

超声波激励下倾斜表面液滴逆重力迁移的润湿特性研究

吴馨¹ 高铁瑜¹ 龚建英¹ 颜晓江¹ 谢小军² 宋子琛² 宋孟杰³

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安; 3. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 为了研究 35 kHz 超声波激励下液滴在倾斜铝板表面逆重力迁移过程中的动态润湿行为, 通过定量分析液滴体积、超声振动速度以及表面倾斜角对液滴直径铺展率及接触角滞后的影响, 揭示了超声作用下液滴在倾斜表面逆重力迁移过程中的润湿行为演化规律, 建立了液滴微观润湿特性与宏观动力学行为的协同作用关系。进一步基于受力竞争机制构建了包含声学韦伯数和邦德数的综合无量纲数, 确立了液滴动力学响应的预测经验关系式。研究结果表明, 超声激励可显著增强液滴润湿能力, 并驱动液滴在 30°~90° 倾斜表面实现逆重力迁移, 其最大位移约为 5.04 mm。液滴直径铺展率在超声作用下呈现出“增大-峰值-回缩-稳态”的非线性演变, 其最大直径铺展率变化范围为 1.16~1.51, 且主要受超声振动速度正向调控。此外, 超声振动可有效削弱重力诱导的润湿非对称性, 推动接触角滞后由重力主导的负值状态向声场主导的正值状态转变, 该转变临界值对应的综合无量纲数为 18.79。本研究为基于声场的液滴输运与表面润湿调控提供了理论与实验依据。

关键词: 超声波; 倾斜表面; 液滴; 逆重力迁移; 润湿特性

中图分类号: TN752.6; TK124 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-22

Study on Wetting Properties of Droplets Anti-Gravity Migration on Inclined Surfaces under Ultrasonic Excitation

WU Xin¹, GAO Tieyu¹, GONG Jianying¹, YAN Xiaojiang¹, XIE Xiaojun², SONG Zichen²,
SONG Mengjie³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 710054, Xi'an, China;

3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, 100081, Beijing, China)

Abstract: To investigate the dynamic wetting behavior of droplets during anti-gravity migration on an inclined aluminum plate surface under 35 kHz ultrasonic excitation, the effects of droplet volume, ultrasonic vibration velocity, and surface inclination angle on droplet diameter spreading ratio and contact angle hysteresis were quantitatively analyzed. The evolution of droplet wetting behavior was

收稿日期: 2026-01-22。

revealed, and the synergistic relationship between microscopic wetting properties and macroscopic dynamic behavior was established. Furthermore, based on the force competition mechanism, a comprehensive dimensionless number including the acoustic Weber number and the Bond number was constructed, and an empirical relationship for predicting the droplet dynamic response was established. The results show that ultrasonic excitation enhances droplet wetting ability and drives droplets to migrate against gravity on inclined surfaces at angles of 30° - 90° , with a maximum displacement of approximately 5.04 mm. The droplet diameter spreading ratio exhibits a nonlinear evolution of "increase-peak-retraction-steady" under ultrasonic, with the maximum values ranging from 1.16 to 1.51, primarily positively modulated by vibration velocity. Ultrasonic vibration effectively weakens gravity-induced wetting asymmetry, driving the contact angle hysteresis from a gravity-dominated negative state to an ultrasonic-dominated positive state, and the dimensionless number corresponding to the critical value of this transformation is 18.79. This study provides theoretical and experimental basis for the control of droplet transport and surface wetting based on the ultrasonic field.

Keywords: ultrasonic wave; inclined surface; droplets; anti-gravity migration; wetting properties

液滴在固体表面的操控与去除是微流控、表面自清洁及防除霜等领域中的关键问题^[1-3]。在实际工程应用中,液滴往往存在于倾斜表面,其迁移行为受重力、接触角滞后及粘附力的综合影响,表现出更复杂的滞留及滑动行为。若液滴不能及时被去除或汇聚,不仅会降低设备性能^[4],还可能对运行稳定性带来隐患^[5]。此外,液滴的去除并不局限于顺重力下滑,在诸如底部积液排空、液滴反向收集等特定工况下^[6],需要能驱动液滴克服重力运动的输运手段。

目前,已有多种方法被用于倾斜表面液滴驱动控制,如电润湿^[7]、热梯度驱动^[8]和表面结构设计^[9-10]等。这些策略大多通过在液滴内部或其周围建立非对称场来提供驱动力,从而使液滴获得沿设定方向运动的能力。虽然这些方法在小尺度液滴迁移、特定材料表面或低倾角下取得了一些成果,但还是面临例如

响应范围受限、在大角度表面上难以实现等挑战。因此,在不依赖复杂结构设计且具备良好适应性条件下,实现液滴在倾斜表面上的高效稳定驱动,仍是值得探索的课题。

近年来,基于声场作用的液滴操控技术因其高功率密度与较强的界面扰动能力而备受关注^[11-16],尤其是在倾斜表面上实现液滴逆重力迁移方面表现出显著优势。超声能量通过压电换能器传递,无需在表面引入复杂图案或电极结构;同时,声场对液滴形态、体积和材料适应性强,适用于多种表面与环境条件,具备良好的通用性。液滴在声场作用下不仅会受到声辐射力推动,还会在内部激发声流,并引发接触线的周期扰动,从而有效削弱钉扎效应并增强整体运动能力^[17-21]。这些机制使得液滴能够在倾斜甚至垂直表面上实现快速逆重力移动。例如, Jong 等^[22]在水平和倾斜表

面上使用横表面波输运液滴,实验观察到液滴可在垂直玻璃表面以约 0.57 mm/s 的速度向上爬升,且在移动过程中具备一定的自清洁效果。此外, Sartori 等^[23]进一步通过实验界定了垂直振动下液滴运动的模态转换,指出随着振幅增加,液滴会经历从静止、滑动到向上爬升的演变过程。尽管这些工作初步验证了超声驱动在倾斜表面上实现液滴上坡运动的可行性,但仍存在一些需解决的问题。倾斜表面液滴在超声振动下润湿行为变化的机制尚不清楚,例如,液滴逆重力迁移过程中润湿特性的演化规律,以及微观润湿动力学与超声波驱动力之间的定量关系。

因此,本研究开展了超声振动作用下倾斜表面液滴向上迁移过程中的润湿特性研究。通过定量分析超声振动速度、液滴体积以及表面倾角对液滴铺展变形特性的影响,揭示了在超声驱动下液滴逆重力迁移过程中的润湿行为演化规律,建立了液滴微观润湿特性与宏观动力学行为的耦合关系。

1 实验装置

实验装置如图 1(a)所示。实验系统由超声波发生器、超声换能器、圆盘铝板、高速相机、计算机、辅助光源、微量移液器及倾斜支架构成。从相关研究可知,超声波除霜领域常用激励频率范围通常集中于 20-40 kHz^[24-27]。因此,本研究选取 35 kHz 这一典型工况具有良好的代表性,并且该频率也可为后续结

合不同表面结构的特征频率响应研究提供参考。其中超声波发生器用于产生特定频率和幅值的交流电信号,为系统提供稳定的激励源。超声换能器通过逆压电效应将电信号转换为机械振动,为确保振动能量高效且方向精准地传递,换能器输出端的变幅杆与圆盘铝板中心通过刚性螺纹进行了紧密机械连接。这种刚性连接方式保证了换能器与铝板作为统一的整体固定于倾斜支架上。因此,换能器施加的机械激励方向始终与倾斜铝板表面保持垂直,最终在铝板表面激发出稳定的径向对称弯曲振动模态。其中,圆盘铝板直径为 90 mm,静态接触角为 78.4°。高速摄像系统由高速相机(EoSens mini2)和计算机组成,为精准捕捉超声激励下液滴毫秒级的动态铺展与迁移过程,相机的拍摄帧率设定为 250 fps,分辨率设定为 480×276 像素。倾斜支架通过调整台架高度实现表面倾斜角的改变,其中表面倾斜角变化范围为 30~90°。此外,在实验过程中通过改变超声波发生器的电压来调整超声功率,即改变铝板表面的振动速度。该实验平台的结构设计与系统性能参数已在前期研究中详尽报道^[28-30]。

为了实现液滴在倾斜表面的逆重力运动,本研究基于声流体动力学理论,通过设计特定的表面振动速度梯度场来实现液滴受到非对称声辐射压力。铝板表面驻波结构的分布特征如图 1(b)所示,通过铜粉颗粒清晰标识出同心圆状的波节环。铝板表面形成多个交替分布

的波节与波腹环带。波节位置分别为 $X = 14.8 \text{ mm}$, $X = 38 \text{ mm}$, 波腹位置分别为 $X = 0 \text{ mm}$, $X = 26.6 \text{ mm}$ 。此外, 图 1(c)展示了波腹位置($X = 26.6 \text{ mm}$)振动速度为 0.75 m/s 工况下圆盘铝板表面径向振动速度分布特性。本研究液滴起始位置均静置于 $X = 20.7 \text{ mm}$, 当施加超声波后, 液滴开始朝着上方的 $X = 26.6 \text{ mm}$ 处的波腹位置迁移。此外, 在本研究中, 液滴体积(V)取值为 $5/10/15 \mu\text{L}$, 表面振动速度(U_v)取值为 $0.35/0.55/0.75 \text{ m/s}$, 表面倾斜角(θ_s)取值为 $30/60/90^\circ$ 。

在实验研究中, 由于测量仪器固有精度的局限性、环境的微小干扰以及不可避免的人为读数偏差, 测量结果往往会带有一定的误差。为了保证实验数据的可靠性, 需对关键测量参数进行不确定度分析。针对液滴直径、接触角及运动位移等关键参数, 本研究依赖高速相机捕获的图像并结合 ImageJ 软件进行提取。该类参数的合成标准不确定度 U 主要由显微镜误差 Δy 和多次测量的标准差 S 两部分组成^[31]。其数学表达式如下:

$$U = \sqrt{S^2 + \Delta y^2} \quad (1)$$

在本实验的光学设置中, 高速相机的分辨率为 480×276 像素。因此, 单个像素代表的实际物理尺寸构成了图像测量的系统基准误差, 即:

$$\Delta y = \frac{d}{480} \quad (2)$$

式中, d 为当前焦距下视野所覆盖的实

际物理宽度。

此外, 为消除偶然误差干扰, 本研究中每一个独立工况均进行了 3 次重复性实验, 并将算术平均值作为最终采纳数据。测量数据的标准差为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中, x_i 为单次测量值, $\bar{x}$ 为该工况下的平均值, n 为重复实验次数。

基于上述理论模型计算得出, 本实验中尺度与接触角的标准不确定度分别为 0.0843 mm 和 0.8722° 。结合图 2 给出的统计结果可知, 在所有测试工况下, 各核心表征参数的相对标准偏差均被限制在 8% 以下, 各项关键参数的标准不确定度远小于其物理量测量值的绝对量级。该分析结果证明了本研究所搭建的实验测试系统具有优异的测量精度, 所获取的液滴动力学数据真实可靠。

2 结果与讨论

2.1 超声激励下铝板表面液滴逆重力迁移的行为特性

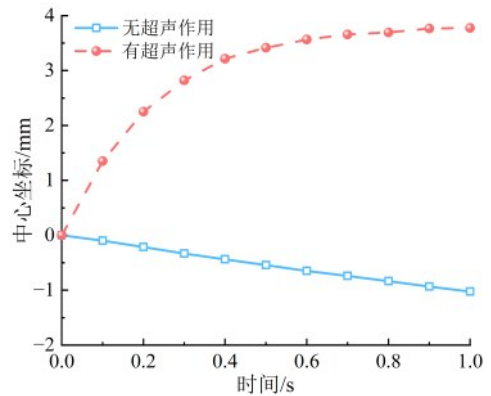
为了清晰揭示超声波激励对液滴逆重力迁移过程的影响特性, 对比展示了在垂直铝板表面上有无超声作用($U_v = 0.75 \text{ m/s}$)下 $15 \mu\text{L}$ 液滴的动态演化过程及相关运动特性, 具体如图 3 和图 4 所示。其中定义液滴向上运动位移为正。由图 3(b)和图 4 可知, 在无超声作用下, 液滴仅受重力作用而进行自然滑落, 其中心坐标随时间呈负向线性增

大,运动速度维持在约1 mm/s的低匀速水平。如图3(a)所示,当施加超声激励时,液滴迅速克服重力并向上方的波腹位置迁移。中心坐标数据表明液滴产生了显著的正向位移,且在启动初期($t = 0.1$ s),其运动速度迅速增大至约13.5 mm/s的峰值,随后逐渐减小。结合图1(c)中的表面振动速度分布可知,在此区间内超声振动速度沿运动方向逐渐增大,但振动速度梯度减小。该非均匀振动场使液滴前后端处于不同的振速梯度下,从而产生指向波腹方向的定向净驱动力。超声作用下液滴运动方向的反转和显著的速度差异归因于声辐射力为液滴提供了远超重力分量的驱动力。

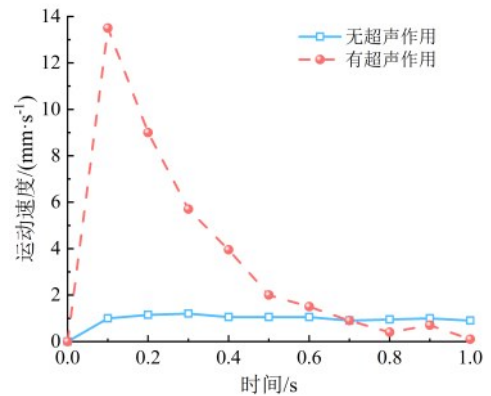
此外,在自然滑落过程中,液滴基本保持初始的收缩状态,如图4(c)所示,其直径铺展率(定义为超声作用下液滴瞬时铺展直径与初始静态直径之比)稳定在1.0左右。而在超声作用下,液滴瞬间发生明显的扩张铺展,其直径铺展率在启动阶段($t = 0.1$ s)增至最大值约1.42,随后小幅回落并稳定在1.2附近。该现象可归因于超声能量输入诱发的声辐射力与声流效应。声辐射力作用于液滴表面,打破了原有的表面张力平衡,而内部声流则加速了液滴内部的质量传递,有效降低了铝板表面微观粗糙结构对三相线的钉扎势垒,使液滴向高润湿性的铺展态转变。

进一步由图3(b)可知,在自然滑落过程中,液滴受到向下的挤压和上方接触线的拉扯,呈现典型的“下大上小”

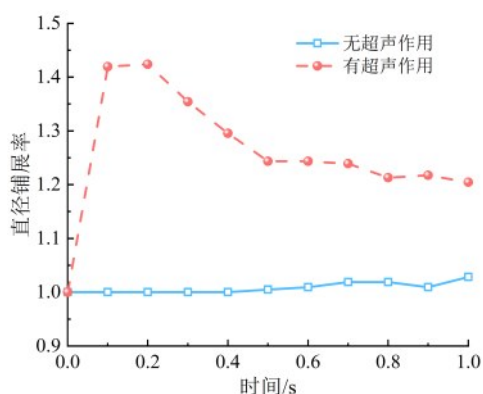
非对称形状,导致其接触角滞后(定义为液滴在运动方向上前端接触角与后端接触角的差值)始终维持在约45°。然而,超声波的施加迅速打破了重力诱导的静态不对称性。在声辐射力驱动下,液滴接触角滞后在启动瞬间发生反转,并随着向上迁移进入稳态逐渐衰减至0°附近。这表明在声辐射力、重力与接触线阻力的共同作用下,液滴不仅实现了宏观逆重力迁移,且其整体形貌也趋于动态对称。因此,超声波不仅提供了克服重力的动力,更通过微观脱钉扎效应改变了液滴的变形及润湿特性。



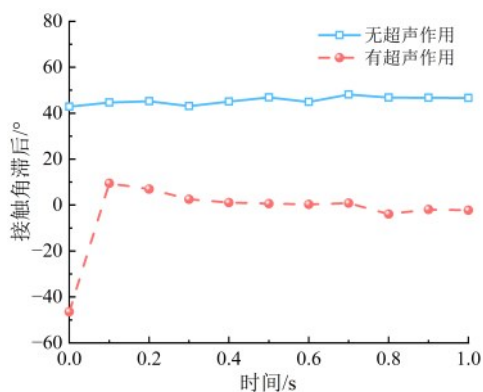
(a) 中心坐标



(b) 运动速度



(c) 直径铺展率



(d) 接触角滞后

图4 有无超声激励下铝板上液滴的运动特性对比 ($V = 15 \mu\text{L}$, $U_v = 0.75\text{m/s}$, $\theta_s = 90^\circ$)

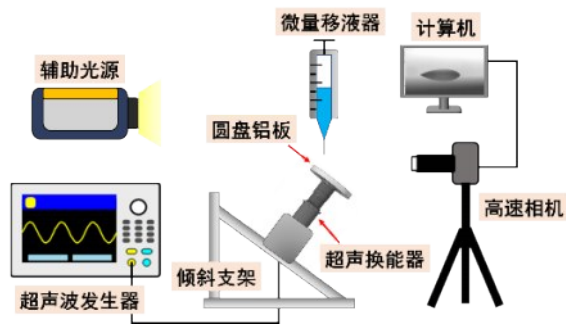
Fig. 4 Comparison of the droplet motion characteristics on the aluminum plate surface with and without ultrasonic excitation ($V = 15 \mu\text{L}$, $U_v = 0.75\text{m/s}$, $\theta_s = 90^\circ$)

2.2 液滴直径铺展率变化特性

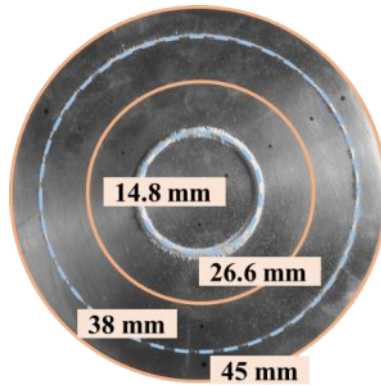
液滴在超声激励下的直径铺展率是衡量声场影响界面润湿动力学的重要参数。图5和图6展示了不同表面倾斜角、液滴体积及超声振动速度下液滴直径铺

展率随时间的动态演变过程。从整体趋势看,多数工况下液滴呈现出“迅速铺展-达到峰值-缓慢回缩-趋于稳态”的非线性特征。该拉伸-收缩特性揭示了声场能量输入与液滴自身表面张力、粘性耗散之间的动态竞争关系。

从参数影响来看,液滴直径铺展率整体随表面倾斜角的增大而降低。这归因于液滴重力分量随倾斜角增大而增强,不仅提升了液滴逆重力迁移的能量门槛,也加快了铺展后的回缩过程,从而降低了液滴可实现的铺展程度。图5进一步表明,在固定倾角和振动速度时,液滴体积主要影响铺展过程的时间尺度和稳态情况,而对直径铺展率峰值的影响相对有限。体积较大的液滴在超声激励下更容易发生显著形态变化,并在较短时间内进入稳态,但其最终稳态铺展率反而低于小体积液滴。这归因于大体积液滴在铺展后同时承受更强的重力和表面张力收缩作用,铺展阶段后更易发生回缩;而小体积液滴由于重力作用较弱,铺展后缺乏足够的回缩驱动力,因此更容易停留在相对铺展的稳态。



(a) 实验装置示意图



(b) 铝板表面振动分布特性

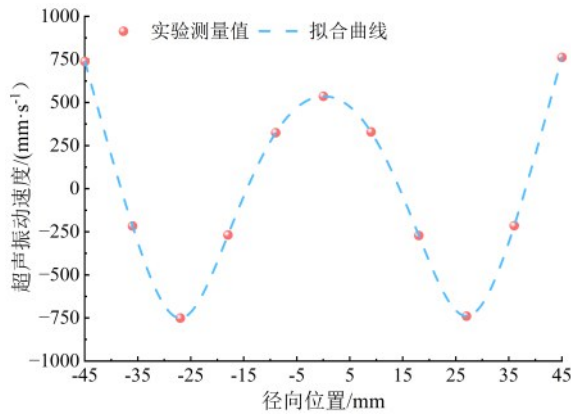
(c) 波腹位置 ($X = 26.6$ mm) 振动速度为 0.75 m/s 工况下圆盘铝板表面径向振动速度分布特性

图1 实验装置示意图及铝板表面振动分布特性

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and vibration distribution characteristics on aluminum plate surface

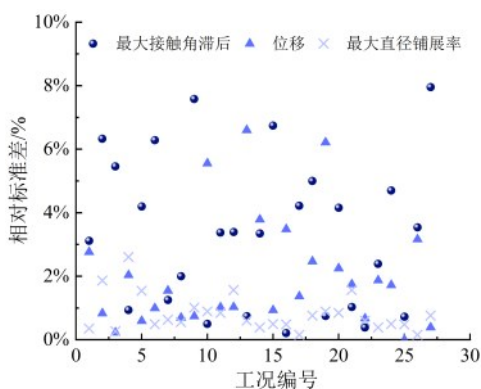
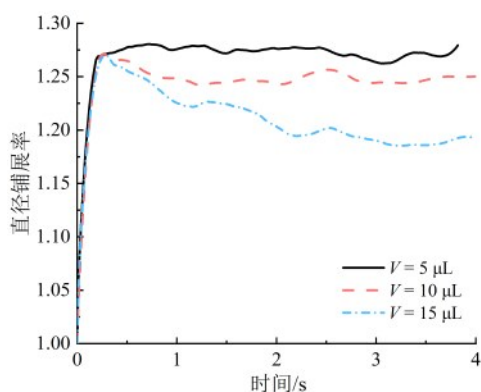


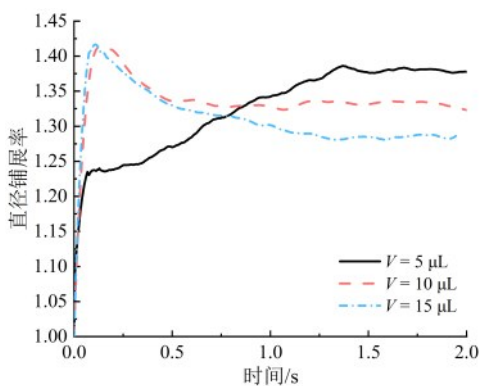
图2 不同工况下各参数的相对标准差

Fig. 2 Relative standard deviation of parameters under different working conditions

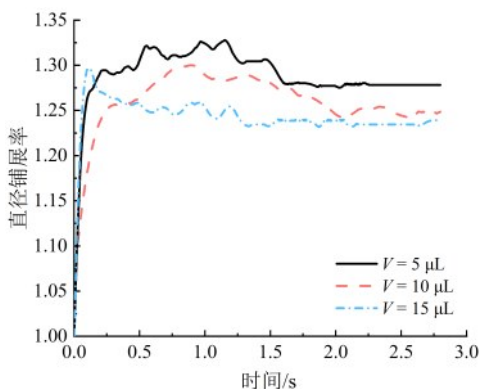


(c) $\theta_s = 90^\circ$

图5 不同表面倾斜角及液滴体积下液滴直径铺展率的动态演变过程 ($U_v = 0.55\text{m/s}$)



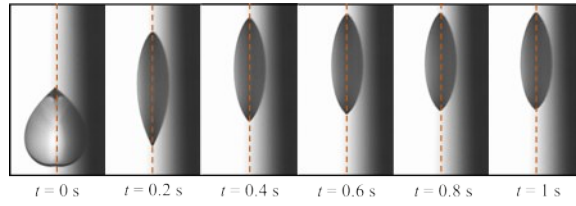
(a) $\theta_s = 30^\circ$



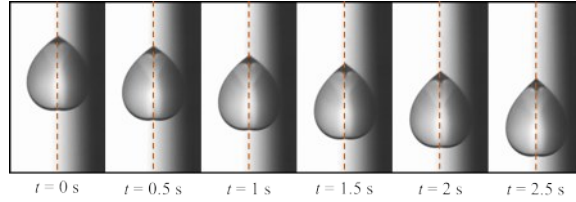
(b) $\theta_s = 60^\circ$

Fig. 5 Dynamic evolution of droplet diameter spreading ratio under different surface inclination angles and droplet volumes ($U_v = 0.55\text{m/s}$)

由图6可知,在固定液滴体积和表面倾斜角时,液滴直径铺展率随振动速度呈现出明显的分层分布特征,且超声振动速度越大,铺展率峰值和稳态铺展率均越高。这表明超声振动速度直接决定了超声作用下液滴所获得的有效能量输入水平。较高的振动速度能够显著增强接触线的向外扩展,使液滴在超声启动阶段实现更充分的铺展,并在稳态阶段维持更大的铺展程度。



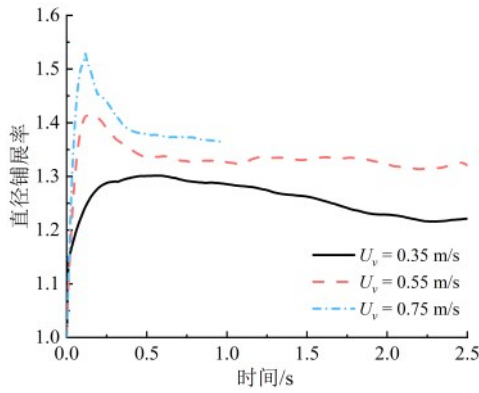
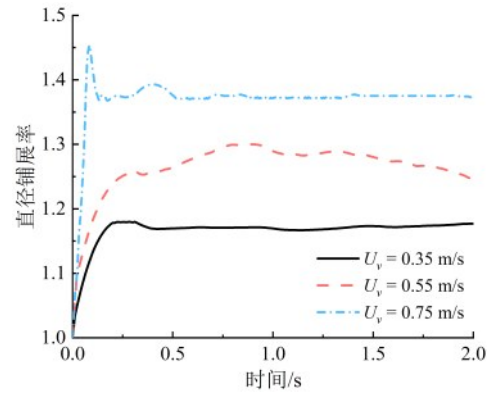
(a) 超声作用下液滴逆重力迁移过程



(b) 无超声作用下液滴自然滑落过程

图3 有无超声激励下铝板表面上液滴的运动过程 ($V = 15 \mu\text{L}$, $U_v = 0.75 \text{ m/s}$, $\theta_s = 90^\circ$)

Fig. 3 The droplet motion process on the aluminum plate surface with and without ultrasonic excitation ($V = 15 \mu\text{L}$, $U_v = 0.75 \text{ m/s}$, $\theta_s = 90^\circ$)

(a) $\theta_s = 30^\circ$ (b) $\theta_s = 60^\circ$

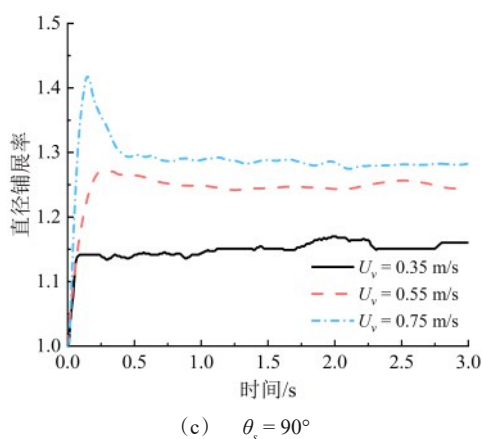
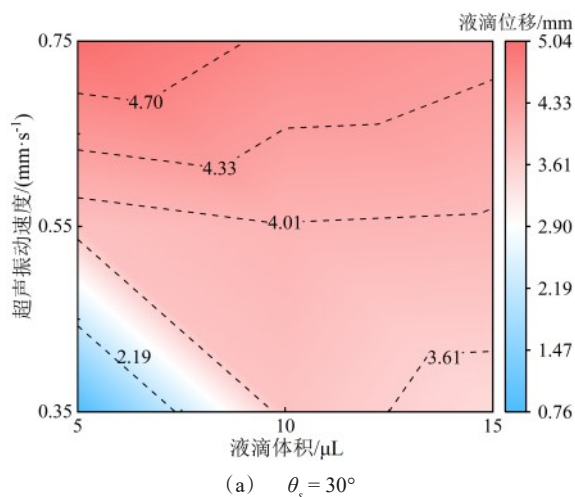


图6 不同表面倾斜角及超声振动速度下液滴直径铺展率的动态演变过程
($V = 10 \mu\text{L}$)

Fig. 6 Dynamic evolution of droplet diameter spreading ratio under different

surface inclination angles and vibration velocities ($V = 10 \mu\text{L}$)

值得注意的是,在小体积、低振速且伴随高倾角的工况下(如 $10 \mu\text{L}$ - 0.35 m/s - 90°),液滴直径铺展率呈现出“增加-稳定”的特殊演变规律。结合图7所示的液滴位移分布可知,在此类工况下,超声驱动力不足以驱动液滴向波腹区域迁移,液滴基本停留在初始位置,仅在超声启动时发生铺展。由于液滴所处位置的超声振动速度分布变化较小,后续阶段缺乏促进液滴铺展的动力来源,因此液滴直径铺展率在达到一定水平后保持稳定,不再出现明显回缩行为。



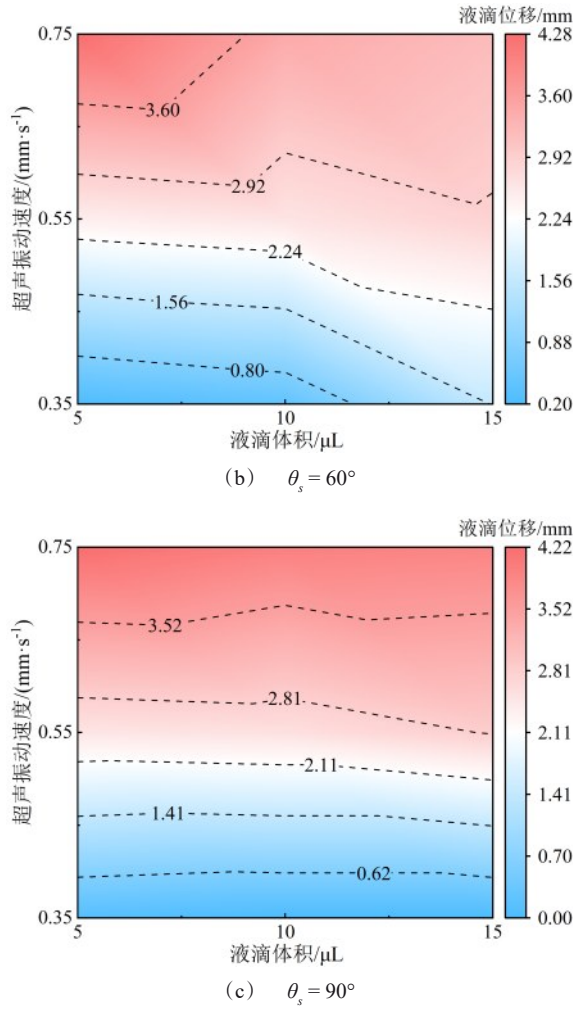


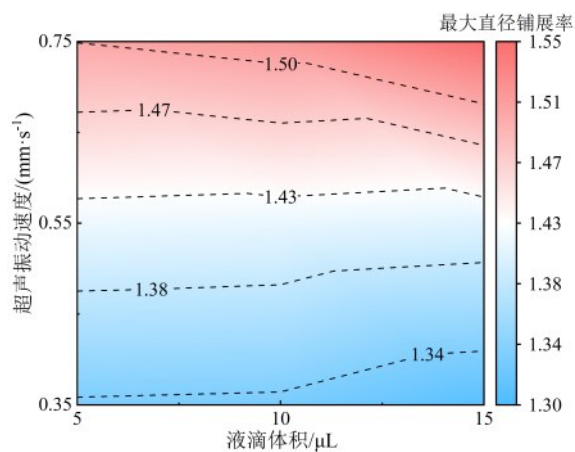
图7 不同工况下液滴运动位移分布特性

Fig. 7 Droplet displacement distribution characteristics under different working conditions

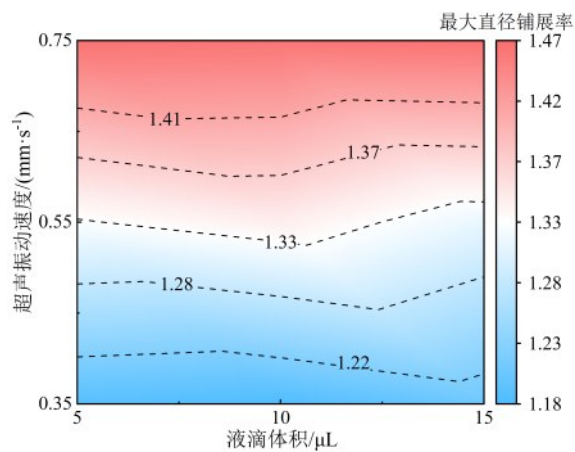
图8为不同工况下液滴最大直径铺展率的等高线图,其揭示了多参数耦合下的液滴润湿性调控规律。首先,液滴体积对最大直径铺展率的影响微乎其微。其次,在液滴体积与表面倾斜角恒定时,最大直径铺展率与超声振动速度呈显著正相关。从能量角度来看,振动速度的提升增强了作用在液滴上的声辐

射力,使液滴获得了更高的能量以克服阻力向外铺展。此外,在液滴体积与振动速度恒定时,液滴最大直径铺展率随表面倾斜角的增大而减小。除重力分量增加的影响外,更关键原因在于迁移距离的缩短,高倾角下液滴位移能力受限,使其无法从低振速区进入高振速区,进而导致液滴受到的实际有效激励

减弱,限制了其润湿范围的进一步 扩张。



(a) $\theta_s = 30^\circ$



(b) $\theta_s = 60^\circ$

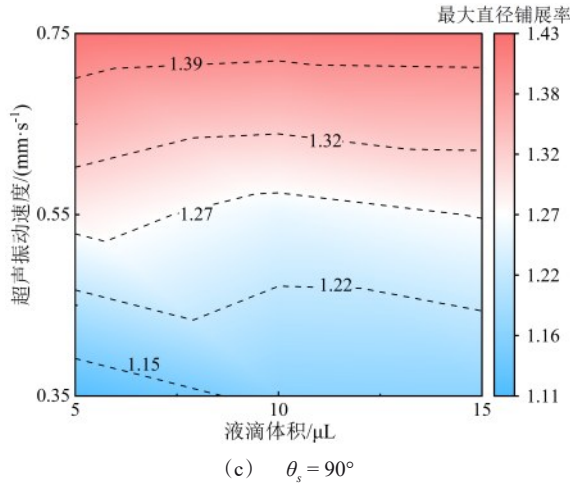


图8 不同工况下液滴的最大直径铺展率分布特性

Fig. 8 Distribution characteristics of droplet maximum diameter spreading ratio under different working conditions

2.3 液滴接触角变化特性

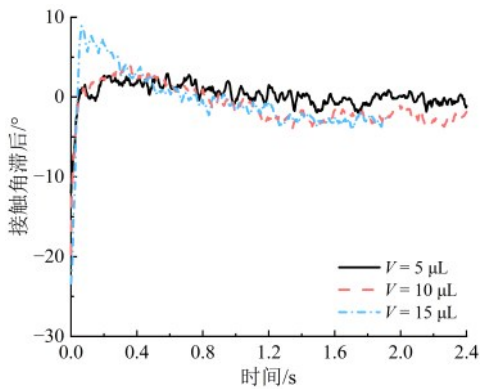
在本研究中,液滴接触角反映了液滴形状的非对称性及其运动阻力。在倾斜表面上,重力场自然诱导了液滴内部的压力梯度,导致下方液体聚集而上方变薄,通常呈现出“下大上小”的几何特征,对应的接触角滞后值为负。图9和图10给出了不同表面倾斜角、液滴体积和振动速度下接触角滞后的时间演化规律,揭示了超声场介入后液滴润湿动力学从重力主导向声场主导的转变过程。

图9展示了在不同表面倾斜角及液滴体积下液滴接触角滞后的动态演变过程。在较小倾角下($\theta_s = 30^\circ$),如图9(a)所示,不同体积液滴的接触角滞后均表现出“快速增大-逐渐衰减-稳定趋近于零”的特征。超声激励初期,接触角滞

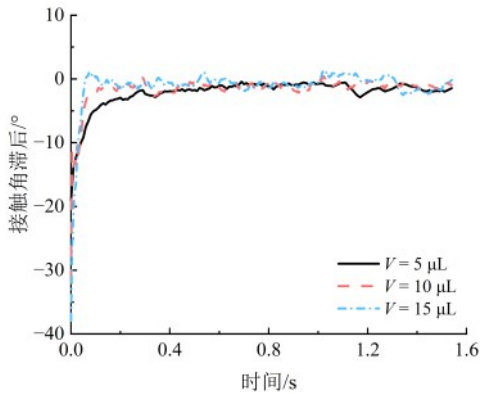
后在0-0.3 s内由初始的负值迅速跃升至正值区间,峰值可达约 3° - 8° ,且液滴体积越大,峰值越高。该阶段对应超声振动对接触线钉扎状态的快速破坏,高频振动诱导的声辐射力显著降低了接触线局部能垒,使前后端接触线发生瞬时扩张。同时,液滴内部由振动驱动形成的环状声流促使液体向前输运,在短时间内形成“前大后小”的反重力非对称形态,从而导致接触角滞后由负转正。随后,随着液滴整体开始向波腹位置迁移,前后接触线的运动逐渐同步,液滴形状由非对称态过渡至准对称态,接触角滞后缓慢衰减并稳定在 0° 附近,表明液滴进入一种声场与重力共同约束下的动态平衡状态。

当倾斜角增大至 60° 和 90° ,如图9(b)-(c)所示,接触角滞后的演化规律发生明显变化。超声激励初期,接触角滞

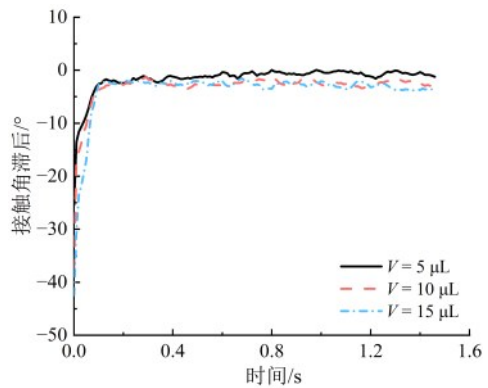
后值同样会经历短暂的快速上升,但随后稳定在负值区间,且液滴体积对稳态负值的影响较小,范围约为 -3° 至 0° 。此时,沿斜面方向的重力分量显著增强,持续驱动液体向后缘堆积,超声振动虽可降低局部润湿阻力,但不足以从整体上逆转重力主导的液滴非对称性,尤其在大体积液滴中,重力诱导的内部压力梯度占据主导。



(a) $\theta_s = 30^{\circ}$



(b) $\theta_s = 60^{\circ}$



(c) $\theta_s = 90^{\circ}$

图9 不同表面倾斜角及液滴体积下液滴接触角滞后的动态演变过程

Fig. 9 Dynamic evolution of droplet contact angle hysteresis under different surface inclination angles and droplet volumes

图10揭示了超声振动速度及表面倾斜角对液滴形态变化的影响。在相同倾角下,随着振动速度提高,接触角滞后的响应由重力主导逐步向声场主导转变。在高振速下(如0.75 m/s),液滴接触角滞后的演变表现为初期急剧增大再快速减小的特征,峰值可达约 5° ~ 11° 。这种突增反映了超声启动瞬间,液滴前后端接触线获得的动能足以将接触线推离原始平衡位置,产生极大的接触角改变。相比之下,在0.35 m/s的低振速下,液滴接触角滞后仅表现为快速增大至稳定且稳定值为负的现象,稳态滞后量维持在约 -12° 至 -3° 。这表明在低振速区间,超声能量主要被液滴内部粘性耗散所抵消,无法提供足够的净驱动力来克服重力诱导的非对称性。中等振动速度(0.55 m/s)呈现出过渡特征,其稳态

接触角滞后介于高、低振速之间。当表面倾角增大时, 振动速度的影响依然显著, 但整体响应区间向负值侧移动。

因此, 超声振动速度的提高本质上增强了超声对液滴的驱动力, 使液滴接触线更容易越过由表面微观粗糙和不均匀性形成的能量障碍, 从而不再长期停留在某一局部钉扎位置。在这种强振动条件下, 接触线会经历频繁的脱钉与钉扎过程, 前后端接触线的运动差异被不断削弱, 最终导致前后接触角趋于一致, 接触角滞后明显减小。由图 10 可知, 随着振动速度的增加, 液滴稳定阶段的接触角滞后持续向 0° 靠近, 说明超声激励能够在倾斜表面上主动削弱润湿非对称性, 使液滴形态趋于对称。

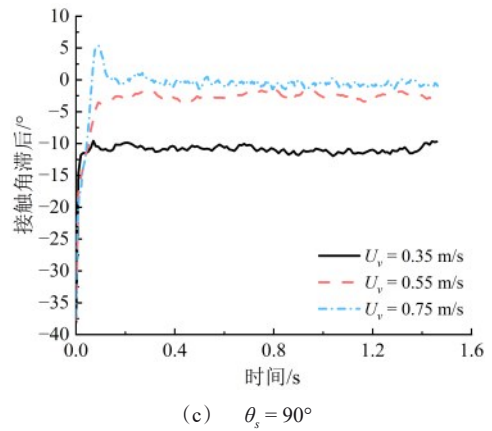
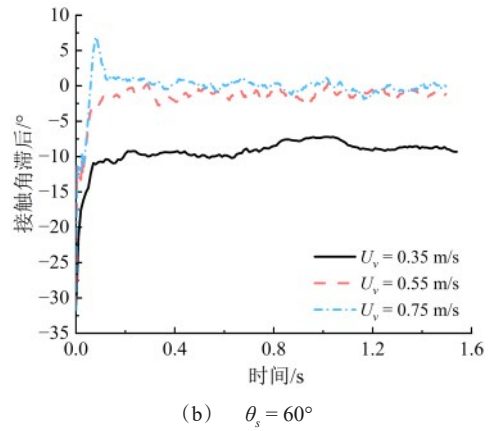
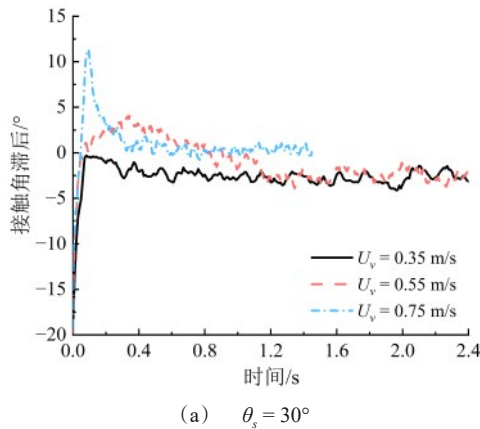
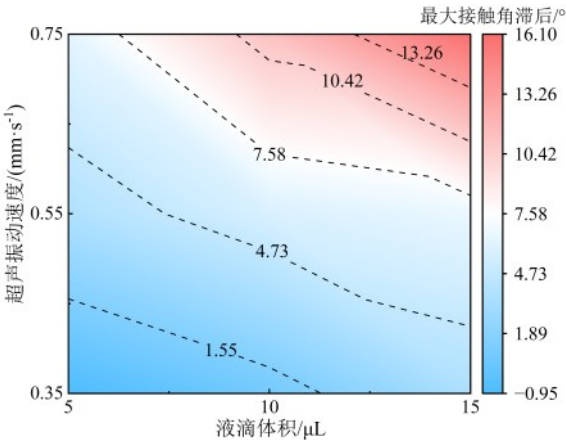


图 10 不同表面倾斜角及超声振动速度下液滴接触角滞后的动态演变过程
Fig. 10 Dynamic evolution of droplet contact angle hysteresis under different surface inclination angles and vibration velocities

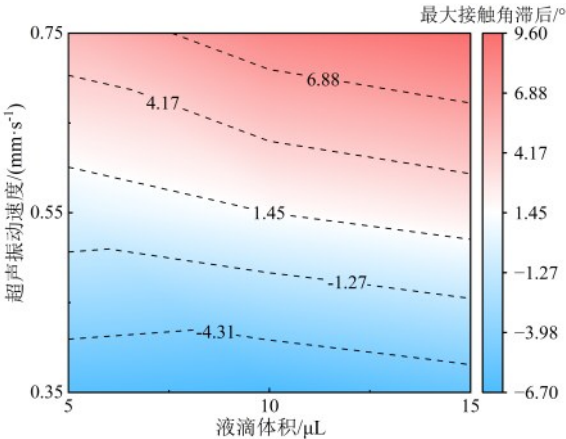
图 11 给出了液滴最大接触角滞后在多参数空间中的整体分布特征。由图可知, 最大接触角滞后在低倾斜角度下 ($\theta_s = 30^\circ/60^\circ$) 随液滴体积和振动速度增加而增大, 但在高倾斜角度下 ($\theta_s = 90^\circ$), 在低振速区间 ($U_v = 0.35-0.55\text{m/s}$) 液滴最大接触角滞后随液滴体积的增大而减小, 且均为负值。最大接触角滞后

随表面倾斜角增大而减小。此外，超声振动速度对应的梯度明显大于液滴体积和表面倾角，是决定最大接触角滞后幅值的主导参数。当振动速度提高至 0.75 m/s 时，最大接触角滞后可迅速提升至 16° 左右，而在低振动速度区间，

其值普遍接近 0° 或处于较低水平。这表明最大接触角滞后主要受超声启动阶段瞬态驱动力控制，只有当振动强度足够大时，液滴才能在短时间内突破接触线钉扎和重力约束，产生显著的润湿非对称响应。



(a) $\theta_s = 30^\circ$



(b) $\theta_s = 60^\circ$

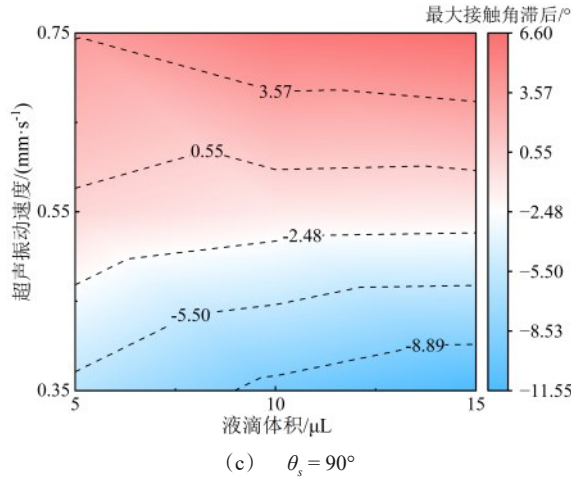


图 11 不同工况下液滴最大接触角滞后的分布特性

Fig. 11 Distribution characteristics of droplet maximum contact angle hysteresis under different working conditions

2.4 动力学响应的无量纲分析

为揭示超声波激励下液滴沿倾斜表面逆重力移动的内在机制,进一步采用无量纲分析对不同工况下液滴动力学响应进行归一化处理。本研究中的液滴运动本质上是超声驱动力与重力分量之间竞争的结果。因此,引入声学韦伯数 $We_a = \rho U_v^2 R_0 / \gamma$ 和 邦 德 数 $Bo_a = \rho g R_0^2 \sin \theta_s / \gamma$ 来表征液滴在运动过程中的受力机制,声学韦伯数为超声振动惯性力与表面张力的比值,邦德数为重力分量与表面张力的比值。其中, ρ 为液体密度, γ 为表面张力, R_0 为液滴特征半径, R_0 是根据液滴体积按照半球形液滴计算得到的等效半径,用于表征液滴体积的影响。进一步取二者之比,定义综合无量纲数 Π :

$$\Pi = \frac{We_a}{Bo_a} = \frac{U_v^2}{g R_0 \sin \theta_s} \quad (4)$$

该综合无量纲数 Π 给出了超声驱动力相对于重力分量的归一化强弱关系,同时将超声振动速度、液滴体积及表面倾角耦合到该表达式中。此外,进一步对液滴的三个响应量进行无量纲化处理。液滴无量纲位移定义为液滴实际位移 L 与起始点到终点波腹的有效驱动距离 L_c 的比值, $L^* = L/L_c$, 其中 $L_c = 5.9 \text{ mm}$ 。液滴最大直径铺展率 D_m 本身就是一个无量纲数,可直接用于表征液滴的变形程度。为表征液滴润湿状态的不对称性,定义最大润湿阻力系数 $C_R = \cos \theta_r - \cos \theta_a$ 。

将全部无量纲响应参数统一映射至 $\log_{10} \Pi$ 坐标后发现,原本分散的实验点整体呈现出较明显的线性增长趋势,如图 12 所示。其中,决定系数 R^2 反映拟

合模型与实验数据的相关性及吻合程度,数值越接近1,拟合可靠性与精度越高。基于最小二乘回归,得到三个响应量与综合无量纲数之间的经验关系式:

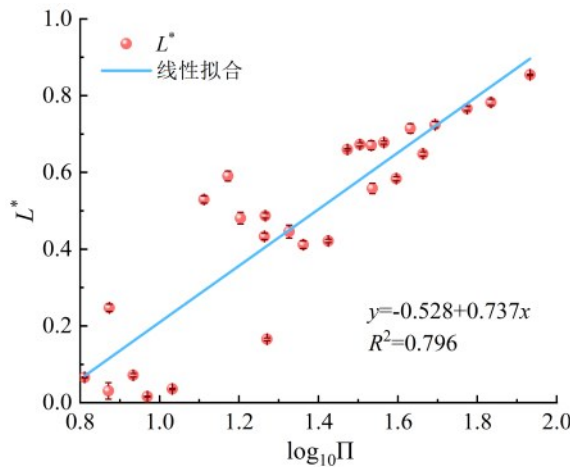
$$L^* = 0.737 \log_{10} \Pi - 0.528, R^2 = 0.796 \quad (5)$$

$$D_m = 0.362 \log_{10} \Pi + 0.849, R^2 = 0.900 \quad (6)$$

$$C_R = 0.186 \log_{10} \Pi - 0.237, R^2 = 0.808 \quad (7)$$

由图12可知,三个无量纲响应量均随 $\log_{10} \Pi$ 的增大而呈近似线性上升,表明综合无量纲数 $\log_{10} \Pi$ 能够较好地统一表征液滴逆重力移动过程中的宏观位移、界面变形与润湿非对称性演化规律。其中, L^* 的增加表明随着超声驱动力相对重力作用不断增强,液滴更容易克服沿表面方向的重力约束,实现更显著的位移。 D_m 与 $\log_{10} \Pi$ 的相关性最高,

说明液滴最大铺展对该综合无量纲数最为敏感,表明液滴铺展变形是外部超声激励向宏观移动响应传递的重要连接过程。 C_R 随 $\log_{10} \Pi$ 的增大由负转正的过程表明液滴不对称性方向的转变。当 $C_R < 0$ 时,液滴不对称性以重力约束效应为主;当 $C_R = 0$ 时,前后端趋于对称,对应临界过渡状态;而当 $C_R > 0$ 时,说明超声驱动已主导前后接触线响应。此外,可基于 C_R 的拟合方程计算得到控制不对称性反转的临界值。令 $C_R = 0$,解得临界无量纲驱动参数 $\log_{10} \Pi \approx 1.274$,即 $\Pi_{cr} = 18.79$ 。因此,当超声惯性力达到重力分量的约18.79倍时,超声作用将克服重力带来的静压非对称性效应实现液滴界面变形机制由重力主导向声场主导的转变。



(a) 综合无量纲数与无量纲位移的关系

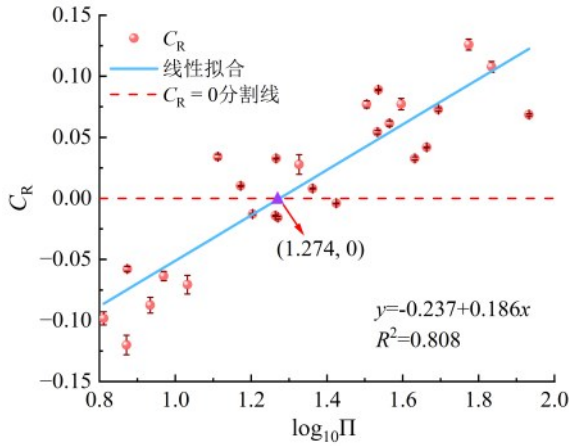
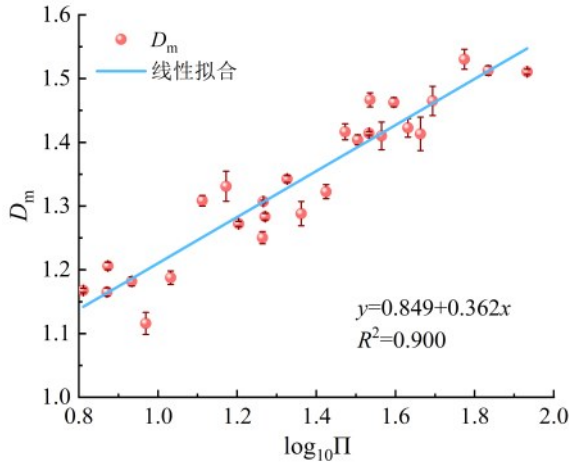


图 12 综合无量纲数与无量纲响应量之间的关系

Fig. 12 Relationship between comprehensive dimensionless number and dimensionless response quantities

3 结论

本文研究了在 35 kHz 超声波作用下,液滴在倾斜表面上逆重力迁移过程中的润湿行为。全面分析了在不同液滴体积、超声振动速度和表面倾斜角下液滴直径铺展率及接触角滞后的动态演

变,揭示了液滴的润湿特性。主要结论如下:

(1) 在超声波激励下,液滴会出现显著铺展变形,液滴润湿性增强,液滴接触角急剧减小,铺展直径快速增大。此外,声辐射力会抵抗液滴重力使液滴在 30°~90°倾斜表面实现逆重力迁移,

最大位移达到5.04 mm。

(2) 液滴直径铺展率呈现“迅速铺展-达到峰值-缓慢回缩-趋于稳态”的非线性演化特征,并且在小体积、低振速、高倾角工况下表现为“快速增加-稳定”的特殊规律,液滴最大直径铺展率变化范围为1.16-1.51。超声振动速度是影响液滴铺展程度的关键因素,倾斜角的增大起抑制作用,液滴体积的影响可忽略。

(3) 超声波激励可使液滴接触角滞后由重力主导的负值向声场主导的正值转变。在低倾角下,液滴最大接触角滞后随液滴体积的增大而增大,但在高倾角下,在低振速区间液滴最大接触角滞后随液滴体积的增大而减小,且均为负值。随着振动速度的增大,液滴最大接触角滞后增加,稳定接触角滞后由负值转为正值。倾角的增大会导致液滴不对称性增强。

(4) 构建了表征超声惯性力与重力分量比值的综合无量纲数 Π ,确立了多参数耦合下的经验预测标度律。液滴的无量纲位移、最大直径铺展率及最大润湿阻力系数均随 $\log_{10}\Pi$ 呈线性增长趋势。液滴变形相关的不对称性反转的临界值为 $\Pi_{cr}=18.79$,即当超声驱动力达到重力分量的约18.79倍时,超声驱动力将克服重力带来的静压约束,实现液滴界面变形机制由重力主导向声场主导的转变。

参考文献

[1] 刘学,赖天伟,赵琪,强铭琛,马斌,侯予,

受限流道沿程参数变化对竖直圆管表面结霜特性影响的实验研究,西安交通大学学报,(005)(2022) 056.

- [2] 谭海辉,陶唐飞,徐光华,万翔,张鑫,翅片管式蒸发器超声波除霜理论与技术研究,西安交通大学学报,49(9)(2015) 9.
- [3] 褚福强,吴晓敏,陈永根,疏水表面结霜初期液滴生长的理论分析,化工学报,66(S1)(2015) 60-64.
- [4] W. Ling, J. Wu, X. Li, J. Ma, Y. Ding, B. Li, M. Zeng, Numerical prediction of frosting growth characteristics of micro-channel louvered fin heat exchanger, Energy, 283 (2023) 128519.
- [5] P. Vocale, G. L. Morini, M. Spiga, Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance, Energy Procedia, 45 (2014) 653-662.
- [6] L. Y. Yeo, J. R. Friend, Surface acoustic wave microfluidics, Annual review of fluid mechanics, 46(1) (2014) 379-406.
- [7] S. Datta, M. Sharma, A.K. Das, Investigation of upward climbing motion of a droplet over an inclined surface using electrowetting, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(16) (2014) 6685-6693.
- [8] 高安然,李铁,刘翔,焦继伟,王跃林,基于温度梯度驱动的液滴传输行为研究,测试技术学报,24(05) (2010) 377-380.
- [9] P.P. Seerha, P. Kumar, A.K. Das, S.K. Mitra, Proposition of stair climb of a drop using chemical wettability gradient, Physics of Fluids, 29(7) (2017).
- [10] N. T. Chamakos, G. Karapetsas, A. G. Papatheanasiou, How asymmetric surfaces induce directional droplet motion, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 511 (2016) 180-189.

- [11] Z. Yuan, C. Lu, C. Liu, X. Bai, L. Zhao, S. Feng, Y. Liu, Ultrasonic tweezer for multi-functional droplet manipulation, *Science Advances*, 9(16) (2023) eadg2352.
- [12] T. Luo, S. Liu, R. Zhou, C. Zhang, D. Chen, Y. Zhan, Q. Hu, X. He, Y. Xie, Z. Huan, Contactless acoustic tweezer for droplet manipulation on superhydrophobic surfaces, *Lab on a Chip*, 23(18) (2023) 3989-4001.
- [13] P. Brunet, M. Baudoin, O. B. Matar, F. Zoueshtiagh, Droplet displacements and oscillations induced by ultrasonic surface acoustic waves: A quantitative study, *PHYSICAL REVIEW E*, 81(3) (2010).
- [14] X. Chen, A. Lal, Surface liquid droplet motion on silicon ultrasonic horn actuators, in: *Proceedings of 2005 IEEE Ultrasonics Symposium*, 2005, pp. 1032-1035.
- [15] M. Sesen, T. Alan, A. Neild, Microfluidic on-demand droplet merging using surface acoustic waves, *Lab on a Chip*, 14(17) (2014) 3325-3333.
- [16] 吴馨, 龚建英, 靳龙, 王宇涛, 黄睿宁, 超声波激励下铝板表面液滴群输运特性的研究, *化工学报*, 74(S1) (2023) 104-112.
- [17] R. Galleguillos-Silva, Y. Vargas-Hernández, L. Gaete-Garretón, Wettability of a surface subjected to high frequency mechanical vibrations, *Ultrasonics sonochemistry*, 35 (2017) 134-141.
- [18] J. -J. Guo, X. -P. Chen, L. Shui, Surface wave mechanism for directional motion of droplet on an obliquely vibrated substrate, *Physics of Fluids*, 32(3) (2020) 031701.
- [19] M. Trapuzzano, A. Tejada-Martínez, R. Guldiken, N. Crane, Volume and Frequency-Independent Spreading of Droplets Driven by Ultrasonic Surface Vibration, *Fluids*, 5(1)(2020) 18.
- [20] J. Scortesse, J. -F. Manceau, F. Bastien, Displacement of droplets on a vibrating structure, *Ultrasonics*, 40(1) (2002) 349-353.
- [21] T. Fukaya, J. Kondoh, Experimental consideration of droplet manipulation mechanism using surface acoustic wave, *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(7S1) (2015) 07HE06.
- [22] E. De Jong, Y. Wang, J.M. Den Toonder, P. R. Onck, Climbing droplets driven by mechanowetting on transverse waves, *Science advances*, 5(6) (2019) eaaw0914.
- [23] P. Sartori, D. Quagliati, S. Varagnolo, M. Pierno, G. Mistura, F. Magaletti, C. M. Casciola, Drop motion induced by vertical vibrations, *New Journal of Physics*, 17(11) (2015) 113017.
- [24] K. Adachi, K. Saiki, H. Sato, T. Ito, Ultrasonic Frost Suppression, *Japanese Journal of Applied Physics*, 42(2R)(2003) 682.
- [25] D. Li, Z. Chen, M. Shi, Effect of ultrasound on frost formation on a cold flat surface in atmospheric air flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8) (2010) 1247-1252.
- [26] D. Wang, T. Tao, G. Xu, A. Luo, S. Kang, Experimental study on frosting suppression for a finned-tube evaporator using ultrasonic vibration, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36 (2012) 1-11.
- [27] M. Amer, C. -C. Wang, Experimental investigation on defrosting of a cold flat plate via ultrasonic vibration under natural convection, *Applied Thermal Engineering*, 179 (2020) 115729.
- [28] X. Wu, J. Gong, T. Gao, Y. Wang, R. Huang, J. Hou, Experimental study on dy-

- dynamic wetting behavior of liquid droplets on the aluminum surfaces excited by ultrasonic waves, *Applied Thermal Engineering*, 248 (2024) 123209.
- [29] X. Wu, J. Gong, Z. Jiang, X. Yang, T. Gao, C. Yang, Droplet transport dynamics induced by ultrasonic vibration on horizontal metal surface, *Physics of Fluids*, 37 (7) (2025).
- [30] X. Wu, J. Gong, Y. Wang, X. Li, X. Yang, Motion and rupture properties of droplets on inclined surfaces under ultrasonic excitation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 256 (2026) 128108.
- [31] 任政, 张兴群, 张蓓乐, 薛绒, 陈小砖, 赖天伟, 侯予, -60℃水平圆管表面结霜特性的实验研究, *西安交通大学学报*, 053 (007) (2019) 78-83,135.