

猪笼草叶笼滑移区各向异性超疏水润湿特性表征与机理分析

王立新^{1*} 张琳琳¹ 张硕研¹ 周强²

(1. 河北科技大学 机械工程学院,石家庄 050018;
2. 中国农业大学 工学院,北京 100083)

摘要 为获取各向异性超疏水表面研制的仿生原型,采用接触角测量仪测试表征了猪笼草(*Nepenthes alata*)叶笼滑移区的各向异性超疏水润湿特性,采用扫描电镜和三维形貌干涉仪观测滑移区形貌结构并提取三维特征信息,分析滑移区形貌结构对各向异性超疏水润湿特性的影响机理。结果表明:水滴在滑移区的接触角为 $(155.07 \pm 1.14)^\circ$,朝向叶笼底部和顶部的滚动角分别为 $(2.82 \pm 0.45)^\circ$ 和 $(5.40 \pm 0.31)^\circ$;滑移区覆盖着两端朝向叶笼内部弯曲且具有不对称凸面表层轮廓的微米级月骨体,以及形貌轮廓不规则且交错排列成致密孔洞结构的纳米级蜡质晶体,其中能够蓄留空气的蜡质晶体是产生超疏水润湿特性的重要因素;月骨体在不同方向的斜坡结构、悬崖结构致使水滴在滑移区滚动难易程度呈现差异,从而导致滚动角的显著不同与各向异性超疏水润湿现象的产生。

关键词 工程仿生; 各向异性超疏水; 滚动角; 猪笼草滑移区; 月骨体

中图分类号 TB17 **文章编号** 1007-4333(2020)08-0035-08 **文献标志码** A

Anisotropic superhydrophobic wettability measurement and mechanism analysis of slippery zone in *Nepenthes* pitchers

WANG Lixin^{1*}, ZHANG Linlin¹, ZHANG Shuoyan¹, ZHOU Qiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To find the bionic prototypes used to designing superhydrophobic surfaces with anisotropic properties, the anisotropic superhydrophobic wettability of slippery zone in *Nepenthes* pitcher was measured via a contact angle meter. The morphology/structure of the slippery zone was examined via a scanning electron microscope and a scanning white-light interferometer to obtain their structure parameters, and the influence mechanism of structure characteristics on anisotropic superhydrophobic wettability was analyzed. The results show that: The contact angle of water droplet on the slippery zone is $(155.07 \pm 1.14)^\circ$, and the sliding angle of the slippery zone toward pitcher in bottom and up are $(2.88 \pm 0.45)^\circ$ and $(5.40 \pm 0.31)^\circ$, respectively. The slippery zone is covered by a large number of lunate cells with micron-scaled structure parameters, and their both ends bend toward pitcher bottom to form a crescent-shaped profile with an asymmetrical convex surface. Plenty wax coverings are densely and continuously distributed on the slippery zone. It appears as discernible platelet-formed wax crystals with an irregular pattern and nano-scaled structure parameters overlapping with each other to form plenty of distinguishable cavities. The wax coverings depend on their cavities to trap air and become an important factor to make the slippery zone present superhydrophobic wettability. Lunate cell's slope and precipice structure make the rolling of water drops displaying different degrees of difficulty at slippery zone, resulting in the anisotropic superhydrophobic wettability of slippery zone.

Keywords engineering bionic; anisotropic superhydrophobicity; sliding angle; slippery zone; lunate cell

收稿日期: 2019-10-13

基金项目: 河北省高等学校青年拔尖人才资助项目(BJ2017011);河北省自然科学基金(E2019208306);国家自然科学基金青年基金(51205107)

第一作者: 王立新,副教授,主要从事机械仿生学研究,E-mail:wanglx@hebust.edu.cn

荷叶表面因具有由微米级乳突与纳米级蜡质晶体构成的分级结构而呈现超疏水润湿现象,由此开启了学者对超疏水表面(superhydrophobic surface)的仿生研究^[1-2]。超疏水表面是指水滴的接触角 $>150^\circ$ 且滚动角 $<10^\circ$ 的材料表面,其在自清洁、防腐蚀、飞行器抑冰、海洋防污及舰船减阻等诸多领域具有重要的应用前景^[3-5]。各向异性超疏水表面因能在不同方向上呈现差异显著的超疏水润湿现象而在沙漠集水和微流体器件等方面具有日益巨大的应用潜力^[6]。微纳形貌结构是影响液滴在固体表面呈现较高接触角的关键因素,因此超疏水/各向异性超疏水表面制备主要是在具有微纳级别形貌结构的粗糙表面修饰低表面能物质,或在低表面能材料表面构筑微纳形貌结构^[7]。自然界中,诸多动植物体表的微纳复合结构赋予其表面特殊的超疏水润湿现象,例如荷叶表面因具有低黏附超疏水润湿现象而呈现的自清洁效应、花生叶片可使水滴牢固附着的高黏附超疏水现象,以及蝴蝶翅膀与水稻叶片因具有方向性形貌结构而呈现的各向异性超疏水润湿行为^[8-9]。这些具有微纳形貌结构的动植物体表为超疏水/各向异性超疏水表面研制提供了仿生原型,但存在制备工艺复杂、成本高昂和功效耐久性低等问题,效法自然并获取较为理想的仿生原型,可为上述问题提供突破契机^[10]。

食虫性植物猪笼草(*Nepenthes*)依靠叶笼实现对昆虫的滑移捕获,并能将其消化成生长所需要的营养元素。基于宏/微观形貌结构的显著差异,叶笼通常划分为盖子、口缘、滑移区和消化区等4部分^[11-12]。穹幕状盖子能够避免叶笼内部遭受灰尘、雨水等污染^[13],还可充当弹弩在雨滴的激发下产生扭杆弹簧式振动致使猎物跌落至叶笼内部^[14]。瓶口状口缘由朝向叶笼内部延伸的辐射状沟脊构成并密布盲孔状蜜腺,并可致使液膜产生连续定向转移,已被视为研制微量液滴可控转移功能表面的仿生原型^[15-16]。滑移区覆盖着由微米级月骨体(Lunate cell)和纳米级蜡质晶体层(Wax coverings)组成的微纳复合结构,可有效抑制致灾农业昆虫的附着功能并促其滑移至叶笼底部^[17-18]。消化区分布着大量能够分泌消化酶的消化腺,可将捕获昆虫消化成生长所需的营养元素^[19]。宏观景象下,滑移区呈现高度洁净的形貌,预示其具有低黏附超疏水润湿特性,这为超疏水表面研制提供了可供选择的仿生原型。

近年来,学者已逐步开展滑移区超疏水润湿现

象研究。滑移区对极性/非极性液滴的接触角高达 160° ^[20],滑移区由月骨体、蜡质晶体组成的微纳复合结构决定了其超疏水特性,其中蜡质晶体发挥主要作用^[21]。深入研究发现,滑移区超疏水润湿特性会随猪笼草种属的不同而呈现差异,这源于形貌结构参数不同而导致的实际液-固接触面积差异^[22]。月骨体两端垂向叶笼底部的弯曲形貌致使滑移区呈现结构方面的各向异性^[23],导致昆虫产生显著不同的附着行为^[24-26],还影响超疏水润湿特性,表现为朝向叶笼底部的水滴滚动角为 3° ,相反方向的为 10° ^[25]。上述研究为各向异性超疏水表面研制提供了新的仿生原型,目前,有关滑移区形貌结构对各向异性超疏水润湿现象影响的机制鲜有报道。本研究以红瓶猪笼草(*Nepenthes alata*)为研究对象,采用接触角测量仪测试表征其叶笼滑移区(Slippery zone)的各向异性超疏水润湿特性,采用扫描电镜和三维形貌干涉仪观测滑移区形貌结构并提取三维特征信息,旨在揭示猪笼草叶笼滑移区各向异性超疏水润湿特性的产生机理,以为各向异性超疏水表面仿生研制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 猪笼草叶笼滑移区

以红瓶猪笼草(*Nepenthes alata*)的叶笼滑移区为研究对象(图1(a)),网购于浙江省杭州市小虫草堂食虫植物培育基地。选取成熟叶笼(长度 130.8 ± 5.5 mm, $n=12$)并剪取滑移区制成 1 cm \times 1 cm的试验样本,用于各向异性超疏水润湿行为测试与形貌结构观测。

1.2 各向异性超疏水润湿行为测试

利用视频光学接触角测量仪(SL-200KS, Solon公司,美国)测试水滴在试验样本表面的接触角和滚动角。采用座滴法(Sessile drop)使 3 μ L水滴与试验样本表面接触,接触角测量仪自带的高速成像系统采集图像并由软件Cast 3.0分析处理,获取接触角;将 5 μ L水滴滴落至试验样本表面,旋转样本放置平台直至水滴发生临界滚落,记录样本放置平台的倾斜角度,即为滚动角。试验样本在样本放置平台沿2个方向固定,以使水滴的滚落方向分别朝向叶笼底部与顶部。

1.3 滑移区形貌观测及结构特征信息提取

采用临近点干燥法对试验样本进行干燥,以能够最大限度保持滑移区的原始形貌,采用离子溅射

镀膜仪(Bal-Tec SCD005, Balzers, 瑞典)对干燥样本进行镀金处理,镀层厚度约 10 nm。利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM, Hitachi S-4800, 日本)对处理好的样本进行形貌结构观察,并采用设备自带软件进行结构特征信息的分析提取。利用三维白光形貌干涉仪(Scanning white light interferometer, SWLI, Zygo NV-5000, 美国)对新鲜样本进行扫描观测,获取滑移区形貌结构的纵向特征信息。

2 结果分析与讨论

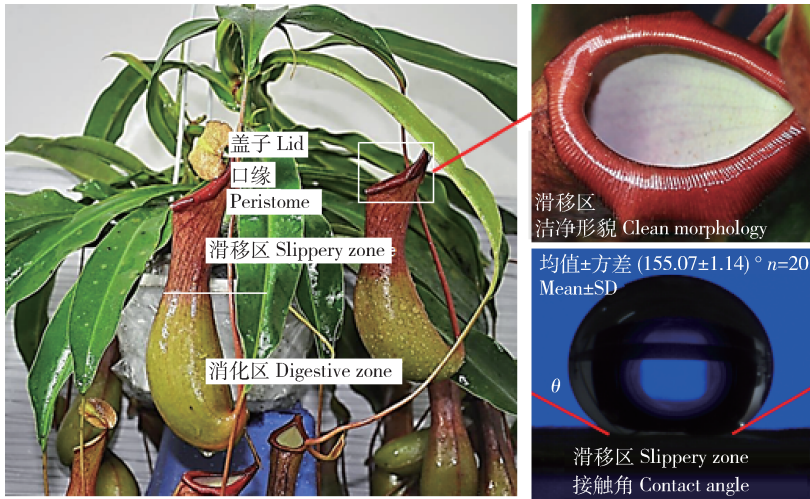
2.1 滑移区各向异性超疏水润湿行为

滑移区各向异性超疏水润湿行为测试表征结束后,分析获取润湿特征信息。由图 1(a)可知,滑移区能够使水滴呈现近乎完整的球状形貌,产生的接触角介于 $153.00 \sim 160.61^\circ$,平均值为 $(155.07 \pm 1.14)^\circ$,表明具有较强的超疏水润湿特性。如

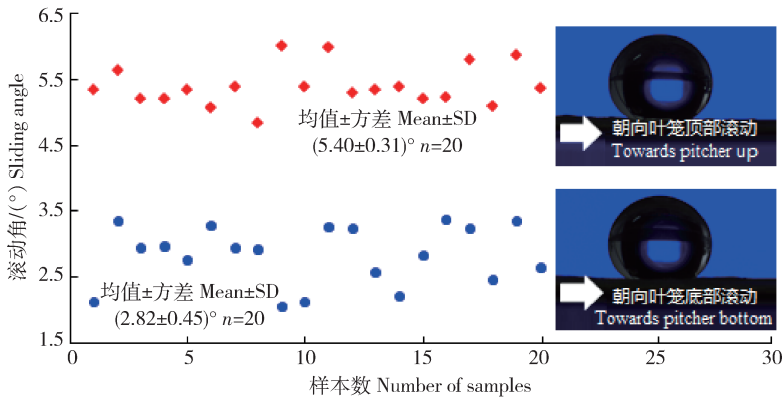
图 1(b)所示,滑移区朝向叶笼底部的滚动角介于 $2.03 \sim 3.37^\circ$,平均值为 $(2.82 \pm 0.45)^\circ$;朝向叶笼顶部的滚动角介于 $4.83 \sim 6.01^\circ$,平均值为 $(5.40 \pm 0.31)^\circ$ 。不同方向上滚动角的显著差别,表明滑移区具有较强的各向异性超疏水润湿特性,这可以为各向异性超疏水表面研制提供仿生原型。

2.2 滑移区形貌结构

SEM 观测结果显示滑移区形貌结构由两端向下弯曲的月骨体(Lunate cell)和交错致密排列的蜡质晶体层(Wax coverings)构成(图 2(a)),这与之前的观测结果高度相似^[11,22-23,26]。每个月骨体对应着增大交叠的结构单元,形成具有不对称凸面的表层轮廓(图 2(b)),致使滑移区在形貌结构方面呈现显著的各向异性。蜡质晶体层由形状不规则但可辨别轮廓的片状蜡质晶体构成,近乎垂直排列于滑移区基层且紧密交错成网状,形成大量轮廓不规则的孔洞(图 2(c))。



(a) 猪笼草叶笼与接触角 *Nepenthes* slippery zone and contact angle



(b) 滑移区滚动角 Sliding angle of the slippery zone

图 1 猪笼草叶笼组成与滑移区各向异性超疏水润湿行为

Fig. 1 Structure of *Nepenthes* pitcher and anisotropic superhydrophobic wettability

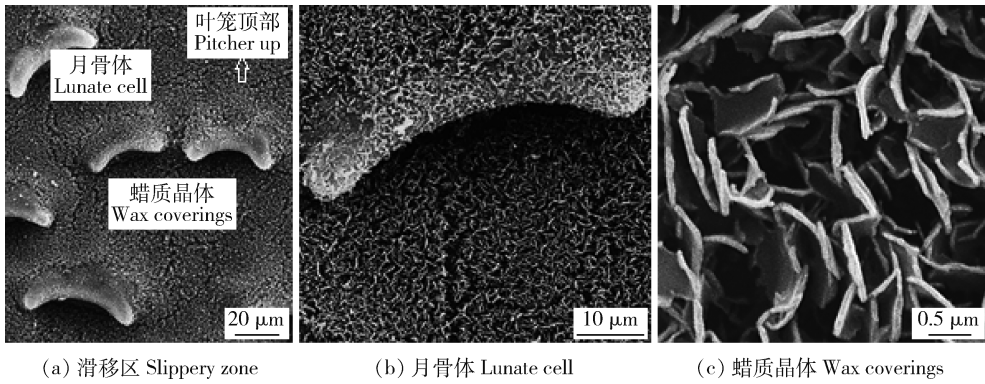
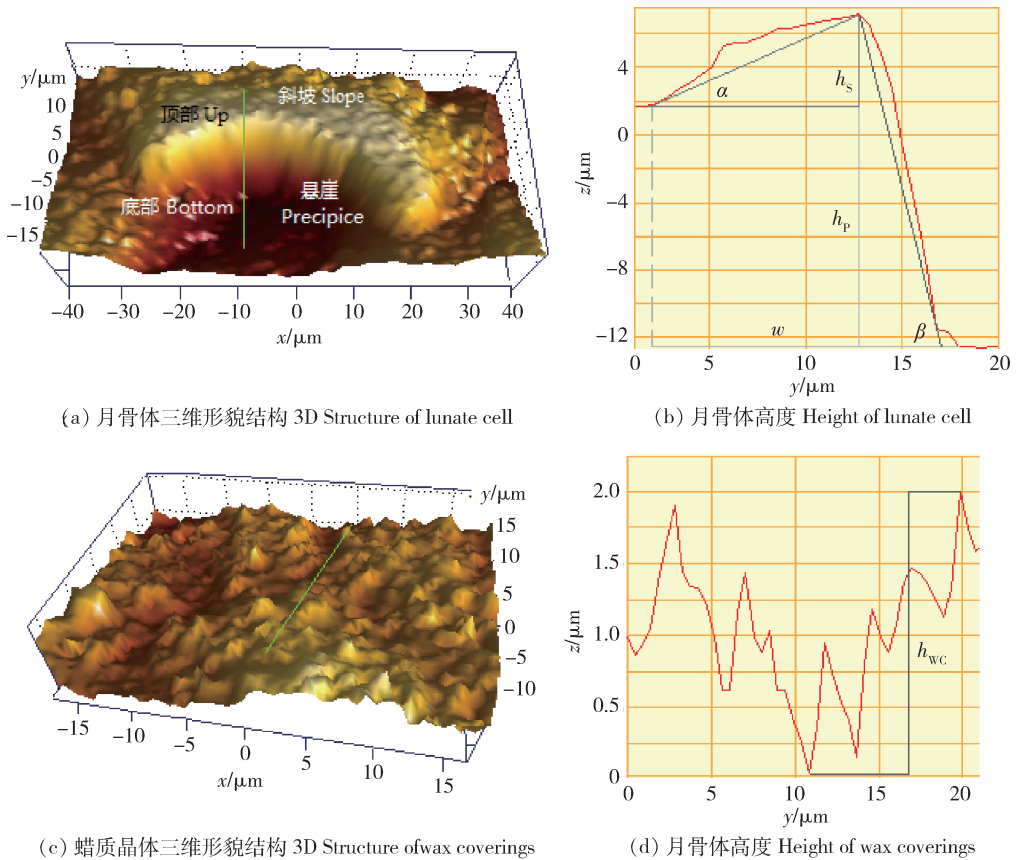


图2 猪笼草叶笼滑移区形貌结构的扫描电镜图像
Fig. 2 SEM images of slippery zone in *Nepenthes* pitcher

SWLI 扫描结果能够呈现滑移区形貌结构的纵向变化(图 3(a)和图 3(b)),月骨体朝向叶笼底部的高度变化缓慢而形成“斜坡”结构,朝向叶笼顶部的高度变化剧烈而形成“悬崖”结构,朝向叶笼顶部

高度变化剧烈而形成“悬崖”结构。蜡质晶体层相对较为光滑,在纵向上的高度起伏仅处于微米与纳米之间(图 3(c)和图 3(d))。



x, y 和 z , 分别为长度、宽度和高度; α 和 β , 月骨体斜坡结构和悬崖结构的倾角; h_s, h_p 和 h_{wc} , 分别为斜坡, 悬崖和蜡质晶体层的高度; w , 月骨体宽度。

x, y and z , length, width, height respectively; α and β , inclined angle of lunate cell's slope and precipice; h_s, h_p and h_{wc} , heights of slope, precipice and wax coverings, respectively; w , width of lunate cell.

图3 猪笼草叶笼滑移区的三维形貌结构图像
Fig. 3 3D morphology and structure of slippery zone in *Nepenthes* pitcher

如表 1 所示,月骨体具有微米级的三维特征参数,其中斜坡高度相对较小,间距相对较大,分布密度约为 $266.6 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。蜡质晶体层具有微纳级别的三维结构参数,其中高度为 $(1.98 \pm 0.16) \mu\text{m}$,片状蜡质晶体的长度和厚度分别为 $(1.22 \pm 0.10) \mu\text{m}$ 和 $(92.5 \pm 8.4) \text{ nm}$, $n=20$ 。月骨体与蜡质晶体共同构成的微纳复合结构是滑移区呈现超疏水润湿特性的重要因素。张鹏飞等^[21]通过测试水滴在形貌结构完整、萃取除去蜡质晶体的滑移区接触角证实,蜡质晶体是滑移区呈现超疏水润湿特性的关键;基于 Wenzel 方程和 Cassie-Baxter 方程构建的数学模型显示,仅凭月骨体可使滑移区呈现 102.7° 的接触角,而蜡质晶体可使接触角提高到 138.2° ^[22]。月骨体两端低垂的非对称形貌结构是导致滑移区产生各向异性的关键,而蜡质晶体几乎不发挥作用;这种形貌结构方面的各向异性使昆虫在朝向叶笼底部方向上产生较强的附着功能,而朝向叶笼顶部方向上可使昆虫爬行功能完全丧失^[23,25-26]。三维结构特征方面(图 3),月骨体在朝向叶笼底部方向上具有显著较小的斜坡倾角与斜坡高度,分别为月骨体在朝向叶笼顶部方向上悬崖倾角与悬崖高度的 26.4% 和 30.4% ;滑移区的这种结构特征差异导致了水滴滚动难易程度的不同,是滑移区呈现各向异性超疏水润湿特性的根源。

表 1 月骨体形貌结构特征参数 ($n=20$)

Table 1 Structure parameters of lunate cells ($n=20$)

参数类型 Parameter type	参数值 Value
斜坡高度/ μm Slope height	5.39 ± 0.43
悬崖高度/ μm Precipice height	20.41 ± 1.73
斜坡倾角/ $^\circ$ Slope angle	23.10 ± 2.40
悬崖倾角/ $^\circ$ Precipice angle	76.10 ± 4.00
长度/ μm Length	58.29 ± 4.51
宽度/ μm Width	14.42 ± 1.09
间距/ μm Interval distance	94.31 ± 8.54

2.3 滑移区各向异性超疏水润湿特性影响机制

已有研究指出,形貌结构和化学成分是致使材料表面呈现超疏水润湿特性的关键因素,植物叶片表面覆盖着具有疏水特性的蜡质晶体^[27];水滴在光滑疏水材料表面的接触角难以超过 120° ,因此形貌结构及其产生的粗糙度能够显著增强材料表面的超疏水润湿行为^[28]。猪笼草叶笼滑移区微米级的月

骨体与纳米级的蜡质晶体共同决定其超疏水润湿特性,其中蜡质晶体发挥关键作用^[21-22],这是因为结构参数介于微纳级别的蜡质晶体交错排列而形成的孔洞结构能够蓄留空气,可有效阻止水滴对滑移区的浸润,能够最大限度地托起水滴使其保持圆球形貌,以此产生较大的接触角。

滚动角是水滴在倾斜材料表面临界发生滚动时,倾斜材料表面与水平面所形成的角度,是表征水滴在材料表面运动特性的重要指标。水滴在滑移区呈现最高可达 160.61° 的接触角,极大降低了两者之间的接触面积,较小的滚动角便可引发水滴滚动。滑移区的蜡质晶体层在形貌结构方面不具备各向异性,在朝向叶笼底/顶部均可呈现高度接近的昆虫附着行为抑制功能^[25-26],因此不能视为滚动角呈现显著差异的诱发因素。月骨体两端低垂的非对称形貌结构,并且在朝向叶笼底/顶部具有显著不同的倾角与高度(表 1),致使滑移区在形貌结构方面呈现较强的各向异性,成为滑移区呈现各向异性超疏水润湿特性的潜在关键因素。

滑移区覆盖着厚度约为 $2 \mu\text{m}$ 的蜡质晶体层,水滴与滑移区接触时,首先浸润蜡质晶体及其产生的孔洞结构;蜡质晶体层在形貌结构方面不具有各向异性,阻碍水滴滚动的黏附力(水滴-蜡质晶体)不因滚动方向的差异而呈现不同,因此不会引发滚动角的显著差异。滚动角测试过程中,水滴约为 $5 \mu\text{L}$,半径 1.061 mm ,产生的接触角为 $(155.07 \pm 1.14)^\circ$,故水滴与滑移区的接触半径为 0.447 mm ,接触面积为 0.627 mm^2 ,能够覆盖月骨体的个数约为 167。为定量分析这些月骨体朝向叶笼底/顶部显著不同的形貌结构特征(倾角和高度)对水滴滚动行为的影响机制,构建如图 4 所示的模型。水滴沿朝向叶笼底部滚动时,需要克服月骨体斜坡结构(高度 $(5.39 \pm 0.43) \mu\text{m}$ 、倾角 $(20.41 \pm 1.73)^\circ$)因高度变化产生的阻碍作用,还需克服斜坡结构与水滴间黏附效应产生的阻碍作用;水滴沿朝向叶笼顶部滚动时,需要克服月骨体悬崖结构(高度 $(23.1 \pm 2.4) \mu\text{m}$ 、倾角 $(76.1 \pm 4.0)^\circ$)高度变化产生的阻碍作用,还需克服悬崖结构与水滴间黏附效应产生的阻碍作用。基于上述分析,可获取如下方程:

$$W_{\text{rf-s}} = mgh_s + \gamma_{\text{lg}} \frac{2lh_s}{\sin\alpha} (1 + \sin\theta + \cos\theta) \quad (1)$$

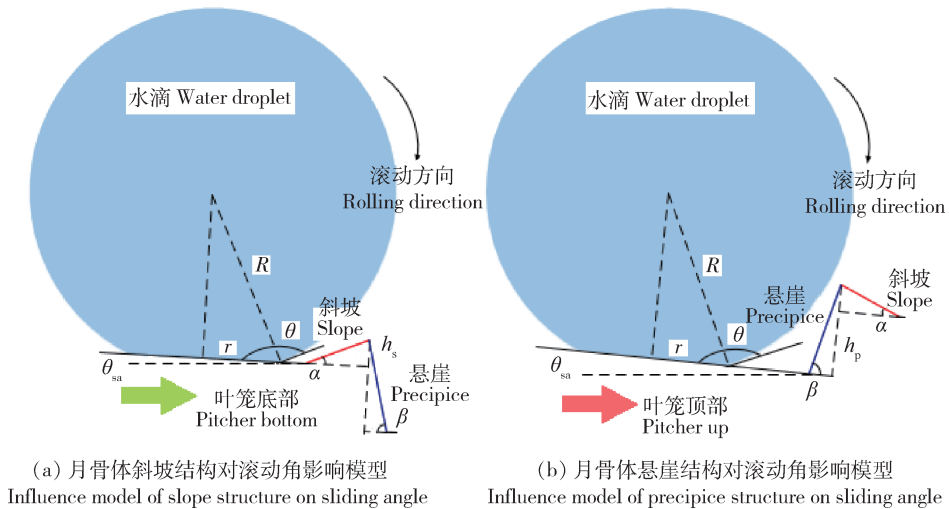
$$W_{\text{rf-p}} = mgh_p + \gamma_{\text{lg}} \frac{2lh_p}{\sin\beta} (1 + \sin\theta + \cos\theta) \quad (2)$$

式中: W_{rf-s} 和 W_{rf-p} , 分别为斜坡和悬崖结构对水滴滚动的阻力做功; m , 水滴的质量; g , 重力加速度; h_s 和 h_p , 分别为斜坡和悬崖结构的高度; γ_{lg} , 水滴的表面张力; l , 月骨体的长度; α 和 β , 分别为斜坡/悬崖结构的倾斜角度; θ , 水滴在滑移区的接触角。因此, 水滴浸润单个月骨体的悬崖/斜坡结构时阻力做功的差值为:

$$\Delta W_{rf} = W_{rf-p} - W_{rf-s} = mg(h_p - h_s) + 2\gamma_{lg}l\left(\frac{h_p}{\sin\beta} - \frac{h_s}{\sin\alpha}\right)(1 + \sin\theta + \cos\theta) \quad (3)$$

将月骨体的结构参数(表1)带入式(3), 则有

$\Delta W_{rf} > 0$, 进一步计算获取 $W_{rf-p}/W_{rf-s} \in (1.53, 3.79)$ 。结果表明水滴浸润悬崖结构时的阻力做功显著大于其浸润斜坡结构时的阻力做功。施加滚动角, 滑移区的水滴将会因高度抬升而获取重力势能, 用于克服月骨体的斜坡/悬崖结构对水滴滚动的阻力做功。因此, 水滴浸润斜坡结构, 即朝向叶笼顶部滚动时呈现相对较高的滚动角(图1(b))。值得注意的是, 滚动角测试过程中所使用水滴的半径为 1.061 mm, 分别为月骨体斜坡高度和悬崖高度的 197 和 52 倍, 说明月骨体形貌结构对水滴滚动仅起到轻微的阻碍作用, 因此在滑移区超疏水前提下, 较小的滚动角(图1(b))便可使水滴产生滚动行为。



θ_{sa} 和 θ , 水滴在滑移区的滚动角和接触角; h_s 和 h_p , 斜坡结构和悬崖结构的高度; α 和 β , 斜坡/悬崖结构的倾斜角; R , 水滴的半径; r , 水滴与滑移区接触的接触圆半径。

θ_{sa} and θ , sliding/contact angle of water droplet on the slippery zone; h_s and h_p , height of the slope/precipice structure; α and β , inclined angle of the slope/precipice structure; R , radius of the water droplet; r , radius of the contact circle between the water droplet and the slippery zone.

图4 月骨体的斜坡/悬崖结构对滚动角影响机制分析模型

Fig. 4 Influence mechanism model of lunate cell's morphology and structure toward pitcher bottom/top

3 结论

本研究基于获取各向异性超疏水表面研制仿生原型的目的, 表征了猪笼草(*Nepenthes alata*)滑移区的各向异性超疏水润湿行为, 对滑移区形貌结构进行观测并分析提取了三维特征信息, 揭示滑移区形貌结构对各向异性超疏水润湿特性的影响机制。水滴在滑移区的接触角介于 $153.00 \sim 160.61^\circ$, 朝向叶笼底/顶部的滚动角分别为 $(2.82 \pm 0.45)^\circ$ 和 $(5.40 \pm 0.31)^\circ$, 预示滑移区具有较强的各向异性超疏水润湿特性。滑移区形貌结构由蜡质晶体层与月

骨体构成, 形貌不规则且交错排列成致密孔洞结构的纳米级蜡质晶体能够蓄留空气, 致使滑移区呈现超疏水润湿特性; 末端弯曲且具有不对称凸面表层轮廓的微米级月骨体在朝向叶笼底/顶部方向上分别形成斜坡/悬崖结构并呈现显著不同的倾角与高度, 导致水滴在滑移区滚动行为难易程度的差异, 使滑移区产生较强的各向异性超疏水润湿特性。

参考文献 References

[1] Xia F, Jiang L. Bio-inspired, smart, multiscale interfacial

- materials[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(15): 2842-2858
- [2] 孙艳红, 杨晓东, 杨卓娟, 王庆成, 门玉琢. 典型状态下荷叶润湿性差异及其机理分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 263-267
Sun Y H, Yang X D, Yang Z J, Wang Q C, Men Y Z. Difference in wettability of lotus leaves in typical states and its mechanism analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (13): 263-267 (in Chinese)
- [3] Latthe S, Terashima C, Nakata K, Fujishima, A. Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf[J]. *Molecules*, 2014, 19(4): 4256-283
- [4] 杨成娟, 李媛, 梅雪松, 田延岭, 张大卫. 纳秒激光制备钛表面纹理结构及其润湿性研究[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(4): 315-321
Yang C J, Li Y, Mei X S, Tian Y L, Zhang D W. Study on the fabrication of titanium surface texture by nanosecond laser and its wettability[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2016, 37(4): 315-321 (in Chinese)
- [5] Xu Q, Zhang W W, Dong C B, Sreepasad T S, Xia Z. Biomimetic self-cleaning surfaces: Synthesis, mechanism and applications[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2016, 13(6): 1-13
- [6] Cao M Y, Xiao J S, Yu C M, Li K, Jiang L. Hydrophobic/hydrophilic cooperative janus system for enhancement of fog collection[J]. *Small*, 2015, 11(34): 4379-4384
- [7] 梁伟欣, 张亚斌, 王奔, 郭志光, 刘维民. 仿生超疏水性表面的生物应用[J]. 化学学报, 2012, 70(23): 2393-2403
Liang W X, Zhang Y B, Wang B, Guo Z G, Liu W M. Biological applications of biomimetic superhydrophobic surfaces [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2012, 70 (23): 2393-2403 (in Chinese)
- [8] 邱宇辰, 刘克松, 江雷. 花生叶表面的高黏附超疏水特性研究及其仿生制备[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(2): 403-408
Qiu Y C, Liu K S, Jiang L. Peanut leaves with high adhesive superhydrophobicity and their biomimetic materials [J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2011, 41(2): 403-408 (in Chinese)
- [9] 张洪敏, 汪涛, 鱼银虎, 张度宝, 潘剑锋. 类蝴蝶翅膀表面微纳结构的制备及其疏水性[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 131-136
Zhang H M, Wang T, Yu Y H, Zhang D B, Pan J F. Preparation and hydrophobic properties of the micro-nano structure of butterfly wings surface[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(5): 131-136 (in Chinese)
- [10] Yao X, Song Y L, Jiang L. Applications of bio-inspired special wettable surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(6): 719-734
- [11] Wang L X, Zhou Q. *Nepenthes* pitchers: Surface structure, physical property, anti-attachment function and potential application in mechanical controlling plague locust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(21): 2513-2523
- [12] 王立新, 周强. 蝗虫灾害光电诱导捕集治理研究进展及应用前景分析[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 203-210
Wang L X, Zhou Q. Progress and prospect of photoelectric induced-trapping controlling locust plague[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(5): 203-210 (in Chinese)
- [13] Gaume L, Gorb S, Rowe N. Function of epidermal surfaces in the trapping efficiency of *Nepenthes alata* pitchers[J]. *New Phytologist*, 2002, 156(3): 479-489
- [14] Bauer U, Paulin M, Robert D, Sutton P. Mechanism for rapid passive-dynamic prey capture in a pitcher plant[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(43): 13384-13389
- [15] Chen H W, Zhang P F, Zhang L W, Liu H L, Jiang Y, Zhang D Y, Han Z W, Jiang L. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata* [J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 85-89
- [16] Wang Z B, Liu Y, Guo P, Heng L P, Jiang L. Porous films: Photoelectric synergetic responsive slippery surfaces based on tailored anisotropic films generated by interfacial directional freezing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(49): 1801310
- [17] Gorb E, Hass K, Henrich A, Enders S, Barbakadze N, Gorb S. Composite structure of the crystalline epicuticular wax layer of the slippery zone in the pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* and its effect on insect attachment [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(24): 4651-4662
- [18] Wang L X, Zhou Q. Friction force of locust *Locusta migratoria manilensis* (Orthoptera, Locustidae) on slippery zones surface of pitchers from four *Nepenthes* species [J]. *Tribology Letters*, 2011, 44(3): 345-353

- [19] Gorb E, Kastner V, Peressadko A, Arzt E, Gaume L, Rowe N, Gorb S. Structure and properties of the glandular surface in the digestive zone of the pitcher in the carnivorous plant *Nepenthes ventrata* and its role in insect trapping and retention [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(17): 2947-2963
- [20] Gorb E, Gorb S. Physicochemical properties of functional surface in pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* blanco (Nepenthaceae)[J]. *Plant Biology*, 2006, 8(6): 841-848
- [21] 张鹏飞, 张德远, 陈华伟. 猪笼草内表面微观结构及其浸润性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 341-345
Zhang P F, Zhang D Y, Chen H W. Microstructure and wettability character of *Nepenthes*' pitcher surfaces [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 341-345 (in Chinese)
- [22] Wang L X, Zhou Q. Surface hydrophobicity of slippery zones in the pitchers of two *Nepenthes* species and a hybrid [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 19907
- [23] Wang L X, Dong S Y, Zhou Q. Slippery surface of *Nepenthes alata* pitcher: The role of lunate cell and wax crystal in restricting attachment ability of ant *Camponotus japonicus* Mayr [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13(3): 373-387
- [24] Gorb E, Gorb S. The effect of surface anisotropy in the slippery zone of *Nepenthes alata* pitchers on beetle attachment [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, 2(1): 302-310
- [25] Zhang P F, Chen H W, Zhang D Y. Investigation of the anisotropic morphology-induced effects of the slippery zone in pitchers of *Nepenthes alata* [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12(1): 79-87
- [26] Wang L X, Tao D S, Dong S Y, Li S S, Tian Y. Contributions of lunate cells and wax crystals to the surface anisotropy of *Nepenthes* slippery zone [J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5: 180766
- [27] Blossey R. Self-cleaning surfaces-virtual realities [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(5): 301-306
- [28] Koch K, Blecher I, König G, Kehraus S, Barthlott W. The superhydrophilic and superoleophilic leaf surface of *ruellia devosiana*; A biological model for spreading of water and oil on surfaces [J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(4): 339-350

责任编辑: 吕晓梅