†}

1) (MOE Key Laboratory of Material Physics and Chemistry under Extraordinary Conditions, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

2) (State Key Laboratory of Solidification Technology, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 1 June 2023; revised manuscript received 18 August 2023)

Abstract

The dynamic processes of surfactant droplets impacting onto substrates of varied temperatures have been widely studied in heat transfer, cooling and printing. In this work, we observe the impacting process of aqueous droplets of surfactants SDS, CTAB, and Triton X-100 on a hot aluminum plate via a high-speed camera, in order to study the dynamics of different surfactant droplets impacting on a hot aluminum substrate. Experimentally, it is discovered that the surfactant droplets in transition boiling produce a secondary droplet of non-wetting state in the final stage of evaporation. The analysis demonstrates that after the droplet impacts the substrate, a temperature gradient is created between the top of the droplet and the triple-phase contact line, increasing the surfactant concentration near the triple-phase contact line as compared with that of the top. The top liquid is maintained by the Marangoni effect, which is caused by the concentration gradient. In the final stage of the evaporation process, the residual droplet gradually shrinks into a sphere. It is detached from the substrate and taken off under the impulse force of the bubble explosion at the bottom, generating the secondary droplet. The radius of the secondary drop increases with the raising of initial concentration of the drop, but ultimately reaches the saturation size. This work explains the role of surfactants in forming secondary droplets. Additionally, this work provides a reference for understanding the physical mechanism of Leidenfrost effect and the controlling of boiling heat transmission.

Keywords: hot substrate, surfactant, Leidenfrost effect, secondary droplet

PACS: 68.03.-g, 68.03.Fg, 68.35.Ja

DOI: 10.7498/aps.72.20230919

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11972303, 12272314).

† Corresponding author. E-mail: dzyang@nwpu.edu.cn

表面活性剂液滴过渡沸腾的Marangoni效应与二次液滴形成

唐修行 陈泓越 王婧婧 王志军 臧渡洋

Marangoni effect of surfactant droplet in transition boiling and formation of secondary droplet

Tang Xiu-Xing Chen Hong-Yue Wang Jing-Jing Wang Zhi-Jun Zang Du-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 196801 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230919

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230919>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分子层次的金纳米棒-表面活性剂-磷脂自组装复合体形貌

Morphologies of self-assembled gold nanorod-surfactant-lipid complexes at molecular level

物理学报. 2020, 69(24): 248701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200979>

表面活性剂对气-液界面纳米颗粒吸附规律的影响

Effect of surfactants on adsorption behavior of nanoparticles at gas-liquid surface

物理学报. 2020, 69(2): 026801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190756>

活性剂对表面声波作用下薄液膜铺展的影响

Effect of surfactants on thin film spreading under influence of surface acoustic wave

物理学报. 2019, 68(21): 214703 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190791>

表面弹性对含可溶性活性剂垂直液膜排液的影响

Effect of surface elasticity on drainage process of vertical liquid film with soluble surfactant

物理学报. 2018, 67(21): 214703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181020>

周期性爆沸诱导的液滴自驱动

Self-propulsion droplet induced via periodic explosive boiling

物理学报. 2021, 70(24): 244703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211386>

液滴撞击圆柱内表面的数值研究

Numerical study of droplet impact on the inner surface of a cylinder

物理学报. 2018, 67(18): 184701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180364>