低表面张力液滴类超疏悬浮状态实验

刘鑫源^{1,2}, 贾力^{1,2*}, 徐金柱^{1,2}, 党超^{1,2}, 丁艺^{1,2}

1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院热能工程研究所, 北京 100044;

2. 微细尺度流动与相变传热北京市重点实验室, 北京 100044

* 联系人, E-mail: ljia@bjtu.edu.cn

2021-06-13 收稿, 2021-08-31 修回, 2021-09-01 接受, 2021-09-03 网络版发表

国家自然科学基金(52036001)资助

摘要 低表面能工质被广泛应用于各种工业和先进技术领域, 如制冷剂喷雾冷却和微流控系统等, 其润湿性和动力学行为的有效调控对提高分析过程的效率具有非常重要的作用. 本文利用表面规则微孔的气流作用, 调控低表面张力液滴的润湿行为, 形成类超疏悬浮状态, 并对该现象中液滴运动行为及润湿性变化规律开展研究. 类超疏悬浮状态中, 液滴的运动行为演变可以分为悬停、振荡、弹跳、脱离4个阶段, 本文探究了弹跳阶段液滴重力势能与表面能之间的转换关系. 类比Young's方程, 提出了类超疏悬浮状态中的类接触角概念, 用于研究液滴不同阶段的润湿行为变化规律, 分析了在惯性力和表面张力影响下液滴类接触角与韦伯数的关系.

关键词 低表面张力液滴, 类超疏悬浮状态, 动力学行为, 润湿性

低表面能工质被广泛应用于工业领域和高新技术中, 如航天工程领域中利用制冷剂喷雾技术冷却高温表面^[1]、微流控系统中液滴无损快速定向输运^[2]、喷墨打印技术中调控活性染料液滴表面张力控制液滴形成^[3]等. 有效调控低表面能工质液滴的润湿特性与动力学行为, 对拓宽低表面能工质的应用范围与提高各种应用过程中的利用效率具有十分重要的意义.

改变固体表面微纳结构特征与添加表面涂层是调控固液界面作用的常规手段. 近些年, 研究者通过设计特殊的功能性结构表面, 使部分低表面张力液滴在固体表面呈现疏液状态. Liu和Kim^[4]在硅表面构建了双层凹角微纳结构, 提高了低表面能工质液滴的表现接触角. Wong等人^[5]受自然界中猪笼草表面液滴超疏液行为的启发, 构建了润滑剂浸润的多孔结构表面, 实现了多数工质的超疏液性能. Kota等人^[6]设计了丝网状微纳复合结构的超疏油表面, 实现了正庚烷($\sigma = 20.1$

mN/m)高运动性能的疏液形态. 但上述微纳结构表面加工流程复杂且成本较高, 尚未在工程实践中被推广应用. 除了调控固液界面作用外, 也有学者结合外场力对液滴进行精准操控, 如电场^[7]、磁场^[8]、热刺激^[9]和超声波^[10]等. 但通过上述外场力对液滴进行操控具有局限性, 如电场需要液滴具有高介电常数, 磁场需要在液滴中添加磁性颗粒可能会污染样本, 热驱动不适用于低沸点易挥发性物质等, 且以上外场调控方法不易实现低表面能工质润湿性调控及液滴操纵. 因此, 寻找更具普适性的润湿特性调控及液滴操纵方法是亟待解决的问题.

Yoshimitsu等人^[11]认为, 通过合理构造固体表面微纳结构分布可以有效截留微量空气, 在微结构表面形成大比例的液气界面, 大幅度降低固液接触的实际比例. 当固液接触比例降低到零时, 即可实现液滴的悬浮, 如Leidenfrost现象^[12]为当液体受热蒸发时, 在高温

引用格式: 刘鑫源, 贾力, 徐金柱, 等. 低表面张力液滴类超疏悬浮状态实验. 科学通报, 2021, 66: 3916–3924

Liu X Y, Jia L, Xu J Z, et al. Experiment on the quasi-superhydrophobic levitation state of droplets with low surface tension (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3916–3924, doi: [10.1360/TB-2021-0559](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0559)

固壁表面与液滴之间形成一层蒸汽层,使液滴悬浮在自身蒸汽层上的现象.这种液滴悬浮现象在液滴输运与操控方面具有极佳的应用前景.近期对Leidenfrost现象的研究也逐渐增多,Graeber等人^[13]研究了在完全刚性表面上Leidenfrost液滴自我诱导的自发振荡行为.Liu等人^[14]研究发现,Leidenfrost液滴在其生命周期中会自发进行一系列不同的运动模式,他们研究了模式之间的过渡条件并证明了该条件的普适性.Sobac等人^[15]研究了悬浮的Leidenfrost液滴在硅油浴中引起的流动以及两者相互作用产生的流体力学结构.蔡畅等人^[16]建立了预测Leidenfrost温度的模型,并探讨了环境压力对Leidenfrost温度的影响机制.王硕林等人^[17]采用分子动力学模拟研究了纳米液滴在不同润湿性表面上的Leidenfrost现象.除通过传统手段实现Leidenfrost现象外,也有学者通过其他手段实现类似Leidenfrost的悬浮现象,如Panchanathan等人^[18]通过将碳酸水置于超疏水固体表面,利用液体中气泡的释放在液滴底部形成气垫,实现了液滴的悬浮状态.党超等人^[19]研究了气流作用下多孔微结构亲水表面水滴的不同动态润湿模式,实现了水滴的类超疏水悬浮状态.受此启发,利用气流作用实现低表面能工质液滴的悬浮状态值得探索.这种方法可以不依赖固体表面改性方法,在不对液滴添

加额外组分、对液滴介电常数没有要求的情况下,实现对低表面张力液滴的操控,在微流控系统等方面具有潜在的应用前景.基于此,本文通过在规则微孔试样底部施加气流,利用微孔气流产生的动量力与液滴重力相互平衡,实现低表面能工质液滴的类超疏悬浮状态,探究微孔气流附加动量力对低表面能工质液滴润湿行为与动力学特性的调控机制.

1 实验系统与方法

1.1 实验装置

为了观察低表面能工质液滴运动行为,获得稳定的液滴运动状态信息与精确的液滴动态数据,本研究搭建了如图1所示的微孔气流调控液滴润湿及动力学行为实验系统.该实验系统由气流调节控制系统、液滴生成系统、可视化系统以及数据采集系统组成.微孔气流调节控制系统作为液滴稳定运动的核心部分,为压力驱动的开环系统.由高压氮气瓶(12.5 MPa)提供稳定的驱动压力,气体通过减压阀减压后流出,并通过调节阀精确调节气体流量,气流由管路进入稳压腔形成稳定的微孔入口压力条件,最后经实验段的表面微孔流出.液滴生成系统由微量进样器与伺服电机构成,

图1 (网络版彩色)微孔气流调控液滴润湿及动力学行为实验系统及实验段. (a) 实验系统; (b) 实验段结构参数; (c) 实验段实物图
Figure 1 (Color online) Experimental system and section for wettability and dynamic behaviors of droplets regulated by the microporous air flow. (a) Experimental system; (b) structural parameters of the experimental section; (c) physical figure of the experimental section

通过编程软件控制电机推动进样器,产生所需体积的液滴.可视化系统由高速相机(SDC-350)和光源组成,用于获取液滴的运动图像.数据采集系统包含连接在气体管路中的气体质量流量计(Cole-Parmer 32908-69)、储气腔中的温度传感器(OMEGA TC-T-NPT-U-72)、压力传感器(OMEGA PXM309-3.5A5V)及连接稳压腔和环境腔的压差传感器(SIEMENS 7MF1641-3BA20-1NA0),传感器均通过数据采集仪(Keysight 34972A)采集实验数据.高压气瓶作为气源以及压力源,当气瓶输出压力高于大气压力时,气体通过压差驱动流出,经过阀门的精密调节,进入储气腔稳压,最终在微孔实验段表面形成稳定的气流,实现对液滴润湿行为的调控.

1.2 微孔实验段

图1(b)为规则阵列微孔实验段的结构参数,微孔实验段为直径40 mm、厚度0.3 mm的不锈钢薄片,中心直径10 mm区域利用激光加工技术构造了规则阵列的微孔,微孔设计直径为80 μm ,孔中心间距为160 μm .图1(c)所示为光学显微镜拍摄的微孔实物图,通过ImageJ统计多张照片中实际微孔直径,得到平均微孔直径为80.09 μm ,实际微孔区域面积为15.2 mm^2 ,该微孔区域即为微孔气流作用区域.本研究所采用的低表面能工质为电子氟化液FC3283及FC40,其主要物性参数如表1所示.利用液滴生成系统产生不同体积的液滴进行实验,本研究中液滴体积范围为0.15~1.83 μL .

1.3 数据处理

液滴半径、运动高度等参数均由ImageJ软件通过像素长度比值法获得,液滴的表观接触角通过接触角测量仪(SDC-350)测量得到,取液滴左右接触角的平均值来衡量表观接触角大小.

微孔气流出口速度 v 的计算公式为

$$v = \frac{Q}{nS}, \quad (1)$$

式中, Q 为气体体积流量,单位为 m^3/s ; n 为实验段微孔数量; S 为微孔实验段单孔面积,单位为 m^2 .

弹跳过程中由于液滴变形而增加的表面能 ΔE_s 的计算公式为

$$\Delta E_s = \sigma(A_{\text{def}} - A_{\text{actual}}), \quad (2)$$

式中, σ 为工质的表面张力,单位为 N/m ; A_{def} 为液滴在最低处变形后的表面积,单位为 m^2 ; A_{actual} 为液滴恢复为球形时的表面积,单位为 m^2 .

韦伯数 We 的计算公式为

$$We = \frac{\rho v^2 l_c}{\sigma}, \quad (3)$$

式中, ρ 为工质密度; v 为液滴下落的平均速度; l_c 为液滴的特征长度即直径,用于表征液滴惯性力与表面张力的相对大小.

邦德数 Bo 的计算公式(4)为

$$Bo = \frac{\rho g r^2}{\sigma}, \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度; r 为液滴半径,用于表征液滴重力与表面张力的相对大小.

1.4 不确定度分析

压力传感器和压差传感器的测量精度为 $\pm 0.25\%$,质量流量计的测量精度为 $\pm 0.2\%$,通过ImageJ软件测量的不确定度为 $\pm 1\%$.计算不确定度通过Moffat^[20]提出的误差分析方法进行计算,其公式如下:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中, δR 代表计算参数 R 的不确定度; δx_i 为影响计算参数 R 的独立因变量 x_i 所对应的不确定度; N 代表影响计算参数 R 的独立因变量的数目.基于式(5)计算得到气体出口速度的不确定度为 $\pm 1.22\%$,表面能的不确定度为 $\pm 3.16\%$.

表1 工质FC40与FC3283物性参数表

Table 1 Physical parameters of working fluids FC40 and FC3283

工质	密度(kg/m^3)	黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力(mN/m)	临界压力(MPa)
FC3283	1820	1.4	15	1.22
FC40	1855	4.1	16	1.18

2 结果分析

2.1 类超疏悬浮状态液滴运动行为分析

通过在液滴底部规则阵列微孔结构不锈钢表面形成微孔气流层,使低表面张力工质FC3283和FC40液滴在空气动力托举作用下的固液接触比例降低到零,产生类似于Leidenfrost现象的类超疏悬浮状态。

通过可视化结果可以发现,随着液滴半径减小,液滴在类超疏悬浮状态中出现了不同的运动模式,分别是悬停、振荡、弹跳以及脱离。图2(a)所示为液滴悬停、振荡及弹跳阶段的示意图,图3所示为4个阶段液滴振幅随半径变化规律。

2.1.1 悬停及振荡阶段

当液滴竖直降落在微孔气流层表面以稳定的状态

悬浮时,液滴质心高度、形状基本保持不变,这个阶段称为悬停阶段。当半径为0.73 mm的FC40液滴竖直降落在出口流速为2 m/s的微气流作用区域时,液滴悬停状态如图2(b)所示,此时液滴无量纲邦德数 $Bo = 0.61$ 。当液滴达到稳定悬停状态时,其受力平衡如图4所示,液滴同时受到重力 G 、微孔气流动量 F_v 、由表面张力引起的拉普拉斯压力 ΔP 以及由气流引起的剪切力 τ 的作用。此时,液滴重力与微孔气流动量力相平衡,维持液滴质心高度稳定;微孔气流切向作用力与液滴变形产生的拉普拉斯压力相平衡,保持液滴形貌稳定。如图3中悬停阶段所示,液滴振幅基本保持恒定且接近于零,形状、气膜厚度基本不变。

随着液滴半径减小,自身重力减小,表面张力作用增大, Bo 数逐渐减小。在此工况下,当 Bo 数小于约0.57

图2 (网络版彩色)类超疏悬浮状态液滴运动示意图。(a)不同阶段示意图;(b)悬停阶段;(c)振荡阶段;(d)弹跳阶段

Figure 2 (Color online) Schematic of droplet motions in the quasi-superhydrophobic levitation state. (a) Schematic of different stages; (b) hovering stage; (c) bobbing stage; (d) bouncing stage

图3 (网络版彩色)液滴振幅随半径变化规律

Figure 3 (Color online) Variation in droplet amplitude with radius

图4 (网络版彩色)液滴悬停阶段受力分析示意图
Figure 4 (Color online) Schematic of force analysis in the droplet hovering stage

时,微孔气流切向作用力与拉普拉斯压力之间的平衡状态被打破,液滴在表面张力的作用下开始收缩,气流作用于液滴底部的作用面积减小,动量减小,与重力的平衡被打破。在惯性力、重力、表面张力与气流动量力的共同作用下,液滴在竖直方向上振动,质心高度发生波动,形状发生变化,但液滴底部气膜最小厚度基本保持不变,这个阶段称为振荡阶段。图2(c)所示为半径0.61 mm的FC40液滴的振荡阶段示意图,此时 $Bo = 0.43$ 。如图3振荡阶段所示,随着液滴半径减小,振幅逐渐增大。这是由于随着半径减小,液滴受力不平衡逐渐增加,振幅增加。

2.1.2 弹跳及脱离阶段

当液滴半径继续减小时,重力与微孔气流动量力

的不平衡进一步增加,向上运动的加速度不断增加,振幅增加。在此工况下,当 Bo 数小于约0.36时,液滴最终克服维持在气膜表面的惯性力,开始向上弹离,液滴底部气膜厚度产生周期性变化,从振荡阶段转变为弹跳阶段。图2(d)所示为半径0.48 mm的FC40液滴的弹跳阶段示意图,此时 $Bo = 0.26$ 。液滴在向上弹跳时,其所受微孔气流动量力逐渐减小,直至液滴向上弹跳的速度减小为零,液滴在重力的作用下开始下落并回到气膜表面,完成一个弹跳周期。弹跳阶段中液滴底部气膜厚度、液滴形状均发生明显变化,质心高度振幅明显增大。

根据可视化研究结果,在微孔气流作用下液滴弹跳阶段会自发地表现出具有稳定频率的振荡。如图5(a)所示,规则微孔表面半径为0.54 mm的FC-3283液滴在微气流速度为2.08 m/s作用条件下呈现周期性弹跳行为,此时 $Bo = 0.35$ 。在该弹跳周期内,液滴在下落过程中发生变形,逐渐向两侧铺展,在最低点处铺展变形达到最大,之后迅速收缩并向上反弹,形成一个完整的弹跳周期。在弹跳阶段中,当液滴体积保持不变时,其弹跳高度基本保持恒定。图5(b)所示为液滴在多个连续弹跳周期中质心高度 y 随时间变化的关系图,可以发现,液滴的运动高度和频率基本恒定,其弹跳频率约为29.61 Hz。

在液滴弹跳过程中,存在重力势能与表面能的相互转换关系。图6(a)所示为下落过程重力势能与表面能

图5 (网络版彩色)类超疏悬浮状态液滴弹跳阶段示意图。(a) FC3283液滴弹跳阶段示意图;(b) FC3283液滴质心高度随时间变化曲线图
Figure 5 (Color online) Schematic of the droplet bouncing stage in the quasi-superhydrophobic levitation state. (a) Schematic of FC3283 in the droplet bouncing stage; (b) curve of FC3283 droplet's centroid height varying with time

图6 弹跳过程液滴表面能与重力势能的变化规律。(a)下落过程;(b)反弹过程

Figure 6 Variation in surface energy and gravity potential energy of droplets during the bouncing stage. (a) Falling process; (b) rebound process

的变化规律,可以发现,液滴变形而增加的表面能随液滴下落最高点重力势能的增加而增加.而液滴在最低点处增加的表面能将在弹跳过程中释放,部分转化为向上弹跳的重力势能.图6(b)所示为液滴在反弹过程释放的表面能与重力势能的变化规律,可以看出,液滴向上反弹时最高点重力势能随其表面能的增加而增加.这种由重力势能、微孔气流动能、液滴表面能以及液滴动能等能量的相互转换构成的动态平衡,使液滴在弹跳阶段以稳定频率呈现周期性运动行为.

此外,通过对比图2中FC40液滴的弹跳阶段及图5(a)中FC3283液滴弹跳阶段的示意图可以发现,两种液滴在弹跳阶段的变形程度存在明显差异,FC40液滴的变形程度明显小于FC3283液滴,且振幅也小于FC3283液滴.这是由于在液滴弹跳的过程中存在能量的损耗,会减少下落过程中增加的表面能以及反弹过程中向上弹跳的动能.本研究使用的两种工质,FC40的黏度明显大于FC3283,因此其黏性耗散大于FC3283,导致FC40液滴的变形程度及振幅均小于FC3283液滴.

当降落在气流表面的液滴半径进一步减小时,其表面张力逐渐占据主导地位,液滴变形减少.在出口流速为2 m/s工况下,当Bo数小于约0.25时,微孔气流动力与重力的差距逐渐增大,超越了液滴维持动态平衡的范围,液滴进入不规则弹跳的脱离阶段,质心振幅明显增大,且振幅、周期呈现不规则变化规律,直到由于液滴高度增加与质心偏移,脱离气流作用范围.

2.2 类超疏悬浮状态液滴润湿行为分析

低表面能工质液滴接触不锈钢表面后会快速铺展,达到稳定的亲液状态.如图S1所示,体积为1 μL的FC3283液滴的接触角约为10°,体积为1 μL的FC40液

滴的接触角约为22.4°,均为亲液状态.

2.2.1 类超疏悬浮状态液滴类接触角

通过在液滴底部形成微孔气流层,使原本亲液状态的低表面能工质FC3283和FC40液滴呈现类超疏悬浮状态.为了更好地描述上述现象中液滴的润湿性变化规律,受Young's方程的启发:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{sl}}{\sigma_l}, \quad (6)$$

对液滴在最低点的形态进行简化.如图7所示,在液滴底部存在类似于三相接触线位置的拐点.在该拐点处,液滴液相与气相间的表面张力的水平切向分力为 σ_{LV} 、斜向切向分力为 σ'_{LV} .由于存在气流速度梯度,该点处还存在水平方向的剪切力 τ .当液滴处于动态平衡状态时,类比Young's方程可以得到:

$$\sigma'_{LV}\cos\theta + \sigma_{LV} = \tau. \quad (7)$$

定义 θ 为类接触角,用于表征液滴类超疏悬浮状态下的表现润湿状态.

2.2.2 悬停及振荡阶段类接触角变化

当FC40液滴处于悬停阶段时,如图8(a)所示,液滴平均类接触角为153.6°;当液滴处于振荡阶段,类接触

图7 (网络版彩色)类超疏悬浮状态液滴类接触角示意图

Figure 7 (Color online) Schematic of the pseudo contact angle of droplets in the quasi-superhydrophobic levitation state

图8 (网络版彩色)类接触角变化规律。(a)悬停阶段;(b)弹跳阶段
Figure 8 (Color online) Variation in pseudo contact angle. (a) Hovering stage; (b) bouncing stage

角在153.4°~167.9°之间变化。

2.2.3 弹跳阶段类接触角变化

通过观察发现,在弹跳阶段,液滴在最低点处类接触角随着液滴半径的减小呈现逐渐增大的趋势,这是由于液滴半径减小, Bo 数减小,表面张力逐渐占据主导地位,液滴更加趋向于维持表面积最小形状,即球形,对应类接触角为180°。因此,在弹跳阶段,液滴类接触角随着半径减小而逐渐增大。此外,液滴类接触角随下

落速度增加逐渐减小,下落速度为液滴在一个周期内由最高点向最低点运动的平均速度。这是由于液滴下落过程中撞击微气流层,撞击速度越大,惯性力越大,液滴变形越大,类接触角越小。综合上述分析可以发现,液滴类接触角受惯性力与表面张力的共同影响,故引入韦伯数 We 表征液滴惯性力与表面张力的相对大小。图8(b)所示为液滴类接触角随 We 数的变化规律,随着 We 数的增大,液滴的类接触角逐渐减小。这是由于随着 We 数增大,惯性力占比增大,液滴表面张力占比减小,导致液滴类接触角减小。

3 结论

本研究利用表面规则微孔的气流作用,调控低表面张力液滴FC3283及FC40的润湿行为,形成了类超疏悬浮状态,并对该现象中液滴润湿及运动变化规律开展研究,得到以下结论。

(1) 液滴在类超疏悬浮状态中随着液滴半径的减小,依次呈现4种运动行为,分别是悬停、振荡、弹跳以及脱离4个阶段。液滴的运动行为演变与重力、微孔气流流量力、惯性力以及液滴的表面张力的动态平衡有关。

(2) 弹跳阶段中,液滴下落及上升过程中存在能量相互转换,其中重力势能与表面能呈现正相关关系。这种能量的相互转换使液滴呈现频率、振幅基本稳定的周期性运动行为。

(3) 类比Young's方程,结合液滴在最大形变时拐点处的受力分析,提出类接触角概念用于描述液滴动态平衡时的润湿行为。在悬停阶段,液滴类接触角达到153.6°;在弹跳阶段,随着液滴半径以及下落速度的增加,液滴惯性作用增强,表面张力作用减弱,随着韦伯数增大,液滴类接触角逐渐减小。

参考文献

- Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art. *Int J Heat Fluid Flow*, 2007, 28: 753–767
- Stone H A, Stroock A D, Ajdari A. Engineering flows in small devices. *Annu Rev Fluid Mech*, 2004, 36: 381–411
- Tang Z, Fang K, Bukhari M N, et al. Effects of viscosity and surface tension of a reactive dye ink on droplet formation. *Langmuir*, 2020, 36: 9481–9488
- Liu T L, Kim C J C J. Turning a surface superrepellent even to completely wetting liquids. *Science*, 2014, 346: 1096–1100
- Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 2011, 477: 443–447
- Kota A K, Li Y, Mabry J M, et al. Hierarchically structured superoleophobic surfaces with ultralow contact angle hysteresis. *Adv Mater*, 2012, 24: 5838–5843
- Suzuki K, Homma H, Murayama T, et al. Electrowetting-based actuation of liquid droplets for micro transportation systems. *J Adv Mech Des Syst*

- Manuf, 2010, 4: 365–372
- 8 Li A, Li H, Li Z, et al. Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot. *Sci Adv*, 2020, 6: eaay5808
 - 9 Irajizad P, Ray S, Farokhnia N, et al. Remote droplet manipulation on self-healing thermally activated magnetic slippery surfaces. *Adv Mater Interfaces*, 2017, 4: 1700009
 - 10 Yu W Y, Xing C X, Lin Q L. Effect of ultrasonic vibration on wetting of water/E-GaIn on different substrate surface (in Chinese). *J Eng Therm*, 2020, 41: 1186–1191 [俞伟元, 邢春晓, 林巧力. 超声波振动对水/E-GaIn在不同基板表面润湿的影响. *工程热物理学报*, 2020, 41: 1186–1191]
 - 11 Yoshimitsu Z, Nakajima A, Watanabe T, et al. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. *Langmuir*, 2002, 18: 5818–5822
 - 12 Bianc A L, Clanet C, Quere D. Leidenfrost drops. *Phys Fluids*, 2003, 15: 1632–1637
 - 13 Graeber G, Regulagadda K, Hodel P, et al. Leidenfrost droplet trampolining. *Nat Commun*, 2021, 12: 1727
 - 14 Liu Y, Shen L, Zamansky R, et al. Life and death of inertial particle clusters in turbulence. *J Fluid Mech*, 2020, 902: 1–2
 - 15 Sobac B, Maquet L, Duchesne A, et al. Self-induced flows enhance the levitation of Leidenfrost drops on liquid baths. *Phys Rev Fluids*, 2020, 5: 062701
 - 16 Cai C, Liu H, Xi X, et al. Study on the theoretical model of Leidenfrost temperature for a sessile droplet on a high-temperature wall (in Chinese). *J Eng Therm*, 2021, 42: 732–739 [蔡畅, 刘红, 奚溪, 等. 高温壁面上静止液滴的Leidenfrost温度模型研究. *工程热物理学报*, 2021, 42: 732–739]
 - 17 Wang S L, Shen Y, He X, et al. Suppression of Leidenfrost phenomenon of nanodroplets through an external electric field (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1705–1714 [王硕林, 沈园, 何鑫, 等. 电场抑制纳米液滴的Leidenfrost现象. *科学通报*, 2020, 65: 1705–1714]
 - 18 Panchanathan D, Bourrienne P, Nicollier P, et al. Levitation of fizzy drops. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf0888
 - 19 Dang C, Ding Y, Jia L, et al. Dynamic wetting behavior of droplets on the surface of porous materials with micro-airflow (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 128–136 [党超, 丁艺, 贾力, 等. 微气流作用下多孔表面液滴动态润湿行为研究. *科学通报*, 2021, 66: 128–136]
 - 20 Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results. *Exp Thermal Fluid Sci*, 1988, 1: 3–17

补充材料

图S1 液滴在不锈钢表面的接触角

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “低表面张力液滴类超疏悬浮状态实验”

Experiment on the quasi-superhydrophobic levitation state of droplets with low surface tension

Xinyuan Liu^{1,2}, Li Jia^{1,2*}, Jinzhu Xu^{1,2}, Chao Dang^{1,2} & Yi Ding^{1,2}¹ Institute of Thermal Engineering, School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;² Beijing Key Laboratory of Flow and Heat Transfer of Phase Changing in Micro and Small Scale, Beijing 100044, China* Corresponding author, E-mail: ljia@bjtu.edu.cn

Droplet wettability and dynamic behavior of working fluids with low surface energy are widely used in various industrial and advanced technology fields, such as refrigerant spray cooling and microfluidic chip. Their wettability and dynamic behavior play a critical role in improving the efficiency of industrial processes. Some scholars have realized the wettability control of droplets of low surface energy fluids by changing the characteristics of micro-nano structures on solid surfaces. In addition, many external incentive ways, such as electrowetting, magnetic field, thermal stimulation, and supersonic vibration, have been proposed to control the droplet wetting state and motion behavior. However, such methods have limitations and no significant effect on low surface energy working fluids.

Inspired by the above methods and the Leidenfrost phenomenon, this study made use of the action of the microporous airflow, which can regulate the wettability and motion behavior of low surface tension droplets without adding additional components to the droplets and without special requirements for the droplets themselves. A visual experimental system for wetting and dynamic behavior of droplets regulated by the microporous airflow was set up, and the experimental section of the regular array micropore was machined by laser. The momentum force generated by the microporous flow was used to balance droplet gravity, which overcomes the wetting behavior of the low surface tension droplets FC3283 and FC40 and the realizes the quasi-superhydrophobic levitation state of droplets with low surface tension. This study aimed to explore the regulatory mechanism of the microporous flow additional momentum force on the wettability and dynamic behavior of droplets with low surface energy.

Experimental results showed that the motion behavior of droplets in the quasi-superhydrophobic levitation state could be divided into four stages (i.e., hovering, bobbing, bouncing, and detaching) with the decrease in droplet radius. The motion behavior of droplets was related to the dynamic balance of gravity, microporous flow momentum force, inertia force, and surface tension of droplets. In the bouncing stage, mutual conversion of energy was observed in the process of droplet falling and rising. A positive correlation was found between gravitational potential energy and surface energy. This kind of energy conversion made droplets oscillate periodically at a stable frequency. In addition, the deformation degree and amplitude of droplets with two kinds of low surface energy working fluids during the bouncing stage were compared, and the effect of viscosity on the droplet energy conversion process was analyzed. For wettability research, analogous to Young's equation, combined with the force analysis of droplets at the inflection point during maximum deformation, the concept of pseudo contact angle was proposed to describe the wetting behavior of droplets. The pseudo contact angle of droplets in different oscillation stages was analyzed. In the hovering stage, the pseudo contact angle of droplets reached 153.6°. In the bouncing stage, as the droplet radius and falling velocity increased, the inertia of droplets increased and the surface tension decreased. Therefore, with the increase in Weber number, the pseudo contact angle of droplets decreased gradually. This method can supplement the external field force droplet manipulation method, and it provides a new method for potential applications in low surface tension droplet manipulation, lossless rapid directional transport, and microfluidic system design.

low surface tension droplet, quasi-superhydrophobic levitation state, dynamic behavior, wettabilitydoi: [10.1360/TB-2021-0559](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0559)