

猪笼草滑移区表面结构参数表征与捕集滑板仿生设计*

王立新 周强 刘启航

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 猪笼草(*Nepenthes*)叶笼滑移区因具有特殊的表面结构而对昆虫表现出良好的滑移功能。利用扫描电子显微镜和三维白光干涉表面形貌仪对滑移区表面结构进行了微观观测并提取了三维结构参数,结果表明滑移区表面主要由两端略向下弯曲的月骨体和致密无序排列的蜡质晶体组成。基于滑移区表面微结构及其三维参数,利用3DSMAX软件设计了蝗虫捕集滑板的表面结构,为具有良好滑移功能的蝗虫捕集滑板的制造提供了理论基础。

关键词: 猪笼草 滑移区 显微结构 捕集滑板 仿生设计

中图分类号: S433.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0233-03

Dimensions of Surface Structures of Slippery Zone in *Nepenthes* Pitchers and Bionic Design of Locust Trapping Plate

Wang Lixin Zhou Qiang Liu Qihang

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

Abstract

The slippery zone of inner pitchers in *Nepenthes* bears specialized structures to serve the functions of trapping insects. The surface microstructures of slippery zone and its geometrical dimensions were acquired with scanning electron microscope (SEM) and scanning white-light interferometer (SWLI). The slippery zone consists of plenty of downward-directed lunate cells, as well as relatively dense and irregular wax crystals. Based on the microstructures and the geometrical dimensions, surface structures of slippery trapping plates used in controlling plague locust was designed with 3DSMAX software, and this design provided theoretical foundations for manufacturing slippery trapping plates.

Key words *Nepenthes*, Slippery zone, Microstructures, Slippery trapping plate, Bionic design

引言

猪笼草叶笼滑移区表面具有能够捕集昆虫的功能,故其表面微结构、化学组成和物理特性,以及与昆虫附着系统的相互作用机理等受到广泛关注^[1-2]。借鉴猪笼草滑移区表面微结构仿生设计具有良好滑移功能的昆虫捕集滑板,用以实现农业害虫光电诱导捕集灭杀机械化技术^[3-4],不仅能够避免喷施化学农药治理农业害虫引起的有机毒素在生态环境中的残留积淀,还可实现部分昆虫的资源化利用。本研究利用扫描电子显微镜与三维白光干涉表面形貌仪对滑移区进行微观观测,提取滑移区表

面结构的三维参数;基于滑移区表面微结构及三维参数,利用3DSMAX设计具有良好滑移功能的蝗虫捕集滑板的表面微结构,为捕集滑板的制造提供理论基础。

1 滑移区表面结构微观观测

1.1 材料与方法

选取成熟的红瓶猪笼草(*Nepenthes alata*)叶笼(图1a),剪取滑移区,以备试验所用。把剪取的滑移区制成8 mm×8 mm样本,用pH值为7.2~7.4,质量分数为0.2%~0.4%的磷酸缓冲液漂洗后放置室内直到完全干燥,采用喷镀装置(Bal-Tec

收稿日期: 2010-04-02 修回日期: 2010-09-28

* 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(kyex09099)

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

SCD005 Sputter Coater) 进行喷镀处理(镀金, 厚约 15 nm)。处理好的样品置于扫描电子显微镜(Hitachi S-3400N, 16 kV)样品腔, 进行叶笼滑移区表面微形貌观察。把剪取的滑移区制成 15 mm × 15 mm 的样本, 采用以上相同方法漂洗除去表面杂质后置于三维白光干涉表面形貌仪(Zygo New View 5000)样品台上进行观测。

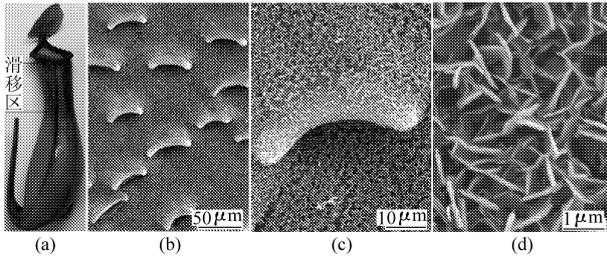


图1 猪笼草叶笼与滑移区表面微结构的扫描电镜图

Fig.1 Pitches of *Nepenthes* and the surface microstructures of slippery zone

1.2 滑移区表面结构与三维参数

猪笼草叶笼滑移区的扫描电镜和三维表面形貌观察试验完成后, 获取滑移区表面结构的显微图像, 利用仪器自带的测量软件提取滑移区表面结构的三维几何尺寸。猪笼草叶笼滑移区约占整个叶笼长度的 1/3, 滑移区表面覆盖着两端向下弯曲的新月体和致密的蜡质晶体层(图 1b)。每个新月体对应着一个增大交叠的保卫细胞, 形成一个具有不对称凸面的表层轮廓并与叶笼外壁相交垂直(图 1c)。蜡质晶体层由形状不规则但可分辨轮廓的片状蜡质晶体组成, 晶体近乎垂直排列于叶笼外壁且紧密交互成网状结构(图 1d), 晶体之间互成角度分布各异。值得注意的是, 位于新月体表面的蜡质晶体层比其他区域明显稀疏。三维表面形貌观测结果表明, 新月体之间的滑移区呈现尺度为微米级的波浪起伏表面(图 2a), 新月体外侧高度变化较为缓慢而形成斜坡, 内侧则近乎垂直变化而形成悬崖(图 2b、2c)。

从猪笼草叶笼滑移区的扫描电镜图像与三维表面形貌图像可以获取滑移区表面整体结构的三维几何参数, 统计结果如表 1 所示。结果表明除蜡质晶体厚度外, 滑移区表面其他结构的几何尺度皆在微米级范围。观察滑移区表面结构的扫描电镜图像, 发现新月体外形轮廓较为规则且类似于圆弧, 进一

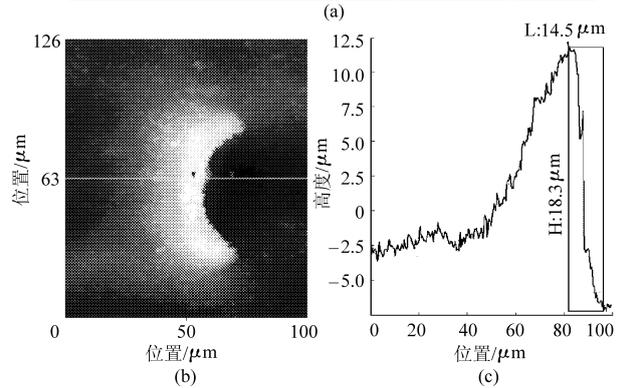
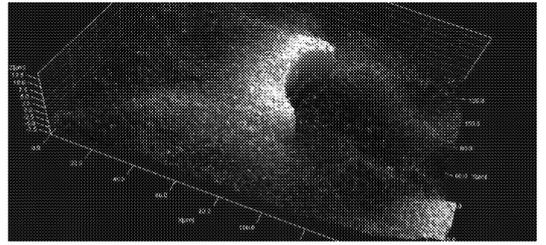


图2 猪笼草叶笼滑移区表面微结构的三维形貌图

Fig.2 Scanning white-light interferometer images of the slippery zone surface in *Nepenthes* pitchers

(a) 新月体三维图 (b) 新月体表面轮廓图
(c) 新月体轮廓高度变化

步计算获取新月体的半径为 $(37.6 \pm 3.6) \mu\text{m}$ ($n = 36$), 圆心角为 $86.2^\circ \pm 8.1^\circ$ ($n = 28$)。通过滑移区表面的三维形貌观察, 还可得到滑移区表面的粗糙度, 其中介于新月体之间的表面粗糙度为 $R_a = 0.96 \mu\text{m}$, 而新月体周围的表面粗糙度为 $R_a = 2.49 \mu\text{m}$, 可见猪笼草叶笼滑移区表面具有较高的粗糙度。

2 蝗虫捕集滑板表面形貌结构仿生设计

蝗虫的附着系数主要由具有坚硬末端的爪和柔软表皮的爪垫组成, 可与附着物表面形成机械锁合与柔性接触两种耦合方式, 从而能够稳固附着于绝大多数基体表面^[5-6]。灾害蝗虫光电诱导捕集灭杀机械化技术的发展, 迫切要求研制具有良好滑移功能的捕集滑板, 使蝗虫附着系统形成的机械锁合与柔性接触两种作用同时降到最低, 以产生良好的滑移效果。对猪笼草叶笼滑移区表面结构及其降低昆虫附着机理的研究, 以及其他领域仿生技术^[7-9]的日益发展, 仿生滑移区表面结构设计制造具有良好

表1 猪笼草叶笼滑移区表面结构的几何尺寸

Tab.1 Geometrical dimensions of surface structures in *Nepenthes* slippery zone

项目	长/ μm	宽/ μm	高/ μm	间距/ μm	密度/个 $\cdot\text{mm}^{-2}$
新月体	50.6 ± 3.3	15.1 ± 1.1	14.0 ± 0.3	80.1 ± 15.7	245.2 ± 16.9
蜡质晶体	1.14 ± 0.15	$(88.0 \pm 10.7) \times 10^{-3}$	1.02 ± 0.21	0.53 ± 0.12	

注: 新月体高度和密度样本数分别是 $n = 8$ 和 $n = 4$; 其他样本数 $n = 36$ 。

滑移功能的蝗虫捕集滑板已具有可行性。

基于猪笼草叶笼滑移区表面结构及其几何尺寸,采用3DSMAX软件实现蝗虫捕集滑板表面微形貌结构的仿生设计。针对滑移区表面结构的几何尺寸处于微纳米级(表1),设计过程中为便于操作,按1 000:1的比例设计滑板的表面微形貌结构。确定捕集滑板基板尺寸为800 mm × 600 mm × 10 mm,遵照滑移区新月体的几何参数及设计比例,捕集滑板表面的新月体按照半径37.6 mm,圆心角86.2°,宽15.1 mm,高14.0 mm的参数绘制,滑板表面新月体的密度及单个新月体的摆放位置亦相似于叶笼滑移区的新月体(图3a)。捕集滑板表面新月体绘制后适当进行拉伸着色光照等渲染处理,以使设计效果更加逼真。为能够同时清晰分辨捕集滑板表面的月骨体与蜡质晶体,在原定设计比例的前提下,再将滑板表面蜡质晶体的绘制比例调至原来的3~5倍,即以长为3.4~5.7 mm,厚度为0.26~0.44 mm,高度为3.1~5.1 mm的参数绘制蜡质晶体,其密度与排列次序与叶笼滑移区的保持相似。设计完成后进行角度调整,着色光照等渲染处理。蝗虫捕集滑板表面微结构仿生设计效果如图3b所示,局部放大如

图3c、3d所示。结果表明,该设计方法能够基于猪笼草叶笼滑移区的表面微结构及其几何参数,实现蝗虫捕集滑板表面为形貌结构的设计。

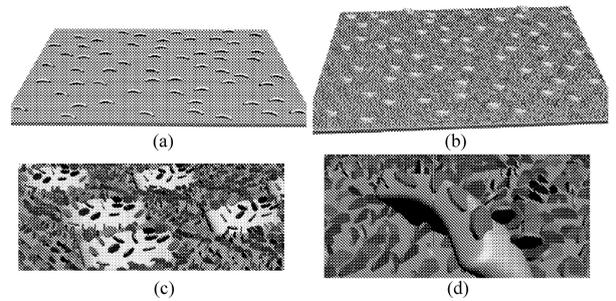


图3 昆虫捕集滑板表面微结构仿生设计
Fig. 3 Bionic design of surface microstructures of slippery trapping plates

3 结束语

利用扫描电子显微镜和三维白光干涉表面形貌仪对猪笼草叶笼滑移区表面结构进行了显微观测,在对获取图像综合分析的基础上提取了表面微结构的几何参数。基于滑移区表面结构及其几何参数,利用3DSMAX软件设计了蝗虫捕集滑板表面形貌结构,为捕集滑板的制造提供了技术支持和理论参考。

参 考 文 献

- 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]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(24): 4 651 ~ 4 662.
- 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.
- 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.
- Wang L X, Zhou Q, Niu H L. Influence of photoelectric stimulation with different spectrum on sliding friction behaviors of locust *Oedaleus infernalis* Saussure (Orthoptera: Acrididae) on slippery plates [J]. *Tribology International*, 2010, 43(5 ~ 6): 1 163 ~ 1 167.
- Perez G 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 A*, 2006, 192(11): 1 233 ~ 1 243.
- Dai Z D, Gorb S N, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(16): 2 479 ~ 2 488.
- 吴娜, 张伏, 佟金. 臭蜣螂唇基切土减阻的力学分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10): 207 ~ 210.
Wu Na, Zhang Fu, Tong Jin. Mechanical analysis of clypeus surface of dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky) in soil-cutting resistance reduction [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 207 ~ 210. (in Chinese)
- 邱兆美, 韩志武. 蝴蝶鳞片微观结构与模型分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(11): 193 ~ 196.
Qiu Zhaomei, Han Zhiwu. Analysis of microstructures and model of butterfly scales [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(11): 193 ~ 196. (in Chinese)
- 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 ~ 174.