

激光图案化铝合金表面的润湿性和各向异性研究

郭永刚^{1,2,3}, 吕志¹, 朱亚超¹

(1.河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001; 2.河南省碳纤维复合材料国际联合实验室, 郑州 450001; 3.汽车复合材料河南省工程实验室, 郑州 450001)

摘要: **目的** 研究水滴在超亲/超疏水图案化铝合金表面润湿性、滚动阻力各向异性和定向运输特性。**方法** 采用激光刻蚀和氟硅烷修饰的方法, 加工出具有微网格图案的超疏水 6061 铝合金表面。在超疏水铝合金表面再次激光刻蚀加工出长方形、平行四边形和圆形的超亲水微流体通道。研究了亲水沟槽宽度和深度对超亲/超疏水表面各向异性润湿和各向异性滚动的影响, 分析了重力作用下水滴沿微流体通道的运动情况。利用 SEM、三维轮廓仪观察铝合金表面形貌。利用接触角测量仪观测水滴与表面的接触角与滚动角大小。利用高速摄像机观察水滴的运动情况。**结果** 水滴在超亲/超疏水铝合金表面表现出明显的润湿性各向异性和滚动阻力各向异性。10 μL 水滴在 0.1 mm 宽度的直线型沟槽上铺展, 平行接触角 θ_{cp} 仅为 93.9° ; 而垂直于线型沟槽方向, 垂直接触角 θ_{cv} 却为 152.6° 。平行滚动角 θ_{rp} 为 21.5° , 而垂直滚动角 θ_{rv} 大于 90° , 水滴无法滚落。基于超亲/超疏水表面滚动阻力各向异性的特性, 制备了依靠重力驱动实现微流体定向运输的铝合金表面。**结论** 亲水沟槽宽度对水滴在超亲/超疏水表面润湿性和滚动阻力各向异性的影响显著。激光刻蚀能够调控加工区域微结构、宏观形状和尺寸, 可用于加工超亲/超疏水表面。超亲/超疏水表面可以依靠重力驱动实现微流体定向运输。

关键词: 水滴; 铝合金; 超亲/超疏水; 各向异性; 激光加工

中图分类号: V261.8; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0352-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.033

Wettability and Anisotropy of Laser Patterned Aluminum Alloy Surfaces

GUO Yong-gang^{1,2,3}, LYU Zhi¹, ZHU Ya-chao¹

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Carbon Fiber Composites International Joint Research Lab in Henan, Henan University of Technology,

Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Provincial Engineering Laboratory of Automotive Composite Materials,

Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: In this paper, a superhydrophobic 6061 aluminum alloy surface with a microgrid pattern was fabricated by

收稿日期: 2022-02-07; 修订日期: 2022-05-16

Received: 2022-02-07; **Revised:** 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51775169); 河南工业大学青年骨干教师培育计划 (2018); 河南工业大学创新基金支持计划专项资助 (2020ZKCJ26); 河南省科技攻关计划项目 (222102220018); 河南省留学人员科研择优资助经费

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775169); Training Program of Young Key Teachers in Henan University of Technology (2018); Innovative Funds Plan of Henan University of Technology (2020ZKCJ26); Henan Province Science and Technology Research Projects (222102220018); Preferential Funding for Scientific Research of Overseas Students in Henan Province

作者简介: 郭永刚 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机械摩擦、磨损及润滑。

Biography: GUO Yong-gang (1979-), Male, Doctor, Professor, Research focus: mechanical friction, wear and lubrication.

引文格式: 郭永刚, 吕志, 朱亚超. 激光图案化铝合金表面的润湿性和各向异性[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 352-359.

GUO Yong-gang, LYU Zhi, ZHU Ya-chao. Wettability and Anisotropy of Laser Patterned Aluminum Alloy Surfaces[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 352-359.

nanosecond laser etching and subsequent modification of low-surface-energy fluorosilane. Then, rectangular, parallelogram and circular superhydrophilic microfluidic channels were fabricated by laser etching again on the surface of the superhydrophobic aluminum alloy. The anisotropic wetting and rolling resistance phenomena of rectangular microfluidic channels along the direction parallel and perpendicular to the grooves were analyzed. The effects of laser-etched groove width and depth on the anisotropic wetting and rolling of droplets on the surface of superhydrophilic/superhydrophobic patterned aluminum alloys were investigated. And the movement of droplets along microfluidic channels under the action of gravity was investigated. In order to explain the phenomenon of anisotropic wetting and anisotropic rolling of droplets on the contact surface more clearly, we innovatively defined the parallel contact angle θ_{cp} , vertical contact angle θ_{cv} , parallel rolling angle θ_{rp} and vertical rolling angle θ_{rv} in this paper, and evaluated the changing laws of anisotropic wetting and anisotropic rolling through their changing laws. Scanning electron microscopy (SEM) and three-dimensional profiler were used to observe the morphology of the aluminum alloy surface. The contact angle measurement instrument was employed to observe and measure the contact state and adhesion state of the droplets on the solid surface. The high-speed camera was applied to observe the specific situation of the water droplet movement on the surface. The experimental results showed that the droplets exhibited obvious contact anisotropy and rolling anisotropy on the surface of the superhydrophilic/superhydrophobic patterned aluminum alloy. And the droplets showed different contact states and different adhesion on the surfaces with different wettability, for example, 10 μL of water droplets spread on 0.1 mm wide linear grooves, and the parallel contact angle θ_{cp} was only 93.9° ; while perpendicular to the direction of the linear groove, the vertical contact angle θ_{cv} was 152.6° . The parallel rolling angle θ_{rp} was 21.5° , while the vertical rolling angle θ_{rv} was greater than 90° , and the water droplets cannot roll off. Both the parallel contact angle θ_{cp} and the vertical contact angle θ_{cv} of water droplets decreased with the increase of the linear groove width, at the same time the contact angle anisotropy tended to increase. The vertical rolling angle θ_{rv} were greater than 90° and could not fall off, while the parallel rolling angle θ_{rp} decreased with the increase of the linear groove width, and it can be concluded that the rolling resistance anisotropy increased with the increase of the linear groove width. As linear groove depth increases, there was no significant change in wettability anisotropy and rolling resistance anisotropy. Based on the characteristics of rolling anisotropy, a kind of aluminum alloy surface with microfluidic directional transport by gravity was prepared successfully, which has good droplet anisotropy and lossless transmission performance. Nanosecond laser processing can control the microstructure, macroscopic shape and the size of the processing area, anisotropic superhydrophilic/superhydrophobic patterned surfaces can be processed easily combined with subsequent low surface energy modification technology. The method here has the advantages of low cost, simple process, and fast response, so it's suitable for the processing of hydrophilic patterns on superhydrophobic surfaces of various metal substrates. Therefore, it has potential applications in biopharmaceutical, high-throughput cell screening and droplet storage.

KEY WORDS: 6061 aluminum; superhydrophilic/superhydrophobic; nanosecond laser etching; anisotropy

润湿性是生物表面固有的重要特性之一。自然界中很多生物因不断进化而具备特殊的超亲/超疏水图案化表面,对生物的发展和生存发挥了极其重要的作用^[1]。例如,生活在纳米布沙漠的甲虫背部有纹理状的超亲/超疏水图案,凸起的亲水区起到水雾收集的作用,收集到的水在重力作用下沿疏水沟壑被输送到甲虫口中^[2-6]。“沙漠中的英雄”仙人掌同样具有水雾收集能力,主要得益于其表面圆锥形刺的团簇结构以及微纳形貌组成的三级结构。此外,尖针形的叶子也可以减少蒸腾作用,保存更多的水分^[7-8]。

受自然界生物启发,研究人员在仿生制备超亲/超疏水表面方面获得了巨大的成功。丁雅玉^[9]借助激光刻蚀技术在 35 μm 厚的铝箔上加工微孔阵列,然后通过喷涂含有疏水二氧化硅的 Glaco 试剂和激光二次刻蚀的方法获得了超亲/超疏水铝膜。Lee 等^[10]先采用

射频大气等离子体刻蚀技术制备超疏水表面,然后通过 EHD 喷流打印沉积极性醇,实现选择性亲水修饰,从而制备超亲/超疏水表面。Yang 等^[11]先采用电化学刻蚀技术制备出超疏水表面,再通过掩膜技术进行二次电化学刻蚀,成功在铝、钛和锌等 3 种金属上制备了超亲/超疏水表面。此外,研究人员还常用微型机械加工技术^[12]、电化学方法^[13]、光刻法^[14]制备图案化超亲/超疏水表面。水滴在超亲/超疏水表面上滚动阻力具有明显的各向异性^[15]。由于各向异性滚动阻力的存在,当超亲/超疏水面倾斜一定角度,水滴能够在重力驱动下沿亲水图案实现快速滚动。这种重力驱动的水滴操控,在超高精度分子传感^[16-17]、高通量细胞筛选^[18-20]、生化合成^[21-22]、干旱多雾地区水资源收集^[23-25]等领域有诸多潜在应用。

上述文献提到的多种超亲/超疏水表面的加工方

法,存在步骤复杂、时效性差、成本高、涉及强酸等诸多问题。因此,开发一种成本低廉、方法简便、效果稳定的加工方法,对于超亲/超疏水表面的推广和开发应用具有重要的意义,超亲/超疏水表面的各向异性润湿和各向异性滚动机制也值得深入研究。本文采用便捷的纳秒激光加工方法,制备了超亲/超疏水6061铝合金图案化表面,分析了线型沟槽宽度、深度对各向异性滚动阻力的影响,开展了重力操控微流体定向运输的应用研究。该方法成本低廉、工艺简单,并且能够快速响应,适用于多种金属基体表面上润湿性图案的加工,在微流体定向运输方面具有重大的应用价值。

1 试验

1.1 材料

6061铝片(98%)购自广州源动力金属材料公司,尺寸为40 mm×20 mm×2 mm。丙酮、乙醇、正己烷均为分析纯,购自天津富宇精细化工有限公司;1H,1H,2H,2H-全氟癸基三氯硅烷($\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7(\text{CH}_2)_2$, 96%)购自上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 试样制备方法

1)样品预处理。采用600#、800#、1000#、1200#砂纸对试验所用铝片进行打磨以去除铝片表面的氧化层,打磨至铝片表面光亮,划痕均匀为止。将打磨后的试样依次放入丙酮、无水乙醇和去离子水中各超声清洗5 min,以去除表面的油污和杂质,冷风吹干后得到预处理试样。

2)超疏水铝合金表面的制备。将预处理后的样品固定在工作台上,用激光器(RC1064-F150)在试样表面刻蚀出网格状图案。图1是用CAD软件设计的激光加工网格状图案的加工路径。激光按照预设的线间距先沿着与竖直方向平行的路径1从左至右扫描样品,接着按照与水平方向平行的路径2从上到下扫描样品,完成全部扫描为1个周期。其线间距为90 μm 。激光器功率为10 W,扫描速率为500 mm/s,频率为20 kHz,激光束的光斑直径大约为30 μm ,对每个试样重复激光扫描5个周期。在室温条件下,将激光处理后的铝试样浸入体积分数为0.1%的1H,1H,2H,2H-全氟癸基三氯硅烷(HDFS)的正己烷溶液中修饰10 min,接着在鼓风干燥箱60 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥15 min。氟硅烷与无机物接触后,氟硅烷首先发生了水解反应生成硅氧烷;随后生成的硅氧烷与铝合金表面的羟基发生脱水反应,使铝合金表面极性高的羟基转变为极性低的醚键,铝合金表面为烷基(—R)覆盖,形成界面区域。最终铝合金表面被— CF_3 基团所覆盖,形成疏水膜层,明显降低了铝合金的表面能,提高了铝合金表面的接触角。具体反应过程如图2所

示。通过接触角测量仪对其表面进行表征,所得全部试验样品的接触角为 $170^{\circ}\pm 2^{\circ}$,滚动角为 $3^{\circ}\pm 1^{\circ}$,成功制备出超疏水表面。

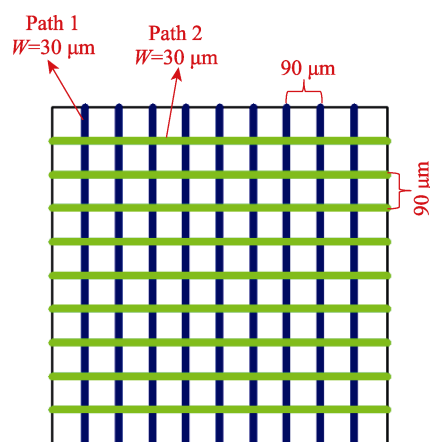


图1 铝合金表面微纳结构激光加工方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser processing method of micro-nano structure on the surface of aluminum alloy

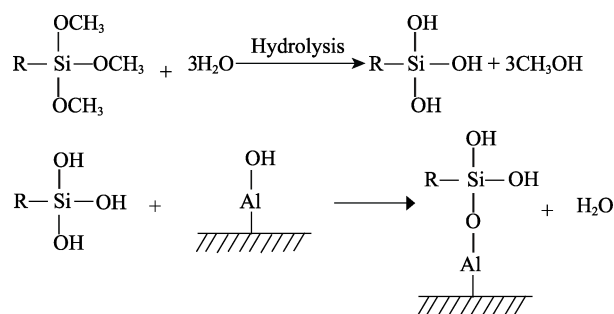


图2 氟硅烷与铝合金表面的反应

Fig.2 Reaction of fluorosilane with aluminum alloy surface

3)微流控通道的激光加工。在上述超疏水表面上用激光器加工出不同形状的亲水通道。图3是不同形状的亲水通道的照片,长方形图案(长18 mm,宽0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mm)、平行四边形图案(底边长0.707 mm,高15 mm,夹角 45°)以及圆环形图案(外径16 mm,内径15 mm)。从图3e中可以看出微米级凸起结构。由图3f可知,经过激光第二次刻蚀,微米级凸起结构已经被清除。激光加工过程生成的瞬时光和热会扩散到铝合金试样表面,使其单位面积上的自由能增大,逐渐接近水滴的自由能,根据相似相溶原理,水滴与该表面能够迅速贴合,使该表面呈现超亲水性^[26]。这些图案均是由CAD软件设计后导入激光加工程序,激光器根据图案生成加工轨迹加工而成的,图形内部填充线间距均为0.01 mm的正方形网格,激光器功率为10 W,扫描速率为500 mm/s,频率为20 kHz,激光束的光斑直径为10 μm 。图4是以宽度为0.5 mm的亲水直线沟槽试样加工流程为例而作的示意图。

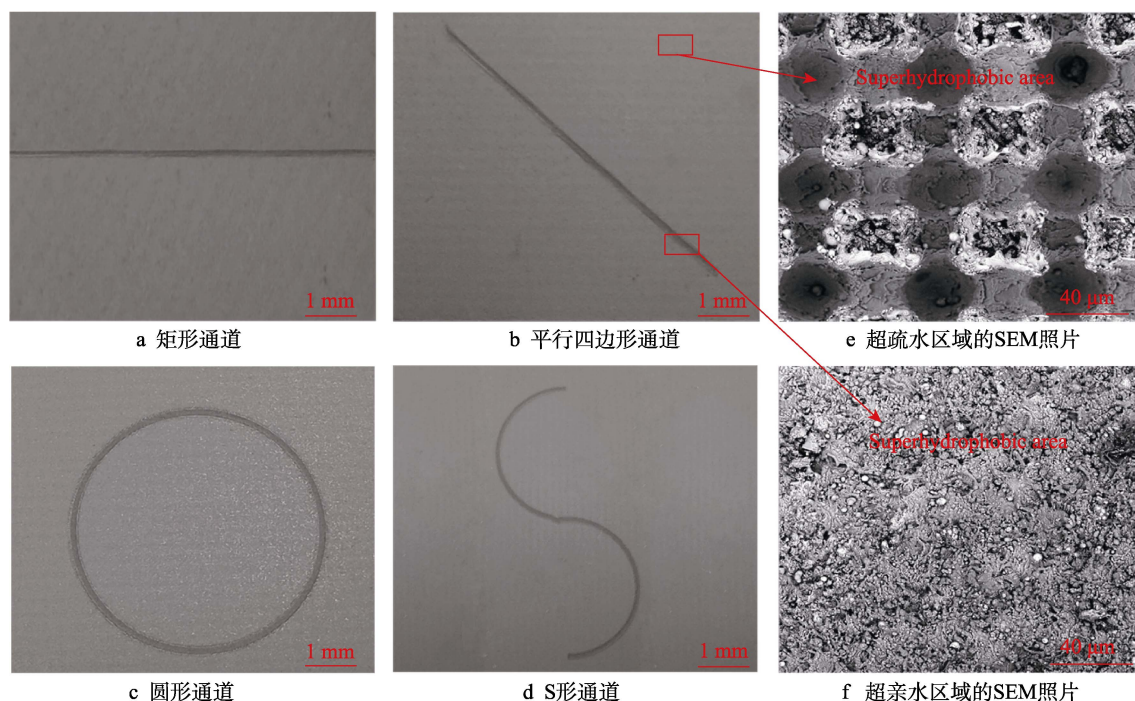


图 3 超亲水通道图和表面不同区域的 SEM 形貌

Fig.3 Photos of superhydrophilic channels with different shapes and SEM images of different areas on the surface: a) rectangular channel; b) parallelogram channel; c) circular channel; d) S-shaped channel; e) SEM image of superhydrophobic area; f) SEM image of superhydrophilic area

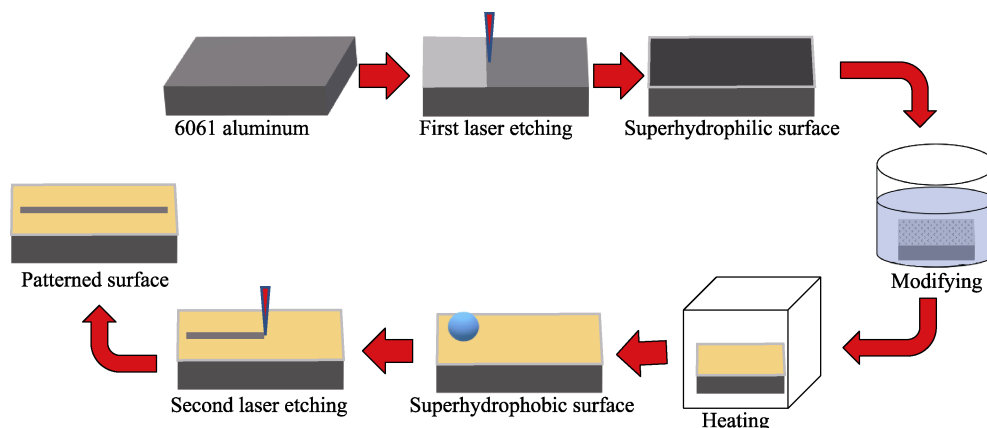


图 4 激光加工超亲水/疏水图案表面流程示意图 (0.5 mm 宽的直线凹槽)

Fig.4 Schematic diagram of laser processing superhydrophilic/hydrophobic patterned surface (Straight groove with a width of 0.5 mm)

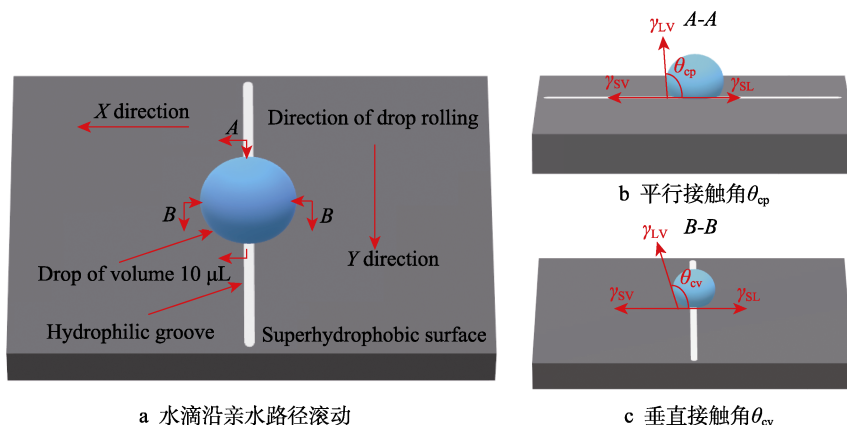
1.3 测试与表征

通过扫描电子显微镜 (INSPECT-F50, 美国) 观察试样表面的微观形貌。采用三维轮廓仪 (VR-3200, 日本) 观测亲水图案。借助光学接触角测量仪 (Kruss-DSA100, 德国) 测量水滴在试样表面的接触角, 测量水滴体积约为 10 μL。逐渐倾斜试样表面, 当水滴开始滚动时的表面倾角为水滴在该表面上的滚动角, 滚动角由精密角度旋转台测得。采用高速摄像机 (Pco.dimaxHD, 德国) 来观察水滴运动的详细情况。

图 4 是平行接触角 θ_{cp} 、垂直接触角 θ_{cv} 、平行滚

动角 θ_{rp} 和垂直滚动角 θ_{rv} 的示意图。如图 5b—c 所示, 平行接触角 θ_{cp} 是指水滴在亲水沟槽上完全铺展后, 亲水表面、水滴和空气三相交界处的接触角; 而垂直接触角 θ_{cv} 是指水滴在超疏水表面上完全铺展开后, 超疏水表面、水滴和空气三相交接处的接触角。在测量平行接触角后只需要使样品旋转 90°, 即可测得垂直接触角。

如图 5a 所示, 平行滚动角 θ_{rp} 是指水滴在倾斜的超亲/超疏水图案化表面沿 Y 方向滚动时, 倾斜表面与水平面所形成的临界角度; 而垂直滚动角 θ_{rv} 是指水滴在倾斜的超亲/超疏水图案化表面沿 X 方向滚动时, 倾斜表面与水平面所形成的临界角度。



a 水滴沿亲水路径滚动

c 垂直接触角 θ_{cv}

图5 平行接触角、垂直接触角和水滴沿亲水路径滚动的示意图

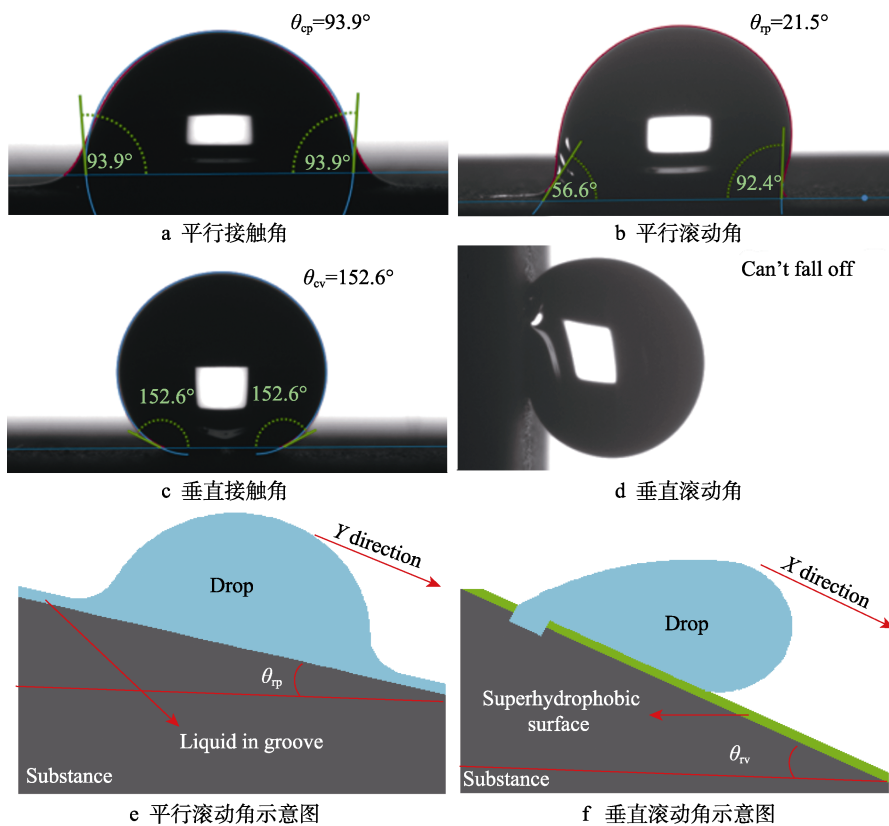
Fig.5 Schematic diagram of parallel contact angle, vertical contact angle, water droplets roll in Y direction and water droplets roll in X direction: a) water droplets roll in Y direction and water droplets roll in X direction; b) parallel contact angle θ_{cp} ; c) vertical contact angle θ_{cv}

2 结果及分析

2.1 线型沟槽宽度对润湿性和滚动阻力各向异性的影响

如图 6a 和图 6c 所示, 10 μL 水滴在 0.1 mm 宽度的直线型沟槽上铺展, 平行接触角 θ_{cp} 仅为 93.9°; 而垂直于线型沟槽方向, 水滴边缘与超疏水区接触, 垂

直接角 θ_{cv} 却为 152.6°, 这是因为超疏水表面和超亲水线型沟槽表面自由能差异较大, 水滴在低自由能的一侧表现出超疏水性, 在高表面能的一侧表现出超亲水性。另外, 水滴在亲水线型沟槽上滚动阻力也具有显著各向异性, 测得平行于线型沟槽方向水滴平行滚动角 θ_{rp} 为 21.5°, 如图 6b 所示; 而水滴在垂直于线型沟槽方向黏附于表面, 无法滚落 (垂直滚动角 θ_{rv} 大于 90°), 如图 6d 所示。垂直于线型沟槽的液滴表



a 平行接触角

b 平行滚动角

c 垂直接触角

d 垂直滚动角

e 平行滚动角示意图

f 垂直滚动角示意图

图6 10 μL 水滴接触 0.1 mm 宽线型沟槽时的图像

Fig.6 Images of 10 μL droplet contacting in 0.1 mm wide linear groove: a) parallel contact angle; b) parallel rolling angle; c) vertical contact angle; d) vertical rolling angle; e) schematic diagram of parallel rolling angle; f) schematic diagram of vertical rolling angle

面张力与平行于沟槽的液体黏性力差异是导致滚动阻力差异的主要原因。线型沟槽状超亲/超疏水图案化表面沿平行和垂直于线型沟槽方向表现出显著的各向异性润湿现象和各向异性滚动现象。

此外, 10 μL 水滴沿平行线型沟槽方向的铺展长度随着线型沟槽宽度的增加而增大, 具体数值如表 1 所示。说明随着宽度的增大, 亲水沟槽的边界润湿性更好。

表 1 10 μL 的水滴沿平行线槽方向在不同宽度的线槽上铺展长度
Tab.1 Spread length of 10 μL water droplets on linear grooves of different widths along the parallel linear groove direction

Width/mm	Spread length/mm	Width/mm	Spread length/mm
0.1	3.37	0.7	5.04
0.3	4.11	0.9	6.26
0.5	4.61	—	—

从图 7 中可以看出, 水滴平行接触角 θ_{cp} 和垂直接触角 θ_{cv} 均随线型沟槽宽度的增加而减小, 但二者的差值增大, 接触角各向异性有增大的趋势。这可能是因为随着亲水沟槽宽度的增大, 水滴沿线型沟槽铺展长度增大, 改变了液滴的形状。对于滚动阻力各向异性, 试验无法直接测量, 但可以通过滚动角的大小来间接反映出滚动阻力。垂直滚动角 θ_{rv} (滚动角均大于 90°) 始终黏附于表面, 无法脱落, 而平行滚动角 θ_{rp} 却随着线型沟槽宽度的增大而减小。因此滚动角各向异性随着线型沟槽宽度的增加而增大, 进而可以得出, 滚动阻力各向异性随着线型沟槽宽度的增加而增大。

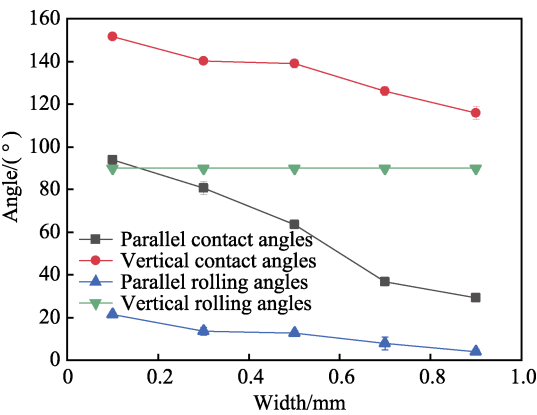


图 7 10 μL 水滴在不同宽度的线型凹槽上的平行接触角、垂直接触角、平行滚动角和垂直滚动角
Fig.7 Parallel contact angle, vertical contact angle, parallel rolling angle and vertical rolling angle of 10 μL water droplets on the linear grooves of different widths

2.2 线型沟槽深度对润湿性和滚动阻力各向异性的影响

试验制备了宽度 0.5 mm、刻蚀次数 1~5 次 5 个

长方形直线沟槽样品, 如表 2 所示, 随着激光刻蚀次数的增加, 线型沟槽深度会逐渐增加, 而线型沟槽宽度变化不大。为此, 研究了线型沟槽深度对润湿性和滚动阻力各向异性的影响。从图 8 中可以看出, 水滴平行接触角 θ_{cp} 和垂直接触角 θ_{cv} 随激光刻蚀次数也就是线型沟槽深度的增加保持不变; 垂直滚动角 θ_{rv} 和平行滚动角 θ_{rp} 亦无明显变化。进而可以得出线型沟槽深度对润湿性和滚动阻力各向异性没有明显影响的结论。

此外, 10 μL 水滴在宽度为 0.5 mm 且不同深度线型沟槽上沿平行线型沟槽方向的铺展长度如表 2 所示。可以明显地看出, 铺展长度随线型沟槽深度的增加并没有显著变化。说明随着深度的增大, 对亲水沟槽的边界润湿性基本没有影响。

表 2 10 μL 水滴沿平行线槽方向在不同深度的线槽上的铺展长度
tab.2 Spread length of 10 μL water droplets on linear grooves along the direction of parallel linear grooves of different depths

Laser etching times/time	Trench width/ μm	Spreading length/mm
1	40.99	4.61
2	67.14	4.94
3	85.53	4.91
4	110.59	4.94
5	126.58	4.98

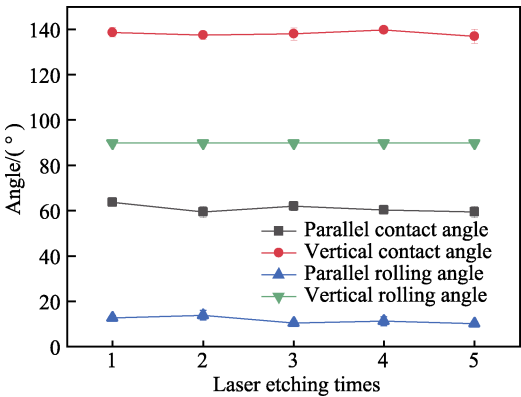


图 8 10 μL 水滴在不同深度的线型凹槽上的平行接触角、垂直接触角、平行滚动角和垂直滚动角
Fig.8 Parallel contact angle, vertical contact angle, parallel rolling angle and vertical rolling angle of 10 μL water droplets on the linear grooves of different depths

2.3 重力操控水滴定向运输的应用研究

表面倾斜一定角度, 水滴在重力驱动下, 由于各向异性滚动阻力可使其沿线型沟槽状亲水图案快速滚动。基于前面所研究的亲水直线沟槽, 试验另外设计制备了斜率为-1 (与水平方向夹角为 45°) 的直线沟槽、圆环形沟槽 (外径 16 mm, 内径 15 mm) 和 S 形沟槽 (由 2 个半圆环组成) 3 种亲水沟槽 (宽度

0.5 mm)来探究水滴在复杂形状亲水沟槽上的定向迁移运动。

如图 9 所示,将表面倾斜 30° ,在亲水沟槽顶部释放 $10\ \mu\text{L}$ 水滴,水滴会被亲水沟槽快速捕获并在重力驱动和各向异性滚动阻力作用下沿着亲水沟槽设定的方向快速运动。水滴在斜率为-1 的直线沟槽从顶部运动到底部只需经过 5.6 ms,圆环形沟槽需要 6.1 ms, S 形沟槽则需要 20.7 ms。对比水滴在 3 种不同形状亲水沟槽中的运动,不难发现,直线沟槽水滴运动的时间最短,圆环形沟槽次之,水滴在 S 形沟槽

所需时间最长。这是因为 S 形沟槽行程最长为 47.1 mm,圆环形沟槽行程次之为 23.6 mm,直线沟槽行程最短为 21.2 mm。此外,水滴在直线沟槽的运动为匀加速运动,而水滴在圆环形沟槽和 S 形沟槽中的运动为变加速运动。由此可知,当水滴重力的分力小于垂直表面张力时,可以在超疏表面上设计复杂形状的亲水沟槽并依靠重力驱动来实现水滴微流体的定向迁移运动。该方法成本低廉、工艺简单并且能够快速响应,适用于多种金属基体超疏表面上亲水图案的加工,在微流体控制领域具有较大的应用潜能。

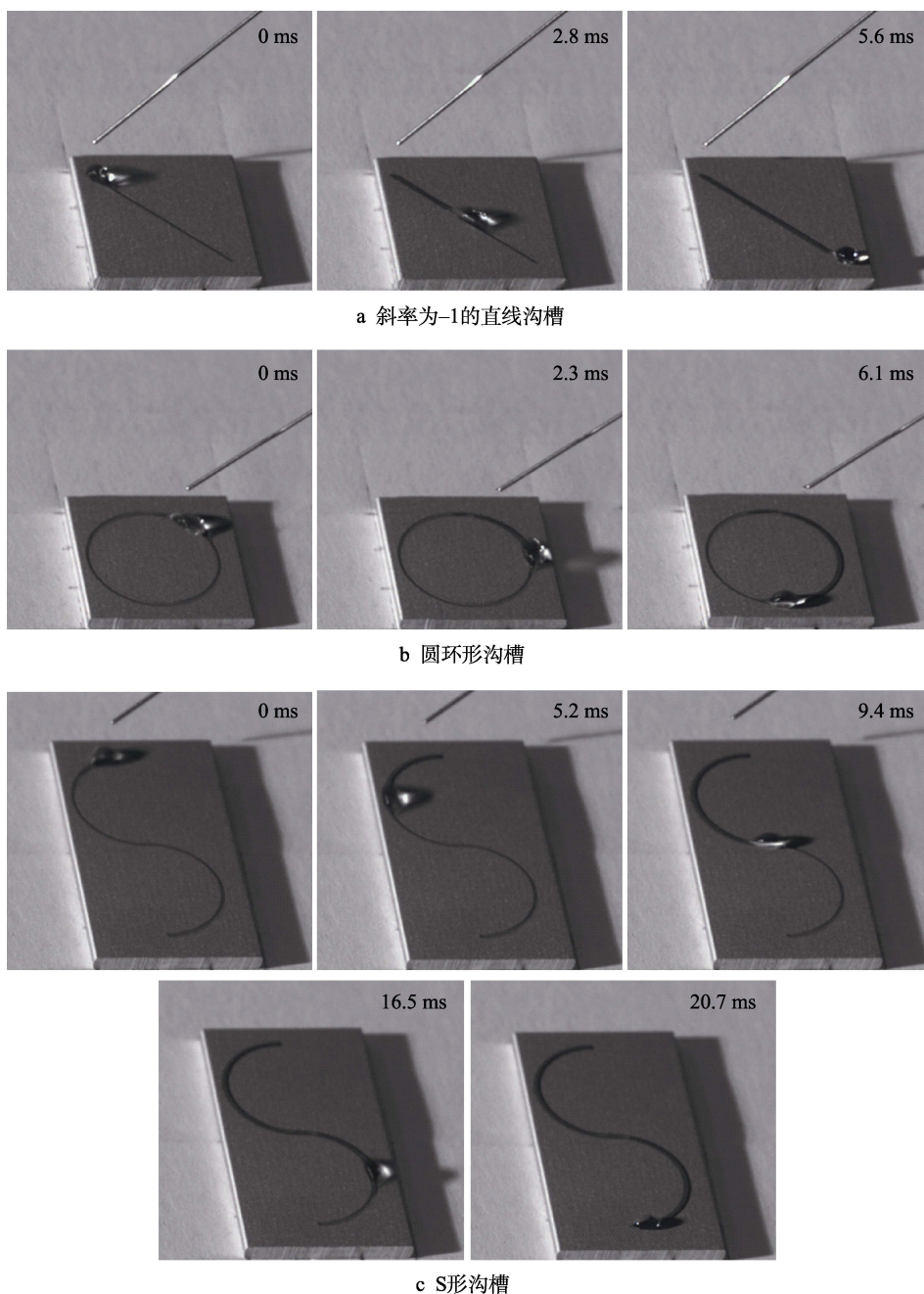


图 9 $10\ \mu\text{L}$ 水滴在宽度为 0.5 mm 的亲水性凹槽表面在重力作用下的定向传输照片
Fig.9 The directional transportation photograph of a $10\ \mu\text{L}$ water droplet moving on on the surface of a hydrophilic groove with a width of 0.5 mm: a) straight groove with a slope of -1; b) annular groove; c) S-shaped groove

3 结论

1) 线型沟槽状超亲/超疏水图案化表面沿平行和垂直于沟槽方向表现出显著各向异性润湿现象, 且滚动阻力各向异性随着沟槽宽度的增加而增大, 但沟槽深度对其影响不大。

2) 在各向异性滚动阻力和重力驱动共同作用下, 可使微升级别的水滴沿沟槽方向快速滚动, 从而实现水滴定向迁移运动, 在微流体控制领域具有巨大的应用潜力。

参考文献:

- [1] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [2] PARKER A R, LAWRENCE C R. Water Capture by a Desert Beetle[J]. *Nature*, 2001, 414(6859): 33-34.
- [3] GUADARRAMA-CETINA J, MONGRUEL A, MEDICI M G, et al. Dew Condensation on Desert Beetle Skin[J]. *The European Physical Journal E*, 2014, 37(11): 109.
- [4] BINGI J, MURUKESHAN V M. Speckle Lithography for Fabricating Biomimetic Spindle Structures of Desert Beetle Skin[J]. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 2017, 3(2): 025003.
- [5] LEE M, YANG K, HWANG Y H, et al. Spheriform: Therapeutic Spheroid-Forming Nanotextured Surfaces Inspired by Desert Beetle *Physosterna Cribripes*[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2015, 4(4): 511-515.
- [6] DUPUIS A, YEOMANS J M. Droplet Dynamics on Patterned Substrates[J]. *Pramana*, 2005, 64(6): 1019-1027.
- [7] JU Jie, BAI Hao, ZHENG Yong-mei, et al. A Multi-Structural and Multi-Functional Integrated Fog Collection System in Cactus[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1-6.
- [8] PENG Jin-yang, YU Pu-ren, ZENG Song-jun, et al. Application of Click Chemistry in the Fabrication of Cactus-Like Hierarchical Particulates for Sticky Superhydrophobic Surfaces[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(13): 5926-5931.
- [9] 丁雅玉. 纳秒激光制备微孔阵列铝箔及其润湿与雾水收集特性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [10] DING Ya-yu. Nanosecond Laser Fabrication of Microporous Array Aluminum Foil and Its Wetting and Fog Collection Characteristics[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [11] LEE J, HWANG S, CHO D H, et al. RF Plasma Based Selective Modification of Hydrophilic Regions on Super Hydrophobic Surface[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 394: 543-553.
- [12] YANG Xiao-long, LIU Xin, SONG Jin-long, et al. Patterning of Water Traps Using Close-Loop Hydrophilic Micro Grooves[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 447-454.
- [13] DENG Si-yan, SHANG Wei-feng, FENG Shi-le, et al. Controlled Droplet Transport to Target on a High Adhesion Surface with Multi-Gradients[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [14] 安力佳. 基于纳米阵列的非均匀润湿性表面构建及其结露和结霜特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [15] AN Li-jia. Fabrication and Condensation and Frosting Properties of the Surfaces with Nano Arrays and Heterogeneous Wettability[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [16] 杨晓龙. 非均匀润湿性图案化表面加工及其液滴操控研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [17] YANG Xiao-long. Fabrication of Patterned Non-Uniform Wetting Surfaces and Their Applications in Droplet Manipulations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] XU Li-ping, CHEN Yan-xia, YANG Gao, et al. Ultratrace DNA Detection Based on the Condensing-Enrichment Effect of Superwetable Microchips[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2015, 27(43): 6878-6884.
- [19] QIAO Wen, ZHANG Tian-tian, YEN T, et al. Oil-Encapsulated Nanodroplet Array for Bio-Molecular Detection[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2014, 42(9): 1932-1941.
- [20] YEN T M, ZHANG Tian-tian, CHEN Ping-wei, et al. Self-Assembled Pico-Liter Droplet Microarray for Ultrasensitive Nucleic Acid Quantification[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(11): 10655-10663.
- [21] POPOVA A A, SCHILLO S M, DEMIR K, et al. Droplet-Array (DA) Sandwich Chip: A Versatile Platform for High-Throughput Cell Screening Based on Superhydrophobic-Superhydrophilic Micropatterning[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(35): 5217-5222.
- [22] CHANG Bo, ZHOU Quan, RAS R H A, et al. Sliding Droplets on Hydrophilic/Superhydrophobic Patterned Surfaces for Liquid Deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(15): 154102.
- [23] YOU I, KANG S M, LEE S, et al. Polydopamine Microfluidic System Toward a Two-Dimensional, Gravity-Driven Mixing Device[J]. *Angewandte Chemie*, 2012, 51(25): 6126-6130.
- [24] MUGHERLI L, BURCHAK O N, BALAKIREVA L A, et al. In Situ Assembly and Screening of Enzyme Inhibitors with Surface-Tension Microarrays[J]. *Angewandte Chemie*, 2009, 48(41): 7639-7644.