壁虎在不同粗糙度的竖直表面的黏附

吉爱红^{①*}, 葛承滨^{①②}, 王寰^①, 王周义^①, 戴振东^①

① 南京航空航天大学航天学院仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016;

② 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016

* 联系人, E-mail: meeahji@nuaa.edu.cn

2016-04-18 收稿, 2016-05-15 修回, 2016-05-16 接受, 2016-06-16 网络版发表

国家自然科学基金(51375232)和江苏省自然科学基金(BK20141410)资助

摘要 壁虎的脚掌上具有脚爪和刚毛两种附着器官, 两种器官具有不同的附着机制, 二者协同作用使壁虎具有在任意粗糙度的竖直墙面和天花板上自如运动与附着的能力. 将壁虎脚掌上的脚爪去除后, 放置在14种不同粗糙度的竖直的砂纸表面, 以研究壁虎仅依靠刚毛时的附着能力. 研究表明, 仅仅依靠刚毛附着时, 壁虎在各类砂纸表面的滑移速度、内收速度等存在差异性. 滑移速度随着砂纸表面上颗粒直径与间距比值增大而减小, 表面粗糙度并不是影响黏附性能的直接原因, 其黏附性能由刚毛尖端末梢与砂纸表面的接触面积决定. 研究壁虎脚掌刚毛在不同粗糙度的竖直表面的黏附性能, 可以为设计基于仿壁虎刚毛黏附的爬壁机器人提供参考.

关键词 壁虎, 附着, 粗糙度, 刚毛, 砂纸

壁虎的脚掌上具有脚爪和刚毛两种附着器官, 两种器官具有不同的附着机制, 二者协同作用使壁虎具有在任意粗糙度的竖直墙面和天花板上自如运动与附着的能力. 公元前300年, 亚里士多德将壁虎与昆虫等动物的运动与附着能力归结为超自然力, 这是最早对生物附着能力的研究. 随着光电显微技术的飞速发展, 动物附着机制的研究取得了令人瞩目的成就. Autumn等人^[1,2]从壁虎的运动行为、运动力学以及壁虎脚掌刚毛和脚爪的微观结构、黏附机制、黏附力等方面进行了大量的研究, 并通过单根刚毛的黏附力测量, 提出壁虎的刚毛黏附基于范德华力作用机制^[3~5], 排除了毛细力和静电力黏附机制的可能性. 田煜教授基于tape模型从理论上分析了壁虎黏附和脱附间的快速转变, 这个模型整合了在刚毛末端压舌板和附着面之间由范德华力产生的黏附力和摩擦力, 范德华力的产生由壁虎脚趾的宏观运动来控制. 他从理论上分析说明脚趾、刚毛等结构使壁虎

的黏附力和摩擦力在3个数量级间变化, 从而迅速地实现黏附和脱附^[6]. 杨文伍等人^[7]从化学、物理学、生物学、机械工程学及材料学的角度较为系统地介绍了壁虎动态黏附理论, 并将这种理论应用在仿生材料制备上. Prevenslik^[8]针对Autumn的研究, 提出了静电力对壁虎在墙面和天花板上附着有一定的作用和影响的结论. Puthoff等人^[9]和Chen等人^[10]都各自通过实验表明, 相对湿度会导致刚毛刚度的降低从而增强刚毛的黏附性能. 陈少华等人^[11]针对壁虎刚毛作为黏附系统最小单元的真实形状, 考虑有限尺寸纳米薄膜长度、厚度、撕脱角等因素, 研究了其微观黏附力学机制. Puglisi等人^[12]提出了壁虎和昆虫在墙面附着时肌肉控制的简单模型. Collins等人^[13]从进化的角度研究了壁虎脚趾的刚毛垫结构形态对环境的适应性.

事实上, 除了壁虎脚掌刚毛的微观形貌会影响到黏附性能, 其附着的目标表面的形貌同样也对黏

引用格式: 吉爱红, 葛承滨, 王寰, 等. 壁虎在不同粗糙度的竖直表面的黏附. 科学通报, 2016, 61: 2578–2586

Ji A H, Ge C B, Wang H, et al. Adhesion of gecko on vertical surfaces with different roughness (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2578–2586, doi: 10.1360/N972016-00179

附性能产生重要的影响。但是,目前关于壁虎刚毛微观形貌和接触表面粗糙度关系的研究未见报道,在不同粗糙度表面上黏附性能未见涉及。

动物运动与附着的表面都是具有一定的粗糙度的。而传统接触理论都是对光滑表面间的黏着力进行分析,如JKR(Johnson, Kendall和Robert)、DMT(Derjaguin, Muller和Toporov)、MYD(Muller, Yushmanchenko和Derjaguin)和赫兹理论的主要局限在于它们假设物体表面完全光滑。Greenwood等人^[14]于1966年提出了GW模型考虑到粗糙度表面的接触问题。模型假设粗糙峰均为曲率半径相同的球体,高度符合高斯分布,并假设粗糙峰的接触为纯弹性变形状态,与实际可能同时发生的弹性变形、塑性变形、弹塑性变形状态有较大出入。1975年,Fuller等人^[15]借鉴了GW模型的研究方法,并将原有的模型使用的赫兹理论修正为JKR理论,得到粗糙表面接触的黏附力。Roy Chowdhury等人^[16]在JKR模型和GW模型的基础上,考虑一部分粗糙峰完全弹性变形,提出了RG模型。Chang等人^[17]在RG模型的基础上,对接触粗糙峰使用了DMT理论,提出了CEB模型。2001年Persson等人^[18]使用自仿射分形描述表面粗糙度研究表面粗糙度对弹性固体黏着的影响。

Loskill等人^[19]曾经以壁虎的单根刚毛为对象,研究了表面能与宏观尺度的表面力之间的关系。我们前期也开展了壁虎在竖直的不同材料表面的运动与附着行为研究,并得到壁虎在竖直表面的运动与附着能力随着接触面材料表面能的增加而提高的结论^[20]。本文在此研究的基础上,将壁虎脚掌上的脚爪去除后,放置在14种不同粗糙度的竖直的砂纸表面,以研究壁虎仅依靠刚毛一种器官时在相同材料但粗糙度不同的表面的黏附性能。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用大壁虎(*Gekko gecko*)12只,体重为(65.5±5.1) g, 身长(鼻尖-排泄口连线)为112.1±5.2 mm (mean±s.d.). 产于中国的广西南宁。由于南京的环境气候与南宁相差很大,所以实验前将大壁虎放置在特殊的饲养室内饲养。饲养环境模拟壁虎在南宁的自然生活环境,处于自然光照下,环境温度为(25±3)℃,湿度为63%~73%,用蝗虫和蟋蟀喂养。为研究壁虎刚

毛的黏附机理,需要排除壁虎脚爪的影响。所以剪去壁虎脚掌的每个脚趾上的脚爪,过数天时间,等壁虎完全康复后再开展实验。壁虎在较难黏附表面上会本能地逃逸而寻求安全地带,同时壁虎正向放置(头朝上、尾朝下)时会出现跳跃行为而影响实验效果,所以在实验过程中将壁虎眼睛蒙上,倒立放置在砂纸表面,观察其黏附行为。对壁虎在不同目数的砂纸上开展实验的顺序是随机的,每次实验结束后都会休息一段时间或更换另一只近似体重的壁虎继续开展实验,因此实验顺序的变化不会影响实验结果。

1.2 实验材料

实验所用的砂纸为德国进口勇士牌砂纸,实验时将砂纸背面用502胶水均匀张贴固定在竖直的有机玻璃板上,避免砂纸因为壁虎附着力的作用而发生形态改变。砂纸的规格为230 mm×280 mm。从220目到7000目,共14种型号,各种型号的砂纸的表面粗糙度值如表1所示。其中 R_a 表示轮廓算术平均偏差, R_q 表示方均根粗糙度。用三维超景深显微镜(VK-X200, Keyence, 日本)对砂纸微观形貌进行观测,并对图像进行分析处理,计算每张图中的单个颗粒的大小,测量每两个颗粒间的间距和任意颗粒的高度值。壁虎的脚掌刚毛与接触面产生黏附时,刚毛末端的压舌板与接触面的接触状况决定了黏附力大小。对砂纸而言,砂纸表面的微观颗粒直径和颗粒间距又决定了砂纸的表面状况。因此,以砂纸的颗粒直径 $\bar{D}$ 和颗粒间距 d 两个参数为变量,计算砂纸的颗粒直径 $\bar{D}$ 与颗粒间距 d 的比值大小,采用聚类分析法中的“对样本进行分类”的Q型聚类分析法^[21],按照“类与类之间的距离为最短距离”的原则,将14种目数的砂纸进行编号,并分成三类(表1): 第一类: a-220目, b-1000目, c-320目; 第二类: d-240目, e-1200目, f-800目, g-400目, h-1500目, i-600目, j-2000目; 第三类: k-5000目, l-7000目, m-2500目, n-3000目。

2 实验结果

壁虎附着在竖直砂纸表面时,由于重力作用会缓慢向下滑移。此时壁虎四肢会努力向内收缩以阻止位移。在身体向下滑移和四肢横向内收的过程中,壁虎四只脚掌会向外臂方向扭转,进而拉住整个身体不至于滑落。另一方面,由于四肢的内收,壁虎的躯干部分相对于砂纸表面拱起,从而增加了身体与

表1 砂纸颗粒直径、间距比值及砂纸表面粗糙度

Table 1 Ratio of particles' diameter to distance on the surface of sandpapers and roughness of sandpapers

目数	编号	$\bar{D}$ (μm)	d (μm)	$\bar{D}/d$	R_a (μm)	R_q (μm)	分类
220	a	0.469	0.531	0.883	18.07	21.92	第一类
1000	b	0.504	0.496	1.016	3.61	4.25	
320	c	0.546	0.454	1.203	7.30	9.06	
240	d	0.614	0.386	1.591	16.94	21.12	第二类
1200	e	0.668	0.332	2.012	3.60	4.34	
800	f	0.674	0.326	2.067	6.02	7.30	
400	g	0.713	0.287	2.484	7.10	8.86	
1500	h	0.732	0.268	2.731	3.96	4.87	
600	i	0.767	0.233	3.292	6.10	7.44	
2000	j	0.769	0.231	3.329	2.79	3.59	第三类
5000	k	0.871	0.129	6.752	2.21	2.74	
7000	l	0.893	0.107	8.346	1.96	2.42	
2500	m	0.950	0.050	19.000	2.94	3.68	
3000	n	0.965	0.035	27.390	3.34	4.07	

砂纸之间的距离,因此在增大平衡力矩的同时也增大了倾覆力矩,直致倾覆掉落。如果壁虎在倾覆掉落之前,重新调整各脚姿态,则身体恢复到原来的伸展状态,壁虎可以维持黏附在砂纸表面。

提取壁虎在实验前后的不同姿态下(初始附着和身体内缩)四肢的伸展位置。将四肢左右方向的伸展定义为从脚掌踝关节到壁虎身体纵向轴线(连接鼻点和排泄口)的垂直距离(图1),四肢前后方向的伸展定

图1 (网络版彩色)静态附着壁虎前后腿左右伸展相对距离。(a) 壁虎左右伸展示意; (b) 后腿左右伸展相对距离; (c) 前腿左右伸展相对距离
Figure 1 (Color online) Relative transverse limb span of gecko in static adhesion. (a) Schematic diagram of transverse limb span of gecko; (b) relative transverse hindlimb span; (c) relative transverse fore-limb span

义为脚掌踝关节沿身体轴线方向到壁虎身体质心的垂直距离(图2)。脚掌踝关节越过中心轴线到达对侧区域时,其相对于中心轴线的距离定义为负值。统计时将所有的距离相对壁虎的体长作均一化处理。

对于两组或多组实验数据的线性回归分析采用方差分析(ANOVA)检验其相关性,当概率 $P<0.05$,说明线性相关性显著,反之则认为没有显著相关性。其中 R^2 为线性度, F 为判定临界值, $d.f.$ 为数据自由度。用线性回归分析四肢左右伸展距离与砂纸颗粒直径间距比值的关系(后腿: $R^2=0.006$, $F=2.639$, $d.f.=1205$, $P=0.105>0.05$;前腿: $R^2=0.001$, $F=0.286$, $d.f.=1205$, $P=0.395>0.05$)以及四肢前后伸展距离与砂纸颗粒直径间距比值的关系(后腿: $R^2=0.006$, $F=2.639$, $d.f.=1205$, $P=0.502>0.05$;前腿: $R^2=0.001$, $F=0.286$, $d.f.=1205$, $P=0.593>0.05$),发现前后腿左右伸展距离与砂纸颗粒直径间距比值以及前后腿前后伸展距离与砂纸颗粒直径间距比值都没有显著相关性。

将收缩距离对时间求导可得到四肢在砂纸表面

上滑移的速度。滑移速度可以认为是静态黏附情况的直接表现,即滑移速度越大,黏附性能越差。从14种目数的砂纸表面的实验结果可以看到,在各表面上后腿的横向内收速度小于前腿横向内收速度。向下滑移和横向内收速度随着颗粒直径间距比值的增大而逐渐减小,变化规律明显,跟目数的增加没有直接关系。

将滑移速度与按Q型聚类分析法排列的砂纸的目数的关系进行讨论分析(图3)。在第一类砂纸上滑移速度随颗粒直径间距比值增大而显著减小;在第二类砂纸上滑移速度随颗粒直径间距比值增大而逐渐减小,但是其减小的幅度不如第一类明显;在第三类砂纸上滑移速度随颗粒直径间距比值增大,其数值变化较小,滑移速度逐渐趋于平稳。通过线性回归分析(后腿: $R^2=0.097$, $F=43.771$, $d.f.=1205$, $P<0.001$;前腿: $R^2=0.104$, $F=47.579$, $d.f.=1205$, $P<0.001$;下滑速度: $R^2=0.128$, $F=60.041$, $d.f.=1205$, $P<0.001$),各种速度均与砂纸颗粒直径间距的比值间存在显著性关系。

图2 (网络版彩色)静态附着壁虎前后腿前后伸展相对距离。(a) 壁虎前后伸展示意;(b) 后腿前后伸展相对距离;(c) 前腿前后伸展相对距离
Figure 2 (Color online) Relative fore-aft limb span of gecko in static adhesion. (a) Schematic diagram of fore-aft limb span of gecko; (b) relative fore-aft hindlimb span; (c) relative fore-aft fore-limb span

图3 (网络版彩色) 向下滑移和横向内收速度. (a) 壁虎后腿横向内收速度; (b) 壁虎前腿横向内收速度; (c) 壁虎向下滑移速度

Figure 3 (Color online) Velocity of slipping down and transverse adduction. (a) Velocity of transverse adduction of gecko hindlimbs; (b) velocity of transverse adduction of gecko fore-limbs; (c) velocity of gecko slipping down

3 讨论

如前所述, 压舌板是壁虎脚掌刚毛与表面直接接触的最末端的结构. 一根刚毛长度大约是100 μm , 横截面的直径大约是4.2 μm . 压舌板轴的直径大约是0.1 μm , 长度大约是0.8 μm ^[5]. 压舌板垫的尺寸大约是0.3 μm (长度) $\times$ 0.2 μm (宽度) $\times$ 5 nm(厚度), 每个压舌板长度方向间距为0.1 μm , 宽度方向间距为0.2 μm ^[6]. 根据测量, 14种砂纸的颗粒高度都在10 μm 以上, 如果不考虑刚毛前端压舌板与颗粒侧面接触, 那么压舌板应该只与砂纸颗粒上表面接触. 因此将砂纸表面简化成台柱型阵列结构, 假定压舌板只与台柱上表面接触, 不考虑压舌板与台柱侧面和下表面接触的可能性.

壁虎在竖直砂纸表面上的摩擦力和黏附力与压舌板在砂纸表面的接触面积有关. 由接触面积可计

算在各目数砂纸上壁虎脚掌刚毛单个压舌板平均可获得的最大摩擦力. 根据田煜的黏附摩擦模型计算压舌板在14种目数的砂纸上所获得的黏附力和摩擦力^[6], 并对比黏附所需摩擦力和黏附力, 结果如图4所示. 图中水平的细彩线为14种目数的砂纸上单个压舌板平均可获得的最大摩擦力 $F_{f_i}^{\max}$. 根据从小到大排列, 由下向上可以分成三类, 依次为第一类、第二类和第三类砂纸, 与Q型聚类分析得到的分类一致. 定义牵引角 θ 为压舌板牵拉方向与接触面夹角. 由图可知, 牵引角越小时, 壁虎在垂直砂纸表面附着所能得到的摩擦力 F_f 越大, 越有可能抵抗重力的作用, 从而保持身体在附着面上的平衡. 但在牵引角小于10°时, 第一类砂纸(编号a, b和c)上所能获得的最大摩擦力 $F_{f_i}^{\max}$ 都已小于摩擦力 F_f , 所以出现壁虎在第一类砂纸表面上滑移的情况; 第二类砂纸(编号d~j)上也有少量滑移; 在第三类砂纸表面上则滑移速度很小.

定义接触面积所占采样面积比值 α_s 为壁虎脚掌与砂纸表面实际形成的接触面积与砂纸采样面积间的比值. 砂纸取样面积300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 计算 α_s . 图5(a)为不同的颗粒间距下, α_s 与砂纸颗粒直径 $\bar{D}$ 的关系曲线. 图5(b)为不同的颗粒直径下, α_s 与砂纸颗粒间距 d 的关系曲线. 从图5(a)和(b)可知, 接触面积所占比值随着颗粒直径的增大而增大, 随着颗粒间距的增大而减小. 图5中的彩色点为14种砂纸对应的接触面积值所占比值 α_s 对应的位置分布点. 这些比值由图中的虚线分开, 形成三类, 由下向上依次为第一类、第二类和第三类砂纸. 除5000目(编号k)表面的比值有偏差外, 这三类砂纸的分布符合前述Q型聚类分析得到的分布.

进一步分析接触面积比值与砂纸颗粒直径间距的比值的的关系, 如图6所示. 由表1可知, 14种砂纸中, 220目砂纸(编号a)的颗粒直径间距比值最小为0.883, 3000目(编号n)砂纸的颗粒直径间距比值最大为27.39, 砂纸颗粒直径间距比值在0.883与27.390之间. 在这个区间接触面积随着直径间距比值的增大而增大. 当直径间距比值较大(>27.390)或较小(<0.883)时, 接触面积随之变化不明显. 而两表面接触时产生的最大摩擦力与接触面积相关, 所以最大摩擦力与直径间距比值相关, 即直径间距比值直接影响了壁虎在砂纸上的黏附性能. 壁虎静态黏附时以滑移速度和内收速度作为衡量黏附性能的标准, 分析滑移速度与砂纸颗粒直径间距比值的的关系, 砂纸颗粒直径

图4 最大摩擦力与牵引角的关系. $F_{f_i}^{\max}$ ($i=a\sim n$): 14 种砂纸上能够获得的最大摩擦力; 牵引角 θ : 压舌板牵拉方向与接触面夹角; F_n : 黏附力; F_f : 摩擦力

Figure 4 The relationship between the maximum friction force and peeling angle. $F_{f_i}^{\max}$ ($i=a\sim n$): the maximum friction forces on 14 grades of sandpapers; peeling angle θ : angle between spatula and contact surface; F_n : adhesive force; F_f : friction force

图5 (a) 接触面积所占比值与颗粒直径的关系; (b) 接触面积所占比值与颗粒间距的关系

Figure 5 (a) The relationship between the ratio of contact area to sample area and particles' diameter; (b) the relationship between the ratio of contact area to sample area and particles' distance

间距比值大小按对数进行排列, 如图7所示, 虚线为趋势线. 发现滑移速度随着比值的增大而减小, 与实验结果相吻合.

4 结论

切除脚爪的壁虎主要利用摩擦力在竖直墙壁上

静态附着. 壁虎在遇到黏附性能差的表面时四肢会出现向下滑移和向内的收缩, 或重新调整身体的姿态. 壁虎在向下滑移和横向内收四肢时, 内收速度和滑移速度与砂纸表面颗粒直径间距比存在一定关系, 滑移速度随着比值的增大而减小.

通过形状测量激光显微系统对砂纸表面进行观

图6 接触面积比值与砂纸颗粒直径间距比值的关系

Figure 6 The relationship between the ratio of contact area to sample area and the ratio of diameter to distance of particles

察测量分析。根据砂纸微观测量结果, 计算得出在砂纸表面所需要的摩擦力与黏附力和所能提供的最大摩擦力间的关系。当壁虎在表面微观形貌尺寸比压舌板尺寸大很多的表面上黏附时, 表面粗糙度不是影响黏附性能的直接原因, 刚毛尖端末梢与砂纸表面的接触面积决定了黏附性能的优劣。压舌板的牵引角对其所需摩擦力有较大影响, 壁虎不同姿态下牵引角是否一样, 壁虎是否会主动改变牵引角来增加运动或静止的稳定性等还需要进一步研究。

图7 滑移速度与砂纸颗粒直径间距比值的关系

Figure 7 The relationship between velocity of slipping down and the ratio of diameter to distance of particles

参考文献

- 1 Autumn K, Niewiarowski P H, Puthoff J B. Gecko adhesion as a model system for integrative biology, interdisciplinary science, and bio-inspired engineering. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2014, 45: 445–470
- 2 Crandell K E, Herrel A, Sasa M, et al. Stick or grip? Co-evolution of adhesive toepads and claws in *Anolis lizards*. *Zoology*, 2014, 117: 363–369
- 3 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405: 681–685
- 4 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 12252–12256
- 5 Autumn K, Gravish N. Gecko adhesion: evolutionary nanotechnology. *Philosoph Trans Roy Soc A: Math Phys Eng Sci*, 2008, 366: 1575–1590
- 6 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
- 7 Yang W W, He T X, Deng W L. Dynamic adsorption of gecko and bionics of gecko-like nanomaterials (in Chinese). *Prog Chem*, 2009, 21: 777–782 [杨文伍, 何天贤, 邓文礼. 壁虎的动态吸附与壁虎纳米材料仿生学. *化学进展*, 2009, 21: 777–782]
- 8 Prevenslik T. Electrostatic gecko mechanism. *Tribol Ind*, 2009, 31: 61–66
- 9 Puthoff J B, Prowse M S, Wilkinson M, et al. Changes in materials properties explain the effects of humidity on gecko adhesion. *J Exp Biol*, 2010, 213: 3699–3704
- 10 Chen B, Gao H J. An alternative explanation of the effect of humidity in gecko adhesion: Stiffness reduction enhances adhesion on a rough surface. *J Appl Mech*, 2010, 2: 1–9
- 11 Chen S, Peng Z. Progress in the bionic study on gecko's micro-adhesion mechanism (in Chinese). *Adv Mech*, 2012, 42: 282–293 [陈少华, 彭志龙. 壁虎黏附微视力学机制的仿生研究进展. *力学进展*, 2012, 42: 282–293]
- 12 Puglisi G, Truskinovsky L. Cohesion-decohesion asymmetry in geckos. *Phys Rev E*, 2013, 87: 032714
- 13 Collins C E, Russell A P, Higham T E. Subdigital adhesive pad morphology varies in relation to structural habitat use in the Namib Day Gecko. *Funct Ecol*, 2015, 29: 66–77

- 14 Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces. *Proc Roy Soc London Ser A: Math Phys Sci Roy Soc*, 1966, 295: 300–319
- 15 Fuller K N G, Tabor D. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids. *Proc Roy Soc London Ser A: Math Phys Sci Roy Soc*, 1975, 345: 327–342
- 16 Roy Chowdhury S K, Ghosh P. Adhesion and adhesional friction at the contact between solids. *Wear*, 1994, 174: 9–19
- 17 Chang W R, Etsion I, Bogy D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces. *J Tribology*, 1987, 109: 257–263
- 18 Persson B N J, Gorb S. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic plates with application to biological systems. *J Chem Phys*, 2003, 119: 11437–11444
- 19 Loskill P, Puthoff J, Wilkinson M, et al. Macroscale adhesion of gecko setae reflects nanoscale differences in subsurface composition. *J R Soc Interface*, 2012, 10: 20120587
- 20 Ji A H, Gu W, Wang Z Y, et al. Locomotion and adhesion mechanisms of gecko climbing vertically on different material surface (in Chinese). *China Mech Eng*, 2014, 25: 432–438 [吉爱红, 顾伟, 汪中原, 等. 壁虎在垂直的不同材料表面的运动与附着行为研究. *中国机械工程*, 2014, 25: 432–438]
- 21 Gao X. *Fuzzy Clustering Analysis and Its Application* (in Chinese). Xi'an: Xidian University Press, 2004 [高新波. 模糊聚类分析及其应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004]

Adhesion of gecko on vertical surfaces with different roughness

Ji AiHong¹, GE ChengBin^{1,2}, WANG Huan¹, WANG ZhouYi¹ & DAI ZhenDong¹

¹ Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Locomotion is the basis of predation, escape, reproduction for animals. Geckos, spiders and insects run and climb with exceptional speed, strength and agility for their size, representing in many respects an ideal model system for the study of terrestrial locomotion. Biologists make comparative biology study with animals to develop a deeper understanding of the fundamental biomechanical design rules common to all legged organisms. Engineers look to animals' locomotion for design principles to improve the performance of legged robots including wall-climbing robots and other complex systems. Claws and setae are two kinds of adhesive devices in geckos' toe pads. These two devices can adhere on surfaces depending on different attachment mechanism. Synergistic action between these two devices makes geckos freely move on vertical walls and ceilings with arbitrary roughness. The interaction of claws with a substrate is determined by the roughness of the substrate, the friction coefficient between the claw and the substrate, and the relative dimension between the claw and the substrate. The stability of the interaction depends on the mechanism of mechanical inter-locking. The adhesion of geckos' setae is thought to be due to dry adhesion, which is generated by van der Waals force. The key parameters for the setae adhesion here is the distance between the terminal part of the setae and the substrate, which is in the range of a few nanometers in order to generate van der Waals forces. In addition that the microstructure of gecko setae affects to the adhesion performance, the morphology of substrate surface also plays an important role on the adhesion performance. Geckos with claws amputation were placed on 14 grades of vertical sandpapers to study setae' adhesive ability. The ratio of particles' diameter to distance on the surface of sandpapers was calculated. According to the ratios, 14 grades of sandpapers were classified into three new grades by the Q cluster analysis method which principle is that the difference between two neighbouring grades is the smallest among all grades. On the surface of sandpaper which the ratio is relatively smaller, geckos will slip down and try to make transverse adduction, even adjust its posture to keep adhering on the substrate. The maximum friction force between gecko spatula and sandpaper was calculated by the contact area. Then the relationship between the maximum friction force and adhesive force was also deduced. The results show that slipping velocity, adduction speed of geckos on all grades of sandpapers surface are different. Slipping velocity decreases with the ratio of particles' diameter to their distance on the surface of sandpaper increasing. The result from calculation is consistent with the conclusion from the experiments. The adhesive ability of geckos is determined by the contact area between the surface of the setae on the distal tip and sandpaper, and surface roughness is not a key factor. The study of adhesive performance of geckos setae can contribute to the design of wall climbing robot based on the adhesion of gecko-inspired setae.

gecko, adhesion, roughness, setae, sandpaper

doi: 10.1360/N972016-00179