

壁虎超强的粘附能力 —— 隐藏在脚下的奥秘

彭志龙¹⁾ 陈少华

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 壁虎具有超强的黏附爬行能力, 几乎能在任意表面上行走, 其特殊的黏附本领引起了人们的广泛关注。本文介绍了壁虎脚掌的精细黏附系统结构是其超强黏附能力的主要来源, 并综述了目前国内外对壁虎黏附机理的研究进展。最后, 给出了仿生黏附的应用前景。

关键词 壁虎, 黏附, 多级结构, 仿生纤维

世界上许多生物在自然界“适者生存”及长期演化中练就了一身特殊的本领, 例如, 壁虎、蜘蛛、蚂蚁等, 它们不仅能在垂直墙壁上运动自如, 而且能在天花板上停留和爬行, 地球引力对它们似乎没什么影响。多少年来, 人们对生物这种飞檐走壁的能力一直众说纷纭, 尤其是体重较大的壁虎。数千年前人类就已经注意到壁虎这种超能力, 亚里士多德 (Aristotle, B. C. 384~322) 曾在《动物自然科学史》中记载: “壁虎即使头部向下也能在树上自由上下爬行”。我们不禁要问: 是什么使壁虎拥有如此超强粘附力? 人类为什么没有这种超能力? 其实, 早在 2002 年, 好莱坞大片《蜘蛛侠》中男主角那身飞檐走壁 (图 1) 的本领就形象描述了人类对这种超能力的向往。



图 1 蜘蛛侠剧照

长期以来, 壁虎脚下的奥秘引起了科学家们浓厚的兴趣, 国内外很多科技工作者一直致力于研究和模仿壁虎这种飞檐走壁的能力, 并试图从各个方面, 利用各种手段, 揭示隐藏在其脚下的粘附机理, 而为人类所利用。近年来, 随着实验设备的发展和实验技术的进步, 能够清楚地观察到微米甚至纳米结构的图像, 对壁虎粘附机理的研究才取得了重大进展。

1 壁虎脚掌粘附系统结构

壁虎种类虽然多种多样, 但其脚掌粘附系统的结构在微

本文于 2013-04-10 收到。

1) E-mail: zlpeng@LNM.imech.ac.cn

观上却有惊人的相似 (如图 2)。大守宫是亚洲体型最大的壁虎, 体长可达 30~40 cm, 重达 200~300 g, 是科学家常用来研究的对象。我们用肉眼就能观察到它柔软的足垫上呈现出一条条弧状褶皱, 长度约为 1~2 mm^[2]。20 世纪 60 年代, 随着扫描电镜的出现, 壁虎足掌上错综复杂的粘附系统结构才得以揭示。壁虎的粘附系统是一种多级、多纤维状表面的结构, 壁虎的每个脚趾生有数百万根细小刚毛, 每根刚毛的长度约为 30~130 μm, 直径为数微米, 约为人类头发直径的 1/10, 刚毛的末端又分叉形成数百根更细小的铲状绒毛 (100~1000 根), 每根绒毛长度及宽度方向的尺寸约为 200 nm, 厚度约为 5 nm (如图 3 所示)。



图 2 不同种类壁虎的脚掌结构^[2]

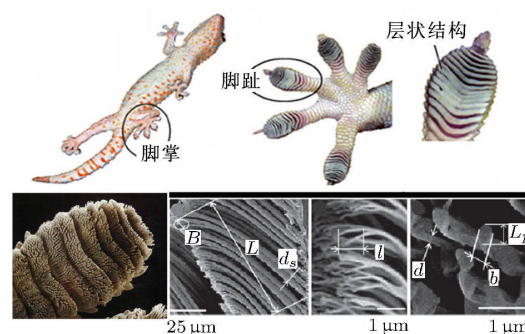


图 3 大守宫壁虎脚掌多级粘附系统的微观结构^[1]

2 壁虎脚掌的粘附机理

实际上, 当两固体表面相互靠近时其间的相互作用力十分复杂, 包括范德华力、静电力、偶极力、毛细力等, 若要分别区分出各力的作用, 是一项十分复杂而艰巨的任务, 有很大的挑战。过去一百年来, 人们对壁虎的粘附能力提出了种种猜测, 从黏液、真空压力到静电力等, 但都被一一否定。直到最近十几年, 壁虎粘附的奥秘终于得以揭示, 美国路易斯

克拉克学院 Autumn 教授及同事于 2000 年通过实验证实壁虎超强粘附力源于脚掌上大量刚毛与物体表面的分子间作用力,即范德华力. 范德华力是中性分子彼此距离非常近时,产生的一种微弱电磁力,大量范德华力的积累就足以支撑壁虎体重. 壁虎这种特殊的多分级粘附系统结构,最小粘附单元达到纳米量级,保证能轻易的与各种表面达到近乎完美的结合,无论多粗糙的表面,由于壁虎最小粘附单元非常精细,微观上都接近理想光滑结构,因此两者能形成理想接触,进而保证大量范德华力积累产生超强粘附力. 根据 Autumn 教授最早实验测量得到的壁虎单根刚毛最大粘附力约为 $200 \mu\text{N}$, 根据计算,壁虎每平方米面积上的刚毛数量可达一万多根,一只大守宫壁虎脚掌上刚毛数量约为 600 万根,因此可产生高达 1300 N (133 kg) 的粘附力,理论上可承担两个普通成年人的重量,这简直是一股不可思议的力量.

壁虎理论上能够产生超过 133 kg 的粘附力,但壁虎本身重量约为 100 g 左右,如此计算壁虎脚上的刚毛充其量才发挥 0.05% 的功效. 如此大的差距不禁让人怀疑这莫非是大自然的“过度设计”. 但事实上不然,生物学家皮安卡与同事某次在亚马逊河流域从事研究工作时,偶然间看到一个相当有趣的现象:一只壁虎从约 30 m 高的树上跳跃而起,朝地面竖直降落,就在离地面约 7 m 左右,坠落的壁虎突然朝近邻树叶伸出一只脚,接着紧紧粘住树叶,迅速爬进树叶中消失(图 4). 该小插曲说明,或许壁虎的刚毛在平时并未完全发挥功能(图 5),但脚下复杂的结构绝非大自然的“过度设计”,或许为了在激烈的竞争环境中生存,壁虎才演化成如此精致的结构,并得以繁衍不息.

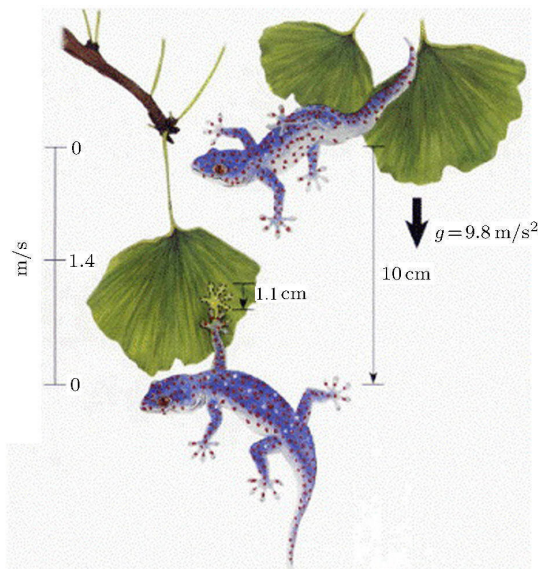


图 4 从 10 cm 高度降落的壁虎,只要与树叶表面滑行 1.1 cm 的距离,壁虎便能牢固的抓住树叶 [2]

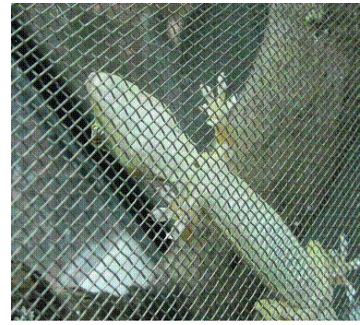
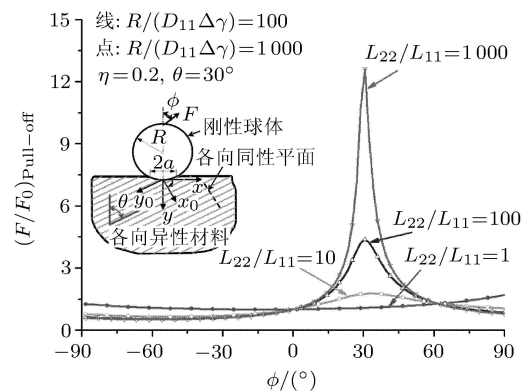
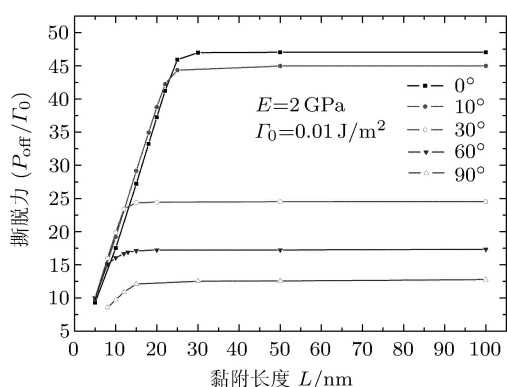


图 5 即使与表面接触面积减小,壁虎依然能牢牢粘附于铁网上

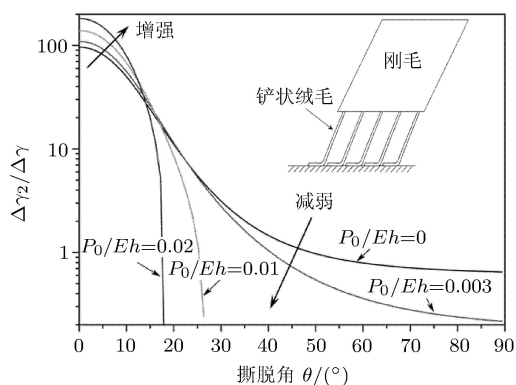
壁虎脚掌拥有如此强劲粘附力,甚至比胶带还粘,它又是如何轻易的从表面上脱粘,实现可逆粘附. 壁虎这种特殊的可逆粘附能力,引起了国内外科技工作者的广泛兴趣, Autumn 教授实验发现壁虎刚毛在脱粘过程中角度十分重要,唯有在某个临界角度下刚毛才能轻易脱粘,经过大量实验得到该临界角约为 30° 左右. 我国中国科学院力学研究所陈少华研究员对壁虎等生物的粘附机理进行了多年的理论研究. 2006 年,陈少华研究员与美国布朗大学高华健教授合作发现了壁虎、蚱蜢等昆虫在运动时,依靠脚部衬垫的各向异性实现粘附和脱粘的运动力学机制,理论揭示壁虎等生物可逆粘附的宏观机制(图 6(a)),该结果发表在国际固体力学顶级期刊《力学与固体物理》杂志,并且该研究得到了中央电视台等多家媒体报道. 随后,陈少华研究员课题组进一步研究了壁虎可逆粘附的微观机制,分别考虑壁虎最小粘附单元尺寸、基底粗糙度、环境湿度及预应力等因素对壁虎粘附行为的影响(图 6(b)和图 6(c)),研究结果合理解释了 Autumn 教授等的实验现象 [4-5].



(a) 壁虎宏观各向异性粘附模型 [3]



(b) 壁虎最小粘附单元 (微观) 粘附模型 [4]



(c) 壁虎二级结构粘附模型 [5]

图 6

另一方面, 壁虎在日常生活中难免会经过布满灰尘的地带, 脚掌上沾染灰尘, 神奇的是壁虎粘附力不但依然强劲, 而且能够“百花丛中过, 片叶不沾身”, “动一动脚掌, 不带走一颗沙粒”。壁虎脚下究竟隐藏着何种玄机使得壁虎能在沾满灰尘的墙壁上依然运动自如. Autumn 教授通过对壁虎直接进行实验测试, 发现壁虎脚掌表面具有类似“荷花效应”的自清洁能力 (如图 7 所示).

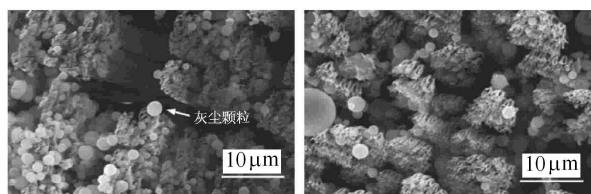


图 7 开始沾满灰尘颗粒 (箭头所示) 的壁虎刚毛组织 (左图), 壁虎爬行几步后灰尘减少很多 (右图)[6]

与“荷花效应”不同, 荷叶表面虽然与壁虎脚掌表面同样具有超疏水能力, 但荷叶表面并不具有壁虎的超强粘附力. 揭示壁虎这种具有自清洁能力的粘附原理, 是人类仿生壁虎超强粘附能力必须攻克的关键问题, 目前该方面的研究还相对较少.

3 壁虎粘附能力的仿生研究与应用

几十亿年的进化与“适者生存”造就了壁虎等生物在各种表面上运动的能力, 这种能力远超越了人们的想象. 目前, 人类还不能达到这样的水平, 但对壁虎等生物超强粘附能力的研究, 最终目的是为人类所用. 例如, 我们可以仿生设计科学家称之为“壁虎带”的粘合剂, 用于外科手术用的夹子和缝线、登山者使用的安全装置、医用绷带、甚至还有足球守门员使用的超强黏性手套等; 还可以仿生设计适合任意表面行走的微型爬壁机器人, 可以代替人类在特殊环境中完成一些不适合人类直接完成的任务.

英国科学家 Geim 等仿照壁虎脚掌刚毛的几何排列构造, 以电子光束微影与氧离子干刻蚀法在 5 μm 厚的聚酰亚胺薄膜上制备长约 2 μm, 直径约 0.5 μm, 间距 1.6 μm 的高弹性聚酰亚胺纤维阵列. 当施加一定预压力后, 每平方厘米的面积可负重 3 N. 他们利用这样的仿壁虎带能支撑一个体重适当的“蜘蛛侠”玩具, 如图 8 所示, 该玩具重 40 g, 手掌覆盖有仿生制造的壁虎带, 与基底接触面积能达到 0.5 cm², 可以支撑大于 100 g 的重量 [7-8].

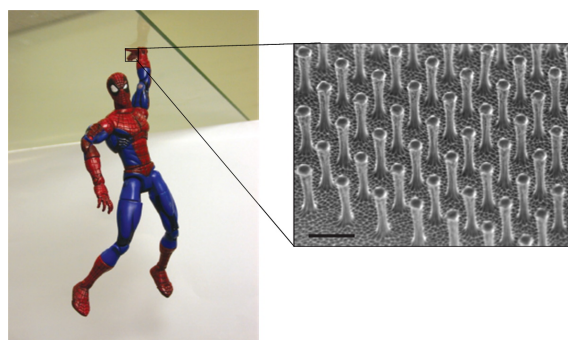


图 8 掌部具有仿壁虎刚毛结构的“蜘蛛侠”玩具吸附在天花板上, 右图为掌部的仿壁虎刚毛阵列结构 [7]

美国斯坦福大学的一个研究小组在 2006 年研发出一种仿壁虎机器人, 称之为“黏虫”(Stickybot)(如图 9(a)). 和壁虎一样, 该机器人具有 4 只黏性脚掌, 每只脚具有 4 个脚趾, 并且脚趾上长有数百万根细小的人造刚毛 (直径约为 0.5 μm). 借助这些刚毛与物体表面间的范德华力, 它就能“飞檐走壁”. “黏虫”从黏附原理、运动形式及外形上都比较接近真实的壁虎. 我国南京航空航天大学戴振东教授课题组经过多年的仿生研究, 终于 2011 年成功实现了“大壁虎”机器人在垂直 90° 的平面上爬行. 该“大壁虎”机器人通体由白色铝合金组成, 长 150 mm (不含尾巴), 重约 250 g, 如图 9(b) 所示. 该成果受邀参加了国家“十一五”重大科技成就展.



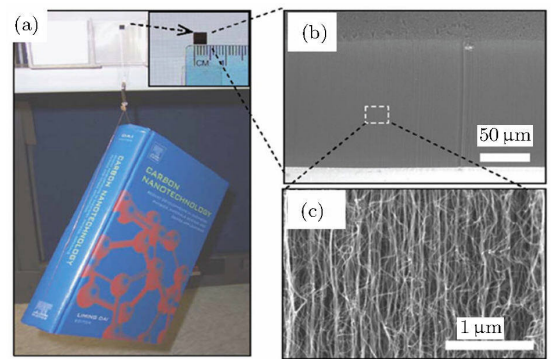
(a) 美国“黏虫”仿壁虎机器人



(b) 我国“大壁虎”机器人

图 9

美国佐治亚理工学院华人科学家王中林教授领导的研究小组利用碳纳米管阵列制成仿生壁虎脚。碳纳米管由竖直部分及端部的弯曲部分组成,分别用来仿生壁虎脚部刚毛和铲状绒毛。当碳纳米管阵列与基底接触时,弯曲部分与基底表面的线接触有效地增大了接触面积,类似于壁虎铲状绒毛与基底的接触。为了测量该结构粘附力,取 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 面积的碳纳米管集簇与玻璃基底接触(图 10 所示),该样品能牢牢吊起一本重为 1.48 kg 的书本,切向粘附力约为 $90.7\text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$, 达到壁虎粘附力的 10 倍;而法向粘附力随着碳纳米管的长度的变化由 $10\text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$ 仅增大到 $20\text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$ 且远小于切向粘附力,并且总粘附力随着拉脱角的变化而变化。因此,在碳纳米管基础上研发出的仿生壁虎脚既能在垂直墙壁上吸附重物,也能够从不同角度轻松取下^[9]。

图 10 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 面积的碳纳米管集簇与基底接触能轻松吊起一本重为 1.48 kg 的书本

近年来,科研人员试图用各种方式仿生模拟壁虎脚,但都局限在光滑物体表面,而且无法有效控制“强粘附”与“易脱粘”可逆粘附的交替过程。王中林教授领导的研究小组利用可控的碳纳米管阵列,成功研制出具有“强粘附”和“易脱粘”性能的仿生壁虎脚,使仿生壁虎脚朝着实际应用方向迈出了关键一步。正如王中林教授所说:“好莱坞大片《蜘蛛侠》中飞檐走壁的绝世本领未来有望成为普通人都能掌握的基本技能”。

参 考 文 献

- 1 Autumn K, Liang YA, Hsieh ST, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405(6787): 681-685
- 2 Autumn K. How gecko toes stick. *American Scientist*, 2006, 94(2): 124-132
- 3 Chen SH, Gao HJ. Bio-inspired mechanics of reversible adhesion: Orientation-dependent adhesion strength for non-slipping adhesive contact with transversely isotropic elastic materials. *J Mech Phys Solids*, 2007, 55(5): 1001-1015
- 4 Peng ZL, Chen SH, Soh AK. Peeling behavior of a bio-inspired nano-film on a substrate. *Int J Solids Struct*, 2010, 47(14-15): 1952-1960
- 5 Peng ZL, Chen SH. Effect of pretension on the peeling behavior of a bio-inspired nano-film and a hierarchical adhesive structure. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(16): 163702
- 6 Hansen WR, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. *Proc Natl Acad Sci, U.S.A.*, 2005, 102(2): 385-389
- 7 陈少华, 苏爱嘉. 生物粘附与仿生粘附力学的进展. *力学与实践*, 2007, 29(4): 9-17
- 8 陈少华, 彭志龙. 壁虎粘附微视力学机制的仿生研究进展. *力学进展*, 2012, 42(3): 282-293
- 9 Qu LT, Dai LM, Stone M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off. *Science*, 2008, 322(5899): 238-242