

东方蝼蛄膜翅表面形态与润湿性*

高 吭¹ 李玉柱¹ 佟 金²

(1. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 洛阳 471003; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 利用扫描电镜分析了东方蝼蛄膜翅的表面形态。在 OCA20 型接触角测量仪上测量了水与东方蝼蛄膜翅展开表面各部位的接触角,分析了东方蝼蛄膜翅表面几何微结构与润湿性的关系。研究表明,东方蝼蛄膜翅展开后各部位的几何微结构各不相同,水与东方蝼蛄膜翅展开表面各部位的接触角平均值为 94.4°~118.6°,表现出疏水性能。东方蝼蛄膜翅表面几何微结构与疏水性能的综合作用是其折叠后表面不沾土壤和水的重要机理。

关键词: 仿生学 东方蝼蛄 膜翅 表面形态 润湿性

中图分类号: Q811 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0220-03

Surface Morphology and Wettability of the Membranous Wing of the Oriental Mole Cricket(*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)

Gao Hang¹ Li Yuzhu¹ Tong Jin²

(1. Vehicle and Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Key Laboratory for Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The surface morphology of the membranous wing of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) was examined by scanning electron microscopy (SEM). The contact angles of water on the membranous wing surface of the oriental mole cricket were determined with an interface tension/wetting-angle measuring instrument (model OCA20). The relationship between wettability of the membranous wing surface of the oriental mole cricket with geometrical structure of its membranous wing surface was analyzed. The results showed the difference of each part of the membranous wing surface in the geometrical structure. The average apparent contact angles of water on the membranous wing surface of the oriental mole cricket was from 94.4° to 118.6°, indicating a hydrophobic ability. The comprehensive action of the geometrically structural surface and the hydrophobic function was the dominant mechanism of preventing adhesion of soil and water from their membranous wing surface. This research established the theoretical foundation on exploring all kinds of membranous wings and improving the waterproofness of green thin film.

Key words Biomimetics, *Gryllotalpa orientalis* Burmeister, Membranous wing, Surface morphology, Wettability

引言

土壤洞穴动物一直以来都是仿生学及土壤机械应用中的研究热点。蝼蛄的前胸背板上具有独特的

中央隆起的微小凹陷^[1],使水在蝼蛄前胸背板上的接触角为 91°~106.5°,其平均值为 97.2°^[2]。东方蝼蛄(*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)的体表各部位都布满了不同密度的刚毛,使得东方蝼蛄各部位体

收稿日期: 2010-11-03 修回日期: 2010-12-02
* 国家自然科学基金资助项目(50675087)、河南省教育厅自然科学计划项目(2011A410001)、河南科技大学博士科研启动基金资助项目(09001435)和河南科技大学青年基金资助项目(2010QN0017)
作者简介: 高吭,讲师,主要从事地面机械仿生理理论及其技术研究,E-mail: jlugaohang@163.com

表与水的接触角在 $110.8^{\circ} \sim 141.5^{\circ}$ 之间^[3]。这些现象均表明湿润性与固体表面几何结构之间有着密切的关系。蝼蛄是集挖洞、疾走、游泳、飞行和鸣叫于一体的动物。以东方蝼蛄为例的鞘翅类土壤动物,在土壤中挖洞穴居和穿行,其膜翅表面不沾土和水,还可以在飞行时展开。关于鞘翅类土壤动物的膜翅表面形态和润湿性研究相对较少,本文对东方蝼蛄膜翅表面形态和润湿性加以研究。

1 材料和方法

1.1 试验材料

东方蝼蛄,属于直翅目(*Orthoptera*),蝼蛄科(*Gryllotalpidae*),蝼蛄属(*Gryllotalpa*),试验用东方蝼蛄样品采集于吉林省德惠市五台乡。图 1 为东方蝼蛄膜翅的折叠和展开状态照片。

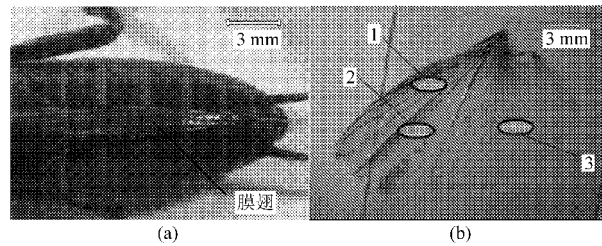


图 1 东方蝼蛄成虫膜翅照片

Fig. 1 Stereoscopic photograph of the membranous wing of an oriental mole cricket

(a) 在体折叠状态 (b) 离体展开状态

1.2 扫描电镜分析

将采集来的 4 只东方蝼蛄成虫用蒸馏水洗净,放入质量分数为 70% 的乙醇溶液中固定,分别取下东方蝼蛄的膜翅进行表面喷金,制成扫描电镜分析试样。用 JSM-5310 型扫描电镜观察其展开后 3 个部位表面微观形态(3 个部位的位置说明见图 1b,东方蝼蛄膜翅在折叠状态下,可以看见的是膜翅展开后的位置 1、位置 2 和膜翅边缘。膜翅在展开状态下,能够看见位置 3。)以及膜翅边缘的微观形态。

1.3 表面接触角测量

选择 10 只东方蝼蛄成虫,把活体蝼蛄膜翅部位分解下来,铺平,用双面胶粘在载玻片上,利用 OCA20 型接触角测量仪,测量水在东方蝼蛄膜翅表面上的接触角,选定膜翅的 3 个位置进行测量,3 个位置如图 1b 所示。测量位置 1 和位置 2,可以获得东方蝼蛄膜翅在折叠状态下的润湿性。位置 3 是折叠在里面的部位,展开后测量其润湿性,综合数据可以得到膜翅展开状态下的润湿性。测量水滴体积为 $4 \mu\text{L}$ 。由于影响接触角测量结果的因素较多,重现性较低,因此对每个部位进行了 10 次重复测量,取其有效数据的平均值作为该部位的接触角。

2 结果与讨论

扫描电镜分析发现,如图 2 东方蝼蛄膜翅表面各部位的微观结构明显不同。膜翅位置 1,也就是膜翅在折叠状态下的最上层,表面布满了细小的刚毛,刚毛长度都在 $5 \mu\text{m}$ 以内,见图 2a。位置 1 的刚毛几乎都平行于膜翅排列,刚毛的尖部基本指向同一个方向,这个方向是指向东方蝼蛄尾部的。膜翅展开后位置 2(图 2b),也就是膜翅在折叠状态下的第 2 层,表面由小的刺突组成鳞片状花纹,刺突也是平行于膜翅排列,刺突根部指向鳞片中心,呈扇形放射状分布。图 2c 为膜翅展开后的位置 3,是膜翅折叠状态下最靠近里面的内层部分,表面分布有大小不一的刺突,分布没有规律性,但是分布密度很小。膜翅边缘部分如图 2d 所示,表面结构由鳞片状花纹延伸而来,刺突随着靠近边缘不断变长,最后在边缘部位,刺突的长度可以达到 $50 \mu\text{m}$ 以上。

扫描电子显微分析表明,东方蝼蛄膜翅在折叠状态下,微观结构由展开后的位置 1、2 和边缘组成。发现,膜翅在折叠状态下的表面,都覆盖着高密度的刚毛,刚毛尖部的朝向顺应体表与土壤接触界面,这有利于其减小滑动阻力和防止粘附,这一特征与蛱螂体表刚毛分布特征类似^[4~5]。

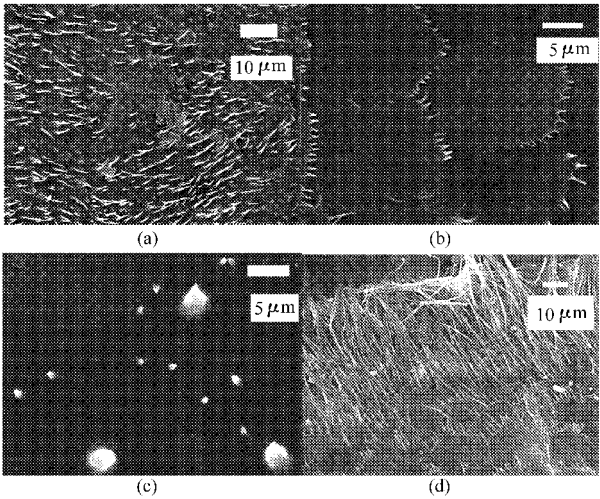


图 2 东方蝼蛄膜翅展开表面结构微观图片

Fig.2 Scanning electron microscopy photographs of the surface morphologies of the membranous wing of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister.

(a) 位置 1 表面结构 (b) 位置 2 表面结构
(c) 位置 3 表面结构 (d) 外缘表面结构

表 1 所示为水与东方蝼蛄膜翅表面各部位接触角的测量结果。图 3 所示为水滴在东方蝼蛄膜翅展开 1 位置上的状态(接触角为 132°)。由表 1 可以发现东方蝼蛄膜翅表面展开后位置 1 的水接触角最大值为 132° ,最小值为 109.3° ,平均值为 118.6° ;位

置 2 的水接触角最大值为 108.2°, 最小值为 100.3°, 平均值为 104.5°; 位置 3 的水接触角平均值大于 90°。东方蝼蛄膜翅表面各部位都表现出了疏水的性能。由于位置 1、2 的总水接触角平均值为东方蝼蛄膜翅在折叠状态的平均水接触角, 可以发现, 东方蝼蛄膜翅在折叠状态的平均水接触角要大于展开状态的平均水接触角。

野外考察发现, 当东方蝼蛄从表层土壤甚至稀泥中钻出时, 其包括膜翅在内的体表各部位都清洁而不粘泥土和水。这是由于刚毛在东方蝼蛄的膜翅表面形成一种柔性的表面, 使得土壤或泥水在与东方蝼蛄膜翅接触时, 膜翅表面与刚毛之间形成大量间隙, 有效地减少膜翅表面与泥土的接触面积^[6]。这个间隙内可形成一个有气、无土和无水区, 亦即形成了界面截留结构, 即使对于含水量较多的泥土或水, 也会使水膜不易连续, 从而提高其不粘性能。

以飞行为主的膜翅目昆虫——蜻蜓的翅膀上, 并没有发现表面覆盖刚毛的现象^[7], 而是表面多为蜡质层, 其原因可能是为了降低空气阻力等因素。而东方蝼蛄膜翅表面具有高的水接触角, 其折叠状态下微观结构表面覆盖高密度刚毛, 这二者的综合作用可能是东方蝼蛄在挖掘过程中, 其膜翅不沾土壤和水的重要机理。

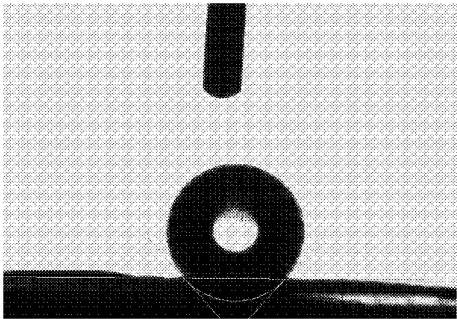


图 3 水滴在东方蝼蛄膜翅展开 1 位置上的状态
Fig.3 Water drip on the position 1 of the membranous wing flat state of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister

表 1 东方蝼蛄膜翅表面各部位的水接触角
Tab.1 Water contact angle of the surface membranous wing of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister (°)

序号	位置 1	位置 2	位置 3
1	118.7	108.2	92.9
2	113.7	107.8	98.3
3	121.8	105.5	86.1
4	114.2	100.3	96.5
5	129.4	100.4	97.3
6	111.4	105.8	91.7
7	132.0	101.3	93.6
8	109.3	106.2	95.2
9	112.4	107.3	97.3
10	123.1	101.9	95.3
平均值	118.6	104.5	94.4

3 结论

(1) 土壤洞穴动物东方蝼蛄的膜翅表面各部位的微观结构明显不同, 膜翅在自然折叠状态下的最上层, 表面布满了细小的刚毛; 第 2 层表面由小的刺突组成鳞片状花纹; 膜翅自然折叠状态下看不见的部分, 表面分布有大小不一的刺突, 分布密度很小; 膜翅边缘部分刺突不断变长, 刺突的长度可以达到 50 μm 以上。发现东方蝼蛄膜翅在折叠状态下的表面, 都覆盖着高密度的刚毛, 刚毛尖部的朝向顺应体表与土壤接触界面, 这有利于其减小滑动阻力和防止粘附。

(2) 东方蝼蛄膜翅表面展开后各部位与水的接触角平均值分布在 94.4°~118.6°之间, 位置 1 表面的水接触角最大, 位置 3 表面的最小, 东方蝼蛄膜翅在折叠状态的平均水接触角要大于展开状态的平均水接触角。东方蝼蛄膜翅表面刚毛形成的几何结构表面与高疏水性能的综合作用是其表面不粘土壤和水的重要机理。

参 考 文 献

1 程红, 孙久荣, 李建桥, 等. 臭蜣螂体壁表面结构及其与减粘脱附功能的关系[J]. 昆虫学报, 2002, 45(2): 175~181.
Cheng Hong, Sun Jiurong, Li Jianqiao, et al. Structure of the integumentary surface of the dung beetle *Copris ochus* Motschulsky and its relation to non-adherence of substrate particles [J]. Acta Entomologica Sinica, 2002, 45(2): 175~181. (in Chinese)

2 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1): 1~12.

3 高吭, 佟金. 东方蝼蛄体表形态与润湿性[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 172~175.
Gao Hang, Tong Jin. Cuticle surface morphology and wettability of the oriental mole cricket [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 172~175. (in Chinese)

4 Tong Jin, Moayad B Z, Ren Luquan, et al. Biomimetics in soft terrain machines: a review [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2004, 13(1~2): 71~86.

10 cm, 自动导航系统具有良好的控制精度和稳定性, 能够满足水稻插秧的自动对行作业要求。

4 结论

(1) 为了进行农业机械导航和变量作业试验研究, 将 XDNZ630 型插秧机的行走与栽插机构进行电控改造, 以伺服电动机为动力, 设计了基于 GPS 技

术的控制器, 实现了插秧机的自动导航作业。

(2) 转向机构采用永磁型伺服电动机驱动, 控制器采用了位置控制方式, 闭环反馈控制方法实现了转向系统的自动跟踪控制。

(3) 插秧机在田间试验时, 在车辆行进速度不大于 0.6 m/s 时, 跟踪最大误差小于 10 cm, 基本满足插秧机自动对行的精度要求。

参 考 文 献

- 1 李建平, 林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 232 ~ 236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 232 ~ 236. (in Chinese)
- 2 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95 ~ 97.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95 ~ 97. (in Chinese)
- 3 Yoshisada Nagasaka, Naonobu Umeda, Yutaka Kanetani, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 223 ~ 234.
- 4 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
Zhang Zhigang. Automatic guidance system based on DGPS for rice transplanter [D]. Guangzhou: South China Agriculture University, 2006. (in Chinese)
- 5 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118 ~ 122.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 6 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 88 ~ 92.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 7 Zhang Q. A generic fuzzy electrohydraulic steering controller for off-road vehicles [J]. Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(9): 791 ~ 799.
- 8 孙恒, 陈作模. 机械原理 [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- 9 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2000.
- 10 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 1 ~ 5.
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1 ~ 5. (in Chinese)

(上接第 222 页)

- 5 孙久荣, 郭策, 程红, 等. 蜣螂与壁虎刚毛的比较及改形对其功能的影响[J]. 动物学报, 2005, 51(4): 761 ~ 767.
Sun Jiurong, Guo Ce, Cheng Hong, et al. Comparison of the setae between the dung beetle *Copris ochus* and the gecko *Gekko gecko* and the effects of deformation on their functions [J]. Acta Zoologica Sinica, 2005, 51(4): 761 ~ 767. (in Chinese)
- 6 佟金, 孙霁宇, 张书军, 等. 神农蜣螂前胸背板表面形态分形及润湿性[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4): 74 ~ 76.
Tong Jin, Sun Jiyu, Zhang Shujun, et al. Fractal and wettability of pronotum surface morphology of *Catharsius molossus* Linnaeus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4): 74 ~ 76. (in Chinese)
- 7 张金. 三种昆虫膜翅结构仿生模型与纳米力学[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Zhang Jin. Structural biomimetic models and nanomechanics of membranous wings of three species of insects [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)