

一类蚂蚁黏附系统的实验研究¹⁾

李新然 * 孙冬雅 * 谢季佳 † 陈少华 †,2) 王海军 **

(北京市第四中学高三, 北京 100034)

†(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)

**(北京师范大学鄂尔多斯附属学校, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要 以家蚁为研究对象, 利用扫描电镜、光学显微镜等仪器对其足部微观黏附结构进行了实验观察, 研究了家蚁在洁净玻璃板上爬行的黏附机理, 并观察了不同表面粗糙度、倾斜度的玻璃板及蜡表面上蚂蚁的爬行行为。实验结果表明此类蚂蚁的黏附主要依赖于足部缩放自如的囊状中垫。玻璃板粗糙度及倾斜度对蚂蚁爬行行为无明显影响, 而随着蜡表面倾斜度的增大, 家蚁的黏附爬行能力逐渐降低, 最终在一定倾斜度的蜡表面黏附失效。

关键词 蚂蚁, 黏附系统, 中垫, 表面

中图分类号: Q692 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)05-051-06

EXPERIMENTAL STUDY OF A KIND OF ANTS' ADHESIVE SYSTEM¹⁾

LI Xinran* SUN Dongya * XIE Jijia † CHEN Shaohua †,2)

(The Fourth High School of Beijing, Beijing 100034, China)

†(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**(Ordos School Attached to Beijing Normal University, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract With the help of scanning electronic microscope and optical microscope, the micro-adhesive systems of house ants are observed and studied experimentally, especially for the adhesive mechanisms on clean glass sheets and the climbing behaviors on glass sheets or wax surfaces with different surface roughness or tilted angles. Experimental observations show that the adhesion of ants depends largely on an arolium, which can extend freely. The surface roughness and tilted angles of glass sheets have no obvious effects on ants' climbing behaviors. However, ants' adhesion ability decreases when the tilted angle of wax surface increases, and becomes invalid beyond a critical tilted angle.

Key words ants, adhesive system, arolium, surface

大量的研究已经表明, 壁虎、蜘蛛、苍蝇、树蛙等具有超强黏附能力的动物及昆虫, 其黏附组织可以分为两类, 一类是毛发状的黏附表面, 一类是光滑的黏附表面^[1-2]。其中, 壁虎、蜘蛛等的黏附机制主要是依赖于表面分子引力的作用, 而苍蝇的黏附则依赖于毛细力的作用^[3-5]。树蛙的黏附机制还在进一步的研究中^[6]。研究这些动物及昆虫的黏附机制, 对仿生设计超强黏附材料、仿生爬壁机器人黏附

系统等具有重要的理论意义及指导价值, 特别是对表面分子力依然存在的太空操作设计具有优势。

蚂蚁是生活中常见的爬行昆虫, 一些种类的蚂蚁, 可以在较光滑的表面爬行自如, 并且在天花板上也可以自由地行走。这些蚂蚁的黏附爬行机理是否与人们关注较多的壁虎、蜘蛛等黏附机理一致, 还是具有不同的微观黏附结构及黏附机制, 其黏附机制到目前为止还没有公认的观点^[7-9], 而且蚂蚁的

2011-01-13 收到第 1 稿, 2011-06-20 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (10972220, 10732050, 10721202) 及 LNM 开放课题资助项目。

2) 陈少华, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为生物及仿生材料力学、级纳米尺度力学、表面 / 界面力学、先进复合材料等。E-mail: shchen@LNM.imech.ac.cn

种类繁多，不同的生存环境对其黏附系统的演化应该具有很大的影响。这就促使了我们对蚂蚁黏附机制进行了初步实验研究。

选取家蚁作为主要研究对象，实验观察了家蚁黏附系统的微观结构，利用透明玻璃为基底，实时观测了家蚁黏附系统在蚂蚁爬行时的具体黏附行为；制作了不同粗糙度的玻璃表面，考虑不同的倾斜度，观察家蚁的黏附爬行行为；进一步分析了家蚁在蜡表面的黏附；该工作为进一步深入系统地研究蚂蚁的黏附机制提供了初步的实验基础及基本认识。

1 实验仪器及试样制备

1.1 实验仪器

实验中应用的扫描电镜为 HITACHI S570 和 FEI Sirion400NC，用于观察蚂蚁足部的细节，如微观结构，结构表面细节等。由于扫描电镜的操作要求，只能对死蚂蚁足部的微观结构进行观察。

实验中应用的光学显微镜为 POLYVAR-MET，用于观察蚂蚁的实时黏附动作。利用 CCD 采集显微镜观察到的图像，并以 30 FPS 的速度进行了视频采集。

1.2 试样制备及实验方法

1.2.1 黏附系统的微观观察实验

选取家蚁作为研究对象，分别在花园中捕捉 20 只，放在有土的塑料瓶内敞口保存。在花店温室中捕捉 20 只（冬天），放在有土的塑料瓶内敞口保存。

扫描电镜观察的蚂蚁共分为 3 组，分别应用无水乙醇及液氮将其快速杀死。喷金后在扫描电镜下观察。主要观察蚂蚁足部黏附系统的表面微观结构及尺寸分布。

光学显微镜观察活体蚂蚁的爬行行为，将蚂蚁放置于已经调整好的光学显微镜的载玻片上，让其自由爬动，移动载物台进行追踪，并适时拍照记录。为了避免蚂蚁爬行过快给实验观察带来不便，我们将蚂蚁用普通透明胶带黏在载玻片上，使其背部被黏住，腹部朝向载玻片，而头和腿有自由活动的空间。之后将载玻片有蚂蚁的一面朝下，倒扣在载物台上。蚂蚁在刚被黏住和受显微镜强光照射时比较惊慌，让其稳定一段时间，再进行观察。适时用 CCD 进行拍照记录。

同样选取蚂蚁分为 3 组，每组两只。有两只在活的情况下直接将腿切下（前、中、后腿做好记号），另两只在低温金属表面冻死（先将蚂蚁放在铝盘中，在其正常爬行时将铝盘浸到液氮中。不让蚂蚁与沸腾的液氮接触，以免破坏细小结构）。还有两只直接放在喷金室内抽真空杀死。喷金后在扫描电镜下观察。主要关注光学显微实验中发现的足部囊结构。

1.2.2 表面粗糙度对黏附的影响

制作不同粗糙度的玻璃表面：找来多块相同大小，表面光滑的玻璃板，保持一块光滑玻璃板作为对照，另外的几块用不同型号的砂纸（400, 1 000, 2 000）分别进行有序（平行）与无序的均匀打磨，直到粗糙痕迹明显可见。

将质地均匀的蜡加热熔化，并在光滑玻璃上凝固。冷却后用温水浸泡，使蜡稍稍变软，轻轻从玻璃上揭下，晾干，谨慎保存。

粗糙度对黏附影响的实验分为两部分，第一部分是观察蚂蚁在不同粗糙程度的玻璃板上的爬行快慢。对于同一粗糙程度的玻璃板，我们改变倾斜角度，从零度依次增加到 90°，观察蚂蚁的黏附与爬行情况；第二部分是令蚂蚁在蜡表面上爬行，并改变倾斜角度，观察爬行情况。实验中可以应用普通相机摄像记录。

2 实验结果与分析

2.1 蚂蚁足部微观表面形貌

扫描电镜下观察蚂蚁的足部微观结构如图 1(a)~1(d) 所示。乙醇处理使得蛋白质变性，如图 1(a), 1(b) 所示，并不能客观反映表面微观形貌及组织结构。

图 1(c), 1(d) 给出了液氮处理后蚂蚁足部的表面微观图像，蚂蚁腿部共有 8 节，前 4 节较长，后 4 节短小，最后一节末端有两个钩子，在粗糙表面爬行时发挥一定的作用。每一节表面和身体表面均匀布满稀疏的长短不一的刚毛。对比于蚂蚁足部的刚毛，自然界甲虫足底的刚毛纤细，实验已经证实此纤细的刚毛用以与物体表面黏附^[10]，且甲虫的刚毛更加细密，有二级结构，第一级长 35 μm 左右，第二级长 10 μm 左右，与表面实现密切接触，而蚂蚁足部表面的刚毛相对稀疏，是否亦应用于黏附作用，还有待于进一步的实验考察。

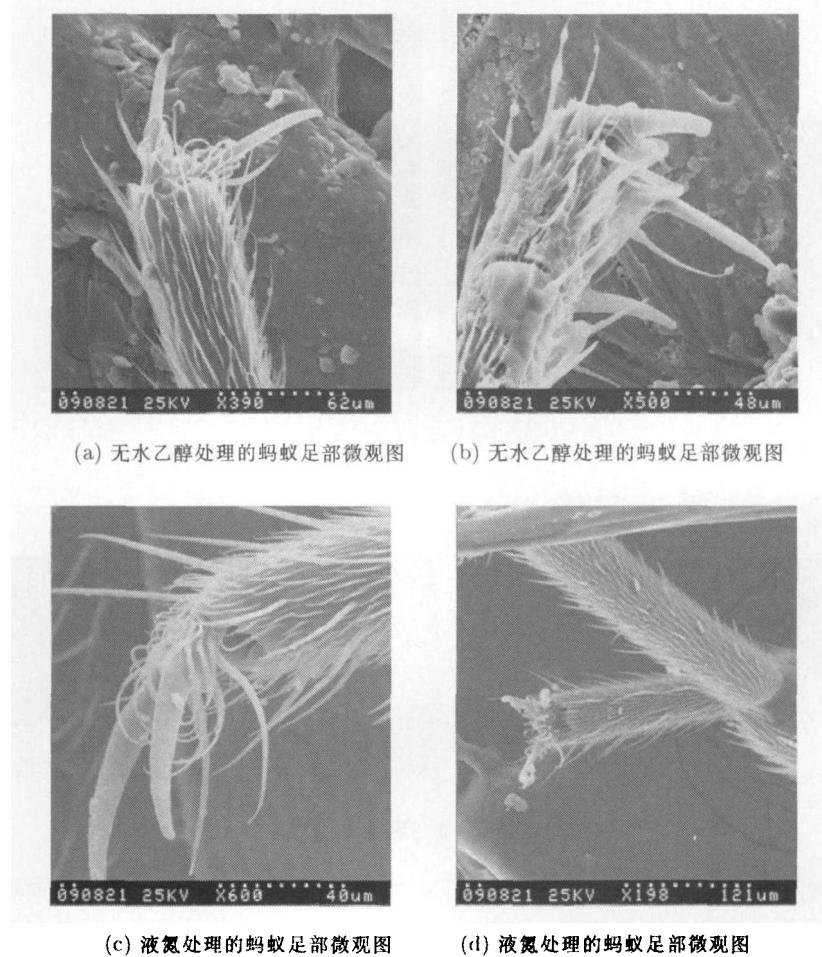


图 1

2.2 蚂蚁黏附特征

光学显微镜给出了活体蚂蚁与固体表面黏附的图像, 如图 2 所示。实验发现蚂蚁的足部前端具有一种较透明, 类似吸盘的囊垫, 长度约为 $35\mu\text{m}$, 位于端部两个足钩之间。在透明玻璃板上运动时, 此囊垫与玻璃板密切接触。图 2(a) 显示的是从花房中捕捉到的蚂蚁足部前端显微图像, 吸盘形状较为圆滑。图 2(b) 为花园中捕捉到的蚂蚁足部前端显微图像, 吸盘似乎具

有一定的棱角。属于两种不同的蚂蚁, 后面实验将进一步对前一种蚂蚁黏附系统进行细致的研究。

图 3 给出了光学显微镜下足部囊垫在黏附过程中的变化, 初始蚂蚁向左上方拖动自己的右前腿, 吸盘与玻璃表面得到充分的接触, 并清晰可见。可见蚂蚁为了与表面充分黏附, 必需施加一个侧向力, 而图像显示两个足钩向后弯曲, 对玻璃表面黏附似乎无贡献。

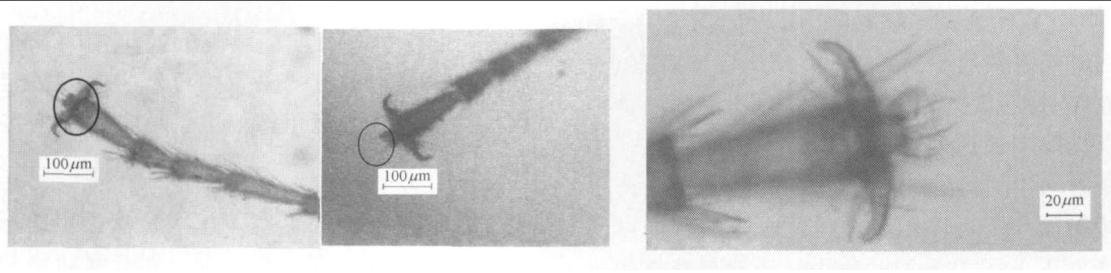
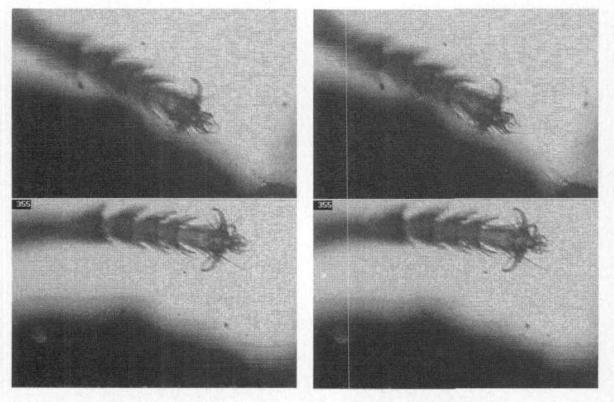


图 2



(b) 光学显微镜下蚂蚁足部前端囊状中垫

图 2(续)

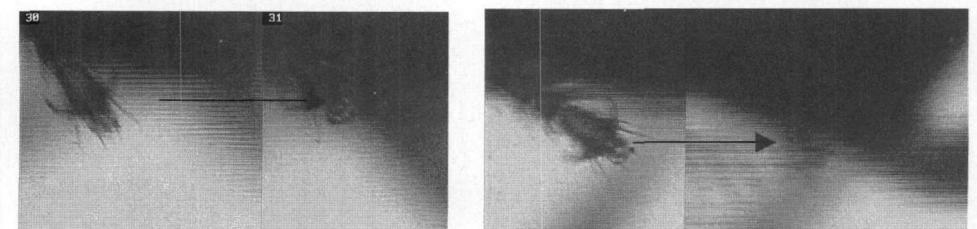


图 3 光学显微镜下囊状中垫的变化

图 4 为光学显微镜下蚂蚁足部离开玻璃表面的过程, 由左到右依次显示不同时间的脱黏快照。在此过程中, 可以发现囊垫与玻璃接触面发生微妙的变化, 脱

黏表现为囊垫与玻璃表面接触面积逐渐减小的过程, 面积减小到一定程度, 则足部与玻璃表面脱离。黏附与脱黏更详细的实验研究在后面将进一步给出。

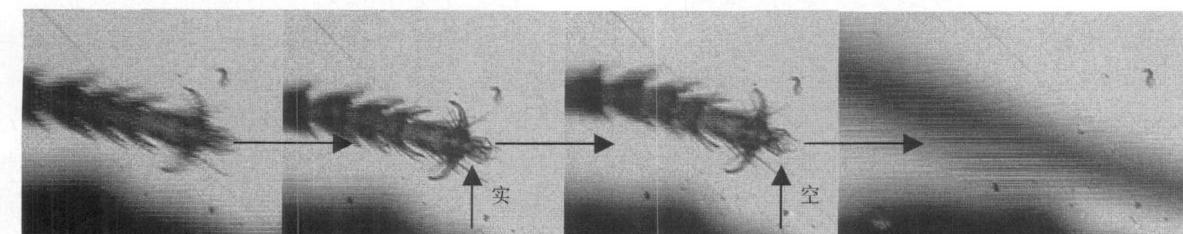


图 4 光学显微镜下囊状中垫脱黏过程

大量实验已经证明一类小动物或昆虫主要有几种黏附原理: 真空黏附、湿黏附、分子间作用力。考察本文所研究蚂蚁的黏附系统, 并结合实验观察(对两种蚂蚁爬行路线多次观察, 未发现明显的液体痕迹), 可以排除本文所研究蚂蚁的湿黏附可能性。由蚂蚁的黏附动作, 即需要预先施加一种预压力, 产生足够的接触面积, 可以初步推论所研究蚂蚁的黏附原理可能属于分子力的相互作用。当然自然界中, 蚂蚁种类繁多, 生存的环境不尽相同, 从优化的角度可以推论, 不同种类的蚂蚁, 其黏附机理亦可能不尽相同。进一步的实验研究还有待开展。

2.3 囊状中垫的形状及结构

上面光学显微实验发现蚂蚁足钩间长有一个囊状中垫, 且对蚂蚁的黏附爬行似乎起着决定性的作用。我们进一步应用扫描电镜对囊状中垫进行重点研究。

图 5(a) 给出了真空下蚂蚁囊状中垫的形貌, 可以发现中垫的表面比较光滑。切开囊状中垫, 如图 5(b) 显示, 囊状中垫似乎为一个中空的球体。进一步使蚂蚁在低温表面行走, 一定时间后, 蚂蚁的囊状中垫被完全冰结, 冰结后的囊呈现鼓起的形态,

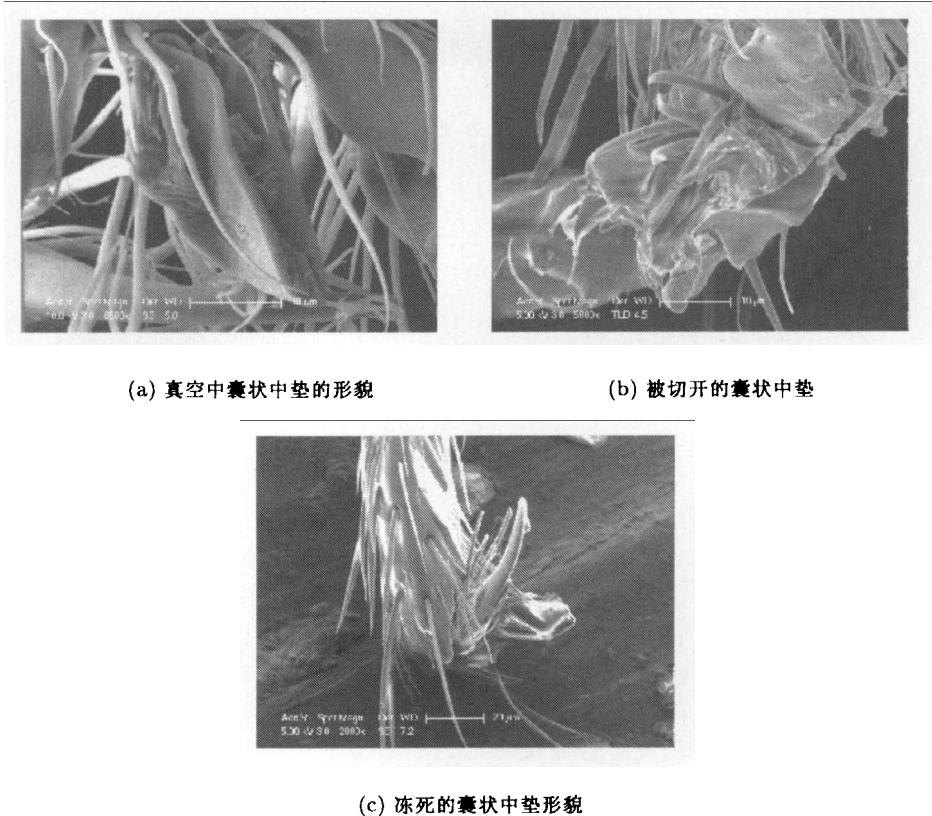


图 5

表面比较光滑，且与前面实验观察到的中垫相比，具有更大的体积，似乎外界的刺激，可能使蚂蚁试图增强黏附，如图 5(c) 所示。

由于囊状中垫对此类蚂蚁黏附具有重要的作用，实验发现中垫实际类似于空腔，可以排除此类蚂蚁利用真空吸附机理的可能性。

2.4 黏附与脱黏行为

对于囊状结构黏附机理，进一步利用光学显微镜进行实时观测。图 6(a) 给出了中垫黏附图像，可以

发现中垫大面积与玻璃基底接触，同时足钩的顶部与玻璃基底接触。图 6(b) 给出了接触面积减小的图像。由于蚂蚁被胶带粘着，蚂蚁在玻璃基底上试图挣脱束缚，脱黏过程与蚂蚁自由爬行时不同。此时蚂蚁的腿围绕接触面积转动，当中垫接触面积减小到一定大小时 ($5 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$)，足部足够从玻璃表面上脱黏。说明中垫与玻璃表面脱黏瞬时，接触面积并非完全消失，类似于两接触体由于表面力的相互作用，脱黏时刻存在一定的临界接触面积。图 7 给出了蚂蚁试图挣脱束缚，足部脱黏的全过程。

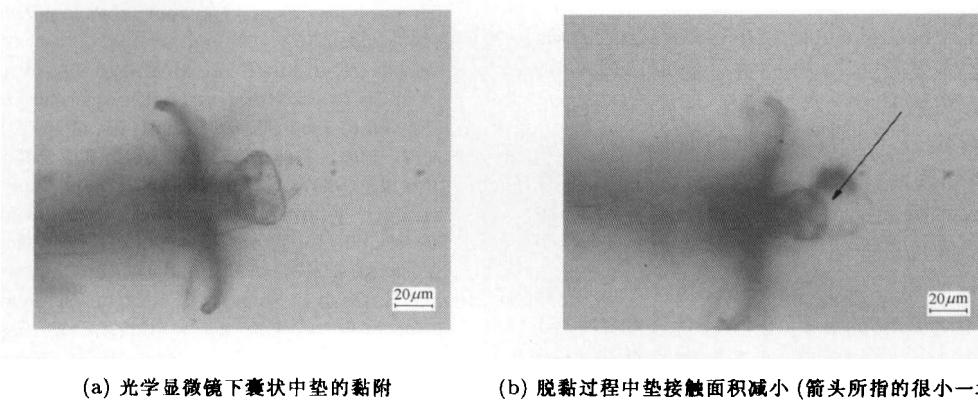


图 6

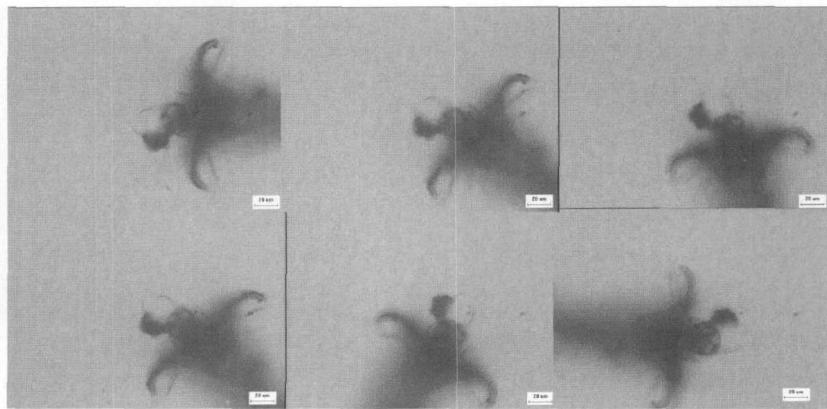


图7 脱黏过程中接触面积快照

2.5 不同表面的宏观黏附行为

对于粗糙的玻璃面及比较光滑的蜡表面进行了蚂蚁宏观爬行行为的观测，最终发现，本文所研究的具有囊状中垫的蚂蚁，在两种表面上具有不同的宏观黏附行为：(a) 在玻璃上，蚂蚁喜欢向下爬很少向上爬；(b) 无论是平行或均匀打磨的玻璃对爬行都没有太大影响。在平行纹上，蚂蚁更容易顺纹爬（偶尔也会垂直于条纹爬行），同时更大的角度会让蚂蚁下行速度减小；(c) 蚂蚁在蜡上爬行时，如果表面倾角不大，爬行很自如。但蜡表面倾角不断增大时，爬行会显得越来越困难。倾斜到一定角度（约为 $55^{\circ}\sim70^{\circ}$ ），蚂蚁则会从蜡表面掉下来。

由上面的宏观黏附行为观察可以推论，由于蚂蚁的爬行似乎不受表面粗糙度的影响，蚂蚁的黏附应该不属于真空吸附。但蚂蚁的黏附机理是湿黏附、干黏附，还是两者的共同作用？例如，爬行路线是否存在微液滴？倾斜到一定角度时，蚂蚁与蜡表面的具体接触图像？如果是干黏附，在一定倾斜度的蜡表面不能黏附是否由于表面能较小，造成接触面正应力较小，从而影响摩擦力？这些问题将促进我们开展更深入系统的实验和理论分析。

3 结论及展望

本文通过实验初步研究了一类蚂蚁的黏附系统及黏附特征，最终发现此类蚂蚁的足部黏附结构除了两只足钩适应较粗糙表面爬行外，在足钩之间存在一个中空的囊状垫，类似于中空的软球，伸缩自如。当蚂蚁需要黏附时，囊状中垫伸出，通过侧向滑动，产生一个水平侧向力，使得囊状中垫充分与基底接触。通过接触面积减小到一定程度实现脱黏。初步实验未观察到爬行痕迹中的微液滴，且发现不同粗糙度的表面对蚂蚁的黏附爬行无明显影响，但对于蜡表面，存在一定的临界倾斜角度，使得蚂蚁的黏附失效。由初步实验可以排除蚂蚁通过真空吸附的可能性。蚂蚁的真实黏附机理，即依靠毛细力

的湿黏附，还是依靠表面分子力的干黏附，还需要深入系统的实验研究。另外对于不同种类的蚂蚁，不同的生存环境是否影响其黏附系统的结构或黏附机理也是我们即将开展的工作。对蚂蚁等一类昆虫及小动物黏附爬行能力的研究，包括其微观及宏观黏附行为，黏附系统的结构组成及不同的黏附机理的揭示，将为未来仿生设计超强黏附材料、黏附机器人等具有重要的指导和借鉴意义。

参 考 文 献

- Autumn K, Liang YC, Hsieh ST, et al. Adhesion forces of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405: 681-685
- Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 10603-10606
- Autumn K, Sitti M, Liang YC, et al. Evidence for van der Walls adhesion in gecko setae. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 12252-12256
- Scherge M, Gorb S. Biological Micro- and Nano-Tribology—Nature's Solutions. Springer, Berlin. 2001
- Gorb S, Beutel RG. Evolution of locomotory attachment pads of hexapods. *Naturwissenschaften*, 2001, 88: 530-534
- Federle W, Barnes WJP, Baumgartner W, et al. Wet but not slippery: boundary friction in tree frog adhesive toe pads. *J R Soc Interface*, 2006, 3, 689-697
- Federle W, Baumgartner W, Hölldobler B. Biomechanics of ant adhesive pads: frictional forces are rate- and temperature dependent. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206: 67-74
- Federle W, Brainerd EL, McMahon TA, et al. Biomechanics of the movable pretarsal adhesive organ in ants and bees. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98, 6215-6220
- 周群, 何斌, 岳继光. 蚂蚁的吸附力来源及其分泌液作用. 力学学报, 2007, 23(3): 428-432 (Zhou Qun, He Bin, Yue Jiguang. Source of attachment forces of ants and the secretion effect. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 23(3): 428-432 (in Chinese))
- Dai Z, Gorb S, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). *The Journal of Experimental Biology*, 2002, 205, 2479-2488

(责任编辑: 刘俊丽)