基础知识

昆虫足的吸附机制*

周　群[1,2**]　何　斌[1]　岳继光[1]

（1. 同济大学控制科学与工程系　上海　200092；2. 上海理工大学理学院　上海　200093）

Adhesion mechanisms of insect legs. ZHOU Qun[1,2**], HE Bin[1], YUE Ji-Guang[1] (1. *School of Control Science & Engineering*, *Tongji University*, Shanghai　200092, China; 2. *Science College*, *University of Shanghai for Science & Technology*, Shanghai　200093, China)

Abstract　Many insects possess adhesive pads on their legs, which have undergone evolutionary optimization to be able to attach to variable substrates and to control adhesive forces during locomotion. Insect adhesive pads are either relatively smooth or densely covered with specialized adhesive setae. This capacity results from the interaction of adhesive with complex mechanical systems. The mechanics and adhesion of different kinds of adhesion pads are here reviewed. At last, we are looking forward to applying insect adhesion on biomimetic mechanisms.

Key words　adhesion, cuticle, setae, ultrastructure, material properties

摘　要　自然界中有许多昆虫足上都有吸附垫，这些垫子经过进化能吸附在各种表面上，并能在运动中控制吸附力。昆虫吸附垫要么是光滑的表皮垫子，要么是密布特殊的刚毛。昆虫这种"飞檐走壁"的能力来自于粘液、复杂机械系统以及生物系统之间的相互作用。文章主要参考国内外研究昆虫吸附机制的文献，综述了能在光滑表面上行走的昆虫的基本爬行原理，对其吸附机制进行了分类。并分析目前研究的主要内容，提出目前昆虫吸附机制要解决的问题。最后对吸附机制在仿生机械应用上作了展望。

关键词　吸附，表皮，刚毛，超微结构，材料特性

昆虫足上的粘性吸盘几百年来吸引了无数生物学家的兴趣，他们开展了广泛的研究。像蚂蚁、苍蝇、甲虫、蟋蟀等许多昆虫足上都有着形态各异的粘性吸附垫。这些吸附垫可迅速释放，并且吸附力控制行进和奔跑。昆虫吸附机构显示了惊人的结构多样性和卓越的性能。一些昆虫在光滑表面能抵抗超过它们自身重量100倍的分离力，并且还能在这些表面上自由行走[1]。然而昆虫如何控制奔跑和维持稳定吸附接触这样矛盾的任务仍未可知。昆虫足上粘附垫是带粘性的和机械系统的合成物，为分析受控制的吸附机制，不仅需要单独研究吸附系统，而且还要研究足垫复杂的机械设计和吸附功能之间的相互作用。

对昆虫在光滑表面上的行走机制的研究很早就吸引了众多科学家的注意。最先报道描述粘着结构并给出了关于吸附的可能机制的文献，大概源于19世纪。他们假设这种机制作用，可能为吸管产生的力或是静电作用力[2]。

利用电子显微镜，人们发现昆虫有2种类型的粘附垫对光滑表面产生吸附作用。第1种是利用刚毛对光滑表面产生吸附作用，这类昆虫以苍蝇、蜜蜂、甲虫为代表。它们的足掌都具有刚毛的结构。刚毛是一种长而细的毛发，其长度在几十到几百微米直径在几微米，有的是独立的1支，有的是呈树状的分支（图1）。另一种粘附垫结构是光滑可变形的表皮垫子叫做噗或肢垫，呈半圆型。蚂蚁，蟑螂，蚱蜢和臭虫

* 国家自然科学基金项目资助项目（50405045）；2004年上海市局管基金项目计划（04JG05061）。

**E-mail: pingguotubao@yahoo.com.cn

收稿日期：2006-03-22，修回日期：2006-04-12，再修回：2006-06-06

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

就具有这样的软的可变形的结构。

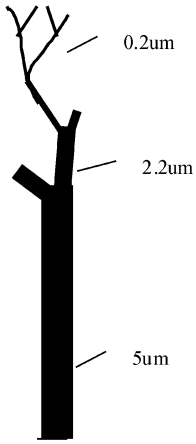


图 1 树状分支刚毛结构

很多文献证明在垫子表面和地面层之间的接触面存在吸附分泌物。研究证明很多昆虫依靠分泌液对光滑表面进行吸附。分泌液产生的吸附力由两部分组成,粘附力和剪切力。从文献中看,粘附力成因及分泌液的粘附性质仍未可知。

在所有产生昆虫摩擦驱动力的因素中,吸附机制起主导作用(大于 90%)。

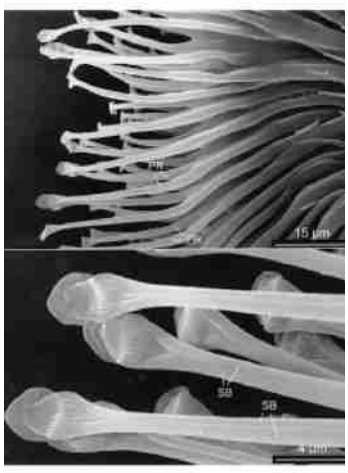
1 吸附装置分类

昆虫通过一长期的生物进化使它们能吸附在不同表面。在运动中使用的足吸附垫,有很好地适应各种表面轮廓的能力。这种系统有 2 种不同的设计。苍蝇、甲虫和耳虫的垫子都是覆盖一层相对较长的可变形的刚毛,刚毛能弯曲,这样就能复制表面轮廓。第 2 种是光滑的垫子型。下面介绍这 2 种吸附机制中几种具有代表性的昆虫。

1.1 刚毛型

北京大学生命科学学院研究了臭蜣螂体壁表面结构及其与减粘脱附功能的关系[3]。他们采用扫描电镜技术观察并描述了臭蜣螂头部、胸腹部和足部体表上的凹陷和刚毛结构,发现有 4 种简单的凹陷,其三维结构、边缘类型和位于凹陷中央的带孔刚毛的长度在身体不同部位均有不同。简单凹陷广泛分布于除腹部以外的各部分。体壁上还有大小和形状不同的刚毛。研究表明凹陷和突起等非光滑表面可有效地减少土壤接触和粘附表面,降低界面的空气负压,改善界面润滑,增加减附作用。而体表的分泌物和化学特性对此种昆虫的减粘脱附也有作用[4]。此项研究为工程机械和材料制造等方面的减粘脱附提供了仿生学理论和方法。

德国的 Gorb 研究了苍蝇的粘性垫,指出苍蝇足上的垫子是适合于吸附到各种表面的构造物。它们是椭圆状,主要由弹性表皮组成。粘性垫上覆盖着刚毛,它用来增加与表面吸附的实际面积(图 2)。通过使用反射扫描显微镜,可看到最接近的和末梢的刚毛有超微结构。推断分泌液的释放精确地对准每根刚毛末端。位于垫子基本部的刚毛没有这种机制。2 种类型的刚毛设计可以适应各种不同的表面[5]。



苍蝇爪垫附在玻璃上的 SEM 显微镜图

Eisner 和 Aneshansley 研究了一种甲虫吸附并在 2000 年发表了相关论文。研究表明,甲虫靠激活跗骨粘性机制来安全地停在表面并应对外界扰动。将甲虫的跗节通过钩子连到树叶上,测量显示这些甲虫能经受住 4 ~ 5 g 的拉力,相当于自身身体重量的几百倍。跗节上面共约有 60 000 根带粘性的刚毛,每根刚毛末端有 2 个垫子。当行走时,甲虫靠刚毛与表面接触而产生的一小摩擦力。若跗骨被水平压下,此时所有或几乎所有的刚毛接触物体地面,一

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

旦粘附上,就能抵挡住0.8 g(60倍身体质量)的牵引力达2 min。这种吸附也是通过一种分泌液来保证,大多为一种油类液体[6]。

1.2　表皮垫子型

德国温兹堡大学的Federle与英国的Riehle、Curtis、美国的Full合作,近几年一直从事蚂蚁吸附机制的研究。他们发现树栖蚂蚁在光滑平面上抵抗分离的力高达40~150倍自身的重量[7]。蚂蚁垫子在行走每一步时都可伸展(图3)和收缩,要么主动地随爪子屈肌的收缩而伸展,要么被动地随足向身体拖动时伸展[8]。Federle等还通过使用干涉反射显微镜方法(IRM)来研究粘液薄膜的性质和尺寸。从足印留下的小滴上分析表明粘液不易被水沾湿并形成低接触角。通过IRM对薄膜厚度和粘性进行估计,Federle等指出仅靠粘液不足以解释观察到的摩擦力,吸盘表皮的弹性变形也起了作用[1]。

图3　伸展开的蚂蚁爪垫

Gorb等对蟋蟀做了研究,并用实验证明了蟋蟀的跗节有着能变形的吸附垫,它们能变形、复制它们所接触的表面轮廓。垫子表面被表面凹槽分割成规则六边形的子接触块[9]。这种吸附系统由表皮细胞产生的分泌液来补充,并通过垫子表皮上的孔道传送到垫子表面。吸附中垫子材料机械性能有重要作用,可变形表皮与周围表皮有不同的超微结构,它主要由以一定角度朝向表皮表面的特有的杆组织而成。通过实验最后总结:(1)粘性分泌液对垫子吸附是关键;(2)吸附是通过垫子变形而达到的[2]。有关分泌液的组成和物理特性的进一步的数据能帮助更好地理解昆虫吸附系统在运动中的作用。

有种缘蝽 *Coreus marginatus* 的光滑垫子是由非常顺从的材料组成,能适应表面轮廓并增加实际接触面积。每个跗节都有1对吸附垫,垫子是圆形表皮,连接到爪子侧部。腹部表面很光滑,有时能看见微小折痕,爪垫腹部面是半球形,背部面包含了凹槽,放射状地从爪垫底部伸出。这些凹槽被前人解释为分泌液的液体传输系统。这一褶状物表面的另一可能功能是增加接触面积,背部面打开帮助腹部面铺开在表面。腹部面的表皮材料结构和背部面的不同。腹部面是像杆一样的分支结构,这和其它昆虫(如膜翅目昆虫、蝉)的光滑型吸附垫一样。臭虫有6条腿12个爪垫[10]。

2　吸附机制的研究内容及方法

目前,文献中的研究集中在昆虫的粘附原理,吸附力的来源,吸附过程的控制,微小力的测试等方面。关于昆虫吸附原理的研究还涉及到微系统、微流体力学、测试传感器、用于爬壁机器人足掌的仿生材料研究等内容。

2.1　粘附原理及吸附力来源研究

昆虫吸附器官要么是光滑并可变形的表皮垫子,要么是一片吸附刚毛。有的昆虫在光滑表面上爬行时还分泌粘液,粘性液体起到重要作用。这种分泌液通过孔道释放到垫子表面,其精确的路径还须深入研究。多数科学家认为,在两物体之间的液体薄膜产生了源自于表面张力和粘性力的吸附力。而表面张力太小,可能可以被忽略。另一方面,由于粘性而引起的力能在垂直的和平行的方向起作用,但在静态情况下它们为零。

表皮垫子型昆虫的吸附力仅靠分泌液不足以解释,因此只能由直接的软表皮和地面的交互作用来解释;刚毛型昆虫其吸附力主要是依靠刚毛与表面近距离接触而产生的分子间范德华力作用。像甲虫这样又能分泌粘液的昆虫,吸附力除了包括分子间力外,还有源自毛细管力的液体湿吸力。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

2.2 吸附和分离过程

尽管爪垫的机械系统很复杂,它的控制却很简单。如蚂蚁,这种控制仅包括一个单一的肌肉和总的足的运动。吸附是通过爪屈肌的收缩或是当垫子向身体拖动时而得到的。当爪屈肌放松或足跗骨向身体外推时,爪垫部分折进去并通过弹性表皮的反作用而从表面分离。在足抬起前,爪垫开始折进去并且离开表面。在分离前足常常会朝离开身体方向移动一小步,这样就帮助爪垫缩回。然而当一只带着未伸展的垫子的足迅速离开时,即使是完全伸出的爪垫也能收回[7]。

2.3 微力测试

德国的 Federle 用离心分离技术来测量吸附力。将昆虫放在光滑的玻璃圆筒或带转子的转盘上来分别测量垂直力和平行力。通过与离心分离机同步的闪光灯,能观察到昆虫停滞的图像并用摄影机来记录。吸附力可从昆虫所处的半径和旋转速度来计算。

如其它昆虫一样,在对蚂蚁的测试时发现平行力一般远大于垂直力。平行的静态分量相当于超过 2 倍的垂直分离力。一旦滑行开始,摩擦力就可能成倍地增加。当受到大的分离力时,通过提供附加摩擦力来帮助抵制快速的扰动。垫子光滑地滑动,摩擦力随着滑行速度线性增加。只有动态力与温度有关,而静态力与之无关或只有轻微关系[1]。

2.4 分泌液

一部分昆虫的吸附系统由粘性分泌液来补充,其来源和出口通道仍不是很清楚。在甲虫中,这些分泌液由碳氢化合物和蜡状成分组成。苍蝇的分泌液是在刚毛轴里面传送,在刚毛末端部释放的。当苍蝇垫与表面接触时发现了包含脂质的物质[11]。这个分泌液对于成功吸附到光滑表面似乎很重要。实际上,在硅胶表面行走 15~30 min 后,苍蝇就失去了这种在光滑表面行走的能力,在蚜虫上也得到了类似的结论[12]。Federle 等研究了蚂蚁粘液薄膜的性质和尺寸,指出粘液在接触区域约为 90~160 nm 厚,粘性约为 40~100 mPas。垫子表皮和粘性分泌液的相对作用有待进一步的综合研究,要研究它们的特性,分析吸附和运动的相互作用[8]。

2.5 研究方法

一般的研究方法有用显微镜方法观察昆虫足掌的形态构成和分泌液状态;用离心分离技术测试微小吸附力;用高速摄像机记录昆虫行走步伐并用软件分析等。

另外还有用光纤维传感器和玻璃弹簧组成的力测量器测试蟋蟀垫子变形与吸附力的关系;用紫外灯把 1 排刚毛加工固定于接触模式的原子力显微镜悬臂上,并用改变密封实验箱内的干氮流速来控制湿度,从而测量毛细管力对刚毛吸附力的作用[13];在墙壁上放置微力传感器和高速摄像机来测试分析爬壁动物各条腿力的分布及运动时的吸附和分离姿态[14];我们现在用分子动力学建模分析超薄液体膜的纳米摩擦学特性,以便对昆虫分泌液的作用做进一步的研究。

3 仿生机械应用

美国的 Sitti 于 2003 年提出了为将来爬壁机器人制作人造足部刚毛的技术[15],用硅胶或聚氨酯成功合成了人造刚毛,刚毛原形表明吸附力接近自然刚毛的预计值(每根约 100 nN)。这些毛结构将来可用在新型仿生干吸上,用于微型空间和医疗机器人足掌等许多方面。

卡内基梅隆大学的研究人员提出了一种在消化道停止和移动该胶囊的机械装置(图 4,5)。这种机械装置使用类似甲虫吸附机制的人造微纤维吸附。这种纤维吸附机制是由范德华力引起的分子间力和由毛细管力引起的液体吸附力构成。人造甲虫足掌由 PDMS 使用硅模子来制作[16]。

德国的 Case Western Reserve 大学的研究人员从表皮垫子型吸附的昆虫身上得到灵感,他们研制了一种有顺从吸附足的小爬壁机器人,使用压力感应胶带作吸附垫,它能在垂直壁面行走,并能越过凹凸不平的表面[17]。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

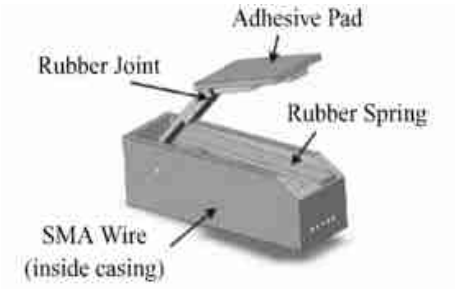


图 4　内窥镜微胶囊机器人的一条腿

图 5　微胶囊原型

4　结论和展望

昆虫足的吸附机制的研究及应用刚刚被科学家们重视，许多科学家正投入到这方面的研究[18~21]。从所取得的成果和研究领域看，昆虫吸附机制所涉及到的科学技术，是未来发展的一个重要方向。研究昆虫吸附机制是一个非常重要的研究方向，对于爬壁机器人仿生吸附足掌的设计有重要的借鉴意义。

昆虫吸附机制中还有许多问题仍不清楚。具体如下：

(1)昆虫吸附作用的基本原理尚未有统一的结论，表皮垫子型昆虫吸附中什么力占主导作用，科学家们尚未有一致的结论。

(2)昆虫如何控制奔跑和维持稳定吸附接触这样矛盾的任务仍未可知。

(3)现有的生物学家们的研究还无法弄清楚昆虫吸附的原理，对实现仿生应用还远远不够。如2个表面之间的粘附力和有相对运动趋势时的摩擦力在这类足掌的工作机制中扮演何种角色？

(4)昆虫足垫的材料特性及机械特性如何？在运动过程中遵循什么样的力学规律？

昆虫足上粘垫与粘性液体等构成生物机械液体耦合系统，涉及到多学科交叉甚至神经科学等。下一步我们的工作包括粘液薄膜的纳米摩擦学研究、表皮垫子的弹性变形在吸附力形成中的作用及研制高分子材料来仿生昆虫的粘弹性垫子等。

参　考　文　献

1　Federle W., Riehle M., Curtis A. S. G., Full R. J. *Integr. Comp. Biol.*, 2002, **42**(6): 1 100~1 106.
2　Jiao Y., Gorb S., Scherge M. *J. Exp. Biol.*, 2000, **203**(12): 1 887~1 895.
3　程红，孙久荣，李建桥，任露泉. 昆虫学报，2002，**45**(2): 175~181.
4　孙久荣，郭策，程红，王卫英，于敏，等. 动物学报，2005，**51**(4): 761~767.
5　Gorb S. N. *Proc. R. Soc. Lond B*, 1998, **265**: 747~752.
6　Eisner T., Aneshansley D. J. *PNAS*, 2000, **97**(12): 6 568~6 573.
7　Federle W., Riehle M., Curtis A. S. G., Full R. J. *Integr. Comp. Biol.*, 2002, **42**(6): 1 100~1 106.
8　Federle W., Baumgartner W., Holldoler B. *J. Exp. Biol.*, 2004, **207**(1): 67~74.
9　Gorb S. N., Jiao Y., Scherge M. *Proc. R. Soc. Lond B*, 2000, **267**(1 401): 1 239~1 244.
10　Gorb S. N., , Gorb E. V. *J. Exp. Biol.*, 2004, **207**(17): 2917~2924.
11　Gorb S. N. *Proc. R. Soc. Lond B*, 1998, **265**(1 398): 747~752.
12　Dixon A. F. G., Croghan P. C., Gowing R. P. *J. Exp. Biol.*, 1990, **152**(1): 243~253.
13　Huber G., Nantz H., Spolenak R., Mecke K., Jacobs K., *et al. PNAS*, 2005, **102**(45): 16 293~16 296.
14　Autumn K., Hsieh S. T., Dudek D. M., Chen J., Chitaphan C., *et al. J. Exp. Biol.*, 2006, **209**(2): 260~272.
15　Sitti M., Fearing R. S. *J. Adhesion Sci. Tech.*, 2003, **17**(8): 1 055~1 074.
16　Cheung E., Karagozler M. E., Park S., Kim B., Sitti M. In: IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics 2005. AIM' 05, California, USA.
17　Daltoriol K. A., Horchlerl A. D., Gorb S., Ritzmann R. E. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 2005. IROS' 05, Edmonton, Canada. 2005. 4 018~4 023.
18　Fudeg D. J. *Exp. Biol.*, 2005, **208**(5): v~a.
19　Arzt E., Gorb S., Spolenak R. *PNAS*, 2003, **100**(19): 10 603~10 606.
20　Santos R., Gorb S., Jamar V., Flammang P. *J. Exp. Biol.*, 2005, **208**(13): 2 555~2 567.
21　Gay C. *Integr. Comp. Biol.*, 2002, **42**(6): 1 123~1 126.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n