科学通报 2010 年 第 55 卷 第 6 期：409 ~ 417
评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

仿壁虎微纳米刚毛阵列的研究进展

张昊，郭东杰，戴振东*

南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所，南京 210016
* 联系人，E-mail:zddai@nuaa.edu.cn

2009-07-20 收稿, 2009-12-20 接受
国家自然科学基金重点项目(批准号: 60535020)、国家高技术研究发展计划(编号: 2007AA04Z201)、国家自然科学基金(批准号: 50805076)和江苏省自然科学基金(编号: BK2007202)和固体润滑国家重点实验室开放基金资助项目

摘要 壁虎的超级黏附力源于分布于脚趾的数十万细长刚毛和接触面间的范德华力. 仿壁虎刚毛的研制是实现机器人三维无障碍运动的关键技术之一. 近年来, 许多国内外学者致力于研制仿壁虎脚掌刚毛结构的倾斜、末端分支、膨大的微纳米黏附阵列, 以得到高黏附性能、可自由调控吸附脱附的仿壁虎脚掌, 对已有文献进行总结、比较, 并展望其进一步的发展方向.

关键词
仿生
壁虎
刚毛
微纳米黏附阵列

壁虎脚趾上数百万根微米级刚毛和纳米级绒毛阵列与接触表面接触产生的范德华力形成超级黏附力[1~3]. 研究壁虎脚掌的结构及受力机理, 借鉴其脚掌黏附的黏附机制, 制造出仿壁虎微纳米黏附阵列, 并依此研制的仿壁虎机器人在故障检测、抢险救灾、军事侦察等多个领域具有重要价值[4], 其中仿壁虎刚毛阵列是研制这类机器人的核心技术, 本文从刚毛的物理形态、黏附机制和仿生刚毛阵列的研制几个方面回顾该领域研究的新进展, 提出未来发展所面临的问题和可能的解决办法.

1 壁虎脚掌的分级结构

大壁虎(Gekko gecko)是已知具备三维空间无障碍运动能力的动物中质量最大的, 其脚掌具有非常精细的微观结构和介观结构(图 1)[5~7]. 刚毛(图 1 中 ST)长约 30~130 μm, 直径约 5 μm; 并具有刚毛分枝(图 1 中 BR); 末端膨大的压舌板形结构(图 1 中 SP). 每根刚毛末端长有更微细的绒毛, 绒毛分成两级结构, 绒毛底端部分为直径约 0.1 μm 的圆柱状, 长约 0.8 μm. 刚毛末端膨大的压舌板形结构, 长约 0.3 μm, 宽约 0.2 μm, 厚度约为 5 nm. 大量的微精细刚毛保证了壁虎脚掌与接触面的充分接触, 从而产生强大黏附力.

壁虎的黏附脚掌具有以下特点：(1)各向异性的黏附能力[8~10]. 壁虎脚掌在附着和脱附时, 刚毛的拉伸方向不同[11~13]. (2)小的法向脱附力[13]. 壁虎在 15 ms 的时间内以几乎为零的法向脱附力实现快速脱附, 30°为保障刚毛可靠黏附的临界角度[5]. (3)黏附材质的强适应性. 由于范德华力的普适性, 壁虎的黏附能适应不同形貌和材质表面[1,14]. (4)脚掌自洁性及自身不粘连性[15]. 壁虎刚毛材料为β角蛋白, 弹性模量约 2~4 GPa, 本身不具黏连性[16]; 此外, 由于壁虎脚掌具有复杂精妙的柔性层级结构, 黏附在刚毛上的颗粒, 也会随着爬行过程中刚毛的拉伸滑移动作而脱落, 达到自洁的目的.

2 壁虎脚掌的黏附理论

范德华力回答了壁虎脚底毛的黏附机制, JKR 理论阐明了仿壁虎刚毛的黏附力与各个设计参数间的关系[17]. 根据 JKR 理论. 两个物体间的黏附力为:

$$F = -1.5\pi wR,$$

其中 F 为黏附力; w 为黏着能, 与相互接触物的表面自由能有关; R 为当量半径, 与接触物体的几何形状

英文版见: Zhang H, Guo D J, Dai Z D. Progress on gecko-inspired micro/nano-adhesion arrays. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0065-y

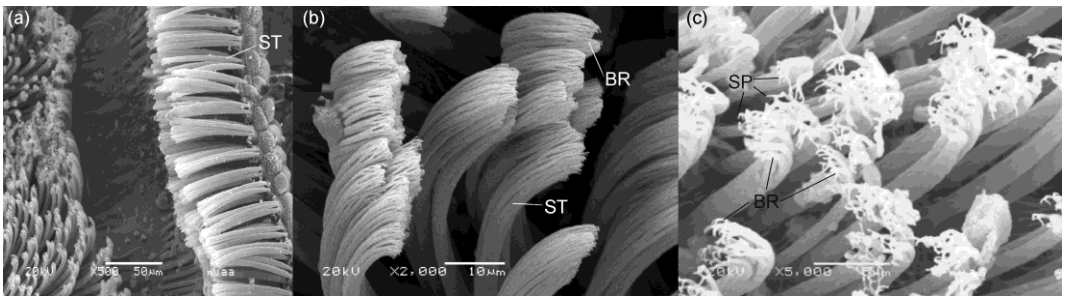


图 1 壁虎脚掌刚毛的分级结构[4,7]

(a) 刚毛群的一级结构(ST); (b) 二级分支结构(SP); (c) 三级压舌板结构(BR)

相关. JKR 理论较好地解释壁虎、苍蝇等刚毛型脚掌的吸附现象[18,19]. 从 JKR 公式可以看出, 黏附性能受到表面能和接触几何两个因素制约. 而对于现有的微黏附仿壁虎刚毛阵列, 提高刚毛的黏附性能就可以从两个方面改进: 一是选用高表面能的材料制备人工刚毛; 二是尽可能地增大有效接触面积.

3 微纳米黏附阵列的研究进展

近年来, 化学、物理、微机械加工等技术的迅速发展推动了微纳米黏附阵列的研制. 多种制备技术如微纳模注塑法、反应性等离子体刻蚀法、静电诱导刻蚀法、自组织结构孔模板浇注法等被利用制作人工刚毛阵列. 各种制备方法均具有其独特的优点. 多种表面能不同的高分子材料如聚酰亚胺(PI)、聚氨酯(PU)、硅橡胶(PDMS)、碳纳米管(CNT)等被先后选用为刚毛材料, 所研制的仿壁虎刚毛黏附阵列的性能见表 1. 比较可得: 聚氨酯阵列的弹性模量可调性最强, 黏弹性好, 黏附强度适中; 硅橡胶阵列加工工艺相对简单, 机械性能适中, 需要的预负载小, 但产生的黏附力相对小; 纳米管阵列的材料弹性模量大, 黏附性能强, 但需要的预负载大, 且脱附比较困难.

依据壁虎脚掌刚毛黏附力产生的机理, 刚毛的形状对黏附力具有重要的影响. 研究表明: (1)高密度的人工刚毛阵列具有大的相互接触面积, 是产生大黏附力的必要条件. (2)支杆末端的庞大结构等效于增加接触面积, 从而优化黏附性能. (3)支杆倾斜的人工刚毛可调控机械性能, 进而调控刚毛黏附性能. (4)末端分级的多层结构可以满足阵列对不同材质表面的适应能力. 目前, 研究人员正致力于寻找制备具有上述结构刚毛的制备技术. 许多研究结果相继被报道出来, 下面分别阐述其代表性成果.

3.1 高密度刚毛阵列

高密度的刚毛阵列成为人工刚毛研制的一个主要方向. 刚毛尺寸从微米级渐次过渡到纳米级, 同时长径比也逐渐增加. 其黏附能力也迅速增强, 由低于壁虎黏附强度发展到远高于壁虎的黏附强度. 但高密度的人工刚毛带来了一系列的问题, 如刚毛群倒塌、相互黏连等缺陷. 相比而言, 碳纳米管刚毛阵列具有更精细、不黏连、机械性能好、黏附性能好、可规模化生产等优点, 发展潜力更高, 有望取代其他的高分子材料.

有关高密度刚毛阵列的例子较多. Akron 大学 Ge 等人[20]用化学气相沉积的方法得到了宽度 50~500 μm, 长度 200~500 μm 的壁虎胶带(见图 2). 该胶带由高密度碳纳米管阵列组成, 1 cm^2 的柔性壁虎胶带能够承受

表 1 不同仿壁虎刚毛微/纳黏附阵列制备的比较

材料	壁虎刚毛[1, 2]	聚丙烯[10]	聚酰亚胺[23,24,31]	聚氨酯[9,29,40]	聚硅氧烷[33~36]	碳纳米管[21,41,42]
弹性模量/GPa	1~3	~1	~3	<0.01	~0.003	>500
长径比	7~43	~30	0.5~7	1~4	0.5~7.5	>100
黏附强度/N cm^{-2}	10		0.1~3	0.2~18	~6	~20
剪切强度/N cm^{-2}	55	2	—	—	—	91
预载强度/N cm^{-2}	<0.05	<0.1	50	12	0.8	125

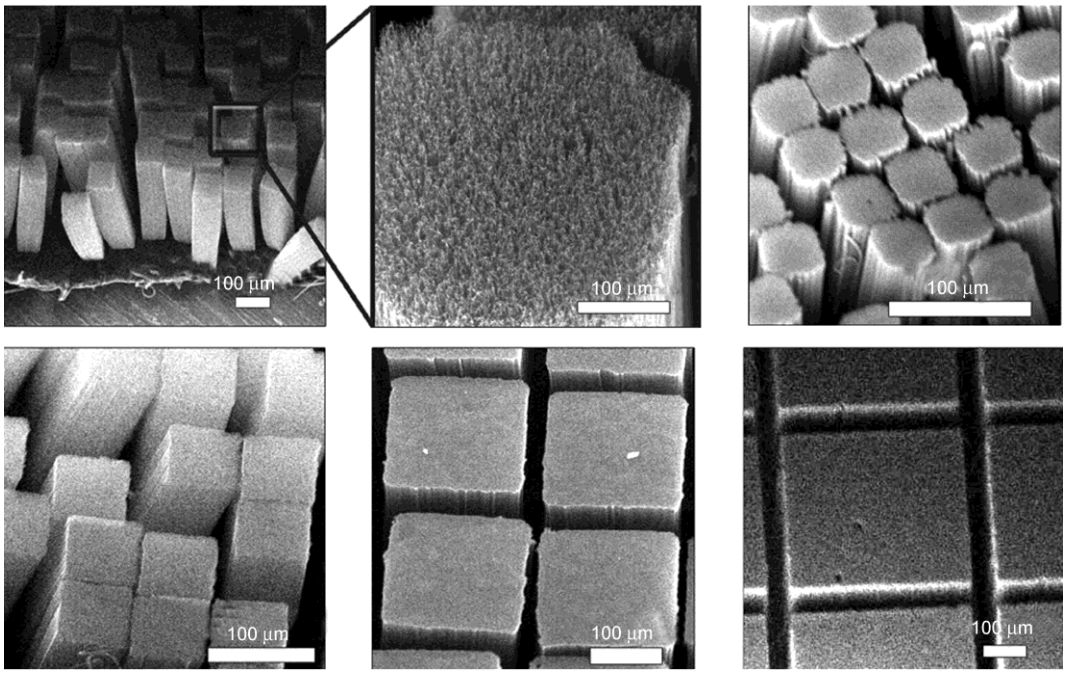


图 2　碳纳米管微图案阵列[20]

36 N 切向黏附力, 4 倍于壁虎生物体脚掌的黏附[20].

Dayton 大学的 Qu 等人[21]最近利用化学气相沉积的方法得到高密度的碳纳米管黏附阵列(图 3). 相对于 Ge 等的碳纳米刚毛阵列, Qu 等人的创新之处在于: 在黏附阵列顶部采用弯曲的碳纳米管代替直立的碳纳米管, 从而增加了刚毛的有效接触面积, 故得到了黏附性能更为强大的刚毛阵列. 在 20 N 的法向预载力下, 4 mm×4 mm 的黏附阵列片可产生 14.8 N 的切向黏附力, 切向黏附强度高达 92.5 N/cm^2, 远远超过壁虎生物体脚掌的黏附强度. 如此大的切向黏附强度, 若在吸附与脱附功能上加以改进, 实现稳定吸附和主动脱附, 类似壁虎飞檐走壁的本领在不久未来有望成为普通人都能掌握的基本技能. 近期 Qu 与本课题组合作, 积极推进该黏附阵列在仿壁虎机器人上的应用.

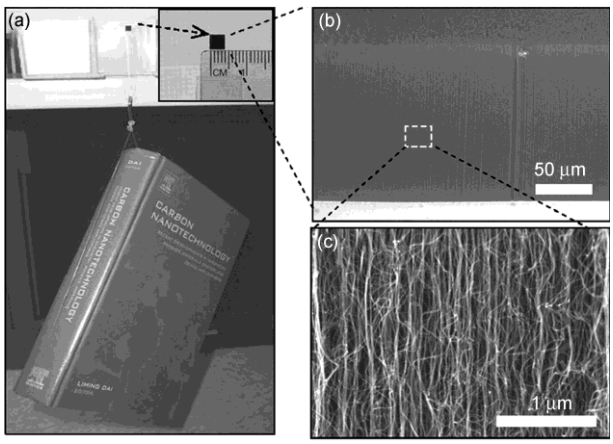


图 3　碳纳米管微黏附阵列[21]

(a) 悬挂 1480 g 重物实物图; (b)和(c) 不同放大倍数的 MWNT 阵列

California 大学 Lee 等人用聚丙烯 (polypropylene)制造出微米级黏附阵列(图 4)[10,12]. 每根刚毛弹性模量为 1 GPa, 直径 0.6 μm, 阵列基底厚度 25 μm. 在零预负载下, 2 cm × 2 cm 的阵列片切向能够承受 400 g 的重物, 且法向脱附便利, 具有较好的重复使用性.

国内, 梅涛课题组利用ICP深刻蚀方法制备阴型模板, 浇注硅橡胶和聚酰亚胺高分子聚合物, 固化后脱模得到多种长径比的微黏附阵列[22~24], 如图 5(a)~(c), 阵列垂直分布, 刚毛形状为圆柱状, 长度 1~10 μm, 直径 2~5 μm. 黏附性能测试表明: 长 5 μm, 直径 2 μm 的阵列的法向黏附强度最大, 最高可达 1.94 N/cm^2.

本课题组利用真空注模法浇注了硅橡胶刚毛阵列[25]. 图 6 为刚毛阵列的光学微观照片. 黏附力测试结果表明: 刚毛阵列的黏附力随刚毛密度增加而增加. 但这类刚毛的黏附力较弱, 尚不足于支持机器人

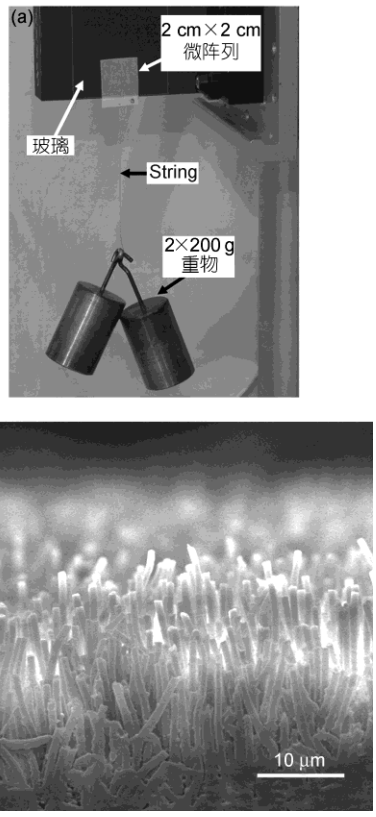


图 4 聚丙烯微阵列[10]

(a) 实物图: 2 cm×2 cm 阵列在光滑玻璃衬底上支撑 400 g 重物; (b) 微阵列的 SEM 图

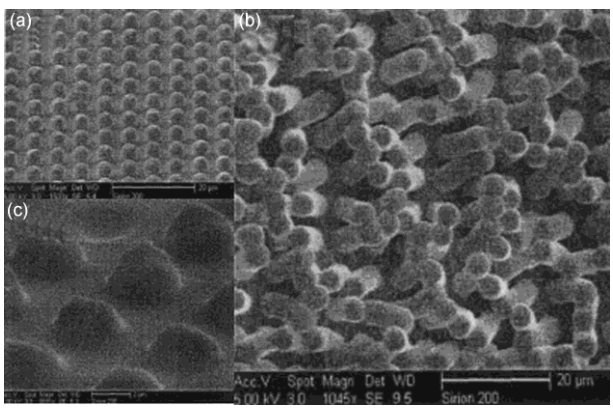


图 5 不同长径比的微黏附阵列[23]

的体重.

3.2 倾斜支杆刚毛阵列

相对于直立刚毛, 倾斜刚毛具有较好的调控黏附和脱附性能. 一方面刚毛的倾斜便于调控刚毛的

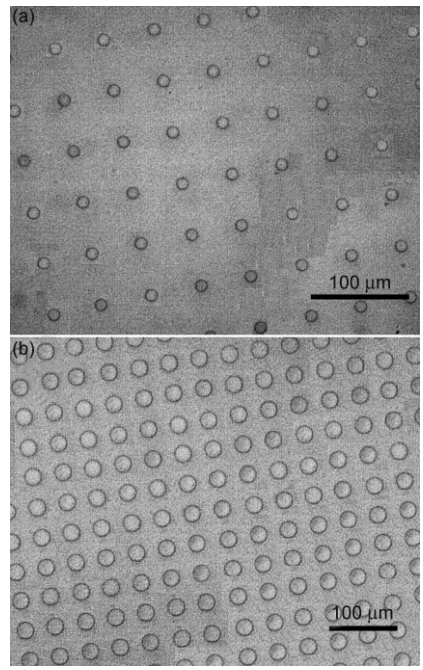


图 6 两种不同直径、密度、间距的刚毛阵列[25]

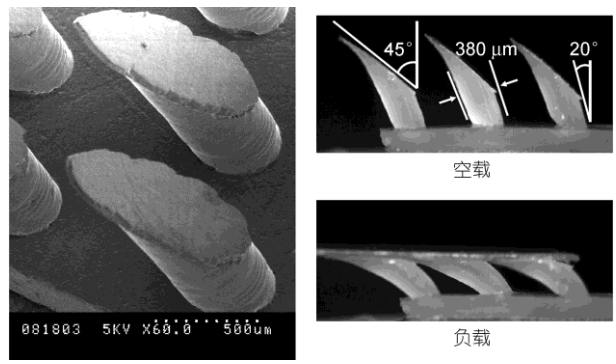


图 7 倾斜的毫米级黏附阵列[26]

接触面积. 刚毛与接触面所成的角度越小, 刚毛与壁面接触时越柔软, 具有更好的适应性. 另一方面便于刚毛阵列的脱附. 实际的刚毛阵列同时存在法向力和切向力, 刚毛阵列脱附时, 切向力减小, 法向力起作用, 促进刚毛阵列与接触面脱离. 鉴于倾斜刚毛的优点, 许多研究小组竞相开展倾斜刚毛的制备研究. 其中具有代表性的例子如下. Stanford 大学 Cutkosky 等人从优化支杆形貌出发, 研制了倾斜杆式毫米级刚毛阵列(图 7)[26~28]. 刚毛采用模具浇注法制备, 浇注材料为聚氨酯, 其末端尖锐, 黏附强度约为 0.24 N/cm^2, 具有明显的各向异性. 将之用于仿壁虎爬壁

机器人, 能实现壁虎爬行过程中类似的滑黏现象.

图 8 所示为 Carnegie Mellon 大学 Sitti 等人研制的支杆倾斜分布的微米级阵列[29]. 制备工艺采用模具注塑法, 光刻工艺制模, 聚氨酯材料浇注, 刚毛长径比为 2.4~4.0, 法向黏附强度可达 2.5~3.2 N/cm^2, 具有较好的柔顺性. 微黏附刚毛阵列与玻璃球面接触的黏附性能测试结果显示: 长径比大的阵列比长径比小的阵列黏附强度高.

本课题组利用金属铜板作为衬底, 聚四氟乙烯微斜孔为模板浇注了硅橡胶基倾斜刚毛阵列[30]. 如图 9 所示, 刚毛分布均匀, 支杆取向一致, 具有规则的末端形貌. 刚毛阵列的黏附性能达到国外同类研究成果的水平.

3.3 末端庞大刚毛阵列

支杆末端的膨大结构相当于增加刚毛的有效接触面积, 因此能增加黏附性能. 其优点是支杆可选用不易相互黏连材料, 高表面能材料只要用在支杆末端, 从而既达到提高黏附性能, 又实现相互不黏连、阻止刚毛阵列倒塌. 其缺点是要保证末端与支杆主体保持高的键合能力, 否则, 末端因与接触面的强吸附而与支杆脱离. 这类刚毛的制备工艺比较复杂, 很难保证末端具有一致性. 代表性的例子如下.

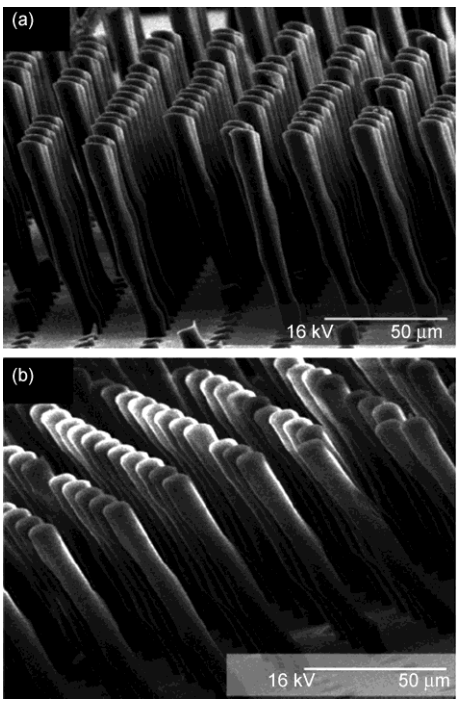


图 8 倾斜的聚氨酯黏附阵列[29]

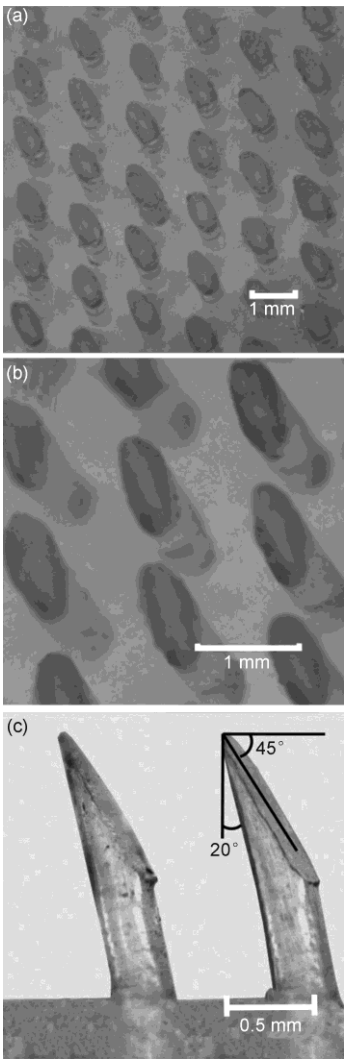


图 9 倾斜的硅橡胶基刚毛阵列[30]

Manchester 大学的 Geim 等人首先制备了聚酰亚胺微突起阵列, 微凸起直径 0.5 μm, 高 2 μm, 间距 1.6 μm(见图 10). 1 cm^{2}面积微突起阵列可悬挂一个蜘蛛人玩偶(高 50 cm, 重 40 g)[31]. 该类刚毛的末端膨大部分与支杆为同类材料, 具有高的完整性, 但其末端的膨大程度较小, 并没有高度增加实际的有效接触面积.

Arzt 等利用光刻与模具工艺, 制造了多种末端形貌的微黏附阵列(图 11), 并研究了各种接触末端形貌对黏附阵列法向黏附和切向黏附的影响[32], 结果显示接触末端对黏附性能有明显的影响, 蘑菇状的末端阵列的法向黏附最大, 匙突的末端阵列的法向黏附次之, 球状和平的末端阵列的黏附较小, 凹槽的末端黏附最小.

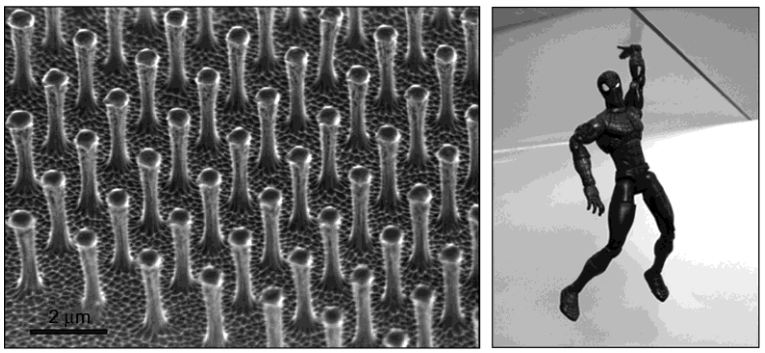


图 10 聚酰亚胺微阵列突起的 SEM 图片[31]

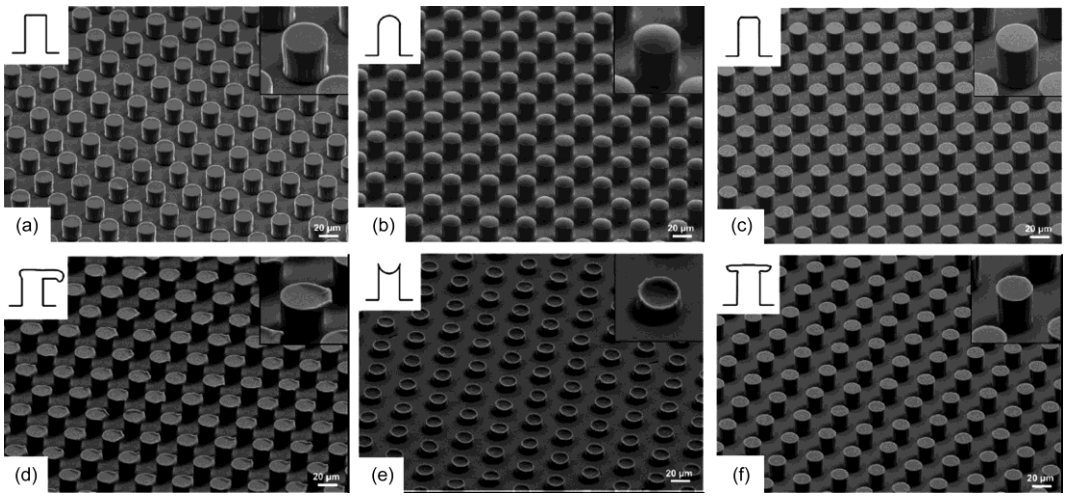


图 11 不同末端形貌的微阵列 SEM 图片[32]

(a) 平面; (b) 球形; (c) 平面圆角; (d) 匙突形; (e) 凹槽形; (f) 蘑菇形

德国 Gorb 等人采用模具注塑法, 得到长 100 μm, 直径 40 μm, 末端为蘑菇状的硅橡胶基微黏附阵列(见图 12)[33~36]. 置于光滑玻璃面上进行黏附性能测试, 此阵列的法向黏附强度可达 6 N/cm^2. 另外, 末端薄层使得黏附杆在细微颗粒污染的条件下仍具有充分的接触面积; 且杆间隙可容纳污染颗粒, 个别缺陷支杆也不会影响周围支杆的黏附性能.

3.4 多层复合结构

这类刚毛的优点是多层结构可多重组合, 从而在相同基底上形成不同形貌、角度和材质的黏附结构, 黏附性能优良, 调控性好, 自洁性能好, 可以满足在各种不同表面使用的需要. 缺点是制备工艺复杂, 代价昂贵、难以规模化生产, 同时不同层次结构之间的键合强度严重影响使用时的性能, 表现为易损伤和

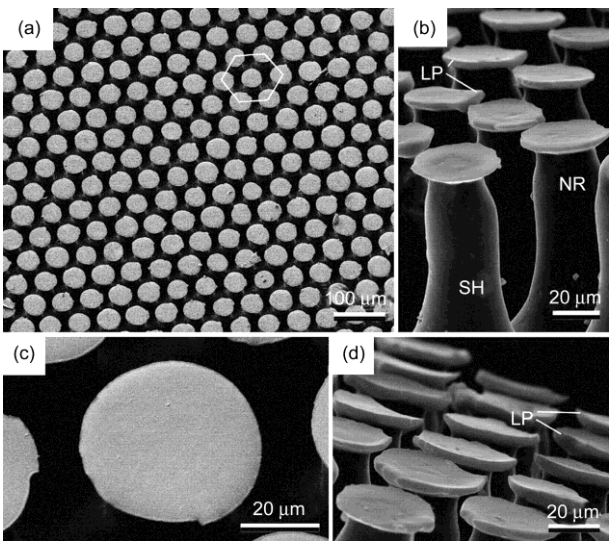


图 12 支杆末端膨大的黏附阵列[33]

(a)和(c) 正面; (b)和(d) 侧面

易脱落.

Carnegie Mellon 大学 Sitti 等人研制了多种具有多级复合结构的微黏附阵列[9,37~39]. 微阵列的制作工艺主要分为两步：首先采用光刻制模，聚氨酯材料浇注固化，脱模后得到不同直径、不同长径比、支杆垂直或倾斜、末端平整的微黏附阵列(如图 13(a)~(c)). 接着在微阵列支杆的末端固化一层不同于底端支杆的聚氨酯材料，从而得到末端膨大的结构，如图 13(d)~(g)所示；或者是将阵列吸附相同的聚氨酯，在固化的时候对阵列施加一定的载荷，使其形成盘状末端，图 13(h)所示；或将更小直径的末端盘状刚毛植于支杆的末端，形成两级结构，如图 13(i)所示. 复合结构完成后，黏附性能明显增加. 以 13(h)类刚毛为例，修饰末端后其黏附强度比修饰前增加 2~23 倍，摩擦力也增加了 60%~109%.

韩国 Jeong 等人提出了一种大长径比、多级分支结构微阵列的制造方法[40] (见图 14). 微阵列采用纳模注塑法制备，在聚氨酯上光刻出微米级的细孔，制成上模. 将聚氨酯上模覆盖在热塑性聚合物层上，黏流态的聚合物因毛细作用将顺孔而上，充满细孔，在一定温度下固化，脱模后便得到一层微米级的聚合物阵列. 末级的纳米级黏附阵列采用同样的固化方法，键合于次级的微米级支杆上，这样就得到了具有多级复合结构的刚毛阵列.

4 问题及展望

现有研究已经揭示了壁虎脚掌刚毛的黏附机制，提出了仿壁虎人工刚毛阵列设计的相关参数，从而加速了仿壁虎刚毛阵列的研制. 但人工刚毛阵列真正成为仿壁虎三维无障碍运动机器人的脚掌尚需一个过程，几个亟需解决的问题如下：

(1) 刚毛阵列的制备技术尚需进一步发展. 现有的仿生刚毛阵列微制造技术还远没有达到商业化应用的程度. 稳定制备工艺、提高成品率和生产效率，降低生产成本，需要材料化学和机器人等不同领域研究者的密切合作.

(2) 可调控吸附脚掌的制备是人工刚毛阵列制备技术中的关键. 壁虎的运动力学测试表明：壁虎运

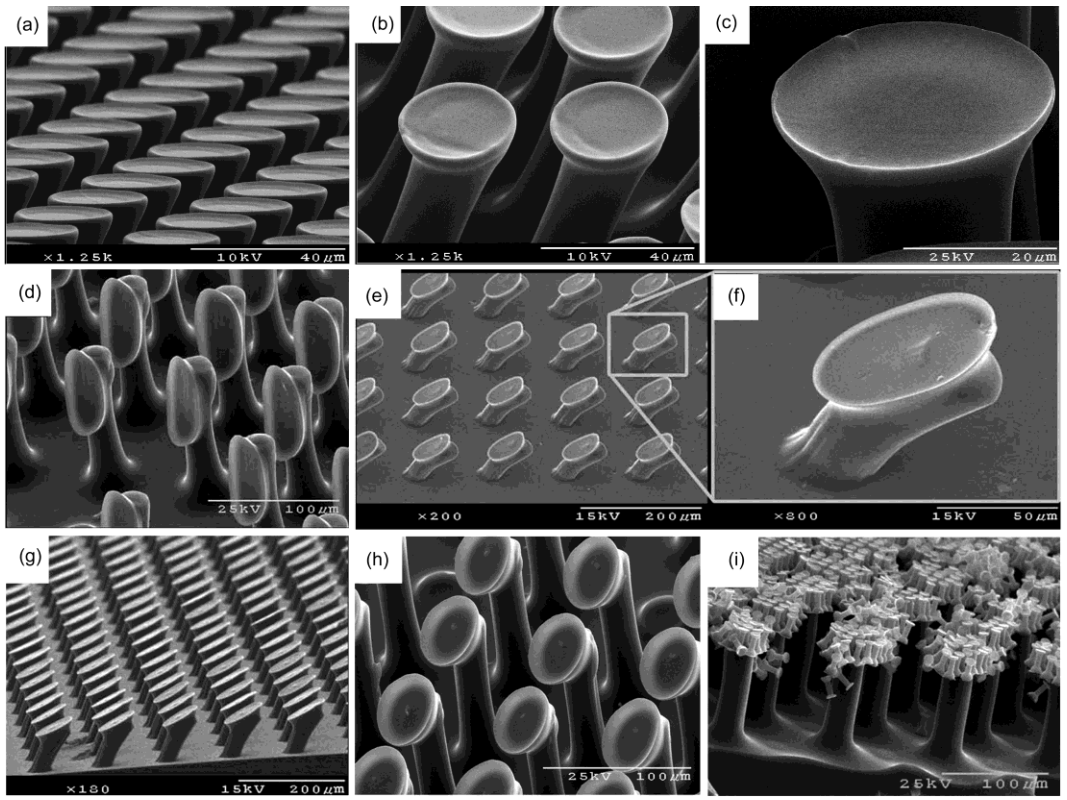


图 13 多级复合结构的微黏附阵列[9,37~39]

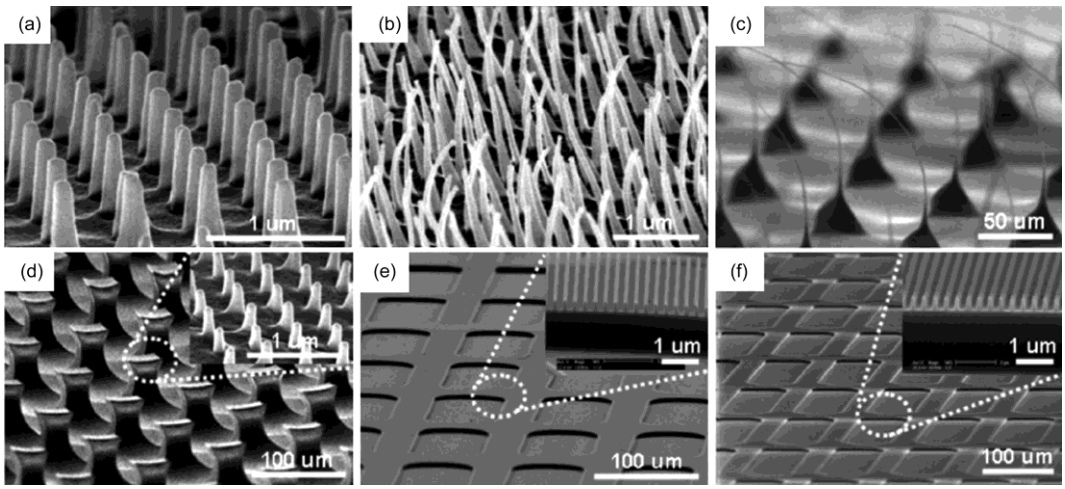


图 14 大长径比多级复合结构的黏附阵列[40]

动中法向预载荷仅数十毫牛, 但可产生数百毫牛的切向黏附力, 从而满足壁虎无障碍运动的要求.

(3) 多级分支的、自洁的、多功能仿壁虎刚毛阵列的制备技术也是一个难点. 现有技术很难制备兼顾这些全部优点的人工刚毛, 而这些优点是壁虎经过漫长的 35 亿年进化而来.

综上所述, 未来的黏附阵列应具有以下结构特征: 长径比大、多级分支、杆式倾斜和末端庞大. 其制备技术应着力寻求有商业趋势的生产方法: 自生长法可能成为主流; 模型法价低, 黏性要求不高应用较好. 刚毛的制备与机器人脚的结合及其控制的一体化将受重视并最终应用于特种机器人及相关领域.

参考文献

1 Autumn K, Liang Y A, Hsieh T. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681—685
2 Autumn K, Metin S, Liang Y A, et al. Evidence for van der waals adhesion in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 12252—12256
3 Sun W X, Neuzil P, Kustandi T S, et al. The nature of the gecko lizard adhesive force. J Biophys, 2005, 89: 14—17
4 Dai Z D, Sun J R. Progress in study on gecko locomotion and biomimetic gecko-robot. Prog Nat Sci, 2007, 17: 1—5
5 Gao H J, Wang X, Yao H M, et al. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. Mech Mater, 2005, 37: 275—285
6 Dai Z D, Sun J R. Yue D, et al. Morphology and contact mechanics influence adhesive characteristics of dung beetle's bristle and gecko's setae. Prog Nat Sci, 2007, 17: 1074—1081
7 Yu M, Ji A H, Dai Z D. Effect of microscale contact state of polyurethane surface on adhesion and friction. J Bionic Eng, 2006, 3: 87—91
8 Tian Y, Pesika N, Zeng H B. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103: 19320—19325
9 Michael P M, Burak A, Sitti M. Gecko-inspired directional and controllable adhesion. Small, 2009, 5: 170—175
10 Lee J, Majidi C, Schubert B, et al. Sliding induced adhesion of stiff polymer microfiber arrays. I. Macroscale behaviour. J R Soc Interface, 2008, 5: 835—844
11 Autumn K, Dittmore A, Santos D, et al. Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment. J Exp Biol, 2006, 209: 3569—3579
12 Schubert B, Lee J, Majidi C, et al. Sliding-induced adhesion of stiff polymer microfibre arrays. II. macroscale behaviour. J R Soc Interface, 2008, 5: 845—853
13 Autumn K, Peattie A N. Mechanisms of adhesion in geckos. Integr and Comp Biol, 2002, 42: 1080—1090
14 Autumn K, Gravish N. Gecko adhesion: evolutionary nanotechnology. Philos Trans R Soc A: Math, Phys Eng Sci, 2008, 366: 1575—1590
15 Hansen W, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. Proc Natl Acad Sci USA, 2005, 102: 385—389
16 Autumn K, Majidi C, Groff R E, et al. Effective elastic modulus of isolated gecko setal arrays. J Exp Biol, 2006, 209: 3558—3568
17 Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids. Proc R Soc B: Biol Sci, 1971, 324: 301—313
18 Gao H J, Yao H M, Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101: 7851—7856

19 杨帆, 杨卫. 从苍蝇与物面的触粘看尺度效应. 力学与实践, 2004, 26: 12—14
20 Ge L H, Sethi S, Ci L J, et al. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 10792—10795
21 Qu L T, Dai L M, Stone M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off. Science, 2008, 322: 238—242
22 任鸟飞, 汪小华, 王辉静, 等. 仿壁虎微纳米黏附阵列研究进展. MEMS 器件与技术, 2006, 8: 386—392
23 陈士荣, 梅涛, 倪林, 等. 仿壁虎微纳米黏附阵列的工艺制作. MEMS 器件与技术, 2006, 9: 434—437
24 王辉静. 仿壁虎微米阵列的加工及其黏附作用分析. MEMS 器件与技术, 2008, 3: 162—165
25 莫桂冬. 仿壁虎机器人脚掌粘性材料的仿生学研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2008
26 Santos D, Kim S, Spenko M, et al. Directional adhesive structures for controlled climbing on smooth vertical surfaces. In: 2007 IEEE Int Conf Rob Autom, 2007, 4: 1261—1267
27 Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. IEEE Trans Rob, 2008, 24, 65—74
28 Santos D, Spenko M, Parness A, et al. Directional adhesion for climbing: theoretical and practical considerations. J Adhes Sci Technol, 2007, 12: 1317—1341
29 Aksak B, Murphy M P, Sitti M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays. Langmuir, 2007, 23: 3322—3332
30 刘彬, 张昊, 郭东杰, 等. 倾斜仿生刚毛的设计、制备及黏附性能研究. 摩擦学学报, 2009, 29: 1—6
31 Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nat Mater, 2003, 2: 461—463
32 Aranzazu D C, Christian G, Eduard A. Contact shape controls adhesion of bio-inspired fibrillar surfaces. Langmuir, 2007, 23: 10235—10243
33 Gorb S, Varenberg M, Peressadko A, et al. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. J R Soc Interface, 2007, 4: 271—275
34 Gorb S, Varenberg M. Mushroom-shaped geometry of contact elements in biological adhesive systems. J Adhes Sci Technol, 2007, 12: 1175—1183
35 Gorb S, Sinha M, Peressadko A, et al. Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. Bioinspiration Biomimetics, 2007, 2: 117—225
36 Gorb S, Varenberg M. Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. J R Soc Interface, 2007, 4: 721—725
37 Murphy M P, Aksak B, Sitti M. Adhesion and anisotropic friction enhancements of angled heterogeneous micro-fiber arrays with spherical and spatula tips. J Adhes Sci Technol, 2007, 12: 1281—1296
38 Aksak B, Murphy M P, Sitti M. Gecko inspired micro-fibrillar adhesives for wall climbing robots on micro/nanoscale rough surfaces. IEEE Int Conf Rob Autom, 2008, 5: 3058—3063
39 Kim S, Sitti M. Biologically inspired polymer microfibers with spatulate tips as repeatable fibrillar adhesives. Appl Phys Lett, 2006, 89: 261911-1—3
40 Jeong H, Lee S, Kim P, et al. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force. Colloids Surf A, 2008, 313: 359—364
41 Yurdumakan B, Raravikar N R, Ajayan P M, et al. Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes. Chem Commun, 2005, 30: 3799—3801
42 Northen M T, Turner K L. A batch fabricated biomimetic dry adhesive. J Nanotechnol, 2005, 16: 1159—1166