

仿生取向结构表界面及其摩擦各向异性研究进展

姬忠莹^{1,2}, 闫昌友^{1,2}, 张晓琴¹, 刘志鲁¹, 王晓龙¹

(1.中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在长期的进化和生存竞争中, 自然界生物表界面形成了优异的取向结构来执行传播、攀爬、移动与粘附等诸多行为, 而基于形态结构的摩擦各向异性在其中扮演了重要角色。研究自然界取向结构表界面, 从而揭示其摩擦各向异性行为和规律, 并从中获得灵感, 采用物理、化学手段进行仿生构筑和研究, 对现代许多科技领域发展新型仿生功能性表界面材料具有重要意义。以露珠草和猪殃殃的倒刺结构、蛇腹部鳞片微结构、壁虎脚掌刚毛微结构为例, 详细阐述了具有代表性的自然生物表界面的取向微结构形态及其功能, 并对生物表界面产生摩擦各向异性行为的两种机理做了解释。在此基础上, 简介了模板法、增材制造等几种仿生取向结构的制备方法, 以及基于仿生取向结构的表界面摩擦各向异性研究成果。最后, 列举了以蛇的蠕动行进、壁虎的高粘附为仿生对象, 构筑具有摩擦各向异性的取向结构表界面, 及其在仿生驱动、攀爬和定向输运等方面的应用实例, 并展望了仿生摩擦各向异性领域未来的研究重点和发展方向。

关键词: 仿生表界面; 取向结构; 摩擦各向异性; 仿生运动

中图分类号: TB383; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0112-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.017

Research Advances in Biomimetic Surfaces with Oriented Structures and Its Frictional Anisotropy

Ji Zhong-ying^{1,2}, Yan Chang-you^{1,2}, Zhang Xiao-qin¹, Liu Zhi-lu¹, Wang Xiao-long¹

(1.Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: In the long-term evolution and survival of the fittest, the biological surfaces/interfaces in nature which are covered with micro- and nanostructures oriented to the supporting layer play crucial roles in the process of spreading, climbing, locomotion, and adhesion due to the resultant frictional anisotropy. Studying the interfaces of natural orientation structure, revealing the anisotropy behavior and laws of friction, and getting inspirations to conduct construction with physical and chemical means and bionic research, are of great significance for the development of new biomimetic functional materials in many fields of modern science and technology. In this review, taking the hook-like spines of the *C. Lutetiana* and *Galium aparine*, ventral scales in the snake, and numerous keratinous setae in the gecko feet as examples, the morphology and functions of these natural

收稿日期: 2018-03-14; 修订日期: 2018-05-04

Received: 2018-03-14; Revised: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51775538); 甘肃省自然科学基金 (1606RJZA051, 17JR5RA318, 17YF1FA139); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775538), the Natural Science Foundation of Gansu Province (1606RJZA051, 17JR5RA318, 17YF1FA139), and the Western Light Project of CAS

作者简介: 姬忠莹 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为仿生摩擦。

Biography: Ji Zhong-ying (1990—), Male, Doctoral candidate, Research focus: bionic tribology.

通讯作者: 王晓龙 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为仿生材料及表界面。

Corresponding author: WANG Xiao-long (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: biomimetic materials and surfaces/interfaces.

biological surface/interfaces are introduced detailly, and the two mechanisms of frictional anisotropy based on the oriented structures are explained. On this foundation, the preparation methods including template and additive manufacturing and frictional performance of biomimetic surface/interface with anisotropic structures are discussed respectively. Finally, the applications of the frictional anisotropy surfaces mimicking the fast locomotion of snake and the high adhesion of gecko feet on the biomimetic driving, climbing and directional transportation are exhibited. Accordingly, the perspectives about the research emphasis and the development in the bionic frictional anisotropy field are provided.

KEY WORDS: biomimetic surface/interface; structure with orientation; frictional anisotropy; biomimetic motion

从微观尺度的晶面^[1-3]、分子层^[4-6]，到宏观尺度生物体的表界面结构^[7-8]，自然界中处处存在各向异性摩擦。其中，生物表界面形成的取向结构以摩擦各向异性为媒介，对生物自身的捕食、移动、行走与传播等诸多行为有着重要的影响，因此引起了研究人员的广泛关注^[9-16]。近年来，通过探索认识自然界特殊功能的表界面微结构并从中获得灵感，采用物理、化学手段进行仿生构筑，进而研究摩擦各向异性在其中的作用，拓展摩擦各向异性在材料科学与机械工程等领域的应用，已经成为仿生摩擦学新的研究热点^[17-18]。因此，本文基于仿生取向结构的摩擦各向异性，对生物表界面微结构及其功能、摩擦各向异性机理进行了详细的阐述，并对仿生取向结构的构筑方法以及所显示出来的摩擦各向异性做了一定的总结。最后，列举了三种基于仿生摩擦各向异性的应用实例，并提出未来的研究要结合仿生结构、功能性材料与 3D 打印新技术等，通过多学科交叉共同发展，进一步拓宽摩擦各向异性的应用领域。

1 生物表界面微结构及摩擦各向异性

1.1 生物表界面微结构

在长期的进化和生存竞争中，很多生物的表界面都形成了优异的微纳结构以及巧妙的材料拓扑，从而来适应复杂苛刻的生存环境。因此，在探索仿生摩擦学的研究过程中，首先要了解生物表界面的微结构，在此基础上研究其化学组成、生物功能，进而人工制备相应的表界面。本文以微结构所执行的功能为切入点，总结了几种典型的具有摩擦各向异性的生物表界面，对其表界面微结构的形态以及所执行的功能进行了详细的阐述。

1.1.1 传播功能

自然界中，动物因其能动性而被当作植物果实或种子的传播媒介。相应地，一些植物果实或种子的独特结构对这种传播途径提供了有力保障，如露珠草、苍耳子等植物果实所具有的钩状结构^[19-23]。如图 1a 所示，以露珠草为代表，其果实整体被成排排列的钩

状毛刺包裹，并且毛刺表面相对较光滑，具有相似的长度，垂直于果实表面。重要的是，所有毛刺的尖端排列具有一定的取向性，即钩状尖端朝向果实底部。正是由于这种钩状毛刺的存在以及取向性排列，露珠草果实接触动物皮毛时，通过相互之间的机械嵌合以及取向接触分离力（摩擦各向异性），使露珠草果实能顺利嵌合在动物身上，从而完成传播行为。

1.1.2 攀爬功能

与露珠草类似，猪殃殃的叶子与茎部也存在相类似的钩状微结构^[20,24-25]，如图 1b 所示。猪殃殃作为典型的拉拉藤属攀爬植物，其叶子表面的钩状微结构虽然在叶面分布与整体形态上具有一定的差异性，但叶面（正面和背面）的微结构都具有优异的取向性，即叶子背面的微结构弯曲朝向叶基，而叶子正面的微结构朝向叶尖。正是由于这种取向性结构所导致的“棘轮机理”（ratchet mechanism）以及叶面的摩擦各向异性，使其作为依附于寄主植物的存在，能够顺利完成攀爬行为。此外，像马面鱼鱼皮以及豆叶表面等，都存在弯刺（钩）状的取向结构，它们分别在各向异性的润湿以及昆虫捕获等方面有着重要的作用^[23,26-27]。

1.1.3 移动功能

与植物传播、攀爬功能不同的是，动物的表界面取向结构更多地服务于其在各种环境中的运动行为^[28-29]，较典型的是蛇类在陆地环境中的蠕动行进^[30-33]。如图 1c 中的 SEM 图所示，蛇腹部具有小齿状突起的鳞片微结构，其长约为 $(2.46 \pm 0.45) \mu\text{m}$ ，宽约为 $(0.60 \pm 0.11) \mu\text{m}$ ，鳞片间距约为 $(3.87 \pm 0.39) \mu\text{m}$ 。这种微结构成排排列，并且具有从头到尾的取向性。在蠕动的过程中，由于腹部鳞片取向微结构的存在，其与接触面产生的摩擦力在不同方向上（向前与向后）具有明显的差异性，即摩擦各向异性，进而利用这种各向异性产生一种前行的推进力。当然，蛇腹部的蠕动行为与其腹部表皮材料的组成也有很大关系，坚硬、不可弯曲的外层与柔软、韧性较好的内层组合，能够将摩擦各向异性最大化^[34]。因此，基于软-硬材料组合的表界面也是以后研究的另一个热点方向。

1.1.4 粘附功能

除了在运动中产生驱动力,生物脚掌与固体表面之间的摩擦粘附也是研究的一大热点^[35-38]。从质量较轻的甲虫、苍蝇、蜘蛛,到质量较大的壁虎,这些生物在各种表面上都具有杰出的运动能力,尤其是壁虎在光滑垂直的墙壁以及吊顶的天花板上自由迅速爬行的行为,在很早以前就引起了强烈的关注。研究表明,其核心就是脚掌的微结构提供了良好的摩擦粘附机制。如图1d所示,这些脚掌的附着器官一般都覆盖有细长、可变性的刚毛^[39],而这些刚毛具有很好的变形能力,使得每个刚毛能够与表面形成众多的微接

触区。田煜等^[40-41]对壁虎刚毛束的摩擦各向异性与粘附性质进行了系统的研究与调控,发现在相同环境条件、相同初始载荷与拖动速度的条件下,在逆、顺刚毛方向上有着最大和最小的摩擦系数,并提出了基于顺、逆刚毛弯曲方向的摩擦各向异性参数(A_f , friction anisotropy)以及摩擦各向异性特征参数(A_{cf} , characteristic value of friction anisotropy)的概念,这对壁虎刚毛仿生设计及摩擦特性的表征提供了定量参考。通过研究苍蝇、蜘蛛等脚掌的刚毛微结构,可以对各种车辆等的驱动效率与附着行为提供重要的参考价值^[41]。

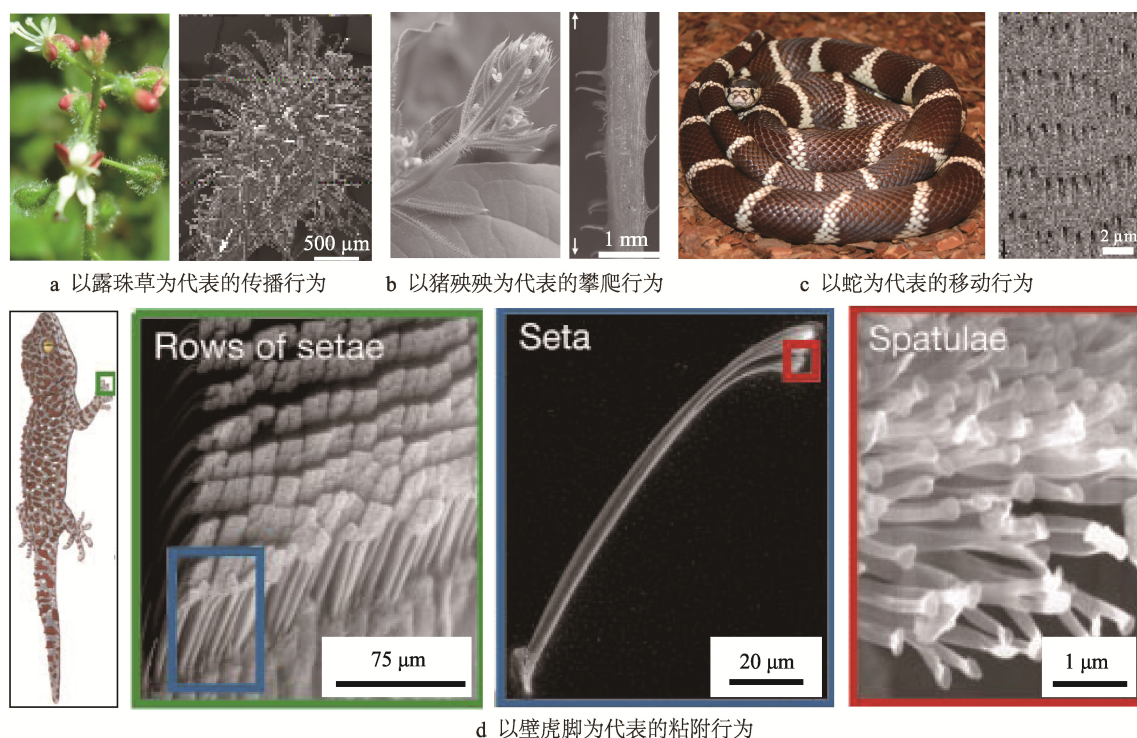


图1 自然界中的生物表界面微结构

Fig.1 The microstructures in the biology surfaces/interfaces. The selected topics mainly include the functional behaviors of dispersal of the *C. Lutetiana* (a); climbing of the *Galium aparine* (b); locomotion of the snake (c); and adhesion of the gecko foot (d)

1.2 生物表界面摩擦各向异性

与传统摩擦学光滑表面不同,生物表界面的摩擦各向异性由其独特的形态结构特征所致。生物表界面是个非常复杂的系统,它的微细结构尺寸和形状多种多样,有尖刺、刚毛、钩子等,并且与基底材料成一定的角度取向。研究表明,在生物进化过程中,形成了两种典型的方式用于移动过程中适应外部环境。对于摩擦学,这两种方式就是在产生摩擦力时,其表界面取向结构的变化形式不同。

一种是刚毛/毛发型,像苍蝇的爪垫、蛇腹部的鳞片等。它由大量柔软的毛发/刚毛通过弯曲变形来接触粗糙环境,进而产生摩擦力。这种通过结构直接变形引起的适应性也是自然界比较普遍的一种方式。

图2a为蛇腹部鳞片结构的摩擦学测试,在忽略对偶横向滑移的情况下,在特定测试条件下(光滑玻璃球作为对偶,蛇蜕下不加柔性衬垫),对偶向头部滑动和向尾部滑动的摩擦系数数值具有明显的差异性,尾部滑动方向约为0.16,而头部滑动方向约为0.13。当在蛇蜕下存在柔性的衬垫时,这种摩擦各向异性更加明显,头部滑动方向的摩擦系数为0.08,而向尾部取向时几乎为头部方向的两倍(0.16)^[33]。这也间接证明了软硬复合材料对摩擦各向异性的影响。

另一种为表面光滑型,像蚱蜢的爪垫和跗垫等^[43]。虽然其表面相对较光滑,但这种光滑表面却含有高度可变形的基底来适应各种表面轮廓,通过基底轮廓的形变来产生取向摩擦力。图2b为蚱蜢第三节跗垫的

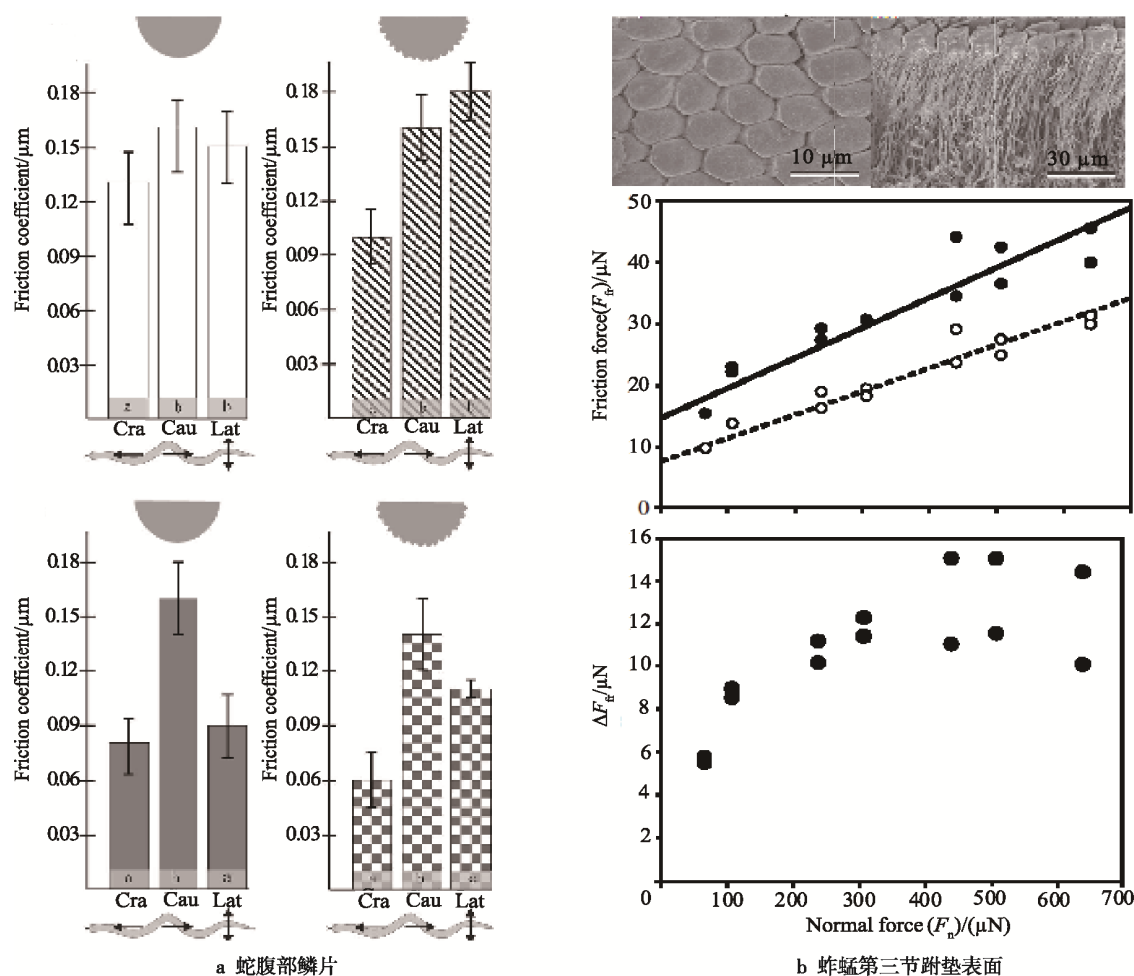


图 2 蛇腹部鳞片以及蜥蜴第三节跖垫表面的摩擦各向异性

Fig. 2 Frictional anisotropy of the Ventral scales of the snake (a) and the Tarsal structures of *A. diadematus* (b)

表面及其摩擦学性能,可以看出,由内外两层特殊结构组成,外层为单一的光滑六边形,直径约为 $6\ \mu\text{m}$,面积约为 $14.7\ \mu\text{m}^2$ 。而在相对光滑的六边形下,存在相互交联串通的长度约为 $15\sim 30\ \mu\text{m}$ 的细丝棒状微结构。这种内外结构组合能使光滑足垫在粗糙基底上通过基底形状的弯曲变化来快速适应接触面,使自身质量在不同的运动方向、不同的运动环境中得到平衡。在 $0.5\ \text{Hz}$ 的频率下,向远侧滑动的摩擦力始终大于向近侧滑动的摩擦力,并且随着载荷的增加,这种摩擦各向异性有一个轻微的增加,最终达到一个相对的稳定值。这些数据表明,生物表界面的取向结构通过产生各向异性的摩擦力,进而实现自身移动的功能。受此启发,仿生表界面结构化拓扑形貌的设计及相关研究受到了越来越多的关注^[44]。

2 人工制备的仿生微结构及其摩擦各向异性

2.1 人工制备的仿生微结构

随着微加工技术的发展,对于仿生的微纳米精细

结构的制备已经取得很大的突破^[45-48]。由于壁虎脚掌是由粗到细并在刚毛顶部存在分支的多级结构,尺度变化在毫米到微纳米之间,因此精确制备这种仿生微纳米结构存在一定的困难,但其卓越的粘附与摩擦性能又引起了广泛的关注。目前主要的制备方法有微纳米模板法^[49-50]、碳纳米管生长法^[51-52]、光刻法^[53]、纳米压印^[54] (nano-embossing) 以及拉丝法^[55]等。本文以模板法、碳纳米管生长法以及 3D 打印为例,对仿生微结构的制备做了简单介绍。

模板法是以含有微纳米尺度、高比率孔洞的主模板为制备刚毛微结构的阴模,并将阴模浇筑液体聚合物^[56],待液态聚合物完全固化后,将模板剥离或者刻蚀掉,从而形成特定形状的微纳米阵列^[49,57-58]。这种方法具有易操作、高精度以及低成本等优点,因此应用较广泛。以卡内基梅隆大学的 Sitti 教授课题组制备的二级微结构为例,通过将整齐排列的柱状微结构与液体聚合物轻微接触并迅速收回,使得柱状微结构的顶端残留一定的液体聚合物,然后将带有液体聚合物的一侧朝下悬空放置并室温固化 $24\ \text{h}$,就会得到顶端为球形的样品。若将带有液体聚合物的顶端正面朝

下放置并与光滑的低表面能基底接触,使液体有一定程度的平铺,待固化完成后样品与基底分离,则会得到顶端为抹刀型微结构的样品(图3)。通过 SEM 图可以看出,经过上述方法修饰的样品分别形成了均匀、表面较光滑的球形以及抹刀型的二级微结构(图4)。

除模板法外,碳纳米管(CNT)生长法由于其在

材料方面独特的优势(如高张力和挠曲强度、高弹性模量以及高长径比)而逐渐成为另一种非常有前景的方法^[51]。王中林课题组合成的高密度碳纳米管阵列,表现出了极强的高粘附能力(约为壁虎脚的10倍)以及受力的各向异性分布(切向粘附力远大于法向粘附力)。如图5所示,面积为4 mm×4 mm、具有高

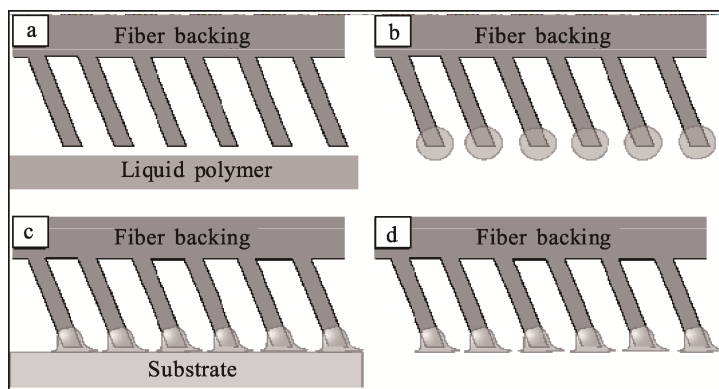


图3 仿生壁虎脚刚毛尖端微结构的制备流程图
Fig.3 Fabrication process of the biomimetic fiber tip

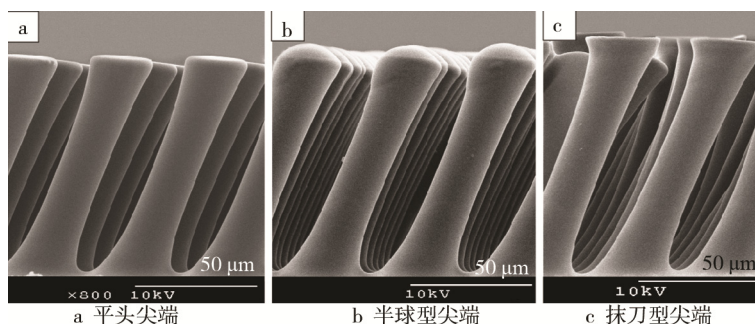


图4 仿生刚毛微结构的平头尖端、半球型尖端以及抹刀型尖端的 SEM 图

Fig.4 SEM images of biomimetic fibers with unmodified flat tips (a), spherical tips (b) and spatula tips (c)

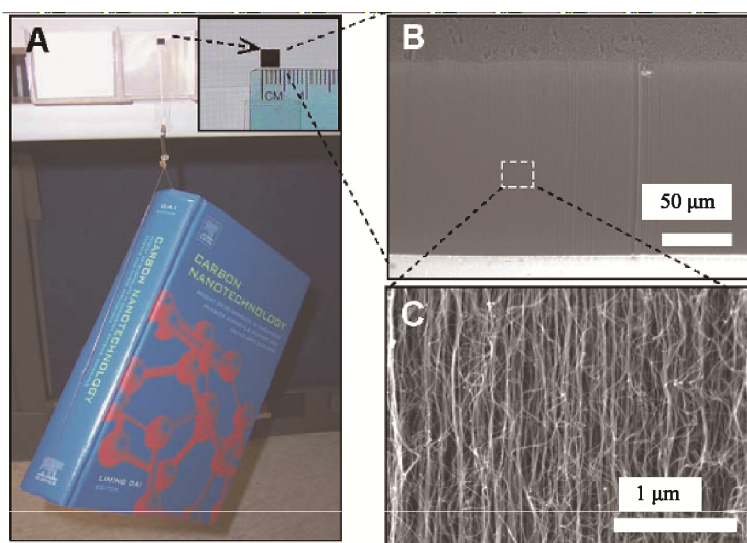


图5 1.48 kg 的书籍通过 4 mm×4 mm 垂直排列的多壁碳纳米管(VA-MWNT)阵列薄膜悬挂在玻璃表面上的演示及不同放大倍数的 VA-MWNT 薄膜的 SEM 图

Fig.5 A book of 1480 g in weight suspended from a glass surface with use of vertically aligned multiwalled carbon nanotubes (VA-MWNTs) supported on a silicon wafer. The top right squared area shows the VA-MWNT array film, 4 mm by 4 mm (A); SEM images of the VA-MWNT film under different magnifications (B and C)

粘附的 CNT 薄膜可以承受 1.48 kg 的质量,并将该质量的书籍悬挂在玻璃表面上。通过 SEM 观察该薄膜可以发现,该薄膜由直径为 10~15 nm、长度约为 150 μm 的致密多壁碳纳米管垂直排列。理论计算可以得出,在干粘附的状态下,该薄膜的整体粘附力可以达到 90.7 N/cm²,表现出了很高的粘附性。但是这种方法也有不易控制、精度相对较低的缺点。

近年来,3D 打印以其设计的灵活性、较强的可控性、材料节约性等优点,在仿生微结构制造方面表现出了强大的优势^[59]。3D 打印是借助计算机设计,通过三维建模构造数字模型,再对数字模型进行空间分割,最后以逐层“打印”、层层堆积的形式实现整体造型。其技术特点使得研究人员可以采用 3D 打印,通过程序设计与自然界高度相似的微结构,然后选择合适的材料,直接实现复杂的三维微结构制备。图 6 是蜂巢槐叶萍表面类似于打蛋器的微结构,该结构能使表面具有超疏水性^[60]。受此启发,研究人员设计与该结构尺寸、形态高度类似的模型,并借助于 3D 打印技术一次成形。通过 SEM 图可以看出(图 7),

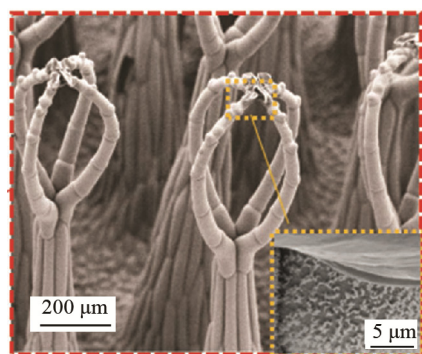


图 6 蜂巢槐叶萍表面微结构的 SEM 图

Fig.6 SEM images of the eggbeater hair structure on the *Salvinia molesta* surface

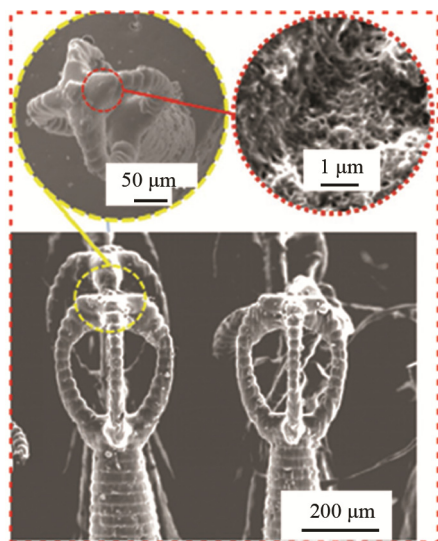


图 7 3D 打印的仿生打蛋器微结构阵列的 SEM 图

Fig.7 SEM images of 3D printed eggbeater arrays

打印的表面微结构排列整齐,重复性较好,具有较高的精度,并且可以大面积批量制备。通过加入 CNT,其二级结构也具有一定的相似性。基于此,3D 打印在仿生微结构设计与制备方面将会发挥越来越重要的作用。

2.2 仿生取向结构表界面的摩擦各向异性行为

Sitti 等通过仿生壁虎脚制备了具有高度取向的刚毛结构^[61],并进行了尖端二级结构的修饰,如图 8 所示。通过摩擦学的测试发现,倾斜柱状在正向(with)和反向(against)的摩擦力具有明显的差异性。在正向上,尖端无论是否修饰微结构,当横向移动开始时,由于柱状物的延展性,摩擦力会立即增加。而在反向上,由于柱状物被压缩,摩擦力在最终下降前也会有一个瞬时的增加。另外,相对于无修饰的柱状物,通过在柱状物尖端修饰抹刀型微结构,由于这种微结构的粘附性能较好,在滑动过程中对摩擦力有很大的影响,使得摩擦力提高很多,尤其是在正向上。相对于真实的壁虎脚表界面微结构,虽然制备的仿壁虎脚表界面微结构更加规则,设计更方便,以及能够大面积制备,但是相对于生物表界面,这种多级结构显得略为简单,并且相对于生物表界面多种、梯度的材料组成,仿生表界面在材料组成方面显得更加单一。因此,如何将多材料以及具有梯度功能的材料与仿生取向结构结合起来,对于构筑仿生表界面具有重要的指导意义。

3 基于仿生的摩擦各向异性的应用实例

近年来,人们逐渐认识到生物界在适者生存的环境下所进化匹配的独特结构与材料组合,进而把生物界的研究作为各种技术思想、设计原理以及创造发明的源泉。基于此,将生物学和工程技术结合在一起,利用仿生表界面微结构的摩擦各向异性,进行定向驱动、攀爬等仿生摩擦学方面的研究引起了很大的关注^[7,17,62-63]。本文以蛇的蠕动行进、壁虎的高粘附以及具有取向结构的植物(狗尾草)为例,简单介绍了具有摩擦各向异性的表界面在工程技术中的应用。

蛇在波浪式移动过程中,其腹部微结构使其在前后方向同时具有低摩擦和高摩擦,前者使其能够轻松滑过表面,后者为其提供驱动力。研究也证实了蛇腹部鳞片微结构的完美取向排列是蛇皮具有摩擦各向异性的关键因素^[42]。基于此,研究人员将具有取向结构的鳞片引入到蛇形机器人的每一个模块中,进而探索鳞片对蛇形机器人运动的影响(图 9a,其中 I 仿生对象 II 为生物表界面结构 III 为仿生制备的表界

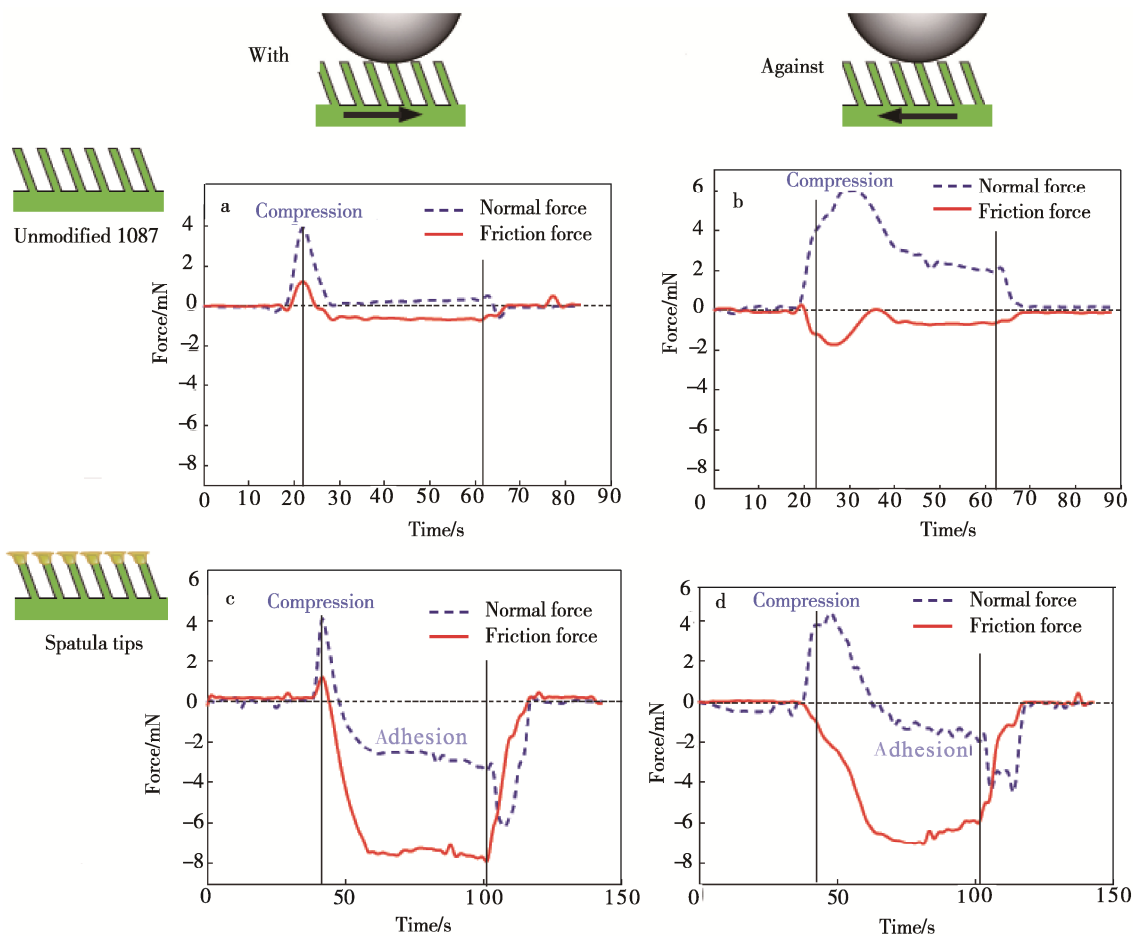


图8 仿生壁虎脚表界面的摩擦学性能

Fig.8 The friction performance of the biomimetic surface which is inspired by the gecko feet

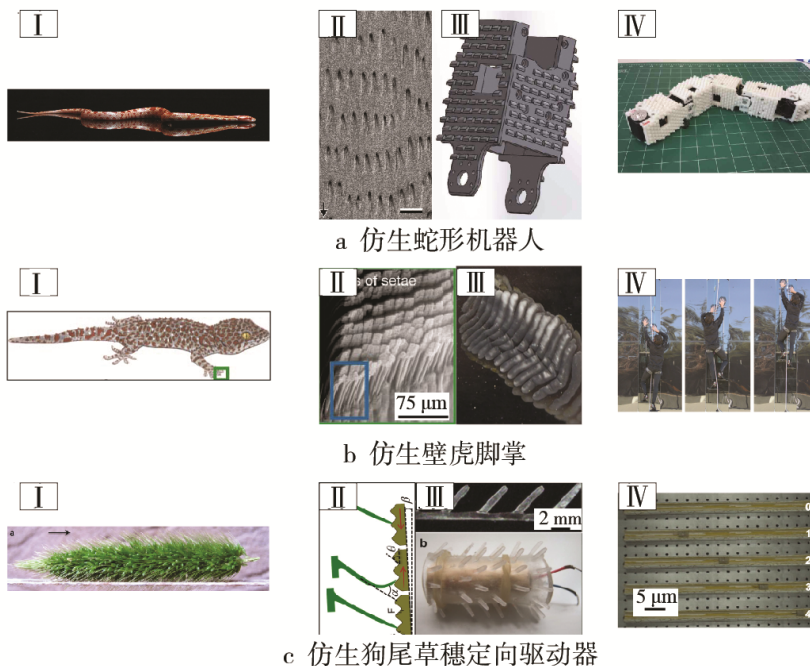


图9 仿生摩擦各向异性的应用实例

Fig.9 Applications of bio-inspired from nature based on frictional anisotropy: (a) snake-like robot; (b) bionic gecko feet; (c) direction actuator mimicking grass spike. *i*, the samples of bio-inspired; *ii*, the structures of biological surface; *iii*, the fabricated structures of bio-inspired from nature; *iv*, the applications in practical life

面结构, IV 为实际应用)^[64]。研究发现, 带有该取向结构鳞片的蛇形机器人, 蠕动位移增加了 3 倍, 也就是经过一个循环, 存在取向鳞片的蛇形机器人的蠕动位移从~0.06 cm 增加到了~2.10 cm, 而在横向起伏方面也从 0.07 cm 增加到了 0.15 cm。这表明, 具有取向结构的鳞片能够提供各向异性摩擦力, 进而对蛇形机器人的运动提供驱动力。

壁虎脚由于存在多级刚毛微结构, 其与接触面之间由于范德华力产生了强大的粘附性能, 使壁虎能够在墙壁或天花板上自由行走。通过对壁虎脚掌刚毛微结构的结构和材料设计, 研究人员合成了一种可控干粘附的仿壁虎脚掌表面, 能够在垂直、光滑的玻璃表面支撑人体重量并进行攀爬, 进而躲避火灾等。如图 9b 所示, 通过调控手掌大小的仿壁虎脚掌表面自主吸附与脱附, 能使体重为 70 kg 的成人在垂直光滑的玻璃上迅速攀爬上升, 约 90 s 可攀爬 3.7 m。

通过施加外力的方式, 加上取向结构造成的摩擦各向异性, 能使仿生表界面按照设定的路径进行定向驱动^[65]。如图 9c 所示, 狗尾草穗周身布满了直径约 60~110 μm 、长约 6~10 mm、与穗本身成 40°~60°取向的倾斜芒状物。通过敲击震动的方式, 在机械嵌合及各向异性摩擦力的帮助下, 狗尾草穗会沿着穗芒取向的反方向平行移动, 甚至在负载情况下爬坡前进。受此启发, 研究人员使用柔性聚二甲基硅氧烷制备了具有类似结构的表面, 并固定在震动马达上, 在一定的震动频率下, 该仿生结构会迅速定向移动, 4 s 内爬行约 36 cm。这种简易设备的研究, 对药物的靶向输送、微电动机系统等领域有很好的理论指导意义。

基于摩擦各向异性的应用主要集中在仿生机器人与定向驱动等领域中, 但随着学科的交叉发展, 其应用逐渐拓展到摩擦电^[66]、液压密封^[67]等领域, 表现出了广阔的应用前景。

4 结语

表界面取向结构作为生物在长期进化过程中适应外部复杂环境的结果, 对其自身的移动、攀爬、捕食、繁衍等具有重要影响。以生物表界面取向结构为基础的关于摩擦各向异性的研究已经取得了很大进展, 并在仿生机器人、定向输送等领域得到了广泛应用。但对所制备的仿生表界面取向结构的研究仍然不够深入、系统, 如仿生表界面结构与基底的组合对摩擦各向异性的影响, 如何充分发挥 3D 打印在制备复杂结构方面的优越性等。今后应该将仿生取向结构、功能性材料与 3D 打印新技术等结合在一起, 进一步拓宽摩擦各向异性在各学科的应用。

参考文献:

- [1] ENOMOTO Y, TABOR D. The Frictional Anisotropy of Diamond[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1981, 373: 405-417.
- [2] BOWDEN F P, BROOKES C A, HANWELL A E. Anisotropy of Friction in Crystals[J]. *Nature*, 1964, 203: 27-30.
- [3] PARK J Y, OGLETREE D F, SALMERON M, et al. High Frictional Anisotropy of Periodic and Aperiodic Directions on a Quasicrystal Surface[J]. *Science*, 2005, 309: 1354-1356.
- [4] LILEY M, GOURDON D, DUSCHL C, et al. Friction Anisotropy and Asymmetry of a Compliant Monolayer Induced by a Small Molecular Tilt [J]. *Science*, 1998, 280: 273-275.
- [5] CHOI J S, KIM J S, SALMERON M, et al. Friction Anisotropy-driven Domain Imaging on Exfoliated Monolayer Graphene[J]. *Science*, 2011, 333: 607-610.
- [6] CARPICK R W, SASAKI D Y, BURNS A R. Large Friction Anisotropy of a Polydiacetylene Monolayer[J]. *Tribology Letters*, 1999, 7: 79-85.
- [7] MANOONPONG P, PETERSEN D, KOVALEV A, et al. Enhanced Locomotion Efficiency of a Bio-inspired Walking Robot Using Contact Surfaces with Frictional Anisotropy[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39455.
- [8] 戴振东, 于敏, 吉爱红, 等. 动物驱动足摩擦学特性研究及仿生设计[J]. *中国机械工程*, 2005, 16: 1454-1457.
DAI Zhen-dong, YU Min, JI Ai-hong, et al. Study on Tribological Characteristics of Animals' Driving Pads and Their Bionic Design [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16: 1454-1457.
- [9] BOHN H F, FEDERLE W. Insect Aquaplaning: Nepenthes Pitcher Plants Capture Prey with the Peristome, a Fully Wettable Water-lubricated Anisotropic Surface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101: 14138-14143.
- [10] KOCH K, BHUSHAN B, BARTHOLOTT W. Multifunctional Plant Surfaces and Smart Materials[M]. Heidelberg: Springer Handbook of Nanotechnology, 2010: 1399-1436.
- [11] GORB E V, GORB S N. The Effect of Surface Anisotropy in the Slippery Zone of Nepenthes Alata Pitchers on Beetle Attachment[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, 2: 302-310.
- [12] LAKHTAKIA A, BENZ M J, GORB S N, et al. Anisotropic Frictional Properties in Snakes[J]. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering*, 2012, 8339: 83390X-6.
- [13] HU D L, NIRODY J, SCOTT T, et al. The Mechanics of Slithering Locomotion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 10081-10085.
- [14] ELBAUM R, ZALTZMAN L, BURGERT I, et al. The Role of Wheat Awns in the Seed Dispersal Unit[J].

- Science, 2007, 316: 884-886.
- [15] ELGAR M A, LIDDLE M J. Multiple Pathways in Diaspore Dispersal, Exemplified by Studies of Noogoora Burr (*Xanthium Occidentale* Bertol, Cotnpositae)[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 1984, 88: 303-315.
- [16] PEISKER H, MICHELS J, GORB S N. Evidence for a Material Gradient in the Adhesive Tarsal Setae of the Ladybird Beetle *Coccinella Septempunctata*[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1661.
- [17] SEQUEIRA A A, USMAN A, ALI M Z, et al. Biologically Inspired Robots into a New Dimension—A Review[J]. International Journal of Automation, Mechatronics & Robotics, 2016, 3: 108-116.
- [18] 任露泉, 戴振东, 佟金. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科学通报, 2006, 51: 2353-2359.
- REN Lu-quan, DAI Zhen-dong, TONG Jin. Research and Development of Bionic Tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 2353-2359.
- [19] 李儒海, 强胜. 杂草种子传播研究进展[J]. 生态学报. 2007, 27: 5361-5370.
- LI Ru-hai, QAING Sheng. Process and Prospects in Research of Weed Seed Dispersal[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27: 5361-5370.
- [20] GORB E, GORB S. Contact Separation Force of the Fruit Burrs in Four Plant Species Adapted to Dispersal by Mechanical Interlocking[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2002, 40: 373-381.
- [21] SMITH B T, WANG B C. Closing the Seed Dispersal Loop[J]. Trends in Ecology & Evolution 2002, 17: 379-385.
- [22] SABINE F F, POSCHLOD P, BEINLICH B. Experimental Studies on the Dispersal of Plants and Animals on Sheep in Calcareous Grasslands[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1206-1222.
- [23] 杜珍珠, 徐文斌, 阎平, 等. 新疆苍耳属 3 种外来入侵新植物[J]. 新疆农业科学, 2012, 49: 879-886.
- DU Zhen-zhu, XU Wen-bin, YAN Ping, et al. Three Newly Recorded Alien Invasive Plants of *Xanthium* in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49: 879-886.
- [24] GORB E V, POPOV V L, GORB S N. Natural Hook-and-loop Fasteners: Anatomy, Mechanical Properties, and Attachment Force of the Jointed Hooks of the Galium Aparine Fruit[J]. Design and Nature, 2002, 57: 151-160.
- [25] BAUER G, KLEIN M C, GORB S N, et al. Always on the Bright Side: the Climbing Mechanism of Galium Aparine[J]. Proceedings of the Royal Society B—Biological Sciences, 2011, 278: 2233-2239.
- [26] CAI Y, LIN L, JIANG L, et al. Filefish-inspired Surface Design for Anisotropic Underwater Oleophobicity[J]. Advanced Function Materials, 2014, 24: 809-816.
- [27] SZYNDLER M W, HAYNES K F, LOUDON C, et al. Entrapment of Bed Bugs by Leaf Trichomes Inspires Microfabrication of Biomimetic Surfaces[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2013, 10: 20130174.
- [28] ZHOU M, PESIKA N, ISRAELACHVILI J, et al. Recent Advances in Gecko Adhesion and Friction Mechanisms and Development of Gecko-inspired Dry Adhesive Surfaces[J]. Friction, 2013, 1: 114-129.
- [29] SCHEIBERT J, DYSTHE D K. Role of Friction-induced Torque in Stick-slip Motion[J]. A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics, 2010, 92: 54001.
- [30] 胡友耀, 丁建宁, 戴振东, 等. 蛇类表皮的生物摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2006(11): 56-59.
- HU You-yao, DING Jian-ning, DAI Zhen-dong, et al. Bio-friction Properites of Snake Epiderm is Scales[J]. Lubrication Engineering, 2006(11): 56-59.
- [31] SANTOS P S, HOGE A R. Submicroscopic Structure of "Stratum Corneum" of Snakes[J]. Science, 1953, 118: 410-411.
- [32] HAZEL J, STONE M, TSUKRUK V V, et al. Nanoscale Design of Snake Skin for Reptation Locomotions via Friction Anisotropy[J]. Journal of Biomechanics, 1999, 32: 477-484.
- [33] BAUM M J, KOVALEV A E, GORB S N, et al. Anisotropic Friction of the Ventral Scales in the Snake *Lampropeltis Getula Californiae*[J]. Tribology Letters, 2014, 54: 139-150.
- [34] KLEIN MC G, GORB S N. Epidermis Architecture and Material Properties of the Skin of Four Snake Species[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2012, 9: 3140-3155.
- [35] TAO D, GAO X, TIAN Y, et al. Controllable Anisotropic Dry Adhesion in Vacuum: Gecko Inspired Wedged Surface Fabricated with Ultraprecision Diamond Cutting[J]. Advanced Function Materials, 2017, 27: 1606576.
- [36] ARZT E, GORB S, SPOLENAK R. From Micro to Nano Contacts in Biological Attachment Devices[J]. Proceedings of the National Academy of Sceinces of the United States of Amierica, 2003, 100: 10603-10606.
- [37] CAMPO A, GREINER C, ARZT E, et al. Patterned Surfaces with Pillars with Controlled 3D Tip Geometry Mimicking Bioattachment Devices[J]. Advanced Materials, 2007, 19: 1973-1977.
- [38] ZENG H, PESIKA N, ISRAELACHVILI J N, et al. Frictional Adhesion of Patterned Surfaces and Implications for Gecko and Biomimetic Systems[J]. Langmuir, 2009, 25: 7486-7495.
- [39] AUTUMN K, LIANG Y A, FULL R J, et al. Adhesive Force of a Single Gecko Foot-hair[J]. Nature, 2000, 405: 681-685.
- [40] 万进, 田煜, 周铭, 等. 载荷对壁虎刚毛束的摩擦各向异性特性影响的实验研究[J]. 物理学报, 2011, 61(1): 016202.
- WAN Jin, TIAN Yu, ZHOU Ming, et al. Experimental Research of Load Effect on the Anisotropic Friction Behaviors of Gecko Seta Array[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 61(1): 016202.
- [41] TIAN Y, PESIKA N, ISRAELACHVILI J, et al. Adhe-

- sion and Friction in Gecko Toe Attachment and Detachment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103: 19320-19325.
- [42] 韩建保, 张鲁滨, 李邦国. 轮胎路面附着系数实时感应识别系统[J]. *车辆与动力技术*, 2005, 98: 62-64.
HAN Jian-bao, ZHANG Lu-bin, LI Bang-guo. Electronic Sensing System for Real Time Identification of the Tire-Road Adhesion[J]. *Vehicle & Power Technology*, 2005, 98: 62-64.
- [43] GROHMANN C, HENZE M J, GORB S N, et al. Two Functional Types of Attachment Pads on a Single Foot in the Namibia Bush Cricket *Acanthoproctus diadematus* (Orthoptera: Tettigoniidae)[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 282: 20142976.
- [44] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 结构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31: 622-631.
ZHAO Wen-jie, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Development and Research Process of Surface Texturing on Improving Tribological Performance of Surface[J]. *Tribology*, 2011, 31: 622-631.
- [45] BHUSHAN B. Biomimetics: Lessons from Nature—An Overview[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2009, 367: 1445-1486.
- [46] NOSONOVSKY M, BHUSHAN B. Multiscale Friction Mechanisms and Hierarchical Surfaces in Nano- and Bio-tribology[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, 58: 162-193.
- [47] MA S H, YE Q, ZHOU F, et al. Antifouling on Gecko's Feet Inspired Fibrillar Surfaces: Evolving from Land to Marine and from Liquid Repellency to Algae Resistance[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2015, 2: 1500257.
- [48] MARVI H, HAN Y, SITTI M. Actively Controlled Fibrillar Friction Surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 051602.
- [49] SITTI M. Synthetic Gecko Foot-hair Micro/Nano-structures as Dry Adhesives[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2003, 18: 1055-1074.
- [50] MURPHY M P, AKSAK B, SITTI M. Adhesion and Anisotropic Friction Enhancements of Angled Heterogeneous Micro-fiber Arrays with Spherical and Spatula Tips[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2007, 21: 1281-1296.
- [51] QU L, DAI L, WANG Z L, et al. Carbon Nanotube Arrays with Strong Shear Binding-on and Easy Normal Lifting-off[J]. *Science*, 2008, 322: 238-242.
- [52] DICKRELL P L, SINNOTT S B, SAWYER W G, et al. Frictional Anisotropy of Oriented Carbon Nanotube Surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2005, 18: 59-62.
- [53] GEIM A K, DUBONOS S V, SHAPOVAL S Y, et al. Microfabricated Adhesive Mimicking Gecko Foot-hair[J]. *Nature Materials*, 2003, 2: 461-463.
- [54] KIM D S, LEE H S, KWON T H, et al. Replication of High-aspect-ratio Nanopillar Array for Biomimetic Gecko Foot-hair Prototype by UV Nano Embossing with Anodic Aluminum Oxide Mold[J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 13: 601-606.
- [55] SPINA G L, STEFANINI C, DARIO P, et al. A Novel Technological Process for Fabricating Micro-tips for Biomimetic Adhesion[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15: 1576-1587.
- [56] SITTI M, FEARING R S. Synthetic Gecko Foot-hair Micro/Nano-structures for Future Wall-climbing Robots[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2003, 17(8): 1055-1073.
- [57] 刘彬, 张昊, 戴振东, 等. 倾斜仿生刚毛的设计、制备及黏附性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(5): 393-398.
LIU Bin, ZHANG Hao, DAI Zhen-dong, et al. Design, Fabrication and Adhesion Test of Lean Bio-inspired Seta[J]. *Tribology*, 2009, 29(5): 393-398.
- [58] 王辉静. 仿壁虎微米阵列的加工及其粘附作用分析[J]. *微纳电子技术*, 2008, 45: 162-165.
WANG Hui-jing. Fabrication of Biomimetic Gecko Micro-array and Its Adhesion[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2008, 45: 162-165.
- [59] STUART A R. Additive Manufacturing of Biologically-inspired Materials[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45: 359-376.
- [60] YANG Y, LI X, CHEN Y, et al. 3D-Printed Biomimetic Super-hydrophobic Structure for Microdroplet Manipulation and Oil/Water Separation[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30: 1704912.
- [61] MURPHY M P, AKSAK B, SITTI M. Adhesion and Anisotropic Friction Enhancements of Angled Heterogeneous Micro-fiber Arrays with Spherical and Spatula Tips[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2007, 21: 1281-1296.
- [62] RUS D, TOLLEY M T. Design, Fabrication and Control of Soft Robots[J]. *Nature*, 2015, 521: 467-475.
- [63] LI Y, KRAHN J, MENON C. Bioinspired Dry Adhesive Materials and Their Application in Robotics: A Review[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13: 181-199.
- [64] SERRANO M M, CHANG A H, VELA P A, et al. Incorporating Frictional Anisotropy in the Design of a Robotic Snake through the Exploitation of Scales[J]. *Proceedings of the IEEE Nanotechnology Conference on Robotics & Automation*, 2015, 2015: 3729-3734.
- [65] BAI S, XU Q, QIN Y. Vibration Driven Vehicle Inspired from Grass Spike[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1851.
- [66] ZHANG L, CHENG L, QIN Y, et al. Controllable Fabrication of Ultrafine Oblique Organic Nanowire Arrays and Their Application in Energy Harvesting[J]. *Nanoscale*, 2015, 7: 1285-1289.
- [67] SCARAGGI M, ANGERHAUSEN J, PERSSON B N J, et al. Influence of Anisotropic Surface Roughness on Lubricated Rubber Friction with Application to Hydraulic Seals[J]. *Wear*, 2017(7): 43-62.