

El、Scopus 收录 中文核心期刊

非对称微沟槽表面液滴各向异性润湿行为研究

胡海豹,丁海艳,曹 刚,李明升

ANISOTROPIC WETTING BEHAVIORS OF DROPLETS ON THE SURFACE OF ASYMMETRICAL MICROGROOVES

Hu Haibao, Ding Haiyan, Cao Gang, and Li Mingsheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-402

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土壤水分布的孔隙尺度格子玻尔兹曼模拟研究

PORE-SCALE LATTICE BOLTZMANN MODELING OF SOIL WATER DISTRIBUTION 力学学报. 2021, 53(2): 568-579

矩形疏水沟槽表面水滴振荡特性

CHARACTERISTIC OF DROPLET OSCILLATION ON THE SURFACE OF RECTANGULAR HYDROPHOBIC GROOVES 力学学报. 2017, 49(6): 1252–1259

基于t准则的各向异性强度准则及变换应力法

ANISOTROPIC STRENGTH CRITERION BASED ON T CRITERION AND THE TRANSFORMATION STRESS METHOD 力学学报. 2020, 52(5): 1519–1537

各向异性柔性壁上二维T-S波演化的数值研究

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EVOLUTION OF TWO-DIMENSIONAL T-S WAVES ON AN ANISOTROPIC COMPLIANT WALL 力学学报. 2021, 53(5): 1302-1312

粒料固有各向异性的离散元模拟与细观分析

SIMULATION AND MICRO–MECHANICS ANALYSIS OF INHERENT ANISOTROPY OF GRANULAR BY DISTINCT ELEMENT METHOD

力学学报. 2018, 50(5): 1041-1050

考虑颗粒转矩的接触网络诱发各向异性分析

SHEAR-INDUCED ANISOTROPY ANALYSIS OF CONTACT NETWORKS INCORPORATING PARTICLE ROLLING RESISTANCE

力学学报. 2021, 53(6): 1634-1646



流体力学

2024 年 3 月

非对称微沟槽表面液滴各向异性润湿行为研究

胡海豹*,† 丁海艳† 曹 刚**,2) 李明升†

*(西北工业大学深圳研究院,广东深圳 518063) †(西北工业大学航海学院,西安 710072) **(中车艾森迪海洋装备有限公司工程技术部,上海 201306)

摘要 液滴在各向异性表面的润湿行为对于液滴操作和运动控制具有重要的科研与工程价值.采用重力式测试系统对非对称沟槽表面上液滴各向异性润湿行为进行表征,分析了沟槽几何结构非对称性、沟槽高度和宽度以及浸油处理对液滴静润湿与动润湿行为的影响规律.结果表明,沟槽几何结构不对称性会影响液滴润湿状态,液滴在非对称沟槽表面不同方向上接触角差异比对称沟槽更大,使得各向异性更显著;浸油处理会减小沟槽表面液滴接触角,从而表现出更明显的各向异性;非对称沟槽表面的接触角随沟槽高度增大而减小,随宽度增大而增大,表面浸油处理会缩小试件间接触角的差异,高度和宽度对浸油处理后的非对称表面的调控作用基本失效;当沟槽宽度增加时,浸油处理后的非对称沟槽表面滑动角减小,同时液滴沿非对称沟槽大顶角向小顶角方向运动时的滑动角大于沿反方向运动时的滑动角,且液滴体积越大,滑动角越小.最后,对上述规律进行了接触线理论分析,并从表面能模型角度推导出滑动角理论公式,与实验结果基本吻合.

关键词 非对称微沟槽,各向异性润湿,浸油,接触角,滑动角

中图分类号: O647 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-402

ANISOTROPIC WETTING BEHAVIORS OF DROPLETS ON THE SURFACE OF ASYMMETRICAL MICROGROOVES¹⁾

Hu Haibao $^{*,\,\dagger}$ Ding Haiyan † Cao Gang $^{**,\,2)}$ Li Mingsheng †

* (Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518063, Guangdong, China)
[†] (School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)
** (CRRC SMD (Shanghai) Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract The wetting behaviors of droplets on anisotropic surface have importantly scientific research and engineering value for the control of droplet operation and movement. In the paper, a gravity test system is used to characterize the anisotropic wetting behaviors of droplets on the surface of asymmetric grooves, and the effects of groove geometry asymmetry, groove height and width, and oil immersion treatment on droplet static and dynamic wetting behaviors are studied. The results indicate that geometric asymmetry of the groove affects the wetting state of the droplet, and the difference of the contact angle of the droplet in different directions on the surface of the asymmetric groove is greater than that in the symmetrical groove, so the anisotropy of the asymmetric groove surface is more significant than that of the symmetric groove surface. The contact angle of droplets on grooves surface with oil immersion treatment decreases,

2023-08-22 收稿, 2023-11-15 录用, 2023-11-16 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (52071272, 12102358, 52201382) 和深圳市科创委基础研究 (JCYJ20210324122201004) 资助项目.

2) 通讯作者: 曹刚, 助理工程师, 主要研究方向为液滴润湿异性及定向运动. E-mail: caogangl@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 胡海豹, 丁海艳, 曹刚, 李明升. 非对称微沟槽表面液滴各向异性润湿行为研究. 力学学报, 2024, 56(3): 715-722 Hu Haibao, Ding Haiyan, Cao Gang, Li Mingsheng. Anisotropic wetting behaviors of droplets on the surface of asymmetrical microgrooves. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(3): 715-722 resulting in more significant anisotropy than that in the non-oil immersion state. The contact angle of the asymmetric groove surface decreases with the increase of the groove height h, and increases with the increase of the width c. The regulation effect of height and width on the asymmetric surface after oil immersion is basically ineffective with the same contact angle anisotropy characteristics in different specimens basically due to the difference of contact angle among specimens reduced by surface oil immersion treatment. When the width of the groove increases, the sliding angle of the surface of the asymmetric grooves decreases. At the same time, the sliding angle of the droplet moving along the direction of the asymmetric groove from the large top angle to the small top angle is larger than that in the opposite direction, and the larger the droplet volume, the smaller the sliding angle. Finally, the above laws are analyzed by contact line theory, and the slip angle theory formula is derived from the surface energy model, which is basically consistent with the experimental results.

Key words asymmetrical microgrooves, anisotropic wetting, immersion oil, contact angle, sliding angle

引 言

自然界中存在很多天然的各向异性表面,例如 具有微米级乳突结构的荷叶^[1],一、二级径向脊微 结构的猪笼草顶瓶^[2],微米矩形鳞片周期性排列的 蝴蝶翅膀^[3]等.液滴在各向异性表面的润湿行为对 于液滴操作和液滴运动的智能控制具有重大的科学 和经济意义^[4-5],广泛应用于生物化学检测^[6-7]、水收 集^[8]、微流控^[9-10]、水下减阻^[11-13]等领域.

化学性质异性或者物理结构不对称的表面均会 在特定方向产生不平衡力,表现出各向润湿异性[14]. 沟槽表面是一种受到广泛关注的构建各向异性表面 的方法^[15-20], Ding 等^[15]提出了一种计算液滴在沟槽 表面 Cassie 状态下临界滑动角的方法,发现疏水矩 形沟槽表面的液滴临界滑动角与垂直于运动方向的 三相接触线长度及肋条与沟槽的宽度比密切相关; 董琪琪等[16]发现,水滴振荡周期与沟槽间距无关, 且由于疏水沟槽表面上存在能垒束缚效应,致使水 滴振荡过程中接触线的铺展和回缩运动不服从典型 阻尼振荡规律,呈现振荡数次后直接趋稳的特点; Sun 等[17] 发现液体 Al-Si5 的润湿性在沟槽表面呈 现出各向异性,在沟槽垂直方向上润湿性受到抑制, 在沟槽平行方向上润湿性得到促进. Sureshvarr 等[18] 发现随着微槽深度与宽度的比值和凹槽间距与凹 槽宽度的比值的增大,液滴形态由椭球形向球形 转变

除了常见的矩形沟槽外,还有学者对其他类型 的沟槽进行了研究. Hao 等^[21]结合动力学模拟与理 论分析,揭示了水滴在楔形槽界面上同一位置的反 方向运动机理,还发现水滴在沟槽越高、开孔角越 大、疏水性越强的表面上运动越快. Khan等^[22]使用 Surface Evolver (SE)分析了微 V 型槽表面粗糙度参 数对润湿行为的影响,并与相应的微 V型槽表面粗 糙度的节距、幅值和深度的尺寸变化进行了比较, 发现具有微波纹理的表面比微 V 型槽表面具有更高 的润湿性和更小的稳定液滴. 赵坤^[23]通过液滴接触 角和滑动角实验,验证光滑直沟槽圆弧阵列和光滑 倾斜沟槽直线阵列存在各向异性的阻力. 学者们对 于对称沟槽表面润湿特性已有系统研究, 但对几何 非对称沟槽表面润湿异性行为仍缺乏细致分析.

此外,受猪笼草袋状叶内壁多孔结构分泌蜡状 黏液物质机制^[24]的启发,通过在微结构表面灌注低 表面能液体,可以形成具有较大接触角及较小滑动 角的超滑表面 (SLIPS)^[25],水滴、低表面能油滴 (十 六烷等)、水下气泡都能够在超滑表面上轻松滑 动^[26-27].这类超滑表面具有自愈、防冰和防生物污 染^[28-30]等特殊功能,在液滴微反应和微流体技术等 领域表现出极大的优势和潜在应用价值^[31].不过,目 前关于非对称沟槽表面浸油后润湿行为的报道还较少.

为此,本工作采用重力式测试系统测试了非对称沟槽表面上液滴各向异性润湿行为,并分析了沟槽几何结构非对称性、沟槽高度和宽度以及浸油处理对液滴静润湿与动润湿行为的影响规律,以增进对非对称沟槽表面润湿行为的认识.

1 实验部分

1.1 样品制备

这里设计了不同几何尺寸的锯齿形沟槽,其结构示意图如图 1(a) 所示.其中, h 和 c 分别表示沟槽

的高度和宽度、α和β表示沟槽的两个顶角, 红色箭 头 A 和 B 表示液滴运动的两个方向. 所有试件均采 用 3D 打印技术 (FabPro 1000) 制备, 所用材料为光 敏树脂, 实际被测表面如图 1(b) 所示. 实验制备的表 面微结构参数如表 1 所列, 其中微结构的尺寸误差 为±0.02 mm, 角度误差为±2.3°. 浸油处理前的沟槽 表面液滴滑动角大于 90°, 在增大表面倾角过程中液 滴始终钉扎在表面无法运动, 如图 1(d) 所示. 采用反 复涂刷的方式在制备好的沟槽表面上浸润黏度为 5100 cP 的硅油 (sygard 184 silicone elastomer) 薄层. 观察沟槽侧面硅油的浸润情况, 保证硅油铺满整个 沟槽表面且在沟槽锯齿底部不产生沉积和填充, 通 过沟槽顶部明亮区域的分布判断油膜均匀度, 如 图 1(f) 所示. 此外, 浸油沟槽表面在表征时, 考虑到 硅油重力和挥发性等因素的影响, 在确保涂刷均匀





Fig. 1 (a) Schematic diagram of grooves structure; (b)The tested grooves surface; (c) Multiple directions measurement; (d) The droplet on the groove surface with sliding angle greater than 90°; (e) Non-immersion oil surface; (f) Immersion oil surface

表1 沟槽的尺寸参数

Table 1Parameters of grooves used in the experiments

| Specimens | α/(°) | β/(°) | h/mm | c/mm |
|-----------|-------|-------|------|------|
| 1# | 44.04 | 44.04 | 0.29 | 0.60 |
| 2# | 55.22 | 23.76 | 0.20 | 0.60 |
| 3# | 55.95 | 29.76 | 0.25 | 0.60 |
| 4# | 55.00 | 36.19 | 0.30 | 0.61 |
| 5# | 56.59 | 38.23 | 0.32 | 0.53 |
| 6# | 50.03 | 39.21 | 0.35 | 0.69 |
| 7# | 36.61 | 36.10 | 0.34 | 0.91 |

后的 30 s 内完成一次测量.

1.2 表面润湿行为的表征

实验用重力式测试装置如图2所示,由接触角 测量仪 (OCA15EC) 与固定在其上的水平旋转平台 和倾角平台组成,实验测量液体采用夫离子水,温度 约为 20°C, 湿度约 30%, 光滑表面接触角为 106.61°± 2.65°. 在测量前, 将倾角平台调至水平, 使用倾角仪 对平面水平度进行校验以排除装置的干扰.静态表 征时,将倾角平台调节至水平,测试液滴体积选用 10 µL. 为更好地表征沟槽表面液滴润湿行为的各向 异性,精确测试待测表面 360°范围的接触角,如 图 1(c) 所示,每间隔 30°测量一个值.测量时,取同一 位置液滴两侧接触角平均值作为接触角测量结果. 为便于理解,规定0°和180°方向为沟槽的平行方向, 90°和 270°方向为沟槽的垂直方向. 动态表征时, 先 将倾角平台调节至水平,调整待测沟槽表面,使摄像 机视野处于 0°观测角度. 将 56, 46, 32和 18 µL 系列 体积的液滴滴在待测沟槽表面上,调节重力式测试 系统使试件表面倾斜,摄像机记录液滴随平板倾斜 整个运动过程.采用图像处理技术读取倾斜角,实验 中将液滴起始滑动的倾斜角作为液滴的滑动角.



1: light source, 2: micro pump, 3: grooves specimen, 4: horizontal rotating platform, 5: inclined platform, 6: lifting platform, 7: camera 图 2 重力式测试系统 Fig. 2 Gravity test system

2 结果与分析

2.1 非对称沟槽表面静润湿规律

为研究沟槽几何结构对称性对表面液滴润湿行 为的影响,测试了试件 1#和 4#的接触角,结果如图 3 所示.从中可以发现,液滴在平行方向的接触角为最 大值,随液滴被测方向与沟槽平行方向夹角越大,接 触角逐渐变小,在垂直方向达到接触角最小值,且非 对称沟槽不同方向上接触角差异比对称沟槽更大. 其产生原因在于沟槽侧壁及顶端对液滴具有阻隔作 用,约束液滴铺展,而测量方向与平行方向夹角越大, 沟槽对液滴的阻隔作用逐渐减弱,液滴容易铺展,接 触角越小.同时,非对称沟槽本身结构的不对称性扩 大了不同方向阻隔作用的差异,使得非对称沟槽表 面各向异性更明显.浸油处理后,两个沟槽表面液滴 接触角均减小,导致各向异性比非浸油状态更显著, 非对称沟槽表面接触角范围甚至跨越亲疏水两个区 域.对于未浸油状态,沟槽齿面自身的粗糙度和沟槽 的尺寸参数共同影响非对称沟槽表面的接触角,且 粗糙度对沟槽表面影响的比重更大;浸油后,沟槽齿 面形成超滑表面,粗糙度远小于未浸油状态,此时沟 槽表面的接触角主要由沟槽尺寸参数决定,不同角 度尺寸参数影响不同,因而各向异性更显著.

沟槽高度 h 和宽度 c 对非对称沟槽表面接触角的影响结果见图 4. 在非浸油状态下, 当宽度 c 和顶





Fig. 3 Contact angles of two kinds of grooves surfaces

角 α 不变时,随着沟槽高度 h 的增大,沟槽接触角逐 渐减小 (见图 4(a));而当高度 h 和顶角 β 不变时,沟 槽接触角随宽度 c 增大而增大 (见图 4(c)).因此,通 过改变微沟槽结构参数可以实现对液滴各向异性润 湿行为进行调控.表面浸油处理会缩小试件间接触 角的差异,不同试件表面的液滴静态接触角大小相



图 4 沟槽 (a) ~ (b) 高度和 (c) ~ (d) 宽度对接触角的影响 Fig. 4 Influences of groove (a) ~ (b) height and (c) ~ (d) width of on contact angle



图 4 沟槽 (a)~(b) 高度和 (c)~(d) 宽度对接触角的影响 (续) Fig. 4 Influences of groove (a)~(b) height and (c)~(d) width of on contact angle (continued)

近,如图 4(b)和 4(d) 所示,高度和宽度对浸油处理 后的非对称沟槽表面的调控作用基本失效,不同试 件具有基本相同的接触角各向异性特征.

2.2 非对称沟槽表面动润湿规律

浸油处理后的沟槽表面液滴具有较小的滑动 角,液滴可以在浸油后的沟槽表面上滑动. 图 5 为不 同体积的液滴在浸油非对称沟槽表面 (试件 5# ~ 7#) 上沿 A 和 B 两个方向运动的滑动角随沟槽宽度 c 的变化规律. 从图 5 可以看出,随沟槽宽度 c 增大, 非对称沟槽表面沿两个方向的滑动角基本呈现减小 趋势. 这可能是由于沟槽宽度 c 增加,沟槽更趋近于 平缓,三相接触线连续性更好,滑动更加容易,滑动 角减小. 对比图 5(a) 和图 5(b),液滴沿 A 方向运动的 滑动角大于沿 B 方向运动的滑动角,其中 A 方向表 示沿沟槽表面大顶角向小顶角运动方向, B 方向表





图 5 宽度对非对称沟槽表面滑动角的影响

Fig. 5 Influence of groove width on the sliding angle of asymmetric grooves surface

示沿沟槽小顶角向大顶角运动方向. 从图 5 中还可 以发现, 随液滴体积增加, 液滴沿两个方向运动的滑 动角均表现出逐渐减小的趋势.

2.3 理论分析

(1) 静态接触角

Wenzel 模型^[32] 定义了粗糙表面上液滴的完全 均匀润湿现象, 该模型用于预测表面完全润湿且仅 由固液界面组成的表观接触角. 由 Wenzel 模型相应 表观接触角θ, 在微沟槽表面上可以定义如下

$$\cos\theta = r\cos\theta_0 \tag{1}$$

其中, θ₀ 是光滑表面本征接触角, r 为表面粗糙度比, 定义为液滴宏观尺度表面积与边缘位置的投影面积 之比, 沟槽平行方向的表面粗糙度比

 r_{\parallel}

沟槽垂直方向的表面粗糙度比

$$r_{\perp} = 1 \tag{3}$$

而在非对称沟槽表面上,各个方向的表面粗糙度比 因角度引起的结构差异而不同,表面粗糙度比介于 二者之间

$$r_{\perp} < r < r_{\parallel} \tag{4}$$

随着测量方向与平行方向夹角增大,表面粗糙 度比逐渐减小,液滴容易铺展,接触角越小,在垂直 方向达到接触角最小值.

由于非对称沟槽锯齿形齿尖结构产生能壁垒,

液滴的三相接触线钉扎. 在图 6(a)中,固定 α 角和宽度 c,本征接触角 θ_0 因表面材料相同而保持不变,高度 h的增大会导致三相接触线整体逆时针旋转,液滴轮廓线从 3 过渡到 2,再到 1,本征接触角 θ_0 也随之逆时针偏斜,表观接触角变小;在图 6(b)中, β 角和高度 h 不变时,宽度 c 增大引起液滴轮廓线从 6 逐渐过渡到 4,三相接触线逆时针旋转,本征接触角 θ_0 也随之偏斜,沟槽表面的表观接触角增大. 当表面浸油处理后,沟槽齿尖钉扎可能会减弱或者消失,油膜的存在使得高度和宽度变化引起的差异减弱,致使浸油条件下接触角相近.

(2) 滑动角

忽略液滴在浸油状态的沟槽表面上因毛细力作 用沿沟槽方向的扩展,稳定状态时液滴因沟槽齿尖 能量壁垒而钉扎.液滴移动满足以下条件:当满足 $\theta \le \theta_0 - \beta$ 时,液滴右侧边缘将向左移动;当满足 $\theta \ge \theta_0 + \alpha$ 时,液滴右侧边缘将向右移动;当满足 $\theta \le \theta_0 - \alpha$ 时,液滴左侧边缘将向右移动;当满足 $\theta \ge \theta_0 + \beta$ 时,液滴左侧边缘向左移动^[33].

如图 7(a) 所示, 当沟槽表面沿顺时针方向倾斜时, 右侧表观接触角 θ_{right} 逐渐增大, 左侧接触角 θ_{left} 逐渐变小, 当 θ_{right} 增至 $\theta_0 + \alpha$ 时, 液滴右侧边缘向右移动, 而当满足 $\theta_{left} \leq \theta_0 - \alpha$ 条件时, 液滴左侧边缘向右移动, 同时满足两个条件, 液滴会沿 A 方向滑动; 在测量 B 方向的滑动角时, 如图 7(b) 所示, 沟槽表面逐渐向逆时针方向倾斜, 左侧表观接触角 θ_{left} 逐渐变小. 当 θ_{left} 增大至







Fig. 6 Influence of parameters of grooves on the contact angle of asymmetric grooves surface



图 7 两个方向对非对称沟槽滑动角的影响 Fig. 7 Influence of two directions on the sliding angle of asymmetric grooves surface

 $\theta_0 + \beta$ 时,液滴左侧边缘向左移动,而当满足 $\theta_{right} \le \theta_0 - \beta$ 条件时,液滴右侧边缘向左移动,当两个 条件均满足时,液滴将沿 B 方向滑动.对于同一表 面,因设计沟槽顶角满足 $\beta < \alpha$,得到 $\theta_0 + \beta < \theta_0 + \alpha$, $\theta_0 - \beta > \theta_0 - \alpha$.在 θ 增大过程中,优先达到 $\theta \ge \theta_0 + \beta$, 而随 θ 减小,先满足 $\theta \le \theta_0 - \beta$ 条件,因而液滴更倾向 于沿小顶角向大顶角运动方向 (A 方向)的滑动角大 于沿小顶角向大顶角运动方向 (B 方向)的滑动角.

液滴在浸油沟槽表面运动,液滴与固体表面接 触的单位面积黏附能

$$\Delta E = \gamma_{\text{oil/air}} + \gamma_{\text{air/water}} - \gamma_{\text{oil/water}}$$
(5)

其中, $\gamma_{\text{oil/air}}$, $\gamma_{\text{air/water}}$ 和 $\gamma_{\text{oil/water}}$ 分别表示油膜与气体、气体与液滴和油膜与液滴的表面张力. 根据接触角公式 $\cos\theta_0 = r \frac{\gamma_{\text{oil/air}} - \gamma_{\text{oil/water}}}{\gamma_{\text{air/water}}}$ [34-35], θ_0 为油-水界面接触角, r 为液滴边缘位置的平面投影与宏观尺度表面积之比, 则

$$\Delta E = \gamma_{\text{water/air}} \left(1 + \frac{\cos \theta_0}{r} \right) \tag{6}$$

根据能量守恒定律,由于液滴向下运动,黏附能 必须通过重力势能进行平衡^[36],则有

$$\rho Vg\sin\varphi \cdot COM = \Delta E \cdot \Delta S \tag{7}$$

其中, ρ是液滴密度, g是重力加速度, φ是液滴滑动 角, COM 是液滴质量中心和 V 为液滴体积, ΔS 是液 滴与沟槽表面接触面积. 根据式 (6), 则

$$\sin\varphi = \frac{\gamma_{\text{water/air}}(1 + \frac{\cos\theta_0}{r}) \cdot \Delta S}{\rho V g \cdot COM}$$
(8)

假设液滴与沟槽表面接触的区域为半径为 R₀的圆形区域,有

$$R_0 = R\sin\theta = \left[\frac{3V}{\pi(1-\cos\theta)^2(2+\cos\theta)}\right]^{1/3}\sin\theta \quad (9)$$

其中, θ为液滴表观接触角, R 为液滴半径. 当我们不考虑表面粗糙比对表面的影响时 r = 1, 将式 (9) 代入式 (8), 则

$$\sin\varphi = \frac{3^{2/3}\pi^{1/3}\gamma_{\text{water/air}}\sin^2\theta(1+\cos\theta_0)}{\rho g \cdot COM \cdot (1-\cos\theta)^{4/3}(2+\cos\theta)^{2/3}} \cdot V^{-1/3}$$
(10)

对于浸油状态的沟槽表面,液滴在不同试件表 面的平行方向接触角近似相等, 使得液滴接触角 θ 近似相等,可发现非对称沟槽表面液滴的滑动角仅 仅与液滴的质量中心 COM 和液滴体积 V 有关. 对 浸油状态的同一试件表面,液滴体积越大,其对应的 质量中心越大[36],则随液滴体积增加,液滴的滑动角 下降. 将非对称沟槽浸油状态实验结果整理为 $\sin \varphi$ 关于变量 V^{-1/3} 的拟合结果, 如图 8 所示, 从图中可 以发现,对于 c = 0.53 和 c = 0.69, 趋势走向大概呈现 线性关系.此外, c = 0.53 的试件, A 方向的线性度比 B方向更好,说明沟槽的不对称性有影响作用,A方 向更接近于假设条件下光滑平板的滑动角.对于式 (8), 整个试验过程中, 液滴与气体的表面张力、液滴 密度、重力加速度保持不变.对于相同的液滴, ΔS , V 和 COM 均相同, 区别在于 A 方向液滴边缘位置的 投影面积大于 B 方向, 因而 A 方向的滑动角大于 B 方向的滑动角.





3 结论

(1) 沟槽几何结构不对称性会影响液滴润湿状态, 液滴在非对称沟槽表面不同方向上接触角差异比对称沟槽更大, 表现出更明显的各向异性. 浸油处理会减小沟槽表面液滴的接触角, 导致各向异性比非浸油状态更显著.

(2) 非对称沟槽表面的接触角随沟槽高度 h 增 大而减小, 随宽度 c 增大而增大. 表面浸油处理会缩 小试件间接触角的差异, 高度和宽度对浸油处理后 的非对称表面的调控作用基本失效.

(3) 当沟槽宽度增加时,沟槽表面滑动角减小; 非对称沟槽表面液滴沿沟槽的大顶角向小顶角方向 运动的滑动角比沿反方向大;同时随液滴体积增加, 滑动角均减小;最后对上述规律进行了接触线理论 和表面能模型分析,并对变化规律进行解释.

此外,受实验装置的限制,论文未能定量观测油 膜厚度和浸油状态对湿润行为的影响,对沟槽宽度 和高度的定量分析存在不足,相关研究仍有待进一 步深入.

参考文献

- Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of waterrepellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*, 1997, 79(6): 667-677
- 2 Chen HW, Zhang PF, Zhang LW, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of Nepenthes alata. *Nature*, 2016, 532: 85-89
- 3 Zheng YM, Gao XF, Jiang L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. *Soft Matter*, 2007, 3(2): 178-182
- 4 胡志英, 葛鹏, 张俊虎. 各向异性浸润表面在液体操控中的应用. 分子科学学报, 2021, 37(5): 398-407 (Hu Zhiying, Ge Peng, Zhang Junhu. Applications of anisotropic wetting surfaces in liquid manipulation. *Journal of Molecular Science*, 2021, 37(5): 398-407 (in Chinese))
- 5 曹刚,黄苏和,李明升等. 润湿异性表面液滴定向运动研究进展. 实验流体力学, 2021, 35(1): 67-85 (Cao Gang, Huang Suhe, Li Mingsheng, et al. Advances in research on directional movement of droplets on wetted anisotropic surfaces. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(1): 67-85 (in Chinese))
- 6 Huang GY, Li MX, Yang QZ, et al. Magnetically actuated droplet manipulation and its potential biomedical applications. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(2): 1155-1166
- 7 Chi JJ, Shao CM, Shang LR, et al. Microfluidic droplet templates derived porous patch with anisotropic wettability. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417: 128073
- 8 Chen DL, Li J, Zhao JY, et al. Bioinspired superhydrophilic-hydrophobic integrated surface with conical pattern-shape for self-driven fog collection. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 530:

274-281

- 9 Hao CL, Li J, Liu Y, et al. Superhydrophobic-like tunable droplet bouncing on slippery liquid interfaces. *Nature Communications*, 2015, 6: 7986
- 10 Li HZ, Fang W, Li YN, et al. Spontaneous droplets gyrating via asymmetric self-splitting on heterogeneous surfaces. *Nature Communications*, 2019, 10: 950
- 11 张春来,张丽霞,王潇等. 沟槽型微纳复合结构表面的制备与减阻 性能研究. 材料导报, 2023, 37(12): 239-243 (Zhang Chunlai, Zhang Lixia, Wang Xiao, et al. Preparation and drag reduction performance of grooved micro-nano composite structure surface. *Materials Reports*, 2023, 37(12): 239-243 (in Chinese))
- 12 冯家兴, 胡海豹, 卢丙举等. 超疏水沟槽表面通气减阻实验研究. 力学学报, 2020, 52(1): 24-30 (Feng Jiaxing, Hu Haibao, Lu Bingju, et al. Experimental study on drag reduction characteristics of superhydrophobic groove surfaces with ventilation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 24-30 (in Chinese))
- 13 王宝, 汪家道, 陈大融. 基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面 水下减阻研究. 物理学报, 2014, 63(7): 214-220 (Wang Bao, Wang Jiadao, Chen Darong. Drag reduction on hydrophobic transverse grooved surface by underwater gas formed naturally. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(7): 214-220 (in Chinese))
- 14 薛銮栾, 李会增, 李安等. 基于各向异性表面的液滴驱动. 化学进展, 2021, 33(1): 78-86 (Xue Luanluan, Li Huizeng, Li An, et al. Droplet self-propulsion based on heterogeneous surfaces. *Progress in Chemistry*, 2021, 33(1): 78-86 (in Chinese))
- 15 Ding Y, Jia L, Peng Q, et al. Critical sliding angle of water droplet on parallel hydrophobic grooved surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 585: 124083
- 16 董琪琪, 胡海豹, 陈立斌等. 矩形疏水沟槽表面水滴振荡特性. 力 学学报, 2017, 49(6): 1252-1259 (Dong Qiqi, Hu Haibao, Chen Libin, et al. Characteristics of droplet oscillation on the surface of rectangular hydrophobic grooves. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(6): 1252-1259 (in Chinese))
- 17 Sun YM, Li HY, Huang RR, et al. Improved wettability of Al-Si5 on DP980 steel during laser-induced heating by surface texture preparation. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 89: 111-123
- 18 Sureshvarr K, Kannan R, Alphonsa J, et al. Scaling of anisotropic wetting behavior of water drop configuration arising from parallel groove-textured stainless steel surfaces. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2023, 9: 1
- 19 Kumar M, Bhardwaj R, Sahu KC. Motion of a droplet on an anisotropic microgrooved surface. *Langmuir*, 2019, 35(8): 2957-2965
- 20 乔小溪,张向军,陈平等. 微矩形凹槽表面液滴各向异性浸润行为 的研究. 物理学报, 2020, 69(3): 205-211 (Qiao Xiaoxi, Zhang Xiangjun, Chen Ping, et al. Influences of micro-groove size on surface anisotropic wetting behaviors. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(3): 205-211 (in Chinese))
- 21 Hao SQ, Xie Z, Yang WX, et al. Wetting-State-Induced turning of water droplet moving direction on the surface. ACS Nano, 2023,

17(3): 2182-2189

- 22 Khan I, Rahman A. Wettability and droplet energetics on microscale wavy and V-grooved surfaces. *Results in Engineering*, 2022, 16: 100791
- 23 赵坤. 基于飞秒激光制备振动驱动液滴运输的沟槽阵列表面的研究. [博士论文]. 合肥: 安徽大学, 2022 (Zhao Kun. Research on droplet transport grooves array surface under vibration condition based on femtosecond laser fabrication. [PhD Thesis]. Hefei: Anhui University, 2022 (in Chinese))
- 24 Bohn HF, Federle W. Insect aquaplaning: Nepenthes pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences* of the United States of America, 2004, 101(39): 14138-14143
- 25 Wong TS, Kang SH, Tang SKY, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 2011, 477(7365): 443-447
- 26 Yong JL, Huo JL, Yang Q, et al. Femtosecond laser direct writing of porous network microstructures for fabricating super-slippery surfaces with excellent liquid repellence and anti-cell proliferation. *Advanced Materials interfaces*, 2018, 5(7): 1701479
- 27 Jiao YL, Lyu XD, Zhang YY, et al. Pitcher plant-bioinspired bubble slippery surface fabricated by femtosecond laser for buoyancydriven bubble self-transport and efficient gas capture. *Nanoscale*, 2019, 11(3): 1370-1378
- 28 Zhang PF, Chen HW, Zhang LW, et al. Stable slippery liquid-infused anti-wetting surface at high temperatures. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(31): 12212-12220
- 29 Nishioka S, Tenjimbayashi M, Manabe K, et al. Facile design of plant-oil-infused fine surface asperity for transparent blood-repelling endoscope lens. *RSC Advances*, 2016, 6(53): 47579-47587
- 30 Manabe K, Kyung KH, Shiratori S. Biocompatible slippery fluid-infused films composed of chitosan and alginate via layer-by-layer self-assembly and their antithrombogenicity. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(8): 4763-4771
- 31 Cai ZX, Chen FZ, Tian YL, et al. Programmable droplet transport on multi-bioinspired slippery surface with tridirectionally anisotropic wettability. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 449: 137831
- 32 Wenzel RN. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, 28: 988-994
- 33 Sandre O, Gorre-Talini L, Ajdari A, et al. Moving droplets on asymmetrically structured surfaces. *Physical Review E*, 1999, 60(3): 2964-2972
- 34 McHale G, Orme BV, Wells GG, et al. Apparent contact angles on lubricant-impregnated surfaces/SLIPS: From superhydrophobicity to electrowetting. *Langmuir*, 2019, 35(11): 4197-4204
- 35 Sadullah MS, Launay G, Parle J, et al. Bidirectional motion of droplets on gradient liquid infused surfaces. *Communications Physics*, 2020, 3(1): 166
- 36 He L, Sun YY, Sui X, et al. Modeling and measurement on the sliding behavior of microgrooved surfaces. *Langmuir*, 2019, 35(43): 14133-14140