

# 基于猪笼草叶笼滑移区仿生的蝗虫捕集滑板功效测试\*

王立新 周强

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**【摘要】** 为测试基于猪笼草(*Nepenthes*)叶笼滑移区表面结构与超滑功能仿生制备的蝗虫滑移捕集滑板的功效,利用蝗虫附着力测试系统进行了蝗虫在叶笼滑移区与滑移捕集滑板上的附着力测试试验,并利用光电诱导蝗虫滑移捕集机进行了滑移捕集滑板的滑移功能验证试验。结果表明,蝗虫在捕集滑板上的最大附着力与在叶笼滑移区表面的最大附着力之比是0.94~1.05;滑移捕集滑板以32°倾斜角安装时,对蝗虫的滑移捕集率可达82.4%。相似的附着力和较高的滑移捕集率表明仿生制备的滑移捕集滑板与猪笼草叶笼滑移区具有相近的滑移功能,达到了良好的仿生效果,能够满足灾害蝗虫光电诱导滑移捕集治理的技术需求。

**关键词:** 蝗虫 捕集滑板 猪笼草叶笼滑移区 仿生 附着力

中图分类号: S475+.1; S433.2; Q811.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0222-04

## Function Testing of Locust Slippery Plate Manufactured Based on Waxy Zone of *Nepenthes* Pitchers

Wang Lixin Zhou Qiang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

To test the function of the slippery plate bionic-manufactured based on the surface structure and function of waxy zone in *Nepenthes* pitchers, attachment force of locust on the slippery plate and the waxy zone was measured by utilizing attachment force measurement system for locust. The experiment of verifying the slippery function of the slippery plate with photoelectric inducing plague locust machine was carried out. The experiments results showed that the attachment force of locust on the slippery trapping plate was 0.94~1.05 times of that on the waxy zone. The slippery trapping ratio was reached to 82.4% when the slanting angle of the slippery plate was 32°. Similarity of the attachment force and considerable slippery trapping ratio probably indicates that the slippery plate bears similar function with the waxy zone, and can satisfy the technical demand of photoelectric inducing and slippery trapping plague locust.

**Key words** Locust, Slippery plate, Waxy zone of *Nepenthes* pitcher, Bionics, Attachment force

### 引言

灾害蝗虫的光电诱导滑移捕集治理<sup>[1]</sup>不仅能避免喷施农药治理导致的环境污染,还可实现捕集蝗虫作为生物资源利用。在诱导光源作用下被诱至滑板的蝗虫,因具有特殊的附着系统<sup>[2-3]</sup>而能够稳固附着于绝大多数滑板的表面,显著降低了光电诱导蝗虫滑移捕集机的捕集效率。猪笼草叶笼滑移区

因具有特殊的表面结构而对绝大多数昆虫表现出良好滑移功能<sup>[4-5]</sup>。因此,可借鉴叶笼滑移区的表面结构与功能仿生制造具有超滑功能的昆虫捕集滑板,以提高捕集机的滑移捕集效率,满足灾害蝗虫光电诱导滑移捕集治理的技术需求。

本文针对基于猪笼草叶笼滑移区仿生制备的蝗虫滑移捕集滑板,利用附着力测试系统进行蝗虫在捕集滑板表面的附着力测试,并利用光电诱导蝗虫

收稿日期: 2010-08-11 修回日期: 2010-10-11

\* 国家自然科学基金资助项目(50775214)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(kycx09099)

作者简介: 王立新,博士生,主要从事生物摩擦与材料仿生研究,E-mail: wangcola@qq.com

通讯作者: 周强,教授,博士生导师,主要从事生物光电技术与机械仿生研究,E-mail: zq@cau.edu.cn

滑移捕集机进行滑移捕集滑板的滑移功能验证试验,以检验滑移捕集滑板的功效。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

**猪笼草叶笼滑移区:**选取红瓶猪笼草(*Nepenthes alata*)叶笼若干,剪取其滑移区,拼接成10 cm × 6 cm大小,用作测试蝗虫在其表面的附着力。猪笼草叶笼及滑移区表面微形貌如图1a、1b所示。

**滑移捕集滑板:**基于猪笼草叶笼滑移区的表面微结构与超滑功能,选用润滑性与滑移性均较好的鳞片状可膨化石墨(尺寸为0.2~0.4 mm)作为叶笼滑移区表面结构中蜡质晶体的替代物。双面胶均匀附于基板表面,作为可膨化石墨的粘合剂,利用高压静电吸附法将可膨化石墨吸附至基板,从而制得蝗虫滑移捕集滑板。其中静电压为15~20 kV,正负极的间距为40 mm,通电时间为150~180 s。在高压静电作用下,吸附至基板的鳞片状可膨化石墨被粘合在基板表面,形成竖立且厚度相对均匀的石墨层,局部表面形貌如图1c所示。

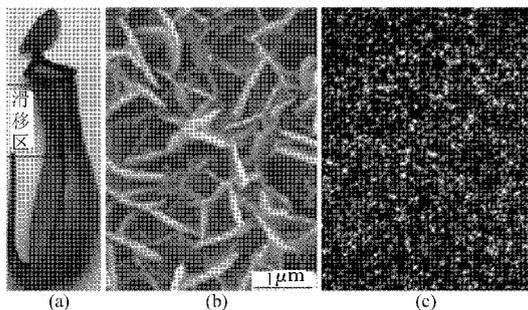


图1 猪笼草叶笼滑移区与仿生制备的滑移捕集滑板

Fig.1 Waxy zone of *Nepenthes* pitchers and the slippery trapping plate

**蝗虫:**选用河北沧州蝗虫养殖基地大棚内饲养的东亚飞蝗(*Locusta migratoria manilensis*)成虫与3~4龄幼虫作为附着力测试用蝗虫。成虫体重:(1.31 ± 0.17) g,体长:(41.82 ± 1.98) mm;幼虫体重:(0.83 ± 0.08) g,体长:(29.19 ± 1.62) mm。体重和体长测量次数  $n = 20$ 。以北京延庆某蝗虫养殖基地大棚内饲养的东亚飞蝗成虫为试验对象,在大棚内进行仿生制备滑板的滑移功能验证试验。用作附着力测试的蝗虫成虫与用作滑移功能验证试验的蝗虫成虫在活性、体重、体长等方面均无显著差异。

### 1.2 试验仪器

蝗虫附着力测试系统由测力传感器、传感器固定机构、信号调理电路、数据采集卡、数据处理与界面显示软件等部分组成,系统结构如图2所示。其中,测力传感器为拉压式传感器1-PW4MC3,量程

为300 g,分辨率为0.1 g。附着力测试前,对该传感器进行标定,直线拟合标定结果如图3所示,结果表明所选传感器具有优异的线性度。基于LabWindows/CVI编写该测试系统的数据处理与界面显示程序。该程序能够实时显示蝗虫的附着力,并将采集到的数据进行比较运算,获取附着力的最大值。通过调节数据处理与界面显示软件,设置该系统的采样频率为10 Hz,每次测试总采样点数为500。

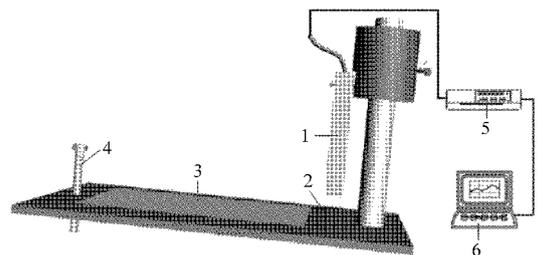


图2 蝗虫附着力测试系统

Fig.2 Attachment force measurement system for locust  
1. 测力传感器 2. 底台 3. 测试滑板 4. 角度调节螺栓 5. 信号调理电路 6. 显示界面

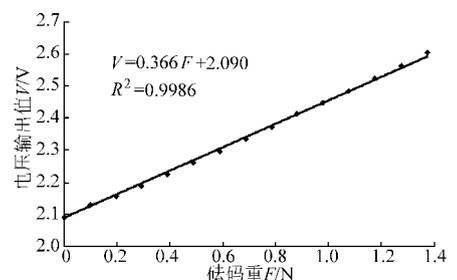


图3 传感器标定结果直线拟合

Fig.3 Linear fitting of sensor's calibration results

针对蝗虫对可见光源表现出的趋向性<sup>[1,6]</sup>,设计了光电诱导蝗虫滑移捕集滑机,其整体结构如图4所示。仿生制备滑移捕集滑板尺寸为400 mm × 100 mm × 180 mm(下底 × 上底 × 高),安装于图4所示位置,其倾斜角度 $\alpha$ 设为32°。选用蝗虫较为敏感的蓝色LED灯(峰值波长460 nm)作为该捕集机的诱导光源。为使滑落至集蝗箱的蝗虫以任何角度均不能跳跃至集蝗箱外,滑移捕集滑板下方设置了自锁机构。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 蝗虫附着力测试

将仿生制备的蝗虫滑移捕集滑板裁成10 cm × 8 cm,安放于传感器固定机构底台上,调整角度调节螺栓使滑板的倾斜角依次为20°、25°和30°。采用与前试验类似的方法<sup>[7]</sup>,调节套筒的高度,使传感器的着力点与蝗虫体的纵向轴线处于同一直线上,蝗虫与传感器着力点通过长为10 cm的细线连接。蝗虫在捕集滑板表面爬行,产生附着力,并通过细线

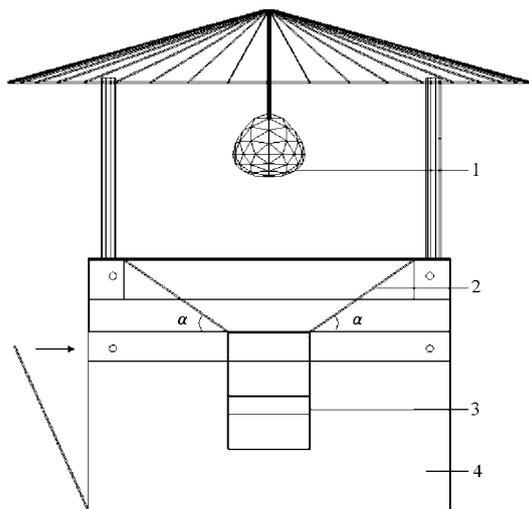


图4 光电诱导蝗虫捕集机结构

Fig. 4 Structure of photoelectric inducing machine for trapping plague locust

1. 诱导光源 2. 滑移捕集滑板 3. 自锁机构 4. 集蝗箱

传递给传感器,致使传感器产生电压信号,经信号调理电路处理后接入数据采集卡的 A/D 通道,完成模数转化后输入计算机,经数据处理与界面显示软件处理后转换成附着力并在界面窗口上显示。选取活性较好的蝗虫成虫与 3~4 龄幼虫各 15 只作为一个测试组,成虫与幼虫各准备 3 个测试组,用以完成蝗虫在 3 种倾斜角度的滑移捕集滑板上的附着力测试。每只蝗虫重复进行两次测试,即对每种倾斜角度的滑移捕集滑板完成 30 次附着力的测试。为了作为对照,采用相同的方法进行蝗虫在猪笼草叶笼滑移区表面的附着力测试。试验过程中维持相同的温度、湿度等条件。

### 1.3.2 滑移功能验证试验

于 2010 年 7 月下旬,以北京延庆蝗虫养殖基地棚内饲养东亚飞蝗成虫作为试验对象,为使蝗虫具有较好的生物活性,选择气温相对较高的 20:00~21:00 点为试验时间,连续 3 天重复进行捕集滑板倾斜角为 32°的试验。试验中,蝗虫在 LED 光源的诱导下,飞至光源处并跌落至滑移捕集滑板上,在滑移捕集滑板的滑移作用下,经自锁机构滑移至集蝗箱。整个试验过程由 CCD 摄像头摄像记录。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结果

#### 2.1.1 蝗虫附着力测试结果

蝗虫附着力测试过程中,数据处理软件将每次测试所采集的数据作比较运算,获取最大附着力并在界面上显示。所有测试完成后,获得蝗虫成虫及幼虫在不同倾斜角度滑移捕集滑板与叶笼滑移区的

最大附着力,如表 1 所示。

表 1 蝗虫在叶笼滑移区及滑移捕集滑板的最大附着力  
Tab. 1 Maximal attachment force of locusts on waxy surface of *Nepenthes* pitchers and slippery trapping plate mN

材料	倾斜角/(°)			
	20	25	30	
叶笼滑移区	成虫	406.8 ± 17.2	375.1 ± 18.6	342.6 ± 15.1
	幼虫	134.6 ± 8.9	109.4 ± 10.7	93.7 ± 9.7
捕集滑板	成虫	404.5 ± 15.8	394.7 ± 17.6	357.9 ± 14.6
	幼虫	126.3 ± 10.5	107.3 ± 8.9	96.8 ± 8.2

由表 1 可知,成虫在叶笼滑移区表面的最大附着力介于 342~407 mN 之间,在仿生制备的滑移捕集滑板上的最大附着力介于 357~405 mN 之间;幼虫在叶笼滑移区表面的最大附着力介于 93~135 mN,在滑移捕集滑板上的最大附着力介于 96~127 mN。对于给定的滑板倾斜角,蝗虫在滑移捕集滑板与在叶笼滑移区表面的最大附着力的比值  $F$  介于 0.94~1.05 之间(表 2)。

表 2 蝗虫在滑移捕集滑板与滑移区的最大附着力比值  
Tab. 2 Ratio of locust's maximal attachment force on slippery trapping plate and waxy zone

倾斜角/(°)	成虫	幼虫
20	0.99	0.94
25	1.05	0.98
30	1.04	1.03

#### 2.1.2 滑移功能验证试验结果

滑移捕集滑板的滑移功能验证试验过程中,棚内蝗虫受到诱导光源(蓝色 LED 灯)引诱,飞至诱导光源处,并跌落至滑移捕集滑板上。跌落至滑板上的蝗虫,或直接滑移至集蝗箱,或艰难缓慢地爬行少许时间后滑移至集蝗箱,只有少部分蝗虫从滑移捕集滑板表面逃脱。定义滑移捕集率  $R$  为集蝗箱内捕集到的蝗虫个数  $N_1$  与跌落至捕集滑板的蝗虫个数  $N$  之比。功能验证试验完成后,根据 CCD 摄像头保存的图像分别统计 3 次试验中跌落至捕集滑板的蝗虫个数  $N$ 。打开集蝗箱,统计捕集到的蝗虫个数  $N_1$ 。由此获得蝗虫滑移捕集滑板的滑移捕集率,分别为 80.9%、79.6%、82.4% (表 3)。

表 3 蝗虫滑移捕集滑板的滑移捕集率  
Tab. 3 Slippery trapping ratio of the slippery trapping plate

试验序号	$N_1$	$N$	$R/\%$
1	297	367	80.9
2	339	426	79.6
3	323	392	82.4

## 2.2 讨论

蝗虫的附着系统主要由具有尖硬末端的爪和柔软表皮的爪垫组成,能与附着物表面形成机械锁和与柔性接触两种耦合方式<sup>[3]</sup>,以保证蝗虫能够在绝大多数附着物表面稳固附着或自由移动。猪笼草叶笼滑移区表面覆盖着排列致密,错综呈复杂网状的蜡质晶体层。研究发现,蜡质晶体层对昆虫附着系统的减附机理主要表现在<sup>[4, 8~9]</sup>:①微纳米尺度的蜡质晶体致使滑移区产生适宜的粗糙度,致使昆虫附着系统接触面积减少。②蜡质晶体具有松脆易断裂等物理性质,从而易沾染昆虫附着系统的爪垫。③滑移区适宜的粗糙度及蜡质晶体具有松脆易断裂等物理性质,致使滑移区不能提供有效的接触点使昆虫的附着系统形成机械锁和作用。④滑移区微纳米结构的蜡质晶体层致使爪垫分泌的粘性液滴或被吸收,或与晶体相融而形成滑移膜。猪笼草叶笼滑移区主要依靠蜡质晶体层限制昆虫的附着系统与接触面形成正常的机械锁和与柔性接触作用,从而使附着力显著降低,实现对昆虫的滑移捕集。

具有良好的润滑性、滑移性等性质的鳞片状可膨化石墨,在微结构形态及物理性质方面与猪笼草叶笼滑移区表面的蜡质晶体具有相似性。蝗虫在滑移捕集滑板表面附着时,滑板表层的石墨易沾附到蝗虫附着系统爪垫上,致使附着面积显著减少。滑

板表层的石墨易与底层的石墨分离,故不能提供牢固的接触点使蝗虫附着系统的爪形成有效的机械锁和作用。鳞片状可膨化石墨的滑移性致使沾附在蝗虫附着系统的石墨与底层石墨产生相对滑移,致使蝗虫在滑移捕集滑板表面的附着力进一步降低,从而使蝗虫在滑移捕集滑板的最大附着力相似于叶笼滑移区( $F = 0.94 \sim 1.05$ ),使滑移捕集滑板对蝗虫的滑移捕集率达到82.4%。相近的最大附着力与较高的滑移捕集率,表明仿生制备的滑移捕集滑板具有与猪笼草叶笼滑移区相似的滑移功能,能够满足灾害蝗虫光电诱导滑移捕集治理的技术需求。

## 3 结束语

利用蝗虫附着力测试系统与光电诱导蝗虫滑移捕集机,对基于猪笼草叶笼滑移区表面结构与超滑功能仿生制备的蝗虫滑移捕集滑板进行了功效测试。蝗虫在滑移捕集滑板的最大附着力为其在猪笼草叶笼滑移区的0.94~1.05倍;光电诱导滑移捕集机的滑板倾斜角为32°时,对蝗虫的滑移捕集率可达82.4%,表明了仿生制备的蝗虫滑移捕集滑板具有与猪笼草叶笼滑移区相似的滑移功能,达到了良好的仿生效果,能够满足灾害蝗虫光电诱导滑移捕集治理的技术需求。

## 参 考 文 献

- 周强,徐瑞清,程小桐. 昆虫的生物光电效应与虫害治理应用[J]. 现代生物医学进展, 2006, 6(4): 70~72.
- Jiao Y K, Gorb N S, Scherge M. Adhesion measured on the attachment pads of *Tettigonia viridissima* (orthoptera, insecta) [J]. Journal of Experimental Biology, 2000, 203(12): 1 887~1 895.
- Perez Goodwyn P, Peressadko A, Schwarz H, et al. Material structure, stiffness, and adhesion: why attachment pads of the grasshopper (*Tettigonia viridissima*) adhere more strongly than those of the locust (*Locusta migratoria*) (insecta; orthoptera) [J]. Journal of Comparative Physiology, 2006, 192(11): 1 233~1 243.
- Gorb E, Hass K, Henrich A, et al. Composite structure of the crystalline epicuticular wax layer of the slippery zone in the pitchers of the carnivorous plant *Nepenthes alata* and its effect on insect attachment [J]. The Journal of Experimental Biology, 2005, 208(24): 4 651~4 662.
- 王立新,周强,刘启航. 猪笼草滑移区表面结构参数表征与捕集滑板仿生设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 232~234.  
Wang Lixin, Zhou Qiang, Liu Qihang. Dimensions of surface structures of waxy zone in *Nepenthes* pitchers and bionic design of locust trapping plate [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 232~234. (in Chinese)
- 王立新,周强. 蝗虫灾害物理防治发展及应用前景探讨[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(21): 9 146~9 148.
- 王立新,周强,罗瑞龙,等. 蝗虫在滑移捕集滑板上的附着力测试[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 195~198.  
Wang Lixin, Zhou Qiang, Luo Ruilong. Attachment force test of locust on slippery trapping plates [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 195~198. (in Chinese)
- Gaume L, Perret P, Gorb E. How do plant waxes cause flies to slide? Experimental tests of wax-based trapping mechanisms in three pitfall carnivorous plants [J]. Arthropod Structure & Development, 2004, 33(1): 103~111.
- Wang L X, Zhou Q, Zheng Y J, et al. Composite structure and properties of pitcher surface of carnivorous plant *Nepenthes* and its influence on insect attachment system [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1 657~1 664.