

# 基于超快激光的浸润性可控表面无泵运输轨迹制备

成健<sup>1,2</sup>, 曹佳丽<sup>1</sup>, 张恒超<sup>1</sup>, 吴颖<sup>1</sup>, 郑重<sup>1</sup>, 刘顿<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>2</sup>湖北工业大学中英联合超快激光加工研究中心, 湖北 武汉 430068

**摘要** 为实现基于超快激光铝板浸润性梯度轨迹上的液滴无泵运输, 进一步提高液滴运动速度, 利用纳秒激光器在 1050 铝板上制备出超疏水表面, 再通过飞秒激光器在超疏水表面制备出楔形超亲水轨迹。采用接触角测量仪、电子扫描显微镜和傅里叶红外光谱仪测量样品表面的浸润性、表面形貌和化学成分, 通过高速摄像机记录液滴在水平面和 30°斜面上的运动情况。结果表明: 通过激光方法可在铝板上制备出浸润性循环转变的表面, 接触角由 0°变为 164.6°, 再由 164.6°变为 0°; 随着超亲水轨迹楔角  $\alpha$  由 4°变为 10°, 液滴的最大速度由 300 mm/s 变为 500 mm/s; 随着样品的加热环境由空气变为真空, 样品滚动角由大于 30°降为 3.04°, 液滴的平均速度由 50 mm/s 变为 100 mm/s。增大轨迹楔角或降低超疏水表面黏附力, 都可以有效提高液滴在浸润性梯度轨迹上的运动速度。

**关键词** 激光技术; 1050 铝板; 可控浸润性; 表面粘附力; 无泵运输

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102012

## Preparation of Pump-Free Transport Trajectory on Infiltration Controllable Surface Using Ultrafast Laser

Cheng Jian<sup>1,2</sup>, Cao Jiali<sup>1</sup>, Zhang Hengchao<sup>1</sup>, Wu Ying<sup>1</sup>, Zheng Zhong<sup>1</sup>, Liu Dun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

<sup>2</sup>Sino-UK Joint Ultrafast Laser Processing Research Center, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

**Abstract** This study aims to achieve pump-free transport of droplets along an infiltrating gradient trajectory on an aluminum plate by using ultrafast lasers and further increase the speed of the droplet movement. First, a superhydrophobic surface is prepared on a 1050 aluminum plate by using a nanosecond laser. Then, a wedge-shaped superhydrophilic trajectory is prepared on this superhydrophobic surface by using a femtosecond laser. The wettability, surface topography, and chemical composition of the sample surface are measured by using a contact angle measuring instrument, an electron scanning microscope, and a Fourier infrared spectrometer, respectively. The movement of droplets on the horizontal plane and the plane with a slope of 30° is recorded by using a high-speed camera. Results show that a surface with wettability-recycling property could be prepared on an aluminum plate by using a laser method. The contact angle could change from 0° to 164.6° and then from 164.6° to 0°. The hyper hydrophilic trajectory wedge angle changes from 4° to 10°, whereas the maximum droplet velocity changes from 300 to 500 mm/s. The sample heating environment changes from air to vacuum, sample rolling angle reduces from above 30° to 3.04°, and average droplet velocity changes from 50 to 100 mm/s. Therefore, it can be concluded that increasing the trajectory wedge angle or reducing the adhesion of the superhydrophobic surface can effectively improve the movement speed of droplets along the wettability gradient trajectory.

**Key words** laser technique; 1050 aluminum plate; controllable wettability; surface adhesion; pump-free transport

**OCIS codes** 140.3390; 240.5450; 240.6648

收稿日期: 2019-05-31; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51775176)、湖北省教育厅项目(T201405)、湖北工业大学 2019 年度博士科研启动基金(BSQD2019001)、航空科学基金(201818X5002)

\* E-mail: dun.liu@hbut.edu.cn

# 1 引 言

浸润性在许多高新技术领域和人们的日常生活中具有至关重要的作用。具有超疏水性的界面材料给人们的日常生活及工农业生产带来极大的便利和高附加值<sup>[1]</sup>。浸润性由固体表面的微观几何结构和化学组成共同决定<sup>[2]</sup>。目前,研究人员主要通过两种途径制备超疏水表面:一种是在基体上构造特殊的粗糙表面,然后用化学物质进行修饰以降低表面能;另一种是在低表面能材料表面构造粗糙表面来得到超疏水表面。具体的方法有激光辐照<sup>[3]</sup>、电化学刻蚀法<sup>[4-5]</sup>、物理化学气相沉积法<sup>[6]</sup>、等离子体聚合合法<sup>[7]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[8]</sup>和层层自组合法等<sup>[9]</sup>。虽然这些方法都能制备出超疏水或超亲水表面,但有些方法存在着污染严重、效率低、成本高等缺点。采用激光技术可以直接制备出超疏水和超亲水表面,这种技术具有效率高、污染小等特点。

在仿生超疏水表面的制备成为研究热点的同时,研究人员越来越多地开始关注制备具有超疏水与超亲水可逆转换的表面,这种表面在微流体元器件、微结构机电系统和人工智能防污、防水涂层等领域具有非常广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。混合自组装单层膜技术<sup>[11]</sup>是一项新型的组装技术,这项技术中的溶液是由两种不同的硫醇分子混合而成的。用此溶液浸泡铜时,两种不同的硫醇分子会同时对铜表面进行修饰,修饰物质的组成可以通过调节溶液中两种不同的硫醇分子的含量来进行调节。李昕等<sup>[12]</sup>采用原位化学氧化法制备出了聚苯胺-涤纶复合导电织物,其颜色和浸润性都具有pH响应性,可快速响应外界酸度的变化。

目前,研究人员利用表面浸润性的空间梯度制备出可以驱动液滴运输的表面。在这种表面上,液滴沿浸润性增大的方向受到不平衡的力,使液体在基板上流动<sup>[13-15]</sup>。Bliznyuk等<sup>[16]</sup>采用光刻方法制作出各向异性图案,其产生的梯度表面张力可以驱动微滴运动,液滴的最大速度可达14 mm/s; Schutzius等<sup>[17]</sup>采用STC(surface tension confined)通道使低表面张力液体沿毛细管作直线运动,速度接近30 mm/s。尽管这些工作证明了液体可以在平面上快速流动,但它没有实现芯片实验室(lab on a chip)应用中所期望的能处理复杂流动的任务。中国科学技术大学的史杨等<sup>[18]</sup>归纳了飞秒激光器在加工微流控芯片方面的应用,为微流控芯片的制备提供了参考。Chen等<sup>[19]</sup>在*Nature*上发表论文,报

道了猪笼草口缘表面水运输的特殊形成机制,揭示了超浸润性是确保液体无动力定向运输的必要条件。

本文利用激光技术开展了1050铝基浸润性可控表面无泵运输轨迹的研究,基于超快激光,在1050铝板上制备出浸润性可控的表面,实现了液滴的无泵运输。分析了样品浸润性梯度、超疏水表面黏附力对液滴运动速度的影响。本文为提高浸润性梯度表面液滴的运动速度提供了理论依据,对生化分析、微流体系统等具有一定的参考意义。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

实验材料为1050铝板(尺寸为50 cm×50 cm×0.3 mm)。将铝板依次放入丙酮、去离子水中采用超声波清洗15 min,以去除铝板表面的杂质和油污。根据激光处理后加热方式的不同,将铝板分为A、B两组,A组铝板的加热方式为真空加热,B组铝板的加热方式为空气加热。

### 2.2 实验过程

使用激光加工的方式在超疏水基板上制作各种形状和尺寸的超亲水图案,加工过程如图1所示。首先采用G4纳秒激光器扫描纯铝板表面,实验参数如下:功率为74 W,输出波长为1064 nm,脉宽为26 ns,扫描速度为5575 mm/s,重复频率为450 kHz。然后将A组样品放入100℃的DZG-6020型台式电热真空干燥烤箱中,抽真空,在真空氛围中加热;将B组样品放入100℃烤箱中,不抽真空,在空气氛围中加热。采用DropMeterTM Experience A-300接触角测量仪检测样品表面的浸润性;采用Contour GK-K0表面轮廓仪和Sirion200场发射扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面形貌;然后采用Libra-HE飞秒激光器在该超疏水表面上加工超亲水图案,飞秒激光器的功率靠多级半波片和分光棱镜组合进行控制,聚焦光的平均功率范围为80~800 mW,实验选取可控范围内的最低功率80 mW。其他实验参数如下:输出波长为800 nm,脉宽为100 fs,扫描速度为200 mm/s,重复频率为10 kHz。使用PHOTRON FastCam-APX RS高速摄像机记录液滴的运动,用冷光源(FOSTEC, 8375)照射样品。使用ADU3000P-H自动加液泵分配水滴,将针缓慢地放置在样品上方,使液滴以低速落在所需位置,水滴的惯性效应可忽略不计。

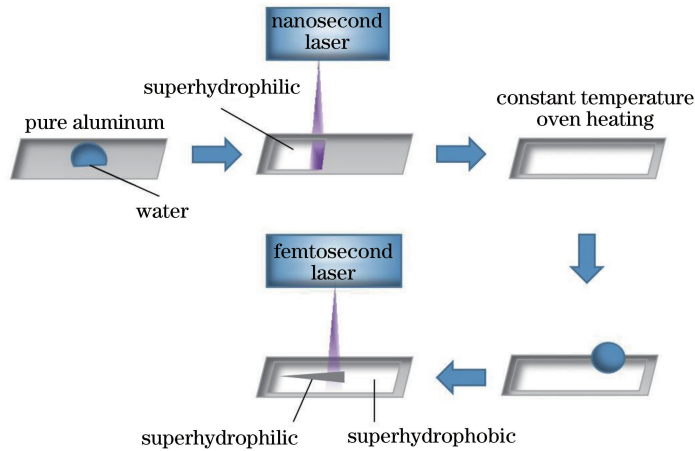


图 1 铝板表面的主要加工过程

Fig. 1 Main process of aluminum plate surface

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 激光器的选用

目前,已有研究者针对纳秒、皮秒、飞秒激光制备超疏水材料进行了相关研究<sup>[20]</sup>,上述激光均可使材料达到优异的超疏水效果。对于实验所采用的铝板,采用纳秒、皮秒、飞秒三种激光器加工超疏水表面时的最佳重复频率与扫描速度如图 2 所示。显然,纳秒激光在铝板表面加工超疏水表面的效率要比皮秒、飞秒激光高很多。所以,本实验选用纳秒激光器在铝板表面加工超疏水区域。

为了比较纳秒、飞秒激光加工超亲水区域对轨迹运输能力的影响,选择更优的激光加工超亲水区域。结果显示,样品经纳秒、飞秒激光加工后,接触角都为  $0^\circ$ ,都形成了超亲水表面,但液滴在轨迹上运动的形态却不一样。 $2 \mu\text{L}$  液滴在  $10^\circ$  斜面上的轨迹如图 3 所示,图 3(a)为  $2 \mu\text{L}$  液滴在纳秒激光加工超亲水样品上运动的照片,由于纳秒激光的热影响大,轨迹的整体粗糙度较大,液滴在进入轨迹瞬间浸润整个轨迹,不能维持滴状;图 3(b)为  $2 \mu\text{L}$  液滴

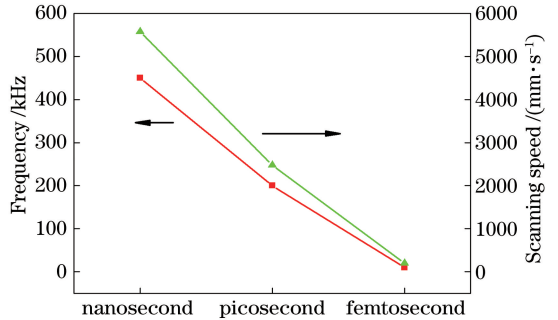


图 2 纳秒、皮秒、飞秒激光器在铝板表面加工超疏水表面时的重复频率和扫描速度

Fig. 2 Repetition frequency and scanning speed of nanosecond, picosecond, and femtosecond lasers when ultra-hydrophobic surface on aluminum plate surface is processed

在飞秒激光加工超亲水样品上运动的照片,同样大小的液滴,其与在纳秒激光加工超亲水样品上的形态完全不一样,由于轨迹的整体粗糙度较小,液滴始终维持滴状,在轨迹上运动的整个过程中,液滴体积基本没有损失。与纳秒激光相比,飞秒激光加工的超亲水样品运输效果更好。两种轨迹上液滴形态

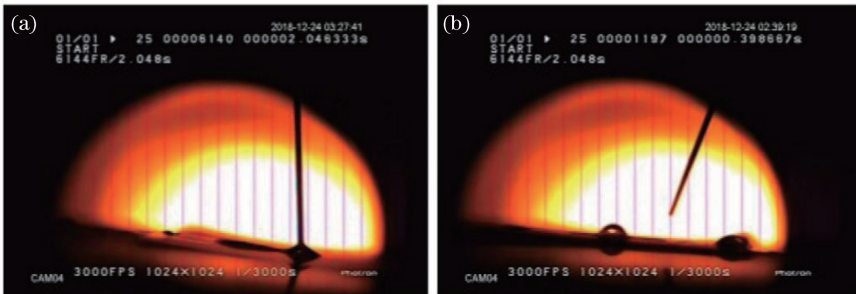


图 3  $2 \mu\text{L}$  液滴在纳秒、飞秒激光加工的超亲水样品上运动的照片。(a) 纳秒激光;(b) 飞秒激光

Fig. 3 Motion photographs of  $2\text{-}\mu\text{L}$  droplet on superhydrophilic sample processed by nanosecond and femtosecond laser, respectively. (a) Nanosecond laser; (b) femtosecond laser



之所以不一样,是因为飞秒激光功率越小,热效应越小,加工的样品粗糙度越小,液滴运输效果越好。如图4所示,飞秒激光加工样品表面的凸起要比纳秒激光加工样品表面的更少,并且更小,液滴在运动过程中,残留在凸起内的液滴更少。由此可见,飞秒激光加工热效应更小,加工出来的微

纳二级结构更清晰,液滴在运输过程中的损失更小,更有利于液滴的运输。与纳秒激光相比,飞秒激光具有更短的脉冲持续时间和更高的峰值功率,对材料表面的热作用很小。因此,为了尽量减少液滴在轨迹上运输时的损失,选用飞秒激光在铝板超疏水表面上加工超亲水区域。

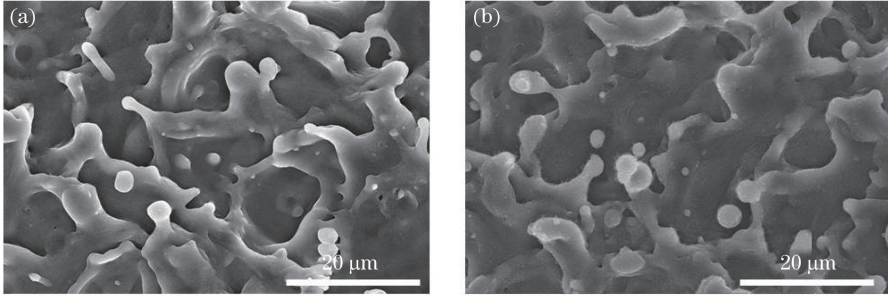


图4 纳秒激光、飞秒激光加工超亲水样品表面的SEM图。(a)纳秒激光;(b)飞秒激光

Fig. 4 SEM images of superhydrophilic sample surface processed by nanosecond and femtosecond laser.

(a) Nanosecond laser; (b) femtosecond laser

### 3.2 样品浸润性的可控分析

如图5所示,通过激光加工和加热处理,A组样品表面的静态接触角可实现超亲水→超疏水→超亲水的转换。样品表面的原始接触角为 $69.1^\circ$ ,如图5(a)所示;经纳秒激光器加工后,样品表面的接

触角由 $69.1^\circ$ 变为 $0^\circ$ ,形成超亲水表面,如图5(b)所示;超亲水样品在真空烤箱加热后,样品表面接触角由 $0^\circ$ 变为 $164.6^\circ$ ,形成超疏水表面,如图5(c)所示;飞秒激光器再次加工样品表面后,样品表面接触角由 $164.6^\circ$ 变为 $0^\circ$ ,形成超亲水表面,如图5(d)所示。

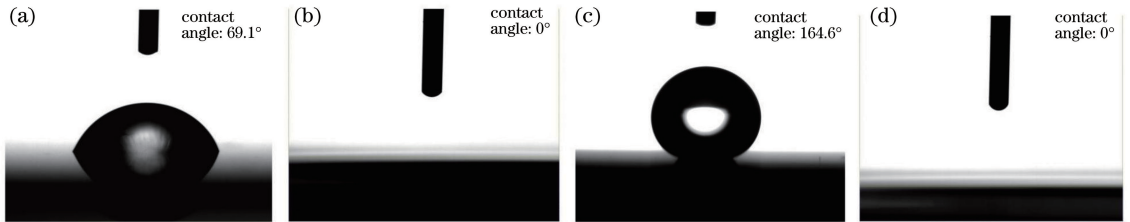


图5 各状态下样品表面的接触角。(a)原始样品;(b)纳秒激光加工后;(c)真空烤箱加热后;(d)飞秒激光加工后

(c) after heating in vacuum oven; (d) after femtosecond laser processing

固体表面浸润性由微观结构和表面自由能共同决定<sup>[21]</sup>,所制备的呈现超疏水和超亲水状态的样品的SEM图像如图6所示,可见,样品表面形貌没有

明显变化,因此可以推测铝基表面浸润性的改变主要由表面自由能决定。在激光加工铝板过程中,环境中存在充足的氧气,过量的氧可能会在铝板表面

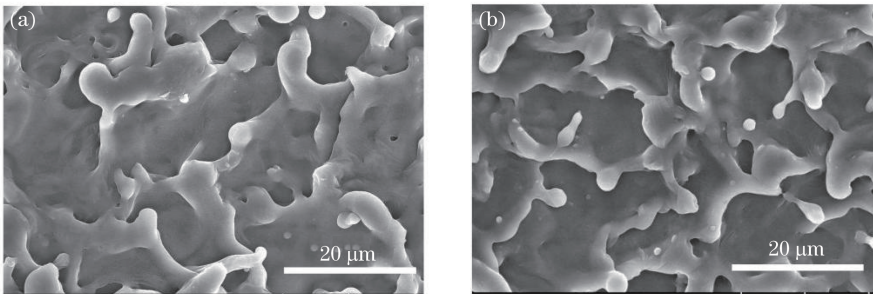


图6 呈超疏水和超亲水状态的激光加工铝基表面的SEM图。(a)呈超疏水状态;(b)呈超亲水状态

Fig. 6 SEM images of laser-processed aluminum-based surfaces in superhydrophobic and super-hydrophilic states.

(a) Superhydrophobic state; (b) super-hydrophilic state



生成一些与氧有关的缺陷基团,例如 O—的悬空键,这使得铝板表面具有较高的表面自由能。这些缺陷可通过形成一些弱键与水分子相连。由于这个原

因,铝板表面的润湿性从疏水性变为超亲水性<sup>[22-23]</sup>。因此,激光加工后,铝板表面会从超疏水状态变成超亲水状态。

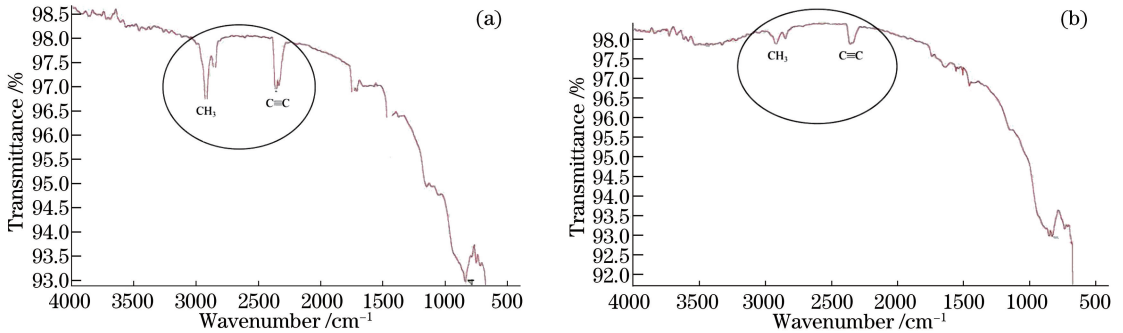


图 7 铝基样板在不同状态下的傅里叶红外光谱图。(a)亲水状态;(b)疏水状态

Fig. 7 Fourier infrared spectrum of aluminum matrix in different states. (a) Hydrophilic state; (b) hydrophobic state

利用傅里叶红外光谱仪对超亲水表面和超疏水表面进行元素分析,两种不同状态铝板的傅里叶红外光谱(FTIR)如图 7 所示。傅里叶红外光谱图显示,在亲水铝板表面,—CH<sub>3</sub>、C≡C 官能团峰形尖锐,含量低;在疏水铝板表面,—CH<sub>3</sub>、C≡C 官能团峰形宽,含量高。激光加工后将铝板静置于空气中,加工部分会吸收空气中的碳元素,与亲水铝板表面相比,疏水铝板表面含有较多的一CH<sub>3</sub>官能团,其中—CH<sub>3</sub>的表面能为 22~24 mN/m<sup>2</sup>,这些低表面能物质使样品经加热处理后,表面从超亲水状态变成超疏水状态<sup>[24]</sup>。

### 3.3 样品的黏附性分析

将经纳秒激光处理的样品放在真空或空气中加热后,样品的接触角、滚动角和表面粗糙度( $R_a$ )如表 1 所示。所谓接触角,是指在气、液、固三相交点

处所作的气-液界面的切线与固-液交界线之间的夹角。而滚动角是指液滴在倾斜表面上刚好发生滚动时,倾斜表面与水平面所形成的临界角度。测量时取液滴大小为 10  $\mu$ L,结果表明,两种样品表面的接触角都可达到 160°以上,但真空中加热样品的滚动角仅为 3.04°,空气中加热样品的滚动角大于 30°,如图 8 所示。可见,真空中加热样品的黏附力要比空气中的小很多。

表 1 纳秒激光加工的铝板被加热后的接触角与表面粗糙度  
Table 1 Contact angle and surface roughness of aluminum plate surface processed by nanosecond laser

Condition	Contact angle / (°)	Rolling angle / (°)	$R_a/\mu\text{m}$
Vacuum heating	164.56	3.04	0.688
Air heating	163.20	30.15	0.787

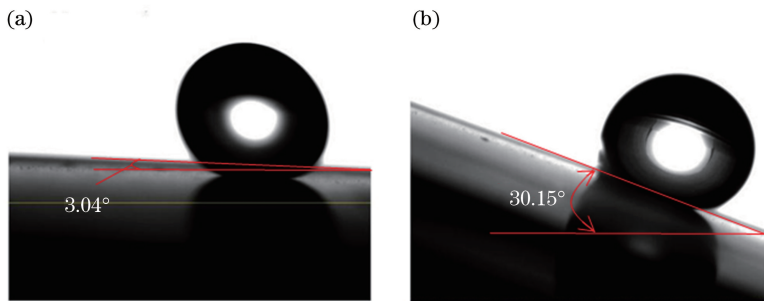


图 8 铝基超疏水基底的滚动角。(a)在真空中加热的样品;(b)在空气中加热的样品

Fig. 8 Roll angle of aluminum-based superhydrophobic base. (a) Heating sample in vacuum; (b) heating sample in air

在真空中和空气中加热的两种超疏水表面的 SEM 照片如图 9 所示。图 9(a)是在真空中加热后的超疏水样品,图 9(b)是在空气中加热后的超疏水样品。两者相比,在真空中加热样品表面的纳米结构更

小,且更均匀。纳米结构对样品表面黏附力有很大影响,纳米结构越小,样品表面与水滴的接触面积越小,黏附力也越小<sup>[25]</sup>。所以,在真空中加热的样品表面比在空气中加热的样品表面具有更小的黏附力。

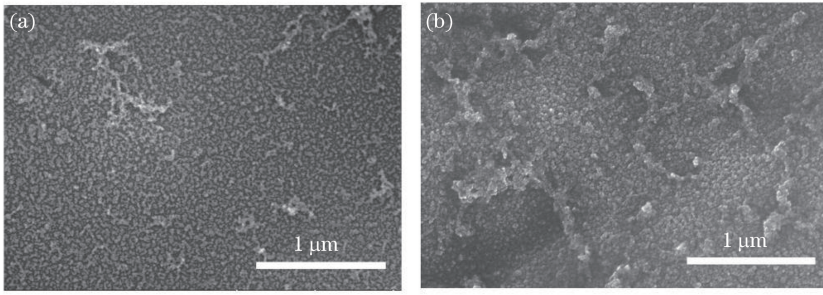


图 9 超疏水铝板的 SEM 照片。(a)在真空中加热样品;(b)在空气中加热的样品

Fig. 9 SEM images of super-hydrophobic aluminum plate. (a) Heating sample in vacuum; (b) heating sample in air

### 3.4 液滴的运动特性

为测试液滴的可控运动行为特性,制作了楔形通道,该通道的各个参数如图 10(a)所示,初始端宽度  $a$  取  $100 \mu\text{m}$ ,图案总长  $L=10 \text{ mm}$ ,改变楔角  $\alpha$ ,得到 3 组不同楔角的通道尺寸,如表 2 所示。用飞秒激光器在超疏水表面加工不同角度的超亲水楔形通道,如图 10(b)所示。超亲水轨道上的液滴受到两侧超疏水区域边界的限制,轨道上液滴

的接触角从窄端到宽端逐渐减小,形成一定的接触角梯度。

表 2 各楔形图案的尺寸

Table 2 Size of wedge pattern

No.	$\alpha /(^{\circ})$	$a / \text{mm}$	$b / \text{mm}$	$L / \text{mm}$
1	4	0.1	0.798	10
2	8	0.1	1.499	10
3	10	0.1	1.850	10

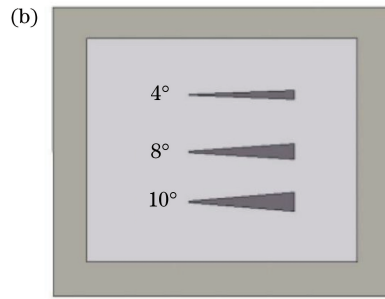
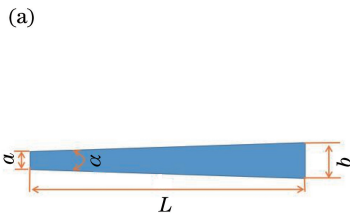


图 10 楔形图案参数及超疏水基板上的超亲水图案。(a)楔形图案参数;(b)超亲水图案

Fig. 10 Wedge pattern parameters and superhydrophilic pattern on superhydrophobic substrate.

(a) Wedge pattern parameters (b) superhydrophilic pattern

为了观察液滴在不同楔形图案上的运动速度,采用  $3 \mu\text{L}$  液滴,在  $\alpha$  角分别为  $4^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$  的情况下进行实验,记录 A 组铝板上长度为  $10 \text{ mm}$ 、坡度分别为  $0^{\circ}$  和  $30^{\circ}$  的楔形通道上液滴的位移。 $3 \mu\text{L}$  液滴在坡度分别为  $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$  的  $4^{\circ}$  楔角图案上的运动示意图如图 11 所示,实验所得图片如图 12 所示, $t$  为液滴

的运动时间, $S$  为液滴的运动路程。液滴最开始在通道的窄端,由于毛细力作用,整个通道先被润湿。液滴在向上运动过程中,其前、后两端的接触角不同,后端接触角大于前端接触角。所以,液滴后端气固表面的自由能和表面张力小于前端<sup>[20]</sup>。表面张力差使液滴获得动力,液滴不仅能克服黏附力向前

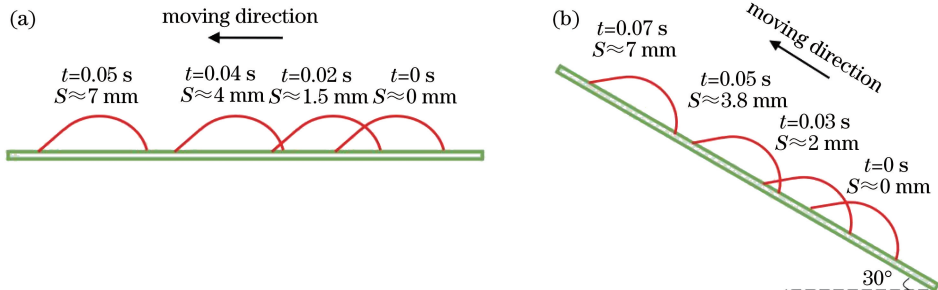


图 11 液滴运动示意图( $S$  为液滴运动路程)。(a)坡度为  $0^{\circ}$ ;(b)坡度为  $30^{\circ}$

Fig. 11 Diagrams of droplet movement ( $S$  is droplet movement distance). (a) Slope is  $0^{\circ}$ ; (b) slope is  $30^{\circ}$

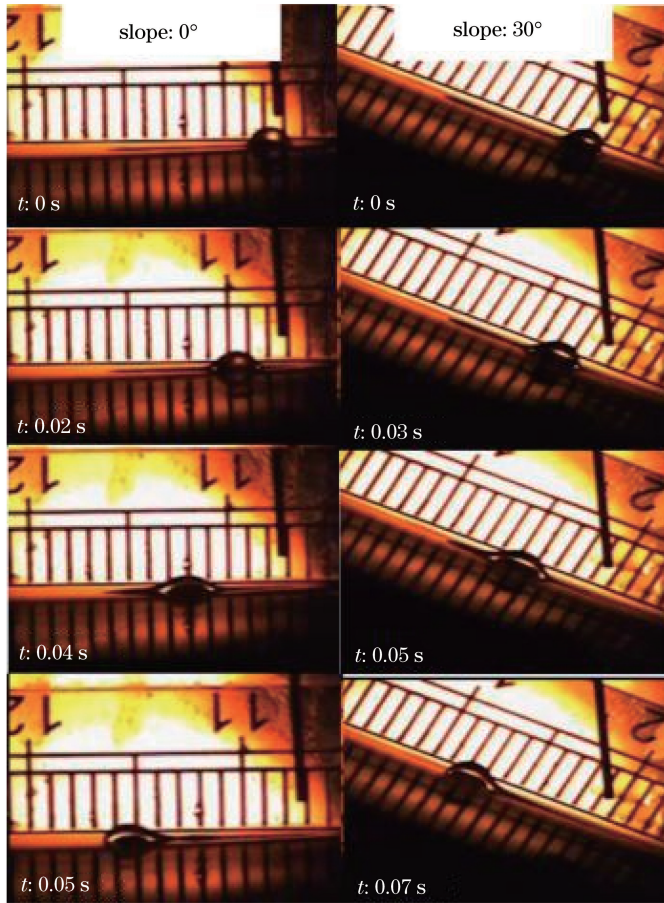


图 12 液滴运动(从右至左)照片

Fig. 12 Photos of droplet movement (from right to left)

运动,还可以同时克服黏附力和自身重力向上运动。

在坡度为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  的情况下,液滴的位移如图 13 所示。在  $10^\circ$  坡度下,液滴在通道上的运动速度最大,之后依次为  $8^\circ$  和  $4^\circ$  坡度下。通道楔角  $\alpha$  越大,液滴

前、后两端接触角的差值越大,表面张力的差值也就越大,液滴所受动力越大,液滴运动速度就越大。当通道楔角  $\alpha$  为  $4^\circ$  时,最大速度约为  $300 \text{ mm/s}$ ;当通道楔角  $\alpha$  为  $10^\circ$  时,最大速度约达  $500 \text{ mm/s}$ 。

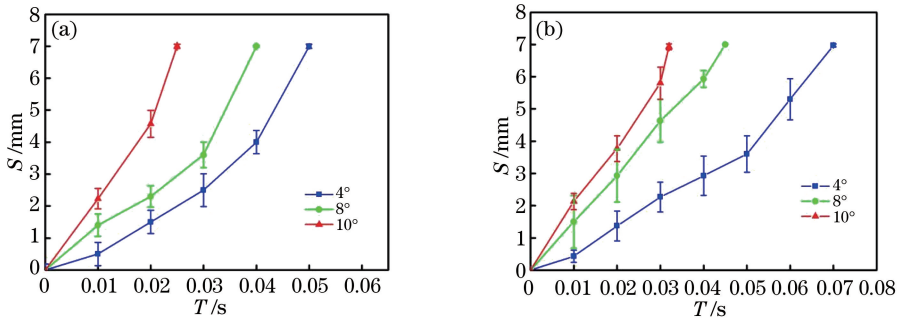


图 13 液滴的位移。(a)坡度为  $0^\circ$ ; (b)坡度为  $30^\circ$

Fig. 13 Droplet displacement. (a) Slope is  $0^\circ$ ; (b) slope is  $30^\circ$

为了观察黏附力对液滴运动的影响,在 A、B 两组滚动角不同的铝板上,采用  $3 \mu\text{L}$  液滴在  $\alpha$  角为  $4^\circ$  的情况下进行实验,记录长度为  $10 \text{ mm}$ 、坡度为  $30^\circ$  的楔形通道上液滴的位移情况,结果如图 14 所示。可见:在高滚动角铝板上,液滴在  $0.14 \text{ s}$  内移动了

$7 \text{ mm}$ ,平均速度为  $50 \text{ mm/s}$ ;而在低滚动角铝板上,液滴只需  $0.07 \text{ s}$  就能移动  $7 \text{ mm}$ ,平均速度可达  $100 \text{ mm/s}$ ,是前者的 2 倍。实验结果表明,滚动角越大,液滴的黏附力越大,液滴的运动速度越慢。

液滴在楔形通道上受到的毛细力大小为<sup>[26]</sup>



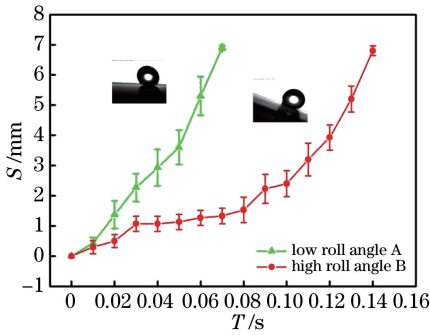


图 14 不同滚动角样品表面液滴位移

Fig. 14 Droplet displacement on surface of different rolling angle samples

$$F_{CX} = -\frac{d}{dx}(\gamma_{LS}A_{LS} + \gamma_{LG}A_{LG} + \gamma_{SG}A_{SG}), \quad (1)$$

式中： $\gamma$  为固体(S)、液体(L)和气体(G)之间单位界面面积的表面能，单位为 N/m； $A$  为相应的表面积，单位为  $m^2$ ； $x$  为液滴轴向位移，单位为 m。

直观地说，液滴之所以有向前移动的倾向，是因为这样会导致更大面积的超亲水通道变湿，从而导致表面能量沿着  $x$  方向降低。在楔形通道上，液滴前、后边界以及固定边线承受的表面张力如图 15 所示。由于通道呈楔形，液滴前缘与超亲水水接触的长度大于后缘相应部分的长度，加之两侧表面张力沿  $x$  轴的分向量合力也指向图 15 所示的  $x$  轴方向，从而推动了液滴沿着  $x$  轴方向运动。

液滴任何部分的局部表面张力为  $-\gamma_{LG}/r(x)$ ，其中液滴的局部曲率  $r(x) \approx \delta(x)/[2\sin\theta(x)]$ ，单位为 m。 $\theta(x)$  表示液滴的局部接触角，单位为  $(^\circ)$ ； $\delta(x)$  表示液滴的局部宽度，单位为 m； $\theta(x)$  和  $\delta(x)$  沿通道长度变化(当楔角较小时， $\delta(x)$  与楔角  $\alpha$  成比例)。假设有一个代表性的平均接触角  $\theta_{avg}$ ，其单位为  $(^\circ)$ ，液滴轴向表面张力梯度  $dP/dx$  可以估计为<sup>[26]</sup>

$$\frac{dP}{dx} \propto -\frac{d}{dx} \left[ \frac{\gamma_{LG}}{r(x)} \right] \propto -\gamma_{LG} \cdot \frac{d}{d\delta(x)} \left[ \frac{2\sin\theta}{\delta(x)} \right] \propto 2\gamma_{LG} \sin\theta_{avg} \frac{1}{\delta(x)^2} \alpha. \quad (2)$$

该张力梯度将液滴驱动到楔形通道的较宽部分。(2)式表明，表面张力梯度与楔角  $\alpha$  成正比，通道楔角  $\alpha$  越大，表面张力梯度也就越大。

楔形微纳结构表面上的液滴运动由动力-表面张力梯度  $dP/dx$  和阻力-重力分力  $F_g$ 、摩擦力  $F_f$  和黏附力  $F_a$  决定。表面张力差增大和黏附力减小，都会使液滴所受合力增大。换言之，通道楔角  $\alpha$  越大，或滚动角越小，液滴的运动速度就越大。

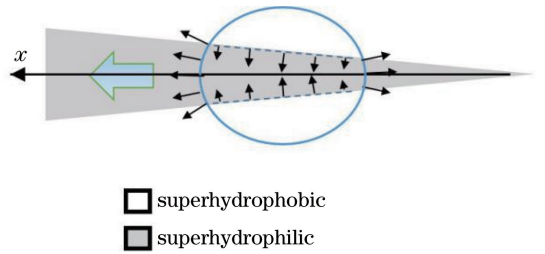


图 15 液滴表面张力分析

Fig. 15 Analysis of droplet surface tension

## 4 结 论

基于激光技术，开展了 1050 铝基浸润性可控表面液滴运动特性的研究。基于浸润性梯度，在 1050 铝板上制备出浸润性可控表面，实现了液滴的无泵运输。分析了样品浸润性梯度、超疏水表面黏附力对液滴运动速度的影响。激光处理 1050 铝板表面后，样品的表面能增大，形成了超疏水表面；加热处理后，样品表面生成了一  $CH_3$  低表面能官能团，从而形成了超亲水表面。与纳秒激光相比，飞秒激光加工的超亲水表面粗糙度更小，液滴运动损失更小。激光加工和加热处理可以实现 1050 铝板表面的浸润性可控。与空气加热相比，在真空下加热的 1050 铝板，其表面的纳米结构更小、更均匀，且具有更小的黏附力。液滴可以在超疏水基底亲水楔形图案上进行无泵运输。超疏水基底亲水楔形图案的表面张力梯度越大，黏附力越小，液滴的运动速度越快。

## 参 考 文 献

- [1] Long J Y, Fan P X, Gong D W, *et al.* Ultrafast laser fabricated bio-inspired surfaces with special wettability[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0800001.  
龙江游, 范培迅, 龚鼎为, 等. 超快激光制备具有特殊浸润性的仿生表面[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0800001.
- [2] Jia Z H, Lei W, He J C, *et al.* Transition of wetting state for vibrated droplets on rough surfaces [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2015, 29(1): 58-63.  
贾志海, 雷威, 贺吉昌, 等. 粗糙表面振动液滴的浸润状态转变特性[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(1): 58-63.
- [3] Zeng Y, Wei X B, Jiang Y J. Surface wettability of PA2200 3D printing parts by laser irradiation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201006.  
曾勇, 魏小波, 蒋毅坚. 激光辐照 PA2200 材料 3D

- 打印件的表面浸润性[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201006.
- [4] Kumar A, Gogoi B. Development of durable self-cleaning superhydrophobic coatings for aluminium surfaces via chemical etching method[J]. Tribology International, 2018, 122: 114-118.
- [5] Gray-Munro J, Campbell J. Mimicking the hierarchical surface topography and superhydrophobicity of the lotus leaf on magnesium alloy AZ31[J]. Materials Letters, 2017, 189: 271-274.
- [6] Liu Y, Xue J Z, Luo D, *et al.* One-step fabrication of biomimetic superhydrophobic surface by electrodeposition on magnesium alloy and its corrosion inhibition [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 491: 313-320.
- [7] Lee J A, McCarthy T J. Polymer surface modification: topography effects leading to extreme wettability behavior[J]. Macromolecules, 2007, 40(11): 3965-3969.
- [8] Tang Y Q, Zhang Q H, Zhan X L, *et al.* Superhydrophobic and anti-icing properties at overcooled temperature of a fluorinated hybrid surface prepared via a sol-gel process[J]. Soft Matter, 2015, 11(22): 4540-4550.
- [9] Zhang C Y, Zhang S N, Gao P C, *et al.* Superhydrophobic hybrid films prepared from silica nanoparticles and ionic liquids via layer-by-layer self-assembly[J]. Thin Solid Films, 2014, 570: 27-32.
- [10] Kong L H, Chen C D, Zhang P Y, *et al.* Superhydrophobic cuprous oxide nanostructures on phosphor-copper foil with rapid thermal transitions from superhydrophobicity-to-hydrophilicity [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 108-116.  
孔令豪, 陈常东, 张平余, 等. 磷铜片表面构建超疏水  $\text{Cu}_2\text{O}$  纳米结构及其超疏水-亲水快速转变[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 108-116.
- [11] Du Y, Chen H J, Cheng Z J, *et al.* Preparation of copper surfaces with controlled wettability through the molecular self-assembling process[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2014, 35(1): 105-109.  
都颖, 陈海杰, 成中军, 等. 分子自组装法制备具有可控浸润性的铜表面[J]. 高等学校化学学报, 2014, 35(1): 105-109.
- [12] Li X, Jin J P, Wang R. pH-responsive polyaniline chromic textile with super-hydrophobicity and washability[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 61-68.  
李昕, 金俊平, 王锐. 超疏水耐水洗的 pH 响应性聚苯胺变色织物[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 61-68.
- [13] Kooij E S, Jansen H P, Bliznyuk O, *et al.* Directional wetting on chemically patterned substrates [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 413: 328-333.
- [14] Sommers A D, Brest T J, Eid K F. Topography-based surface tension gradients to facilitate water droplet movement on laser-etched copper substrates [J]. Langmuir, 2013, 29(38): 12043-12050.
- [15] Chandesris B, Soupremanien U, Dunoyer N. Uphill motion of droplets on tilted and vertical grooved substrates induced by a wettability gradient [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 434: 126-135.
- [16] Bliznyuk O, Jansen H P, Kooij E S, *et al.* Smart design of stripe-patterned gradient surfaces to control droplet motion[J]. Langmuir, 2011, 27(17): 11238-11245.
- [17] Schutzius T M, Elsharkawy M, Tiwari M K, *et al.* Surface tension confined (STC) tracks for capillary-driven transport of low surface tension liquids [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(24): 5237-5242.
- [18] Shi Y, Xu B, Wu D, *et al.* Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology [J]. Chinese Journal of Laser, 2019, 46(10): 1000001.  
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1000001.
- [19] Chen H W, Zhang P F, Zhang L W, *et al.* Continuous directional water transport on the peristome surface of nepenthes alata [J]. Nature, 2016, 532(7597): 85-89.
- [20] Yang Q B, Chen Z P, Yang T, *et al.* Surface wettability of different micro-textured YG6 processed by femtosecond lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091404.  
杨奇彪, 陈中培, 杨涛, 等. 飞秒激光加工 YG6 不同微结构表面浸润性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091404.
- [21] Wang M C, Yang Q L, Wang C, *et al.* Effects of micro- and nano-structure on the adhesive property of rose petals [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2011, 32(7): 1594-1597.  
王明超, 杨青林, 王春, 等. 玫瑰花花瓣微观结构与水滴黏附性质的关系[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(7): 1594-1597.
- [22] Meng X Q, Zhao D X, Zhang J Y, *et al.* Wettability conversion on ZnO nanowire arrays surface modified by oxygen plasma treatment and annealing [J]. Chemical Physics Letters, 2005, 413(4/5/6): 450-

- 453.
- [23] Miyauchi M, Kieda N, Hishita S, *et al.* Reversible wettability control of TiO<sub>2</sub> surface by light irradiation [J]. *Surface Science*, 2002, 511(1/2/3): 401-407.
- [24] Liang J, Wu Y Q, Liu M. Preparation of superhydrophobic wood by an *in situ* sol-gel process [J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(4): 87-91.  
梁金, 吴义强, 刘明. 溶胶-凝胶原位生长制备超疏水木材[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(4): 87-91.
- [25] Bain C D, Whitesides G M. Formation of monolayers by the coadsorption of thiols on gold: variation in the length of the alkyl chain[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1989, 111(18): 7164-7175.
- [26] Ghosh A, Ganguly R, Schutzius T M, *et al.* Wettability patterning for high-rate, pumpless fluid transport on open, non-planar microfluidic platforms [J]. *Lab Chip*, 2014, 14(9): 1538-1550.