

纳秒激光制备仿生超亲水不对称双轨表面及其液滴/气泡操控应用

顾剑锋¹, 方金鹏², 李传宗³, 王悦², 顾志祥⁴, 肖轶^{4*}

¹南通科技职业学院机电与交通工程学院, 江苏 南通 226000;

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

³阜阳师范大学计算机与信息工程学院, 安徽 阜阳 236037;

⁴南通职业大学机械工程学院, 江苏 南通 226000

摘要 受仙人掌锥形刺和长嘴鸟喙单向运输液滴现象的启发,利用纳秒激光烧蚀技术,在钛片表面上制备了一种简便有效的液滴和气泡操控平台——超亲水不对称双轨(SHADR)。利用静态各向异性结构产生的拉普拉斯压力梯度,SHADR不仅可以实现液滴的自发单向运输,还可以实现水下气泡的单向运输。定量研究了单轨道宽度、分支角等结构参数对液滴和气泡运输性能的影响,并对简化的力学模型进行了分析。这种功能表面不仅操作简便,而且适用性广,可以应用于微流体和界面科学等领域。

关键词 激光技术; 纳秒激光; 微纳加工; 不对称结构; 液滴/气泡操控; 单向运输

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230606

1 引言

为了适应生态环境,自然界的生物呈现出各种特征。比如仙人掌表面均匀分布着锥形刺,而锥形刺的不对称结构产生的拉普拉斯压力差将驱动收集的水滴定向移动^[1];当水鸟喝水时,其上下颌骨的梯形不对称结构产生的拉普拉斯压差导致液滴不断地向口中移动^[2]。受到这些生物表面微结构的启发,科研人员制备了具有特殊润湿性的仿生功能表面,并将其应用到液体运输和微流体器件等方面^[3-6]。

近年来,仿生功能表面在微流体动态操控方面发挥了重要作用。其中,液滴和气泡作为常见的界面流体,其动力学现象得到了广泛关注^[7-9]。微液滴的混合、存储和定向运输等动力学行为,在液滴微反应器、细胞筛选、药物输运和释放以及生物化学合成等领域中具有重要的应用价值^[10-13]。而微气泡作为一种重要载体,在天然气采集、药物/基因靶向输运、海洋污染物处理等领域中有着重要的应用^[14-15]。因此,实现液滴和气泡的定向运输和有效收集具有重要的意义。Liu等^[16]通过蚀刻硅纳米柱和调整亲水性二氧化硅平面的面积,得到了从超疏水到亲水的润湿性梯度范围超过 150° 的表面,实现了液滴的定

向和长距离输送。Wang等^[17]采用具有驼峰阵列结构的商用碳纤维板,得到了在驼峰阵列上具有润湿梯度的纳米粗糙层,实现了液滴在低温和高湿环境下的定向驱动。上述策略都是基于表面润湿梯度实现液滴的定向运输,但这种浸润性各向异性的表面的润湿性能不稳定,且运输效率低。静态各向异性结构不仅表面性能稳定,也能够简单高效地驱动液滴。例如, Ma等^[18]提出了一种将超亲气润湿性与几何梯度结构相结合的策略,该策略可对气泡产生高驱动力和低滞后阻力,实现了定向和连续输送气泡的优越性能。Zhang等^[19]利用激光将聚甲基丙烯酸甲酯薄板切割成几何梯度形态,在非对称形态和低表面能氟化物注入表面的条件下,制造的非对称滑面适用于水下气泡的定向和连续输送。Feng等^[20]在铜线表面上制备了物理锥形结构,利用拉氏压力和湿润梯度的协同作用,实现了高效的液滴定向采集系统。Zhu等^[21]将不锈钢片与聚二甲基硅氧烷(PDMS)衬底进行简单的物理结合,构建了超疏水窄化双轨道(SNDR)系统,基于几何不对称引起的拉普拉斯压差,气泡在水下可以自发地、单向地传输。然而,这些静态各向异性结构是由多种材料复合制备的或是通过电化学腐蚀制备的,制备过程复

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-03-28; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 中央高校基本科研基金(WK2090000035, WK2480000005)、江苏省高校“青蓝工程”项目(2019)、南通市基础科学研究项目(JC2020079)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20191209)、江苏省优秀科技创新团队项目(2021-52)

通信作者: *xiaoyiphd@163.com

杂并且容易造成环境污染,作用对象比较单一,应用范围受到限制。因此,通过简单的方式实现液滴和气泡的快速、自发的定向运输,实现操作对象多元化,拓宽功能表面的应用范围,仍然是挑战。

本文提出了一种静态各向异性结构,通过纳秒激光在钛片表面上烧蚀形成超亲水不对称双轨(SHADR)结构。基于 SHADR 不对称结构产生的拉普拉斯压力梯度,液滴和气泡可自发单向传输。研究了不同结构参数对液滴和气泡运输性能的影响,并分析了液滴和气泡运输时的受力情况。这种功能表面可应用于微流体操纵、生物医学等领域。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

本实验所用的钛片的纯度(质量分数)为 99.9%,厚度为 0.5 mm,面积为 50 mm×15 mm。使用商用超疏水试剂增强钛片表面的疏水性。台式超声波清洗器用来清洗钛片表面杂质,其超声频率为 40 kHz,超声功率为 250 W,加热功率为 800 W。

2.2 加工系统及表征设备

采用纳秒光纤激光打标机在钛片表面进行垂直交叉线扫描以增加粗糙度,交叉线间距为 50 μm,激光功率、加工次数、扫描速度分别设置为 6 W、3、1 mm/s;在钛片表面进行线扫描以制备不对称微结构,线间距为

20 μm,激光功率、加工次数、扫描速度分别设置为 0.6 W、1、10 mm/s。利用接触角测量系统测量 5 μL 水滴在钛片表面上的接触角,表征不同结构的钛片表面润湿性。为了保证测量的准确性,我们在同一表面的 5 个不同区域分别测量接触角,并对每个点的测量结果取平均值以作为最终值。光学图像由高速电荷耦合设备相机拍摄。每次运输时至少独立测量 5 次并取平均值。

2.3 SHADR 结构的制备

利用纳秒光纤激光打标机在厚度为 500 μm 的光滑钛片表面进行垂直交叉线扫描,得到具有微纳米结构的粗糙表面。接着,对粗糙的钛片表面进行超疏水改性,增强表面疏水性并降低表面黏附性。最后利用纳秒光纤激光打标机在改性后的超疏水表面进行线扫描,加工长度为 40 mm 和窄端间距为 1 mm 的超亲水双轨道。

3 结果与讨论

本实验通过使用纳秒激光直接烧蚀钛片的方式制备了超亲水不对称双轨结构,制备过程如图 1(a)所示。加工前,将钛片放在去离子水中超声清洗 10 min 以去除表面杂质。图 1(b)定义了 SHADR 结构的参数,包括单轨道宽度(w)、分支角(α)、窄端间距(d)、宽端间距(D)。通过高倍扫描电镜观察,可以发现:未加工的钛片表面光滑平整,并且水滴接触角(WCA)约为 13.1°(图 1(c));激光加工后钛表面的粗糙度增加,钛表面变为超亲水表

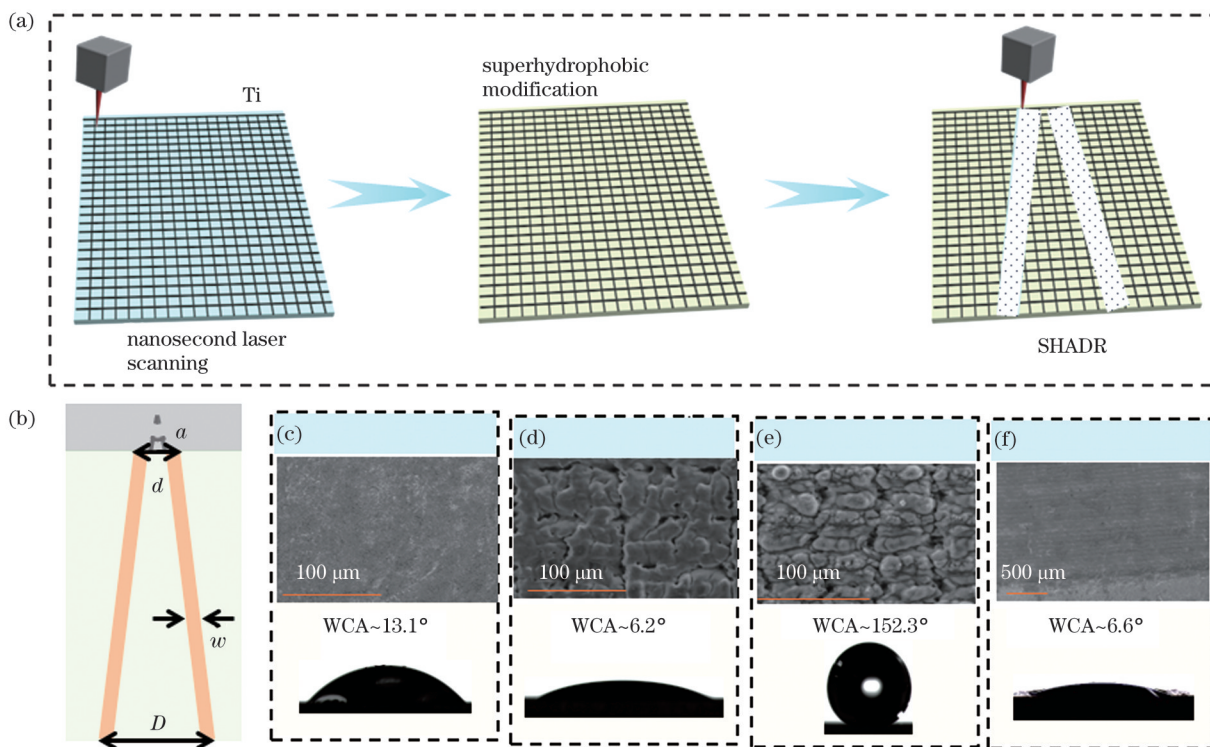


图 1 SHADR 结构的制备过程及形貌表征。(a)SHADR 结构的制备流程;(b)SHADR 结构的参数;(c)原始钛表面及润湿性;(d)激光加工后的钛表面及润湿性;(e)超疏水改性后的钛表面及润湿性;(f)SHADR 表面及润湿性

Fig. 1 Preparation process and morphology characterization of SHADR structure. (a) Preparation process of SHADR structure; (b) parameters of SHADR structure; (c) original Ti surface and wettability; (d) Ti surface and wettability after laser machining; (e) Ti surface and wettability after superhydrophobic modification; (f) SHADR surface and wettability

面,水滴接触角仅为 $\sim 6.2^\circ$ (图 1(d))。在平滑表面上喷涂超疏水涂层,超疏水涂层主要靠化学活性附着在基底表面,容易被损坏,而基底表面粗糙度的增加会增大基底表面与超疏水涂层间的接触面积,这将有助于提高超疏水涂层在基底表面上的附着力,减少涂层的损失^[22]。将超疏水试剂均匀喷涂在激光加工后的钛表面上,干燥后表面上形成非常薄的氟膜层,在氟膜层的作用下钛片表面水接触角达到 $\sim 152.3^\circ$ (图 1(e))。使用纳秒激光在改性后的钛表面上进行线扫描,形成的超疏水涂层会被激光烧蚀掉,此时水接触角为 $\sim 6.6^\circ$ (图 1(f))。

在仙人掌锥形刺启发下制备的 SHADR 结构可以实现液滴的单向运输,可应用于微流体领域。如图 2(a) 所示,由于双轨道为超亲水表面,液滴容易被粘附在 SHADR 结构表面,并在拉氏压差的作用下从宽端运动至窄端;相反,液滴在窄端出现钉扎现象,无法实现运输。图 2(b) 展示了 20 μL 液滴在分支角 α 为 4° 的 SHADR 结构上的动态运输过程,可以看出,在 SHADR 结构上液滴的水平位置变化明显。为了阐明液滴自发单向运输的机理,我们进行了机理分析。如图 2(c) 所示,将液滴滴加在用去离子水预润湿后的 SHADR 结构上,不对称轨道结构引起拉普拉斯压差,因此可以观察到液滴的单向运动。为了方便讨论分析,该模型不考虑重力引起的液滴变形。液滴

运动主要受到拉普拉斯压力梯度引起的驱动力(F_L)及阻碍液滴运动的滞后阻力(F_H)的作用,因此液滴自发地从不对称结构的宽端向窄端运动。双轨道上固-液接触线的结构如图 2(c) 所示,其中角度 θ_1 和 θ_2 分别表示液滴的右边和左边对应的接触角,为了描述液滴的位置,设 x 为液滴右边到分支角顶角的距离, l 为横截面液滴接触区的长度。液滴右边和左边具有不同的曲率,曲率半径分别标记为 R_1 和 R_2 。在这种假设下,经过几何分析可以得到曲率 R_1 和 R_2 分别为

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta_1\right)}{x \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} + \theta_2\right)}{(l+x) \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (2)$$

根据 Young-Laplace 方程可以进一步得到液滴右边和左边受到的拉普拉斯压强,分别定义为 P_1 和 P_2 ^[23-24]:

$$P_1 = \frac{2\gamma \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta_1\right)}{x \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

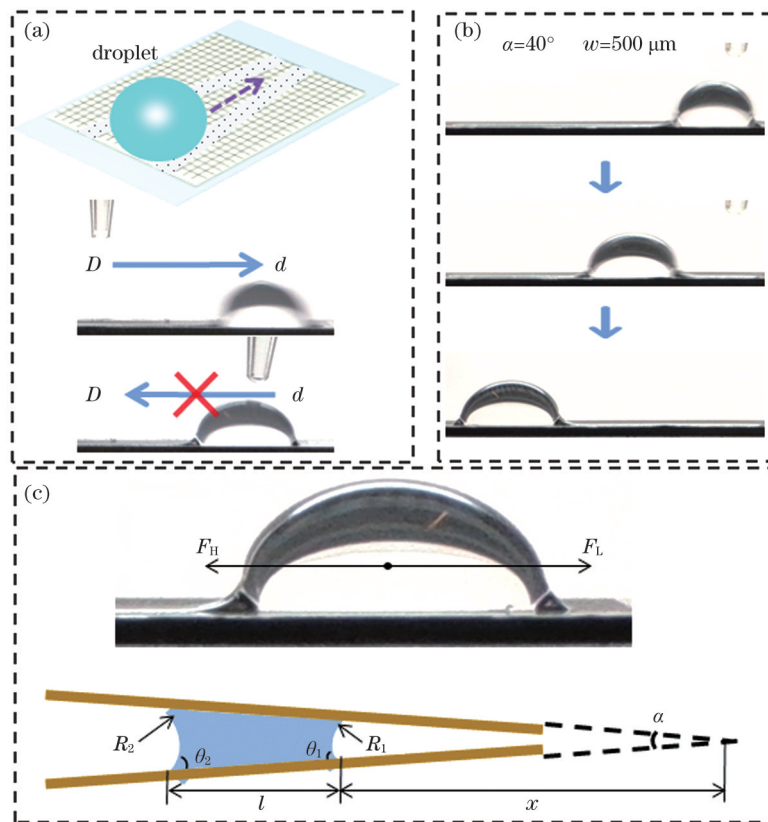


图 2 液滴运输及其机理解释。(a)液滴运输示意图;(b)运输过程的顺序图像;(c)自发运输机理分析

Fig. 2 Droplet transport and its mechanism explanation. (a) Schematic of droplet transport; (b) sequential images of transport process; (c) mechanical analysis of spontaneous transport

$$P_2 = \frac{2\gamma \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \theta_1\right)}{(l+x) \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (4)$$

式中： γ 为液滴与周围介质界面的表面张力系数。

在液-气界面处液体形成凹液面，当 P_2 小于 P_1 时，液滴会向窄端移动。假设不考虑接触角滞后，可以用接触角 θ 表示 θ_1 和 θ_2 ，由式(3)、(4)可以得到液滴两边产生的压差(ΔP)：

$$\Delta P = \frac{4\gamma \cos \theta}{\alpha} \left(\frac{1}{x}\right) - \frac{1}{l+x} + 2\gamma \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{l+x}\right) \sin \theta. \quad (5)$$

液滴右侧与分支角顶角之间的距离远大于横截面液滴的长度，即 $x \gg 1$ ，那么简化公式得到驱动力 F_L ^[25]近似为

$$F_L \approx 2\alpha\gamma l \cdot \sin \theta. \quad (6)$$

由式(6)可知，驱动力随分支角 α 和液滴截面宽度 l 的增大而增大。后续不同参数下液滴运输速度的实验测量结果也验证了理论模型的预测结果。

滞后阻力可以用一个经典的拖曳阻力模型来描述，即Furmidge方程^[26]：

$$F_H = \gamma \cdot W_{dp} (\cos \theta_R - \cos \theta_A), \quad (7)$$

式中： W_{dp} 为液滴垂直于滑动方向的界面宽度； θ_R 和 θ_A 分别为后退接触角和前进接触角。当驱动力 F_L 大于滞后阻力 F_H 时，液滴会自发地运动。这种利用拉普拉斯压差单向运输液滴的系统在微流控和化学反应方面

有潜在的应用。

利用高速电荷耦合设备相机以120 frame/s的速率记录液滴运输的过程，系统地量化了不同参数(分支角 α 、单轨道宽度 w 和液滴体积 V)下水平SHADR结构上液滴的传输性能。图3(a)展示了单轨道宽度 w 为500 μm 时在不同分支角 α 下20 μL 液滴的位移与时间(即位移-速度)的关系。当 α 为4°时，系统运输液滴的能力比较弱，在0.2 s时液滴运输距离为~8.2 mm；当 α 为10°时，系统运输液滴的能力明显增强，在0.16 s时液滴运输距离为~11 mm。可以看出，随着 α 的增加，同一时间内液滴的运输距离增加。这是因为随着 α 的增加，由式(6)得出拉普拉斯压力梯度引起的驱动力增大，表明 α 越大系统运输液滴的能力越强。如图3(b)所示，在 α 为10°的条件下研究了不同单轨道宽度 w 的SHADR结构运输液滴的能力。随着轨道宽度的增加，同一时间内20 μL 液滴的运输距离增加。当 w 为600 μm 时，液滴在0.13 s内的运输距离为~10.2 mm；当 w 为700 μm 时，液滴在0.13 s内的运输距离达到了~12 mm。图3(c)展示了分支角 α 为10°、单轨道宽度 w 为500 μm 的SHADR结构运输不同体积液滴的能力。随着液滴体积 V 的减小，同一时间内液滴运输距离增加。当液滴体积为30 μL 时，在0.2 s内液滴的运输距离为~9.9 mm；当液滴体积为50 μL 时，在0.2 s内液滴的运输距离仅为~7.2 mm。除此之外，SHADR结构还表现出良好的稳定性，经过20次循环表面依然可以实现液滴的单向运输(图3(d))。

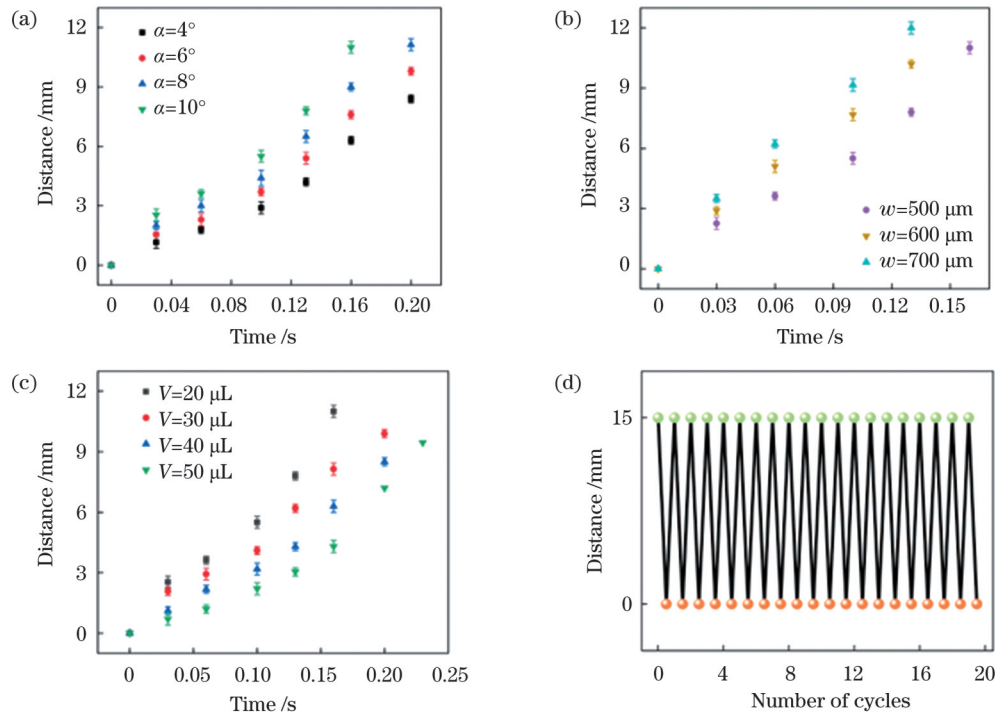


图3 不同参数下SHADR结构上液滴的传输性能。(a) α ;(b) w ;(c) V ;(d)SHADR结构稳定性测试

Fig. 3 Droplet transport performances on SHADR structure under different parameters. (a) α ; (b) w ; (c) V ; (d) SHADR structural stability test

如图 4(a)所示,将样品放入水槽中,SHADR 结构双轨道之间的超疏水表面具有良好的拒水性,其表面微结构困住的微气泡形成了一层空气膜,从而可以轻易捕获气泡;相反,SHADR 结构双轨道的亲水性会使轨道内充满液体,将气泡隔离在双轨道之间的超疏水表面,阻碍气泡偏离轨道。中间的超疏水不对称通道具有良好的亲气性和定向运输能力,可以成功捕获气泡,且在没有任何外部操纵的情况下,被拉普拉斯压力梯度驱动的水下气泡能自发地从不对称结构的窄端运动到宽端。为确定运输气泡的能力,图 4(b)显示了不同分支角(α_1 和 α_2)下气泡自发定向运输的速度。

当分支角为 2° 时,气泡的运输速度为 ~ 105.5 mm/s;当分支角增加至 10° 时,气泡的运输速度达到 ~ 239.4 mm/s。可以看出,随着分支角的增加,气泡在超疏水楔形通道上的运输速度增加。如图 4(c)所示,当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时,气泡的后曲率半径 R_1 的变化微小,即分支角为 α_1 时气泡的前半径 R_{11} 与后半径 R_{12} 大致相等,而前曲率半径 R_2 的变化比较明显,即分支角为 α_2 时气泡的前半径 R_{21} 小于后半径 R_{22} 。结果表明, R_2 的增加会导致驱动气泡运输的拉普拉斯压力增加,表明分支角越大,SHADR 结构的超疏水梯形通道运输气泡的能力越强。

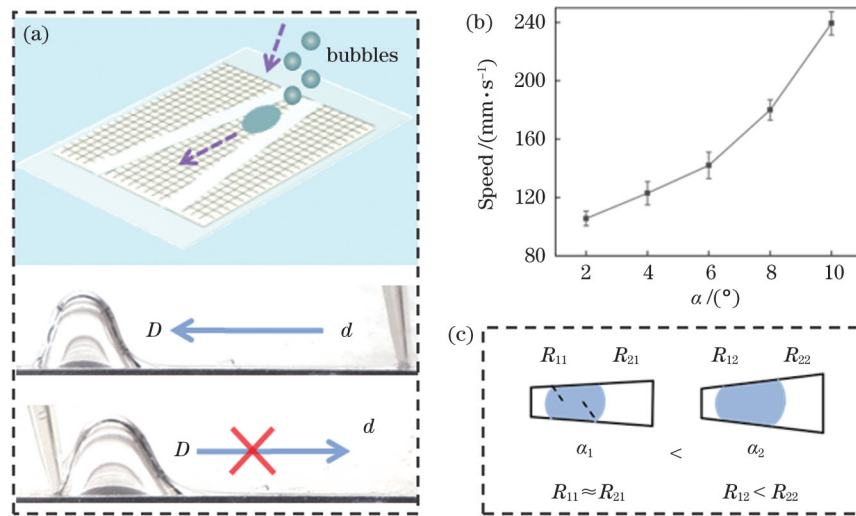


图 4 水下气泡运输及参数对运输的影响。(a)气泡运输示意图;(b)在运输过程中气泡的平均速度;(c)气泡半径曲率的变化
Fig. 4 Underwater bubble transport and effects of parameters on transport. (a) Schematic of bubble transport; (b) average speed of bubbles during transportation; (c) variation of bubble radius curvature

4 实验应用

对亲水轨道进行改良,在经过激光粗糙度处理的

钛片上加工出图 5 所示的类漏斗状轨道。在轨道两边宽口处同时滴入一滴颜色不同的液滴,两液滴在 SHADR 结构双轨道中受到拉普拉斯压力梯度引起的

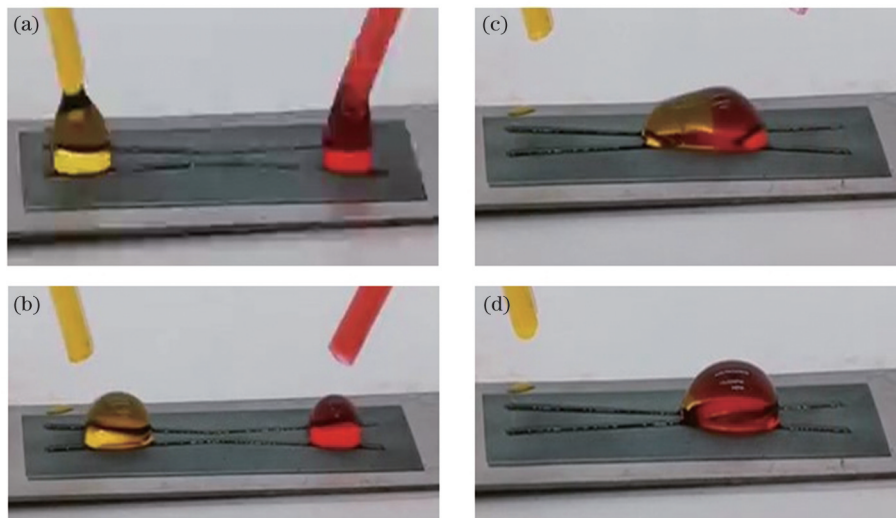


图 5 微液滴的反应过程。(a)液滴从滴管中释放;(b)两液滴开始向中间运动;(c)两液滴开始汇合;(d)液滴汇合后颜色最终均匀
Fig. 5 Reaction process of microdroplets. (a) Droplet is released from dropper; (b) two droplets begin to move towards middle; (c) two droplets begin to converge; (d) color is finally uniform after droplet convergence

驱动力的作用,逐渐向中间靠拢,最终接触汇合成一滴大液滴。

5 结 论

使用纳秒激光在钛片表面上制备了一种静态各向异性结构——超亲水不对称双轨道。由梯形不对称轨道引起的拉普拉斯压差驱动气泡/液滴自发地单向运输。液滴可以自发地从SHADR结构的宽端运动到窄端,气泡可以从窄端运动到宽端。研究结果为实现液滴/气泡在没有外部操纵的情况下在水平表面的定向连续运输提供了一种创新的途径,在微流体操纵方面具有广泛的应用前景,特别是在化学反应、废水处理等领域中。

参 考 文 献

- [1] Ju J, Bai H, Zheng Y M, et al. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1-6.
- [2] Li J, Guo Z G. Spontaneous directional transportations of water droplets on surfaces driven by gradient structures[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(29): 13814-13831.
- [3] 李晶, 丛居平, 郭楠, 等. 超疏水低黏附自清洁类蝶鳞片仿生结构的激光构筑与力学机理[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1602009.
Li J, Cong J P, Guo N, et al. Laser construction and mechanical mechanism of bionic structure of super-hydrophobic low-adhesion self-cleaning butterfly-like scales[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602009.
- [4] 李江, 高筱钧, 付作立, 等. 超快激光仿生复眼加工研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002704.
Li J, Gao X J, Fu Z L, et al. Research advancement on fabrication of artificial compound eye using ultrafast laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002704.
- [5] 王龙, 汪刘应, 许可俊, 等. 碧凤蝶鳞片的微纳结构及其光学特性[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0523002.
Wang L, Wang L Y, Xu K J, et al. Micro-nano structure and optical characteristics of achillidesbianor Cramer scales[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0523002.
- [6] 杨成娟, 杨雪, 王蒙, 等. 仿生超疏水表面在微夹持器钳口端面的应用研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002602.
Yang C J, Yang X, Wang M, et al. Application of bionic superhydrophobic surface in jaw end face of microgripper[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002602.
- [7] Gogolides E, Ellinas K, Tserepi A. Hierarchical micro and nano structured, hydrophilic, superhydrophobic and superoleophobic surfaces incorporated in microfluidics, microarrays and lab on chip microsystems[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 135-155.
- [8] Bhushan B, Jung Y C, Koch K. Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, 367 (1894): 1631-1672.
- [9] Liu M J, Wang S T, Jiang L. Nature-inspired superwettability systems[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(7): 1-17.
- [10] Mumm F, van Helvoort A T J, Sikorski P. Easy route to superhydrophobic copper-based wire-guided droplet microfluidic systems[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(9): 2647-2652.
- [11] Ranella A, Barberoglou M, Bakogianni S, et al. Tuning cell adhesion by controlling the roughness and wettability of 3D micro/nano silicon structures[J]. *Acta Biomaterialia*, 2010, 6(7): 2711-2720.
- [12] Lima A C, Mano J F. Micro/nano-structured superhydrophobic surfaces in the biomedical field: part II: applications overview[J]. *Nanomedicine*, 2015, 10(2): 271-297.
- [13] Watson G S, Green D W, Schwarzkopf L, et al. A gecko skin micro/nano structure—a low adhesion, superhydrophobic, anti-wetting, self-cleaning, biocompatible, antibacterial surface[J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, 21: 109-122.
- [14] Mu X, Zheng W F, Sun J S, et al. Microfluidics for manipulating cells[J]. *Small*, 2013, 9(1): 9-21.
- [15] Marui T. An introduction to micro/nano-bubbles and their applications[J]. *Journal of Systemics Council*, 2013, 11(4): 68-73.
- [16] Liu C R, Sun J, Li J, et al. Long-range spontaneous droplet self-propulsion on wettability gradient surfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [17] Wang L, Shi W W, Hou Y P, et al. Droplet transport on a nano- and microstructured surface with a wettability gradient in low-temperature or high-humidity environments[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2015, 2(9): 1500040.
- [18] Ma H Y, Cao M Y, Zhang C H, et al. Directional and continuous transport of gas bubbles on superaerophilic geometry-gradient surfaces in aqueous environments[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(7): 1705091.
- [19] Zhang C H, Zhang B, Ma H Y, et al. Bioinspired pressure-tolerant asymmetric slippery surface for continuous self-transport of gas bubbles in aqueous environment[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 2048-2055.
- [20] Feng S L, Wang Q Q, Xing Y, et al. Continuous directional water transport on integrating tapered surfaces[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(9): 2000081.
- [21] Zhu S W, Bian Y C, Wu T, et al. Spontaneous and unidirectional transportation of underwater bubbles on superhydrophobic dual rails [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(9): 093706.
- [22] Zhang X S, Zhu F Y, Han M D, et al. Self-cleaning poly (dimethylsiloxane) film with functional micro/nano hierarchical structures[J]. *Langmuir*, 2013, 29(34): 10769-10775.
- [23] Chen H, Tang T, Amirfazli A. Liquid transfer mechanism between two surfaces and the role of contact angles[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(15): 2503-2507.
- [24] Zhuang K, Lu Y, Wang X L, et al. Architecture-driven fast droplet transport without mass loss[J]. *Langmuir*, 2021, 37(43): 12519-12528.
- [25] Lei W W, Hou G L, Liu M J, et al. High-speed transport of liquid droplets in magnetic tubular microactuators[J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): eaau8767.
- [26] Yang X L, Song J L, Zheng H X, et al. Anisotropic sliding on dual-rail hydrophilic tracks[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(6): 1041-1050.

Superhydrophilic Asymmetric Dual-Rail Surfaces Prepared by Nanosecond Laser and Droplet/Bubble Manipulation Applications

Gu Jianfeng¹, Fang Jinpeng², Li Chuanzong³, Wang Yue², Gu Zhixiang⁴, Xiao Yi^{4*}

¹*College of Electromechanical and Transportation Engineering, Nantong Vocational College of Science & Technology, Nantong 226000, Jiangsu, China;*

²*School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

³*School of Computer and Information Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, Anhui, China;*

⁴*College of Mechanical Engineering, Nantong Vocational University, Nantong 226000, Jiangsu, China*

Abstract

Objective In recent years, bionic functional surfaces have played an important role in the manipulation of microfluidic dynamics. Among these, droplets and bubbles have been extensively studied as common interfacial fluids owing to their important application in fields such as droplet microreactors and cell screening. Therefore, it is highly meaningful to achieve a targeted transport and effective collection of droplets and bubbles. Researchers have achieved stable surface-wetting properties, as well as the ability to drive droplets and underwater bubbles simply and efficiently by preparing statically anisotropic structures. However, these static anisotropic structures are prepared by composite structures composed of multiple materials or by electrochemical etching. The preparation process is complex, susceptible to environmental pollution, and only a single target is considered, which significantly limits the application range. In this study, a static anisotropic superhydrophilic asymmetric double rail (SHADR) structure is prepared on the surface of a titanium sheet via nanosecond laser ablation. Based on the Laplace pressure gradient generated by the asymmetric structure, the SHADR structure achieves a spontaneous unidirectional transport of liquid droplets and underwater bubbles. This functional surface provides new ideas for microfluidic manipulation, biomedicine, and other fields.

Methods The titanium sheet is ultrasonically cleaned in deionized water for 10 min to remove surface impurities before processing. A nanosecond fiber laser is used to vertically scan the surface of the titanium sheet to increase the surface roughness. Subsequently, the samples are ultrasonically cleaned once again and modified with a commercial superhydrophobic reagent to enhance the surface hydrophobicity and reduce the surface adhesion. Finally, the modified superhydrophobic surface is scanned using a nanosecond fiber laser-marking machine, and the SHADR structure with a length of 40 mm and an end spacing of 1 mm is processed. The contact angles of 5 μ L water droplets on the surface of the titanium sheet are measured using a contact angle measurement system to characterize the surface wettability of the titanium sheet with different structures. The optical images of the droplets and motion of bubbles are captured by a high-speed camera.

Results and Discussions Inspired by the conical spines of a cactus and the long-billed beak of a bird, a simple and effective droplet and underwater bubble manipulation platform, that is, a SHADR structure, is prepared on the surface of a titanium sheet via nanosecond laser ablation (Fig. 1). Using the Laplace pressure gradient generated by the static anisotropic structure, a SHADR structure achieves the spontaneous unidirectional transport of both droplets (Fig. 2) and underwater bubbles (Fig. 4). In this study, the effects of the structural parameters, such as the single-rail width (w) and branching angle (α), on the transport performances of the droplets and underwater bubbles are quantitatively investigated (Fig. 3) and a simplified mechanical model is analyzed.

Conclusions In this study, a simple and effective droplet and underwater bubble manipulation platform is prepared on the surface of a titanium sheet using nanosecond laser ablation. The SHADR structure enables the anisotropic spontaneous transport of droplets and bubbles based on the Laplace pressure difference. The droplet transport is recorded by a high-speed charge-coupled device camera, systematically quantifying the droplet transport performances in the horizontal SHADR structure under different parameters (branching angle, single rail width, and bubble volume). This functional surface is not only simple to operate but will also have wide applicability in the fields of microfluidics and interface science.

Key words laser technique; nanosecond laser; micro/nano processing; asymmetric structures; droplet/bubble manipulation; unidirectional transport