中国科学 C 辑: 生命科学
2007 年 第 37 卷 第 5 期: 568~574
http://www.scichina.com

《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

大壁虎与无蹼壁虎脚底刚毛结构与其黏附性能的比较研究

郭 策[①*] 王文波[①] 于 敏[①] 戴振东[①] 孙久荣[②*]

(① 南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016; ② 北京大学 生命科学学院, 北京 100871)

摘要 采用扫描电子显微镜和细胞组织学技术比较大壁虎(*Gekko. gecko*)和无蹼壁虎(*Gekko. swinhonis*)脚底刚毛的形态构筑, 并观测了其与黏附性能的关系. 扫描结果显示: 壁虎脚底的刚毛排列整齐而密集、方向规则, 尖端弯曲而分支. 其中, 大壁虎脚底刚毛排列呈束状, 头端分支间距较小(小于 0.2~0.3 μm), 均弯向脚心, 角度规范(约 10°), 末梢呈花托状膨大; 无蹼壁虎脚底刚毛两级分支明显, 分支间距较大(第一级分支大于 0.5 μm, 第二级分支大于 1 μm), 末梢呈卷须状, 多角度弯曲. 组织学检测发现, 大壁虎和无蹼壁虎的刚毛均为实体, 内容物丰满, 毛底部有大量上皮细胞、脂肪细胞、色素细胞和肌肉组织, 没有腺细胞. 功能性实验证实, 壁虎脚底毛形态构筑的规范性与其黏附性能正相关, 改变脚底刚毛的形态构筑可显著降低其黏附性能. 同时, 测试结果表明 2 种壁虎脚底毛的切向黏附力均大于其法向黏附力, 相对体重而言, 无蹼壁虎具有更强的黏附性能, 特别是其法向黏附性能更优于大壁虎. 壁虎刚毛的形态构筑和组织学特点为制备仿壁虎刚毛群提供了重要信息.

关键词 大壁虎(*G. gecko*) 无蹼壁虎(*G. swinhonis*) 刚毛 黏附 仿生学

作为特种机器人大家族中的一员, 爬壁机器人成为世界各国的研究热点之一. 研制爬壁机器人, 首先必须解决机器人对垂直壁面、天花板等表面的黏附问题. 目前国际上所采用的主要有真空吸附和磁吸附的方法, 如英国的RobugⅡ和法国的RM3, 但这些技术在应用中都受到一定的限制[1]. 这促使人们将目光转向自然界, 寻求利用仿生科学来解决这一难题.

壁虎能够在墙壁、天花板等任何表面做无障碍运动, 其高超的攀爬能力一直是科研人员重点研究的对象. 实验中, 壁虎能以 1 m/s的速度在垂直的抛光玻璃表面上攀爬, 且只靠一个脚趾就能够把整个身体悬挂在墙上. 壁虎拥有这一绝技的秘密在于其脚掌上的数以万计的刚毛. 壁虎脚底有许多趾垫, 每个趾垫上生有若干行微小的刚毛, 刚毛总数可达数百万根以上[2]. 它们在与表面接触时产生的黏附力使壁虎牢固地吸附在接触面上. 美国科学家Autumn及其同事利用MEMS(微机电系统)技术测试壁虎单根离体刚毛的黏附力, 发现当刚毛上的卷须和物体表面贴得非常近时, 可以产生微弱的分子间作用力, 即范德华力(van der Waals)[2,3], 于是提出壁虎刚毛黏附机制的van der Waals假说. 他们的工作得到了许多同行的认同和引用[4~8].

壁虎的种类很多. 其中, 在我国分布较广的有大壁虎(*G. gecko*)和无蹼壁虎(*G. swinhonis*). 大壁虎体大粗壮, 成体全长可达 300 mm以上, 重达 150 g; 无蹼壁虎成体全长可达 130 mm以上, 体重在 7 g左右. 2

收稿日期: 2006-04-12; 接受日期: 2007-09-10
国家自然科学基金面上项目(批准号: 30400086, 30770285 和 30470230)及国家自然基金重点项目(批准号: 60535020)资助.
* 联系人, E-mail:guozc@nuaa.edu.cn; sjr@pku.edu.cn

种壁虎除体形差异大以外, 其生活习性也不同. 大壁虎多栖息于峰峦突兀、岩石暴露的石山岩缝中, 肢体常呈水平和垂直攀缘状态, 分布范围较小, 主要分布于我国云南、广东、广西等地; 无蹼壁虎常活动于建筑物的墙上、门、窗及天花板等处, 活动灵活, 肢体常呈垂直和倒悬状态, 分布范围很广, 在我国大部分省区都有分布. 目前, 国内外多以大壁虎为对象, 研究壁虎的形态特征以及脚掌刚毛的黏附能力, 见文献 [2, 3, 9~12]; 而对无蹼壁虎的研究甚少.

本工作将大壁虎和无蹼壁虎的脚底刚毛的形态和黏附性能做比较性研究, 通过分析壁虎刚毛的黏附作用与形态构筑间的关系, 来揭示壁虎脚底毛的黏附机制. 为制备仿壁虎刚毛群、解决爬壁机器人的黏附问题提供重要信息.

1　材料与方法

1.1　扫描电子显微镜观察

成体大壁虎和无蹼壁虎各 4 只, 用于扫描电子显微镜观察其脚趾刚毛的形态. 每种雌、雄各半. 大壁虎全长 261~280 mm, 平均体重 79.6 ± 6.3 g, 无蹼壁虎全长 113~126 mm, 平均体重 3.7 ± 0.7 g. 依照文献 [13], 用 10%甲醛固定后, 取壁虎的趾部, 用乙醇(70%, 80%, 90%, 95%, 100%)逐步脱水, 每一个步骤所用时间约为 24 h. 临界点干燥(CPDO30 Critical Point Dryer)持续 3 h后, 用离子溅射仪(SCD005 Sputter Coater)喷金, 最后用FEI QUANTA 200 (日本光电)扫描电子显微镜观测.

1.2　细胞组织学观测

成体大壁虎和无蹼壁虎各 4 只, 用于细胞组织学观测. 每种雌、雄各半. 依照文献 [14]的方法, 将壁虎的脚趾分别进行固定、中和、水洗、脱水、包埋、固定切片(厚 10 μm)和染色, 最后通过Motic B系列生物显微镜(麦克奥迪公司, 中国)进行观测和分析.

1.3　壁虎刚毛的改形和黏附能力检测

成体大壁虎和无蹼壁虎各 5 只进行刚毛改形和黏附力检测.

(1) 壁虎刚毛的改形方法: 在组织显微镜下, 用自制的微型电烙铁(15 W, 烙铁头长 50 mm, 尖端直径 1 mm)距离约 5 mm 烘烤离体大壁虎和无蹼壁虎脚趾底部的刚毛. 控制烘烤时间(约 2~6 s), 制备不同程度改形刚毛的脚趾. 在扫描电子显微镜下观测烤制的结果.

(2) 观测改形刚毛的黏附能力: 利用自行研发的两维多功能摩擦磨损实验台(传感器灵敏度: 5 mN; 测试范围: 0~2 N)和 AcqKnowledge 数据采集与处理软件(BIOPAC Systems, Inc, USA)分别测试大壁虎和无蹼壁虎第Ⅲ脚趾改形前、后的法向黏附力和切向黏附力, 并通过 t 检验判断改形前后及不同程度改形对黏附性能影响的差异.

2　结果

2.1　大壁虎与无蹼壁虎刚毛的形态和构筑间的差异

无蹼壁虎和大壁虎的每只脚趾底均形成膨大的趾垫, 趾垫的表面横行排列着数目不等的皮瓣, 又称趾下瓣(图 1(a)和(b)), 趾下瓣上密集生长着数百万根刚毛. 从脚趾Ⅰ到脚趾Ⅴ, 无蹼壁虎的趾下瓣平均为 6, 7, 8, 8 和 7 排; 大壁虎的趾下瓣平均为 14, 16, 18, 19 和 16 排.

扫描电子显微镜的结果显示, 壁虎刚毛排列整齐而密集、方向规则、头端略弯向趾心并分支. 其中, 无蹼壁虎的刚毛长约 60~70 μm, 直径在 1~3 μm. 刚毛下段垂直于皮瓣, 顶端呈多角度弯曲. 在刚毛上端有两级分支, 一根刚毛先分 5~7 根分支, 后者再分 3~5 根分支, 分支较疏散, 第一级分支间距大于 0.5 μm, 第二级分支间距大于 1 μm, 尖端末梢呈卷须状(见图 1(c)); 大壁虎的刚毛排列一般成束状, 每一束包含 4~6 根刚毛, 刚毛长约 100 μm, 直径约为 5 μm. 头端分支排列非常紧密, 间距小于 0.2~0.3 μm, 大壁虎刚毛头端均弯向脚心, 弯曲角度规范, 约为 10°, 末梢膨大(约为毛径的 2 倍)呈花托状(图 1(d)).

2.2　壁虎刚毛的内部结构

观测无蹼壁虎和大壁虎脚趾刚毛的纵向切片, 2 种标本的组织学切片中均没有发现腺细胞, 从而可排除壁虎脚底毛与接触面产生黏附力过程中有自身的黏液或体液的作用. 大壁虎和无蹼壁虎刚毛切片显示, 二者刚毛基部的细胞组织构造相似, 均存在着上皮细胞、脂肪细胞、色素细胞和肌肉组织等(图 2(a)和(b)).

观测两种壁虎脚趾刚毛的横向切片, 发现壁虎脚底毛的横断面内容物充实, 形态不均一, 图 3 是大壁虎脚底刚毛的横向切片. Alibardi 已用放射免疫细

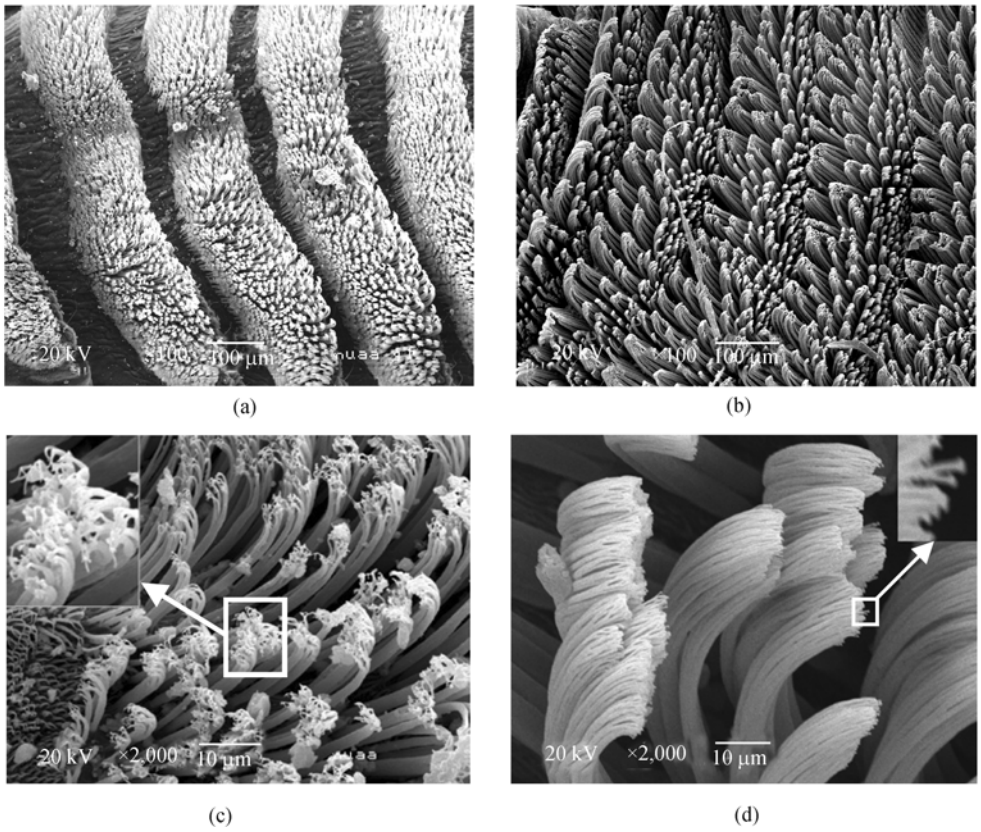

图 1 大壁虎和无蹼壁虎的脚底毛

(a) 无蹼壁虎的脚趾皮瓣, 150×; (b) 大壁虎的脚趾皮瓣, 100×; (c) 无蹼壁虎的脚趾刚毛(2000×), 左上: 刚毛局部放大图(5000×); (d) 大壁虎的脚趾刚毛(2000×), 右上: 刚毛局部放大图(10000×)

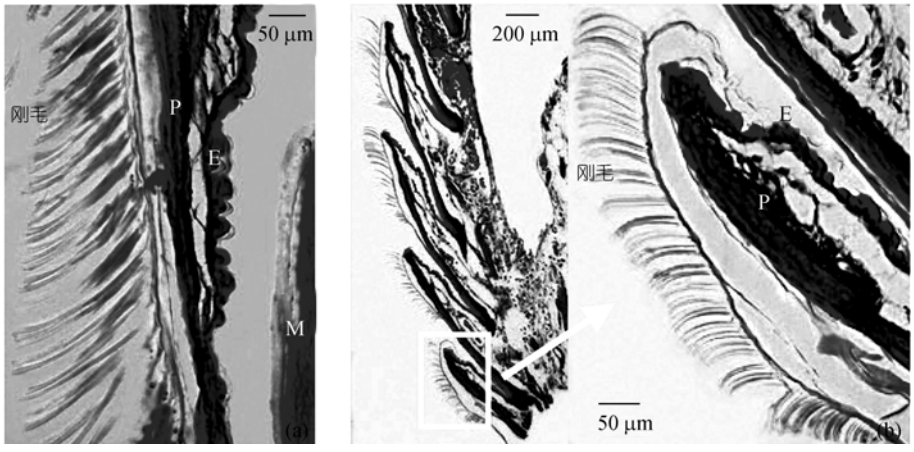

图 2 壁虎刚毛基部的细胞组织构造

(a) 大壁虎刚毛纵向切片; (b) 无蹼壁虎刚毛纵向切片. E: 上皮细胞; F: 脂肪细胞; P: 色素细胞; M: 肌肉组织

胞化学方法证实, 其中存在大量的Beta-角蛋白[15], 其他蛋白组分还有待做进一步观测.

2.3 壁虎刚毛的结构与黏附功能相关

(1) 壁虎刚毛的改形处理: 在组织显微镜监测下, 控制烘烤距离(约 5 mm), 烘烤时间分别为 2, 4, 6 s, 制备不同程度改形的刚毛. 依刚毛的改形程度, 将离体的脚趾分 3 组(每组 $n = 5$), 图 4(a)是大壁虎刚毛烘烤前后的扫描电镜, 由图中可见: 低变组 2 中仅少量刚毛变形和出现横向交织; 中变组 3 中因大量刚毛尖

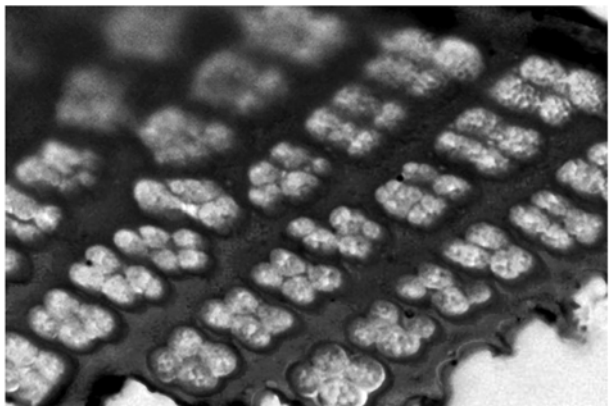

图 3　壁虎脚底毛横向切片(1000×)

端变形, 大部分刚毛“胶”连在一起; 高变组 4 中所有的刚毛被烤“焦”, 丧失刚毛构筑的形态; 没有烘烤的为正常组 1. 无蹼壁虎刚毛做同样处理.

(2) 改形的刚毛丧失黏附能力: 分别测量大壁虎和无蹼壁虎 15 只脚趾刚毛改形前、后的黏附力. 为了观测脚趾下毛的黏附力, 测试前剪去脚趾前端的爪. 利用三维推进器(成都仪器厂)夹持壁虎脚趾, 模拟壁虎脚趾发力模式, 使脚趾与实验台传感器的受力面夹角约为 10°. 测量时保持均匀、恒速向后(脚心)牵拉脚趾, 同时通过两维多功能摩擦磨损实验台测量其法向和切向黏附力, 数据经 AcqKnowledge 数据采集与处理软件记录和分析. 两种壁虎刚毛的法向和切向黏附力变化如图 4(b), 图 4(c)和图 4(d)所示. 实验数据的统计学分析结果见表 1 和表 2.

由结果可知, 2 种壁虎刚毛的切向黏附力均大于其法向黏附力. 考虑到壁虎脚趾与物体表面的实际接触面积, 正常组大壁虎和无蹼壁虎刚毛的切向黏附力分别约 3.7 N/cm^2 和约 2.7 N/cm^2, 法向黏附力分别约 0.8 N/cm^2 和约 1.8 N/cm^2. 刚毛改形后在两个方向上的黏附力均明显降低, 降低程度与改形程度密切相关, 各组间差异显著. (Student t 检验, 大壁虎正常组、低变组和中变组的切向黏附力: n=10, t 分别为 t = 2.6586, P<0.05; t=3.3597, P<0.005; 大壁虎正常组、低变组和中变组的法向黏附力: n=10, t 分别为 3.3882, 4.6343, P<0.005. 其余各组实验数据差异明显, P <0.001).

3　讨论

壁虎脚底刚毛的形态和构筑与其黏附功能密切相关. 通过壁虎刚毛改形前后的黏附性能测试进一步证实了 Kellar Autumn 等人的推测. Kellar Autumn 等人认为, 壁虎脚趾黏附的能力决定于脚趾的大小和形状, 而不是表面的化学构成.

大壁虎和无蹼壁虎体重不同, 脚趾的大小相异, 其黏附性能也不同. 本文利用两维多功能传感器同时测量、比较了大壁虎和无蹼壁虎脚底毛的切向黏附力和法向黏附力, 较全面地衡量了两种壁虎的脚掌黏附性能. 大壁虎脚底毛切向黏附力为 29.6 N, 约是体重的 40 倍(总的切向黏附力(N)=单位面积切向黏附力(N/ cm^2)×面积(5 脚趾×4, cm^2)), 法向黏附力为 6.4 N, 约是体重的 10 倍; 而无蹼壁虎脚底毛切向黏附力为 3.8 N, 约是体重的 70 倍, 法向黏附力为 2.5 N, 约是体重的 50 倍. 可见, 相对体重而言, 无蹼壁虎具有更强的黏附性能, 特别是其法向黏附性能更优于大壁虎, 这是与无蹼壁虎的生活习性相适应的. 与栖息于石山岩缝中的大壁虎相比, 常活动于建筑物内外的无蹼壁虎肢体多呈垂直和倒悬状态, 因此需要更大的法向黏附力. 当对壁虎刚毛改形时, 无蹼壁虎刚毛的黏附性能遭受破坏更明显, 这说明就形态构筑而言, 无蹼壁虎脚掌的黏附性能更依赖其刚毛尖端的精细结构.

在大壁虎脚底毛的细胞组织学观测中, 发现大壁虎脚底毛具两种形态: 其一: 脚底毛呈刚毛样结构, 排列在皮肤的表面, 看不到毛囊结构(见图 5(a)); 其二: 脚底毛呈细胞样结构(见图 5(b)), 是毛囊细胞的突起. 毛囊细胞内容物丰富, 细胞核着色清楚. 这两种状态来自脚底毛细胞不同的发育过程, 表明脚底毛来自毛囊细胞, 在发育过程中毛囊逐渐退化. 意大利的Alibardi[15]观测壁虎脚底毛的化学构成时, 发现无论刚毛处于哪一种发育状态, 其内容物都是非常丰富的, 主要成分是β-角蛋白, 其余成分尚待进一步研究. Autumn及其同事利用微传感器测量了壁虎脚单根刚毛的黏附力, 排除了吸力、胶合力、静电等其他作用力的可能, 认为壁虎脚底毛与接触面间产生黏附力的本质是分子间作用力, 即范德华力(van der Waals) [2,3], 但Autumn等人在测量单根壁虎刚毛的黏附力时发现, 刚毛必须和接触对象有一定相对滑动才能测到黏附力. 这一实验过程与范德华力的作用机制并非完全吻合. 我们在实验中也发现, 离体刚毛的黏附力只在牵拉过程中出现. 脚趾与接触面之间

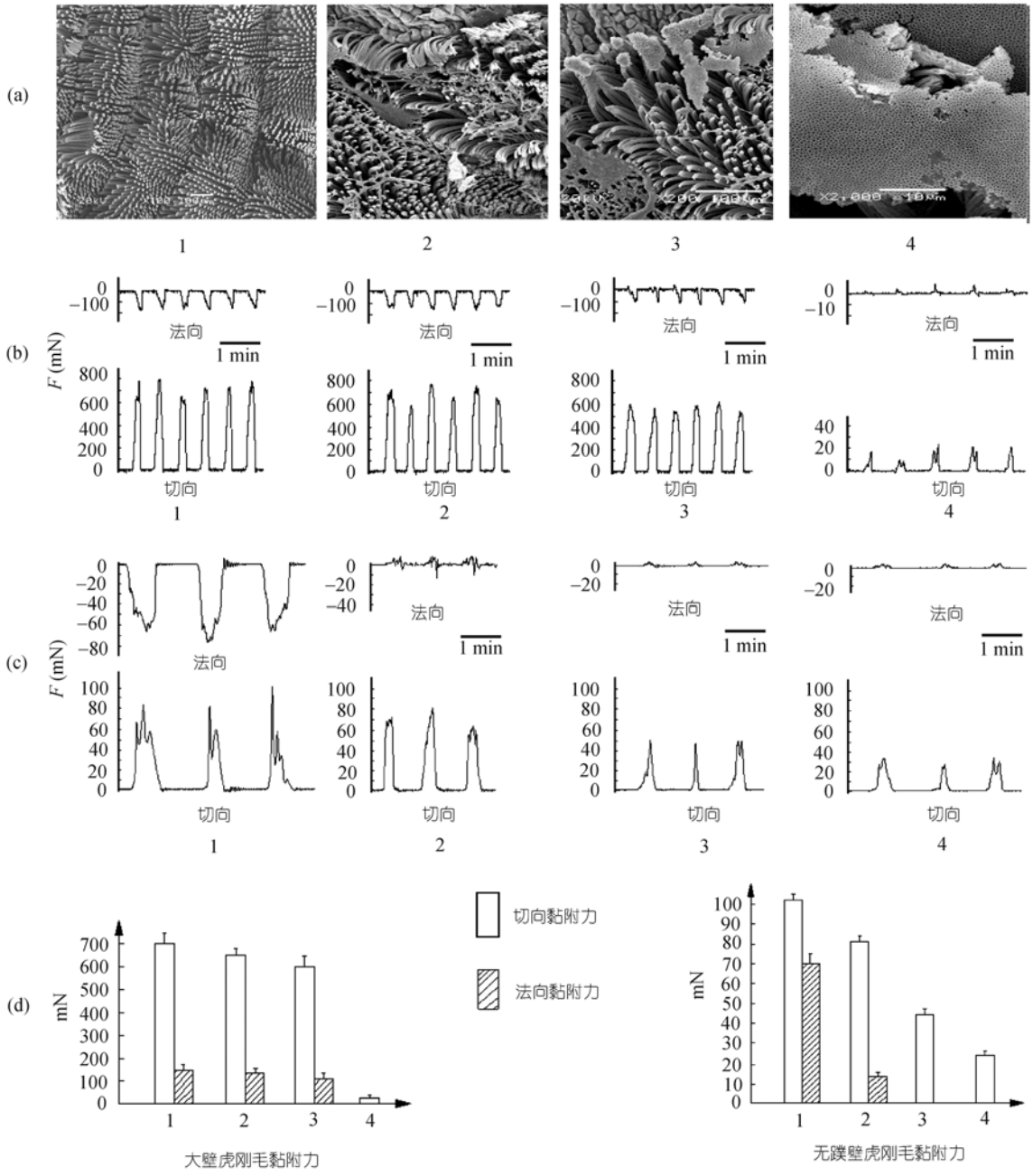

图 4 壁虎刚毛改形前后的切向黏附力和法向黏附力比较

(a) 大壁虎脚底刚毛改形前后的形态比较; (b) 大壁虎脚底毛改形前后的黏附力; (c) 无蹼壁虎脚底毛改形前后的黏附力; (d) 两种壁虎脚底毛改形前后的切向黏附力和法向黏附力. 1: 正常组; 2: 低变组; 3: 中变组; 4: 高变组

表 1 大壁虎脚底刚毛改形前后黏附力比较

组次	正常组/mN	低变组/mN	中变组/mN	高变组/mN
切向黏附力 X ± S	697.2 ± 43.7	653.0 ± 24.1	601.7 ± 44.9	19.6 ± 1.9
法向黏附力 Y ± S	–147.7 ± 16.8	–131.9 ± 9.4	–111.6 ± 17.1	–

表 2　无蹼壁虎脚底刚毛改形前后黏附力比较

组次	正常组	低变组	中变组	高变组
切向黏附力 $X \pm S$	108.4 ± 4.3	82.2 ± 4.2	43.7 ± 4.5	23.9 ± 2.8
法向黏附力 $Y \pm S$	−69.2 ± 7.4	−13.3 ± 2.6		

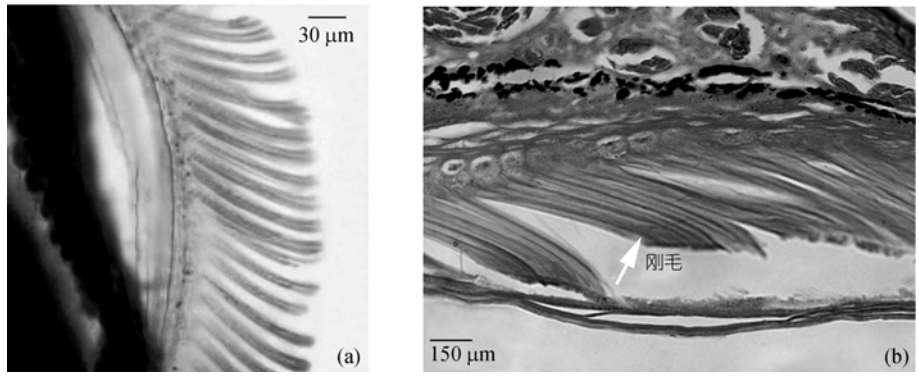

图 5　壁虎脚底毛发育过程中的两种不同形态

夹角约 10°牵拉时, 刚毛的黏附力较大. 这一角度使壁虎在攀缘中脚趾尖端刚毛从弯向脚掌变为垂直脚掌, 使刚毛与攀缘表面的接触刚好处于最佳接触角度. 特别是脚趾尖端的刚毛在牵拉中处于最佳的动态发力状态. 壁虎脚底毛对所接触界面的应答可能是主动的. 刚毛内可能存在可收缩性蛋白(此推测已得到证实, 材料待发表), 它和脚底的神经肌肉组织共同参与这种主动应答的调节. 因此, 壁虎脚底毛与接触面产生黏附力的过程中可能存在生物学机制, 而 Autumn 等人则没有考虑到这种可能性.

壁虎脚底刚毛的形态和构筑给黏附的仿生学研究和应用以启迪, 为科学家制造“人工合成黏结剂”和仿生刚毛群, 解决爬壁机器人的稳定吸附等难题提供了重要蓝图. 国际上关于仿生刚毛的制造竞争处于白热化状态. 如美国的Sitti和Fearing等人最早用腹膜方法制得的四面锥形的仿生刚毛 [16,17]和英国的Geim等人用电子束平版印刷法和氧等离子干刻蚀法制造出的仿生刚毛 [18]. 但目前制备的人造刚毛的黏附性能均不理想, 其中Sitti和Fearing等人制得的仿生刚毛长约 6 μm, 直径约为 6 μm, 毛密度约为 $5\times10^4/cm^2$, 黏附力很小, 这可能是由于没有顾及壁虎刚毛尖端分支和膨大的微结构, 没有对刚毛末端精细结构进行仿生学设计, 致使用于黏附的有效接触面积大大不足; 目前所有人造刚毛群的形态都是直立的, 没有模拟壁虎刚毛顶部的弯曲和动态效应. 壁虎刚毛顶部呈一定弯曲角度, 这与壁虎爬行时脚趾下毛的滑行动态模式相匹配. 壁虎可通过脚底神经-肌肉组织, 或通过毛内部可收缩蛋白或弹性物质改变毛的弯曲角度, 调节刚毛的刚度和韧性, 对界面的刺激做主动性应答; Geim制得的仿生刚毛虽然黏附力可高达 3 N/cm^2, 却备受刚毛间“黏连”现象的困扰. 纤细的刚毛(直径< 0.3 μm)与物体表面接触时极易倒下, 密集的排列(间距< 1.6 μm)也会引起刚毛彼此间黏连. 这种现象正如我们的刚毛改形实验所显示的, 会使黏附性能明显下降. 仿生刚毛间的“黏连”现象极大地妨碍了仿生刚毛的应用. 为什么壁虎脚底排列更密集、分支更精细的刚毛群却没有此现象? 这是否与壁虎脚底毛表面生物材料相关? 是否与壁虎脚底毛表面生物电学极性相关? 本结果和正在进行的刚毛的理化性质的研究将有助于进一步揭示壁虎脚底毛黏附机制, 并给仿生刚毛的制备提供新的理念.

参　考　文　献

1　李鲁虹. 英国特种机器人的应用研究情况. 机器人情报, 1992, 3: 2342—2347

2　Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. Nature, 2000, 405: 681—685[DOI]

3　Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. Proc Nat Acad Sci USA, 2002, 99(19): 12252—12256[DOI]

4　Bundle M W, Dial K P. Mechanics of wing-assisted incline running

(Wair). J Exp Biol, 2003, 206(24): 4553—4564[DOI]
5 Gorb S N, Beutel R G, Gorb E V, et al. Structural design and biomechanics of friction-based releasable attachment devices in insects. Integr Comp Biol, 2002, 42(6): 1127—1139[DOI]
6 Desiraju G R. Chemistry beyond the molecule. Nature, 2001, 412(6845): 397—400[DOI]
7 Gee H. Biomechanics-Gripping feat. Nature, 2000, 405(6787): 631—631[DOI]
8 Federle, W, Endlein, T. Locomotion and adhesion: Dynamic control of adhesive surface contact in ants. Arthropod Struct Dev, 2004, 33: 67—75[DOI]
9 Zaaf A, Damme Van R, Herrel A, et al. Spatiotemporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. J Exp Biol, 2001, 204(7): 1233—1246
10 Zaaf A, Herrel A, Aerts P, et al. Morphology and morphometrics of the appendicular musculature in geckoes (Lepidosauria) with different locomotor habits. Zoomorphology, 1999, 119(1): 9—22[DOI]
11 Zaaf A, Damme van R. Limb proportions in climbing and ground-dwelling geckos (Lepidpsauria, Gekkonidae): A phylogenetically informed analysis. Zoomorphology, 2001, 121(1): 45—53[DOI]
12 孙久荣, 郭策, 程红, 等. 蜣螂与壁虎刚毛的比较及改形对其功能的影响. 动物学报, 2005, 51(4): 761—767
13 程红, 孙久荣, 李建桥, 等. 臭蜣螂体壁表面结构与其减黏脱附功能的关系. 昆虫学报, 2002, 45(2): 175—179
14 程红, 陈茂生, 孙久荣. 臭蜣螂体壁结构的组织学分析. 昆虫学报, 2003, 46(4): 429—435
15 Alibardi L. Ultrastructural autoradiographic and immunocytochemical analysis of setae formation and keratinization in the digital pads of the gecko *Hemidactylus turcicus* (Gekkonidae, Reptilia). Tissue & Cell, 2003, 35: 288—296[DOI]
16 Sitti M, Fearing R S. Nanomolding Based Fabrication of Synthetic Gecko Foot-Hairs. IEEE conference on Nanotechnology, Washington DC, 2002, Aug. 26—28
17 Sitti M, Fearing R S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives. J Adhe Sci Technol, 2003, 18(7): 1055—1074[DOI]
18 Geim A K, Dubonos1 S V, Grigorieva1 I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nature Materials, 2003, 2: 461—463[DOI]