微气流作用下多孔表面液滴动态润湿行为

党超^{1,2†}, 丁艺^{1,2†}, 贾力^{1,2*}, 彭启^{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

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: ljia@bjtu.edu.cn

2020-04-13 收稿, 2020-05-10 修回, 2020-05-11 接受, 2020-05-12 网络版发表

国家自然科学基金(51776015)和中国博士后科学基金(2019TQ0025, 2019M660017)资助

摘要 基于对附加动量力场调控液滴润湿行为特性的创新性思考, 通过可视化实验, 利用多孔材料表面配合辅助微气流作用的形式, 探索了液滴在多孔材料表面的动态润湿行为特性, 鉴别了微气流作用下液滴在多孔材料表面的3种不同动态润湿模式, 发现了液滴在微气流作用下的类超疏水悬浮状态. 在此基础上, 针对具有典型意义的液滴完整浸润模式, 结合对多孔材料表面液滴受力模式与受力机理的分析, 探讨了不同微气流条件下液滴表观接触角、体积以及底部润湿面积等动态润湿参数与润湿时间之间的依变规律.

关键词 微气流, 多孔表面, 动态润湿模式, 润湿参数

液滴作为界面现象与流动传热过程调控的基本单元, 其不同表面的润湿特性是诸多工业领域和高新技术的应用关键, 如表面自清洁^[1]、表面减阻^[2]、抑制结霜结冰^[3]、油墨喷印^[4]、水力定向输运^[5]、强化冷凝换热^[6]等. 因此, 有效调控液滴在固体表面的润湿状态对拓展上述工程技术的应用范围具有重要意义. 目前, 对固体表面的形貌和涂层进行修饰是调控液滴润湿状态的常规间接手段^[7], 如利用微纳米层级结构和低表面能涂层实现液滴的超疏水状态^[8], 但是如何借助外部激励方式对液滴动态润湿特性实现直接且有效的调控, 成为众多学者的研究重点.

近年来, 多种外部激励方式被应用于调控液滴在不同表面的润湿状态, 如振动、电润湿和磁场力调控等. 贾志海等人^[9]研究了垂直振动作用下, 液滴在微柱结构疏水表面的润湿状态转变行为, 结果表明基底振动破坏了液滴的初始力平衡状态, 当振动能大于固液界面黏附能时, 液滴润湿状态发生显著变化. Lei等

人^[10]同样通过基底垂直振动的方式, 实现了液滴在微柱结构疏水表面Wenzel-Cassie润湿态的转变. 陆规等人^[11]介绍了电润湿方法在调控液滴润湿状态转变方面的应用, 指出电润湿通过对液滴施加电压使液滴气液界面张力发生改变, 进而影响液滴的受力状态和表观接触角, 基于此, 通过调整电压可以有效调控液滴润湿状态. 蒋成刚等人^[12]基于电润湿方法, 研究了液滴在交流电场作用下的润湿特性, 发现利用交流电压频率可以有效调控液滴表观接触角的变化速率. Chen等人^[13]通过可视化实验获得液滴在电润湿作用下的固液界面润湿特征, 研究指出随着电润湿电压的增大, 液滴三相接触线从固体基底微结构边缘的脱落是导致液滴润湿状态转变的直接原因. Manukyan和Schneider^[14]通过磁场力调控磁性液滴在疏水表面的润湿行为, 研究发现磁场力通过改变液滴力平衡状态使液滴三相接触线发生滑移, 进而改变液滴的表观润湿形态. Li等人^[15]利用磁场力控制液滴中磁性钢珠的运动, 通过钢珠的运动

引用格式: 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. 科学通报, 2021, 66: 128–136

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, doi: [10.1360/TB-2020-0404](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0404)

调控液滴的润湿状态和运动行为。上述外部激励调控方法中, 振动方法的调控效果具有随机性和不确定性, 电润湿目前仅能对电解质液滴的润湿特性进行调控, 而磁场力无法调控非磁性液滴的受力状态和润湿特性。因此, 探索具有普适性的液滴润湿特性调控方法是亟须解决的关键科学问题。受启发于无重力条件下液滴空中飘浮的现象, 基于抵消重力场作用的思路, 本研究创新性地提出使用附加微气流场作为动量力场调控液滴的受力状态和润湿特性。这一思路与高温条件下的 Leidenfrost 现象^[16]有类似之处。Leidenfrost 现象是指液滴与超过 Leidenfrost 温度的过热表面接触时, 部分液滴在固体表面迅速汽化形成蒸汽层, 剩余的液滴受到蒸汽层的托举力而悬浮在过热表面。基于此, 通过在液滴底部增加微气流场, 使液滴受到微气流作用产生的空气动量力, 通过调整微气流场压力可以改变空气动量力的大小, 进而调控液滴的受力状态和润湿特性。

本研究通过在多孔材料试样底部增加微气流场, 对液滴下表面施加动量力, 消减液滴重力作用, 同时通过改变液滴形态, 调控液滴表面张力的方向, 进而调控液滴在多孔材料表面的动态润湿行为特性, 探索了微气流作用下液滴的动态润湿模式。结合液滴受力机理分析, 研究了不同微气流条件下, 液滴的动态润湿参数与润湿时间之间的依变规律。

1 实验系统

1.1 实验装置

图1为研究微气流作用下多孔材料表面液滴润湿行为特性的实验装置示意图。为了便于对流通气体的

控制与调节, 避免波动与不稳定性, 整个实验系统设计为压差驱动下的开环单路系统。如图1(a)所示, 高压气瓶内存储有足量的高压氮气(12.5 MPa), 可为实验系统持续提供稳定的高压气流源。形成微气流所需的驱动压力相对于气瓶压力而言很小, 故高压气流需首先通过减压阀节流降压, 而后通过连接管路进入储气腔, 储气腔腔体较大, 起到对来流气体的缓冲与稳压作用。当储气腔内压力高于外界大气压力后, 流通气体则经由多孔材料试样流出, 在试样表面形成微气流。通过调节连接管路中靠近储气腔处的针阀开度, 可以精确调控进入储气腔的流通气体流量大小, 进而改变储气腔内气体的压力状态。连接管路中的电磁阀配合时间继电器使用, 实现对任意时间段内流通气体的瞬态通断控制, 安装在电磁阀之后的质量流量计则用来监测流通气体的流量大小。采用可编程精密注射泵来调控微小液滴的生成, 同时, 利用高速相机捕捉液滴在多孔材料试样表面的润湿行为。此外, 储气腔腔体上安装有温度、压力传感器与压差传感器, 分别用以监测腔体内气体温度、压力状态以及腔体内外气体压差状态。图1(b)为储气腔的具体结构示意图, 利用环氧树脂黏合剂, 将多孔材料实验试样贴附并密封于储气腔盖板上部的载样片上, 采用螺栓加垫片的紧固密封方式, 实现载样片与储气腔盖板、储气腔盖板与腔体之间的连接与密封。

1.2 多孔材料试样

图2为实验所用多孔材料试样的实物图及扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图。多孔材料试样为半径2 cm、厚度1 mm的圆形薄片结构, 由

图1 (网络版彩色)微气流辅助液滴润湿行为实验装置。(a) 压差驱动的开环单路实验系统; (b) 储气腔具体结构

Figure 1 (Color online) Experimental device for wetting behavior of droplets assisted by micro-airflow. (a) The open-loop single channel experimental system driven by differential pressure; (b) the air chamber structure

图2 (网络版彩色)多孔材料实验试样. (a) 实物图; (b) SEM图

Figure 2 (Color online) Experimental sample of porous material. (a) Physical figure; (b) SEM figure

粒径为75 μm 的球形铜粉颗粒烧结而成. 其实际的气体有效流通区域, 即微气流作用区域为多孔材料试样中心半径1 cm的圆形区域, 液滴的润湿行为亦在该区域中心位置处进行捕捉.

2 数据处理

2.1 液滴形貌参数计算

图3是液滴在多孔材料试样表面动态润湿过程中的球形形貌示意图. 液滴的表观接触角通过接触角测量仪(SDC-350)测量得到, 取左右接触角的平均值为表观接触角的实际值. 液滴的底部圆直径 $2a$ 及高度 h 通过像素长度比值法获得, 已知滴液针头外径为510 μm , 通过ImageJ软件获得滴液针头外径、液滴底部圆直径和高度在同一帧图片中的像素长度 $l_{\text{针头}}$ 、 $l_{\text{直径}}$ 和 $l_{\text{高度}}$, 进而计算得到相应的像素长度比值 $k_1(l_{\text{直径}}/l_{\text{针头}})$ 和 $k_2(l_{\text{高度}}/l_{\text{针头}})$,

图3 (网络版彩色)液滴球形形貌示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of spherical morphology of a droplet

则液滴底部圆直径及高度的实际值分别为滴液针头外径值(510 μm)与像素长度比值 k_1 和 k_2 的乘积.

液滴底部润湿面积的计算公式如下:

$$S = \pi a^2, \quad (1)$$

式中, a 为液滴底部圆半径.

液滴体积的计算公式如下:

$$V = \frac{\pi a^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)}{3 \sin^3 \theta}, \quad (2)$$

或

$$V = \frac{\pi}{6} (3a^2 h + h^3), \quad (3)$$

式中, θ 为液滴表观接触角; h 为液滴高度.

2.2 不确定度分析及可重复性验证

在本研究实验中, 压力传感器和压差传感器的测量精度为 $\pm 0.25\%$, 液滴接触角测量仪的测量精度为 $\pm 0.1^\circ$, 通过ImageJ软件测量的液滴底部圆直径($2a$)和高度(h)的不确定度为 $\pm 1\%$. 采用Moffat^[17]提出的不确定度计算方法来精确计算液滴动态润湿实验中液滴底部润湿面积和体积的不确定度, 计算结果分别为 $\pm 2\%$ 和 $\pm 1.4\%$, 表明实验测量与参数计算的准确性较高.

为保证实验条件的一致性, 每次在进行液滴浸润实验之前, 通过高压氮气吹扫和热烘干多孔材料试样表面, 去除多孔材料孔隙结构内及表面残留的水分及附着的杂质. 为验证实验的可重复性, 选取微气流驱动压差1.18 kPa时, 对不同动态润湿时间点的液滴表观接触角进行3次实验测量. 3次测量实验的结果偏差很小(图S1), 最大偏差仅为 3.6° , 表明本研究实验具备较好的可重复性.

3 结果分析

3.1 多孔材料表面液滴动态润湿模式分析

光滑的铜表面是亲水表面, 液滴接触到光滑铜表面后会迅速黏附并呈现出快速铺展的动态润湿模式, 以达到稳定的亲水状态. 对于铜粉颗粒烧结的多孔材料表面而言, 根据本研究的相关可视化研究结果, 随着多孔材料表面上下压差的逐渐增大, 即多孔材料表面微气流驱动压差的逐渐增大, 共发现并鉴别了液滴润湿过程中所呈现出的3种不同动态润湿模式, 每种动态润湿模式下液滴润湿行为的典型可视化实验结果如图4所示. 在此基础上, 图5定性描述了液滴动态润湿模式及液滴浸润状态随微气流驱动压差与动态润湿时间的发展变化情况.

当微气流驱动压差较小时($\Delta P \leq 17.15$ kPa), 包括无微气流作用的情况, 液滴在多孔材料试样表面呈现出完整浸润的动态润湿模式, 如图4(a)与5(a)所示. 该润湿模式下, 液滴接触到试样表面后迅速黏附, 三相接

触线处的钉扎效应作用非常明显, 液滴并未出现快速铺展趋势, 而是在多孔材料的毛细抽吸作用下处于不断向试样内部浸润的状态, 最终则达到完全浸润状态. 无微气流作用时, 液滴的动态润湿时间极短为2.3 s, 随着微气流驱动压差的增大, 动态润湿时间可长达50 s (压差为17.15 kPa). 但无论微气流作用与否, 整个动态润湿过程中, 液滴形态的变化基本相似.

当微气流驱动压差继续增大时($17.15 \text{ kPa} < \Delta P < 25.88 \text{ kPa}$), 液滴在多孔材料试样表面呈现出破碎浸润的动态润湿模式, 如图4(b)与5(b)所示. 该润湿模式下, 液滴接触到试样表面后同样会迅速黏附, 并在多孔材料的毛细抽吸作用下不断向试样内部浸润. 但与此同时, 微气流会从附着液滴的中心处不断突破, 造成液滴形态的间断性破碎现象, 也使得液滴的铺展范围相对于完整浸润模式有所增大. 在动态润湿过程后期, 液滴形态的变化情况则逐渐趋于与完整浸润模式一致, 直至完全浸润状态. 值得注意的是, 该润湿模式下, 附着液滴三相接触线处的钉扎效应作用仍然十分明显, 即

图4 (网络版彩色)多孔材料试样表面液滴动态润湿模式及其对应液滴润湿行为的典型可视化实验结果. (a) 液滴完整浸润模式; (b) 液滴破碎浸润模式; (c) 液滴非浸润模式

Figure 4 (Color online) Typical visualization results of droplet dynamic wetting mode and corresponding wetting behavior on the surface of porous materials. (a) Droplet intact infiltration mode; (b) droplet cracked infiltration mode; (c) droplet non-infiltration mode

图5 (网络版彩色)多孔材料试样表面液滴动态润湿模式与液滴浸润状态的发展变化情况示意图。(a)液滴完整浸润模式;(b)液滴破碎浸润模式;(c)液滴非浸润模式

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of the development and change of droplet dynamic wetting mode and droplet infiltration state on the surface of porous materials. (a) Droplet intact infiltration mode; (b) droplet cracked infiltration mode; (c) droplet non-infiltration mode

便在微气流突破过程中依旧限制了液滴的快速铺展趋势,这也是三相接触线附近附加微气流对液滴前驱液膜的空间隔离限制,以及多孔材料毛细抽吸与表面颗粒几何限制的综合作用效果。

当微气流驱动压差较大时($\Delta P \geq 25.88$ kPa),液滴在多孔材料试样表面则呈现出非浸润的动态润湿模式,如图4(c)与5(c)所示。该润湿模式下,液滴接触到试样表面后并不会发生黏附,微气流所形成的托举作用已经阻碍了液滴向多孔材料试样内部的浸润,多孔材料试样对液滴的毛细抽吸作用失效,故液滴在试样表面始终处于类似超疏水润湿态的悬浮状态,液滴形态也基本不随动态润湿时间的变化而变化。该润湿模式的形成初步佐证了通过采用外加动量场来调控并实现液滴超疏水润湿行为特性的可行性,为水回收技术、冷凝换热强化技术等方面的探索提供了新的思路。

3.2 液滴动态润湿参数分析

微气流作用下液滴在多孔材料试样表面所呈现出的上述3种动态润湿模式与微气流托举、多孔材料毛细抽吸、固液界面黏附以及液滴自身性质等诸多作用因素密切相关。为了更好地理解多因素作用下液滴动态润湿参数的变化规律,首先对液滴动态润湿过程的受力特征进行了简化。如图6所示,微气流作用下液滴在多孔材料试样表面呈完整浸润模式时,其动态润湿过程中同时受到重力 F_g 、表面张力 F_σ 、托举力 F_b 、黏

图6 (网络版彩色)多孔材料试样表面液滴动态润湿过程受力情况示意图。(a)接触角 $\theta > 90^\circ$;(b)接触角 $\theta < 90^\circ$

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of force acting on droplet on the porous materials surface during the dynamic wetting process. (a) Contact angle $\theta > 90^\circ$; (b) contact angle $\theta < 90^\circ$

附力 F_v 与毛细力 F_c 的作用。托举力 F_b 、黏附力 F_v 与毛细力 F_c 近似认为作用在液滴与试样表面的接触面上,即液滴底部润湿面积,其中,托举力 F_b 垂直于水平方向向上,黏附力 F_v 垂直于水平方向向下。液滴底部润湿区域的浸润液体不仅向多孔材料试样深处浸润,而且会沿润湿区域径向扩散,因此,毛细力 F_c 与水平方向之间存在一定的夹角 α 。另外,表面张力 F_σ 同时与液滴三相接触线圆周长和表观接触角相关,当接触角 θ 大于 90° 时,表面张力 F_σ 在水平方向上的分力指向液滴外部,当接触角 θ 小于 90° 时,表面张力 F_σ 在水平方向上的分力则指向液滴内部,而表面张力 F_σ 在垂直方向上的分力始终竖直向上。

此外,在动态润湿过程的初始时刻,当微气流托举力 F_b 小于液滴所受重力 F_g 时,液滴在重力场作用下可黏附至多孔材料试样表面并不断向试样内部浸润。同时,由于微气流的流动会受到多孔材料局部孔隙结构的限制作用,因此,当微气流托举力 F_b 整体相对较大时,局部孔隙结构内的空气压力则可能足以突破液滴底面的固液黏附力 F_v 及表面张力 F_σ 的限制作用,微气流则会进入液滴内部使液滴发生形胀。当微气流持续进入液滴内直至液滴内部气压大于环境气压时,液滴表面发生破碎,微气流逸出液滴,即形成液滴破碎润湿模式。该模式下的动态润湿过程中,由于液滴形态受到不断溢出的微气流的影响,一方面难以捕捉液滴体积、表观接触角等动态润湿参数的真实情况,另一方面,其动态润湿参数的变化规律也具有较大随机性。对于托举力 F_b 相对较小的情况而言,液滴整体受力状态较为均衡。

当微气流托举力 F_b 大于液滴所受重力 F_g 时,液滴重力场作用效果被抵消,且液滴与多孔材料试样表面

间存在气膜,无法与试样表面发生黏附,在随后的动态润湿过程中处于非浸润模式,不存在黏附力 F_v 与毛细力 F_c 的作用.因此,液滴在表面张力 F_σ 作用下始终呈现球形状态,在托举力 F_b 与重力 F_g 相平衡的情况下,液滴悬浮于多孔材料试样表面上,类似于超疏水润湿态,其液滴体积、表观接触角等动态润湿参数基本保持不变.

综上分析,液滴完整浸润模式同时受多种因素的作用且液滴形态的变化更具规律性,以下将重点对其动态润湿过程进行参数化分析.

图7(a), (b)分别展示了完整浸润模式下液滴表观接触角与液滴体积随动态润湿时间的变化规律.可以看出,在不同微气流驱动压差作用下,液滴动态润湿初期,其表观接触角和体积均急剧减小,呈现指数下降趋势,而在动态润湿后期,表观接触角和体积的减小幅度均显著变缓,整体上呈现线性下降趋势.动态润湿初期,液滴底部附近的多孔材料试样孔隙结构丰富,毛细力较大,毛细抽吸作用较强,液滴会被迅速抽吸浸润到孔隙结构内部.其中,从液滴初始接触到试样表面至接触角 θ 下降到 90° 的阶段,表面张力在水平方向上的分力与液滴润湿铺展方向一致,加速了液滴的浸润过程.当接触角继续下降小于 90° 之后,表面张力在水平方向的分力与液滴润湿铺展方向相反,对液滴的浸润过程产生了阻碍作用,液滴接触角与体积的下降幅度稍微有所减缓.动态润湿后期,随着浸润程度的增加,液滴底部附近的局部区域内多孔材料试样的孔隙结构逐渐被液体充盈而趋近于饱和状态,试样表面的作用向实体材料靠近,毛细力大幅减小,故该局部区域试样表面上的液滴近似处于受力平衡状态.另外,液滴所处的局部

区域较小,浸润到多孔材料中的液体仍会不断向周围孔隙扩散,多孔材料试样表面上液滴的受力状态会处于动态平衡阶段.因此,液滴也由动态润湿初期的加速浸润状态过渡为近似匀速浸润状态,其表观接触角与体积的减小幅度变缓,呈现近似线性的缓慢下降趋势.此外,微气流驱动压差越大,液滴受到的托举力越大,被抽吸进入试样孔隙结构的阻力较大,同样也阻碍了已浸润液体向周围的扩散速度.因此,相同润湿时间内,液滴接触角与体积的变化幅度较小,但液滴从接触多孔材料试样表面到处于完全浸润状态的动态润湿周期更长.

图8展示了完整浸润模式下液滴底部润湿面积随动态润湿时间的变化规律.动态润湿初期,液滴接触到多孔材料试样表面后,在重力与毛细力作用下迅速黏附铺展,底部润湿面积迅速增大,当液滴底部圆周三相接触线处的黏附阻力与表面张力和毛细力的水平方向分力平衡时,液滴三相接触线停止滑移并被钉扎在多孔材料试样表面的微结构中,此时液滴底面的润湿面积达到最大值.在随后的动态润湿过程中,随着浸润程度的增加,液滴体积不断减小,但由于液滴底面三相接触线处钉扎效应的作用,液滴高度的减小幅度显著大于其径向宽度的减小幅度,故液滴底部润湿面积会缓慢减小.在动态润湿末期,当液滴高度与底面直径之比小于0.03时,液滴底部润湿面积开始迅速减小,液滴快速趋近于完全浸润状态.该过程中,液滴表观接触角很小,表面张力在水平方向上的分力相对于垂直方向明显较大且指向底面圆心,加速了液滴底面圆周三相接触线的收缩,故液滴底部润湿面积的减小幅度会迅速

图7 (网络版彩色)完整浸润模式下液滴动态润湿参数与润湿时间的关系. (a) 表观接触角与时间; (b) 体积与时间

Figure 7 (Color online) Variation of droplet dynamic wetting parameters with the wetting time in intact infiltration mode. (a) Apparent contact angle versus time; (b) volume versus time

图8 (网络版彩色)完整浸润模式下液滴底部润湿面积与动态润湿时间的关系

Figure 8 (Color online) Variation of wetting area at the bottom of droplet with the dynamic wetting time in intact infiltration mode

增大。此外,当微气流驱动压差增大时,相同条件下液滴受到的托举力增大,液滴底部三相接触线铺展滑移时受到的黏附阻力减小,因此液滴初始铺展形成的底部润湿面积较大,且由于液滴浸润阻力增大,液滴动态浸润的持续时间增长。

4 结论

本研究通过实验研究了微气流作用下液滴在多孔材料表面的润湿行为,明确了不同微气流条件下液滴的动态润湿模式,讨论了典型润湿模式下的液滴受力特征及润湿参数变化规律,得到的主要结论总结如下。

(1) 微气流作用下,液滴在多孔材料表面可呈现3种不同的动态润湿模式,即完整浸润模式、破碎浸润

模式和非浸润模式。完整浸润模式与破碎浸润模式下,液滴最终处于完全浸润状态,而非浸润模式下,液滴则始终处于类超疏水悬浮状态。

(2) 完整浸润模式下,液滴的表观接触角和体积在动态润湿初期急剧减小,呈指数下降趋势,在动态润湿中后期,两者减小幅度变缓,呈线性下降趋势。微气流驱动压差越大,液滴的表观接触角和体积在相同润湿时间内变化幅度越小,但动态润湿周期越长。

(3) 完整浸润模式下,液滴底部润湿面积在动态润湿初期迅速增至最大值,而后缓慢减小。当液滴高度与底面直径之比小于0.03时,底部润湿面积的减小幅度迅速增大,液滴快速趋近于完全浸润状态。微气流驱动压差越大,液滴底部润湿面积的最大值越大。

参考文献

- Liu Y H, Li G J, Peng C, et al. Preparation and antibacterial activity of superhydrophobic PET fabric (in Chinese). *J Chem Ind Eng*, 2014, 65: 1517–1525 [刘云鸿, 李光吉, 彭超, 等. 超疏水PET织物的制备及其抗菌性能. 化工学报, 2014, 65: 1517–1525]
- Li J, Zhao S C, Li Q, et al. Fabrication of biomimetic multi-scale surface of rice leaf and anisotropic superhydrophobic properties (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 1766–1773 [李晶, 赵世才, 李强, 等. 类水稻叶多尺度表面构筑与各向疏水性. 科学通报, 2017, 62: 1766–1773]
- Hou Y, Yu M, Shang Y, et al. Suppressing ice nucleation of supercooled condensate with biphilic topography. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 075902
- Trimbach D C, Al-Hussein M, de Jeu W H, et al. Hydrophilic elastomers for microcontact printing of polar inks. *Langmuir*, 2004, 20: 4738–4742
- Ding Y, Jia L, Peng Q, et al. Critical sliding angle of water droplet on parallel hydrophobic grooved surface. *Colloid Surf A-Physicochem Eng Asp*, 2020, 585: 124083
- Ding Y, Jia L, Zhang Y, et al. Investigation on R141b convective condensation in microchannel with low surface energy coating and hierarchical nanostructures surface. *Appl Therm Eng*, 2019, 155: 480–488
- Nakajima A. Design of hydrophobic surfaces for liquid droplet control. *NPG Asia Mater*, 2011, 3: 49–56
- Peng Q, Jia L, Guo J, et al. Forced jumping and coalescence-induced sweeping enhanced the dropwise condensation on hierarchically microgrooved superhydrophobic surface. *Appl Phys Lett*, 2019, 114: 133106
- Jia Z H, Lei W, He J C, et al. Dynamic characteristics of vibrated-droplets on a microstructured hydrophobic surface (in Chinese). *Chin Sci Bull*,

- 2014, 59: 2663–2667 [贾志海, 雷威, 贺吉昌, 等. 微结构疏水表面振动液滴的动态特性. 科学通报, 2014, 59: 2663–2667]
- 10 Lei W, Jia Z H, He J C, et al. Vibration-induced Wenzel-Cassie wetting transition on microstructured hydrophobic surfaces. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 181601
- 11 Lu G, Lin D J, Wang X D. Progress of electrowetting applications in micro-nano energy conversion and utilization systems (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 799–811 [陆规, 林殿吉, 王晓东. 电润湿在微纳能源利用系统中的应用. 科学通报, 2017, 62: 799–811]
- 12 Jiang C G, Shi L T, Wu C W. Electrowetting induced oscillation of microdroplets on superhydrophobic surface (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2264–2268 [蒋成刚, 史立涛, 吴承伟. 超疏水表面微液滴的电致振动. 科学通报, 2012, 57: 2264–2268]
- 13 Chen Y C, Suzuki Y, Morimoto K. Electrowetting-dominated instability of Cassie droplets on superlyophobic pillared surfaces. *Langmuir*, 2019, 35: 2013–2022
- 14 Manukyan S, Schneider M. Experimental investigation of wetting with magnetic fluids. *Langmuir*, 2016, 32: 5135–5140
- 15 Li A, Li H, Li Z, et al. Programmable droplet manipulation by a magnetic-actuated robot. *Sci Adv*, 2020, 6: eaay5808
- 16 Quéré D. Leidenfrost dynamics. *Annu Rev Fluid Mech*, 2013, 45: 197–215
- 17 Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results. *Exp Therm Fluid Sci*, 1988, 1: 3–17

补充材料

图S1 实验可重复性验证结果

本研究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 “微气流作用下多孔表面液滴动态润湿行为”

Dynamic wetting behavior of droplets on the surface of porous materials with micro-airflow

Chao Dang^{1,2†}, Yi Ding^{1,2†}, Li Jia^{1,2*} & Qi Peng^{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

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: ljia@bjtu.edu.cn

The dynamic wetting behavior characteristic of droplets is of significant importance in various industrial applications and high technologies, such as surface self-cleaning, surface drag reduction, anti-frosting, and droplet directional transportation. The modifications of coating surface energy and micro/nano structures on substrate surfaces are the conventional and indirect ways to manipulate the droplet dynamic wetting behavior. At present, many direct and external incentive ways, like substrate vibration, electrowetting and additional magnetic field, also have been proposed to control the droplet dynamic wetting behavior.

In the present study, inspired from the phenomenon of droplet floating in the air without gravity, an innovative manipulation method had been proposed, which utilized the additional micro-airflow field as a momentum field to control the force distribution and wetting characteristic of droplets. The core idea of this innovative manipulation method was similar as the Leidenfrost phenomenon, which used the gas buoyancy to counter the droplet gravity effect. A porous substrate sintered by copper particles was used as the experimental sample, a micro-airflow field was located at the down side of porous substrate, and a droplet was wetted on the up side of porous substrate. The magnitude of upright momentum force could be changed by adjusting the pressure of micro-airflow field. Under different pressure of micro-airflow field, the dynamic wetting behaviors of droplets on porous substrate were visualized, and the change regulations of dynamic wetting parameters as a function of wetting time were analyzed.

According to the results, three different dynamic wetting modes of droplets on the surface of porous materials with micro-airflow were identified, namely, intact infiltration mode, broken infiltration mode and non-infiltration mode. In the intact infiltration mode and broken infiltration mode, the droplets were finally in the state of complete infiltration, while in the non-infiltration mode, the droplets always maintained the suspension state similar as the super-hydrophobic wetting state. When the droplet was in the intact infiltration mode on the surface of the porous sample, the corresponding dynamic wetting process was simultaneously affected by gravity, surface tension, lifting force, adhesion force and capillary force. In this mode, the apparent contact angle and volume of droplet decreased exponentially at the initial stage during the dynamic wetting process. At the following stage, the decreasing amplitude of two dynamic wetting parameters became slower and presented a linear declining trend. The wetting area at the bottom of droplet rapidly increased to the maximum value at the initial stage, and then decreased slowly. However, when the ratio of droplet height to bottom diameter was less than 0.03, the decreasing amplitude of bottom wetting area increased rapidly, and the droplet would quickly approach to the state of complete infiltration. Besides, the maximum wetting area at the bottom of droplet increased with the increase of pressure difference driven by micro-airflow. The larger the pressure difference was, the smaller the changing range of apparent contact angle and volume of droplet in the same wetting time was, but the longer the whole dynamic wetting period was.

micro-airflow, porous surface, dynamic wetting mode, wetting parameter

doi: [10.1360/TB-2020-0404](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0404)