

四棱锥复合梯度表面液滴的定向移动

王湘涵^{1,2}, 弯艳玲^{1,2*}, 楚顺顺¹, 许金凯², 吴庆堂³

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 长春 130013; 2. 跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 长春设备工艺研究所, 长春 130012)

摘要: **目的** 探究出能使液滴移动距离达到最大的复合表面制备手段, 以及液滴在其表面的移动机理及影响因素。**方法** 采用电火花加工技术在 H62 黄铜表面制备四棱锥结构构建结构梯度, 并通过化学刻蚀在四棱锥表面制备润湿梯度, 从而形成复合梯度结构。分别使用扫描电子显微镜和高速摄像机观察复合表面的微观结构与试件表面液滴的移动过程。**结果** 复合结构表面不仅具有不对称几何形状引起的拉普拉斯压力, 其上的液滴还会受到不平衡表面张力的作用。润湿梯度提供的不平衡表面张力与结构梯度形成的拉普拉斯压力共同组成驱动合力, 令液滴在相较单一梯度表面表现出更强的移动性能。对比分析侧面夹角等因素对液滴定向移动的影响规律后得出, 经化学蚀刻后的复合表面, 液滴移动距离提升明显, 并且移动距离增加量与夹角 β 成正比。在结构梯度与润湿梯度的共同作用下, 液滴在 $\beta=5^\circ$ 的试件表面上定向移动距离达到最大, 最大移动距离 $L_{\max}=6.96$ mm。**结论** 相较于单一梯度表面, 复合型液滴定向移动表面可以获得最长的移动距离, 表现出良好的应用前景。制备方法上, 电火花线切割与化学刻蚀操作简单, 成本低廉, 有助于推动制备大批量液滴定向移动复合表面的相关研究。

关键词: 电火花; 黄铜; 逐步刻蚀法; 自驱移动; 复合梯度; 拉普拉斯压力

中图分类号: TG146.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)09-0351-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.031

Directional Droplet Movement Based on Spatial Quadric Pyramid Composite Surface

WANG Xiang-han^{1,2}, WAN Yan-ling^{1,2*}, CHU Shun-shun¹, XU Jin-kai², WU Qing-tang³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China; 2. Key Laboratory of Cross-scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun 130022, China; 3. Changchun Institute of Equipment and Process, Changchun 130012, China)

ABSTRACT: Directional movement of liquids has a wide range of applications in fog collection, oil-water separation, microfluidics, condensation and heat exchange, protein adsorption, and cell migration. It is found that organisms such as cactus spines and spider silk have the ability to drive the directional movement of liquid droplets due to the presence of structural gradients on the surface. Inspired by this, a composite structure surface is prepared in this work.

收稿日期: 2022-08-18; 修订日期: 2022-11-01

Received: 2022-08-18; Revised: 2022-11-01

基金项目: 吉林省教育厅科技研究计划项目 (JJKH20220735KJ); 吉林省科技厅自然科学基金 (20220101241JC); 稳定支持项目 (WDZC2019JJ016)

Fund: Technology Research Planning Project of Education Department of Jilin Province (JJKH20220735KJ); Natural Science Foundation of Science and Technology Department of Jilin Province (20220101241JC); Stability Support Project (WDZC2019JJ016)

引文格式: 王湘涵, 弯艳玲, 楚顺顺, 等. 四棱锥复合梯度表面液滴的定向移动[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 351-357.

WANG Xiang-han, WAN Yan-ling, CHU Shun-shun, et al. Directional Droplet Movement Based on Spatial Quadric Pyramid Composite Surface[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 351-357.

Wire electrical discharge machining (WEDM) was used to prepare a tetragonal structure on the surface of H62 brass, and wetting gradient was prepared on tetragonal surface by the stepwise chemical etching. 500 mL NaOH solution with a concentration of 2.67 mol/L was mixed with 500 ml ammonium persulfate solution with a concentration of 0.15 mol/L. The cone tip of the pyramid structure was vertically fixed at the bottom of the container, and the computer program was used to control the power device to push the syringe every 20 min to inject the same amount of mixed solution to complete the construction of the wetting gradient. Thus, the unbalanced surface tension provided by the wetting gradient and the Laplace pressure formed by the structural gradient formed a driving force, making the droplets exhibit stronger motion performance than a single gradient surface. Scanning electron microscope and high-speed camera were used to observe the microstructure of the composite surface and the movement of droplets on the surface of the specimen, respectively.

At the same time, the effect laws of the lateral angle and other factors on the droplet directional movement were compared and analyzed. Under the action of the structural gradient of the unetched surface, the driving force of the droplet decreased with the increase of the angle β , so the droplet moving distance was negatively correlated with the angle β . After a certain wetting gradient was given to the surface, at the same position from the tip, the side width of the specimen increased with the increase of the angle β , so that the unbalanced tension of the wetting gradient on the droplet also increased. Therefore, compared with the unetched pyramid surface, the movement distance of the composite surface droplets increased significantly, and the increase of the droplet movement distance was positively correlated with the angle β . Finally, under the combined action of structural gradient and wetting gradient, the directional movement distance of droplets on the surface of the specimen with $\beta=5^\circ$ reached the maximum, and the maximum movement distance $L_{\max}=6.96$ mm.

In conclusion, the composite surface preparation method that can maximize the droplet movement distance is explored, and the directional movement performance of droplets on the surface and its affecting factors are also studied. Compared with the single gradient surface, the composite droplet directional movement surface can obtain the longest movement distance. The preparation method of wire electrical discharge machining and chemical etching is simple and low cost, which is helpful to promote the preparation of large quantities of researches on directional movement of droplet based on composite surface, showing a good application prospect.

KEY WORDS: WEDM; brass; step-by-step etching; self-driven movement; composite gradient; Laplace pressure

近年来,液滴的定向移动因其广泛的应用而受到国内外众多研究者的极大关注^[1-3]。自然界中的猪笼草、湿润蜘蛛丝、仙人掌等生物的表面驱动液滴定向移动为制备仿生润湿梯度表面提供了大量的灵感^[4-7]。通常来说,当一个液滴滴落至固体表面时,由于表面张力的影响,液滴会向四周铺展直至达到平衡状态^[8]。一旦这种平衡被打破,液滴就会朝着某一方向移动。打破平衡的力很多,例如温度、光照、重力、电场、机械等^[9-11]。但随着对自然生物的研究深入发现,通过控制材料表面界面张力或几何形状可实现无外界能量输入的液滴定向移动。

换句话说,液滴之所以能在生物表面自发运动主要受几何形状的非均匀性和化学非均匀性的影响^[12]。前者会产生能量差和拉普拉斯压力差,驱动液滴发生移动^[13-15],而后者则会产生润湿梯度,驱动液滴从疏水区域向相对亲水区域运动^[16-18]。与均匀的表面相比,非均匀表面在控制液滴行为时,所需的多样性和精确度方面表现出巨大优势,这为在均匀表面上无法实现的新应用开辟了道路^[19]。基于这个理论,这些年来应用于微流控、液滴定向传输领域的加工方法与结构正在被逐步发现与利用,这些领域的相关研究也成

为如今的一个热点^[20]。

Zhang 等^[21]制作了梯形、三角形、矩形和弯月面 4 种不同形状的云母/蜡固定表面,通过对比水滴在这几种表面上自发定向移动的距离和速度,他们认为复合梯度曲面是实现液滴自发运输最大距离的最佳选择。Susan 等^[22]通过研究液滴在径向表面张力梯度表面上的运动后发现,当饱和蒸汽经过较冷的疏水衬底时,大量的水滴通过与周围的水滴结合而成核并生长,合并的液滴表现出偏向于表面的润湿性更强的一面的二维随机运动。Wang 等^[23]通过改变试件表面微结构,制备了驱动液滴定向移动的复合梯度膜表面,利用热丝化学气相沉积技术,制备了微晶和纳米晶金刚石 β -SiC 复合梯度膜。这种复合梯度膜可以驱动水从疏水侧表面转移到亲水侧表面,通过较低粗糙度与较长梯度的结合,可以驱动液滴以 250 mm/s 的速度定向移动。Shi 等^[24]将铜锥丝的一端浸泡在 CuSO_4 水溶液中,利用化学刻蚀与表面涂层相结合的方法制备了梯形锥形柱结构,经过表面化学改性后,可以实现连续和长距离的液滴定向移动。Chu 等^[25]设计了一种微结构异湿表面,使液膜在受水滴撞击后在微结构顶部自然破裂,随后脱水成一些复杂的图形图案,实现

了对大尺度液膜行为的控制。由此可见, 驱动液滴定向移动需要从构建润湿梯度或结构梯度 2 个方向加以实现。然而, 如何通过润湿性梯度和几何梯度的结合来提高复合梯度结构表面的驱动力, 仍然是众多研究者关注的问题^[26,27]。

本文受自然界中仙人掌刺、湿润的蜘蛛丝等生物表面结构梯度的启发, 制备了四棱锥梯度结构。这种锥形结构的特点: 当锥形结构的锥角小于一定值以后, 该结构表面对液滴产生拉普拉斯压力, 形成了推动水滴在锥形基底上实现自发定向移动的驱动力, 推动液滴由锥形结构尖端向根部移动。本文在四棱锥结构梯度表面上进一步利用化学刻蚀制备润湿梯度, 研究液滴在复合梯度表面的运动规律, 并探究液滴移动距离与四棱锥侧边棱线夹角以及其他变量的关系, 得到了复合型液滴定向移动表面的最长移动距离, 并分析了液滴的移动行为, 对应用于集水、微流控等领域

具有指导意义。

1 试验

1.1 复合结构表面制备

如图 1 所示, 试验材料为 H62 黄铜, 采用电火花线切割制备具有结构梯度的正四棱锥体, 电极丝直径为 0.2 mm, 加工表面粗糙度 $Ra \approx 10 \mu\text{m}$ 。润湿梯度分别构筑于 4 个完全相同的棱锥侧面上, 为了探究棱线夹角与液滴移动距离的关系, 夹角分别选取为 3° 、 5° 、 7° 、 9° , 并将夹角记为 β , 四棱锥总长为 20 mm。加工后的试件分别用丙酮、无水乙醇与去离子水在超声清洗仪中清洗 10 min, 并依次用 800#、1200#、1500#、2000# 砂纸对结构表面进行打磨抛光, 再次清洗后自然风干。为便于后续进行对比试验, 选取此时一部分未经化学刻蚀的四棱锥结构备用。

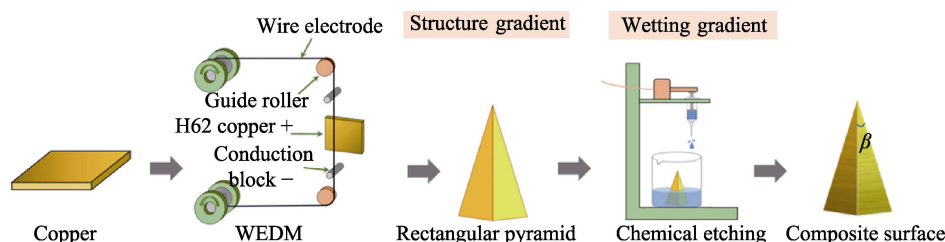


图 1 电火花线切割和化学刻蚀制备复合梯度四棱锥表面

Fig.1 Surface of composite gradient pyramid prepared by WEDM and chemical etching

选用化学刻蚀的方法制备润湿梯度。将 500 mL 浓度为 2.67 mol/L 的 NaOH 溶液与 500 mL 浓度为 0.15 mol/L 的过硫酸铵溶液混合。将四棱锥结构锥尖向上垂直固定在容器底部, 并利用计算机程序控制动力装置每 20 min 推压一次注射器, 注入等量混合溶液, 通过逐步刻蚀法构建润湿梯度。直到四棱锥结构尖端完全没入溶液中, 整个试验进行了 100 min。最终获得四棱锥表面从尖端至根部的润湿梯度(颜色由浅至深表示润湿性逐渐增大)。

1.2 测量与表征

采用扫描电子显微镜观 (Zeiss, EVO MA25, 德国) 测试件表面微结构, 并选取距尖端 5、10、15 mm 等 3 个不同位置进行 SEM 图像观测作为对照试验。采用 MMT-CAM-1 型光学接触角测量仪测量试件表面接触角, 试验液滴为 3 μL , 试验温度为室温。每个试件选取 5 个测量点, 取其平均值。PCO. Dimaxhs4 高速摄像机用于观测试件表面液滴的移动过程, 相机最大帧率为 7 000 帧/s。

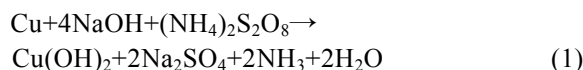
2 结果与讨论

2.1 表面形貌及润湿性

夹角为 3° 、 5° 、 7° 、 9° 的四棱锥表面及距其尖端

5、10、15 mm 等 3 个不同位置的 SEM 形貌如图 2 所示。可以看出, 不同锥度试件表面结构基本相同。在电火花线切割过程中, 由于电极丝与材料之间大量放热而产生的不规则突起和凹坑经研磨抛光后基本消失, 试样的表面平整度良好。

通过观察可以发现, 同一混合溶液与铜表面元素发生反应后, 会在试件表面生成类竹叶结构。每个试件锥尖无类竹叶结构出现, 沿轴向方向, 随着距离尖端越来越远, 类竹叶结构逐渐增加, 最终在试件末端, 表面会均匀布满类竹叶结构。由图 3 的不同反应时间下试件表面的 EDS 测试结果可知, 随着反应时间的增加, 试件铜元素和锌元素的含量均有所降低, 氧含量随着反应时间的增加逐渐增加至 2.5%、4.4%、6.6%、8.7%、10.0%。通过对表面微观结构及表面元素含量分析, 结合化学反应式 (1) 可以得出, 混合溶液与试件表面元素发生反应后在表面生成了 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 薄膜。随着反应时间增加, 试件表面生成的 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 逐渐累积, 形成了类竹叶结构。



由试件表面微观结构结合元素分析可知, 不同夹角下氧元素含量基本相同, 但同一夹角情况下, 随着与尖端距离的增加, 氧元素含量有所变化。试件表面

$\text{Cu}(\text{OH})_2$ 薄膜厚度随反应时间的增加而逐渐增加。由于 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 薄膜具有亲水性, 因此随着反应的进程,

试件表面各处接触角随着距锥尖距离增大而减小, 呈现润湿梯度的变化, 如图 4 所示。

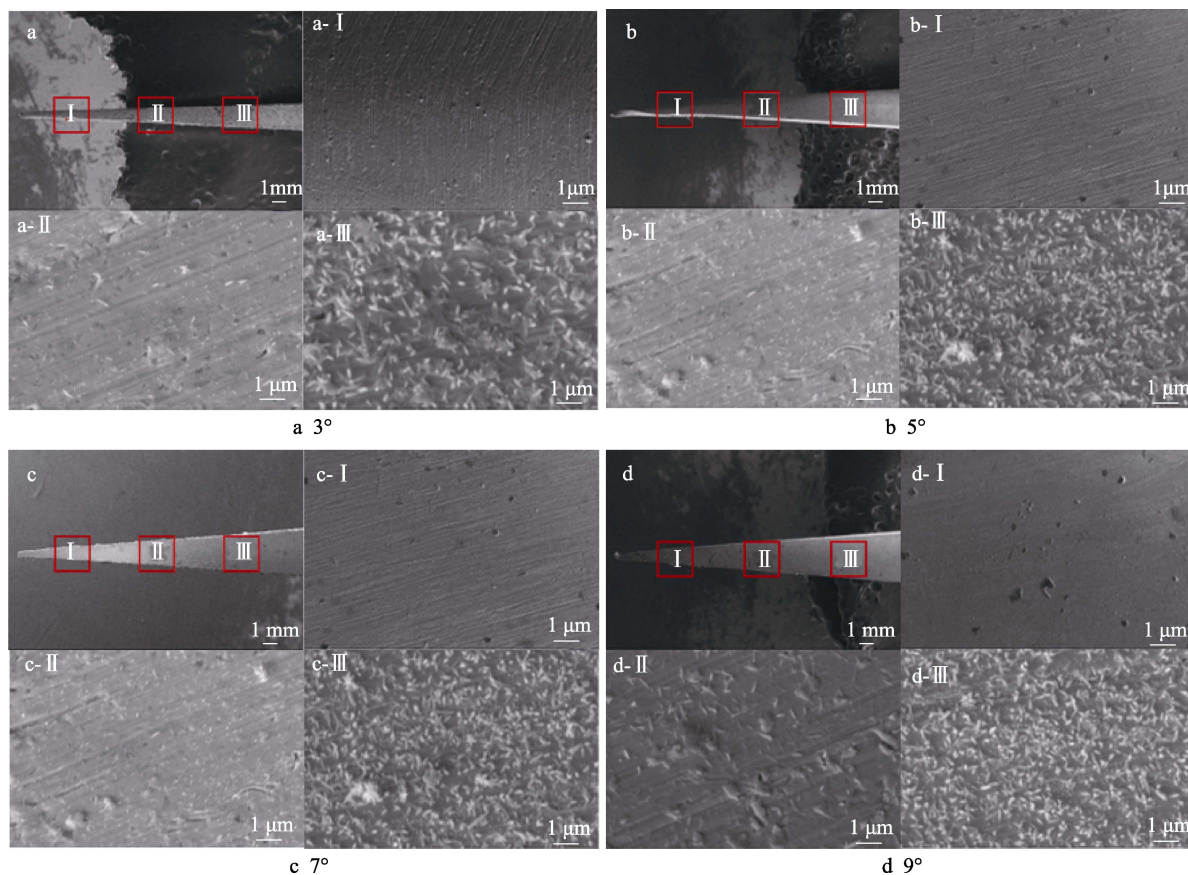


图 2 不同夹角的四棱锥表面及距其尖端 5、10、15 mm 位置的 SEM 图像
Fig.2 SEM images of the surface of a pyramid with angles of (a) 3°, (b) 5°, (c) 7°, (d) 9° and three different positions (5, 10, 15 mm) from its tip

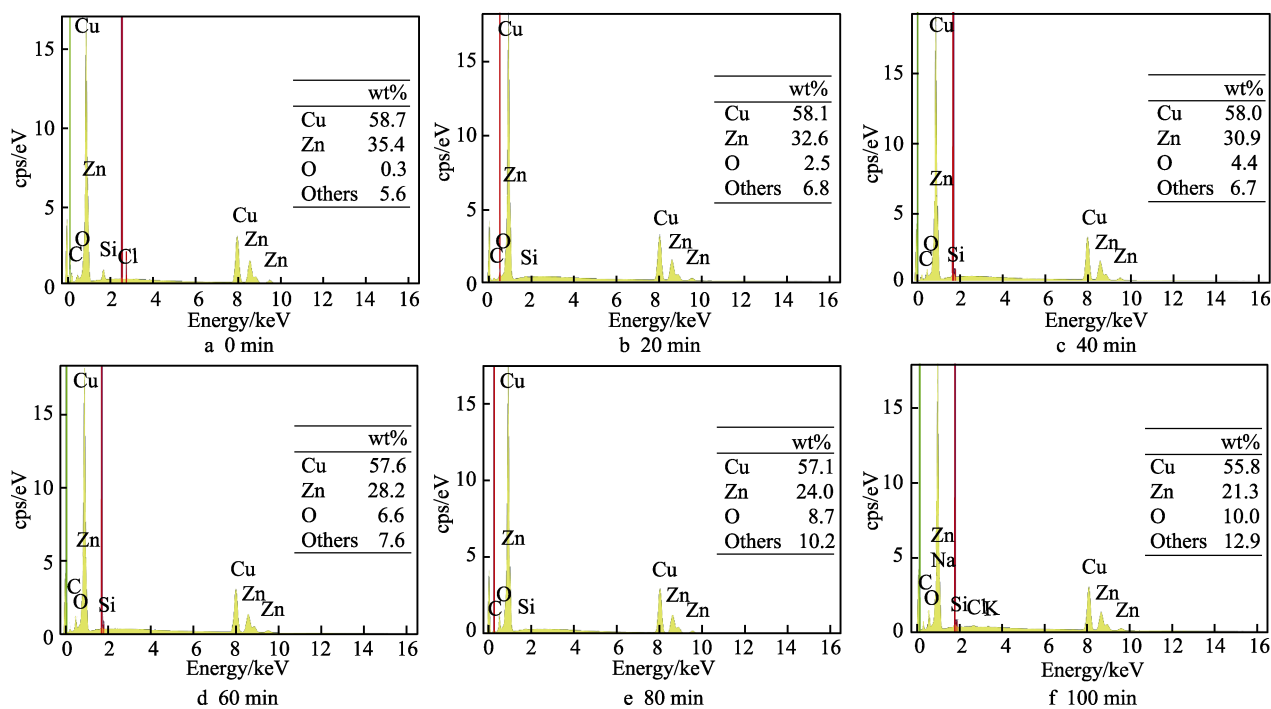


图 3 不同反应时间下试件表面元素含量
Fig.3 Surface element contents of specimens for different reaction time

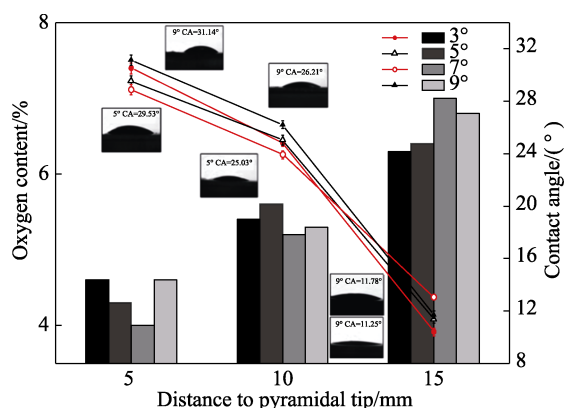


图 4 试件不同位置接触角变化曲线

Fig.4 Contact angle curves of specimens at different positions

2.2 液滴定向移动过程

3 μL 液滴在表面定向移动过程如图 5 所示。研究发现,液滴在四棱锥锥尖释放时,液滴轮廓呈现对称的球形。随着液滴在拉普拉斯压力作用下开始运动,由于四棱锥结构的不对称性,液滴前端受到的压力要大于后端。而后端受黏附阻力的影响,液滴轮廓呈现橄榄球形。随着液滴运动的继续,液滴轮廓持续改变。

对于未经刻蚀的四棱锥结构,当液滴外轮廓全部进入四棱锥侧棱线内时,液滴与四棱锥侧棱线相切或相离,不对称几何形状对液滴作用的压力差消失,此时液滴轮廓会转变为半球形。复合表面与此不同的是当液滴运动停止后,液滴轮廓并未转变为半球形,而是继续保留橄榄球状。这是由于当液滴在表面运动时,由于试件表面具有黏附性会导致液滴黏附在表面,处于移动过程的液滴体积逐渐减小,并伴随着表面黏附性对液滴定向移动产生的移动阻力。在某一时刻当拉普拉斯压力小于阻力时,液滴停止运动,因此会出现液滴在试件表面定向移动的距离小于理论分析距离的情况。

由于本文构建的结构为四棱锥结构,为便于后续讨论,将其简化表示为如图 6 所示的楔形形状。已知四棱锥侧面夹角为 β ,液滴的圆心为 O ,当液滴处于移动过程中时,液滴轮廓并不规则,设 R 为液滴前侧曲率半径, r 为液滴后侧曲率半径。

当液滴停止移动时,液滴前侧曲率半径 R 近似等于后侧曲率半径 r ,此时液滴的移动距离可以定义为:

$$L = r \left[\frac{1}{\sin(\beta/2)} - 1 \right] \quad (2)$$

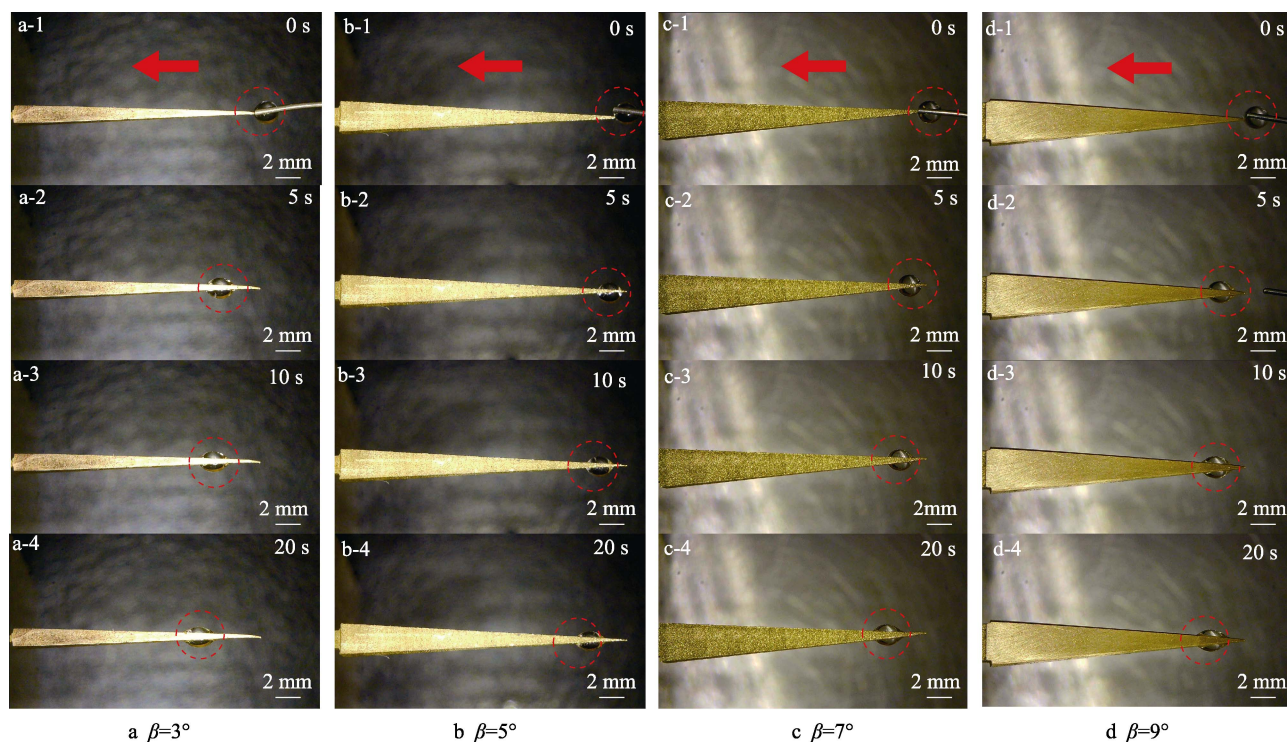


图 5 试件表面液滴定向移动过程

Fig.5 Directional movement process of droplet on the specimen surface

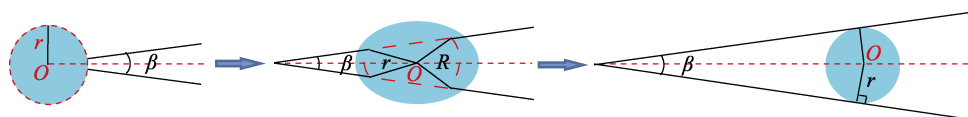


图 6 液滴移动过程

Fig.6 Diagram of droplet movement

根据式(2)可以推断,当液滴体积固定且四棱锥面性质均一时,液滴在试件表面定向移动的距离随侧面夹角 β 的增大而减小。

如图7所示,设作用于液滴表面的张力为 γ ,液滴在不同锥度结构表面所受到的拉普拉斯压力 $F_p^{[28]}$ 为:

$$F_p = -\int \frac{2\gamma}{R^2 + r} \sin \frac{\beta}{2} dz \quad (3)$$

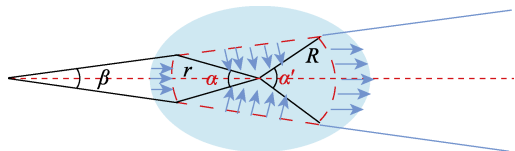


图7 液滴自驱移动驱动力

Fig.7 Driving force of droplet self-driving movement

由式(3)可知, F_p 只与液滴半径和试件侧面夹角 β 相关。这就意味着若液滴半径固定,当表面微结构相同,且化学成分均匀时,试件表面对液滴的拉普拉斯压力仅受夹角 β 影响,增大锥尖角度,液滴受到的驱动力减小。在结构梯度表面,拉普拉斯压力是液滴定向移动的主要驱动力。但是,由于表面存在一定的黏附性,当液滴在试件表面移动过程中,还会受到黏附力 F_N 的阻碍,黏附力的计算公式 $^{[29]}$ 为:

$$F_N = 2\pi r \gamma (\cos \theta_A + \cos \theta_B) \quad (4)$$

式中: θ_A 、 θ_B 为液滴前后两侧表面接触角。此时有:

$$F_{\text{合}} = F_p - F_N \quad (5)$$

当 $F_p > F_N$ 时,驱动合力会推动液滴由四棱锥结构尖端沿轴向根部运动。当 $F_p \leq F_N$ 时,对液滴作用的外力相互平衡,液滴受到的驱动合力为0,此时液滴的定向移动停止 $^{[30-31]}$ 。结合式(3)和(4)来看,当侧面夹角与液滴的半径大小固定时,液滴受到的拉普拉斯压力相同。此时,液滴在四棱锥结构梯度表面受到的复合驱动力就仅受液滴受到的黏附阻力的影响,阻力越大,复合驱动力越小,液滴在试件表面定向移动的距离越小。

对于本文所研究的复合结构表面,它不仅具有不对称几何形状引起的拉普拉斯压力,液滴还会受到不平衡表面张力的作用。不平衡表面张力形成驱动液滴运动的正向驱动力,驱动液滴由表面疏水区域向亲水区域运动。定量测量表明,润湿梯度表面对液滴定向移动提供的驱动力为:

$$F = \int_{h_2}^{h_1} \gamma (\cos \theta_A - \cos \theta_B) dx \quad (6)$$

式中: γ 为表面张力; dx 为试件表面宽度 h 的积分变量。液滴受驱动力下的移动过程如图8所示。

就润湿梯度表面而言,液滴在润湿梯度表面受到的驱动力 F_c 取决于液滴两侧表面张力和试件宽度。液滴在运动过程中到达距锥尖相同距离位置时,两侧表面张力 γ 相同,这是由加工参数决定的,此时不平

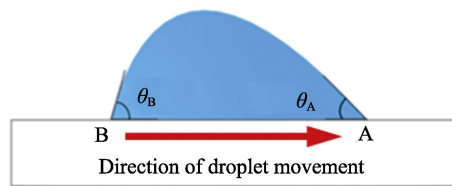


图8 驱动力下液滴移动方向

Fig.8 Droplet movement direction under driving force

衡表面张力 F_c 仅取决于试件表面宽度。改变夹角 β ,在距离锥尖相同距离位置,试件表面宽度 h 也随之改变。 h 增大,液滴受到的不平衡表面张力也会增大,反之亦然。

对比试验表明,当夹角 $\beta=3^\circ$ 时,复合表面液滴定向移动的距离减小,减小量 $\Delta L=0.31$ mm。当 $\beta=5^\circ$ 、 7° 、 9° 时,液滴移动距离增加,增加量 ΔL 分别为2.58、2.64、2.84 mm。这是由于当夹角 $\beta=3^\circ$ 时,侧面宽度较小,不平衡表面张力 F_c 作为液滴定向移动的正向驱动力,其增加量小于试件表面黏附性增大对液滴移动的阻力增加量。当 $\beta=5^\circ$ 、 7° 、 9° 时,由于试件表面宽度较大,不平衡表面张力对液滴的作用力大于黏附性增加对液滴移动造成的增加阻力,由此导致液滴移动距离增大,如图9所示。结合相关理论分析可知,未刻蚀表面在结构梯度影响下,液滴的驱动力随夹角 β 增大而减小,因而液滴移动距离与夹角 β 呈负相关。在赋予表面一定润湿梯度后,在距离尖端相同位置处,试件侧面宽度随夹角 β 增大而增大,使得润湿梯度对液滴作用的不平衡张力也会随之增加,因而相较于未经刻蚀的四棱锥表面,液滴移动距离增加量 ΔL 与夹角 β 呈正相关。最终在结构梯度与润湿梯度的共同作用下,液滴在 $\beta=5^\circ$ 的试件表面上定向移动距离达到最大,最大移动距离 $L_{\max}=6.96$ mm。

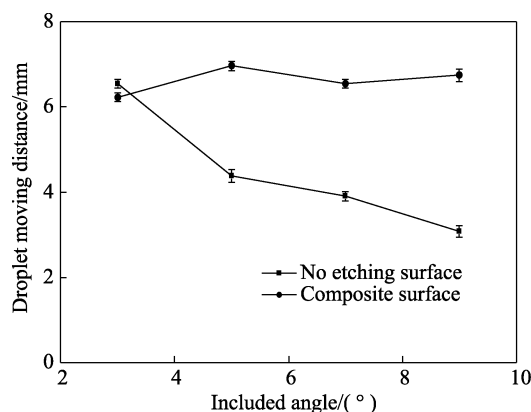


图9 液滴定向移动距离对比试验结果

Fig.9 Comparison of experimental results of droplet directional movement distance

3 结论

1) 采用电火花线切割机床制备了四棱锥结构表

面。同时, 结合了化学刻蚀调控表面的化学组成产生不平衡的表面张力, 在其表面制备出润湿梯度。通过两者相结合得到的复合结构表面可以实现液滴的自驱定向移动。

2) 当表面侧边夹角 $\beta=3^\circ$ 时, 侧面宽度较小, 不平衡表面张力 F_c 作为液滴定向移动的正向驱动力增加量小于试件表面黏附性增大对液滴移动的阻力增加量, 复合表面液滴定向移动的距离减小, 减小量 $\Delta L=0.31$ mm。

3) 当表面侧边夹角 $\beta=5^\circ$ 、 7° 、 9° 时, 由于试件表面宽度较大, 不平衡表面张力对液滴的作用力大于黏附性增加对液滴移动造成的增加阻力。由此使得液滴移动距离增大, 增加量 ΔL 分别为 2.58、2.64、2.84 mm。

4) 相较于未蚀刻表面, 经化学蚀刻后的复合表面液滴移动距离提升明显, 并且移动距离增加量与夹角 β 成正比。最终在结构梯度与润湿梯度的共同作用下, 液滴在 $\beta=5^\circ$ 的试件表面上定向移动距离达到最大, 最大移动距离 $L_{\max}=6.96$ mm。

参考文献:

- [1] LIU Ke-song, JIANG Lei. Metallic Surfaces with Special Wettability[J]. *Nanoscale*, 2011, 3(3): 825.
- [2] ZHAO Yan, WANG Hong-xia, ZHOU Hua, et al. Directional Fluid Transport in Thin Porous Materials and Its Functional Applications[J]. *Small*, 2017, 13(4): 1601070.
- [3] YAO Xi, SONG Yan-lin, JIANG Lei. Applications of Bio-Inspired Special Wettable Surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(6): 719-734.
- [4] WANG Hong-xia, NIU Hai-tao, ZHOU Hua, et al. Multifunctional Directional Water Transport Fabrics with Moisture Sensing Capability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(25): 22878-22884.
- [5] CUI Ying, LI De-wen, BAI Hao. Bioinspired Smart Materials for Directional Liquid Transport[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(17): 4887-4897.
- [6] GUO L, TANG G H. Experimental Study on Directional Motion of a Single Droplet on Cactus Spines[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 198-202.
- [7] SONG Y G, JIANG S J, LI G Q, et al. Cross-Species Bio-Inspired Anisotropic Surface for Active Droplets Transportation Driven by Unidirectional Microcolumn Waves[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12: 42264-42273.
- [8] JU Jie, ZHENG Yong-mei, JIANG Lei. Bioinspired One-Dimensional Materials for Directional Liquid Transport[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2014, 47(8): 2342-2352.
- [9] ROSSEGGER E, HENNEN D, GRIESSER T, et al. Directed Motion of Water Droplets on Multi-Gradient Photopolymer Surfaces[J]. *Polymer Chemistry*, 2019, 10(15): 1882-1893.
- [10] LI Jia-qian, SONG Yu-xin, ZHENG Huan-xi, et al. Designing Biomimetic Liquid Diodes[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(9): 1902-1915.
- [11] JIANG Jie-ke, GAO Jun, ZHANG Heng-di, et al. Directional Pumping of Water and Oil Microdroplets on Slippery Surface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(7): 2482-2487.
- [12] LI Jian, GUO Zhi-guang. Spontaneous Directional Transportations of Water Droplets on Surfaces Driven by Gradient Structures[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(29): 13814-13831.
- [13] SOTO D, LAGUBEAU G, CLANET C, et al. Surfing on a Herringbone[J]. *Physical Review Fluids*, 2016, 1: 013902.
- [14] HOU Kong-yang, LI Xiao-yang, LI Qiang, et al. Auperhydrophilic/Superhydrophobic: Tunable Wetting Patterns on Superhydrophilic/Superhydrophobic Hybrid Surfaces for Enhanced Dew-Harvesting Efficacy[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(2): 2070010.
- [15] 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: 45687.
- [16] CHEN F, ZHANG D S, YANG Q, et al. Bioinspired Wetting Surface via Laser Microfabrication[J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(15): 6777-6792.
- [17] QI Lin, NIU Ye, RUCK C, et al. Mechanical-Activated Digital Microfluidics with Gradient Surface Wettability[J]. *Lab on a Chip*, 2019, 19(2): 223-232.
- [18] ROY S, BHANDARU N, DAS R, et al. Thermally Tailored Gradient Topography Surface on Elastomeric Thin Films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(9): 6579-6588.
- [19] LI Hui-zeng, LI An, ZHAO Zhi-peng, et al. Precise Droplet Manipulation Based on Surface Heterogeneity[J]. *Accounts of Materials Research*, 2021, 2(4): 230-241.
- [20] WANG Peng-wei, BIAN Rui-xin, MENG Qing-an, et al. Bioinspired Dynamic Wetting on Multiple Fibers[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(45): 1703042.
- [21] ZHENG Yan-fen, CHENG Jiang, ZHOU Cai-long, et al. Droplet Motion on a Shape Gradient Surface[J]. *Langmuir*, 2017, 33(17): 4172-4177.
- [22] DANIEL S, CHAUDHURY M K, CHEN J C. Fast Drop Movements Resulting from the Phase Change on a Gradient Surface[J]. *Science*, 2001, 291(5504): 633-636.
- [23] WANG Tao, HANDSCHUH-WANG S, HUANG Lei, et al. Controlling Directional Liquid Motion on Micro- and Nanocrystalline Diamond/ β -SiC Composite Gradient Films[J]. *Langmuir*, 2018, 34(4): 1419-1428.

(下转第 407 页)