基于树蛙脚掌的仿生六棱柱表面边界摩擦研究

张力文, 陈华伟*, 张鹏飞, 张德远

北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191

* 联系人, E-mail: chenhw75@buaa.edu.cn

2015-10-20 收稿, 2015-12-06 修回, 2015-12-07 接受, 2016-02-21 网络版发表

国家自然科学基金(51175020)和国家自然科学基金重大项目(51290292)资助

摘要 湿润环境下软材料的摩擦受固液气多介质作用, 一直都是摩擦理论的难点. 师法自然, 我们从自然界获取灵感, 由树蛙脚掌能在湿环境中产生极强的摩擦力, 来研究软材料在湿环境中的摩擦特性. 本文表征了树蛙脚掌的结构和摩擦力, 发现在边界摩擦状态下, 界面间极薄的液膜有助于增大摩擦力. 在树蛙脚掌湿摩擦力的启发下, 设计制造出了一种仿生六棱柱增摩表面. 通过对摩擦力表征发现, 其边界摩擦能达到干摩擦的50倍. 与光滑表面相比, 仿生六棱柱表面能够产生稳定且持久的边界摩擦力, 六棱柱表面亲水比疏水也有着更优异的边界摩擦性能. 该研究结论有助于人们进一步认识软材料的湿摩擦机理, 可以进一步帮助设计制造更强的湿吸附仿生表面.

关键词 树蛙, 黏液, 边界摩擦, 仿生表面, 湿摩擦

橡胶、硅胶等高聚物在人们生活中重要性逐渐增加, 而这类材料使用性能很多时候决定于其湿摩擦性能, 如汽车轮胎湿防滑、雨刮器刮擦、橡胶手套湿抓持. 但与传统金属等硬材料相比, 人们对这类软材料在湿环境中的摩擦特性还缺乏足够认识. 在干摩擦下, 由于软材料较低的弹性模量使得接触面间的范德华力能够形成更紧密的接触, 从而导致较高的黏附力和摩擦力^[1]. 而当有液体干涉时, 由于接触面与液体之间固液耦合作用受多方面因素影响, 使得接触面间的摩擦情况复杂且多变. 比如, 一般材料的干摩擦力都高于湿摩擦力, 而在橡胶上则会在湿、干摩擦转换时, 出现摩擦短暂增大高过干摩擦的情况, 并可能伴随着黏-滑现象的发生^[2,3].

自然界中生物表面多为软材料, 且经过数亿万年进化, 形成了许多优异生物摩擦现象, 通过对生物摩擦的研究, 可以帮助人们认识软材料的摩擦机理. 人体皮肤作为一种超弹性材料, 其表面会自然地分泌液体以保持潮湿状态, 更有效抓持物体, 这种湿摩

擦显著高于干摩擦的状态被称为边界摩擦^[4], 推测是因液体表面张力导致表面变形增加了有效接触面积^[5]. 与人皮肤相比, 树蛙脚掌在湿环境中的摩擦表现更强, 即使不施加法向力, 树蛙仍然能够轻松地贴附于光滑垂直湿表面上. 其脚掌由密排棱柱细胞构成^[6], 当树蛙在湿表面爬行时, 这种特殊结构可能有助于将液体排出接触表面, 挤入沟槽中, 从而实现与基底接触, 达到增摩效果^[7]. 然而树蛙脚掌自身会分泌黏液, 这与排液体机理相矛盾, 因此, 有研究认为树蛙脚掌爬附效果主要由接触面间黏液的表面张力和黏滞作用产生^[8]. Federle等人^[9]通过对黏液表征发现, 树蛙脚掌摩擦力不是由黏液所产生的黏滞阻力导致的, 推测其可能是由脚掌与表面的边界摩擦产生, 而树蛙脚掌是否工作在边界摩擦状态下没有被证实, 其具体作用机理也需要进一步研究.

在生物脚掌的吸附机理启发下, 湿仿生吸附表面的设计和制造近年来取得了很大的进步. Vogel等人^[10]制造出了利用液体表面张力产生可控黏附的表

引用格式: 张力文, 陈华伟, 张鹏飞, 等. 基于树蛙脚掌的仿生六棱柱表面边界摩擦研究. 科学通报, 2016, 61: 2596–2604

Zhang L W, Chen H W, Zhang P F, et al. Boundary friction force of tree frog's toe pads and bio-inspired hexagon pillar surface (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2596–2604, doi: 10.1360/N972015-01166

面. Murarash等人^[11]和Varenberg等人^[12]通过对仿生六棱柱结构的研究发现,与光滑表面相比,其有排出液体功能,有助于提高在湿环境中的摩擦力,这种结构已经在汽车轮胎上得到使用. He等人^[13]将该结构应用到了爬行机器人上,取得了较好的湿爬附能力. Tsipenyuk等人^[14]制作出了仿生湿防滑表面,并将其使用到了刮胡刀表面. 但是,几乎所有的研究都聚焦在将液体排出至多级结构,增大固固接触,从而增大摩擦力方面,薄液膜对黏附力和摩擦力所产生的作用则几乎没有应用,这由于对树蛙脚掌作用机理作出仍然缺乏深入研究.

为了研究软材料在湿环境下的摩擦特性,我们对树蛙脚掌进行了结构和摩擦表征,揭示了树蛙黏液和摩擦力之间的关系,并基于树蛙脚掌结构设计出了仿生六棱柱表面. 利用该表面探索了表面亲疏水性、液体与摩擦力之间关系,为仿生湿黏附表面设计提供了验证.

1 材料与方法

1.1 表征及实验方法

如图1(a)所示,测量装置由一个2D力传感器和

XYZ三轴微动台构成(Siskiyou, Inc),测试样品被固定在微动台上,由其驱动. 在树蛙脚掌摩擦力测量中,其身体被固定在一个铜制盒子中只有一只腿伸出,脚掌用玻璃管吸住并实现移动(图1(b)). 在PDMS表面摩擦力测量中,将已知重量的载荷放置于测量样品上,作为法向力施加(图1(c)). 微动台的滑动速度区间为2~300 $\mu\text{m/s}$,力传感器量程为10000 mN,最小分辨率为0.2 mN.

1.2 生物样本及仿生样品制备

选用斑点树蛙(*Polypedates megacephalus*, 雨蛙科)作为生物样本,脚掌样本用0.1 mol/L的磷酸盐缓冲液清洗并放入2.5%的戊二醛溶液静置24 h,随后用梯度酒精脱水并浸入叔丁醇中,放置于0℃环境真空干燥,最后喷金得到扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)样品. 仿生密排六棱柱表面通过光刻技术先将六棱柱结构制作到玻璃片上,然后使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)两次复制得到仿生表面,PDMS为预聚物与胶黏剂10:1混合. 光滑对照表面通过复制载玻片获得,粗糙度为60 nm. 为了降低PDMS表面自身的黏性,将获得的PDMS表面加热至150℃保持1 h,再用氧气等离子体处理30 min. 表面

图1 (网络版彩色)摩擦力测量示意图. (a) 测力装置示意图; (b) 树蛙脚掌摩擦力测量方法; (c) 仿生六棱柱表面和光滑表面摩擦力测量方法
Figure 1 (Color online) Schematics of friction test. (a) The equipment of friction test; (b) friction test for tree frog's toe pads; (c) friction test for bio-inspired hexagon pillar surface and smooth surface

亲疏水改性通过四氟化碳和氧气等离子体处理实现, 每次测量后, 都重复一次表面改性过程.

2 结果和讨论

2.1 树蛙脚掌结构表征

树蛙在湿环境中有着超强的爬附能力(图2(a)), 其脚掌由多边形棱柱形状的表皮细胞密排而成, 细胞直径约为10 μm , 沟槽深、宽分别约为5, 1 μm (图2(c), (d)). 细胞结构包括四棱柱、五棱柱、六棱柱和七棱柱, 其中超过一半为六棱柱(图2(b), 图3), 且多为非规则多边形棱柱.

2.2 树蛙脚掌边界摩擦表征

为了测量树蛙脚掌摩擦力, 脚掌在去离子水冲洗后, 用无尘纸擦拭干净. 施加的法向力为3 mN, 滑动速度设定为300 $\mu\text{m/s}$. 摩擦力连续测量10次, 每次测量都重新选取基底上干燥部位进行.

如图4所示, 在每次测量中, 树蛙脚掌的静摩擦力和动摩擦力没有明显区别. 随着测量步数增加, 摩擦力逐渐增加并最终在6次测量后达到稳定状态. Drechsler等人^[15]在竹节虫的脚掌上观察到了类似的黏液与摩擦力关系. 树蛙脚掌与人皮肤相同, 摩擦力从湿到干的过程同样表现出了摩擦力增大的特点, 即边界摩擦^[16]. 而与人皮肤不同, 树蛙脚掌的摩擦

系数最高可以达到40, 远高于人皮肤的最大摩擦系数2. 此外, 人皮肤需要处于湿环境中或者额外添加的液体才能达到边界摩擦, 否则其接触状态会迅速进入干摩擦, 摩擦力减小^[17], 树蛙脚掌却能够一直保持稳定的边界摩擦状态. 究其原因, 可能因为树蛙脚掌表面密布着分泌黏液的腺体, 能够保持边界摩

图2 (网络版彩色)树蛙脚掌结构表征. (a) 斑点树蛙爬行; (b) 树蛙脚掌电子显微镜照片; (c) 单个细胞照片; (d) 脚掌沟槽截面照片
Figure 2 (Color online) Structure characteristics for tree frog's toe pad. (a) Vertical attachment ability of tree frog; (b) SEM image of tree frog's toe pad; (c) a single epithelial cell on tree frog's toe pad; (d) the section view of tree frog's toe pad

图3 树蛙脚掌表皮细胞结构种类
Figure 3 Characteristics of epithelial cells from tree frog toe pads

图4 连续10次测量树蛙脚掌摩擦力得到的测力曲线, 每次测量都重新选取基底上干燥部位进行

Figure 4 Ten consecutive friction test steps for tree frog's toe pad. For each step, the test was performed on a new dry part of the substrate

擦状态, 且其特殊的密排六棱柱结构也会有助于边界摩擦的维持. 在对树蛙脚掌的摩擦力测试中, 其摩擦力能够保持平稳, 而在对人前臂皮肤和手指边界摩擦测量中, 总会出现黏-滑的爬行现象^[17,18]. Varenberg等人^[12]发现在干燥情况下, 仿树蛙的六棱柱表面能够有效地消除黏-滑现象, 但在边界摩擦中这种效果是否会同样出现还需实验证实.

2.3 仿生六棱柱表面的边界摩擦研究

密排微棱柱是典型的树蛙脚掌表面结构, 其中以六棱柱为主, 且沟槽深度超过宽度, 结合已有的制备、观察条件, 我们设计了一种仿生六棱柱表面, 六棱柱内接圆直径为120 μm , 高度为35 μm , 沟槽宽度为20 μm , 面积为1 $\text{cm} \times 1 \text{ cm}$ (图5). 测量摩擦力时, 法向力为5 mN, 滑动速度为300 $\mu\text{m/s}$. 在测量前, 为了让初始时的摩擦状态为湿摩擦, 将50 μL 去离子水

注入到接触表面, 以浸润满整个接触面. 在每步测量后, 基底上的水用无尘纸擦去, 而PDMS表面上残余的水保持不变, 这样接触面间的液量会持续减小. 每步摩擦力测量后, 用分析天平称量PDMS块的质量, 得到表面的残余液体量. 当摩擦力随着测量步数增加而不再变化时, 测量结束.

测量结果如图6所示, 六棱柱表面和光滑表面的干摩擦力都高于湿摩擦力, 这是由于液体作为润滑剂作用于接触表面间. 随着液量的减少, 两种表面都经过了边界摩擦状态, 其大小达到干摩擦的50倍. 随着液量的减少, 液膜越薄, 表面张力越大, 摩擦力也会越大. 这与树蛙脚掌上观测到边界摩擦变化情况也一致.

实验中, 光滑表面上很快达到且通过了边界摩擦状态, 而在六棱柱表面上, 边界摩擦状态维持了更长时间. 由于在滑动过程中, 与光滑表面相比, 六棱柱表面能够更长时间的保存液体, 实现长时间的毛细作用. 树蛙脚掌是由更小的六棱柱组成, 其保持黏液的能力也更强, 可以获得更长时间的边界摩擦力. 如图6(b)所示, 仿生六棱柱表面在第10测量步时表面覆盖有大约0.7 μL 的液体, 由于表面的沟槽体积为0.71 μL , 故当沟槽体积与表面液体量相当时, 边界摩擦会达到最大状态.

为了研究不同结构以及亲、疏水表面的边界摩擦维持能力, 将仿生表面通过一个二维力传感器拖动, 在转速为2 rad/min 的圆玻璃片上滑动. 仿生表面到圆玻璃片中心距离为3 cm, 测试前将1.4 μL 去离子水加入接触表面. 法向力从5 mN增加至1000 mN. 当接触面间没有液体, 摩擦力减小到稳定值时, 测量结束.

典型的测量曲线如图7所示. 疏水的六棱柱和光滑表面几乎观察不到摩擦力. 而亲水的六棱柱和光

图5 仿生密排六棱柱结构表面. (a), (b) 密排微六棱柱电子显微镜照片; (c) 微结构尺寸示意图, 其中内接圆直径120 μm , 沟槽宽度20 μm , 高度35 μm

Figure 5 The bio-inspired hexagon pillar surface. (a, b) SEM images of bio-inspired hexagon pillar surface; (c) the inscribed circle diameter and height of the pillar are 120 and 35 μm , respectively. The width of channels is 20 μm

图6 (网络版彩色)仿生密排六棱柱表面边界摩擦表征. (a) 不同液量下, 密排六棱柱表面和光滑表面的摩擦力情况; (b) 从第6至17测量步, 密排六棱柱表面的液体量

Figure 6 (Color online) The boundary friction of bio-inspired hexagon pillar surface. (a) The comparison of boundary friction in bio-inspired hexagon pillar surface and smooth surface in different amount of liquid; (b) the weight of liquid on bio-inspired hexagon pillar surface from step 6 to 17

图7 (网络版彩色)亲水、疏水的密排六棱柱表面和光滑表面的摩擦力曲线. (a) 亲水六棱柱表面; (b) 亲水光滑表面; (c) 疏水六棱柱表面; (d) 疏水光滑表面. 法向力为5 mN, 液量从1.4减至0 μL

Figure 7 (Color online) Friction test for bio-inspired hexagon pillar surface and smooth surface in hydrophilic and hydrophobic states. (a) Hydrophilic bio-inspired hexagon pillar surface; (b) hydrophilic smooth surface; (c) hydrophobic bio-inspired hexagon pillar surface; (d) hydrophobic smooth surface. The normal force is 5 mN. Liquid volume decreases from 1.4 to 0 μL

滑表面都展示出了高于干摩擦的边界摩擦力. 在图8中, 通过对亲、疏水六棱柱表面的液体铺展过程观察发现, 亲水表面能够轻易铺展开, 形成较薄的液膜, 从而产生较高的摩擦力. 而在疏水表面上, 液体聚集在一起形成了较厚的液膜, 液体作为润滑剂在界面

间产生润滑作用, 导致极小的摩擦. 在亲水PDMS表面, 光滑表面表现出很强的黏-滑爬行运动(图7(b)), 六棱柱表面却能够产生持续稳定的边界摩擦力. 这可能由于液体在光滑表面上很容易流动, 液体分布会随应力分布发生快速变化, 从而导致出现不

图 8 液体在不同浸润性密排六棱柱表面铺展过程. (a) 0.7 μL 液体滴至亲水六棱柱表面后, 液体通过沟槽快速、完全铺展开; (b) 0.7 μL 液体滴至疏水六棱柱表面后, 液体聚集成球状, 难以铺展开

Figure 8 Different water moving states on hydrophilic and hydrophobic bio-inspired hexagon pillar surface. (a) Water quickly spread on hydrophilic bio-inspired hexagon pillar surface through channels; (b) water could not spread on hydrophobic bio-inspired hexagon pillar surface

稳定的边界摩擦, 而六边形沟槽能够有效地固持液体的分布. 从图8(a)可以看到, 液体在亲水六棱柱表面上只会通过沟槽铺展, 而不会在六棱柱表面运动. 此外, 由于六边形沟槽类似于半开毛细管, 液体在其中的铺展速度非常高, 这些使得该结构够用尽可能少的液量, 最快的浸润整个表面. 由于棱柱之间相互独立, 即使某些棱柱发生了黏-滑运动, 整个棱柱阵列在宏观上依然能表现出稳定的边界摩擦力. 树蛙生存中需要稳定且强劲的爬附能力, 六棱柱结构对其脚掌维持边界摩擦力有着很重要的作用.

通过比较4种PDMS表面的边界摩擦状态维持能力, 六棱柱表面维持能力高于光滑表面(图9), 这主要因为光滑表面会将多余液体迅速排出接触面, 而沟槽能够有效地保存液体. 由于亲水六棱柱表面的亲水性沟槽能够更有效地铺展液体, 因此其边界摩擦维持能力最强, 高于疏水六棱柱表面4倍, 远高于光滑表面. 对树蛙而言, 分泌黏液需要消耗能量, 这种特别的密排棱柱结构能够有效地保存黏液, 并产生稳定的边界摩擦.

为了研究边界摩擦与法向力之间的关系, 在PDMS块上施加了5~1000 mN的负载. 测试前, 界面间加入了1.4 μL 液体, 选取在每个表面的摩擦力测量过程中最大摩擦系数作比较. 如图10所示, 除了疏水六棱柱表面, 其余表面边界摩擦系数随法向力增大而减小, 而干摩擦几乎不随负载变化, 这与人手指摩擦系数表现相同^[16]. 由于液体所产生的表面张力是

图 9 4 种表面在不同法向力下的边界摩擦维持距离, 滑动中液量逐渐减少, 初始液量为 1.4 μL

Figure 9 The maintaining distance of boundary friction in four types of surfaces under different weight of load. During sliding, liquid amount kept decreasing. Starting volume amount was 1.4 μL

有限的, 不会随着法向力的增大而增大, 因此当法向力增大后, 其对摩擦力所产生的影响会被削弱.

之前的研究表明, 摩擦力会受液体在沟槽中的流动情况影响^[19]. 在角方向滑动中, 沟槽位于平行或者倾斜于滑动方向, 液体能够在其中自由流动. 在边方向滑动中, 液体会聚集在垂直于滑动方向的沟槽中, 被挤出沟槽的液体滑过棱柱表面, 导致摩擦力减小. 在边界摩擦状态下, 观察到了同样的方向性摩擦力, 其角方向摩擦力高于边方向摩擦力30%(图11). 由于树蛙脚掌工作在边界摩擦状态下, 这个结果可以更进一步地解释其沟槽分布存在方向性的原因.

图 10 4种表面的边界摩擦系数和干摩擦系数在不同法向力下的比较. (a) 法向力由 5 mN 增至 1000 mN, 液量从 1.4 μL 减至 0 μL 过程中, 4 种表面的最大边界摩擦系数比较; (b) 4 种表面在不同法向力下的干摩擦系数

Figure 10 The boundary friction coefficient and dry friction coefficient of four different types of surfaces with different weight of load. (a) The highest boundary friction coefficient of four surfaces with load increasing from 5 to 1000 mN, and liquid volume decreasing from 1.4 to 0 μL ; (b) the dry friction coefficient of four surface with different load

图 11 密排六棱柱表面边界摩擦的方向性. (a) 亲水密排六棱柱表面在角方向和边方向滑动的边界摩擦系数比较; (b), (c) 通过流体仿真, 分析在角方向和边方向的滑动中, 液体在六边形沟槽中的速度分布状态

Figure 11 The direction dependence of boundary friction on bio-inspired hexagon pillar surface. (a) The boundary friction of bio-inspired hexagon pillar surface in different sliding states; (b), (c) the fluid simulation of liquid flowing in different oriented hexagonal channels

3 结论

为了研究软材料在湿环境下的摩擦特性, 我们进一步表征了树蛙脚掌结构和摩擦力, 其脚掌为密排六棱柱结构, 摩擦力随着黏液的减少而增加, 从而形成边界摩擦. 在树蛙脚掌摩擦状态的启发下, 我们设计制造出了一种仿生六棱柱表面, 该表面表现出了远高于干摩擦的边界摩擦力. 进一步表征发现表

面的浸润性对边界摩擦也有很大的影响, 只有亲水表面才能达到边界摩擦. 与光滑表面相比, 亲水六棱柱表面能够产生更加稳定而持续的边界摩擦, 且边界摩擦系数会随着法向力的增加而减小. 此外, 仿生六棱柱表面在边界摩擦状态下也表现出了方向性. 这些研究结论有助于人们进一步认识软材料摩擦机理, 可以进一步帮助设计制造更强的湿吸附仿生表面.

参考文献

- McFarlane J, Tabor D. Adhesion of solids and the effect of surface films. *Proc R Soc London Ser A*, 1950, 202: 224–243
- Deleau F, Mazuyer D, Koenen A. Sliding friction at elastomer/glass contact: Influence of the wetting conditions and instability analysis. *Tribol Int*, 2009, 42: 149–159
- Koenen A, Sanon A. Tribological and vibroacoustic behavior of a contact between rubber and glass (application to wiper blade). *Tribol Int*, 2007, 40: 1484–1491
- Wolfram L J. Friction of skin. *J Soc Cosmet Chem*, 1983, 34: 465–476
- Persson B N J, Kovalev A, Gorb S N. Contact mechanics and friction on dry and wet human skin. *Tribol Lett*, 2013, 50: 17–30

- 6 Barnes W J, Baum M, Peisker H, et al. Comparative Cryo-SEM and AFM studies of hylid and rhacophorid tree frog toe pads. *J Morphol*, 2013, 274: 1384–1396
- 7 Hanna G, Jon W, Barnes W J. Adhesion and detachment of the toe pads of tree frogs. *J Exp Biol*, 1991, 155: 103–125
- 8 Barnes J, Smith J, Oines C, et al. Bionics and wet grip. *Tire Technol Int*, 2002, 2002: 56–60
- 9 Federle W, Barnes W, Baumgartner W, et al. Wet but not slippery: Boundary friction in tree frog adhesive toe pads. *J R Soc Interface*, 2006, 3: 689–697
- 10 Vogel M J, Steen P H. Capillarity-based switchable adhesion. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 3377–3381
- 11 Murarash B, Itoich Y, Varenberg M. Tuning elastomer friction by hexagonal surface patterning. *Soft Matter*, 2011, 7: 5553–5557
- 12 Varenberg M, Gorb S N. Hexagonal surface micropattern for dry and wet friction. *Adv Mater*, 2009, 21: 483–486
- 13 He B, Wang Z P, Li M H, et al. Wet adhesion inspired bionic climbing robot. *IEEE-Asme T Mech*, 2014, 19: 312–320
- 14 Tsipenyuk A, Varenberg M. Use of biomimetic hexagonal surface texture in friction against lubricated skin. *J R Soc Interface*, 2014, 11: 3073–3077
- 15 Drechsler P, Federle W. Biomechanics of smooth adhesive pads in insects: Influence of tarsal secretion on attachment performance. *J Comp Physiol A*, 2006, 192: 1213–1222
- 16 Derler S, Rossi R M, Rotaru G M. Understanding the variation of friction coefficients of human skin as a function of skin hydration and interfacial water films. *P I Mech Eng J-J Eng*, 2015, 229: 285–293
- 17 Adams M J, Briscoe B J, Johnson S A. Friction and lubrication of human skin. *Tribol Lett*, 2007, 26: 239–253
- 18 Pasumarty S M, Johnson S A, Watson S A, et al. Friction of the human finger pad: Influence of moisture, occlusion and velocity. *Tribol Lett*, 2011, 44: 117–137
- 19 Chen H, Zhang L, Zhang D, et al. Bioinspired surface for surgical graspers based on the strong wet friction of tree frog toe pads. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7: 13987–13995

Boundary friction force of tree frog's toe pads and bio-inspired hexagon pillar surface

ZHANG LiWen, CHEN HuaWei, ZHANG PengFei & ZHANG DeYuan

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

In our daily life, there is growing use of polymer soft materials, such as rubber and silica gel. In some circumstances, their wet anti-skidding property plays an important role, e.g., rubber tires on car, windscreen wiper and rubber gloves. Its friction under the wet environment is difficult to study since the interaction effect of fluid, capillary effect and soft solid coupling together. As millions years of evolution, creatures have evolved some special soft skins to attach to all kinds of surfaces. Inspired from mother nature, as the toe pad of the tree frog can greatly attach to wet surface, it was used to study the wet friction theory of soft materials. The structure of its toe pad has been characterized by SEM images. The toe surface was constructed by arrayed pillars with a height of 5 μm , circumscribed diameter of 10 μm and gap of 1 μm . About half of these pillars was hexagon, and the rest was pentagon, heptagon, and quadrangle. The friction of toe pads has been tested with consecutive sliding steps on dry substrates. Its friction increases with secretion decreasing and boundary friction formed just like the friction tests on human skin. Under the inspiration of tree frog's toe pads, we designed and fabricated a bio-inspired soft surface (PDMS) with hexagon pillar array. With liquid between contact area decreasing from wet to dry condition, its friction shows a peak value, which is similar to the friction of tree frog's toe pads. During boundary friction condition, the value can be 50 times higher than dry friction. The liquid between contact interface forms strong capillary force to rise friction as it can be regarded as extra normal force. Comparing to smooth surface, bio-inspired surface can maintain stable and long term boundary friction since the micro-pillars can separately deform to steady friction and the channels can hold more liquid than smooth surface. As hydrophilic hexagon pillar surface can quickly spread liquid through channels to create uniform thin liquid films between contact interfaces, it exhibits much better boundary friction property than hydrophobic one, whose boundary friction is almost 0 mN. By comparing the boundary and dry friction of four type of surfaces under different weight, the four dry friction coefficients display no change as common materials. However, the hydrophilic surface demonstrated the high boundary friction coefficient with little weight. This results from that capillary force between contact interfaces almost stays the same and only plays a great role when the external pressure between interfaces was small. With external normal force increasing, the affection of normal pressure induced by liquid capillary force will be weakened. The boundary of hexagon pillar surface is also different when sliding in the hexagon angle direction and side direction. This was in consistent with the distribution of tree frog's toe pad channels. This study explains the mechanism of tree frog's wet attachment ability. It also further expands the understanding of wet friction mechanism in soft materials. It will be useful for the designing of stronger wet attachable surface or preventing the stick-slide effect on linear guide way.

tree frog, mucus, boundary friction, bio-inspired surface, wet friction

doi: 10.1360/N972015-01166