中国科学 技术科学
SCIENTIA SINICA Technologica

Biomimetic soft adhesion robot: From biology to bionics

李磊, 文力, 王越平, 王思奇 and 王田苗

Citation: 中国科学: 技术科学 **48**, 1275 (2018); doi: 10.1360/N092018-00176

View online: https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

View Table of Contents: https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SST/48/12

Published by the 《中国科学》杂志社

Articles you may be interested in

A wet adhesion inspired biomimetic pad with direction dependence and adaptability
Chinese Science Bulletin **56**, 1935 (2011);

Preliminary studies on the basic factors of bionics
SCIENCE CHINA Technological Sciences **57**, 520 (2014);

Unsmoothed surface on reducing resistance by bionics
Chinese Science Bulletin **40**, 1077 (1995);

Anorthite dissolution promoted by bacterial adhesion: Direct evidence from dialytic experiment
SCIENCE CHINA Earth Sciences **54**, 204 (2011);

Robot learning from demonstration for path planning: A review
SCIENCE CHINA Technological Sciences **63**, 1325 (2020);

中国科学: 技术科学 2018 年 第 48 卷 第 12 期: 1275 ~ 1287
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述 共融机器人专题

仿生软体吸附机器人: 从生物到仿生

李磊, 文力*, 王越平, 王思奇, 王田苗

北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191
* E-mail: liwen@buaa.edu.cn

收稿日期: 2018-05-30; 接受日期: 2018-08-08; 网络版发表日期: 2018-09-28
国家自然科学基金(批准号: 61822303, 61633004)资助项目

摘要 生物吸附是自然界中一种典型的运动模式, 许多生物在进化中由于生存背景和物种的不同演变出各种各样的吸附系统, 吸附系统是功能系统, 其目的是让生物暂时或永久地附着在基体或另一个生物体上, 防止脱落. 生物系统的吸附机制可分为互锁、摩擦和黏结. 黏结可进一步分为干吸附(范德华力)、湿吸附(毛细作用)、负压吸附、胶合(黏液), 它们可独立或同时作用. 基于自然界丰富的吸附方式, 本文详细介绍了陆上/水下典型生物(壁虎、树蛙、章鱼、鲫鱼)的吸附机理, 并对清道夫、海胆、蚍蜉幼虫、跳蛛、叶甲虫幼虫等生物的吸附机理进行简述. 概述依据上述特定吸附机理而设计的仿生吸附装置, 从仿生软体吸附机器人、仿生软体吸附设备、仿生吸附软材料结构等方面, 对仿生吸附的研究成果进行列举, 并提及部分性能研究和应用前景. 以仿生鲫鱼吸盘为例, 阐述了如何模拟生物系统制作仿生样机, 并验证其性能, 挖掘其潜在应用. 对生物吸附方式分类归纳, 总结被其带动的仿生吸附研究意义、发展现状和面临的问题, 并指出仿生软体吸附机器人吸附机理细微化、结构刚柔耦合、仿生复合软材料应用、柔性驱动-传感-控制一体化、多学科交叉融合的发展方向.

关键词 生物吸附, 仿生机器人, 软体机器人, 鲫鱼

1 引言

根据进化理论, 生物为了增加其生存和繁衍的机会, 往往会通过对自然环境的适应, 以自身结构、习性和生理的改变来完成与环境的协调. 生物吸附是一种普遍的生物适应性进化, 在自然界中大量的生物依靠各异的吸附方式来达到诸如节省运动能量、觅食和寻找配偶等目的. 毫无疑问不同生物的吸附方式都是独立地对于特定环境的适应性进化, 但相同的是, 在百万年的进化过程中它们对于生物的生存都起着至关重要的作用[1].

例如, 壁虎能够利用脚掌上数以百万计的纳米级纤毛与吸附表面产生范德华力, 从而实现在垂直墙壁乃至天花板上的快速爬动[2]; 章鱼利用触手上的多个吸盘结构来完成缠绕吸附的动作; 鲫鱼的第一背鳍在千万年的时间尺度下进化为一个吸盘结构, 利用这个吸盘, 鲫鱼能够吸附到船底或各种海洋生物譬如海豚、海龟、鲨鱼甚至是同种生物表面[3,4]; 清道夫鱼腹部吸盘的唇圈上有特殊的多级结构, 使得清道夫鱼能够有效地吸附在较为粗糙的表面[5]; 其他生物, 譬如蜗牛、蜘蛛、蜉蝣幼虫, 它们底盘、腹部或节肢上的吸盘或类吸盘结构, 都对其特定的功能有很大的影响.

引用格式: 李磊, 文力, 王越平, 等. 仿生软体吸附机器人: 从生物到仿生. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1275–1287
Li L, Wen L, Wang Y P, et al. Biomimetic soft adhesion robot: From biology to bionics (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1275–1287, doi: 10.1360/N092018-00176

© 2018 《中国科学》杂志社

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

生物可以通过三种不同的方式进行吸附. 第一, 生物表面与接触表面的互锁. 这就是爪子的工作方式, 抓住存在表面的凸起和不规则物, 或刺穿表面. 第二, 摩擦力方式. 摩擦包括微互锁和材料在接触点上的分子间作用力. 一般来说, 摩擦与载荷成正比, 但与宏观接触面积无关. 当两个表面都有一定程度的粗糙度时, 摩擦是最有效的, 但仅在表面倾斜角小于90°时存在. 第三, 黏结方式. 指生物与其接触表面之间的黏结, 其强度较大不能被动物的重量所破坏. 黏结包括: (1) 干吸附(范德华力); (2) 湿吸附(吸水纸粘在玻璃上); (3) 负压吸附(通过降低内压吸附); (4) 胶合(黏液). 这些黏结类型的例子有: 壁虎使用干吸附, 树蛙使用湿吸附, 鲫鱼主要为负压吸附, 海星和海胆使用胶合[6].

作为一个新兴的仿生方向, 仿生吸附致力于制作出无毒害、高强度快速黏结以及长时间可靠吸附的吸附结构[7]. 由于自然界中丰富的生物吸附方式为人类提供了无尽的研究空间, 人们在仿生软体吸附机器人和仿生吸附结构方面也取得了一定的研究成果. 美国斯坦福大学研制的仿壁虎机器人Stickybot能够像生物壁虎一样在光滑的壁面上自由爬行[8]; 韩国国立首尔科技大学制作出一种有多个吸盘结构的高层建筑清洁用机器人[9]; 美国布鲁克林学院从章鱼触手吸盘获取灵感制作出仿生样机, 模拟了章鱼吸盘肌肉在吸附过程中的水压调节过程[10]; 德国马克思普朗克研究所制作出一种仿树蛙脚趾微观结构的表面, 在湿润环境中有较好的吸附性能[11]; 北京航空航天大学从海洋中的鲫鱼“搭顺风车”行为获得启发研究出仿生鲫鱼吸盘样机能够完成水下的快速吸附[12].

生物吸附机理的多样性将不断激发材料科学家和工程师开发新材料和系统, 而对生物吸附系统的功能性进行比较研究, 也便于提取在其功能背后基本的结构、化学、机械原理等, 从而促使仿生吸附快速发展. 将生物界作为无尽灵感的源泉, 可能会拯救地球生物多样性.

2 典型生物吸附机理的研究

互锁、摩擦力、黏结三种吸附方式中, 互锁和摩擦的吸附方式比较直观易懂, 所以以黏结方式作为重点, 选取应用干吸附、湿吸附、负压吸附和胶合四种吸附机理的典型生物为例子, 对生物吸附机理进行详细阐述.

2.1 壁虎的吸附研究(干吸附)

壁虎能够克服重力快速机动地在墙壁上爬行得益于其脚趾与吸附表面间的干吸附产生的范德华力. 壁虎的脚趾上有复杂的多级结构, 从微米级(1~2 μm)的薄层结构到纳米级(100~200 nm)的纤毛结构, 为其提供足够的有效接触面以产生干吸附[13]. 通过环境扫描电子显微镜观测, 壁虎纤毛的末端分叉有铲状的吸盘结构, 能够使壁虎纤毛与吸附表面间产生作用力, 其中切向剪力约194 μN, 正向吸附力约20 μN[14]. 壁虎的一个脚掌上有五个脚趾, 每个脚趾上有大约二十排层状结构, 每一层上有数以千计的纤毛, 而每根纤毛的末端又会有成百根铲状吸盘结构(图1)[15], 整体的纤毛阵列所产生的范德华力足以支撑壁虎在垂直表面甚至是天花板上的摩擦力和吸附力.

斯坦福大学利用最小分辨率到100 μm的光学传感系统, 获取壁虎脚掌在吸附过程中的光学图片, 从而对壁虎脚掌的载荷分布进行分析, 发现壁虎脚掌对于吸附表面的应力分布并不均匀, 这说明壁虎在攀爬过程中并不是简单地用脚掌对吸附表面进行挤压, 而是有一定的不平衡载荷分布(图2(a))[16]. 与此同时, 通过测量在不同粗糙度表面上的切向摩擦力, 研究人员发现当吸附表面的粗糙度接近壁虎脚掌薄层结构的尺寸时, 切向摩擦力会显著减小; 而当吸附表面的粗糙度远大于壁虎脚掌薄层结构尺寸时则能够维持有效的切向摩擦力. 因此针对壁虎对已知粗糙度的表面吸附, 可以通过脚掌薄层结构的尺寸与吸附表面粗糙度间的比例

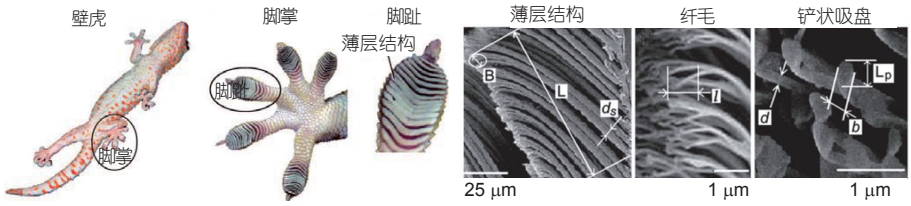

图 1 (网络版彩图)壁虎脚掌的层次结构[15]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

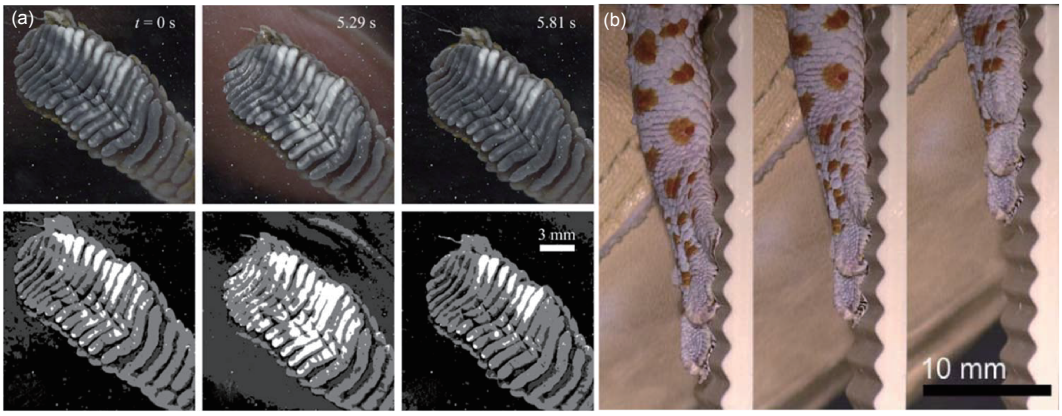

图 2　(网络版彩图)壁虎脚掌的吸附机理. (a) 壁虎右后脚掌吸附的载荷分布[16]; (b) 壁虎脚掌薄层[17]

关系来预测和评估(图2(b))[17].

2.2　树蛙的吸附研究(湿吸附)

树蛙利用可逆的湿吸附方式来产生吸附力，从而使其能够攀爬树木. 树蛙依靠脚趾上的特殊结构协助其在攀爬枝干时黏附在树叶或其他光滑表面上[18]. 事实上，树蛙在多种不同粗糙度或特性的表面上都展现出不凡的吸附能力[19]. 树蛙的脚趾垫由众多表皮细胞(10 μm)组成，这些细胞呈现出六边形的平面微观结构，相邻细胞间间隔为1 μm，这些间隙连接到黏液腺上，从而使黏液能够不断分泌到树蛙脚趾表面. 每个细胞的表面又由数千个柱状结构(100~200 nm)组成(图3). 这种微观结构使树蛙的脚趾软垫可以更好地适应粗糙表面，能够插入裂纹，增大一定比例的脱附力. 树蛙脚垫的层次结构分布跟壁虎脚趾很相似，但产生吸附能力的机理并不相同. 树蛙主要依靠脚趾垫与基底之间的液体所产生的毛细力和黏附力的合力来实现附着. 同时, 高度不规则的脚趾微纳结构促进的紧密接触、干吸附和边界摩擦，也增强了树蛙湿吸附的效果[18]. 不同种类蛙的脚趾形态学结构都基本相同，当脚趾与吸附表面间存在稀薄水层时，才能产生最有效的吸附[6]. 但是，树蛙脚趾垫形态上的微小差异，对垫的附着效率(单位面积上的附着力)有明显的影响. 虽然，较大物种由于其质量较大(单位面积的质量较大)相比小物种更易脱离，但是较大物种的附着效率更高，这与湿吸附系统中的不同作用力有关[20].

对于蛙类的吸附研究，不仅是单纯地研究蛙类脚趾上的湿吸附结构，某些蛙类的其他部位也能产生有效的吸附功能. 相比于树蛙所利用的可逆湿吸附，某

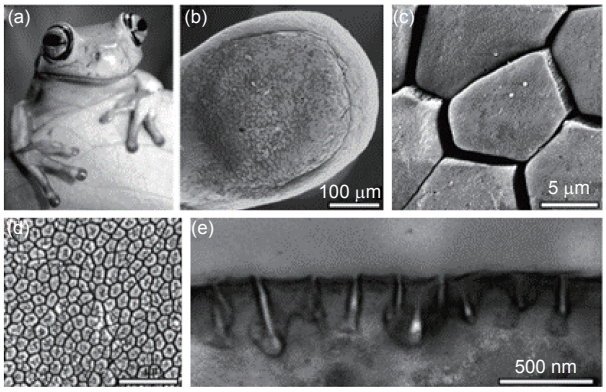

图 3　(网络版彩图)树蛙脚趾的吸附结构[18]

些属的蛙类利用化学黏性物质以实现特定的功能. Notaden和Breviceps属的蛙类分泌黏附性物质用于抵御天敌或同类间的交流[21,22]. 譬如在抵御捕食者时，Notaden属的蛙类能在其背上分泌出一种黏性物质. 通过将捕食者粘到某些外物表面，或者黏合捕食者的嘴部或头部, 从而阻止捕食者的追捕[23].

2.3　章鱼的吸附研究(负压吸附)

章鱼是一种典型的水下吸附生物，由八条柔软的触手组成运动机构，触手的刚度可以自由地改变. 利用触手上的多个负压吸附的吸盘，章鱼能够实现固定自身、抓取物体、感知外界环境等功能[24,25]. 美国北卡罗来纳大学从解剖学的角度来探究章鱼吸盘的吸附机理: 章鱼依靠触手上的软体吸盘结构, 其吸盘结构可以说是一种肌肉-水压器(Muscular-hydrostats)，吸盘中的肌肉组织能够朝三个方向展开，以提供整体吸盘架构的支持和移动[26,27]. 一种结缔组织层覆盖由内到外

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

的整个吸盘表面; 在髋臼顶部中有交叉的结缔组织纤维阵列; 漏斗形部分被一种包覆有褶皱上皮的边缘结构所环绕, 其外表面被几丁质角质层覆盖, 能够周期性脱落并更新[28]. 章鱼吸盘如图4(a)所示[29]. 在解剖结构研究的基础上, 意大利理工学院利用磁共振成像、超声波检测、组织学和三维重建来推测章鱼吸盘的吸附机理, 章鱼吸盘连续性吸附的过程是通过髋臼顶部凸起进而密封髋臼与漏斗形部分之间的孔来实现[30]. 如图4(b)所示, 阶段1: 漏斗形部分肌肉收缩增大吸盘与表面间的接触面积并形成密封; 阶段2: 髋臼肌肉收缩以增强吸附并将水分挤入上部; 阶段3: 髋臼径向肌肉收缩以增强吸附; 阶段4: 完成吸附. 章鱼吸盘能够利用很小的能量损耗来完成长时间的吸附, 同时髋臼结构对吸盘吸附起到至关重要的作用[31,32].

2.4 鲫鱼的吸附研究(摩擦、负压、胶合吸附)

在海洋里, 鲫鱼能吸附到鲨鱼、海豚、海龟、同种体积较大的鲫鱼或轮船等多种宿主的表面[3], 并以此获得生存优势(图5). 对于鲫鱼的研究在很早以前就已经进入各领域研究学者的视野. 最早于1939年, 大英博物馆Norman教授在论文中揭示了鲫鱼的宏观形态结构, 阐述了鲫鱼的进化和运动机理, 并指出随着漫长的进化, 鲫鱼头部的第一背鳍逐渐演化为一个吸盘, 能够吸附到其他生物或非生物表面作免费旅行[33]. Strasburg教授主要研究鲫鱼的生活习性和吸附特性对其宿主的影响[3,34]. 近些年来, 对鲫鱼吸盘的微观结构和吸附机理的研究也陆续展开.

古生物化石的研究发现鲫鱼头顶的吸盘是由第一背鳍逐渐演化而来, 以适应不断变化的环境[35]. 研究表明, 鲫鱼吸盘被一圈柔软的唇圈组织所环绕, 吸盘内部有多排连续栉状的鳍片, 沿着中间鳍条向后延伸, 鳍片底部嵌入到组织肌肉中, 能够在吸附和脱附调节过程中主动地抬起或落下, 在鳍片的顶部边缘上有二到四排向后倾斜的硬质小刺结构, 以增大鲫鱼吸盘与宿主表面之间的摩擦力, 抵抗水流的冲击(图6). 在吸附过程中, 鳍片通过肌肉控制向上抬起使得吸盘内部的体积增大, 从而产生相较于外界环境的负压. 对吸盘样本的解剖发现鲫鱼吸盘底部的竖立肌和降肌分别控制鳍片抬起和落下运动[36], 但具体的控制机理目前还尚不明确.

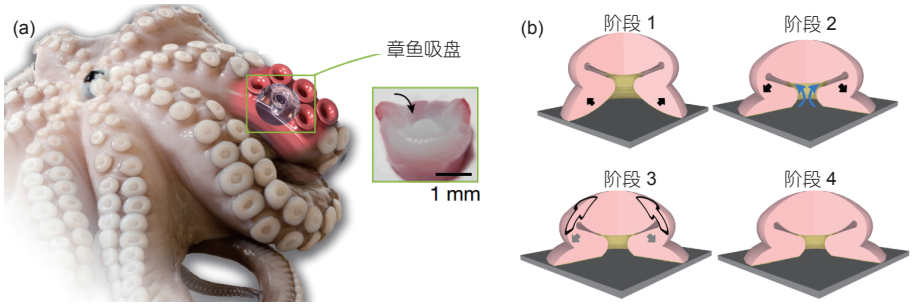

图 4 (网络版彩图)章鱼吸盘的吸附机理. (a) 章鱼的吸盘结构[29]; (b) 章鱼的吸附过程[30]

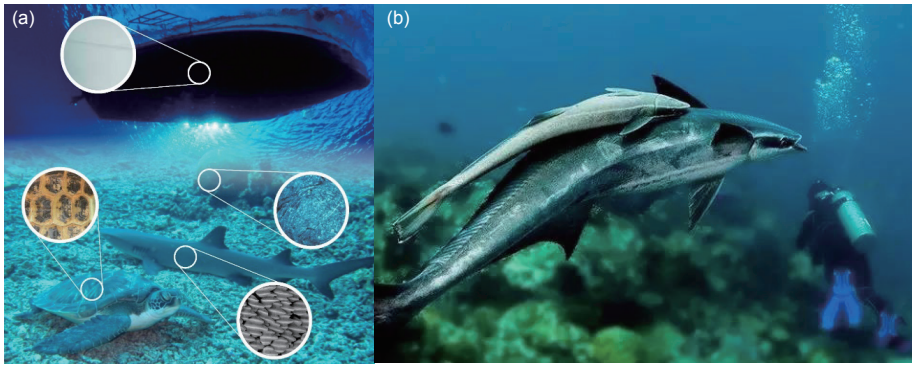

图 5 (网络版彩图)海洋环境中可吸附的各类复杂表面及鲫鱼对宿主的吸附(源自网络)

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

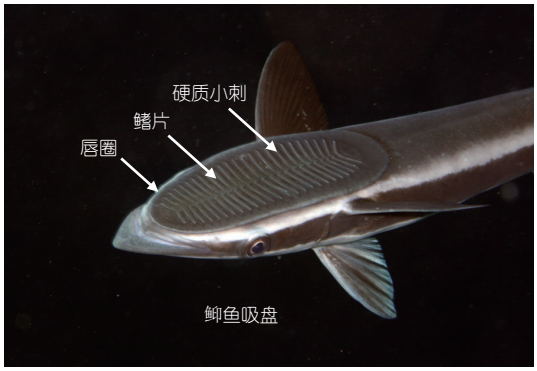

图 6　(网络版彩图)鲫鱼吸盘及其组成[12](Klaus M. Stiefel 拍摄)

鲫鱼鳍片上硬质小刺的存在不但能够增大摩擦力, 也能够增大吸附力[37]. 研究还发现, 吸盘内鳍片的排数不会随着鲫鱼个体的大小呈现正负相关的关系, 鳍片沿中央鳍条的分布并不呈现同一角度, 鳍片也不是固定同一长度, 而是随着中央鳍条向后延伸呈现出一定的规律[37,38]. 鳍片是由软组织包覆骨质结构组成, 只在顶端露出硬质小刺的上端, 这使得在维持吸附的过程中鳍片上软组织和硬质小刺都能与宿主表面有效接触[39]. 对硬质小刺的计算机建模仿真发现, 小刺尖端的几何形状对其增大摩擦有较大的影响, 尤其是在粗糙表面上[40]. 在自然海洋环境下通过对仿鲫鱼吸盘的吸附力学实验和仿真得出, 柔软的唇圈组织有利于鲫鱼吸盘与吸附表面间的密封, 同时吸盘表皮黏液的存在能够显著增加吸盘吸附的密封性并提供一定的黏附力[41]. 在水流环境中, 对鲫鱼吸附状态下的流线型身体的流场分析可得, 鲫鱼对宿主的吸附极为有效, 且体型越大的鲫鱼的头部吸盘吸附能力越强, 因此鲫鱼的体型越大, 其对宿主的吸附效果越显著[42]. 鲫鱼通过软唇圈的负压吸附, 鳍片和硬质小刺的增大摩擦力和吸附力, 以及黏液增加密封性和黏附力来实现有效吸附.

运用单反相机图像、光学显微镜、Micro-CT和ESEM多种从宏观尺度到微观尺度的观测手段, 获得鲫鱼吸盘的软唇圈、软组织包裹硬质骨骼的鳍片结构和鳍片上多排硬质小刺的大量关键尺寸, 并发现唇圈外沿微纳盲孔结构和吸盘前端的特殊感受器结构. 通过DMA实验, 发现唇圈材料具有各向异性. 应用多台高速相机同步追踪鲫鱼的吸附过程并分析大量的视频数据, 获得生物鳍片主动运动的依据. 这些鲫鱼吸盘形态学、材料特性和鳍片运动的研究为进一步的仿生学设计提供详实的数据支持(图7)[12].

2.5　其他典型吸附生物的研究

清道夫鱼与一般鱼类不同的是在它的腹部有一个吸盘, 依靠这个吸盘它能牢固地吸附在岩石表面以抵抗水流的冲刷. 清道夫鱼对很大范围粗糙度(Ra= 15 μm~269 μm)的表面都具有吸附能力[5], 这是由于清道夫鱼腹部吸盘的特殊层次结构, 同时其吸盘还有极好的柔韧性. 根据环境扫描电子显微镜观察, 清道夫鱼的吸盘边缘有复杂的层次状微观结构(图8), 当吸附到粗糙表面上时, 这些微观结构能够有效地补偿因表面凹凸不平带来的缝隙, 从而增强密封[5]. 研究表明, 清道夫鱼对粗糙表面的吸附能力远大于在光滑表面上的吸附能力: 当清道夫鱼吸附到粗糙表面上时, 其吸盘上的微观结构不但使清道夫鱼的正向吸附力不受影响, 也使得其抵抗的切向摩擦力增大, 以此增强在粗糙表面的吸附效果[43].

海胆作为一种海洋生物也存在着吸附结构. 研究表明, 类似于章鱼吸盘, 在海胆的管足末端有柔软的吸盘结构(图9), 在分泌的化学黏性物质的协助下, 海胆能够依靠这个吸盘有效地吸附在岩石上, 吸附力介于

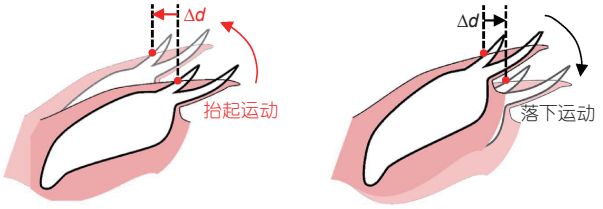

图 7　(网络版彩图)鲫鱼吸盘及鳍片运动[12]

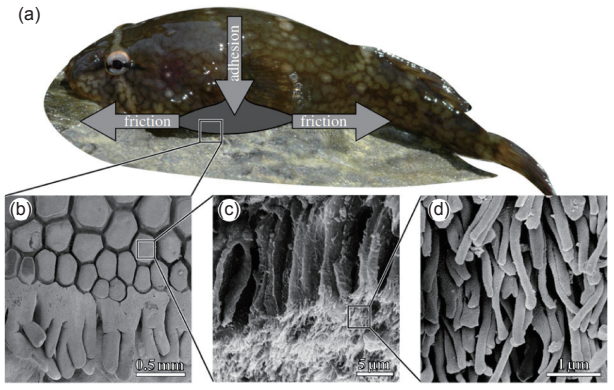

图 8　(网络版彩图)清道夫鱼的吸附结构[5]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

图 9 (网络版彩图)海胆的管足[45]

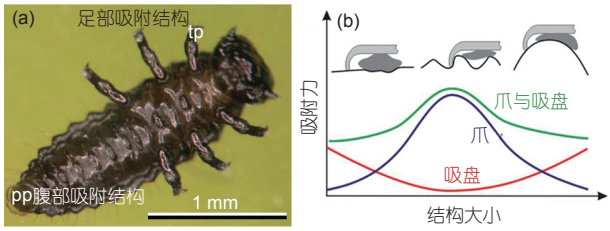

图 10 (网络版彩图)昆虫中爪与吸盘的协同作用[51,55]

23.4±2.0 N和46.3±2.4 N之间，甚至能够到100 N[44,45]. 现今主要有两种模型来推测海胆的管足吸盘吸附：一种模型把海胆吸盘的吸附和脱附解释为由管足分泌的化学物质与吸附表面相互作用，分泌的黏性物质能够像胶水一样黏结海胆管足和表面，而分泌的另一种化学物质能够溶解黏性物质从而实现吸盘脱附[46]；另一种模型把这种吸附解释为吸盘产生负压，同时在黏性物质的协助下进行有效的吸附[47, 48].

蜉蝣幼虫的刚毛底盘(Setose pad)具有附着作用，研究表明，刚毛底盘的存在显著增加了蜉蝣幼虫在光滑甚至是较粗糙表面上的摩擦力，但在光滑表面和粗糙表面上增大摩擦的方式并不相同：在光滑表面上，蜉蝣幼虫主要通过分子黏附来增大摩擦；而在粗糙表面上蜉蝣幼虫主要通过身体表面结构与表面间的互锁作用来增大摩擦[49]. 跳蛛主要依靠跗爪(Tarsal claws)对粗糙表面的钩挂实现附着，而依靠爪簇(Claw tuft)来实现对光滑表面的吸附[50]. 不同于成虫，叶甲虫幼虫依靠足部和腹部的吸附结构分泌黏合剂在光滑垂直表面和天花板上进行吸附[51](图10(a)).

某些昆虫也具备多种不同的吸附方式，以适应各种复杂的环境[52~54]. 其中一种爪(Claws)和吸盘(Adhesive pads)协同作用的吸附方式跟鲫鱼的水下吸附颇为相似：在粗糙表面上依靠爪子与表面的钩挂互锁作用、在光滑表面上依靠吸盘对表面的吸附作用来使本身适应各种不同的复杂环境[55](图10(b)).

3 仿生软体吸附机器人的研究

仿生吸附研究主要有两个目的：其一是将生物吸附的原理转化为技术实践，从而更好地应用于人类社会；其二是针对难以作为实验对象的生物，通过尽可能地模仿其形态、材料特性、运动机构等，以仿生样机作为实验对象来探索生物机理[56]. 在仿生吸附这个学科交叉的领域，具有挑战性的是如何能够使仿生结构像生物一样吸附到各种复杂的表面上，并轻松脱离.

3.1 壁虎的仿生结构

由于壁虎吸附的典型性，对壁虎脚趾吸附结构的仿生非常之多. 针对壁虎在竖直光滑墙壁上的迅速攀爬能力进行一系列研究，斯坦福大学研制出仿壁虎爬壁机器人Stickybot，其脚趾上有人工制作的仿纤毛结构，展示出与生物壁虎相似的吸附能力，能够在光滑壁面上自由爬动[8](图11(a)). 麻省理工学院制作出一种仿壁虎脚掌的分布式柔性设备，由柔软的基底和其上仿壁虎纤毛吸附阵列组成，可以吸附到相对粗糙或是凹凸的表面上[57](图11(b)). 斯坦福大学Cutkosky教授研究组制作出一款仿壁虎爬壁设备，足以承受70 kg的人在垂直玻璃壁上攀爬[58](图11(c)). 加州理工学院将静电黏性胶(Electrostatic adhesive)和壁虎纤毛层次结构结合制作出一种新型吸附装置(图11(d))，其中仿壁虎的干吸附结构减小静电黏性胶与吸附表面间的距离以增强其黏附效果，静电黏性胶的黏附又使更多的纤毛结构有效地吸附到表面，这为未来多种吸附方式的结合设计提供很好的思路[59].

加利福尼亚大学通过一种表面力测量设备来研究仿壁虎纤毛结构在光滑和粗糙面上的摩擦力：由聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作具有纤毛阵列的实验样品，在测力设备上进行剪切摩擦力的实验，实验结果表明预加载、切向速度、剪切距离和剪切方向都对仿壁虎结构有重要的影响[60]. 有些论文指出，对于仿壁虎结构，结构的具体形状对吸附力的影响很小，反而结构的大小和密度起到了至关重要的作用，尤其是深入到低于100 nm的尺度后[61]. 在医学方面壁虎特殊的吸附结构也得到研究和利用，一种仿壁虎纤毛的医用黏合剂具有替代缝合线或缝针以密封伤口的潜在应用[62].

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

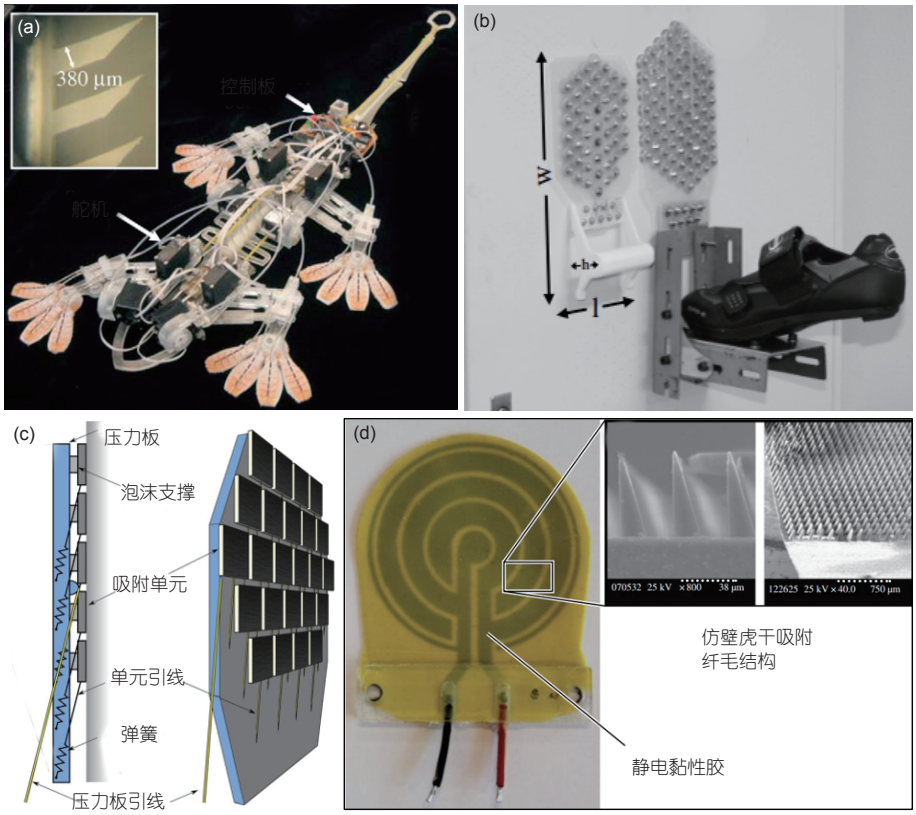

图 11　(网络版彩图)仿壁虎相关研究成果. (a) Stickybot仿壁虎机器[8]; (b) 仿壁虎分布式柔性设备[57]; (c) 仿壁虎爬壁设备[58]; (d) 仿壁虎表面与静电黏性胶的结合[59]

3.2　树蛙及其他陆上生物的仿生结构

德国马克思普朗克研究所制作出一种仿树蛙脚趾微观结构的表面(图12(a)), 在润湿环境下仿生微结构有利于提高该表面的切向摩擦力, 由此验证出树蛙脚趾表面黏液和亲水特性的主要用途是承受较大的摩擦力[11]. 现今也有很多对于陆地上其他生物的仿生研究. 德国萨尔布吕肯大学制作出一种基于仿生干吸附结构的可逆吸附表面, 通过黏性柱状结构的可逆弯曲来实现黏附状态的转换, 在吸附抓取目标物体后, 通过施加高压载荷引起柱状结构的弯曲使吸附表面与目标物体脱离[63]. 韩国国立首尔科技大学制作出一种有多个吸盘结构的高层建筑清洁用机器人MultiTrack(图12(b)), 利用气动吸附技术来完成对光滑墙壁的有效吸附和脱附[9]. 美国哈佛大学模仿棘头虫在吸附到宿主肠壁表面时膨胀其头部以增强吸附的原理, 制作出一种用以与软组织互锁的尖端可溶胀微针阵列(图12(c)), 在实际应用中锥形微针以较小的力穿透表皮组织, 随后尖端溶胀从而增强黏附[64].

3.3　章鱼及其他水下生物的仿生结构

水下的仿生吸附相关机理近年来取得一些研究进展. 韩国成均馆大学对典型的章鱼吸盘结构进行仿生, 探索章鱼吸盘微孔结构对其吸附的影响[29](图13(a)). 美国布鲁克林学院从章鱼触手吸盘获取灵感制作出仿生样机, 模拟了章鱼吸盘肌肉在吸附过程中的水压调节过程[10]. 意大利理工学院利用介电弹性体驱动器制作出与真实章鱼吸盘尺寸接近的仿生吸盘[65](图13(b)). 上海交通大学研制出以形状记忆合金(SMA)为驱动的仿生章鱼吸盘(图13(c)), 形状记忆合金以弹簧的形式嵌入到机构中, 通电使弹簧收缩从而在吸盘部分产生负压[66]. 海胆的管足末端也具有柔软的吸盘结构, 其分泌的化学黏性物质能协助海胆有效地吸附在岩石等多种表面上, 一种仿生海胆吸盘样机模拟这种机制并实现了有效吸附[47](图13(d)). 水蛭的口器也是一种水下吸附结构, 近年来有研究以离子聚合物-金属复合材料(IPMC)为驱动材料对水蛭的口器进行仿生制作, 在未来的医疗领域有潜在应用[67](图13(e)).

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

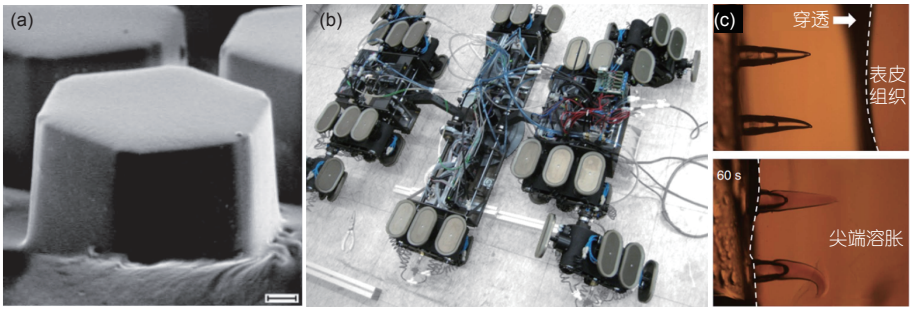

图 12 (网络版彩图)陆地生物的仿生研究成果. (a) 仿树蛙脚趾微观结构[11]; (b) 多吸盘结构的MultiTrack[9]; (c) 尖端可溶胀的微针阵列[64]

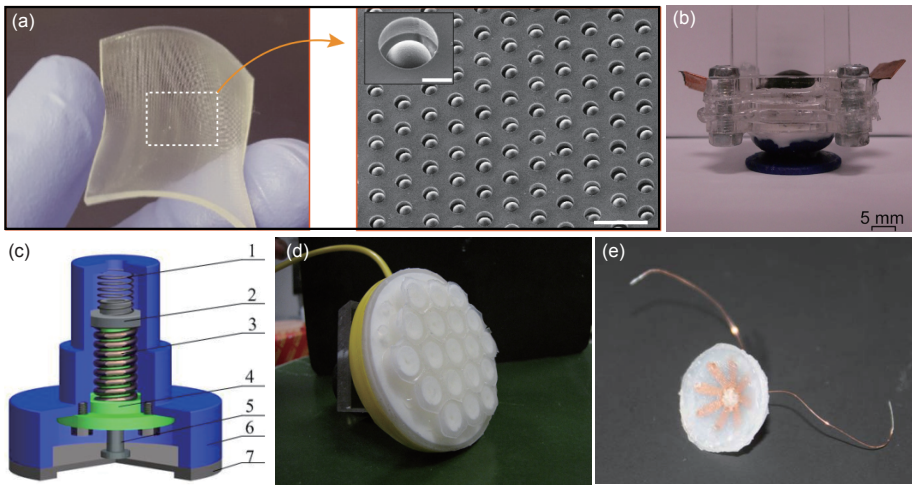

图 13 (网络版彩图)典型的水下仿生吸附研究. (a) 章鱼吸盘结构仿生[29]; (b) 介电弹性体驱动吸盘[65]; (c) SMA驱动仿章鱼吸盘[66]; (d) 仿海胆管足的吸盘[47]; (e) IPMC驱动仿水蛭口器吸盘[67]

3.4 鲫鱼的仿生结构

吸引大量研究人员的鲫鱼奇特吸盘结构于2017年被北京航空航天大学第一次仿生制作出来, 其仿生吸盘样机的CAD设计, 如图14(a)所示. 仿生鲫鱼吸盘样机包括柔软唇圈结构、软组织包覆硬质结构的鳍片、吸盘基板、硬质小刺、鳍片转动机构. 不同部位的颜色代表不同的材料硬度, 其中硬质小刺具有最大的硬度, 其次是鳍片结构, 吸盘基板具有中间硬度, 能够做适当的弯曲变形, 鳍片上软组织和唇圈属于软结构, 红色的部分是极软的硅胶材料, 用于吸盘的密封. 鳍片结构、软唇圈和吸盘基板被视为仿生吸盘样机的主体部分, 由多材料3D打印机根据CAD模型一体打印出来. 采用的多材料3D打印技术能够将鳍片转动机构直接加入到设计中, 在打印出样机后, 鳍片能够直接绕吸盘基板进行转动, 既避免了繁琐的零件装配, 又减小了因装配带来的精度下降问题. 同时, 设计出嵌入结构以防止软唇圈与吸盘基板之间因为材料特性相差太大而不能有效的连接.

需要指出的是, 由于多材料3D打印所应用的材料是硅橡胶, 在微米级别的尺度上无法满足硬质小刺的强度需求, 因此在仿生吸盘样机的鳍片上部预留能够嵌入小刺的凹槽结构. 这样在仿生吸盘样机主体的多材料3D打印完成后, 能够将微激光加工制作的硬质小刺直接嵌入并固定到凹槽结构中(图14(b)).

研究仿生鲫鱼吸盘样机的吸附性能, 对仿生吸盘样机进行力学实验, 控制的变量有样机有无仿生小刺、吸附表面的粗糙度、仿生鳍片的抬起角度、测力方向, 对仿生样机的吸附内压、吸附力和吸盘正向/反向摩擦力进行实验, 经过分析得到两个主要结论: (1)

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

鲫鱼能够主动地控制吸盘内部鳍片的抬起或落下运动，从而调节鲫鱼吸盘与吸附表面间的摩擦力；(2) 鲫鱼鳍片表面软组织和硬质小刺结构的协同使鲫鱼能够适应海洋中各种粗糙度的生物/非生物表面. 仿生吸盘在光滑表面(Ra = 0 μm)上能够产生436.6±16.0 N的吸附力, 大约是仿生吸盘本体重量(1.29 N)的340倍.

仿生鲫鱼吸盘样机安装到一个小型水下航行器的头部，在大型水缸中进行游动-吸附-维持-脱附的运动展示实验. 结果表明, 利用仿生吸盘, 航行器能够有效地吸附到各种表面上以节省游动能量(图15). 同时，也可以将仿生吸盘样机安装到机械臂末端做工业“抓持”[12].

4　总结与展望

自然界中多样的吸附机理，为研究仿生吸附提供了无限的可能. 近年来，通过生物启发的仿生软体吸附机器人技术蓬勃发展，大量的研究成果不断涌现，并在生物、医学、能源、化工、军事等领域的应用逐渐增多，如生物行为观测、外科手术、物体抓持、水下追踪等. 随着研究的不断深入，其必将在日常生活中也得到越来越广泛的应用.

仿生吸附是一个自然科学、生物学、材料学、物理学、机械、化学等多学科交叉的研究领域. 由于生物系统的复杂性, 仿生吸附领域目前仍存在很多问题: 对生物吸附机理的研究存在盲点; 微纳米尺度上, 复杂生物吸附结构的设计与制造难以实现；受材料科学发展制约完全模拟变刚度的生物组织存在困难；仿生软体吸附机器人采用的柔性传感、驱动与控制技术不成熟; 仿生软体吸附样机的稳定性和环境适应性较差.

综上，仿生软体吸附机器人从对生物吸附机理的探寻，到仿生样机的设计、加工、传感、驱动、控制

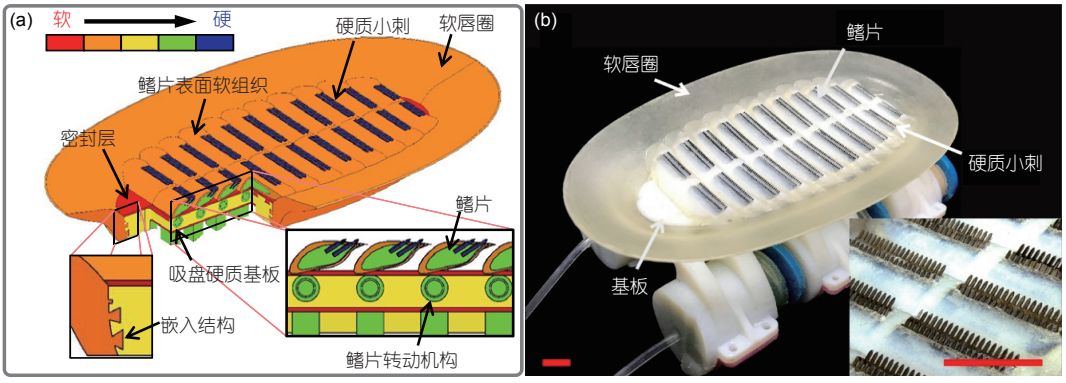

图 14　(网络版彩图)仿生鲫鱼吸盘[12]. (a) 仿生鲫鱼吸盘CAD模型; (b) 仿生鲫鱼吸盘样机

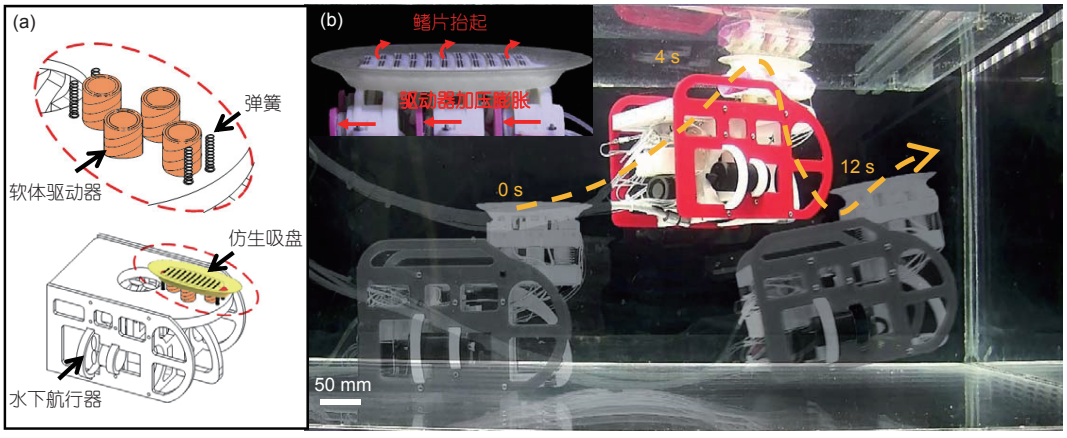

图 15　(网络版彩图)安装有仿生吸盘的水下航行器展示[12]

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

以及整个系统的集成方面都存在需要探究的科学问题和创新的突破口, 未来的研究方向有如下几个方面.

(1) 在研究生物的吸附机理方面, 随着生物、机械、物理、材料等多学科的发展以及先进观测设备的应用, 仿生吸附机理的研究将从宏观逐渐过渡到微纳尺度, 并通过计算机建立逼真的模型, 为仿生软体吸附机器人的设计提供理论基础.

(2) 随着软体机器人技术的发展, 在仿生吸附机器人的设计上单一的刚性结构已经越来越难以满足人们对机器人性能的需求, 因此采用刚柔混合结构乃至纯柔性结构已经成为未来机器人机构设计的发展趋势之一.

(3) 基于生物组织结构并运用多种先进制造技术, 制造出集多材料、多结构、多刚度一体的仿生复合软材料也已成为本研究领域的热点之一.

(4) 多功能的仿生软体吸附装置、高效的软体驱动、灵敏的柔性传感、精确的控制策略及其一体化平台的构建是仿生软体吸附机器人最主要的发展方向.

由于仿生方向越来越重视多学科的交叉与融合, 因此, 在今后从探索科学问题到相应的成果转化过程中, 横跨多领域和多学科合作研究将成为关键.

参考文献

1 Bar-Cohen Y. Biomimetics: Biologically Inspired Technologies. CRC Press, 2005

2 Cheng Q H, Chen B, Gao H J, et al. Sliding-induced non-uniform pre-tension governs robust and reversible adhesion: A revisit of adhesion mechanisms of geckos. J R Soc Interface, 2012, 9: 283–291

3 Brunnschweiler J M, Sazima I. A new and unexpected host for the sharksucker (Echeneis naucrates) with a brief review of the echeneid–host interactions. Mar Biodivers Rec, 2008, 1: e41

4 O'Toole B. Phylogeny of the species of the superfamily Echeneoidea (Perciformes: Carangoidei: Echeneidae, Rachycentridae, and Coryphaenidae), with an interpretation of echeneid hitchhiking behaviour. Can J Zool, 2002, 80: 596–623

5 Wainwright D K, Kleinteich T, Kleinteich A, et al. Stick tight: Suction adhesion on irregular surfaces in the northern clingfish. Biol Lett, 2013, 9: 20130234

6 Barnes W J P. Functional morphology and design constraints of smooth adhesive pads. MRS Bull, 2007, 32: 479–485

7 Peattie A M. Functional demands of dynamic biological adhesion: An integrative approach. J Comp Physiol B, 2009, 179: 231–239

8 Autumn K, Dittmore A, Santos D, et al. Frictional adhesion: A new angle on gecko attachment. J Exp Biol, 2006, 209: 3569–3579

9 Lee G, Kim H, Seo K, et al. MultiTrack: A multi-linked track robot with suction adhesion for climbing and transition. Robotics Autonomous Syst, 2015, 72: 207–216

10 Follador M, Tramacere F, Mazzolai B. Dielectric elastomer actuators for octopus inspired suction cups. Bioinspir Biomim, 2014, 9: 046002

11 Drotlef D M, Stepien L, Kappl M, et al. Insights into the adhesive mechanisms of tree frogs using artificial mimics. Adv Funct Mater, 2013, 23: 1137–1146

12 Wang Y, Yang X, Chen Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish. Sci Robot, 2017, 2: eaan8072

13 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681–685

14 Bhushan B. Adhesion of multi-level hierarchical attachment systems in gecko feet. J Adhes Sci Tech, 2007, 21: 1213–1258

15 Tian Y, Pesika N, Zeng H, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103: 19320–19325

16 Eason E V, Hawkes E W, Windheim M, et al. Stress distribution and contact area measurements of a gecko toe using a high-resolution tactile sensor. Bioinspir Biomim, 2015, 10: 016013

17 Gillies A G, Henry A, Lin H, et al. Gecko toe and lamellar shear adhesion on macroscopic, engineered rough surfaces. J Exp Biol, 2014, 217: 283–289

18 Federle W, Barnes W J P, Baumgartner W, et al. Wet but not slippery: Boundary friction in tree frog adhesive toe pads. J R Soc Interface, 2006, 3: 689–697

19 Scholz I, Barnes W J P, Smith J M, et al. Ultrastructure and physical properties of an adhesive surface, the toe pad epithelium of the tree frog,

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

litoria caerulea white. J Exp Biol, 2009, 212: 155–162
20 Smith J M, Barnes W J P, Downie J R, et al. Structural correlates of increased adhesive efficiency with adult size in the toe pads of hylid tree frogs. J Comp Physiol A, 2006, 192: 1193–1204
21 Graham L D, Glattauer V, Peng Y Y, et al. An adhesive secreted by Australian frogs of the genus Notaden. In: Smith A M, Callow J A, eds. Biological Adhesives. Berlin: Springer, 2006. 207–223
22 Clarke B T. The natural history of amphibian skin secretions, their normal functioning and potential medical applications. Biol Rev, 1997, 72: 365–379
23 Evans C M, Brodie E D. Adhesive strength of amphibian skin secretions. J Herpetology, 1994, 28: 499–502
24 Packard A, Trueman E R, Clarke M R. The skin of cephalopods (coleoids): General and special adaptations. The Mollusca, 1988, 11: 37
25 Kuba M J, Byrne R A, Meisel D V, et al. Exploration and habituation in intact free moving Octopus vulgaris. Int J Comp Psychol, 2006, 19: 426–438
26 Kier W M, Smith A M. The morphology and mechanics of octopus suckers. Biol Bull, 1990, 178: 126–136
27 Kier W M, Smith K K. Tongues, tentacles and trunks: The biomechanics of movement in muscular-hydrostats. Zoological J Linnean Soc, 1985, 83: 307–324
28 Kier W M, Smith A M. The structure and adhesive mechanism of Octopus suckers. Integr Comp Biol, 2002, 42: 1146–1153
29 Baik S, Park Y, Lee T J, et al. A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi. Nature, 2017, 546: 396
30 Tramacere F, Beccai L, Kuba M, et al. The morphology and adhesion mechanism of Octopus vulgaris suckers. PLoS ONE, 2013, 8: e65074
31 Tramacere F, Kovalev A, Kleinteich T, et al. Structure and mechanical properties of Octopus vulgaris suckers. J R Soc Interface, 2014, 11: 20130816
32 Tramacere F, Pugno N M, Kuba M J, et al. Unveiling the morphology of the acetabulum in octopus suckers and its role in attachment. Interface Focus, 2015, 5: 20140050
33 Norman J R. Remoras or sucing-fishe. Nature, 1939, 143: 52–55
34 Strasburg D W. Notes on the respiration of small Remora remora. Copeia, 1957, 1957: 58–60
35 Friedman M, Johanson Z, Harrington R C, et al. An early fossil remora (Echeneoidea) reveals the evolutionary assembly of the adhesion disc. Proc R Soc B-Biol Sci, 2013, 280: 20131200
36 Fulcher B A, Motta P J. Suction disk performance of echeneid fishes. Can J Zool, 2006, 84: 42–50
37 Nadler J H, Mercer A J, Culler M, et al. Structures and function of remora adhesion. MRS Proc, 2013, 1498: 159–168
38 Britz R, Johnson G D. Ontogeny and homology of the skeletal elements that form the sucking disc of remoras (Teleostei, Echeneoidei, Echeneidae). J Morphol, 2012, 273: 1353–1366
39 Culler M, Nadler J H. Composite structural mechanics of dorsal lamella in remora fish. MRS Proceedings, 2014, 1619
40 Beckert M, Flammang B E, Nadler J H. Remora fish suction pad attachment is enhanced by spinule friction. J Exp Biol, 2015, 218: 3551–3558
41 Beckert M, Flammang B E, Nadler J H. A model of interfacial permeability for soft seals in marine-organism, suction-based adhesion. MRS Adv, 2016, 1: 2531–2543
42 Beckert M, Flammang B E, Anderson E J, et al. Theoretical and computational fluid dynamics of an attached remora (Echeneis naucrates). Zoology, 2016, 119: 430–438
43 Ditsche P, Wainwright D K, Summers A P. Attachment to challenging substrates - fouling, roughness and limits of adhesion in the northern clingfish (Gobiesox maeandricus). J Exp Biol, 2014, 217: 2548–2554
44 Siddon C, Witman J. Influence of chronic, low-level hydrodynamic forces on subtidal community structure. Mar Ecol Prog Ser, 2003, 261: 99–110
45 Santos R, Hennebert E, Coelho A V, et al. The echinoderm tube foot and its role in temporary underwater adhesion. In: Functional Surfaces in Biology. Springer Netherlands, 2009. 9–41
46 Flammang P. Adhesion in echinoderms. Echinoderm Studies, 1996, 5: 1–60
47 Sadeghi A, Beccai L, Mazzolai B. Design and development of innovative adhesive suckers inspired by the tube feet of sea urchins. In: 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). Rome: IEEE, 2012. 617–622
48 Lebesgue N, da Costa G, Ribeiro R M, et al. Deciphering the molecular mechanisms underlying sea urchin reversible adhesion: A quantitative proteomics approach. J Proteomics, 2016, 138: 61–71

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

49 Ditsche-Kuru P, Koop J H E, Gorb S N. Underwater attachment in current: The role of setose attachment structures on the gills of the mayfly larvae Epeorus assimilis (Ephemeroptera, Heptageniidae). J Exp Biol, 2010, 213: 1950–1959
50 Kesel A B. Adhesion measurements on the attachment devices of the jumping spider Evarcha arcuata. J Exp Biol, 2003, 206: 2733–2738
51 Zurek D B, Gorb S N, Voigt D. Locomotion and attachment of leaf beetle larvae Gastrophysa viridula (Coleoptera, Chrysomelidae). Interface Focus, 2015, 5: 20140055
52 Dirks J H, Federle W. Mechanisms of fluid production in smooth adhesive pads of insects. J R Soc Interface, 2011: rsif20100575
53 Lai J H, del Alamo J C, Rodríguez-Rodríguez J, et al. The mechanics of the adhesive locomotion of terrestrial gastropods. J Exp Biol, 2010, 213: 3920–3933
54 Shirtcliffe N J, McHale G, Newton M I. Wet adhesion and adhesive locomotion of snails on anti-adhesive non-wetting surfaces. PLoS ONE, 2012, 7: e36983
55 Song Y, Dai Z, Wang Z, et al. The synergy between the insect-inspired claws and adhesive pads increases the attachment ability on various rough surfaces. Sci Rep, 2016, 6: 26219
56 Bandyopadhyay P R, Hrubes J D, Leinhos H A. Biorobotic adhesion in water using suction cups. Bioinspir Biomim, 2008, 3: 016003
57 Berengueres J, Tadakuma K, Kamoi T, et al. Compliant distributed magnetic adhesion device for wall climbing. In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome: IEEE, 2007
58 Hawkes E W, Eason E V, Christensen D L, et al. Human climbing with efficiently scaled gecko-inspired dry adhesives. J R Soc Interface, 2015, 12: 20140675
59 Ruffatto D, Parness A, Spenko M. Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic/gecko-like adhesive. J R Soc Interface, 2014, 11: 20131089
60 Das S, Cadirov N, Chary S, et al. Stick-slip friction of gecko-mimetic flaps on smooth and rough surfaces. J R Soc Interface, 2015, 12: 20141346
61 Spolenak R, Gorb S, Gao H, et al. Effects of contact shape on the scaling of biological attachments. Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci, 2005, 461: 305–319
62 Mahdavi A, Ferreira L, Sundback C, et al. A biodegradable and biocompatible gecko-inspired tissue adhesive. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 2307–2312
63 Purtov J, Frensemeier M, Kroner E. Switchable adhesion in vacuum using bio-inspired dry adhesives. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7: 24127–24135
64 Yang S Y, O'Cearbhaill E D, Sisk G C, et al. A bio-inspired swellable microneedle adhesive for mechanical interlocking with tissue. Nat Commun, 2013, 4: 1702
65 Grasso F W, Setlur P. Inspiration, simulation and design for smart robot manipulators from the sucker actuation mechanism of cephalopods. Bioinspir Biomim, 2007, 2: S170–S181
66 Hu B S, Wang L W, Fu Z, et al. Bio-inspired miniature suction cups actuated by shape memory alloy. Int J Adv Robot Syst, 2010, 6: 151–160
67 Feng H, Dong W, Chai N. A bionic micro sucker actuated by IPMC. In: IEEE International Conference on Orange Technologies. Xi'an: IEEE, 2014. 223–226

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176

Biomimetic soft adhesion robot: From biology to bionics

LI Lei, WEN Li, WANG YuePing, WANG SiQi & WANG TianMiao

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

Biological adhesion is a typical movement model in nature. Many kinds of organisms have evolved various adhesive systems due to their different living backgrounds and species. The adhesive system is a functional system which enables organisms to temporarily or permanently adhere to the substrate or another organism and prevent them from falling off. The biological adhesion mechanisms can be classified as interlocking, friction and bonding. The bonding mechanism was further divided into dry adhesion (van der Waals force), wet adhesion (capillarity), suction (negative pressure) and gluing (mucus), which can act independently or simultaneously. Adhesion principles of the classic terrestrial/underwater creatures (gecko, tree frog, octopus, and remora) were introduced in detail, and the scavenger, sea urchin, ant larva, jumping spider, etc. were simply described. The bionic adhesive devices designed based on the above adhesion mechanisms were summarized. The research achievements of biomimetic adhesion were listed including biomimetic soft adhesion robot, equipment, material, and their application prospects were also mentioned. The method of fabricating bio-inspired remora disc prototype from biological system was demonstrated. In addition, adhesive abilities and potential application of the biomimetic disc were analyzed. Eventually, we summarized the significance, development status and challenges of the biomimetic adhesion and indicated the research directions of bio-inspired soft adhesion robot including detailed adhesion mechanism, rigid flexible coupling structure, biomimetic soft composites, integrated technology (flexible actuator, senser, controller) and interdisciplinary research.

biological adhesion, bionic robot, soft robotics, remora

doi: 10.1360/N092018-00176

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00176