

# 液滴在双轨亲水轨道上的运动特性研究

李准, 郑佳宜, 高芳, 余延顺

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

**摘要:** **目的** 探究重力驱动液滴在双轨亲水轨道上的运动特性, 揭示其力学机理。**方法** 采用喷涂法制备不锈钢超疏水表面, 然后采用激光刻蚀法在超疏水表面上加工出不同类型的亲水轨道。研究液滴在不同轨道上的运动行为, 讨论液滴运动状态与轨道参数之间的关系, 并对液滴运动的力学特性进行分析。**结果** 液滴在平行双轨轨道上的运动阻力约为在单轨轨道上的 1.6~2.4 倍, 其与轨道宽度呈正相关, 与轨道间距呈负相关, 且液滴运动终止时呈现出轨道中途停滞、轨道末端停滞、脱离轨道末端三种状态; 液滴在非平行双轨轨道上的运动阻力与运动方向有关, 由宽端至窄端的运动阻力较由窄端至宽端更小, 前者约为后者的 90.7%。**结论** 液滴在轨道上的运动阻力主要受液滴与亲水轨道的接触面积影响。当平行双轨轨道的间距增大时, 液滴在垂直轨道的方向上拉伸效果增强, 液滴将沿平行轨道的方向收缩, 铺展长度减小, 由此液滴与亲水轨道的接触面积减小, 从而降低了液滴运动阻力; 而液滴在非平行轨道不同运动方向上的阻力差异与液滴的表面张力有关。

**关键词:** 超疏水表面; 双轨; 亲水轨道; 液滴; 运动

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)08-0427-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.039

## Motion Characteristics Study of Water Droplets on Dual-rail Hydrophilic Tracks

LI Zhun, ZHENG Jia-yi, GAO Fang, YU Yan-shun

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** Inspired by the dual-rail tracks train, the motion characteristics of water droplets on the dual-rail hydrophilic tracks was studied, and its mechanical mechanism was revealed. First, the superhydrophobic surface of stainless steel was prepared by spraying method, and then different types of hydrophilic tracks were processed on the superhydrophobic surface by laser etching. The motion behavior of water droplets on different tracks was studied, the relationship between water droplets motion state and tracks parameters was discussed, and the mechanical properties of water droplets motion was analyzed. The results show that the movement resistance of water droplets on the parallel dual-rail tracks is about 1.6-2.4 times that of the single track, and is positively correlated with tracks width and negatively correlated with tracks spacing. The termination state of

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-12-07

Received: 2021-01-27; Revised: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51706101)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51706101)

作者简介: 李准 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为液滴传输。

Biography: LI Zhun (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: droplet transport.

通讯作者: 郑佳宜 (1986—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为液滴动力学。

Corresponding author: ZHENG Jia-yi (1986-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: droplet dynamics.

引文格式: 李准, 郑佳宜, 高芳, 等. 液滴在双轨亲水轨道上的运动特性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 427-434.

LI Zhun, ZHENG Jia-yi, GAO Fang, et al. Motion Characteristics Study of Water Droplets on Dual-rail Hydrophilic Tracks[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 427-434.

water droplets movement presents three types: stagnation in the middle of the tracks, stagnation at the end of the tracks and separation from the end of the tracks. The movement resistance of water droplets on non-parallel dual-rail tracks is related to the movement direction, and the movement resistance from wide end to narrow end is smaller than that from narrow end to wide end, which is about 90.7% of latter. It is concluded that the movement resistance of water droplets on the tracks is mainly affected by the contact area between water droplets and hydrophilic tracks. When the spacing of parallel dual-rail tracks increases, the stretching effect of water droplets in the vertical tracks direction will enhanced, then the water droplets will shrink along the parallel tracks direction and the spreading length will decrease, so the contact area between water droplets and hydrophilic tracks decreases, which lead to the movement resistance of water droplets reduced. However, the resistance difference of water droplets in different directions of non-parallel tracks is related to the surface tension of water droplets.

**KEY WORDS:** superhydrophobic surface; dual-rail; hydrophilic tracks; water droplets; motion

润湿性是表征固液接触状态的重要特性,根据接触角的不同,表面可分为亲水表面、疏水表面和超疏水表面。超疏水表面由于在抗结冰<sup>[1-2]</sup>、自清洁<sup>[3-4]</sup>、油水分离<sup>[5-6]</sup>、强化传热<sup>[7-8]</sup>等领域表现出的优良性能而备受关注。随着润湿性研究的深入开展,非均匀润湿性表面在液滴操控领域表现出重要的应用前景,如微流控<sup>[9]</sup>、雾水收集<sup>[10-11]</sup>等。与表现出均一润湿特性的表面不同,非均匀润湿表面多因化学成分或粗糙结构的不同而表现出润湿性的不均匀分布<sup>[12]</sup>,如润湿性梯度表面<sup>[13-14]</sup>、图案化表面<sup>[15-19]</sup>等,而非均匀润湿性的存在也为液滴的可控运动提供了可能。然而,润湿性梯度表面和图案化表面存在加工工艺复杂、效率低等问题,直接在超疏水表面上构建轨道则受到了众多学者的关注。目前,学者们已开发出不同方法用以加工目标轨道。如 Seo 等<sup>[20]</sup>采用紫外光催化分解效应,在涂覆十二烷基三氯硅烷的超疏水纳米阵列上获得了亲水轨道。Finn 等<sup>[21]</sup>采用激光切割法获得了具有精确微结构的沟槽图案。Balu 等<sup>[22]</sup>则采用印刷技术在超疏水纸面上获得了亲水迹线等。在此基础上,学者们开展了有关轨道宽度、轨道深度、轨道性质等多方面的研究,实现了液滴的定向控制、混合、选择性输运等多种功能,为液滴输运提供了许多新的思路。Yang 等<sup>[23]</sup>通过观察液滴在亲水轨道上的运动情况,发现液滴在平行轨道方向上的运动阻力明显小于垂直方向,从而保证液滴在一定范围内不偏离轨道。Jiang 等<sup>[24]</sup>则发现,相比轨道深度而言,轨道宽度对液滴输运的影响更大,并成功实现了液滴在亲水轨道上的混合和定向收集。除了液滴在轨道上的运动研究外, Sousa 等<sup>[25]</sup>观察了连续水流在亲水线上的流动情况,其在线条宽度为 0.5 mm,流量达到 1.6 mL/min 的情况下依然能保持良好的运动状态,当流动情况随着流量的增大而恶化时,只需适当增加线条宽度便可有效改善。而除了亲水轨道外,有学者也开展了疏水轨道的相关研究,以求实现液滴的无损输运<sup>[26]</sup>。

虽然液滴在轨道上的运动研究已获得不少成果,然而现有的研究中轨道类型相对单一,多为单轨轨

道,且就单轨轨道而言,当液滴运动速度较快或体积较大时,也存在偏离轨道的问题。本文开展了液滴在双轨轨道上的运动试验,包括平行双轨和轨道间距渐变的非平行双轨,研究液滴在双轨轨道上的运动阻力随轨道宽度和轨道间距的变化规律,讨论液滴运动状态与轨道参数之间的关系,并对液滴在双轨轨道上的力学特性进行分析。

## 1 材料制备

### 1.1 超疏水表面的制备

采用喷涂法进行不锈钢超疏水表面的制备,所采用的涂料分为底涂涂料和面涂涂料两种。底涂涂料以醋酸丁酯为溶剂,加入改性氟树脂和丙酮,并进行磁力搅拌;面涂涂料由丙酮和氟改性二氧化硅经磁力搅拌混合而成,可对固体表面进行改性。超疏水表面具体制备过程如下:首先将不锈钢片(40 mm×50 mm)用砂纸打磨,去除表面氧化层及污渍;将打磨后的不锈钢片用去离子水进行超声清洗再干燥处理;而后将底涂涂料充分搅拌均匀,用喷枪将其多次薄而均匀地喷涂在不锈钢片表面,喷涂厚度约为 0.03~0.05 mm,待涂层自然风干;底涂涂层风干后,采用相同方法在底涂涂层上方喷涂面涂涂料,涂层厚度同上,自然风干 2 h。对风干后的不锈钢片进行接触角及滚动角测量,随机选取 3 处不同位置,最终测得其接触角为 $(160\pm 2)^{\circ}$ ,滚动角为 $(2\pm 0.3)^{\circ}$ 。

### 1.2 亲水轨道的加工

亲水轨道的加工选用激光刻蚀法。轨道参数的确定从加工效率、试验可行性、试验误差等多方面考量。对于轨道宽度而言,轨道宽度太小,液滴极易在运动初始偏离轨道方向,难以获取有效数据;宽度太大,体积较小的液滴一旦接触轨道便会马上铺展变形,无法保持原有形状。而前期的文献调研也表明,亲水轨道宽度设置以 0.1~1.0 mm 之间为宜,故轨道宽度在此范围内进行选择。其次,为了更好地反映不同轨道宽度之间的差异,轨道宽度的选择不宜太接近,故选

择 0.2、0.4 和 0.8 mm 3 组数据。轨道间距的确定主要基于两点: 间距太小, 既增大加工难度, 也会引起轨道边缘毛刺数量增加, 导致受损表面所占比率增大, 从而增大试验误差; 间距太大, 液滴极易从轨道之间的超疏水表面滑离而无法开展试验, 故选择 1.0、1.5 和 2.0 mm 3 组数据 (见表 1)。由于采用的不锈钢为亲水性材料, 故轨道深度超过涂层厚度即可获得亲水轨道, 根据表面涂层厚度, 最终确定轨道刻蚀深度为 0.1 mm。

表 1 轨道参数  
Tab.1 Parameters of tracks

Tracks type	Schematic diagram	Tracks spacing/mm	Tracks width/mm
Single track		—	0.2,0.4,0.8
Dual-rail tracks-parallel		1.0	0.2,0.4,0.8
		1.5	
		2.0	
Dual-rail tracks-nonparallel		0.6, 1.4	0.2,0.4,0.8
		0.9, 2.1	
		1.2, 2.8	

2 试验原理及方法

2.1 试验原理

从力学角度而言, 液滴能否沿着一定倾斜角度的轨道运动取决于驱动力 (液滴重力分力) 与轨道表面黏附力的相对大小。当液滴重力分力小于轨道黏附力时, 液滴将黏附在轨道表面, 此时, 需增大重力分力直至大于表面粘附力才能驱动液滴运动。增大重力分力一般有两种方式, 一是保持液滴体积不变, 通过提高表面倾斜角度达到增大重力分力的目的, 但当液滴体积较小时, 可能出现其始终黏附在轨道上的情况, 即使表面倾斜角度达到 90°也无法使液滴运动; 二是保持倾斜角度不变, 通过增大液滴体积以增大重力分力。考虑试验装置的可操作性以及方式一的局限性, 本文通过增大液体体积的方式来克服轨道黏附力, 并将液滴刚好能沿着轨道运动的体积定义为临界滑动体积, 临界滑动体积越大, 即液滴运动时所需的驱动力越大, 其运动阻力也就越大。

2.2 试验装置及方法

试验装置由液滴发生装置、图像采集装置、倾角可调平台和其它辅助部件 (光源) 组成。液滴发生装置主要包括控制器、步进装置和注射器, 注射器位于步进装置底端, 通过控制器控制步进装置的启停和进给速度以挤压注射器产生液滴。图像采集装置由摄像机和计算机组成, 实时拍摄试验现象。试验时, 将亲水轨道表面放置于倾角可调的平台上, 通过此平台调节表面倾斜角度; 手动调节注射器尖端与轨道表面的垂直距离, 既保证液滴能正常脱离注射器尖端, 又使液滴落于轨道时保持较小的撞击速度, 以减少液滴的溅射。试验装置原理如图 1 所示。

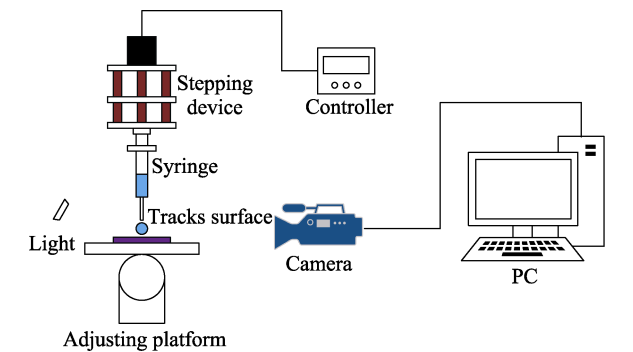


图 1 试验装置原理图  
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

3 结果与讨论

3.1 液滴与亲水轨道的接触特性

为了了解液滴与轨道的接触特性, 从不同方向观察了液滴在轨道上的润湿状态 (见图 2)。对于宽度为 0.8 mm 的单轨轨道 (如图 2a、b 所示), 液滴在平行轨道方向依然保持着较大的接触角; 而从垂直轨道方向来看, 液滴与轨道间的接触角明显小于 90°, 且在亲水轨道毛细力的作用下, 液滴与轨道之间形成向两侧铺展的“液桥” (红圈处)。对于间距为 1.0 mm, 宽度为 0.8 mm 的双轨轨道 (如图 2c、d 所示), 由于轨道间距的原因, 即使从平行轨道方向来看, 液滴也与表面有着较大的接触面积; 在垂直轨道方向, 液滴在双轨轨道上的接触角较单轨轨道更小, 铺展长度明显增加。

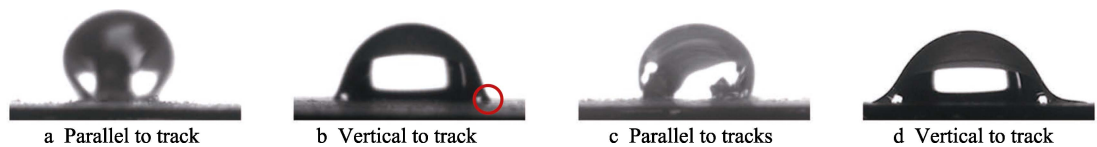


图 2 液滴在轨道不同方向上的润湿状态: (a)(b): 单轨-宽度 0.8 mm;  
(c)(d): 双轨-宽度 0.8 mm, 间距 1.0 mm

Fig.2 Wetting state of water droplets on the tracks in different directions: a) b) single track-track width 0.8 mm; c) d) dual-rail tracks-tracks width 0.8 mm, tracks spacing 1.0 mm

### 3.2 液滴在平行双轨亲水轨道上的运动特性

图3记录了当倾角为 $20^\circ$ 时,液滴在宽 $0.2\text{ mm}$ ,间距 $1.0\text{ mm}$ 的双轨轨道上的整个运动过程。在试验过程中,注射器每次产生一个液滴,将单个液滴体积计为 $1V$  ( $3\sim 4\text{ }\mu\text{L}$ ), $2V$ 代表两个液滴混合的体积,以此类推。在未达到临界滑动体积时,液滴将粘附在轨道上(见图3a),此时控制步进装置挤压注射器继续产生液滴,直至液滴能沿着轨道顺利运动,记录所滴下液滴的数量,以此表征此工况下的临界滑动体积。

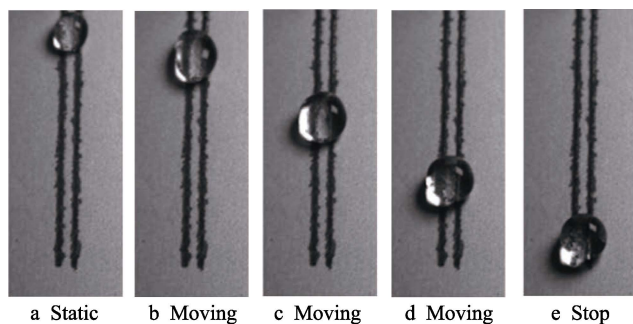


图3 液滴在双轨轨道上的运动过程

Fig.3 Motion process of water droplets on dual-rail tracks

图4记录了液滴在不同工况下的临界滑动体积(轨道间距为 $0$ 代表单轨轨道)。以倾角为 $10^\circ$ 的工况为例(见图4a),液滴在宽 $0.2$ 、 $0.4$ 和 $0.8\text{ mm}$ 的单轨轨道上对应的临界滑动体积分别为 $4V$ 、 $6V$ 和 $10V$ ;而在间距为 $1.0\text{ mm}$ 的双轨轨道上,3种宽度所对应的临界滑动体积分别为 $9V$ 、 $12V$ 和 $17V$ 。可以看出,无论是单轨轨道还是双轨轨道,临界滑动体积均随着轨道宽度的增大而增大,且液滴在双轨轨道上的临界滑动体积明显大于单轨轨道。但随着轨道间距的增大,液滴在双轨轨道与单轨轨道上的临界滑动体积差距减小。如在 $10^\circ$ 的工况下,轨道宽度为 $0.2\text{ mm}$ 时,间距为 $1.5\text{ mm}$ 和 $2.0\text{ mm}$ 的双轨轨道对应的临界滑动体积分别为 $8V$ 和 $6V$ ,均小于间距为 $1.0\text{ mm}$ 时的临界滑动体积( $9V$ ),呈现逐渐减小的趋势。据此,可以合理推断,对于双轨轨道而言,液滴运动阻力随轨道间距的增大而减小,两者呈负相关关系。为了更加具体地反映液滴在双轨轨道与单轨轨道上运动阻力的差异,图4d表征了相同轨道宽度下,液滴在双轨轨道上的临界滑动体积( $V_{II}$ )与在单轨上的临界滑动体积( $V_I$ )的平均比值。当轨道由单轨变为双轨时,轨道数量变为原来的2倍,但液滴运动阻力可增大2倍以上。而随着轨道间距的增大,液滴运动阻力增大的比例逐渐降低,在轨道间距为 $2.0\text{ mm}$ 时,约为单轨时的1.6倍。

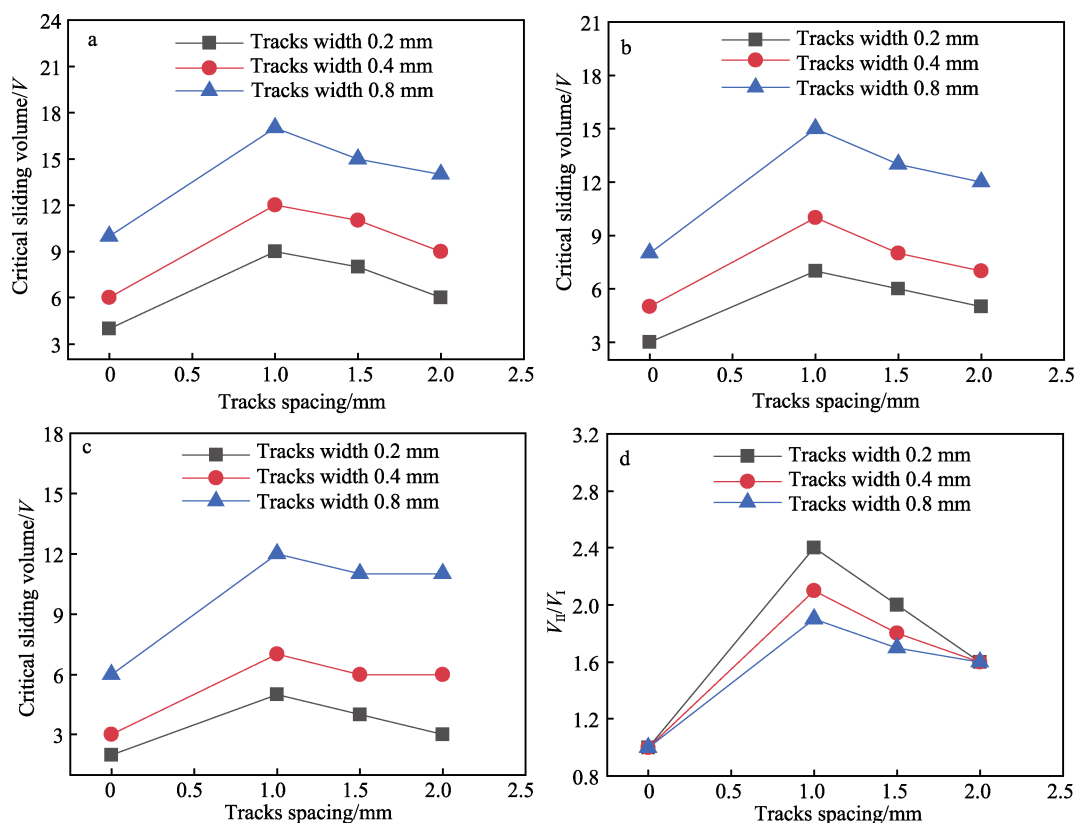


图4 液滴在不同倾角下的临界滑动体积

Fig.4 Critical sliding volume of water droplets at different dip angles:  
a)  $10^\circ$ ; b)  $20^\circ$ ; c)  $30^\circ$ ; d) ratio of critical sliding volume on dual-rail tracks ( $V_{II}$ ) to critical sliding volume on single track ( $V_I$ )



根据固体表面水滴运动的力学模型, 液滴运动阻力可表示为<sup>[27]</sup>:

$$F_f = \lambda A v \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为表面的摩擦系数,  $A$  为固-液接触面积,  $v$  为液滴运动速度。如图 5 所示, 液滴与固体表面的接触面积包括与超疏水表面的接触面积 ( $A_s$ ) 和与亲水轨道的接触面积 ( $2A_H$ ) 两部分, 而超疏水表面由于其良好的拒水性, 表面黏附力基本可忽略不计, 故液滴运动阻力主要受与亲水轨道的接触面积  $A_H$  的影响。当轨道宽度一定时,  $A_H$  直接由液滴铺展长度  $L_P$  决定。液滴与小间距的双轨轨道接触时, 其铺展长度记为  $L_{P1}$ , 随着轨道间距的增大, 垂直轨道方向的拉伸效果增强, 为保持液滴内部压力平衡, 液滴将沿着平行轨道的方向收缩, 其铺展长度记为  $L_{P2}$ , 而  $L_{P2}$  明显小于  $L_{P1}$ , 其与亲水轨道的接触面积也随之减小, 即轨道间距越大, 液滴与亲水轨道的接触面积越小, 液滴运动阻力也就越小。

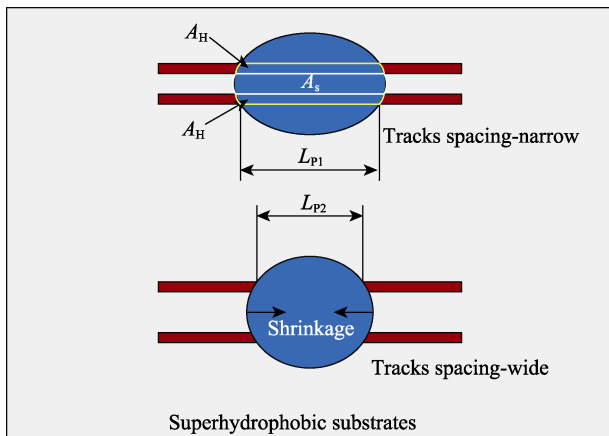


图 5 液滴在不同间距亲水轨道上的铺展状态  
Fig.5 Spreading state of water droplets on hydrophilic tracks with different spacing

在试验过程中发现, 未达到临界滑动体积前, 液滴混合时存在一定程度的形变, 待混合后, 即恢复成类球状。为了验证液滴形变对液滴临界滑动体积的影响, 在表面倾角为  $20^\circ$  的工况下, 观察液滴由不同高度滴落混合时各工况临界滑动体积的变化。结果表明, 在合理的下降高度内, 虽然液滴混合时存在不同程度的形变, 但基本不影响液滴的临界滑动体积 (见图 6)。一方面, 在较低的下落高度内, 单个液滴下落的撞击力有限, 基本可忽略不计。另一方面, 液滴运动的驱动力来自液滴沿轨道方向的重力分力, 其只与液滴重力有关, 不受液滴形态影响; 而运动阻力主要与液滴和亲水轨道的接触面积有关, 微小的液滴形变并不会对液滴与轨道的接触产生明显影响。但需指出的是, 下落高度越高, 液滴混合时的形变越剧烈, 极易增大试验误差, 因此, 尽管液滴形变并不影响临界滑动体积, 但仍需严格控制液滴下落高度。

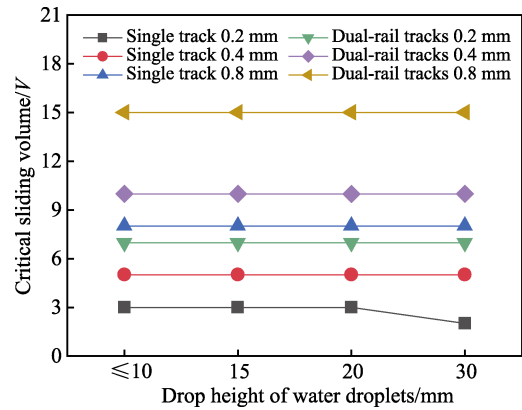


图 6 双轨轨道间距为 1.0 mm 时临界滑动体积与液滴下落高度的关系 ( $20^\circ$ )

Fig.6 Relationship between critical sliding volume and drop height of water droplets when dual-rail tracks spacing is 1.0 mm ( $20^\circ$ )

从液滴运动的终止状态来看, 液滴可从轨道末端滑离, 也可停滞在轨道中途或轨道末端。当液滴在宽度为 0.2 mm 和 0.4 mm 的单轨轨道上运动时, 液滴均能从轨道末端滑离。在宽度为 0.8 mm 的双轨轨道上, 液滴基本无法运动到轨道末端; 除此之外, 在  $10^\circ$  工况下, 液滴在间距为 1.0 mm, 宽度为 0.2 mm 和 0.4 mm 的双轨轨道上也出现了无法运动到轨道末端的情况。在其他工况下, 液滴运动到轨道末端后由于轨道末端的局部阻力, 最终停滞在轨道末端 (见图 3e)。如图 7 所示 (横坐标中坐标形式为 # 代表单轨轨道, 轨道宽度为 #; 坐标形式为 #<sub>1</sub>/#<sub>2</sub> 代表双轨轨道, #<sub>1</sub> 代表轨道宽度, #<sub>2</sub> 代表轨道间距), 液滴在 0.2 mm 和 0.4 mm 的单轨轨道上运动时, 其平均速度明显高于其他工况, 均在 5 cm/s 以上, 在保证液滴运动到轨道末端的同时, 也为液滴克服轨道末端阻力提供了较大的动能。除了运动速度外, 轨道的宽度和数量是影响液滴运动终止状态的另一因素。轨道越宽, 数量越多, 意味着轨道末端的局部阻力越大, 液滴滑离轨道时也

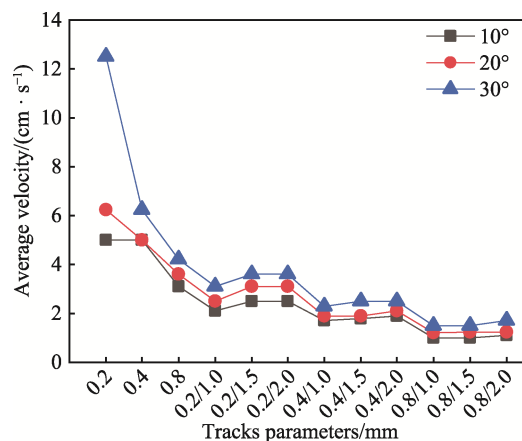


图 7 液滴平均运动速度与轨道类型的关系  
Fig.7 Relationship between the average velocity of water droplets and the tracks types

就越困难。对于液滴能否运动到轨道末端,轨道宽度和数量成为主要影响因素。液滴停滞于轨道中途的工况集中在 0.8 mm 宽的大宽度双轨轨道,由于该类型轨道粘附力相对较大,且在亲水轨道毛细力的作用下,液滴运动过程中存在大量体积损失(见图 8),导致驱动力不足,使液滴在到达轨道末端前速度便已减小到 0。

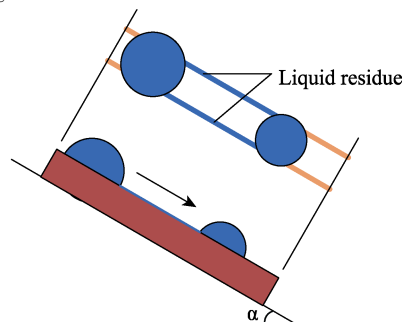


图 8 液滴滑动过程中的液体残留  
Fig.8 Liquid residue during water droplets sliding process

### 3.3 液滴在非平行双轨轨道上的运动特性

间距渐变的非平行双轨轨道分为窄端(Narrow, 记为 N 端)和宽端(Wide, 记为 W 端),分别进行液滴由 N 端向 W 端及由 W 端向 N 端的运动试验,部分运动过程如图 9 所示。

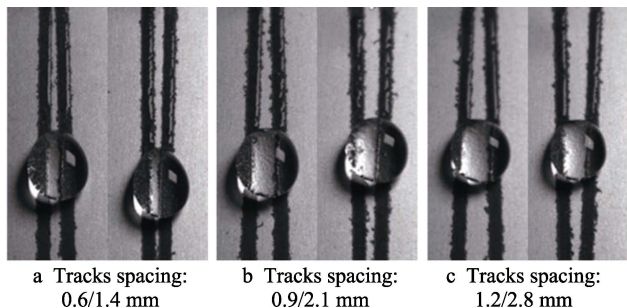


图 9 液滴在非平行双轨轨道上的运动  
(轨道宽度为 0.8 mm)

Fig.9 Motion of water droplets on nonparallel dual-rail tracks (tracks width is 0.8 mm): a) tracks spacing: 0.6/1.4 mm; b) tracks spacing: 0.9/2.1 mm; c) tracks spacing: 1.2/2.8 mm

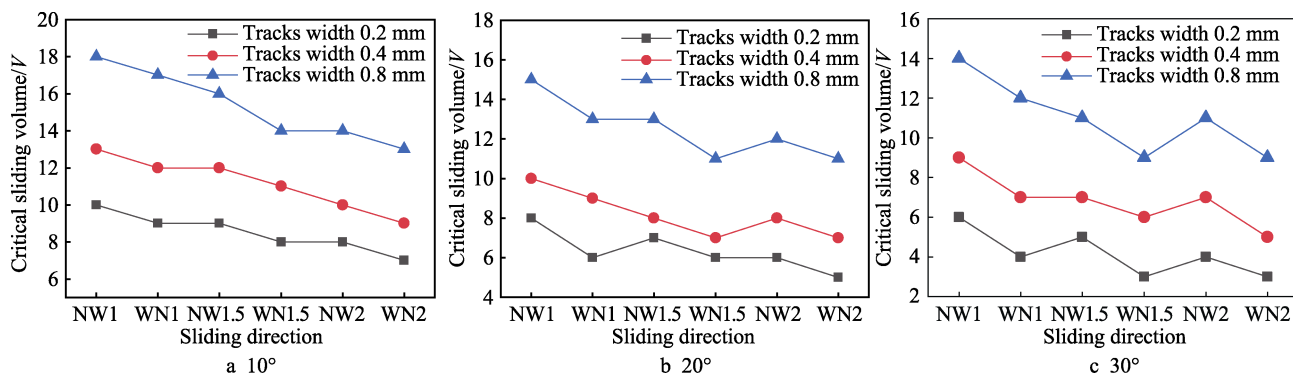


图 10 液滴在不同倾角下的临界滑动体积

Fig.10 Critical sliding volume of water droplets at different dip angles: a) 10°; b) 20°; c) 30°

对于非平行双轨轨道而言,本文更关注运动方向之间的差异。从试验结果来说,液滴从 N 端运动至 W 端的临界滑动体积整体略高于从 W 端至 N 端(如图 10 所示,横坐标中 NW1 表示液滴从 N 端向 W 端运动,1 代表轨道两端间距分别为 0.6 mm 和 1.4 mm,即平均间距为 1 mm 的双轨轨道,以此类推)。如在倾角为 10°的工况下,轨道宽度为 0.2 mm 时, NW1 工况的临界滑动体积为 10V,而 WN1 工况的临界滑动体积仅为 9V。为了量化不同滑动方向上的运动阻力差异,图 11(横坐标#1/#2 中#1 代表轨道宽度,#2 代表平均轨道间距)记录了液滴由 W 端运动至 N 端的临界滑动体积( $V_{WN}$ )与由 N 端运动至 W 端的临界滑动体积( $V_{NW}$ )的比值。由于表面倾角越大,单个液滴提供的驱动力越大,因此,为了尽量减小误差,选取 10°工况下的试验数据进行分析,总体而言,液滴由 W 端至 N 端的运动阻力约为由 N 端至 W 端的 90.7%。

究其原因,液滴与非平行双轨轨道接触时,由于轨道间距渐变,液滴两端会形成不同程度的形变(见图 12)。在两条亲水轨道的作用下,液滴被纵向拉伸,形成表面张力  $F_{\gamma}$ ,而  $F_{\gamma}$  沿轨道方向的分力  $F_{\gamma g}$  将促进或抑制液滴在轨道上的运动。当液滴从 N 端滑向 W 端时,  $F_{\gamma g}$  与液滴运动方向相反,表现为阻力,会在一定程度上抑制液滴的运动,此时需增大液滴体积以提高驱动力;反之,当液滴从 W 端滑向 N 端时,  $F_{\gamma g}$  与液滴运动方向相同,表现为助力,将有利于液滴在该方向上的运动,液滴临界滑动体积从而有所减小。此外,在亲水轨道毛细力的作用下,液滴与轨道之间会形成类似图 2 中的“液桥”,由于液滴两侧轨道间距的差异,两端所形成的“液桥”长度也略有不同,轨道间距越小,对应的“液桥”越长。当液滴由 W 端向 N 端运动时, N 端“液桥”的附加力  $F_N$  表现为助力, W 端“液桥”的附加力  $F_W$  表现为阻力,由于  $F_N > F_W$ ,也在一定程度上降低了液滴由 W 端向 N 端的运动阻力。

### 3.4 误差分析

试验误差主要来源于两方面:1)材料误差。

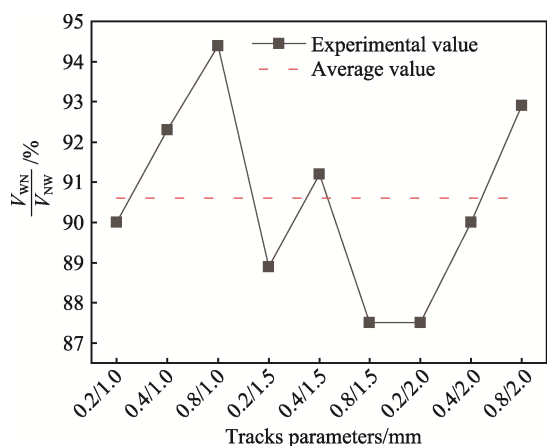
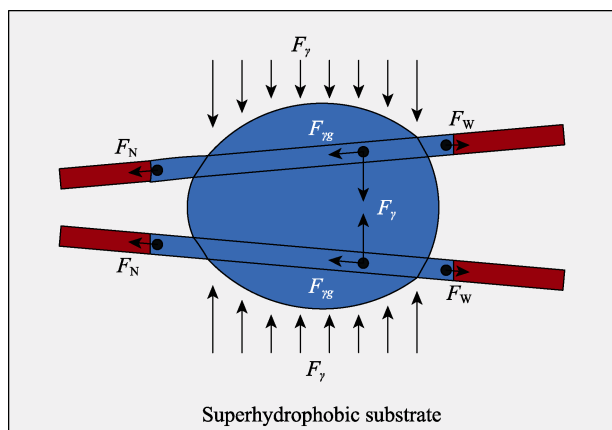


图 11 液滴在不同运动方向上临界滑动体积的比值

Fig.11 Ratio of critical sliding volume of water droplets in different moving directions

图 12 液滴在非平行双轨轨道上的力学分析  
Fig.12 Mechanical analysis of water droplets on nonparallel dual-rail tracks

由于亲水轨道的制备采用激光刻蚀法, 因此难以避免会在轨道边缘处形成毛刺, 而轨道内部也有形成局部凹坑的可能, 当液滴与此处接触时, 极易增大局部粘附力而影响试验效果, 可通过采用高精度加工设备或改进制备方法来降低误差。2) 操作误差。液滴由注射器产生, 虽然推进装置能在一定程度上保证挤压速度相同, 但仍然难以保证单个液滴体积完全相同; 其次, 为了保证液滴能正常滴落而不粘附在注射器尖端处, 需严格控制注射器与轨道之间的垂直距离, 从而导致下落的液滴有一定的速度, 当落在轨道上或与粘附在轨道上的液滴混合时, 极易出现溅射而影响试验效果。

## 4 结论

采用喷涂法制备了超疏水表面, 后采用激光刻蚀法在超疏水表面加工出亲水轨道, 以临界滑动体积表征不同亲水轨道的表面黏附力, 研究了液滴在不同亲水轨道上的运动特性, 具体结论如下。

1) 液滴在双轨轨道上的运动阻力约为单轨轨道

上的 1.6~2.4 倍, 与轨道宽度呈正相关, 与轨道间距呈负相关, 主要受液滴与亲水轨道的接触面积影响。

2) 液滴滑离轨道末端的工况集中在 0.2、0.4 mm 宽的单轨轨道上, 其平均运动速度大于 5 cm/s; 而液滴中途停滞的工况集中在 0.8 mm 宽的双轨轨道上, 与液滴运动过程中的体积损失有关。

3) 液滴在非平行双轨轨道上的临界滑动体积与运动方向有关, 由 W 端至 N 端的运动阻力较由 N 端至 W 端更小, 前者约为后者的 90.7%, 与液滴的表面张力有关。

## 参考文献:

- [1] TANG Ling-ling, WANG Nan, HAN Zhen-yi, et al. Robust Superhydrophobic Surface with Wrinkle-Like Structures on AZ31 Alloy that Repels Viscous Oil and Investigations of the Anti-Icing Property[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 594: 124655.
- [2] ZHENG Hai-kun, CHANG Shi-nan, MA Guo-jia. Anti-Icing Performance of Superhydrophobic Surface Fabricated by Femtosecond Laser Composited Dual-Layers Coating[J]. Energy and Buildings, 2020, 223: 110175.
- [3] DALAWAI S P, SAAD ALY M A, LATTHE S S, et al. Recent Advances in Durability of Superhydrophobic Self-cleaning Technology: A critical review[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 138: 105381.
- [4] LATTHE S S, SUTAR R S, KODAG V S, et al. Self-cleaning Superhydrophobic Coatings: Potential Industrial Applications[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 128: 52-58.
- [5] HUANG Liu, ZHANG Long-long, SONG Jin-long, et al. Superhydrophobic Nickel-Electroplated Carbon Fibers for Versatile Oil/Water Separation with Excellent Reusability and High Environmental Stability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(21): 24390-24402.
- [6] SHANG Qian-qian, LIU Cheng-guo, CHEN Jian-qiang, et al. Sustainable and Robust Superhydrophobic Cotton Fabrics Coated with Castor Oil-Based Nanocomposites for Effective Oil-water Separation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(19): 7423-7435.
- [7] ZHANG Tian-yu, MOU Lin-wei, ZHANG Jia-yi, et al. A Visualized Study of Enhanced Steam Condensation Heat Transfer on a Honeycomb-Like Microporous Superhydrophobic Surface in the Presence of a Non-condensable Gas[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119352.
- [8] WANG Shan-lin, YU Xin-quan, LIANG Cai-hua, et al. Enhanced Condensation Heat Transfer in Air-Conditioner Heat Exchanger Using Superhydrophobic Foils[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 758-766.
- [9] CHOI C H, KO D H, JUN H Y, et al. Rapid Exfoliation

- for Few-Layer Enriched Black Phosphorus Dispersion via a Superhydrophobic Silicon-Nanowire-Embedded Microfluidic Process[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(3): 699-706.
- [10] TAN Xian-hua, ZHU Yi-ying, SHI Tie-lin, et al. Patterned Gradient Surface for Spontaneous Droplet Transportation and Water Collection: Simulation and Experiment[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(11): 115009.
- [11] LIU Ming, YAO Yin, LI Jian-jun, et al. Directional Sliding Behavior of a Water Droplet on a Wedge-Shape Patterned Functional Surface[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2020, 124(31): 6905-6912.
- [12] 汪希奎, 张友法, 余新泉. 仿生非均匀润湿性表面研究进展及应用现状[J]. *表面技术*, 2020, 49(12): 93-115.  
WANG Xi-kui, ZHANG You-fa, YU Xin-quan. Research Progress and Application Status of Biomimetic Hybrid Wetting Surfaces[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(12): 93-115.
- [13] LIU Chao-ran, SUN Jing, LI Jing, et al. Long-Range Spontaneous Droplet Self-Propulsion on Wettability Gradient Surfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7552.
- [14] BANUPRASAD T N, VINAY T V, SUBASH C K, et al. Fast Transport of Water Droplets over a Thermo-Switchable Surface Using Rewritable Wettability Gradient[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(33): 28046-28054.
- [15] LEE A, MOON M W, LIM H, et al. Water Harvest via Dewing[J]. *Langmuir*, 2012, 28(27): 10183-10191.
- [16] YIN Kai, DU Hai-feng, DONG Xin-ran, et al. A Simple Way to Achieve Bioinspired Hybrid Wettability Surface with Micro/Nanopatterns for Efficient Fog Collection[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(38): 14620-14626.
- [17] BAI Hao, WANG Lin, JU Jie, et al. Efficient Water Collection on Integrative Bioinspired Surfaces with Star-Shaped Wettability Patterns[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2014, 26(29): 5025-5030.
- [18] LIN Jian-bin, TAN Xian-hua, SHI Tie-lin, et al. Leaf Vein-Inspired Hierarchical Wedge-Shaped Tracks on Flexible Substrate for Enhanced Directional Water Collection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(51): 44815-44824.
- [19] WANG Meng, LIU Qian, ZHANG Hao-ran, et al. Laser Direct Writing of Tree-Shaped Hierarchical Cones on a Superhydrophobic Film for High-Efficiency Water Collection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(34): 29248-29254.
- [20] SEO J, LEE S, LEE J, et al. Guided Transport of Water Droplets on Superhydrophobic-Hydrophilic Patterned Si Nanowires[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(12): 4722-4729.
- [21] BOX F, THOROGOOD C, GUAN J H. Guided Droplet Transport on Synthetic Slippery Surfaces Inspired by a Pitcher Plant[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2019, 16(158): 20190323.
- [22] BALU B, BERRY A D, HESS D W, et al. Patterning of Superhydrophobic Paper to Control the Mobility of Micro-Liter Drops for Two-Dimensional Lab-on-Paper Applications[J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(21): 3066-3075.
- [23] YANG Xiao-long, LIU Xin, LI Juan, et al. Directional Transport of Water Droplets on Superhydrophobic Aluminium Alloy Surface[J]. *Micro & Nano Letters*, 2015, 10(7): 343-346.
- [24] JIANG Shu-yue, ZHANG Hai-feng, CAO Jia-mu, et al. Super-Hydrophilic Track for Rapid Directional Transport of Water Droplets on the Superhydrophobic Surface[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2020, 24(11): 1-13.
- [25] SOUSA M P, MANO J F. Patterned Superhydrophobic Paper for Microfluidic Devices Obtained by Writing and Printing [J]. *Cellulose*, 2013, 20(5): 2185-2190.
- [26] XU Chen, FENG Rui, SONG Fei, et al. Continuous and Controlled Directional Water Transportation on a Hydrophobic/Superhydrophobic Patterned Surface[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 352: 722-729.
- [27] LIU Qing-chang, XU Bao-xing. A Unified Mechanics Model of Wettability Gradient-Driven Motion of Water Droplet on Solid Surfaces[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 304-309.

(上接第 426 页)

- [25] 朱琳. 蛋壳膜模板浸渍负载法制备疏水材料[J]. *包装工程*, 2021, 42(13): 143-148.  
ZHU Lin. Preparation of Hydrophobic Materials by Impregnation Method with Egg Shell Membrane as Template[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(13): 143-148.
- [26] AN Qiu-feng, ZHAO Jie, LI Xian-qi, et al. Synthesis of Dimethyldodecyl Quaternary Ammonium Polyether Polysiloxane and Its Film Morphology and Performance on Fabrics[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(16): 365.
- [27] AN Qiu-feng, WANG Ke-feng, JIA Yun. Film Morphology, Orientation and Performance of Dodecyl/Carboxyl Functional Polysiloxane on Cotton Substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(10): 4569-4574.
- [28] LIU Yi, FAN Lin, XU Xiao-zhou, et al. Melt Fluidity and Thermal Property of Thermosetting Siloxane-Containing Polyimide Resins and Their Organic/Inorganic Hybrid Characteristics[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101443.

责任编辑: 万长清