

DOI:10.11918/202208020

电润湿效应下液滴动态接触行为分析

高燕飞,何纬峰,施其乐,韩东,张继荣

(南京航空航天大学 先进工业节能研究团队(AECRG) 能源与动力学院,南京 210016)

摘要:为研究电润湿条件下液滴动态接触行为的动态变化机制,采用动态接触角理论,建立电润湿下液滴的数值模型,并对液滴动态接触行为进行分析,系统地研究体积和壁面条件对液滴动态行为的影响。结果表明:当液滴体积从2 μL 增加到6 μL 时,液滴接触半径的最大振幅从0.16 mm增加到0.23 mm,当液滴初始角度从100°增加到115°时,振幅从0.13 mm增加到0.18 mm;同时,滑移长度从0.5 μm 增加到2 μm 时,振幅最大值从0.21 mm增大到0.29 mm。液滴体积越大、壁面的阻力越小和疏水性越强,液滴具有更高的动能以及更大的振荡幅度。此外,液滴初始动能越大,液滴的振荡更加剧烈。通过揭示液滴在电润湿过程中的动态接触行为机制,为通过电润湿效应改善微通道传热特性的研究提供理论依据。

关键词:电润湿;表面润湿性;动态接触角;液滴动力学;滑移长度

中图分类号:TK172

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2023)06-0046-06

Analysis of dynamic contact behavior of droplet under electrowetting effect

GAO Yanfei, HE Weifeng, SHI Qile, HAN Dong, ZHANG Jirong

(Advanced Energy Conservation Research Group (AECRG), College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the dynamic change mechanism of droplet dynamic contact behavior under electrowetting conditions, the dynamic contact angle theory is used to establish a numerical model of droplet under electrowetting and the droplet transient behaviour is analysed. In particular, the effects of volume and wall conditions on the dynamic behaviour of droplet are systematically investigated. The results show that the maximum amplitude of the droplet contact radius increases from 0.16 mm to 0.23 mm when the droplet volume increases from 2 μL to 6 μL , and the amplitude increases from 0.13 mm to 0.18 mm when the initial droplet angle increases from 100° to 115°. At the same time, with the slip length from 0.5 μm increased to 2 μm , the maximum amplitude increases from 0.21 mm to 0.29 mm. The larger the droplet volume, the smaller the wall resistance, the stronger the hydrophobicity, and the higher the kinetic energy and the greater the oscillation amplitude of the droplet. By revealing the dynamic contact behavior mechanism of droplets in the process of electrowetting, a theoretical basis is provided for the study of improving the heat transfer characteristics of microchannels through the electrowetting effect.

Keywords: electrowetting; surface wettability; dynamic contact angle; droplet dynamics; slip length

近年来,随着 MEMS 技术的迅速崛起,微混合器、微流控芯片、微化学反应器、微燃料电池、微交换器等出现,并在微电子、材料科学、化学工程、生化分析和分子生物学等学科显示了广阔的应用前景^[1]。在这种背景下,20 世纪 90 年代,一种新的微流控技术——电润湿技术诞生,与其他微流控技术相比,电润湿技术具有功耗低、响应速度快、可靠性高、成本低等显著优势。

流体动力学理论^[2-3]和分子动力学理论^[4]都被用来模拟液滴在固体表面上运动的动态接触角。流

体动力学理论将动态和静态接触角之间的偏差归因于接触线附近液体前沿的整体黏性耗散。相反,分子动力学理论考虑了接触线附近液体颗粒吸附或解吸产生的摩擦力^[5]。研究表明,分子动力学理论更适合电润湿的研究,一些实验和数值研究成功证明了分子动力学理论在直流电润湿应用中的有效性^[6-10]。

一些学者对电润湿进行了许多实验和理论研究,以了解液滴在电场影响下与固体表面的相互作用。此外,近年来,电润湿现象的研究已从表面特性

收稿日期:2022-08-04;录用日期:2022-11-01;网络首发日期:2022-12-07

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221206.1601.001.html

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20201294);中央高校基本科研业务费(NS2022026);研究生科研与实践创新计划(xcxjh20220215)

作者简介:高燕飞(1999—),男,硕士研究生;何纬峰(1983—),男,副研究员,博士生导师

通信作者:何纬峰,wfhe@nuaa.edu.cn

转向内部机制。Zhang 等^[11-13]使用直流压摆电压驱动电润湿系统,以降低固液界面的滑动阻力,研究了外加电压下粗糙表面上固液界面的摩擦和滑移行为,结果表明,不稳定区域粗糙表面上液滴的滑移行为不能用电润湿方程来解释。He 等^[14]研究了含有不同分子数的纳米液滴在纳米柱阵列表面的润湿和脱湿行为,通过分子动力学模拟,在有无外加电场的情况下进行研究,以检验是否存在尺度效应。Wang 等^[15]在实验水平上研究了电润湿现象中液滴脱湿、振荡和脱落的瞬态动力学。Pathak 等^[16]通过模拟电润湿模型,模拟并计算了硅基片径向对称电场下液滴的动态膨胀,并进一步模拟了液滴在电极阵列上的驱动。Ahmad 等^[17]报道了不同疏水条件下电润湿诱导振荡液滴的数值模拟和实验。Zhang 等^[18]利用分子动力学模拟研究了电润湿驱动离子液体液滴的渗透过程,通过改变基底的润湿性、电场强度和电场极性,研究了电润湿效应。

直流或交流电场下液滴物理性质、电场大小、极性对电润湿现象的影响已经被广泛研究。然而,壁面特性对电润湿过程的具体影响并未有深入研究,同时,对于直流电场作用下液滴在初始动态过程中各物理量之间的联系,目前还没有详细的分析来揭示。此外,电润湿过程中的瞬态分析更有助于揭示液滴变化后的稳态特性。因此,本文基于轴对称模型和动态接触角理论,更好地模拟了液滴接触角的变化。对不同电润湿参数下,液滴动态行为进行了瞬态分析。研究液滴动能变化与液滴振荡之间的内在联系,分析了液滴相互关联的速度、能量和动能之间的关系。获得了不同环境下液滴的动态接触行为变化,为后续的电润湿研究提供了理论支持。

1 数学模型和计算方法

1.1 电润湿工作原理

介质上电润湿的基本原理如图1所示。在电润湿过程中,通常在平板表面涂覆一层介电层,以防止在高压下产生电解效应。以同样的方式,将疏水层应用于介电层,以增加壁表面的疏水性,增加改变接触角的能力。根据 Young-Lippmann 方程,静止时液滴的接触角与施加电压后的电压大小之间的关系如下^[19]:

$$\cos \theta_v - \cos \theta_e = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\gamma_{lg}} U^2 \quad (1)$$

式中: d 为介电层的厚度, U 为电压大小, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为介电层的相对介电常数, θ_v 为施加电压后的静态接触角, θ_e 为初始接触角, γ_{lg} 为表面张力。

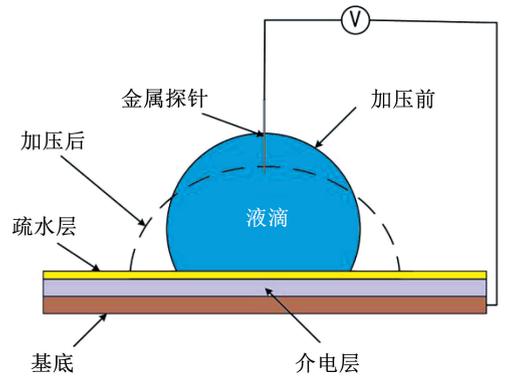


图1 介质上电润湿原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of electrowetting principle on medium

1.2 数学模型

利用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件包对电润湿模型进行了数值模拟。数值模拟中考虑的物理方法包括两相层流法和水平集法,还采用动态接触角模型将这些物理和数学概念结合起来,形成完整的液滴运动过程。构建的物理模型的计算域如图2(a)所示。假设液滴为水,环境介质为空气,液滴受到电场力的刺激后,接触角开始改变。主要研究电润湿效应下液滴的动态行为。

1.3 计算方法

假设液滴被空气包围,流体的运动一般由 Navier-Stokes 方程描述^[20]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \boldsymbol{\pi} + F + \rho g + F_e \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

式中: u 为流体的速度; $\boldsymbol{\pi}$ 为总应力张量; ρ 为流体的密度; F 为作用于流体表面的表面张力; g 为重力; F_e 为电场力,由于电场力只与激励电压大小有关,与液滴的形态无关,在电润湿的动态过程中,电场作用力保持不变, $F_e = \varepsilon_0 \varepsilon_r V^2 / 2d$ 。此外,研究通过动态接触角模型来模拟电润湿效应下液滴接触角的改变,不涉及液滴内部电场分布的具体研究。

另外,水平集方法对应的控制方程为^[20]

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi u) = \gamma \left[\nabla \cdot \left(-\phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} + \varepsilon \nabla \phi \right) \right] \quad (4)$$

式中: ε 为界面厚度参数, γ 为重新初始化参数。对于数值计算,合适的选择是 $\varepsilon = h$,其中, h 为网格单元大小, ϕ 为水平集函数。

流体域由界面分为两种材料,并且在每个子域中,材料属性是恒定的。然而密度和黏度在整个求解域中是不连续的。为了简化计算,以便密度、黏度和表面张力值从空气连续过渡到液滴,通过下式实现^[20]:

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)\phi \quad (5)$$

$$\mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)\phi \quad (6)$$

式中下标 g 和 l 表示气相和液相。

同时调整滑移长度大小来改变壁面阻力特性,在计算模型中,具体关系如下^[21]:

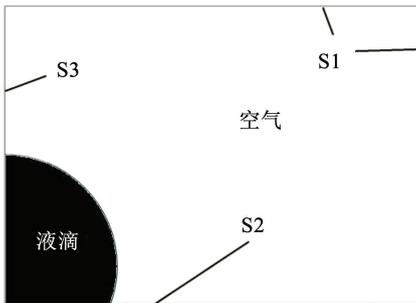
$$f = \mu/\beta \quad (7)$$

式中:β 为滑移长度,f 为摩擦因数。

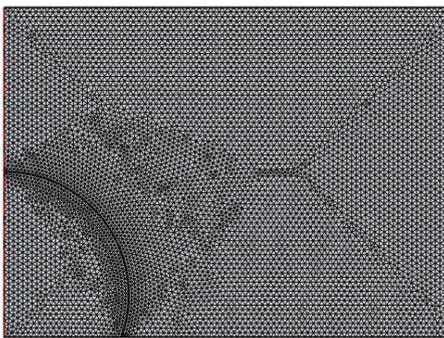
1.4 边界条件和接触角模型

建立数学模型时假设流体层流且不可压。对液滴和空气分别建立层流 Navier-Stokes 方程组,考虑微液滴表面张力的作用^[22]。

在轴对称液滴扩散的模拟中,设置了若干边界条件还原实际场景。S1 边界设置为开放边界,使模型在液滴移动时通过改变系统压力释放来收敛。边界 S2 设置为润湿壁面,S3 为对称边界。为了准确捕捉应力张量对液滴的影响,对液滴表面附近的网格和润湿壁边界进行了特别细化,如图 2(b) 所示,最终计算结果通过了网格独立性数值试验,网格总数为 13 631。



(a) 计算域和边界条件



(b) 模型几何体的有限元网格划分

图 2 电润湿模拟的几何模型

Fig. 2 Geometric model of electro-wetting simulation

由于动态接触角是接触线速度的函数,而动态接触角和接触线速度之间的关系主要基于 Hoffman 定律或由 Cox 推导出的更一般的形式^[2]。这些模型的动态接触角预测值非常相似,因此,采用 Kistler 的动态接触角模型进行研究^[23]:

$$\theta_d = f_H [C_a + f_H^{-1}(\theta_V)] \quad (8)$$

式中:θ_d 为动态接触角,f_H 为 Hoffman 经验函数的反函数,形式如下

$$f_H = \arccos \left\{ 1 - 2 \tanh \left[5.16 \left(\frac{x}{1 + 1.31x^{0.99}} \right)^{0.706} \right] \right\} \quad (9)$$

C_a 为毛细数,定义为

$$C_a = \frac{\mu v_{cl}}{\sigma} \quad (10)$$

其中,μ 为动力黏度,v_{cl} 为三相接触线速度,σ 为表面张力系数。此外,Oh 等^[24] 的实验和计算表明,如果电压小于 130 V,与 Lippmann-Young 方程没有太大偏差。因此,电场引起静态接触角的变化可由 Lippmann-Young 方程预测。动态接触角模型通过自定义函数编程实现。

计算中,v_{cl} 为数值计算扩散液滴中湿润面积半径的时间导数,由于模型为轴对称规则几何模型,计算误差可以接受,具体如下

$$v_{cl} = \frac{dx_{cl}}{dt} \quad (11)$$

式中 x_{cl} 为湿润面积半径。

1.5 数值验证

为了验证本文构建模型的正确性和准确性,相同壁面条件及电压下(电压为直流 100 V),将本文的模拟数据与 Li 等^[21] 的实验数据进行了比较。其余材料性能相同(见表 1),具体比较结果见图 3。

表 1 直流电润湿实验和模拟中使用的液体/基底材料特性
Tab. 1 Material properties of liquids/substrates used in DC wetting experiments and simulations

| ρ/ (kg·m ⁻³) | μ/ (Pa·s) | γ _{lg} / (N·m ⁻¹) | θ _c / (°) | ε _r /d/ (F·m ⁻²) | V/ μL |
|-----------------------------|-------------------------|---|-------------------------|--|----------|
| 997 | 8.94 × 10 ⁻⁴ | 7.275 × 10 ⁻² | 117 | 6.62 × 10 ⁻⁶ | 5.16 |

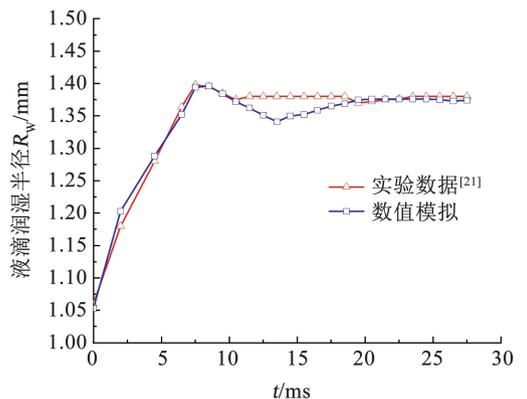


图 3 模型验证数据对比

Fig. 3 Comparison chart of model validation data

如图 3 所示,数值模拟获得的数据与实验数据基本一致,最大数据偏差出现在 13.5 ms,最大误差

为3%,在可接受的范围内,表明所构建模型的正确性。

2 结果与分析

在模拟计算中,液滴体积 $V = 4 \mu\text{L}$ 。液滴初始形状为球形冠,初始接触角为 110° 。介电质和疏水层的总厚度 $d = 2.5 \mu\text{m}$,总有效相对介电常数 $\epsilon_r = 2.8$ 。液滴为去离子水,密度 $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$,运动黏度 $\mu = 1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。环境气体为空气,液滴在施加电压前处于平衡状态($t = 0 \text{ ms}$)。

2.1 直流电润湿下液滴扩散分析

图4为 $U = 75 \text{ V}$ 下液滴形态随时间的变化,图5为不同电压下液滴形态和润湿半径随时间的变化。从图4和5可知,液滴润湿半径从 $t = 1 \text{ ms}$ 时的 1.10 mm 迅速增加到 $t = 7 \text{ ms}$ 时的 1.29 mm 。在施加电压后的短时间内,液滴润湿半径逐渐增大,并达到最大值(波峰), $t = 12 \text{ ms}$ 时,润湿半径为 1.23 mm ,液滴形态变为收缩状态,润湿半径减小并伴有轻微振荡。最后动态接触角也趋于稳定,润湿半径略有振荡,液滴形态也将保持稳定。因此,在直流电压激励下,液滴一般会随时间发生类阻尼振荡运动,直至稳定。

液滴发生变化是由于液滴在初始时刻突然受到电场力的刺激,打破了液滴力的平衡,液滴接触线附近的速度开始增加,动能也急剧增加。然而,在液滴的前进过程中,由于受到毛细力和壁面阻力的影响,液滴在一定时间内达到最大速度(对应于湿润半径随时间的第一波峰)后开始减速,并且最终速度趋近于0。此外,由于在初始变形期间积累了一定的动能,该动能最终导致在液滴边缘压力的积累。在压力作用下,液滴往复运动,造成接触线加速后退和润湿半径振荡。当振荡过程耗尽动能时,液滴的形态和润湿半径达到稳定。

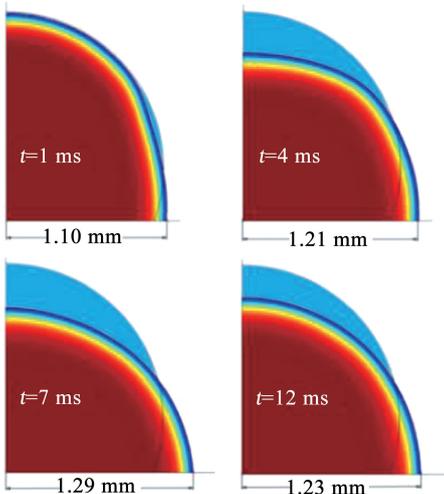
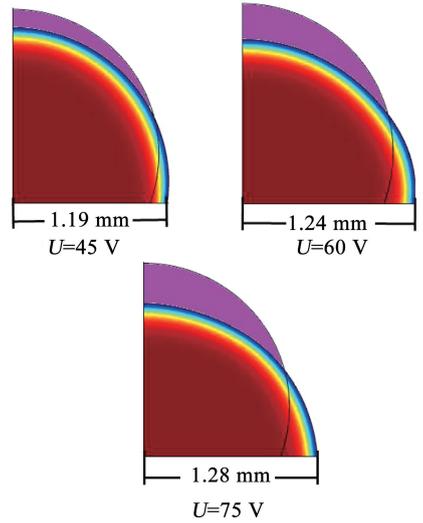
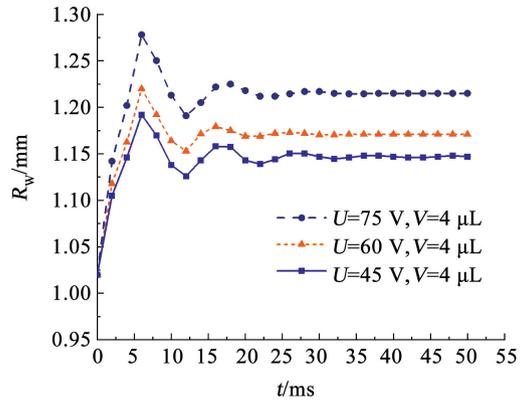


图4 液滴形态随时间的变化 ($U = 75 \text{ V}$)

Fig.4 Variation of droplet morphology with time ($U = 75 \text{ V}$)



(a) 同电压下的液滴形态(最大振幅)



(b) 液滴润湿半径随时间的变化

图5 电润湿过程中的液滴动力学

Fig.5 Droplet dynamics during electrowetting

此外, $U = 75、60、45 \text{ V}$ 液滴半径最大值分别为 $1.28、1.24、1.19 \text{ mm}$ 。可知电压越大,液滴受到电场力越大,液滴动能越大。因此,电压越大,液滴润湿半径越大。

2.2 不同参数对电润湿效应的影响

2.2.1 液滴体积对直流电润湿效应的影响

液滴的振幅是液滴扩散期间沿壁面方向向前移动的位移,用 A_m 表示。图6为 60 V 直流电压和 110° 初始接触角下,不同体积液滴的振荡幅度随时间的变化。可以看出,随着液滴体积逐渐增大,达到最大润湿半径所需的时间(振幅的峰值)从 5 ms 增加到 8 ms ,同时,振荡稳定所需的时间也相应增加。此外,当液滴体积从 $2 \mu\text{L}$ 增加到 $6 \mu\text{L}$ 时,液滴接触半径的最大振幅从 0.16 mm 增加到 0.23 mm 。液滴尺寸越大,振荡幅度越大,振荡过程越强烈。体积越小,液滴达到最大润湿半径所需的时间越短,达到稳定所需的时间越短。

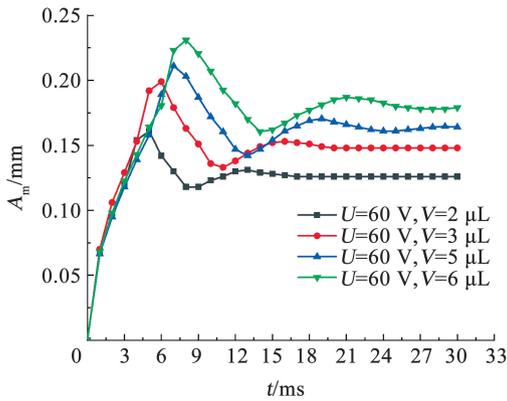


图 6 液滴扩散振幅随时间的变化

Fig. 6 Amplitude of droplet diffusion oscillations as a function of time

液滴体积越大,液滴接触角变化相同时,在电场的影响下液滴扩散半径也就越大,向外扩散时所能携带的动能越多,在相同壁面阻力下,液滴接触线附近的速度降低到 0 所需的时间越长,耗散动能所需的时间也将更长,因此,液滴振荡的时间也就越长。

2.2.2 壁面润湿性对直流电润湿效应的影响

图 7 为不同疏水表面液滴振荡幅度随时间的变化。壁面的疏水性由初始接触角的大小表示。壁面疏水分 4 步从 100° 增加到 115° 。如图 7 所示,当初始角为 100° 、 105° 、 110° 、 115° 时,液滴的最终振幅分别为 0.13、0.14、0.17、0.18 mm。随着表面疏水性的增加,液滴的振幅逐渐增大,并最终稳定。此外,壁面越亲水,液滴振幅在更短的时间内稳定,即扩散过程在较短的时间内稳定。相反,壁面疏水性越强,液滴振荡过程越难达到稳定。

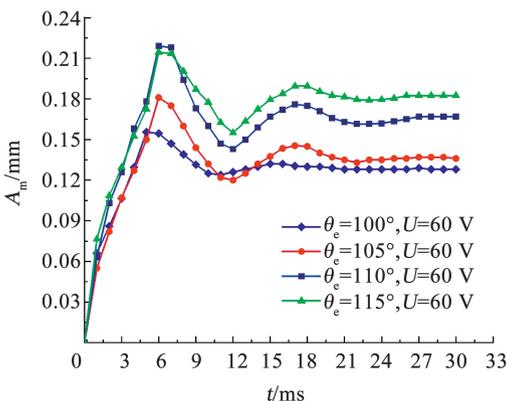


图 7 壁面润湿性对液滴扩散振荡幅度的影响

Fig. 7 Effect of wall wettability on the amplitude of droplet diffusion oscillation

壁面疏水性越强,即初始接触角越大,在相同电压刺激下接触角变化越大,因此,液滴形态变化明显,表面张力变化更大。可知疏水性更强的表面上,液滴受到刺激后所携带的动能越大,在同样的壁面阻力下,液滴拥有的动能减小至 0 所需要的时间更

长,因此,液滴较初始时刻前进距离更长,液滴振幅越大,振荡时间更长。

2.2.3 壁面阻力对直流电润湿效应的影响

图 8 为不同壁面阻力时液滴润湿半径随时间的变化。程友良等^[25]的研究表明,滑移长度越大,壁面对流体的阻碍作用越小。因此,采用滑移长度间接研究壁面阻力对电润湿效应的的具体影响。当滑移长度 $\beta = 2$ 、 1 、 0.5 和 $0.25 \mu\text{m}$ 时,壁面阻力依次减小。从图 8 可知,滑移长度从 $0.5 \mu\text{m}$ 增加到 $2 \mu\text{m}$ 时,振幅最大值分别为 0.21、0.24、0.25、0.26 mm。滑移长度越小,即阻力越大,液滴振幅随时间的变化越小,振荡越容易稳定。在相同的电压刺激下,壁面阻力越小,液滴接触线上的速度减小至 0 需要的时间更长。因此,同一时刻,阻力小的壁面液滴动能较大,振荡时间越长,振荡过程也更加激烈。

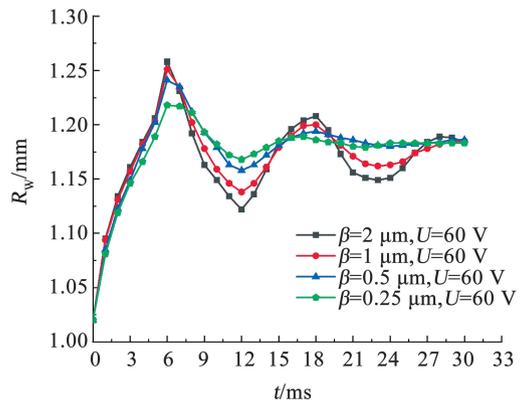


图 8 壁面阻力对液滴润湿半径的影响

Fig. 8 Effect of wall resistance on droplet wetting radius

3 结 论

1) 通过研究电润湿效应下液滴瞬态变化发现,在电场的刺激下,静止液滴接触线附近的速度开始快速增大,动能也急剧增加,液滴润湿半径从 $t = 1 \text{ ms}$ 时的 1.10 mm 迅速增加到 $t = 7 \text{ ms}$ 时的 1.29 mm。最后,当液滴所持动能趋于 0 时,速度降到最低,润湿半径的大小不再改变。

2) 电润湿过程中,液滴体积从 $2 \mu\text{L}$ 增加到 $6 \mu\text{L}$ 时,液滴接触半径的最大振幅从 0.16 mm 增加到 0.23 mm。可见液滴体积越大,液滴动能越大,液滴的类阻尼振荡运动将更加剧烈,需要更长时间才能稳定。此外,随着体积的增加,液滴扩散过程的振幅也将增大。

3) 壁面润湿性变化时,初始角为 100° 时液滴的最终振幅为 0.13 mm,初始角为 115° 时液滴的最终振幅为 0.18 mm。液滴的初始角越大,液滴振荡过程越强烈,振幅越大。此外,在相同电场刺激下,壁面亲水性越强,液滴携带的动能越小,静态接触角变

化越小。

4)在相同条件下,滑移长度从 $0.5 \mu\text{m}$ 增加到 $2 \mu\text{m}$ 时,振幅最大值从 0.21 mm 增大到 0.26 mm 。壁面阻力越大,润湿半径振荡的时间越小,振荡越容易稳定。稳定后,液滴振荡半径也随着壁面阻力的增大而减小。

参考文献

- [1] 蒋冬冬. 交流电润湿作用下液滴振荡及蒸发特性的实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013
JIANG Dongdong. Experimental study of droplet oscillation and evaporation characteristics under AC electrowetting [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013
- [2] COX R G. The dynamics of the spreading of liquids on a solid-surface [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 168: 169. DOI: 10.1017/s0022112086000332
- [3] COX R G. Inertial and viscous effects on dynamic contact angles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 357: 249. DOI: 10.1017/s0022112097008112
- [4] BLAKE T D, HAYNES J M. Kinetics of liquid/liquid displacement [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1969, 30(3): 421. DOI: 10.1201/9781482277500-12
- [5] BLAKE T D. The physics of moving wetting lines [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 299: 1. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.03.051
- [6] WANG K L, JONES T B. Electrowetting dynamics of microfluidic actuation [J]. *Langmuir*, 2005, 21(9): 4211
- [7] KESHAVARZ Z M, KADEM L, DOLATABATI A. Effects of dynamic contact angle on numerical modeling of electrowetting in parallel plate microchannels [J]. *Microfluid and Nanofluids*, 2010, 8(1): 47. DOI: 10.1007/s10404-009-0460-3
- [8] ANNAPRAGADA S R, DASH S, GARIELLA S V, et al. Dynamics of droplet motion under electrowetting actuation [J]. *Langmuir*, 2011, 27(13): 8198. DOI: 10.1021/la201322b
- [9] YI L, SUR A, PASCENTE C, et al. Dynamics of droplet motion induced by electrowetting [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 106: 920. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.040
- [10] KANG K H. How electrostatic fields change contact angle in electrowetting [J]. *Langmuir*, 2002, 18(26): 10318
- [11] ZHANG Yafeng, WANG Yongning, TANG Cheng, et al. Reducing the droplet/solid interfacial sliding resistance under electrowetting-on-dielectric by different voltage slew rate signals [J]. *Colloids and Surfaces A Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2020, 602: 125075. DOI: 10.1016/j.colsurf.a.2020.125075
- [12] ZHANG Yafeng, WANG Yongning, TANG Cheng, et al. Solid/liquid interfacial friction and slip behaviors on roughness surface under applied voltage [J]. *Tribology International*, 2020, 106: 128. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106128
- [13] ZHANG Yafeng, WANG Yongning, WU Xiaolan, et al. Combined effects of pinning and adhesion force on solid/liquid interfacial friction behaviors under applied voltage [J]. *Tribology International*, 2019, 134: 102. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.01.039
- [14] HE Xin, WANG Yifeng, ZHANG Benxi, et al. Effects of nanodroplet sizes on wettability, electrowetting transition, and spontaneous dewetting transition on nanopillar-arrayed surfaces [J]. *Langmuir*, 2021, 37(50): 14571. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c01807
- [15] WANG Qinggong, LI Long, GU Junping, et al. Manipulation of a nonconductive droplet in an aqueous fluid with AC electric fields: droplet dewetting, oscillation, and detachment [J]. *Langmuir*, 2021, 37(41): 12098. DOI: 10.1021/ACS.LANGMUIR.1C01934
- [16] PATHAK S, MONOJIT C, SUNANDO D. Molecular investigation of the actuation of electrowetted nanodroplets [J]. *Langmuir*, 2022, 38(12): 3656. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c03037
- [17] AHMAD I, PATHAK M, KHAN M K. Transient evolution of electrowetting induced oscillating droplets on hydrophobic substrates [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 353: 118. DOI: 10.1016/J.MOLLIQ.2022.118704
- [18] ZHANG Jinrui, ZHANG Kai, WANG Weizong, et al. Permeation by electrowetting actuation: revealing the prospect of a micro-valve based on ionic liquid [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 608: 114. DOI: 10.1016/J.JCIS.2021.09.119
- [19] 洪芳军, 郑平. 介质上电润湿液滴动力学特性的数值模拟研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(7): 1205
HONG Fangjun, ZHENG Ping. Numerical study on droplet hydrodynamics in electrowetting on dielectric [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(7): 1205
- [20] 田磊. 基于水平集方法液滴振荡的数值模拟 [D]. 成都: 西华大学, 2015
TIAN Lei. Numerical simulation of oscillation of drops using level set method [D]. Chengdu: University of South China, 2015
- [21] LI Xiaoliang, HE Guowei, ZHANG Xing. Numerical simulation of drop oscillation in AC electrowetting [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, 56(2): 383. DOI: 10.1007/s11433-012-4986-0
- [22] RAMAN K A, JAIRAM R K, LEE T S, et al. A numerical study on electrowetting induced jumping and transport of droplet [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 99: 805. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.038
- [23] KISTLER S F. *Hydrodynamics of wetting* [M]. New York: Marcel Dekker, 1993
- [24] OH J M, KO S H, KANG S H. Analysis of electrowetting-driven spreading of a drop in air [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(3): 032002. DOI: 10.1063/1.3360331
- [25] 程友良, 蒋衍, 薛占璞. 滑移长度对液体泊肃叶微流动特性的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(12): 7
CHENG Youliang, JIANG Yan, XUE Zhanpu. Effects of slip length on the characteristics of poiseuille microflow of liquid [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(12): 7