

东方蝼蛄口器结构与表皮纳米力学性能研究*

高 吭¹ 李玉柱¹ 佟 金² 孙霁宇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】 利用扫描电镜及能谱仪观察了东方蝼蛄口器表面及断面几何结构特征, 对口器的表皮组成成分进行了分析, 发现口器组织中含有多种金属元素和微量元素; 东方蝼蛄口器具有中空结构, 断面材料呈层状复合结构; 采用切片法对东方蝼蛄口器进行了外形重构; 利用纳米力学测试系统对东方蝼蛄口器表皮材料进行了测试, 发现东方蝼蛄口器的弹性模量和纳米硬度较高。经比较发现, 东方蝼蛄口器表皮的纳米硬度大于雄臭蛱螂唇基表皮的纳米硬度。

关键词: 东方蝼蛄 口器 微观结构 纳米力学

中图分类号: Q811.6; S433.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)08-0224-04

Microstructure and Nanoindentation Properties of Mouthparts of Oriental Mole Cricket

Gao Hang¹ Li Yuzhu¹ Tong Jin² Sun Jiyu²

(1. College of Vehicle and Motive Power Engineering, 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 and the section geometrical structure features and element of the mouthparts of the oriental mole cricket were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy spectrometer. The mouthparts cuticle contained many kinds of metallic elements and microelements. It was found that there existed a hollow structure in the mouthparts and the material of the section displayed sandwich structure. The structure of the mouthparts was modeled with the slice method. The hardness and elastic modulus of the mouthparts cuticle of the oriental mole cricket were obtained by nanomechanical test system. The results showed that the hardness and elastic modulus of the mouthparts cuticle material was high. It was found through comparison that the hardness of the mouthparts of the oriental mole cricket was higher than that of the female clypeus.

Key words Oriental mole cricket, Mouthparts, Microstructure, Nanomechanics

引言

经过长期的进化, 生物材料演变出适应生存环境的结构及功能。认识生物材料的结构特征是开展仿生材料研究的基础。纳米力学测试系统已被广泛应用于测量各种生物材料力学性能^[1~10]。

口器是东方蝼蛄取食的唯一工具, 东方蝼蛄对植物的根、茎和果实都有很强的啃食能力, 是农作物害虫之一。揭示东方蝼蛄口器的结构和材料特性, 对于农业机械切削部件的节能增效及仿生设计都将提供有价值的信息。本文研究东方蝼蛄口器的表皮和断面组成成分, 建立口器的三维模型并分析口器

收稿日期: 2011-01-23 修回日期: 2011-02-09

* 国家自然科学基金资助项目(50675087)、国家杰出青年科学基金资助项目(50025516)、河南科技大学博士科研启动基金资助项目(09001435)、河南科技大学青年基金项目(2010QN0017)和河南省教育厅自然科学计划项目(2011A410001)

作者简介: 高吭, 讲师, 主要从事地面机械仿生理理论与技术研究, E-mail: jlugaohang@163.com

通讯作者: 佟金, 教授, 博士生导师, 主要从事生物表面与仿生摩擦学研究, E-mail: jtong@jlu.edu.cn

的纳米力学特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

东方蝼蛄 (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister), 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。

1.2 扫描电镜与能谱仪分析

在活体东方蝼蛄成虫上, 切取东方蝼蛄口器并用蒸馏水洗净, 放入质量分数为 70% 的乙醇溶液中固定 10 min, 蒸馏水清洗、吹干后, 采用敲击断裂方式分析断面形态, 对其体表进行喷金导电涂层处理, 制成扫描电镜分析试样。用 JSM-5310 型扫描电镜及其配套的能谱仪观察口器表皮形态和断面结构, 分析口器的表皮和断面组成成分。

1.3 利用切片法获得爪趾断面结构

切取活体东方蝼蛄成虫的口器, 首先用酚醛树脂和凝固剂以质量比为 5 的比例将口器封装制成试样; 然后用 PHONEX/BETA 型磨抛机打磨, 抛光精度为 0.02 ~ 0.05 μm , 将每次打磨后的打磨端面 (共采集 25 个断面, 间距 100 μm), 也即口器断面在体视显微镜下放大 50 倍, 记录并存储; 在 Pro/E 软件中利用扫描成型技术建立口器的立体模型。

1.4 纳米力学性能测试

将活体东方蝼蛄成虫的口器用蒸馏水洗净, 在体视显微镜下手工操作, 利用手术刀片剔除表皮刚毛, 用 502 胶迅速固定在载玻片上。使用美国 Hysitron 公司生产的原位纳米力学测试系统测量口器的纳米力学性能, 其加载载荷最大可达 30 mN, 最小为 100 nN, 加载分辨率小于 1 nN, 纵向位移步长 13 nm, 热漂移小于 0.05 nm/s。测量参数按照生物体纳米力学研究的已有成果确定^[11], 最大载荷为 1 000 μN , 保压时间为 20 s, 加载速率为 53 $\mu\text{N/s}$ 。

2 结果与分析

图 1 为东方蝼蛄口器的体视显微镜图和扫描电镜图。观察图 1a 发现, 东方蝼蛄口器表皮光滑, 表面几乎没有刚毛。观察图 1b 发现东方蝼蛄口器断面中间有一个中空结构。这个中空结构里面可能包括口器内的神经、体液等组织, 但这些都是软组织结构, 不能承担外界施加的剪切力, 本文中将其简化为中空。这种中空结构在机械零件上应用较多, 是利用较少材料保证部件具有足够强度和增大抗扭能力的结构。因此, 可以认为东方蝼蛄口器的这种中空

结构在减少口器质量的同时并不影响其应有的强度。东方蝼蛄口器非中空部位断面结构具有层状复合结构特征。在进行纳米力学性能测量时主要涉及口器外表皮的壳质层。

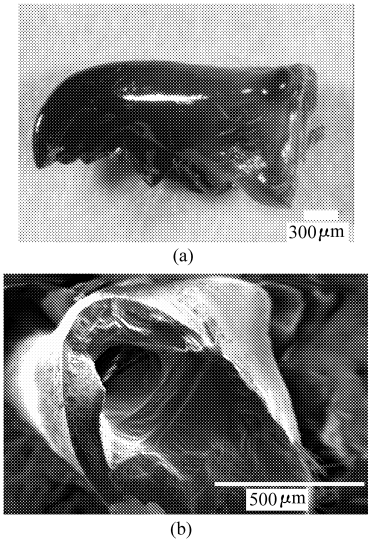


图 1 东方蝼蛄口器的体视显微镜和扫描电镜图
Fig. 1 Stereomicroscopy and SEM images of mouthparts of oriental mole cricket
(a) 体视显微镜图 (b) 扫描电镜图

图 2a 是东方蝼蛄口器的内表面部分, 选取如图所示的测试区, 进行能谱分析, 得到口器内表面的组成成分能谱图如图 2b 所示。得到东方蝼蛄口器各部位的组成成分质量分数, 如表 1 所示。

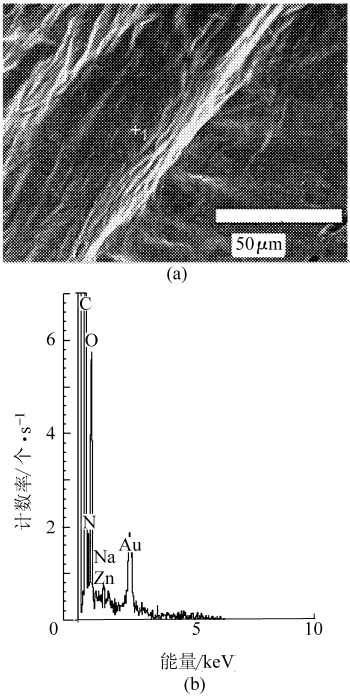


图 2 东方蝼蛄口器内表面能谱仪测试区与能谱图
Fig. 2 Test position and energy spectrum diagram of the mouthparts inner surface of oriental mole cricket
(a) 测试区 (b) 能谱图

表 1 东方蝼蛄口器的组成元素含量

Tab.1 Element list of mouthparts of oriental mole cricket

成分	口器外表面	口器断面	口器内表面
C	51.56	54.09	19.21
N			47.79
O	42.38	39.35	32.32
Al	1.22	1.31	
Si	2.84	3.19	
Ca		0.12	
Na			0.09
Zn			0
Au	1.91	2.07	0.59

东方蝼蛄口器的组成成分主要包括 C、N、O 3 种元素,并含有 Al、Si、Ca、Na 等金属元素和微量元素。其中 Al、Si、Na 远远高于东方蝼蛄其他部位的含量^[11]。在对蛻螂(*Copris ochus* Motschulsky)表皮的金属元素含量进行分析时发现,蛻螂唇基的金属元素 Fe、Zn、P 远远高于其他部位,同时在对蛻螂的唇基进行纳米力学性能研究时发现,蛻螂唇基的纳米硬度比其他部位的纳米硬度要高^[12],说明金属元素的存在可以增强昆虫体壁的硬度。在东方蝼蛄口器上存在多种金属元素,可能也是为了适应它们的工作强度,使其有较高硬度,从而使东方蝼蛄口器的啃食能力很强。

东方蝼蛄口器根部粗大,尖部圆滑过渡。利用工程软件 Pro/E 导入东方蝼蛄口器的断面结构轮廓(图 3a),利用 B 样条曲线拟合法对口器切片轮廓进行提取时,曲线节点间距不大于 100 μm。采用曲面重构的方法,获得口器的外形结构立体图形,重构精度可达到 100~200 μm,如图 3b 所示。

图 4 为东方蝼蛄口器表皮纳米力学测量过程中的载荷-压痕深度关系曲线。所对应测量结果为:弹性模量 $E_r=2.59\text{ GPa}$,纳米硬度 $H=0.21\text{ GPa}$,最大载荷 $P_{\max}=1\,000.32\text{ }\mu\text{N}$,接触深度 $h_c=420.52\text{ nm}$,最大压痕深度 $h_{\max}=478.15\text{ nm}$ 。测得东方蝼蛄口器的弹性模量和纳米硬度分别为 $(2.61\pm0.11)\text{ GPa}$ 和 $(0.29\pm0.08)\text{ GPa}$ 。分析发现,东方蝼蛄口器的纳米硬度较高,可能因为其口器表皮含有多种金属元素所致。以往的研究发现,雌性臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度约为 0.47 GPa ,雄性臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度约为 0.12 GPa ,而东方蝼蛄口器表皮的纳米硬度在雌雄臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度中间^[12]。雌臭蛻螂的唇基主要是用作挖掘土壤、铲粪堆等受力较大的工作,而东方蝼蛄的口器用来啃食根茎类植物或者庄稼的幼苗,所以口器的纳米硬度就小于

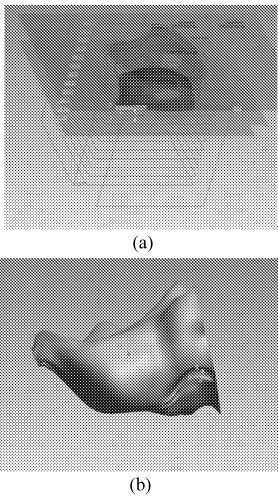


图 3 东方蝼蛄口器外形结构重构
Fig.3 Reconstruction of the mouthparts for oriental mole cricket

(a) 导入 Pro/E 软件中的断面图片
(b) 东方蝼蛄口器曲面重构立体图

雌臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度,大于雄臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度。

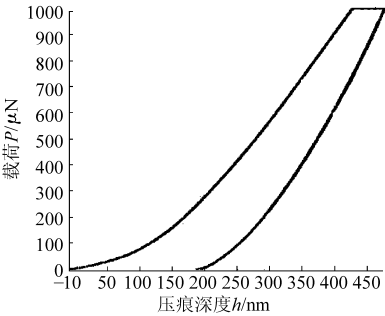


图 4 东方蝼蛄口器表皮材料的载荷-压痕深度关系曲线

Fig.4 Force-displacement curve of the mouthparts cuticle of oriental mole cricket using nanoindenter

3 结论

- (1)东方蝼蛄口器表皮光滑,表面几乎没有刚毛。中间具中空结构,断面由层状复合结构构成。
- (2)东方蝼蛄口器的组成成分主要包括 C、N、O 3 种元素,并含有 Al、Si、Ca、Na 等金属元素和微量元素。多种金属元素的存在,可能使口器表面硬度相对较高。而其中金属元素的存在状态和结构以及其对硬度的影响将在以后的工作中进一步研究。
- (3)东方蝼蛄口器的弹性模量和纳米硬度分别为 $(2.61\pm0.11)\text{ GPa}$ 和 $(0.29\pm0.08)\text{ GPa}$ 。其纳米硬度大于雄臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度,小于雌臭蛻螂唇基表皮的纳米硬度。这可能是因为东方蝼蛄的口器用来啃食根茎类植物或者庄稼的幼苗,不需要切削土壤等硬度较高的工作环境所致。

参 考 文 献

1 Ebenstein D M, Pruitt L A. Nanoindentation of biological materials[J]. Nanotoday, 2006,1(3):26~33.

2 Wang X J, Chen X B, Hodgson P D, et al. Elastic modulus and hardness of cortical and trabecular bovine bone measured by nanoindentation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006: s744~s748.

3 Pelled G, Tai K, Sheyn D, et al. Structural and nanoindentation studies of stem cell-based tissue-engineered bone[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(2):399~411.

4 Song Fan, Xiao Kewei, Bai Yilong. Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 457(1~2): 254~260.

5 Tong Jin, Zhao Yanru, Sun Jiyu, et al. Nanomechanical properties of the stigma of dragonfly *Anax parthenope julius* Brauer [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(8): 2 894~2 898.

6 佟金,高吭,孙霁宇. 东方蝼蛄前足爪趾结构与表皮纳米力学性能[J]. 农业机械学报,2009,40(5):190~193.
Tong Jin, Gao Hang, Sun Jiyu. Microstructure and nanoindentation properties of foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5): 190~193. (in Chinese)

7 Lonnroth N, Muhlstein C L, Pantano C, et al. Nanoindentation of glass wool fibers[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(32): 3 887~3 895.

8 Sun Jiyu, Tong Jin, Zhou Jiang. Application of nano-indenter for investigation of the properties of the elytra cuticle of the dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky) [J]. IEEE Proceedings Nanobiotechnology, 2006, 153(5): 129~133.

9 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Factors impacting nanoindentation testing results of the cuticle of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky [J]. Journal of Bionics Engineering, 2004, 1(4): 221~230.

10 Sun Jiyu, Guo Yingjie, Tong Jin. Testing methods for nanoindentation property of the cuticle of bovine hoof wall and dung beetle's foreleg femur[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 355~364.

11 高吭. 东方蝼蛄特征、功能、力学及其仿生分析[D]. 长春:吉林大学,2009.
Gao Hang. Characteristic, function, mechanics and bionic analysis of oriental mole cricket *Gryllotalpa orientalis* Burmeister [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

12 孙霁宇. 臭蜣螂表皮纳米力学测试方法和纳米力学行为[D]. 长春:吉林大学,2005.
Sun Jiyu. Analyzing methods for nanoindentation and nanomechanical properties of the cuticle of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky [D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)

(上接第 223 页)

9 Tian Limei, Ren Luquan, Liu Qingping, et al. The mechanism of drag reduction around bodies of revolution using bionic non-smooth surfaces [J]. Journal of Bionic Engineering, 2007,4(2): 109~116.

10 陈柏,陈笋,蒋素荣,等. 仿生介入机器人的运动性能[J]. 机器人,2010,32(3):414~418.
Chen Bai, Chen Sun, Jiang Surong, et al. Motion performances of a bionic interventional micro robot [J]. Robot, 2010, 32(3): 414~418. (in Chinese)

11 颜兵兵,任福君. 拱泥机器人仿生机构方案设计[J]. 机械科学与技术,2008,28(5):674~681.
Yan Bingbing, Ren Fujun. Design of the bionic mechanism of a move in mud robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 28(5): 674~681. (in Chinese)

12 任福君,颜兵兵. 拱泥机器人运动特性分析与仿真[J]. 机械工程学报,2008,44(1):62~66.
Ren Fujun, Yan Bingbing. Motion characteristics analysis and simulation of move-in-mud robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 62~66. (in Chinese)

13 张秀丽,郑浩峻,陈恳,等. 机器人仿生学研究综述[J]. 机器人,2002,24(2):188~192.
Zhang Xiuli, Zheng Haojun, Chen Ken, et al. Research on robotic bionics [J]. Robot, 2002, 24(2): 188~192. (in Chinese)

14 赵铁石. 灵活轻便仿生步行机构学研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,1992.
Zhao Tieshi. Mechanism research for flexible and light bionic walking machine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 1992. (in Chinese)

15 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质,2010,37(2):59~63.
Ye Siqiao, Chen Hongkai, Tang Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 59~63. (in Chinese)