

◇ 研究报告 ◇

基于兰姆波在倾斜镜子基板上的油水微分离实验*

关 昭 梁 威†

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海 201620)

摘要 该文提出利用兰姆波在倾斜的镜子基板上推动油水混合液滴,实现油水的微分离。实验主要研究了油水混合液滴在分离过程中的运动位移特性关系。运用 Navier-Stokes、声流力等方程进行理论分析,发现混合液滴在分离过程中水滴所受到的驱动力大于油滴。通过对实验多变量的控制、单一变量的研究、建立油水混合液滴在倾斜镜子基板上受力平衡方程,发现激发电压、油水混合比例、基板倾角三个因素对油水微分离位移实验有着重要的影响。结果表明:当基板倾角和油水混合比例一定时,油水分离位移随着激发电压的增大而减小;在激发电压和基板倾角不变时,油水分离位移随着油水混合比例的减小而减小;当激发电压和油水混合比例不变时,油水分离位移随着基板倾角的增大而减小。该油水分离方法可以被应用到其他非压电基板上,为获得其他两种不相溶混合液滴的分离提供技术支持。

关键词 油水分离, 兰姆波, 分离位移, 镜子基板

中图法分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)02-0208-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.02.009

Experimental investigation on separation of oil from a microliter oil/water mixed drop using Lamb waves on an inclined mirror substrate

GUAN Zhao LIANG Wei

(Mechanical and Automotive Engineering College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract In this paper, Lamb wave has been applied to separate oil from a microliter oil/water mixed droplets on an inclined mirror substrate. The experiment mainly investigated the separation displacement characteristics of oil/water mixed droplet in the separation process. Using the equations of Navier-Stokes and acoustic streaming force, the theoretical analysis and explanation of results show that the driving force of the water droplet in the separation process is greater than the oil droplet. According to the control of experimental multivariables, the study of single variables, establishing the balance equation with the force of oil/water mixed droplet on the inclined mirror substrate, three main factors are demonstrated which influence the separation displacement, i.e., the excitation voltage, the plate inclination, and the oil/water volume ratio. It is found that under a certain oil/water volume ratio and a certain inclination of substrate, the separation displacement decreases with the increase in the input power. Under a certain excitation voltage and a certain inclination angle, the smaller the oil/water volume ratio, the shorter the separation displacement. When the oil/water volume ratio and the excitation voltage are fixed, the larger the inclination angle, the faster the separation. This method can be applied to other non-piezoelectric substrates to separate other two immiscible mixed droplets by the technical support.

Key words Oil/water separation, Lamb wave, Separation displacement, Mirror substrate

2018-06-15 收稿; 2018-10-15 定稿

*国家自然科学基金项目 (51505274), 上海市“晨光计划”项目 (15CG58), 上海市青年东方学者基金项目 (QD2015036)

作者简介: 关昭 (1990-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向: 表面声波激励器应用。

† 通讯作者 E-mail: Wei_Liang222@126.com

0 引言

随着现代工业技术的迅速发展和经济水平的不断提高,工业含油污水肆意排放、化学污染严重、石油大量泄漏、资源短缺等诸多问题的产生,使得油水分离方法得到了相应的重视和研究^[1-3]。根据油水两种液体本身固有的物理、化学性质,相关学者已经顺利开展了探究油水分离方法的相关研究,成功地发现了一些油水分离方法,并得到了具体的发展和应用。例如:物理法、物理化学法、化学破乳法、生物化学法和电化学法等^[4-6]。而传统、应用领域较为广泛的油水分离方法则是物理方法。其中较为简单的油水分离方法,则是将油水混合物加热至合适的温度,由于油的沸点相对较高,水在该温度下形成水蒸气,这样就容易地实现了油水分离。根据油水这两种液体的密度不同,当混合物被放置在容器中时,产生重力差异,使密度较大的水在重力的作用下发生沉降,从而将水从油中分离出来。此外,依靠油水这两种不相溶混合液体的疏液性,各种各样的网状结构得到广泛的推广和应用,如碳纳米管网络^[7]、纳米复合材料^[8]以及Cu(OH)₂纳米线^[9]等。

然而,传统的油水分离方法通常被应用于分离大量的油水混合物。此外,这些油水分离方法对于油水混合物的微分离而言,则表现为分离效率低、仪器设备庞大复杂、运行成本相对较高等问题。因此,一些研究人员试图寻找一种廉价、高效、易于应用到常规设备的油水分离方法。其中,Luo等^[10]利用两个非平行的基板,通过挤压油水混合液滴实现有效的分离。但是,实验所需要的基板涂层必须要满足关键的技术要求。Zhang等^[11]应用双功能膜结构,有效地实现油水分离,但制备膜的过程则需要复杂的化学反应。近几十年来,随着复合材料表面改性技术的快速发展,各种纳米材料和纳米技术被广泛应用到超润湿表面领域,实现对油水混合物的分离,如超疏水、超亲油以及水下超疏油材料^[12-15]等。然而,这些超润湿过滤膜的大网孔由于其尺寸的限制,则不能被应用于各种乳液的分离。

近年来,表面声波(Surface acoustic wave, SAW)技术,已被成功地应用于驱动和操纵微流体流动,如瑞利波^[16-18]和兰姆波^[19-21]。同时,表面声波凭借本身固有的技术特性,在微流体领域中得到了广泛的关注和推广,如声学微反应器^[22]、

微型分离器^[23]、微型泵^[24]等。然而,这些技术通常被应用于微流体系统的分离^[25]和图案化^[26],而对于乳液分离则关注较少。Schmitt等^[19]和Liang等^[20]学者,利用表面声波技术在非压电基板上实现对液滴运动机理的研究。如果应用表面声波技术去驱动两种不相溶的混合液滴,显而易见该混合液滴可被推进,但可否实现混合物分离呢?

基于一些研究学者利用超声波技术实现对液滴的推进和乳液分离探究的基础上,应用兰姆波装置有望将油滴从油水混合液滴中分离出来。本实验中,利用压电陶瓷的逆压电效应,在倾斜的镜子基板上激发兰姆波以产生声流力,驱动并推进油水混合液滴,最终将油滴从混合液滴中分离出来。实验中,使用橄榄油和水作为两种不相溶的代表性液体,进行实验现象、效果的探究和说明。通过相关实验,分析得出了影响油水分离位移(油水混合液滴由起始位置到达临界分离位置所走过的位移)相关因素之间的关系。

1 理论分析

基于动量守恒原理,油水混合液滴在分离过程中的流动通常是不可压缩的定常流动,满足二维时间依赖的Navier-Stokes方程^[27-29]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_G + \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right], \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

其中: ρ 为液滴的密度, kg/m³; $\mathbf{u}$ 为声流的速度, m/s; p 为压力, Pa; $\mathbf{I}$ 为单位对角矩阵; μ 为液滴的黏度, Pa·s; $\mathbf{F}_S$ 为声流力, N/m³; $\mathbf{F}_G$ 液滴重力, N/m³; ∇ 为梯度。

在此项研究中,油水混合液滴在倾斜的镜子基板上实现油水微分离的过程中,油水分离位移长短主要受到三个力的控制,即液滴所受的声流力 $\mathbf{F}_S$,混合液滴的自身的重力 mg ,以及阻碍油水混合液滴沿基板表面下滑的阻力 $\mathbf{F}_r$ 。在倾斜的镜子基板上,兰姆波驱动油水混合液滴运动模型如图1所示。

为了进一步分析油水混合液滴在分离过程中,水滴和油滴所受到声流力的大小,基于Nyborg的声流理论^[30]以及Shiokawa等^[31]的推导,声流力

沿 x 轴、 z 轴方向的体积力分力方程如下所示:

$$F_{Sx} = -\rho(1 + \alpha_1^2) A^2 \omega^2 k_{\text{imag}} \times \exp 2(k_{\text{imag}} x + \alpha_1 k_{\text{imag}} z), \quad (3)$$

$$F_{Sz} = -\rho(1 + \alpha_1^2) A^2 \omega^2 k_{\text{imag}} \times \alpha_1 \exp 2(k_{\text{imag}} x + \alpha_1 k_{\text{imag}} z). \quad (4)$$

而声流力 F_S 则可以根据公式 $F_S = \sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sz}^2}$ [31] 推导而获得:

$$F_S = -\rho(1 + \alpha_1^2)^{3/2} A^2 \omega^2 k_{\text{imag}} \times \exp 2(k_{\text{imag}} x + \alpha_1 k_{\text{imag}} z), \quad (5)$$

其中: ω 为角频率; A 为兰姆波的幅度; k_{imag} 为兰姆波在液体介质内的能量耗散系数。 $\alpha_1 = -j\alpha$, α 为衰减常数, 满足 $\alpha^2 = 1 - (v_s/v_f)^2$, v_s 为兰姆波速度, v_f 为液体中的声速。兰姆波在镜子、橄榄油、水中的声速分别为 $v_s = 2400$ m/s、 $v_{f-\text{Oil}} = 1445$ m/s、 $v_{f-\text{Water}} = 1480$ m/s。因此, 兰姆波在油水中的相关衰减常数可以通过计算获得: $\alpha_{1-\text{Oil}} = -j\sqrt{1 - (v_s/v_{f-\text{Water}})^2} = 1.326$ 、 $\alpha_{1-\text{Water}} = -j\sqrt{1 - (v_s/v_{f-\text{Water}})^2} = 1.277$ 。

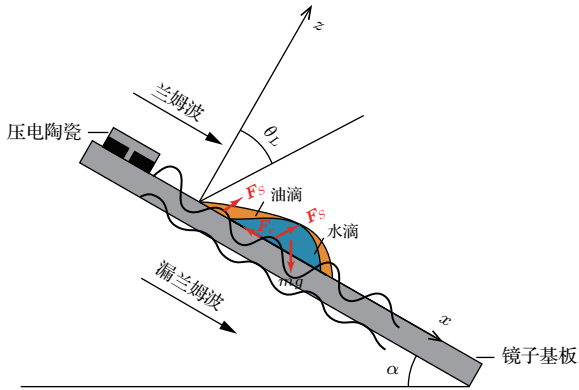


图1 油水混合液滴沿倾斜的镜子基板运动模型

Fig. 1 The movement model of oil/water mixed drop along the inclined mirror substrate

方程(5)所得到的声流力 F_S 为兰姆波与基板之间相互作用区域附近的体积力, 其方向与漏兰姆波在辐射处具有相同的角度。同时, 兰姆波在传播过程中, 声辐射将沿着兰姆角 θ_L 的方向发生衍射, 并作用在液滴内部。

根据公式 $\theta_L = \sin^{-1}(v_f/v_s)$ 则可以确定水滴和油滴在分离过程中相应兰姆角 $\theta_{L-\text{Water}}$ 、 $\theta_{L-\text{Oil}}$ 的数值大小, 通过相应计算得 $\theta_{L-\text{Water}} = \sin^{-1}(v_{f-\text{Water}}/v_s) \approx 42^\circ$ 、 $\theta_{L-\text{Oil}} =$

$\sin^{-1}(v_{f-\text{Oil}}/v_s) \approx 41^\circ$ 。比较水滴和油滴的兰姆角计算结果, 得出相应的结论, 即 $\theta_{L-\text{Water}} > \theta_{L-\text{Oil}}$ 。经过对结论的分析, 得出在油水分离的过程中, 声流力作用在水滴的方向比油滴稍微更靠前一些, 如图1中的声流力 F_S 所标识的方向。

水的密度为 10^3 kg/m³, 橄榄油的密度为 918 kg/m³。此时, 假设兰姆波在水滴和油滴入口处具有相同的幅度和角频率, 通过计算, 分别获得了漏兰姆波在镜子基板上水和油的相应数量, 为 95 m^{-1} 和 70 m^{-1} 。因此, 将已知量带入公式(5)中, 计算出混合液滴在分离过程中, 油和水所受的声流力 $F_{S-\text{Oil}}$ 、 $F_{S-\text{Water}}$ 如下所示:

$$F_{S-\text{Oil}} = -2.9 \times 10^5 A^2 \omega^2 \exp 2(70x + 92.8z), \quad (6)$$

$$F_{S-\text{Water}} = -4.1 \times 10^5 A^2 \omega^2 \exp 2(95x + 121.6z). \quad (7)$$

式(6)和式(7)中的函数 $\exp 2(\)$, 是以 e 为底以2乘以括号内为指数系数的指数方程, 且为增函数。很显然, 在第一象限中的任意一点 (x, z) , 都存在不等式: $\exp 2(95x + 121.6z) > \exp 2(70x + 92.8z)$ 。因此, 得到油滴和水滴所受声流力的关系为 $|F_{S-\text{Water}}| > |F_{S-\text{Oil}}|$ 。

何存富等[32]利用激光测振仪对兰姆波的离面位移和面内位移进行了相关测试, 得出在不同的测量间距下, 频响曲线只是一个平移, 因此在弹性材料中, 离面和面内位移随测量距离增加而呈现的衰减与频率无关, 即在所有的频率上, 它们呈现出完全一致的衰减特性。同时, 当兰姆波处于 S_0 模态时, 面内位移占绝对主导, 而处在 A_0 模态时, 离面位移占绝对主导。

本实验中兰姆波只激发了 A_0 模态, 因此, 离面位移占绝对主导作用, 对油水分离实验有着相应的影响, 通过利用激光多普勒振动测量系统 (Polytec OFV-5000), 估算了激发电压与离面位移的线性关系, 如图2所示。从图中可以看出离面位移随着激发电压的增大而增大, 促进油水分离。

对于液滴在倾斜基板表面上的前进、后退接触角, 可以通过测量和应用进行评估, 在油水分离过程中, 油水混合液滴的接触角滞后 (CAH) 的阻力 F_r 为[33]

$$F_r = k\gamma R (\cos \theta_r - \cos \theta_a), \quad (8)$$

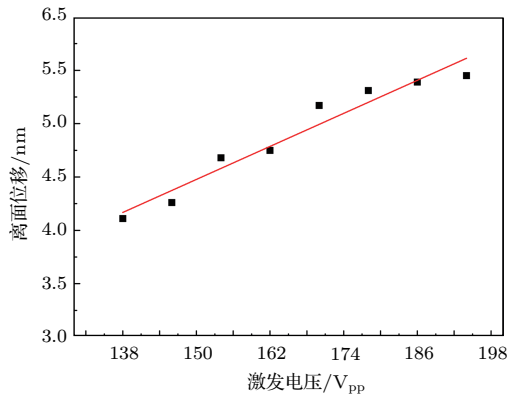


图2 激发电压与离面位移线性关系

Fig. 2 The relationship of excitation voltage and offset displacement

式(8)中: k 为一个与液滴形状有关的数值常数, 通常由实验确定; γ 为液体的表面张力; R 为液滴的半径; θ_r 和 θ_a 分别表示液滴的前进接触角和后退接触角。

20 °C 时, 水的黏度为 1 mPa·s, 橄榄油的黏度为 1.499 Pa·s。由于水和橄榄油的黏度差别很大, 水滴和油滴在分离过程中, 在基板表面所受的阻力 F_r 是不同的。因为高黏度液滴在运动过程中, 存在一个很大的力来阻止液滴的运动^[4]。因此, 可以得出油水混合液滴在分离过程中, 油滴的阻力大于水滴的阻力, 即 $F_{r-Oil} > F_{r-Water}$ 。为了直观地反映影响油水混合液滴分离位移的相关关系, 此处将声流力沿 x 、 z 轴方向进行分解, 在油水分离的过程中, 油水混合液滴所受力的平衡方程可被推导为

$$mg \sin \alpha + F_{Sx} - F_r = ma_x, \quad (9)$$

$$F_{Sz} - mg \cos \alpha = ma_z, \quad (10)$$

其中: α 为基板倾角, a_x 、 a_z 为液滴获得的加速度。根据平衡方程可以清晰地看出影响油水分离位移相关因素之间的关系, 在之后的章节会针对相关影响因素逐一深入探讨。

综上所述, 显然, 水滴在分离过程中将获得比油滴更大的驱动力, 水滴运动更快, 而油滴则落在水滴之后, 与实验现象一致, 实现油水的微分离。

2 实验要求

2.1 实验装置

实验研究基于兰姆波装置平台开展的。该实验装置平台包括直流稳压电源、函数信号发生器、示

波器、微量移液器、压电陶瓷、自制的放大器电路单元、液体容器、单反相机系统、1 mm 厚的镜子基板等。

直流稳压电源所能提供的电压范围为 0~30 V。函数信号发生器产生 1 MHz 频率的连续方形电信号施加到压电陶瓷的两端, 激发产生兰姆波。此外, 激发电压峰值幅度在示波器图像区域可以被检测并显示。微量移液器的量程分别为 0.5~10 μ l 和 10~100 μ l。单反相机 (EOS 5D Mark III), 配备镜头型号为 (24-70F4L)。通过使用摄像机来记录油水分离的全过程, 进行数据采集。当油滴从混合液滴中分离出来时, 水滴将由基板下方所放置的液体容器收集起来。利用环氧树脂胶将压电陶瓷粘贴在镜子基板上。

2.2 实验方法

将镜子基板固定为实验所需要的角度。然后, 在基板表面涂抹一层疏水性涂层, 以保证液滴的接触角达到 90°。利用微量移液器, 按比例滴入油滴和水滴, 形成不同体积比的油水混合液滴。图 3(a)、图 3(b) 分别为滴在基板表面, 所形成的水滴和油滴。

对于制备油水混合液滴, 已经成功探究了三种方法。这些方法的不同之处在于油滴和水滴被放置在基板表面上的位置或顺序。第一种方法, 将水滴直接滴在基板表面的油滴上, 形成的油水混合液滴如图 3(c) 所示。第二种方法, 将油滴和水滴并排滴在基板表面如图 3(d) 所示。而第三种方法是将油滴直接滴在水滴的顶部, 如图 3(e) 所示。观察实验现象, 我们发现第一种方法与第三种方法在形成油水混合液滴的结果上是相似的。这表明, 油水混合物的结构不依赖于形成油水混合液滴的方法。本实验, 将采用第一种方法形成油水混合液滴。其中蓝色虚线为油水混合液滴中水滴的轮廓。

2.3 实验程序

图 4 展示了油滴从油水混合液滴中被分离出来的全过程, 实验是在 20 °C 的室温下完成的。首先, 将涂好疏水层的镜子基板固定在试验台架上, 利用上述第一种方法, 将形成的油水混合液滴放置在基板表面, 如图 4(a) 所示。当开启兰姆波发生器装置, 激发电压被施加在压电陶瓷的两端, 通过压电陶瓷的逆压电效应, 激发兰姆波, 产生声流力。由于本实验所激发的兰姆波是 A0 模态, 所以在基板表面形成

离面位移场。因此,在声流力和离面位移的作用下,液滴沿基板表面发生蠕动现象,再加上液滴受到本

身重力所产生相应的下滑力的作用,最终促使油水混合液滴沿着基板表面被向前推进,如图4(b)所示。

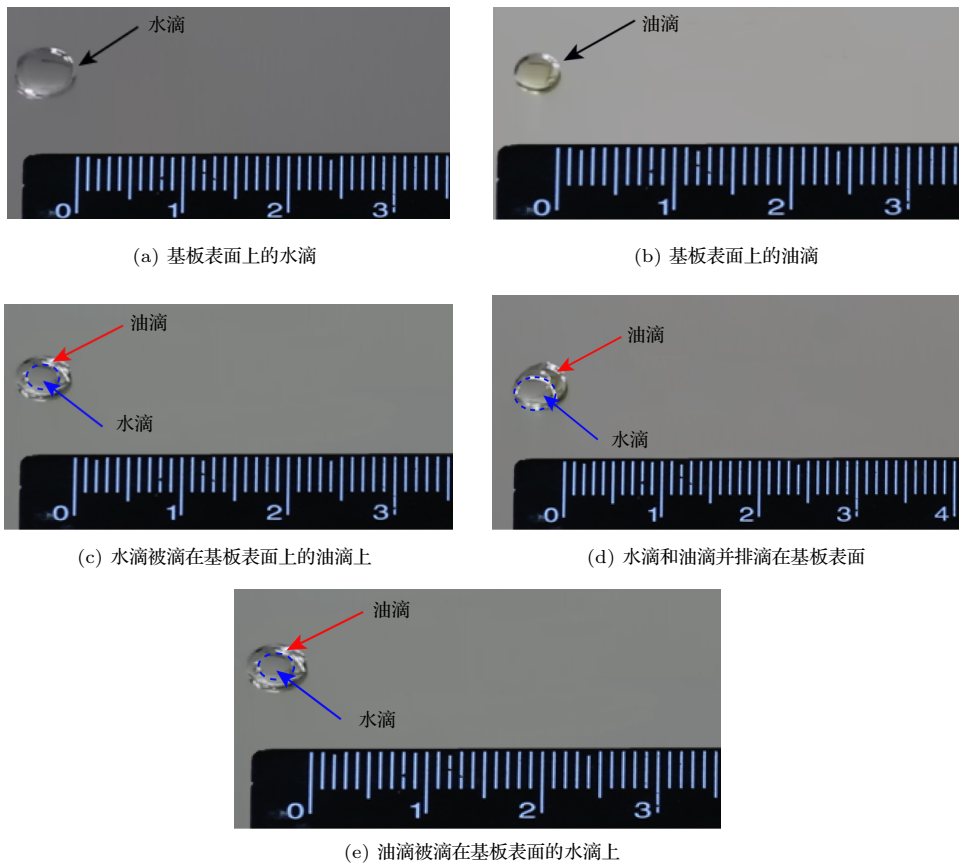


图3 油水混合液滴的形成

Fig. 3 The formation of oil/water mixed drop

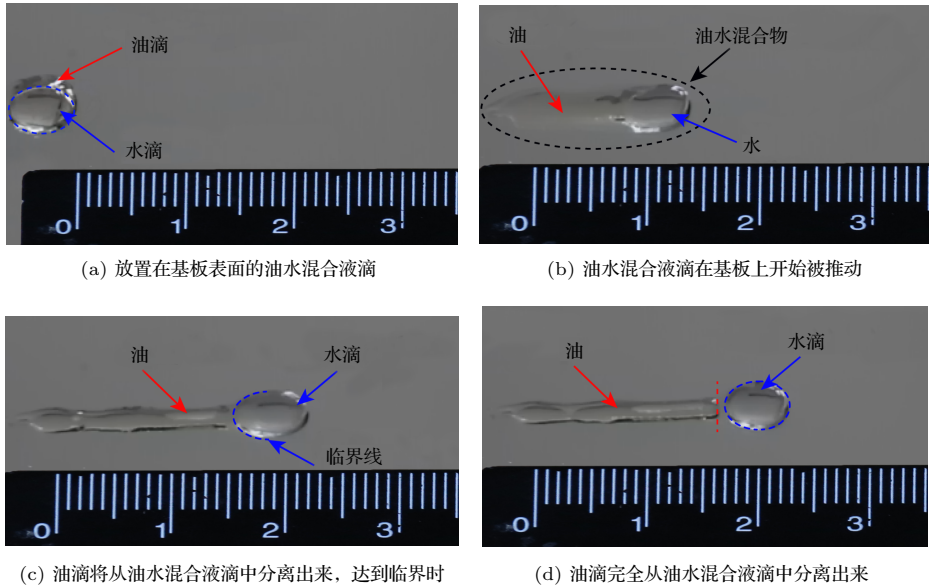


图4 油水混合液滴分离的过程

Fig. 4 The process of the oil/water mixed drop separation

由于兰姆波在镜子基板表面会发生衰减现象, 这样混合液滴在分离过程中所受到的声流力也会随之相应减小, 因此混合液滴在基板表面将做变加速运动。而由于油滴的黏度大于水滴的黏度, 因此在分离过程中, 油滴所受到的阻力将大于水滴, 而水滴所获得的驱动力将大于油滴。随着时间的推移, 液滴的运动速度将不断增加, 最终运动到油滴和水滴将要实现分离的临界分离位移位置, 如图4(c)所示。最终, 实现将油滴从油水混合液滴中完全分离出来, 如图4(d)所示。蓝色虚线圈出的为分离后的水滴, 红色虚线的位置为油滴和水滴的临界分离位移位置, 左侧为分离后的油滴。

3 实验结果与讨论

通过测量将10 μl 的橄榄油和10 μl 、20 μl 和30 μl 的水滴依次混合, 形成油水混合比例分别为1:1、1:2、1:3的混合液滴。在此次实验操作中, 基板的倾斜角度被放置为10°、15°、20°, 并将激发电压从138 V_{pp} 增加至194 V_{pp} , 激发电压每增加8 V_{pp} 为一次测试实验, 且每次测试实验重复10次, 取平

均值进行比较。

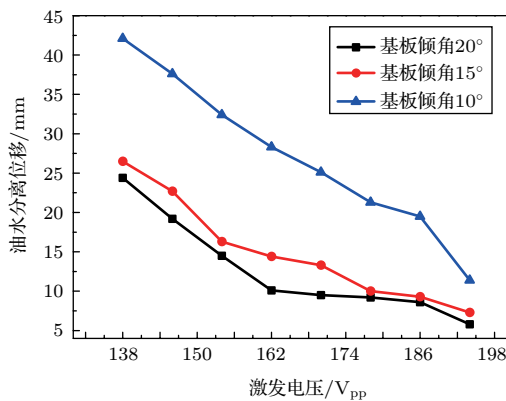
3.1 激发电压的影响

图5展示了在不同的基板倾角和油水混合比例的情况下, 激发电压对油水混合液滴分离位移的相关影响。通过观察图5(a)和图5(b), 从拟合的方程图像可以看出, 油水混合液滴分离位移与激发电压具有一定的关系, 即当油水混合比例与基板倾角保持不变时, 油水混合液滴的分离位移随着激发电压的增加而减小。牛顿运动定律的速度和位移公式如下所示:

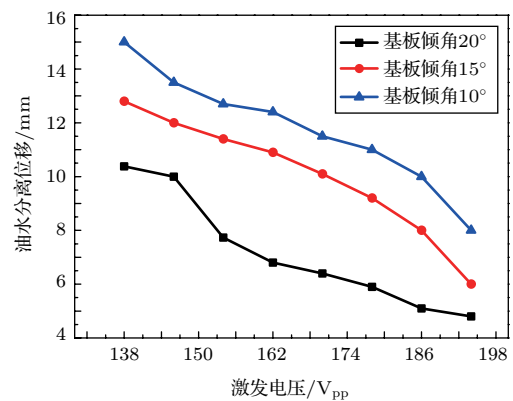
$$v = a_x t, \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{2} a_x t^2, \quad (12)$$

其中, v 为液滴到达临界分离时间的速度; S 为液滴到达临界分离时间所走过的分离位移。根据公式(11)和公式(12), 可以推导出 $v^2 = 2a_x S$ 。随着激发电压的不断增大, 即声流力 F_S 不断增大, 加速度 a_x 在增大, 液滴在镜子基板上达到临界分离时间的速度 v 在增大, 所以油水分离位移 S 在减小。



(a) 当油水混合液滴比例为1:2时, 且在不同倾角的基板上, 油水混合液滴分离位移与激发电压之间的关系



(b) 当油水混合液滴比例为1:3时, 且在不同倾角的基板上, 油水混合液滴分离位移与激发电压之间的关系

图5 油水混合液滴分离位移与激发电压的关系

Fig. 5 The relationship of separation displacement and excitation voltage

3.2 基板倾角的影响

图6为基板倾斜角对油水混合液滴分离位移的影响。比较图6(a)和图6(b), 无论油水混合液滴比例为1:1、1:2还是1:3, 当激发电压保持不变时, 通过分析图像数据, 可以得出相应的结论: 油水混

合液滴分离位移随着基板倾角的增大而变小。因为当激发电压和油水混合比例不变时, 改变基板倾角会使液滴的下滑力 $mg \sin \alpha$ 获得相应的增加, 在声流力和下滑力双重作用下, 因此加速度 a_x 在增大, 液滴在镜子基板上达到临界分离时间的速度 v 在增大, 所以油水分离位移 S 在减小。

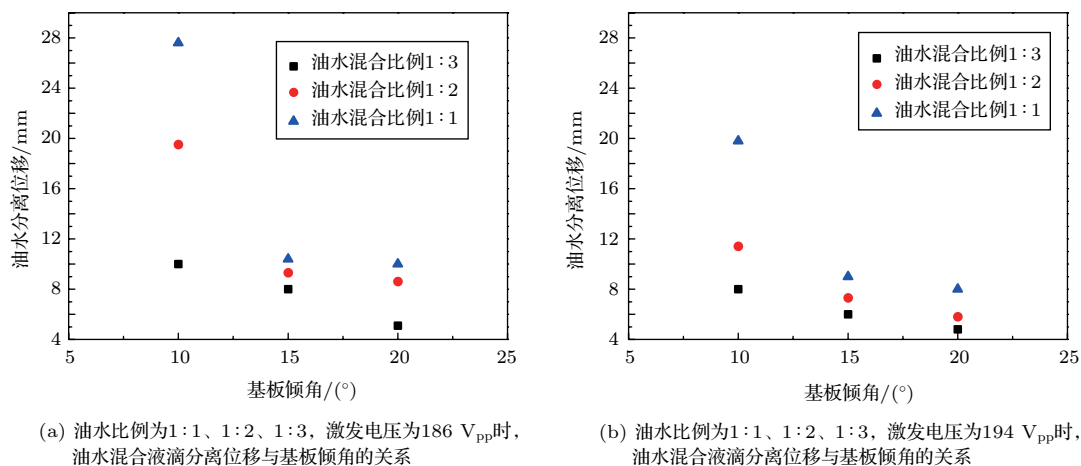


图6 基板倾角对油水混合液滴分离位移的影响

Fig. 6 The effect of substrate inclination on separation displacement of oil/water mixed drop

3.3 油水体积比的影响

图7展示了当基板倾角为15°、20°时, 油水混合液滴分离位移与油水混合比例(1:1、1:2、1:3)之间的关系。通过观察分析图7(a)与图7(b), 可以清晰地得出: 当激发电压不变时, 无论基板倾角为15°还是20°, 油水混合液滴体积比为1:3的油水混合液滴分离位移最短, 油水混合液滴体积比为1:1的油水混合液滴分离位移最长, 而油水混合液滴体

积比为1:2的油水混合液滴分离位移则位于两者中间。由此可知, 当激发电压与基板倾角一定时, 油水混合液滴体积比越小, 油水分离位移越短。当改变油水混合比例时, 由于体积改变导致混合液滴自身的重力 mg 增加, 即液滴的下滑力 $mg\sin\alpha$ 获得相应的增加, 在下滑力和声流力的双重作用下, 因此加速度 a_x 在增大, 液滴在镜子基板上达到临界分离时间的速度 v 在增大, 所以油水分离位移 S 在减小。

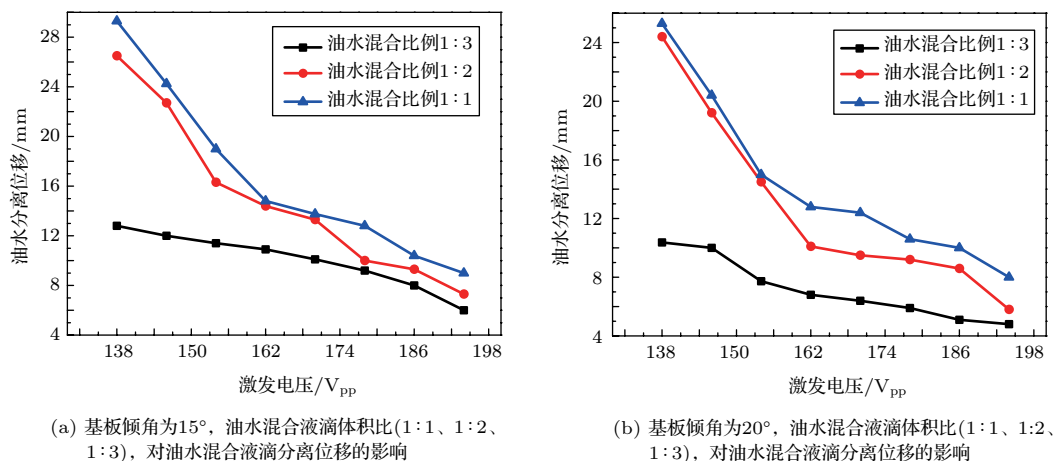


图7 油水混合液滴体积比对油水混合液滴分离位移的影响

Fig. 7 The effect of oil/water volume ratio on separation displacement of oil/water mixed drop

4 结论

本文利用兰姆波装置在倾斜的镜子基板上成功地实现了油水微分离。该方法简单、高效、易于安装。通过对实验数据的采集与分析, 发现激发电压、

基板倾角、油水体积比三个因素影响油水分离位移特性。根据受力平衡方程以及声流理论和牛顿定律的位移方程、速度方程, 分别得出了影响因素与油水分离位移相应的特性关系。

结果表明, 当基板倾角和油水混合比例一定时,

油水分离位移随着激发电压的增大而减小;在激发电压和基板倾角不变时,油水分离位移随着油水混合比例的减小而减小;当激发电压和油水混合比例不变时,油水分离位移随着基板倾角的增大而减小。通过比较图像可知,当油水混合液滴在较大的基板倾角、较大的激发电压以及较小的油水混合比例的情况下,油水分离位移减小。

所得出的理论关系为油水混合液滴分离提供了充分的条件。实验中,尽管只利用了橄榄油和水这两种不相溶合的代表性液体,探究了油水分离位移实验的特性,但是,利用兰姆波装置分离油水混合液滴的方法,可以被应用到其他非压电基板上,为实现分离其他两种不相溶混合液体提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] Nordvik A B, Simmons J L, Bitting K R, et al. Oil and water separation in marine oil spill clean-up operations[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1996, 3(3): 107-122.
- [2] Gossen L P, Velichkina L M. Environmental problems of the oil-and-gas industry (review)[J]. Petroleum Chemistry, 2006, 46(2): 67-72.
- [3] Shannon M, Bohn P, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades[J]. Nature, 2008, 452(7185): 301-310.
- [4] 张博, 王建华, 吴庆涛, 等. 现代油水分离技术与原理[J]. 过滤与分离, 2014, 24(2): 39-45.
Zhang Bo, Wang Jianhua, Wu Qingtao, et al. Review of modern oil-water separation technology and mechanism[J]. Journal of Filtration & Separation, 2014, 24(2): 39-45.
- [5] 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术[J]. 力学进展, 2015, 45: 179-216.
Wu Yingxiang, Xu Jingyu. Oil and water separation technology[J]. Advance in Mechanics, 2015, 45: 179-216.
- [6] 万楚筠, 黄凤洪, 廖李, 等. 重力油水分离技术研究进展[J]. 工业水处理, 2008, 28(7): 13-16.
Wan Chuyun, Huang Fenghong, Liao Li, et al. Research development in the gravity oil water separation technology[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(7): 13-16.
- [7] Shi Z, Zhang W, Zhang F, et al. Ultrafast separation of emulsified oil/water mixtures by ultrathin free-standing single-walled carbon nanotube network films[J]. Advanced Materials, 2013, 25(17): 2422-2427.
- [8] Huang X, Lim T T. Performance and mechanism of a hydrophobic-oleophilic kapok filter for oil/water separation[J]. Desalination, 2006, 190(1-3): 295-307.
- [9] Zhang F, Zhang W B, Shi Z, et al. Nanowire-haired inorganic membranes with superhydrophilicity and underwater ultralow adhesive superoleophobicity for high-efficiency oil/water separation[J]. Advanced Materials, 2013, 25(30): 4192-4198.
- [10] Luo C, Heng X. Separation of oil from a water/oil mixed drop using two nonparallel plates[J]. Langmuir, 2014, 30(33): 10002-10010.
- [11] Zhang Q D, Liu N, Cao Y Z, et al. A facile method to prepare dual-functional membrane for efficient oil removal and in situ reversible mercury ions adsorption from wastewater[J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 57-62.
- [12] He K, Duan H, Chen G, et al. Cleaning of oil fouling with water enabled by zwitterionic polyelectrolyte coatings: overcoming the imperative challenge of oil-water separation membranes[J]. ACS Nano, 2015, 9(9): 9188-9198.
- [13] Wen Q, Di J, Jiang L, et al. Zeolite-coated mesh film for efficient oil-water separation[J]. Chemical Science, 2013, 4(2): 591-595.
- [14] Liu M, Hou Y, Li J, et al. stable superwetting meshes for on-demand separation of immiscible oil/water mixtures and emulsions[J]. Langmuir, 2017, 33(15): 3702-3710.
- [15] Xiao Z, Zhang M, Fan W, et al. Highly efficient oil/water separation and trace organic contaminants removal based on superhydrophobic conjugated microporous polymer coated devices[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 640-646.
- [16] Chang C, Bostwick J, Steen P, et al. Substrate constraint modifies the Rayleigh spectrum of vibrating sessile drops Physical[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2013, 88(2): 02315.
- [17] Kang K, Lim H, Lee H, et al. Evaporation-induced saline Rayleigh convection inside a colloidal droplet[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(4): 1375-1391.
- [18] Agostini M, Greco G, Cecchini M. A Rayleigh surface acoustic wave (R-SAW) resonator biosensor based on positive and negative reflectors with sub-nanomolar limit of detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 254: 1-7.
- [19] Schmitt M, Stich S, Fromm S, et al. Detection and removal of droplets on non-piezoelectric substrates via mode conversion of Lamb waves[J]. British Journal for the Philosophy of Science, 2010, 143(2): 304-308.
- [20] Liang W, Tietze S, Schmitt M, et al. Droplet propulsion on non-piezoelectric substrates induced by Lamb waves[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1474: 392-395.
- [21] Liang W, Lindner G. Investigations of droplet movement excited by Lamb waves on a non-piezoelectric substrate[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(4): 044501.
- [22] Dong Z, Yao C, Zhang Y. Hydrodynamics and mass transfer of oscillating gas-liquid flow in ultrasonic microreactors[J]. AIChE Journal, 2016, 62(4): 1294-1307.
- [23] Watanabe S, Matsumoto S, Higurashi T. Almost complete separation of a fluid component from a mixture using burgers networks of microseparators[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2015, 84(4): 043401.
- [24] Khazaaleh S, Saeed N, Taha I, et al. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers and micropumps: from design to optomicrofluidic applications[J]. Society

- of Photo-optical Instrumentation Engineer, 2017, 10061: 100610S.
- [25] Yu N, Wang S, Liu H, et al. Integrated obstacle microstructures for gas-liquid separation and flow switching in microfluidic networks[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 256: 735–743.
- [26] Berry S, Zhang T, Day J, et al. Upgrading well plates using open microfluidic patterning[J]. Lab on a Chip, 2017, 17(24): 4253–4264.
- [27] Carin M. Deformation of free surface under pressure-2D model with surface tension, COMSOL Multiphysics Model gallery[M]. Lorient Cedex–France, 2009.
- [28] Alghane M, Chen B, Fu Y, et al. Experimental and numerical investigation of acoustic streaming excited by using a surface acoustic wave device on a 128° YX-LiNbO₃ substrate[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2012, 21(1): 015005.
- [29] Janardan N, Panchagnula M. Effect of the initial conditions on the onset of motion in sessile drops on tilted plates[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014, 456(1): 238–245.
- [30] Nyborg W L. Acoustic streaming due to attenuated plane waves[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(1): 68–75.
- [31] Shiokawa S, Matsui Y, Ueda T. Liquid streaming and droplet formation caused by leaky rayleigh waves[J]. Ultrasonics Symposium, 1989, 89: 643–646.
- [32] 何存富, 郑阳, 周进节, 等. 基于激光测振仪的兰姆波离面和面内位移检测[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 6–11.
He Cunfu, Zheng Yang, Zhou Jinjie, et al. In-plane and out-of-plane displacement of Lamb waves test with laser vibrometer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 6–11.
- [33] Laliaa B, Janajrehb I, Hashaikaha R. A facile approach to fabricate superhydrophobic membranes with low contact angle hysteresis[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 539: 144–151.