

载荷对壁虎刚毛束的摩擦各向异性特性影响的实验研究*

万进 田煜[†] 周铭 张向军 孟永钢

(清华大学精密系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2011年3月10日收到; 2011年4月26日收到修改稿)

用离体壁虎刚毛阵列在自制微黏附摩擦测试台上对预加载荷对刚毛摩擦与黏着的各向异性特性的影响进行了实验研究. 实验结果表明, 在逆壁虎刚毛自然弯曲方向卷出实现脱附时, 刚毛所受摩擦力与法向力成正比, 摩擦系数为 0.6; 沿顺刚毛自然弯曲方向卷入实现黏附时, 随预载荷增加摩擦力增加, 法向力由黏附力变为斥力. 在同等预载荷下, 卷入方向的摩擦力是卷出方向的 2 倍以上. 本文提出了摩擦各向异性特征参数, 对壁虎刚毛的黏着与摩擦各向异性进行了定量表征, 这种特性是由刚毛的弯曲及多等级结构决定的.

关键词: 壁虎刚毛, 黏着, 摩擦, 各向异性

PACS: 62.20.-x, 62.25.-g

1 引言

生物界中, 很多动物能在复杂环境下自如运动, 这与这些动物相应的体表结构所特有的摩擦和黏附特性密切相关. 其中, 壁虎因能飞檐走壁, 其运动机制颇受人们关注^[1-3]. 壁虎刚毛所表现出来的摩擦和黏附各向异性、强黏附、低脱附^[4]、自洁性^[5]、自身反黏着^[6]及常态下非黏着^[7]等特性都与其刚毛的微观结构密切相关^[8]. 如图 1 所示, 壁虎每个脚趾上有近 20 列褶, 一个褶有近二十丛刚毛, 一丛刚毛束有数百根刚毛^[9], 每根刚毛柄末端弯曲后多次分叉, 在最末端形成 100—1000 个扇形薄板结构. 研究刚毛的黏着与摩擦特性有助于理解壁虎攀爬的物理机制, 并对仿生刚毛及仿生表面的设计有启发和指导意义.

固体的微观黏着受到表面粗糙度和环境湿度等因素的影响^[10-11], 这些因素也能影响到壁虎刚毛的黏着与摩擦. 通过实验研究, 人们已验证壁虎刚毛的黏着机理以范德华力为主^[12], 粗糙度和毛

细力也可产生重要影响^[13-15]. 此外, 壁虎可以通过改变脚趾的卷入卷出动作, 自如地控制刚毛与壁面间黏着与摩擦. 田煜等^[9]提出的模型显示, 通过改变刚毛末端薄板结构的剥离角度, 壁虎可以调节摩擦力与黏着力几个数量级, 实现与基底表面的快速粘脱附. Autumn 等^[16]在单次加载拖动实验中, 研究了单根、阵列刚毛及壁虎脚趾所表现出的摩擦与黏附特性, 发现刚毛沿与其弯曲方向相反方向(与脚趾卷出方向相同)运动时, 摩擦力与法向力遵循库仑定律, 而顺弯曲方向(与脚趾卷入方向相同)运动时, 所受法向黏附力至少是摩擦力的数倍, 符合“摩擦-黏附”模型; 赵博欣等^[17]通过变化预载荷的大小, 进一步发现沿顺着刚毛弯曲方向拖动时稳定后的摩擦力与法向力呈强烈非线性关系, 所受法向黏附力随摩擦力增大而先增大后减小. 以往在对壁虎刚毛的实验研究^[16,17]中, 沿顺着刚毛弯曲的方向(卷入方向)拖动时, 所加法向载荷的幅值都不大, 拖动后初始法向预载能被刚毛的法向黏附力全部抵消, 使得法向力表现为黏附力.

* 教育部新世纪优秀人才支持计划和国家自然科学基金(批准号:51021064)资助的课题.

[†] E-mail: tianyu@mail.tsinghua.edu.cn

当预载荷进一步增大时,刚毛可能会互相挤在一起使得刚毛与被黏附表面的接触状态发生较大变化,从而使顺刚毛弯曲方向拖动时法向黏附力只能部分抵消初始法向载荷而表现为斥力,对这种现象还未见报道.此外,作为壁虎实现快速黏脱附的重要特性,摩擦各向异性是评价仿生壁虎刚毛的一项重要指标,对仿生刚毛及仿生表面的设计具有指导意义,在之前的壁虎刚毛摩擦行为研究中虽有对该性质的定性描述,但并未有定量表征.针对上述两个问题,本文考察了刚毛在较大预载荷下所表现出来的摩擦和黏附特性,并尝试对摩擦各向异性进行定量表征.

2 实验过程

2.1 实验材料

实验所用刚毛束来自如图 1 所示大壁虎(产地:中国广西,英文名:Tokay Gecko).本实验中所用刚毛束尺寸大小为 $0.37\text{ mm} \times 0.40\text{ mm}$,如图 1(c) 中所示,实验前将其黏在直径为 4 mm 的钢球上.实验中与刚毛对摩的表面为光滑清洁的载玻片,其表面粗糙度 R_a 小于 10 nm .

2.2 实验装置

实验使用自制的微摩擦黏附工作台,其结构如图 2 所示.实验中通过步进电机控制沿法向的加载与切向的拖动;调整块可调节刚毛与玻璃表面的相对位置,使得实验时拖动方向正好沿其自然弯曲的方向,并且刚毛阵列最末端平面平行于对摩玻璃表

面,图 2(c) 和 (d) 所示即为调整好刚毛与玻璃表面相对位置的侧视与俯视图.力检测原理如图 2(b) 所示,粘有壁虎刚毛阵列的钢球固定在双梁弹簧片的末端,弹簧片竖直布置,一电涡流位移传感器通过检测位移变化测量刚毛所受法向力;另一对水平布置的双悬臂梁末端的侧面固定有与刚毛对摩的玻璃表面,该悬臂梁与另一电涡流传感器相配合,可用于测试刚毛所受摩擦力(玻璃表面所受摩擦力的反作用力).两个方向力测试性能如表 1 所示.控

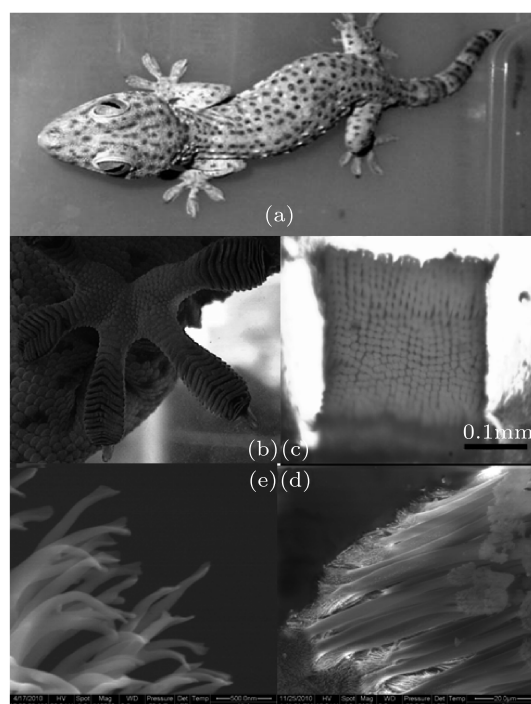


图 1 刚毛等级结构 (a) 壁虎个体; (b) 壁虎脚; (c) 离体阵列刚毛,图中显示其面积约为 $0.37\text{ mm} \times 0.40\text{ mm}$; (d) 单根刚毛; (e) 最末端小薄板结构

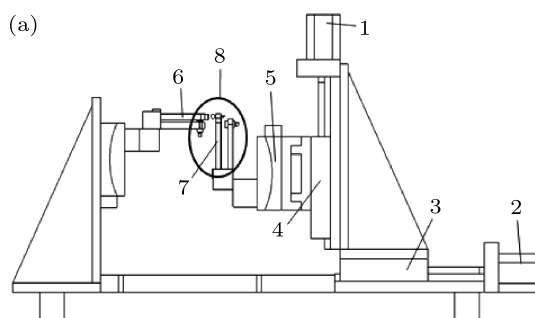


图 2 实验装置简图 (a) 实验装置简图: 1,2 步进电机, 3 水平平台, 4 竖直平台, 5 调整块, 8 测力装置(放大图见图 (b)) 包括 6,7 分别所示的平行向与法向两维力测试单元; (b) 测力原理图,黏在钢球顶端的壁虎刚毛阵列在玻璃表面加载拖动,法向力与摩擦力引起弹簧片产生挠度,该挠度被电涡流传感器所检测,最终换算成力; (c) 和 (d) 为调整好之后壁虎刚毛与玻璃表面的相对位置的侧视与俯视图

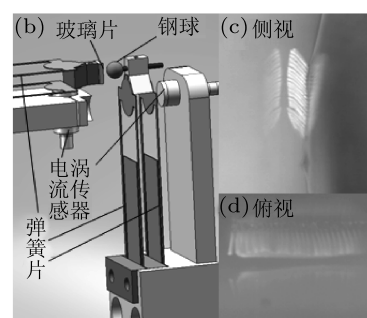
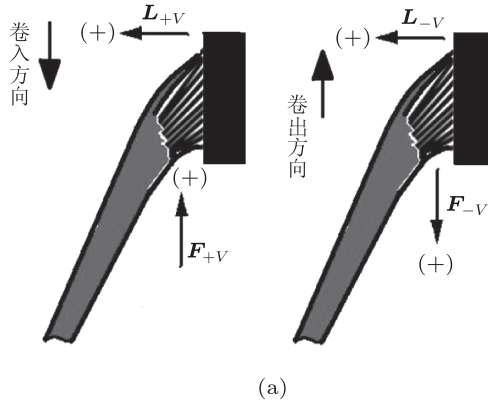


表 1 法向力与摩擦力检测单元测力参数表

	刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	测力分辨率/ μN	测力精度/ μN
法向测力单元	157	20	200
摩擦力测试单元	175	8	80

制电机沿载玻片的法向 (下文中的法向) 加载, 并精



确控制进给位移 (0—90 μm) 得到一系列不同法向预载荷, 每次预加载后保持 3 s, 然后先后沿顺、逆刚毛卷曲方向往复拖动 (切向拖动), 实现摩擦测试. 拖动速度固定为 100 $\mu\text{m}/\text{s}$, 拖动距离 2 mm, 每次实验后卸载, 回到实验开始位置.

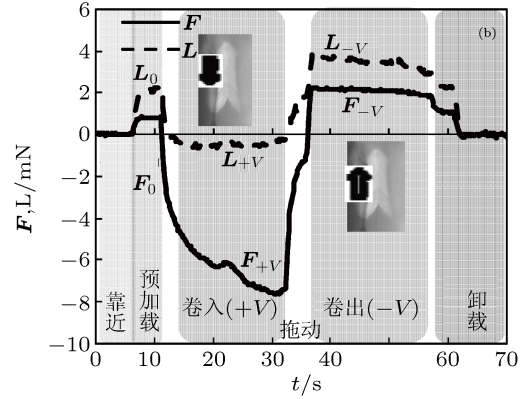


图 3 拖动时刚毛受力示意图及典型实验曲线 (a) 受力示意图; (b) 典型实验曲线, 其中实线表示摩擦力, 虚线表示法向力. 实验过程可分为靠近、预加载、拖动 (先沿卷入、后沿卷出方向)、卸载

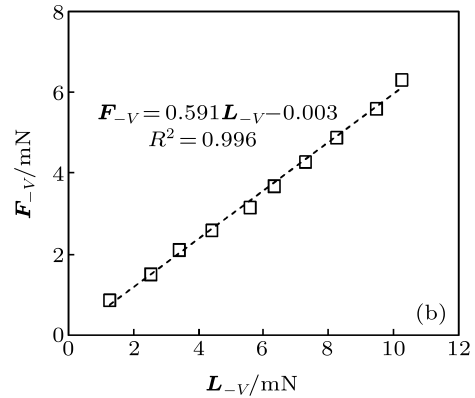
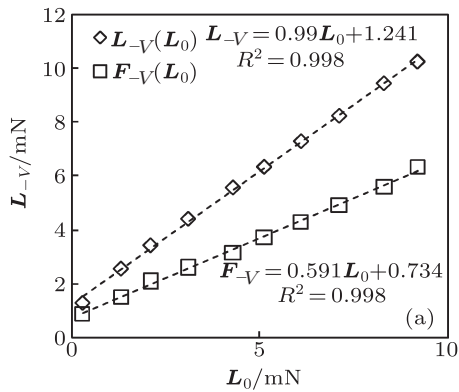


图 4 沿逆刚毛弯曲方向载荷与摩擦力实验结果 (a) 摩擦力 F_{-V} , 法向力 L_{-V} 与预加载载荷 L_0 关系曲线; (b) 摩擦力 F_{-V} 随法向力 L_{-V} 变化关系图

3 实验结果及分析讨论

3.1 典型摩擦力 - 载荷测试结果

一次加载、拖动、卸载过程所得到的典型实验数据, 如图 3(b) 所示, 两条曲线分别为摩擦力 F 与法向力 L . 刚毛末端与玻璃表面接触前, 法向力与摩擦力都为零; 施加预载荷后相应的摩擦力与法向力分别为 F_0, L_0 ; 预加载后沿平行于玻璃表面首先沿卷入 (下文中描述为顺刚毛弯曲方向), 再沿卷出 (下文中描述为逆刚毛弯曲方向) 方向拖动, 往复

至少 3 次, 取摩擦力与法向力在拖动过程中的平均值作为卷入方向摩擦力 (F_{+V}) 与法向力 (L_{+V})、卷出方向摩擦力 (F_{-V}) 与法向力 (L_{-V}), 拖动时各力的正方向定义见图 3(a) 所示.

3.2 逆刚毛弯曲方向载荷 - 摩擦力测试结果

预载的大小通过改变进给量来实现, 图 4(a) 所示实验结果表明, 逆刚毛弯曲方向拖动时, 摩擦力 F_{-V} , 法向力 L_{-V} 与预载 L_0 呈线性关系. 对所得数据进行线性拟合, 可以得

出 $F_{-V}=0.591L_0+0.734$, $L_{-V} = 0.99L_0 + 1.440$, 在拖动过程中, 刚毛的 F_{-V} 与 L_{-V} 之间关系如图 4(b) 所示, 线性拟合结果为 $F_{-V} = 0.596L_0 - 0.003$.

3.3 顺刚毛弯曲方向载荷 - 摩擦力的测试结果

顺刚毛弯曲方向拖动时, 刚毛所受法向力 L_{+V} 、摩擦力 F_{+V} 与预载荷 L_0 之间的关系如图 5(a) 所示. $L_0 < 2$ mN 时, L_{+V} 表现为黏附力,

且与 F_{+V} 一样, 随 L_0 增大而增大. L_0 从 2 mN 增加到 3 mN 再增加到 5 mN 过程中, L_{+V} 先表现为黏附力, 其大小由约 0.5 mN 减小到零, 后变为斥力, 并从零开始增大, 而摩擦力 F_{+V} 则一直增大, 只是增加的速率与 $L_0 < 2$ mN 时相比稍小. L_0 从 5 mN 进一步增加到 9 mN 过程中, L_{+V} 与 F_{+V} 都近似呈线性增长, 且 F_{+V} 增大速率又稍小于 $2 \text{ mN} < L_0 \leq 5 \text{ mN}$ 阶段. 拖动过程中, F_{+V} 与 L_{+V} 的关系曲线如图 5(b) 所示, 当 $5 \text{ mN} \leq L_0$ 时, F_{+V} 与 L_{+V} 近似呈线性关系, 线性拟合结果表明增长斜率约为 0.36.

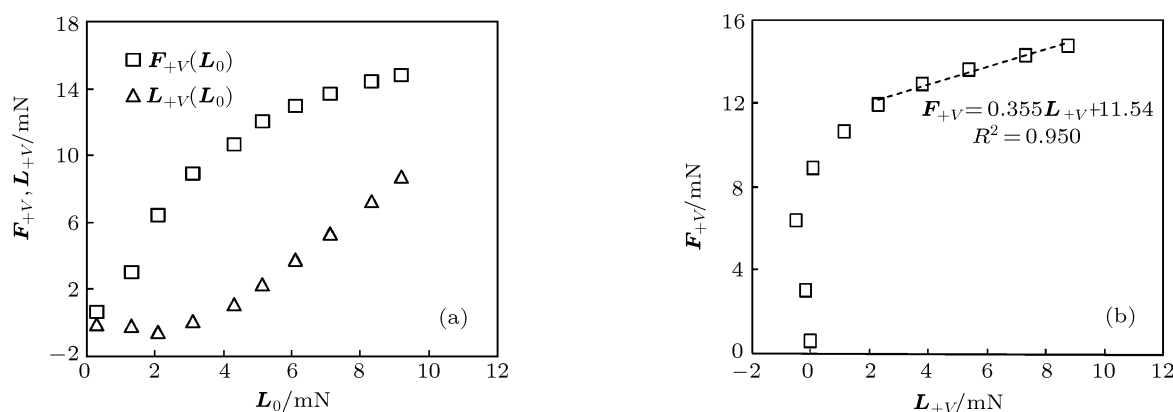


图 5 沿顺刚毛弯曲方向载荷 - 摩擦力实验结果 (a) 法向力 L_{+V} 与摩擦力 F_{+V} 与法向预载 L_0 的关系曲线; (b) 摩擦力 F_{+V} 随法向力 L_{+V} 变化关系图

2008 年赵博欣等^[16]报道了刚毛预载 $L_0 < 3$ mN 条件下的实验结果, 与本实验中 $L_0 < 3$ mN 时的结果一致. 但赵等人并没有报道 $L_0 > 3$ mN 时的情况. 图 5(a) 和 (b) 图显示, $L_0 > 3$ mN 后, L_{+V} 将由黏附力变为斥力, 且随 L_0 增大而线性增大, 同时摩擦力 F_{+V} 一直增大, 但增长趋势减缓, 最后随 L_0 , L_{+V} 增大而线性增加, 对 F_{+V} , L_{+V} , L_0 之间的关系将在下文详细论述.

3.4 讨论

研究表明, 在室温环境下, 洁净玻璃表面吸附的水分子会使黏着力随湿度增加, 黏附力与湿度之间具有非单调的关系^[11,18], 界面间存在的微量液体的体积变化也会对黏附力产生较大影响^[19], Huber^[13] 等用单个刚毛最末端小踏板与玻璃表面进行的黏附实验表明, 空气相对湿度从 1.5% 增加到 90% 时, 黏附力近似线性增大 70%. 在本实验研

究中, 玻璃表面在实验前依次用丙酮酒精去离子水超声清洗并干燥以排除液滴的存在; 所有实验均在超净间中进行, 实验时温度为 25°, 空气相对湿度为 34%, 且基本稳定, 因此, 湿度对黏着力影响在各载荷下均相等, 不影响载荷对壁虎刚毛黏着与摩擦的影响规律.

3.4.1 顺、逆刚毛弯曲方向拖动时刚毛的受力

逆着刚毛弯曲方向拖动时, F_{-V} , L_{-V} 与预载 L_0 , F_{-V} 与 L_{-V} 都呈较强线性关系, 且 $F_{-V} < L_{-V}$, 比值为 0.6. 可看出, 沿逆刚毛弯曲方向拖动时, 刚毛所受摩擦力遵循库仑干摩擦定律, 且摩擦系数约为 0.6, 规律与前人的研究类似^[16,17]. 但赵博欣等^[16]得到的结果为 0.26, Autumn 等^[17]的实验结果为 0.31. 这种差异可能来自于对摩擦表面材料的不同及壁虎刚毛个体的不同. 文献 [16] 实验中的对摩表面为聚合物材料, Autumn 等使用了硅

片, 本研究中使用洁净玻璃表面. 材料不同, 表面自由能大小不一样, 范德华力产生的黏附和摩擦力通常不一样. 壁虎个体差异也可能产生一定影响, 如本实验中所用刚毛长度在 80—90 μm 左右, 而赵博欣、Autumn 等所用刚毛长度则约为 110 μm . 郭策等^[20]对两种壁虎刚毛黏附力的测试实验也揭示刚毛的摩擦性能与其几何形状有关.

顺刚毛弯曲方向拖动时, 刚毛所受摩擦力、法向力及预载荷关系较复杂, 从其总体变化趋势来看, 可分为 3 个阶段:

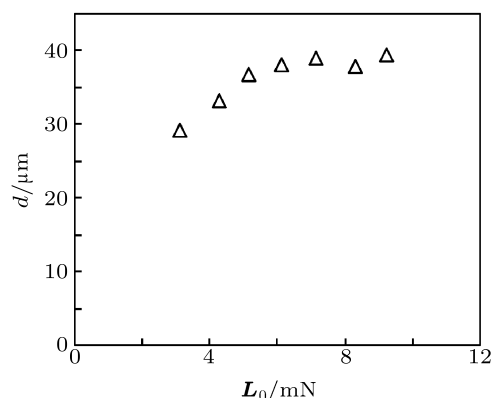


图6 预载大于 2 mN 时, 沿顺刚毛弯曲方向拖动时刚毛法向变形 d 与预载荷 L_0 的关系曲线

$L_0 \leq 2 \text{ mN}$ 时, 由于壁虎刚毛黏在一个直径 4 mm 的钢球上, 理论上, 0.4 mm 长的刚毛对应圆心角约为 11° 的圆弧, 进给 2 μm , 即可使刚毛表面与玻璃表面完全接触, 但实际上刚毛样品表面的不平度要大于此值. 实验观察发现, 约需要 20 μm 左右的进给, 对应 $L_0 \approx 2 \text{ mN}$ 时, 刚毛与玻璃表面才从部分接触变为完全接触. 因此该阶段 F_{+V} 的增加主要是由接触刚毛数增多引起的; 另外, 部分最先接触的刚毛接触角度的变小也将使 F_{+V} 增大, 这一结果与壁虎刚毛在实际不平整表面加载增大接触面积以产生黏附的过程有一定相似性. 在此阶段, 沿法向, 预载荷能被黏附力完全抵消, 从而法向力表现为黏附力, 而且, 黏附力增大幅度要大于预载增加幅度, 故黏附力绝对值随预载增大而增大. 值得注意的是, 实验中多大进给或多大预载才能使刚毛完全与表面接触取决于刚毛末端表面的实际平面度. 该平面度与钢球的直径、粘接的效果及刚毛表面本身的平面度有关. 钢球直径越小, 刚毛最末端表面弯曲程度越大; 而在直径较大时, 则因刚

毛面积较小, 钢球曲率导致的刚毛末端弯曲可以忽略. 本实验中, 由图 2(c) 和 2(d) 可看出, 刚毛表面整体弯曲程度小于微观起伏, 刚毛与对摩表面完全接触所需预载荷大小主要由粘接效果及刚毛本身的不平度引起的综合微观起伏程度决定, 刚毛的表面不平度与实验选材有关, 粘接效果可通过熟练操作加以控制.

当 $2 \text{ mN} < L_0 \leq 5 \text{ mN}$ 时, 随 L_0 增大, 刚毛与对摩玻璃表面全部接触, 接触刚毛数量不再变化, 此时, 刚毛沿法向的平均变形量 d 可根据进给位移及法向测力弹簧变形量的差值计算出, 图 6 所示即为该变形量与预载 L_0 的关系. 图 6 显示, 随 L_0 增大, 刚毛法向变形 d 增大, 必然使刚毛与玻璃表面的接触角度 θ (或剥离角度) 变小, 依据前人提出的刚毛接触模型^[9], 摩擦力与黏附力随 θ 减小都将有较大增加. F_{+V} 的变化可由摩擦二项式理论来加以说明, 其值的变化由两方面因素引起, 其一是法向斥力的增加引起的机械作用项增强, 增加的速率等于沿卷入方向纯机械作用的摩擦系数 u_{im} ; 其二是接触角度变小使黏附力增加, 分子作用项增强. 综合来看, F_{+V} 随 L_{+V} 增大的斜率将大于 u_{im} . 该阶段黏附力增加的速率小于预载荷增大的速率, 故刚毛所受黏附力只能部分抵消法向预载, 刚毛所受法向力由黏附力逐渐变为斥力.

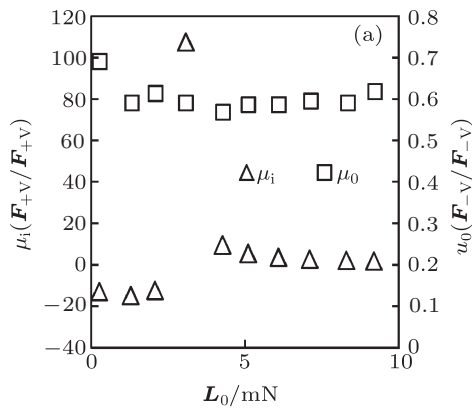
当 $5 \text{ mN} \leq L_0 < 9 \text{ mN}$ 时, 一方面与壁面接触的刚毛数量趋于饱和, 另一方面图 7 显示法向变形 d 不再变化, 从而接触角度 θ 将不变. 故刚毛所受黏附力趋于饱和. 进一步加大预载, F_{+V} 只会因刚毛与壁面的机械作用增强而有所增大, 从而 F_{+V} 与 L_{+V} 呈线性关系 (如图 5(b) 所示), 且增长的斜率为沿卷入方向纯机械作用的摩擦系数 u_{im} , 图 5(b) 显示, $u_{\text{im}} = 0.355$. 该阶段黏附力达到饱和, 且只能部分抵消预载, 故拖动时所受法向力随预载增加而近似线性增大.

沿顺刚毛弯曲方向刚毛拖动时所受法向力表现为预载与拖动时所受黏附力的合力, 顺刚毛弯曲方向拖动时, 预载能被黏附力全部抵消, 从而使刚毛所受法向力表现为黏附力——正如赵博欣等^[17]研究报道的那样. 本研究进一步揭示, 随预载增大, 黏附力最终达到饱和, 只能部分抵消预载, 而使法向力表现为斥力. 这一研究结果有助于进一步理解壁虎的攀爬机理, 即壁虎刚毛一直工作在较小预载

情况下,且能通过脚趾的运动来调整接触状态,使预载能被产生的黏附力完全抵消,从而实现攀爬.其他的动物或在常见的固固接触相对运动中,一方面预载较大,另一方面,面与面间接触不良使相对运动时产生的黏附力有限,不足以抵消预载,从而法向力表现为斥力,这个过程中,黏附力其实也存在,但不易被感知.

3.4.2 摩擦各向异性的表征

取摩擦力与法向力比值为当量摩擦系数,并规定刚毛法向力为正压力时摩擦系数为正,得到摩擦系数 μ_i (卷入), μ_o (卷出) 随 L_0 的变化如图 7(a) 所示. μ_o 稳定在 0.6 左右基本不变. μ_i 因 L_{+V} 会变化



方向,经历由负到正的变化.故理论上, μ_i 在 L_0 某处不会连续,且值趋于无穷;静载 $L_0 = 3$ mN 时,因法向力较小为 0.08 mN (图 5),而摩擦力为 8.9 mN,从而摩擦系数高达 108.在 $L_0 > 3$ mN 后,法向力变为正压力,且此时 μ_i 随 L_0 增大而减小.

摩擦系数可以看作单位法向力作用下所产生的摩擦力的大小.刚毛在不同方向上摩擦系数不一样的变化趋势反映的是刚毛的摩擦各向异性.将同样环境条件、相同初始载荷与拖动速度下,两相同对摩表面沿两不同方向发生相对运动时的摩擦系数之比定义为摩擦各向异性参数,记为 A_f (friction anisotropy),即

$$A_f = \mu_1/\mu_2, \quad (1)$$

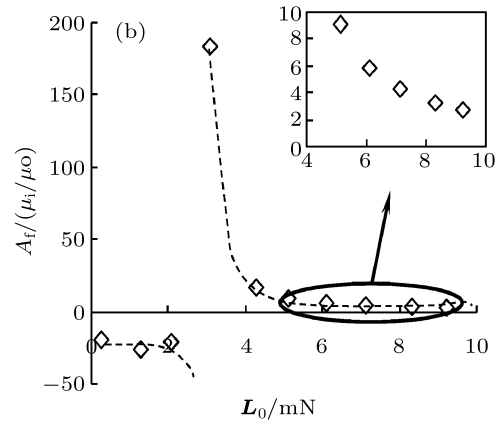


图 7 摩擦系数、摩擦各向异性特征参数与预载关系曲线图 (a) 顺逆刚毛弯曲方向等效摩擦系数随法向静载变化曲线; (b) 摩擦各向异性特征参数 A_f 随法向静荷 L_0 的变化曲线,图中虚线表示数据理论趋势线,圈中所示数据点放大图如右上角所示

其中 μ_1, μ_2 分别表示沿第一、二个相对运动方向上运动时的摩擦系数.本实验中,第一、二方向分别取为顺、逆壁虎刚毛弯曲方向, A_f 随 L_0 变化曲线如图 7(b) 所示,随 L_0 增大, A_f 先负后正,正负反映摩擦实验过程法向力方向的不同.

若第一、二方向分别取为使得摩擦系数最大,最小的方向,则所得 A_f 便是特定载荷与速度下摩擦各向异性程度的最大值,将该值定义为摩擦各向异性特征参数 A_{cf} (characteristic value of friction anisotropy),该两方向为摩擦各向异性特征方向,即

$$A_{cf} = \frac{\mu_{max}}{\mu_{min}}. \quad (2)$$

要求刚毛的 A_{cf} 值需要知道刚毛拖动时具有最大,最小摩擦系数的方向.一方面,沿顺刚毛弯曲方向拖动时,将具有最大摩擦系数,因为刚毛的结构决定了沿该方向拖动时,接触面积最大,所受黏附力达到最大,这一点亦体现在 Autumn 等 [7] 的实验中;而依上小节分析,黏附力能全部抵消或部分抵消预载荷,故一定预载荷下,沿该方向拖动,所受法向斥力将最小,从而摩擦系数最大,图 7(a) 显示, μ_{max} 在某预载处甚至有趋于无穷的趋势.另一方面,沿逆刚毛弯曲的方向拖动时,本文的实验结果以及其他结果 [7,16,17] 都显示摩擦力与法向力遵循库仑干摩擦定律,基本不受法向黏附力的影响,拖动时,预载荷被抵消很少,所受法向斥力将最大,因而摩擦系数将最小.从生物进化角度来看,沿顺、

逆刚毛弯曲方向的拖动分别对应于脚趾的卷入与卷出,壁虎借以实现黏附与脱附,该两方向必然具有最大、最小摩擦系数.综合以上分析,壁虎刚毛摩擦各向异性特征方向便是顺、逆刚毛弯曲的方向,即有, $A_f = A_{cf}$,从而图 7(b)亦是 A_{cf} 与预载 L_0 关系曲线.图 7(b)还显示,对壁虎刚毛而言,在预载 L_0 小于 0.6 atm (9 mN/0.37×0.4 mm²) 时 $A_{cf} > 2.5$.至于 $L_0 = 3$ mN 时,因拖动时法向力趋于 0 使 μ_{\min} 趋于 0, A_{cf} 有趋于无穷的趋势,故预载约为 0.2 atm 时, A_{cf} 会出现奇异点.

对某物体而言, A_f 是相对运动方向、载荷、拖动速度的函数,而 A_{cf} 则只是载荷、拖动速度的函数.很明显,若被黏附表面具有各向同性结构,且测试工况(载荷,拖动速度,湿温度等)固定, A_{cf} 便是一常数,该常数反映了摩擦物体表面结构甚至原子排列的各向异性的程度.本研究中,正是刚毛杆的形状、取向及杆端层级结构的各向异性使得在同样预载下,沿不同方向发生相对运动时,壁虎刚毛构形及与对摩表面的接触情况不一样,从而产生迥异的摩擦黏附行为,即摩擦各向异性,并反应在 A_{cf} 的大小中.很多生物材料及无机材料具有摩擦各向异性,例如缅甸蟒蛇腹鳞也是一种具有较强摩擦各向异性的生物材料,其摩擦各向异性特征方向分别是后前向,在载荷小于 100 mN (直径为 4 mm 的球

与平面接触)时,其 A_{cf} 值约为 1.3—1.4^[21];表面原子级光滑的白云母在对摩时,在载荷为 0.9 MPa、温度为 130 °、干燥环境下^[22], A_{cf} 值为 3.5;表面为 (001) 面金刚石触针在原子级光滑的金刚石表面滑动时,摩擦各向异性特征方向分别是沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向与 $\langle 110 \rangle$ 晶向,载荷大于 80 GPa 时^[23], A_{cf} 值约为 1.5.

4 结论

系统揭示了壁虎刚毛随预载增大时法向力与摩擦力之间的关系,预载可能全部或部分被拖动时产生的黏附力抵消从而表现为黏附力或斥力.首次报道了当预载足够大时,沿顺刚毛弯曲方向拖动时产生的黏附力将达到饱和,法向力表现为斥力,且摩擦力将与法向力呈线性关系.提出了摩擦各向异性参数 A_f 及其特征参数 A_{cf} 来定量表征刚毛所表现出的摩擦各向异性,该特性由刚毛杆的弯曲及杆端层级结构共同决定.定义的参数 A_f , A_{cf} 使得对摩擦各向异性的认识由定性认识上升为定量分析,可为壁虎刚毛仿生表面性能设计提供定量参考;同时从摩擦学的角度来看,该参数可用于其他摩擦副的摩擦特性的表征.

- [1] Arzt E, Gorb S 2003 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **100** 10603
- [2] Li H K, Dai Z D 2008 *Chin. Sci. Bull.* **58** 2697 (in Chinese) [李宏凯, 戴振东 2008 科学通报 **58** 2697]
- [3] Wang Z Y, Wang J T 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 841 (in Chinese) [王周义, 王金童 2010 科学通报 **55** 841]
- [4] Smith M A, Callow A J 2006 *Biological Adhesives* (Berlin: Springer) 225
- [5] Hansen W R, Autumn K 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **102** 385
- [6] Metin S, Fearing 2003 *J. Adhes. Sci. Technol.* **17** 1055
- [7] Autumn K, Liang Y A 2000 *Nature* **405** 681
- [8] Sun J R, Guo C 2005 *Acta Zool. Sin.* **51** 761 (in Chinese) [孙久荣, 郭策 2005 动物学报 **51** 761]
- [9] Tian Y, Pesika N 2006 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **103** 19320
- [10] Wang L S, Zhao Y P 2002 *Tribology* **22** 339 (in Chinese) [王立森, 赵亚溥 2002 摩擦学学报 **22** 339]
- [11] Qian L M, Luo J B, Wen S Z, Xiao X D 2000 *Acta Phys. Sin.* **11** 2247 (in Chinese) [钱林茂, 雒建斌, 温诗铸, 萧旭东 2000 物理学报 **11** 2247]
- [12] Autumn K, Sitti M 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **99** 12252
- [13] Huber G, Bhushan B 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **102** 16293
- [14] Sun W X, Neuzil P 2005 *Biophys. J.* **89** L14
- [15] Kim T W, Bhushan B 2008 *J. R. Soc. Interface* **520** 319
- [16] Autumn K, Dittmore A 2006 *J. Exp. Biol.* **209** 3569
- [17] Zhao B X, Pesika N 2008 *Langmuir* **24** 1517
- [18] Qing T, Shao T M, Wen S Z 2006 *Tribology* **24** 295 (in Chinese) [卿涛, 邵天敏, 温诗铸 2006 摩擦学学报 **24** 295]
- [19] Zhang X H, Zhang X J, Liu Y H, Schaefer J A, Wen S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4722 (in Chinese) [张晓昊, 张向军, 刘永和, Schaefer J A, 温诗铸 2007 物理学报 **56** 4722]
- [20] Guo C, Wang W B 2007 *Sci. China Ser C* **37** 568 (in Chinese) [郭策, 王文波 2007 中国科学 C 辑 **37** 568]
- [21] Zhang Z L, Ding J N, Yang J C, Fan Z, Hu Y Y 2007 *Tribology* **27** 362 (in Chinese) [张占立, 丁建宁, 杨继昌, 范真, 胡友耀 2007 摩擦学学报 **27** 362]
- [22] Hirano M, Shinjo K, Kaneko R, Murata Y 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2642
- [23] Enomoto Y, Tabor D 1981 *Proc. R. Soc. Lond. A* **373** 405

Experimental research of load effect on the anisotropic friction behaviors of gecko seta array*

Wan Jin Tian Yu[†] Zhou Ming Zhang Xiang-Jun Meng Yong-Gang

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 10 March 2011; revised manuscript received 26 April 2011)

Abstract

The load effect on the anisotropic friction property of gecko seta arrays have been experimentally investigated on a homemade micro adhesive and friction force detect device with isolated seta arrays. The result shows that when sliding against the direction of the seta curvature to grip out, the friction force is proportional to the normal load with a friction coefficient of about 0.6. When sliding along the direction of the seta curvature to grip in, the normal preload force could be fully or partly transformed into adhesion force and repulsive force while friction force rapidly rose with the increment of the applied preload. Under the same normal preload, the lateral friction force in grip in is more than twice of that in grip out. These properties of anisotropy in friction and adhesion are determined by the micro and nano-structures of setae.

Keywords: gecko seta, adhesion, friction, anisotropy

PACS: 62.20.-x, 62.25.-g

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in Universities of Ministry of Education, China, and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51021064).

[†] E-mail: tianyu@tsinghua.edu.cn