

# 蚂蚁的吸附力来源及其分泌液作用<sup>1)</sup>

周 群<sup>\*,†,2)</sup> 何 斌<sup>\*</sup> 岳继光<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(同济大学控制科学与工程系, 上海 200092)

<sup>†</sup>(上海理工大学理学院, 上海 200093)

**摘要** 基于离心分离技术研制了微小力测试平台, 测试到蚂蚁在光滑玻璃上的水平吸附力可达 40 倍身体重量. 用扫描电子显微镜观察了蚂蚁足的形态. 分析结果表明分泌液对吸附是很重要的, 排除掉真空力、静电力等吸附机制后, 推断吸附力主要来源于由分泌液产生的垂直于表面方向的毛细作用力和平行方向的黏性力. 用 ANSYS 分析表明垫子表面微褶皱可迅速排出液体. 这些研究可进一步揭开昆虫的吸附机制.

**关键词** 蚂蚁, 吸附力, 分泌液, 液体纳米膜, 仿生

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2007)03-0428-05

## 引 言

早在 17 世纪, 光显微镜先驱就被昆虫吸附垫的结构和功能吸引住了. 一些昆虫, 如蚂蚁、甲虫等, 能在非常光滑的表面上产生吸附力, 大小超过它们自身重量的 100 倍<sup>[1,2]</sup>. 这些昆虫不仅能紧抓住表面, 而且能在光滑表面奔跑. 要完成这些困难的任务, 昆虫必须能快速而有效地产生并控制吸附力. 对昆虫, 特别是脚垫为光滑表皮垫型的昆虫的吸附力来源和昆虫如何控制吸附和分离的机制还不是很清楚, 只有少数几个致力于昆虫的吸附器官的研究, 结论主要基于形态学.

本文在微小力测试实验平台上对蚂蚁 (*iridomyrmex anceps roger*) 的吸附力进行了测试. 在不同的表面, 如玻璃、纸、蜡表面均测试到较大的吸附力. 除了微力测试外, 还用扫描电子显微镜对蚂蚁爪子及爪垫的形态进行了观察和分析. 这些分析的结果除了对揭开昆虫的吸附机制有帮助外, 还可以用于仿生机器人足掌和研制新型吸附机理的爬壁机器人, 并大大扩展人类活动范围, 提高生产率.

## 1 吸附力测试

为了对活体微小动物如蚂蚁及下一步仿生材料进行黏着力测试, 我们研制了一基于高速图像反馈的黏着力测试平台. 如图 1 所示, 整个实验平台由

伺服电机驱动, 电机转速由工控机控制, 蚂蚁分别被放在水平和竖直的光滑玻璃表面进行测试, 斜面倾角  $\theta$  分别调为  $0^\circ$  和  $90^\circ$ . 平台上的高速摄像机 (100 帧 /s) 可以记录整个试验过程中的实时信息. 当电机转动时, 蚂蚁若要有效地吸附在玻璃上而不与之脱离, 需要由黏附力提供向心力; 当离心分离机的转速增加到一定值时, 蚂蚁就无法提供如此大的向心力而沿着运动的切线方向飞离开, 从而与接触面脱离; 边缘检测算法即可从高速摄像机捕获到的分离状态图像中提取出计算机可识别的分离信息, 并反馈给工控机; 工控机根据相关信息确定分离时刻的系统状态, 如电机转速、斜面倾斜度、蚂蚁所处半径等, 计算出蚂蚁在此条件下的最大吸附力和持续时间.

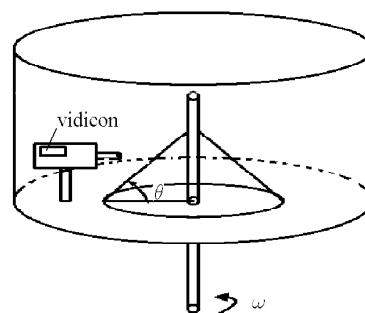


图 1 平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of platform

2006-05-08 收到第 1 稿, 2006-12-12 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (50405045), 上海市启明星计划 (05QMX1455), 上海市局管基金 (04JG05061) 资助项目.

2) E-mail: pingguotubao@yahoo.com.cn

平台光滑玻璃在实验前用酒精清洗，并自然风干。分别对 20 只蚂蚁进行吸附力测试。电机转速用预先编制的 VC 程序控制，从 0 开始以每秒增加 10r/min 的速度直到蚂蚁最后飞离出去为止，这时电机转速再缓慢下降到 0 开始另一次测试，每次测试时间为 2min。在测试水平吸附力时，观察到蚂蚁先到处行走，在平台转速慢慢增加到约 200r/min 时就处于“停滞”状态，再到约 410r/min 时沿平台滑行一段距离后在平台边缘飞离出去。从摄像机中观察到蚂蚁从停滞到滑行出去的时间为 22s，即蚂蚁的吸附力持续时间可接近半分钟。在玻璃上的水平吸附力测量结果如图 2 所示。图中横坐标为蚂蚁编号 1~20，中央水平细线为平均分离转速，为 410r/min。根据公式

$$F = mw^2r \tag{1}$$

其中  $F$  是水平吸附力， $m$  是蚂蚁质量， $w$  是蚂蚁飞离时的平台转速， $r$  是蚂蚁飞离时所处的半径， $r$  在实验中为 20cm。取蚂蚁的平均质量 5mg，则蚂蚁的水平吸附力为 1.84mN，这几乎是蚂蚁身体重量的 38 倍，可见其安全系数是非常高的。图 2 中，20 只蚂蚁分离转速的均方差为 12.07r/min，吸附力的均方差为 0.072mN。可见用离心分离方法测试出的蚂蚁吸附力值较稳定，与平均值的偏离程度较小，可靠地测试出了蚂蚁微小的力。

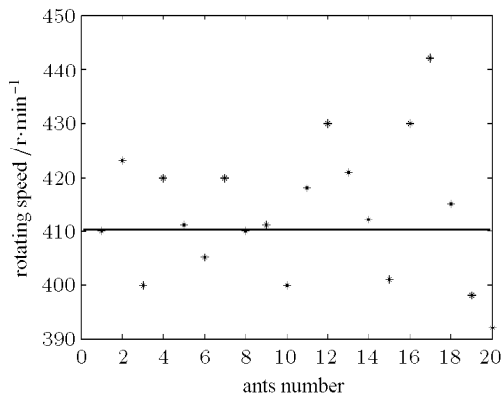


图 2 蚂蚁飞离时的平台转速

Fig.2 Rotating speed when ants fly away

斜面角度调到 90° 时测到蚂蚁在垂直于玻璃方向的平均分离转速为 305r/min，则蚂蚁垂直方向吸附力为 1.02mN。表 1 是蚂蚁在不同表面的力测试结果。可以看到在各个测试表面，蚂蚁都有较大的吸附力，这种吸附的鲁棒性使蚂蚁能在各种表面自由行走。

表 1 蚂蚁在不同表面飞离时的平台转速 (单位: r/min)  
Table 1 Rotating speed when ants fly away from different surfaces (Unit: r/min)

Different surfaces	Rough paper surface	Wax surface	Smooth glass surface
horizontal force	615	258	410
vertical force	400	191	305

## 2 吸附力来源分析

对于这么大的吸附力，其来源还没有统一的定论。昆虫吸附垫从外形结构可分为刚毛型和光滑表皮垫型两种，已经证实不分泌黏液的刚毛型足垫是分子间范德瓦耳斯力的作用。光滑型足垫的昆虫几乎都有垫子分泌液，这就增加了吸附力来源的复杂性。我们主要针对这类湿吸机制来分析其吸附力来源，考虑可能的吸附机制。

### 2.1 几种排除掉的吸附机制

从 Quanta 200 FEG 型扫描电子显微镜 (SEM) 中可以看到蚂蚁每只脚上都有一对爪子 (如图 3)，这使人想到机械连锁作用来钩在物体上，然而在非常光滑的光学玻璃表面蚂蚁也能安全地倒置行走，这就排除了这种机制；在光滑玻璃表面涂一层液体油脂，观察到蚂蚁在油膜上仍能竖直和倒置行走而不跌落，说明不是靠垫子摩擦力来吸附的。在用 1% 的 NaCl 溶液弄湿的滤纸上行走后，蚂蚁仍有吸附力，证明不是静电力吸附机制。图 3 中，蚂蚁爪垫为收缩状态，需要吸附时则完全展开，根据以往对蚂蚁的研究<sup>[1]</sup>，其足部只有爪子屈肌肌肉，柔软的垫子上没有合适的肌肉来产生真空吸附。范德瓦耳斯力

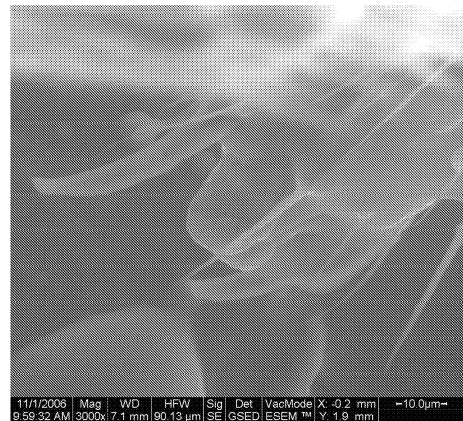


图 3 蚂蚁爪子及爪垫的 SEM 图

Fig.3 Image of claws and pad of an ant

是分子间力中最弱但也是最普遍的一种力，能作用在两平行盘之间，如在爪垫和叶子表面之间。这个力很大程度上依赖于两表面间的距离，随着两表面的极化率而增加。由

$$P = \frac{A}{6\pi D^3} \quad (2)$$

其中  $P$  为吸附应力， $A$  为 Hamaker 常数 ( $4 \times 10^{-20} \sim 4 \times 10^{-19} \text{J}$ )， $D$  为两平面间的距离。取蚂蚁的垫子面积为  $27500 \mu\text{m}^2$ ，并由 Federle 在蚂蚁静态倒置时估计的分泌液薄膜厚度  $90 \sim 160 \text{nm}$ <sup>[1]</sup>，计算出范德瓦耳斯力约为  $58.38 \text{nN}$ ，这个力太小而可以忽略。在极化率极低的聚四氟乙烯表面蚂蚁仍能攀爬和倒置，表明蚂蚁不是或不仅仅是靠范德瓦耳斯力的作用。

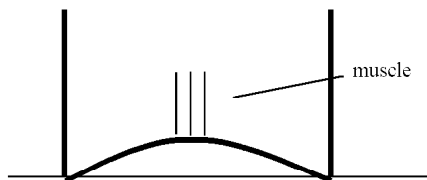
2.2 可能的吸附机制

在有一层脂质溶剂的表面行走半分钟后，蚂蚁就不能黏附在干净的玻璃表面，分泌液被溶剂溶解后蚂蚁就失去了吸附能力，说明黏液很重要。而液体作用能产生的力包括表面张力、毛细作用力和液体黏性力。

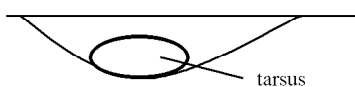
蚂蚁会在非常潮湿的纸表面倒置行走，这种情况下整个附骨表面被弄湿，蚂蚁被液体小滴悬挂下来 (图 4(b))。作用在蚂蚁上的重力为  $F = mg$ ，由表面张力来平衡

$$F = c\gamma \cos \theta \quad (3)$$

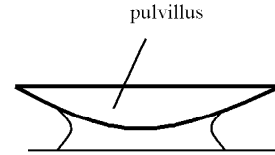
其中  $c$  是润湿表面的圆周， $\gamma$  是液体的表面张力 ( $73 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ，纯水)， $\theta$  是接触角。每只润湿的附骨表面圆周取为  $1000 \mu\text{m}$ ，当水是媒介时取接触角为  $0^\circ$ ，每只蚂蚁所受的力是  $0.438 \text{mN}$ ，而对应的蚂蚁重量为  $0.05 \text{mN}$ ，表明在很潮湿的表面这样的吸附是有效的。



(a) 真空吸附  
(a) Vacuum-cup adhesion



(b) 表面张力吸附  
(b) Surface-tension adhesion



(c) 毛细作用吸附  
(c) Capillary adhesion

图 4 3 种不同的吸附机制

Fig.4 Three kinds of adhesion mechanisms

如图 4(c) 所示，通过毛细作用力两表面间的一滴液体能使两表面吸在一起，这个机制以前已被考虑过<sup>[3,4]</sup>。两平面间的越过空气-液体分界面的流体静力学压力降 ( $P$ ) 是与接触面积无关的

$$P = \frac{\gamma}{\delta} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

$\delta$  是爪垫和地面间的距离， $\theta$  是液体接触角，吸附力就为  $F = PA$ ， $A$  是接触面积。这个力将拉动两表面靠近直到液体半月板达到吸附器官的边缘。蚂蚁自身能分泌黏液作为媒介，取分泌液厚度为  $100 \text{nm}$ <sup>[1]</sup>，表面张力为  $73 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ，接触角为  $0^\circ$ ，则静力学压力降为  $1460 \text{kPa}$ ，这需要在分泌液的抗张强度范围内。使用总的垫子面积  $27500 \mu\text{m}^2$ <sup>[5]</sup>，每只蚂蚁在垂直于接触面方向的力是  $40.15 \text{mN}$ ，这个值比每只蚂蚁的重量  $0.05 \text{mN}$  大得多，可以解释昆虫为什么能抵抗超过自身重量 100 倍的外力。

我们测试到蚂蚁在石蜡表面和玻璃表面都有较大的吸附力，如表 1 所示，证明蚂蚁在疏水性和亲水性表面一样有低接触角。Federle 用干涉反射显微镜方法证明分泌液的接触角很小，在疏水性表面更小，平均  $17^\circ$ ，对其黏性的估计为  $40 \sim 150 \text{mPa}\cdot\text{s}$ <sup>[6]</sup>。

分泌液的黏性比水的大 100 倍，蚂蚁的吸附力可能来自于黏性力。Bowden 和 Tabor 证明要在 10s 内分离直径为 1in 的盘，理论上需要 10t 的力<sup>[7]</sup>。在一给定时间内分离圆形盘的力与盘半径的四次方成正比。取蚂蚁爪垫半径为  $0.0357 \text{mm}$ ，液体薄膜为  $100 \text{nm}$  并且黏性为  $100 \text{mPa}\cdot\text{s}$ ，在 1s 内需要的分离力为  $0.128 \text{mN}$ 。像蚂蚁这样小的昆虫，在垂直接触面方向的黏性作用是很小的，只能是一个辅助作用。在平行于表面的方向，由黏液产生的剪切力为

$$F = \mu A \frac{v}{h} \quad (5)$$

$\mu$  为液体黏性， $A$  为接触面积， $v$  为滑行速度， $h$  为液体膜厚度。根据蚂蚁行走速度取  $v$  为  $1 \text{mm/s}$ ，则

黏性力为 0.0275 mN. 这么小的力无法解释观察到的平行于表面方向的大摩擦力. 可能是分泌液有非牛顿、剪切变薄的特性, 这包括在小的剪切应力下表现得像固体一样的行为, 这是乳状液的一个特性. 当液体膜厚度小于 3 nm 时, 不用任何压力, 液体就呈现类固状态<sup>[8]</sup>, 这时黏性如果增加了 10 倍则吸附力就变为 9.17 mN, 这可以解释蚂蚁在水平方向的大吸附力现象. 在表面力仪实验中观察到, 厚度小于 50 nm 时液体薄膜的剪切响应明显偏离牛顿黏性定律, 即滑动一开始剪应力急速上升, 随后有所下降的静摩擦特征, 且静摩擦力随膜厚减小而迅速增大<sup>[9]</sup>.

### 2.3 分泌液的排出

为使分泌液在昆虫脚垫压下时变薄, 以此来产生吸附力, 液体必须能迅速排开. 我们知道两表面间越薄的液体越难排出. 对两浸在黏度为  $\eta$  的液体里的平行盘, 半径为  $R$ , 在荷载  $F$  作用下从距离  $h_2$  变为  $h_1$  的时间为

$$t_R = \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{\eta R^4}{F} \cdot \left( \frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \quad (6)$$

逼近时间随着膜厚度的减少而大大增加. 垫子表面不是很平的话, “排出问题”就容易了. 如果凹槽把垫子表面分成  $n$  个独立的小接触区域 (半径  $r < R/\sqrt{n}$ ), 排出时间就会缩短  $n$  倍, 因为  $F' = F/n$ ,  $t_r \propto r^4/F_r \propto t_R/n$ . 这也可从图 5 的流体有限元分析中看出, 在凹槽处的液体有更快的流速. 许多昆虫的光滑型吸附垫都有微褶皱的特征, 而且接触区域分割成规则的六边形子接触块的情况在昆虫足垫上经常可见.

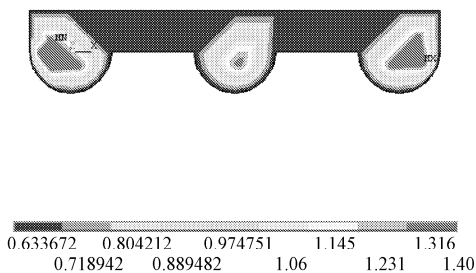


图 5 流体的流速分布

Fig.5 Distribution of velocity of flow

### 3 总 结

(1) 测试到蚂蚁在玻璃上的水平吸附力可达其自身重量的 40 倍, 排除掉机械联锁、真空力等吸附机制后, 通过实验和理论计算推断蚂蚁的吸附力在垂直方向主要来源于毛细作用力, 水平方向主要是分泌液的黏性力.

(2) 作者认为使用具有触变作用的乳状液作为黏性分泌液是有利的, 它能提供大的水平吸附力. 分泌液在蚂蚁吸附中的作用是很重要的, 没有分泌液吸附力就变得很小.

(3) 分析昆虫吸附器官的特点和吸附机理为仿生吸附和摩擦学应用提供了有价值的参考和灵感.

### 参 考 文 献

- 1 Federle W, Riehle M, Curtis ASG, et al. An integrative study of insect adhesion: mechanics and wet adhesion of pretarsal pads in ants. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(6): 1100~1106
- 2 Eisner T, Aneshansley D. Defense by foot adhesion in a beetle (*Hemisphaerota cyanea*). In: Proceedings of the National Academy of Sciences, Randy Schekman, USA, 2000, 97(12): 6568~6573
- 3 Stork NE. Experimental analysis of adhesion of *Chrysolina polita* (Chrysomelidae: Coleoptera) on a variety of surfaces. *Journal of Experimental Biology*, 1980, 88(1): 91~107
- 4 Lees AD, Hardie J. The organs of adhesion in the aphid *Megoura viciae*. *Journal of Experimental Biology*, 1988, 136(1): 209~228
- 5 Federle W, Baumgartner W, Holldoler B. Biomechanics of ant adhesive pads: frictional forces are rate and temperature-dependent. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(1): 67~74
- 6 Federle W, Full RJ. Thin liquid films and ant adhesion. *American Zoologist*, 2001, 41(6): 1441
- 7 Bowden FP, Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford: Clarendon Press, 1986
- 8 Wang H, Hu YZ. A molecular dynamics study on slip phenomenon at solid-liquid interface. In: Proceedings of the First AICT. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 295~299
- 9 邹赜, 李志军, 冷永胜等. 表面力仪及其在表面接触研究中的应用. *科学通报*, 1999, 44(3): 268~271 (Zhou Kun, Li Zhijun, Leng Yongsheng, et al. Application of exterior force apparatus and exterior contact research. *Science Aviso*, 1999, 44(3): 268~271(in Chinese))

## SOURCE OF ATTACHMENT FORCES OF ANTS AND THE SECRETION EFFECT<sup>1)</sup>

Zhou Qun<sup>\*,†,2)</sup> He Bin<sup>\*</sup> Yue Jiguang<sup>\*</sup>

*\*(Department of Control Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)*

*†(Faculty of Science, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)*

**Abstract** A test platform was developed based on the centrifugal technology. Attachment forces of ants measured were found to be 40 times of the body weight. Configuration of claws and pad of ants were observed using scanning electron microscope. Analysis results suggest that the secretion is very important. Besides vacuum force, electrostatic force and other mechanisms, it is likely that capillary force is more significant in the vertical direction and viscosity of the adhesive liquid film dominates in horizontal pulls. Analysis using ANSYS indicates that microfolds on the pad surface facilitate the drainage of the liquid. These results may help to reveal the adhesion mechanisms of insects.

**Key words** ants, adhesive forces, secretion, liquid nanofilms, biomimetics

---

Received 8 May 2006, revised 12 December 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50405045), Phosphor Plan of Shanghai (05QMX1455), Bureau-managed Foundation of Shanghai (04JG05061).

2) E-mail: pingguotubao@yahoo.com.cn