

文章编号: 1000-3851(2009)03-0213-06

东方龙虱(雄性)抱握足形态学及吸附特性

杨志贤, 戴振东*, 王卫英

(南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016)

摘要: 研究了东方龙虱(雄性)抱握足上吸附脚掌的形态结构、吸附机制及其在 2 种不同表面的吸附特性。扫描电镜观察发现其吸附脚掌由 4 排吸附结构及其外围的吸附刚毛群构成, 其吸附结构由约 15 个“鞋垫”状微吸盘平行并排构成一体。吸附机制为微吸盘的真空负压吸附和刚毛群的范德华力粘附。实验测定吸附脚掌在东方龙虱鞘翅表面和玻璃表面产生的最大法向吸附力为 53.3 mN, 最大切向吸附力为 213.5 mN。在 2 种表面上(干、湿状态)其切向吸附力均远大于法向吸附力, 大约是法向吸附力的 6~8 倍, 同时吸附脚掌在湿表面的切向吸附力比干表面大得多, 法向吸附力却相反。法向吸附力主要由刚毛群的范德华力产生, 而切向吸附力由真空吸附和范德华力共同产生。

关键词: 东方龙虱; 吸附脚掌; 形态学; 吸附特性; 仿生机器人

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

Morphology and adhesive characteristics of Cybister(male) fore-foot's adhesive pads

YANG Zhixian, DAI Zhendong*, WANG Weiying

(Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The morphology, adhesive mechanism and adhesive characteristics on two different surfaces of Cybister (male) fore-foot's adhesive pads were studied. The SEM photos show that the adhesive pad's structure consists of three adhesive devices and many setae at the marginal side. Each adhesive device contains about 15 micro-adhesive discs like an insole, which form an array in parallel. Two adhesive mechanisms are vacuum adhesive force by the adhesive discs and the Van der Waals force by the setae. The normal and tangential adhesive forces of the adhesive pads were tested respectively on the elytra surface and the glass surface. The maximal normal force is 53.3 mN and the maximal tangential force is 213.5 mN. The results indicate that the tangential adhesive forces are 6~8 times larger than the normal ones on two different surfaces(dry or wet), and the tangential adhesive forces on the wet surface are larger than those on the dry surface, while the results of the normal forces are contrary. The conclusions approve that the normal adhesive forces basically are equivalent to the Van der Waals forces and the tangential adhesive forces come into being because of the two adhesive mechanisms' work. These works offer the theoretic references for designing the bionic robot's pads.

Keywords: Cybister; adhesive pad; morphology; adhesive characteristics; bionic robot

在大自然中, 各种生物为了适应自身生存的环境, 在经历了长期的进化之后, 形成了具有各自特色的生物结构和优良的性能, 如: 高的强度和韧性、各向异性、自愈合功能和良好的功能适应性等, 现存的生物材料结构大都成功地达到了最佳优化^[1]。近年来, 随着运动仿生学的发展, 仿生机器人的发展和技术攻坚取得了长足进步, 爬壁机器人

是仿生机器人领域的一个重要分支, 它把地面移动机器人技术与吸附技术有机地结合起来。目前采用的吸附方式主要有: 真空负压吸附^[2-3]、磁吸附^[4-5]、粘接剂粘附^[6]和仿壁虎刚毛粘性材料的范德华力粘附^[7]等几种, 这些吸附方式各自存在局限性, 所研制的爬壁机器人往往针对性较强, 只适用于某种特定任务, 较难通用化。要保证机器人适应

收稿日期: 2008-07-03; 收修改稿日期: 2008-12-29

基金项目: 973 计划(2007CB607600); 国家自然科学基金(重点项目: 50635030; 面上项目: 50575102; 50675160); 航空科学基金(2007ZA52008)

通讯作者: 戴振东, 教授, 博士生导师, 主要从事仿生结构与材料防护的研究 E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

各种环境下的作业要求，必须设计出能在各种表面产生足够大的摩擦力和粘附力、且能灵活敏捷地运动的机器人脚(脚掌)。东方龙虱(雄性)抱握足节膨大，进化成一个吸附脚掌，其主要由许多微吸盘和刚毛群构成，吸附力主要由微吸盘的真空负压吸附和刚毛群的范德华力粘附产生^[8]。交配时雄性龙虱用前抱握足上膨大的吸盘组吸附在雌性龙虱光滑的鞘翅背面，使雌虫在雄虫的挟持下无法逃脱，同时还能抵御水流的冲击，其吸附结构及吸附特性对于爬壁机器人脚掌的仿生设计方面具有很大的启示。

本文中以东方龙虱(雄性)抱握足为研究对象，从生物形态学和仿生学的角度，研究了其抱握足吸附脚掌的形态结构，重点探讨了吸附脚掌在 2 种不同表面、不同状态(干态和湿态)的吸附特性。希望能为仿生机器人脚掌的结构优化设计和吸附装置仿生设计方面提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 东方龙虱

东方龙虱(Coleoptera: Dytiscidae)属鞘翅目龙虱科，俗名水龟虫，一般生活在池沼水田或河沟多水草处，以水草为生。由于龙虱含有高蛋白而成为海鲜市场上的一道美味的特色菜，在广东一带已有很多的人工养殖户在饲养龙虱。龙虱的种类很多，世界已知 4000 多种，我国已知 200 多种，其中以黄缘龙虱最为常见。龙虱科甲虫在经历长期的进化和结构优化后，满足空中飞行、地面爬行和水中遨游等全空间、全方位生存的需求，发展出与其生存环境相适应的具有独特结构和优异性能的甲虫生物材料，成为仿生学良好的研究对象。东方龙虱有 6 条腿(如图 1(a))，前腿和中腿比较短小，用于抱握和抓取等，前腿附节上有一椭圆形吸附脚掌(图 1(b))，后腿特别粗大，主要用于在水中划行。

1.2 材料

实验前准备雄性东方龙虱 5 只(购自广州水产市场)，龙虱体长 2.4~2.8 cm，质量为 1.4~1.6 g。

1.3 实验方法

用镊子将龙虱前附足连同整个吸盘结构一起自活体前腿上取下，首先在蒸馏水中清洗 5~10 min，然后脱水处理(依次在 75%、85%、95% 酒精溶液中浸泡 30 min)，取出置于滤纸上晾干，之后将试样粘贴在样品固定台上，用离子溅射仪喷金，最后在扫描电镜(SEM)下观察其形态结构。在试样制

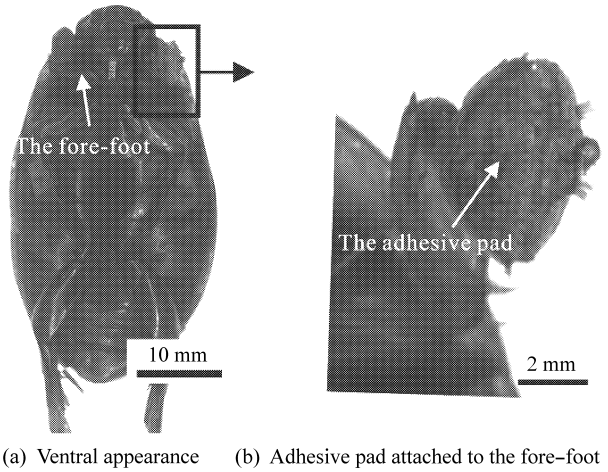


图 1 雄性龙虱外观及其吸附脚掌
Fig. 1 The cybister(male) and its adhesive pad

备过程中经过脱水、晾干、抽真空等处理，生物组织容易变形，甚至部分结构会遭损伤，因此试样不宜过分干燥，以免导致其形态失真。

吸附力测试在 RM 6240B/C 生物信号采集处理系统下进行(图 2)。实验针对 2 种不同的表面(玻璃表面和鞘翅背面)，分别测定在干、湿状态下龙虱吸附脚掌在这 2 种不同表面产生的法向吸附力和切向吸附力。实验样本数 4，每个样本进行重复实验 20 次，而每次的值取 4 个样本的平均值。实验前将尺寸约 30 mm×30 mm 的吸附表面一侧固定在传感器上并竖起放置，同时将活体龙虱的中、后腿去掉，然后用强力胶将其背部固定在一活动支架上，呈站立状放置，腹面及前附足正对被吸附表面。测试过程分别从接触面的法向(图 2 中的 F_n)和切向(图 2 中的 F_t)单独加载测试。实验时，将被吸附表面放置在龙虱抱握足容易触及的位置，同时使接触处尽量避开待吸附表面边沿，保证吸盘与被吸附表面的充分接触，以达到最佳吸附状态。此时，可沿着法向或者切向移动活动支架，使吸附脚掌慢慢与被吸附表面脱离。在此过程中，显示器上

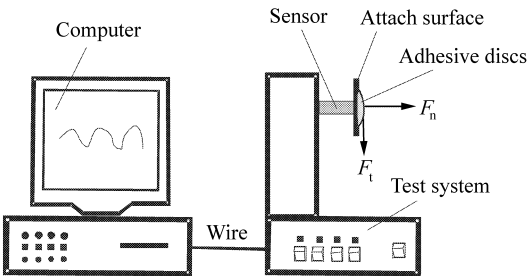


图 2 吸附力测试系统
Fig. 2 Test system for measuring the adhesive force

显示的连续动态曲线反应了信号采集系统通过传感器自动记录的抱握足吸附脚掌产生的吸附力变化的情况。数据处理时，曲线上最大的值即为抱握足上吸附脚掌的法向吸附力或者切向吸附力。

2 结果及分析

2.1 抱握足吸附脚掌形态学分析

根据功能和结构的不同，鞘翅类甲虫的足一般包含步行足、跳跃足、挖掘足、游泳足、抱握足等多种，其中抱握足和游泳足以龙虱科甲虫最为典型。东方龙虱大多为雌雄异型，雄性龙虱的后足为游泳足，前足为抱握足。雄性东方龙虱的抱握足前节附有一个近似椭圆形的吸附脚掌(图 1(b)、图 3(a))，其长轴长为 $5.78\text{ mm}\pm0.05\text{ mm}$ ，短轴长为 $3.68\text{ mm}\pm0.08\text{ mm}$ ，吸附脚掌的面积大约为 66.79 mm^2 。微观上分析，吸附脚掌主要由 4 排吸附结构及其外围的吸附刚毛群构成，每排吸附结构由约 15 个微吸盘平行并排构成一体，每个吸盘均有一根空心吸管相连，吸管横向间距为 $127.39\text{ }\mu\text{m}\pm8.25\text{ }\mu\text{m}$ ，吸管纵向间距为 $151.58\text{ }\mu\text{m}\pm7.63\text{ }\mu\text{m}$ (图 3(a))。单个吸附脚掌上含有 55~65 个微吸盘，外形似“鞋垫”状，其几何尺寸大致相同，长约 $169.65\text{ }\mu\text{m}\pm1.25\text{ }\mu\text{m}$ ，宽约 $59.83\text{ }\mu\text{m}\pm1.12\text{ }\mu\text{m}$ ，

单个微吸盘的接触面积约为 0.01 mm^2 ，吸盘间距为 $20.29\text{ }\mu\text{m}\pm1.45\text{ }\mu\text{m}$ (图 3(b))。吸盘的基部与吸管相连，呈卷曲状，尖部较基部细且圆滑过度，吸盘表面有约 12 条等间距的犁沟状凸起条纹，条纹间距约 $7\text{ }\mu\text{m}$ (图 3(c))。图 3(d)显示了一个吸盘与吸管刚刚断开的情形，图中很容易地看到吸盘与吸管是在吸盘的基部相连接，吸管似竹节一样中空且壁薄。在休息状态，吸盘呈内收敛状，在吸附状态时，其有效接触面积应比前面计算的大。吸管基部从抱握足前节外表皮植出，尖端连接吸盘基部，单根吸管的直径约 $41.31\text{ }\mu\text{m}\pm1.19\text{ }\mu\text{m}$ ，壁厚约 $2.57\text{ }\mu\text{m}\pm0.12\text{ }\mu\text{m}$ ，吸管的长度约 $120\sim140\text{ }\mu\text{m}$ (图 3(e))。吸附脚掌的外围长有大量的刚毛群，刚毛呈均匀点阵排列(图 3(a))，点阵间的横向间距约 $30\sim50\text{ }\mu\text{m}$ ，纵向间距约 $30\sim40\text{ }\mu\text{m}$ 。刚毛由基部到尖端逐渐变细，刚毛长约 $50\sim120\text{ }\mu\text{m}$ ，基部直径约 $14\sim18\text{ }\mu\text{m}$ ，自刚毛的基部到尖部有一条直径约 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的犁沟，刚毛或直立或微曲而向外延展(图 3(f))。

2.2 吸附脚掌的吸附力

2.2.1 法向吸附力

图 4 显示了吸附脚掌在 2 种干、湿状态的吸附表面产生的法向吸附力变化规律，实验重复 20 次。由图可以清楚地看出，在干态下吸附脚掌吸附在这

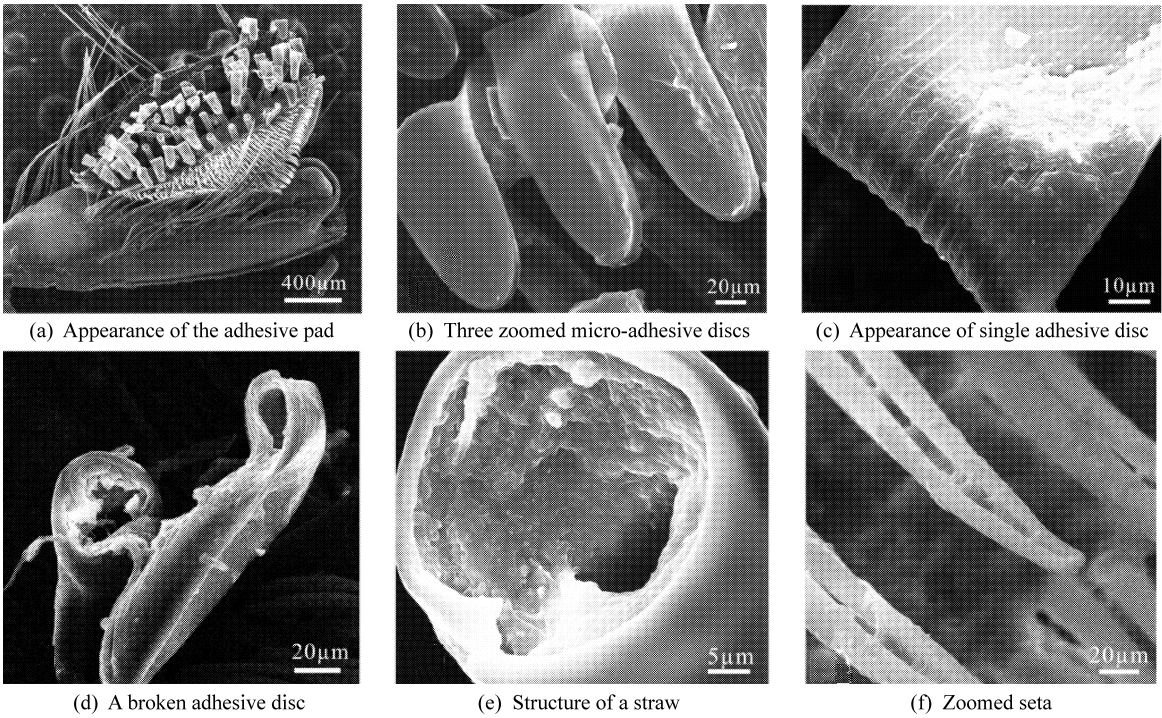


图 3 吸附脚掌的形态结构

Fig. 3 Morphological structure of the adhesive pad

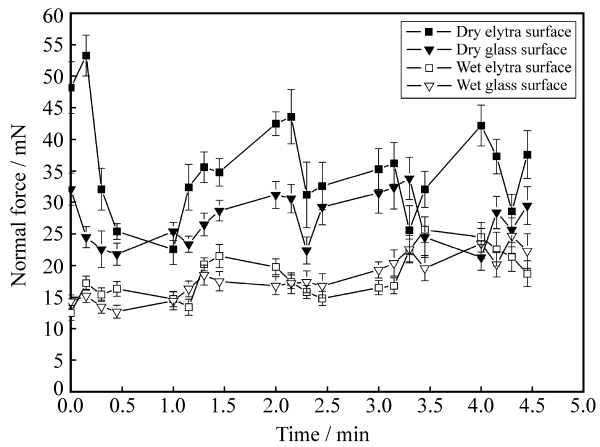


图 4 吸附脚掌在 2 种吸附表面的法向吸附力
Fig. 4 Normal force of the adhesive pad attached to two different surfaces

2 种不同表面上产生的法向吸附力明显要大于其在湿态下产生的法向吸附力。在湿态下，法向吸附力约为 10~25 mN，而在干态下，法向吸附力约为 20~55 mN，可见湿的吸附表面反而降低了其法向吸附力的大小。同时，在干态下，吸附脚掌在鞘翅表面产生的法向吸附力要比在玻璃表面的大得多；而在湿态下，在这 2 种吸附表面产生的法向吸附力数据交替，无明显的规律。在干态下，吸附脚掌在鞘翅表面产生的最大法向吸附力为 53.30 mN，是其自身体重的 3.5 倍；在玻璃表面产生的最大法向吸附力为 33.80 mN，是其自身体重的 2.3 倍。具体数据比较见表 1。

表 1 法向吸附力的比较				
Table 1 Comparison of the normal force				
	Dry		Wet	
	Elytra	Glass	Elytra	Glass
Max/mN	53.30	33.80	25.70	24.70
Min/mN	22.60	21.30	12.50	14.30
Mean/mN	35.46	27.28	18.38	18.16
Deviation	7.68	3.95	3.72	3.40

2.2.2 切向吸附力

吸附脚掌在 2 种不同吸附表面得到的切向吸附力如图 5 所示。结果表明，吸附脚掌所产生的切向吸附力远大于法向吸附力，大约是法向吸附力的 6~8 倍。与法向吸附力规律相反，在湿态的切向吸附力要比干态的切向吸附力大得多。在干态下，切向吸附力约为 70~130 mN，是其自身体重的 4.7~8.7 倍；而湿态下，切向吸附力约为 90~

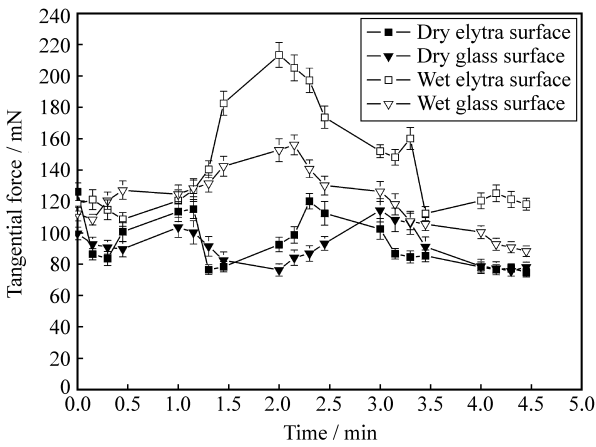


图 5 吸附脚掌在 2 种吸附表面的切向吸附力
Fig. 5 Tangential force of the adhesive pad attached to two different surfaces

220 mN，是其自身体重的 6~14.7 倍。可见，保持吸附表面一定的湿度，有利于增加吸附脚掌所产生的切向吸附力。同时，在湿态下，吸附脚掌在鞘翅表面产生的切向吸附力明显大于在玻璃表面产生的切向吸附力；而在干态下，在这 2 种吸附表面产生的切向吸附力呈交替状态，无明显规律。在湿的鞘翅表面得到的最大切向吸附力为 213.50 mN，是其自身体重的 14.2 倍；在湿的玻璃表面得到的最大切向吸附力为 156.10 mN，是其自身体重的 10.4 倍。具体数据比较见表 2。

表 2 切向吸附力的比较				
Table 2 Comparison of the tangential force				
	Dry		Wet	
	Elytra	Glass	Elytra	Glass
Max/mN	126.20	114.30	213.50	156.10
Min/mN	74.70	75.70	108.60	88.30
Mean/mN	93.52	91.05	144.08	120.24
Deviation	16.48	11.46	33.53	19.58

3 讨论

3.1 抱握足吸附脚掌形态学

东方龙虱主要生活在水中，为了适应其特殊的功能需求，其抱握足前节进化形成了具有优化结构的特殊吸附脚掌。SEM 解析了其结构主要是由“鞋垫”状吸盘和外围的刚毛群构成，在这些吸盘的基部又是由一根空心吸管与抱握足前节外表皮相连，这些空心吸管对其吸附力大小的影响还有待于进一步的研究证实。Bergsten^[9]从龙虱的生态学角度，

研究了几类不同龙虱吸附脚掌的微吸盘结构，相似的是其结构也是由许多微吸盘及其外围的刚毛群构成，不同的是，这些微吸盘均呈圆形，而且数目众多，都在 200 以上(见图 6^[11])，但是缺乏对这几类龙虱吸附脚掌吸附力的进一步研究。Gorb 和 Beutel 对陆地昆虫脚掌吸附结构的详细调研表明其吸附结构主要由许多刚毛群构成，单个刚毛的尖端均进化成相对较大的舌垫(图 7(a))，刚毛的直径约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ，舌垫的直径约 $1\text{ }\mu\text{m}$ ，其接触面积主要是舌垫面积的总和，其吸附力主要来自于舌垫接触表面时产生的范德华力^[10-13]。戴振东等以大壁虎为研究对象，研究了其吸附脚掌的微结构^[14]，结果表明其脚掌皮瓣上具有许多纳米级刚毛群，与昆虫脚掌刚毛不同的是，大壁虎脚掌上的刚毛尖端并不是形成一个相对较大的舌垫，而是在每根刚毛的尖端继续分化成许多纳米级的毛绒团(图 7(b))，单根刚毛的直径约 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，而其尖端分化的刚毛直径只有 $10\sim 40\text{ nm}$ 。基于仿生学的思路，目前国内外有采用硅橡胶腹膜点阵法^[15]、电子束加工阵列法^[16]以及利用高分子聚合物表面改性和分子自组装生长等技术来制备仿壁虎刚毛群，均没有取得理想的效果^[17-18]。异于以上几种不同的吸附结构，东方龙虱的吸附脚掌采用的是微吸盘吸附和刚毛群粘附的双吸附结构，能够产生高于自身体重十几倍的吸附力，同时其几何结构均在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右，相对于前面

提到的 $1\text{ }\mu\text{m}$ 量级的刚毛结构，用于东方龙虱吸附脚掌结构的仿生微制造技术更易于实现。目前戴黎明教授等掌握的碳纳米管技术已经可以制造出直径约 15 nm ，长约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的刚毛群阵列，相信这一技术的突破将带动生物机器人吸附脚掌的飞速发展^[19]。

3.2 吸附脚掌的吸附特性分析

东方龙虱的吸附脚掌由微吸盘阵列结构及其外围的刚毛群构成，Autumn 等的测试表明范德华力是壁虎脚底刚毛粘附的物理机制^[20]，而真空吸附是微吸盘吸附的物理机制，因此可以判定东方龙虱吸附脚掌的吸附机制存在微吸盘的真空吸附和刚毛群的范德华力粘附 2 种。

真空吸附通常是依靠吸盘与被吸附表面之间的压力差而产生。在研究中保持被吸附表面一定的湿度可以降低吸附脚掌的法向切向力，但有利于其切向吸附力的提升，适当增加被吸附表面的湿度，可有效增加微吸盘与被吸附表面间的压力差。这一结论表明了吸附脚掌法向吸附力的来源主要是刚毛群产生的范德华力，而切向吸附力则是由微吸盘的真空吸附及其外围的刚毛群粘附共同作用产生。吸附在湿的鞘翅表面时，吸附脚掌产生的平均切向吸附力为 144.08 mN ，平均法向吸附力为 18.38 mN ，由其吸附特性分析可知切向吸附力中由微吸盘的真空吸附产生的吸附力大小为 125.70 mN 。可见对于东方龙虱吸附脚掌而言，起决定作用的是微吸盘阵列的真空吸附力。图 5 表明在湿的被吸附表面，其切向吸附力几何曲线服从正态分布。可能的原因是当吸附脚掌吸附在湿的被吸附表面时，其微吸盘可能会从吸管中分泌一种特殊的物质与被吸附表面上的水分反应，以达到阻止外部空气进入的目的，从而提高微吸盘内外压力差。此外，随着实验的进行，被吸附表面的湿度也会因时间的推移而产生变化，导致其吸附力变化较大，具体的因素还有待进一步研究、证实。

雄性龙虱抱握雌虫是在水中进行的，而本文中的工作均是在空气中进行的，在空气中测得的吸附力与水中自然状态下吸附脚掌产生的吸附力肯定存在差别。影响吸附脚掌吸附力大小的因素包括吸附脚掌的组织结构、微吸盘阵列、被接触表面的接触面积大小、微吸盘内外压力差、是否有粘性介质等。在自然状态下，龙虱吸附脚掌的组织结构更完善，微吸盘与鞘翅表面的接触面积也更充分，同时

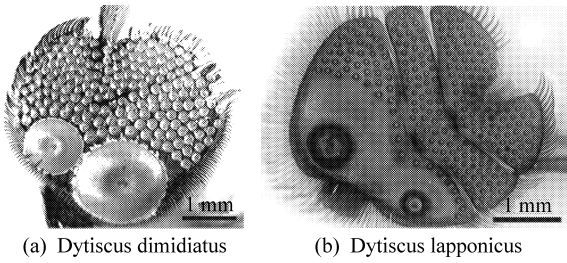


图 6 几类不同龙虱的吸附脚掌^[11]

Fig. 6 Different adhesive pads of several Cybisters^[11]

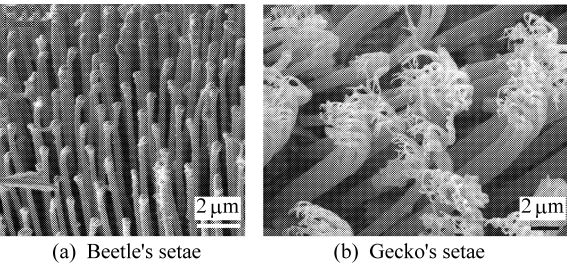


图 7 不同刚毛尖端的微结构^[15-16]

Fig. 7 Microstructure of different setae's tip^[15-16]

加上水中的压强大,微吸盘内外可形成更大的压力差,有理由相信实际产生的吸附力要比本文中测定的大得多。

3 结 论

(1) 东方龙虱吸附脚掌由 4 排吸附结构及其外围的吸附刚毛群构成,每排吸附结构由约 15 个“鞋垫”状微吸盘平行并排构成一体,单个吸附脚掌含有 55~65 个微吸盘。

(2) 吸附脚掌法向吸附力主要是刚毛群产生的范德华力,而切向吸附力则是由微吸盘的真空吸附及其外围刚毛群粘附共同作用产生。

(3) 吸附脚掌产生的平均切向吸附力是其平均法向吸附力的 6~8 倍,产生的最大切向吸附力为 213.5 mN,是其自身体重的 14.2 倍,而产生的最大法向吸附力为 53.3 mN,是其自身体重的 3.5 倍。

(4) 保持被吸附表面一定的湿度会降低吸附脚掌的法向切向力,但有利于其切向吸附力的提升,可见起决定作用的是微吸盘阵列的真空吸附。

(5) 在鞘翅表面产生的吸附力均要大于在玻璃表面产生的吸附力,说明东方龙虱吸附脚掌对于鞘翅表面具有一定的相容性。

参考文献:

- [1] 王立铎, 孙文珍, 梁彤翔, 等. 仿生材料的研究现状[J]. 材料工程, 1996, 17(2): 3-5.
Wang Liduo, Sun Wenzhen, Liang Tongxiang, et al. Progress in bionic materials [J]. Journal of Materials Engineering, 1996, 17(2): 3-5.
- [2] Tomoaki Y, Shinji N, Yukio K. Development of a self-contained wall-climbing robot with scanning type suction cups [C] // Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Victoria, BC, Canada; IEEE, 1998: 900-905.
- [3] Xiao Jun, Xiao Jizhong, Xi Ning, et al. Fuzzy controller for wall-climbing micro-robots [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, 12(4): 466-480.
- [4] Grieco J C, Prieto M, Armada M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads [C] // Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Control Applications. Trieste, Italy; IEEE, 1998: 446-450.
- [5] Wang Yan, Liu Shuliang, Xu Dianguo, et al. Development & application of wall-climbing robots [C] // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Detroit, Michigan; IEEE, 1999: 1207-1212.
- [6] Daltorio K A, Horschler A D, Gorb S, et al. A small wall-walking robot with compliant adhesive feet [C] // 2005 IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

- Edmonton, Alberta, Canada; IEEE, 2005: 4018-4023.
- [7] Menon C, Murphy M, Sitti M. Gecko inspired surface climbing robots [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenyang, China; IEEE, 2004: 431-436.
- [8] 王卫英, 戴振东, 杨志贤, 等. 龙虱吸盘超微结构与吸附能力研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 75-79.
Wang Weiying, Dai Zhendong, Yang Zhixian, et al. Ultrastructure and adhesive strength of adhesive discs of diving beetles [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1): 75-79.
- [9] Bergsten J, Toyra A, Nilsson A N. Intraspecific variation and intersexual correlation in secondary sexual characters of three diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae) [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2001, 73(2): 221-232.
- [10] Gorb S, Jiao Y, Scherge M. Ultrastructural architecture and mechanical properties of attachment pads in Tettigonia viridissima (Orthoptera: Tettigoniidae) [J]. Journal of the Comparative Physiology, 2000, 186(2): 821-831.
- [11] Beutel R G, Gorb S N. Ultrastructure of attachment specializations of hexapods (Arthropoda): Evolutionary patterns inferred from a revised ordinal phylogeny [J]. Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research, 2001, 39(1): 177-207.
- [12] Beutel R G, Gorb S N. A revised interpretation of the evolution of attachment structures in Hexapoda with special emphasis on Mantophasmatodea [J]. Arthropod Systematics and Phylogeny, 2006, 64(1): 3-25.
- [13] Pohl H, Beutel R G. Fine structure of adhesive devices of Strepsiptera (Insecta) [J]. Arthropod Structure & Development, 2004, 33(1): 31-43.
- [14] 戴振东, 孙久荣. 壁虎的运动及仿生研究进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 519-523.
Dai Zhendong, Sun Jiurong. Progress in the bionic research and the gecko's movement [J]. Progress of Natural Science, 2006, 16(5): 519-523.
- [15] Sitti M, Fearing R S. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs [C] // IEEE Conference on Nanotechnology. Washington DC, USA; IEEE, 2003: 26-28.
- [16] Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair [J]. Nature Materials, 2003, 2(7): 461-463.
- [17] 戴振东, 惠春, Gorb S. 表面粗糙度对 4 种聚氨酯弹性体粘着性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 245-249.
Dai Zhendong, Hui Chun, Gorb S. Influence on the adhesive performance of 4 kinds of polyurethanes by the surface roughness [J]. Journal of Tribology, 2003, 23(3): 245-249.
- [18] Dai Zhendong, Yu Min, Gorb S. Adhesion characteristics of polyurethane for bionic hairy foot [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(8): 737-741.
- [19] Qu Liangti, Dai Liming, Stone M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off [J]. Science, 2008, 322(5899): 238-242.
- [20] Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair [J]. Nature, 2000, 405(2): 681-685.