

东方蝼蛄前足爪趾结构与表皮纳米力学性能^{*}

佟金高 吭 孙霁宇

(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前足爪趾表面及断面几何结构特征, 得知东方蝼蛄前足爪趾具有中空结构, 断面材料呈层状复合结构。利用切片法分析了前足爪趾中空结构。利用纳米力学测试系统对东方蝼蛄前足爪趾表皮材料进行了测试, 可知东方蝼蛄爪趾内侧的弹性模量和纳米硬度明显高于其爪趾外侧。与已有研究结果比较表明, 东方蝼蛄爪趾表皮的纳米硬度高于臭蛭螂、粪堆粪金龟、弧齿爪鳃金龟的前足胫节表皮的纳米硬度, 并高于牛蹄、羊蹄和猪蹄蹄壁材料的纳米硬度。

关键词: 东方蝼蛄 爪趾 微观结构 纳米力学

中图分类号: O344; S433.8⁺4

文献标识码: A

Microstructure and Nanoindentation Properties of Foreleg's Tarsal Claw of the Oriental Mole Cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister)

Tong Jin Gao Hang Sun Jiyu

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

Abstract

The surface and the section geometrical structure features of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister) were examined by scanning electron microscopy (SEM). It was found that there exists a hollow structure in the tarsal claw and the material of the section displays sandwich structure. The hollow structure of the foreleg's tarsal claw was modeled using the slice method. The hardness and elastic modulus of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister) were obtained by nanomechanical test system. The results show that the hardness and elastic modulus of the tergal cuticle material of the tarsal claw of the foreleg were higher than its front cuticle material. It was found through comparison that the hardness of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister) is higher than that of the tibia cuticle material of *Copris ochus* Motschulsky, *Geotrupes stercorarius* Linnaeus and *Holotrichia sichotana* Brenske, and higher than the hardness of the hoof wall materials of cattle, sheep and pig as well.

Key words Oriental mole cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister), Claw, Microscopic structure, Nanomechanics

引言

材料在纳观尺度(1~100 nm 之间)上的性能明显不同于在宏观尺度上的性能。对于昆虫这样较小尺寸动物的材料力学性能, 无法采用工程材料力学

性能测试方法进行测试。纳米压痕技术被证明是测量从矿化组织到软组织各种生物材料力学性能的有力工具, 使得在以前无法测量的生物材料力学性能得以进行量化测量和分析, 可有效地进行生物材料多级结构特征研究^[1]。纳米力学测试系统已被

应用于测量和研究牛椎骨和胫骨的弹性模量和纳米硬度^[2], 细胞级组织工程骨的纳米力学^[3], 区别成骨不全症临床类型的骨质弹性模量和纳米硬度^[4], 成人牙釉质的弹性模量、纳米硬度和纳米压痕蠕变行为^[5-6], 蜻蜓翼膜的纳米力学性能^[7-8], 木细胞壁的纳米硬度^[9], 玻璃木纤维的纳米力学行为^[10], 臭蛭螂鞘翅和股节表皮的纳米力学行为^[11-13], 牛蹄壁材料的纳米力学行为^[12]等。

经过长期进化, 蝼蛄前足进化为挖掘足, 具有超强的挖掘洞穴的能力^[14]。本文研究东方蝼蛄前足爪趾的结构和纳米力学特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

东方蝼蛄 (*Grylotalpa orientalis* Burmeister), 属于直翅目(Orthoptera) 蝼蛄科(Grylotalpidae) 蝼蛄属(*Grylotalpa*)。试验用东方蝼蛄样品采集于吉林省德惠市五台乡。由于生物体个体差异较大, 每个试验均取 10~20 只东方蝼蛄成虫重复试验, 试验结果取平均值。

1.2 扫描电镜分析

将活体东方蝼蛄成虫用蒸馏水洗净, 放入质量浓度 70% 的乙醇溶液中固定 10 min, 蒸馏水清洗、吹干后, 切取东方蝼蛄前足, 对其体表进行喷金导电涂层处理, 制成扫描电镜分析试样。用扫描电镜(JSM-5310)分析前足爪趾几何形态和断面结构。爪趾断面形态分析采用敲击断裂方式, 观察其断面形态, 表面亦进行喷金导电涂层处理。

1.3 切片法取得爪趾断面结构

切取活体东方蝼蛄成虫的前足爪趾, 首先用酚

醛树脂和凝固剂以 5:1 的比例将前足爪趾封装制成试样; 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即爪趾断面在体视显微镜下记录并存储; 利用体视显微镜的图像分析系统测量断面参数。

1.4 纳米力学性能测试

将活体东方蝼蛄成虫用蒸馏水洗净, 在体视显微镜下, 利用手术刀片手工剔除表皮刚毛, 取下其前足爪趾, 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前足爪趾纳米力学性能, 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^[15], 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

扫描电镜观察发现, 东方蝼蛄前足爪趾内侧光滑没有覆盖刚毛的部分具有一种加强筋的结构(见图 1a), 这种结构增强了爪趾的强度。图 1b 所示为东方蝼蛄前足爪趾断面形态, 其中间有一个中空结构。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的结构。因此, 可以认为东方蝼蛄爪趾的这种中空结构在减少爪趾质量的同时并不影响其应有的强度。图 1c 所示为东方蝼蛄前足爪趾非中空部位断面结构的 SEM 照片, 反映了爪趾非中空部位的断面具有层状复合结构特征, 其最外面的壳质层厚度约为 10 μm , 内部由厚度约为 2 μm 的层状结构组成。在进行纳米力学性能测量时主要涉及壳质层。

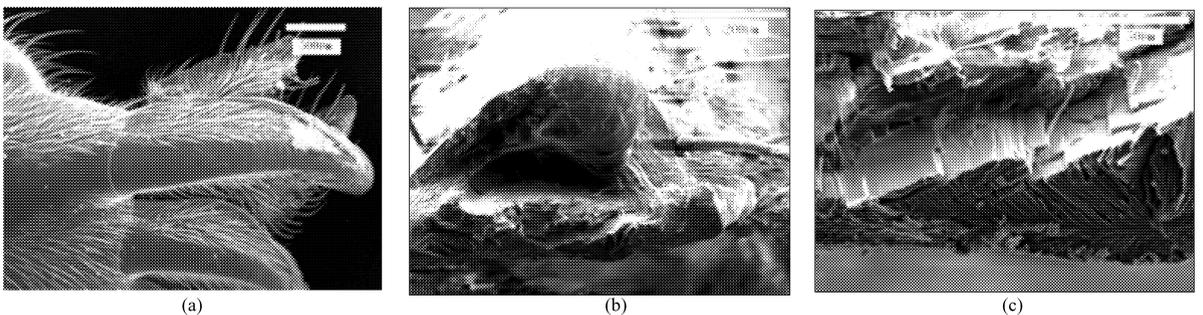


图 1 东方蝼蛄前足爪趾 SEM 照片

Fig. 1 SEM images of the tarsal claw of the oriental mole cricket (*Grylotalpa orientalis* Burmeister)

(a) 前足爪趾形态 (b) 爪趾断面中空形态 (c) 爪趾断面非中空部位形态

利用切片法, 测量东方蝼蛄前足爪趾的中空结构。以前足爪趾的第 1 个趾(爪趾顺序如图 2 所示) 为例: 把爪趾沿长度(2 312 μm) 分为 4 份, 在距离趾尖 1/4 处, 中空结构断面接近于三角形(见图 3a), 中空面积 33 354 μm^2 , 占断面总面积的 15.6%; 在距

离趾尖 1/2 处, 中空结构断面接近于椭圆形, 中空面积 108 588 μm^2 , 占断面总面积的 25.7%; 在距离趾尖 3/4 处, 中空结构断面接近于椭圆形(见图 3b), 中空面积 265 059 μm^2 , 占断面总面积的 49.6%。表 1 为东方蝼蛄爪趾第 1 到第 4 个爪趾的断面中空面积

占断面总面积的百分数。

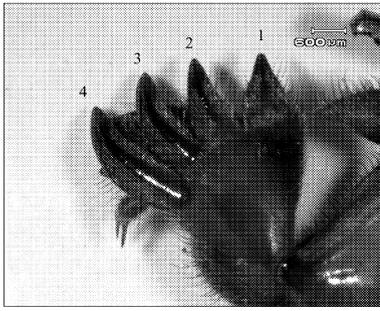


图2 东方蝼蛄前足爪趾内侧体视显微镜照片
Fig.2 Stereomicroscopy images of the inside of the tarsal claw of the foreleg of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)

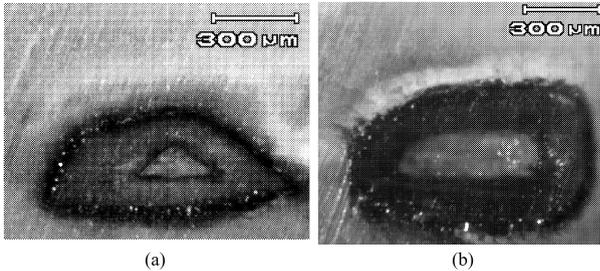


图3 东方蝼蛄前足爪趾断面体视显微镜照片
Fig.3 Stereomicroscopy images of the section of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)

(a) 距离趾尖 1/4 处断面照片 (b) 距离趾尖 3/4 处断面照片

表1 东方蝼蛄爪趾断面中空面积与断面总面积之比
Tab.1 Ratio of the hollow area with the total area of the section of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) %

蝼蛄爪趾	1/4 处	1/2 处	3/4 处
第1趾	15.6 ± 0.20	25.7 ± 0.14	49.6 ± 0.50
第2趾	13.2 ± 0.15	28.7 ± 0.21	44.3 ± 0.23
第3趾	16.8 ± 0.30	19.7 ± 0.13	46.7 ± 0.45
第4趾	15.6 ± 0.12	25.3 ± 0.25	45.3 ± 0.12

综上得知,爪趾断面中空结构面积随着距趾尖的距离增大而增大,占断面总面积的百分比也逐渐增大。而爪趾的壳体层厚度变化较小。

利用 Pro/E 软件画出断面结构轮廓,采用曲面重构方法,获得爪趾中空结构立体图形如图4所示。

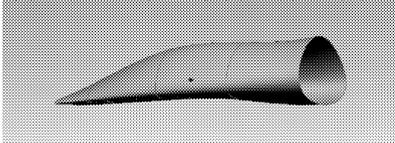


图4 东方蝼蛄前足爪趾中空结构三维示意图
Fig.4 3-D schematic diagram of the hollow structure of the foreleg's tarsal claw of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)

图5所示为东方蝼蛄前足爪趾表皮纳米力学测量过程中的载荷-压痕深度关系曲线。测量位置在前足爪趾的外侧趾尖部分,测量结果为:弹性模量 $E_r = 6.45$ GPa, 纳米硬度 $H = 0.21$ GPa, 最大载荷 $P_{\max} = 1\,000.301$ μN , 接触深度 $h_c = 400.66$ nm, 最大压痕深度 $h_{\max} = 448.21$ nm。表明前足爪趾外侧趾尖表皮材料产生了蠕变现象,即在最高载荷处(保压阶段),载荷保持不变,而位移仍然有继续增大的现象。这种情况的外在因素有应力和温度等,本试验是在封闭工作室内进行,可排除温度的影响,因此主要是在所施加压应力作用下材料的力学现象。东方蝼蛄前足爪趾外侧趾尖和内侧加强筋部位纳米力学测量结果见表2,可以得知,东方蝼蛄前足爪趾内侧部位材料的弹性模量和纳米硬度明显高于爪趾外侧(触土面)部位材料的弹性模量和纳米硬度,这可能是内侧加强筋材料需要更高的强度和弹性之故。东方蝼蛄前足爪趾外侧表皮材料的纳米硬度虽然低于其内侧表皮材料的纳米硬度,但与其他昆虫和动物的爪趾表皮材料相比,东方蝼蛄前足爪趾表皮材料的纳米硬度仍比较高。例如,臭蜚螂、粪堆粪金龟、弧齿爪鳃金龟的前足胫节纳米硬度分别为 0.32、0.35、0.27 GPa^[15],均小于东方蝼蛄前足爪趾的硬度;牛蹄、羊蹄、猪蹄的纳米硬度分别为 0.159 ± 0.046 、 0.318 ± 0.042 、 0.158 ± 0.013 GPa,也都小于东方蝼蛄前足爪趾的硬度^[16]。这对保证东方蝼蛄爪趾具有很强的挖掘能力非常重要。

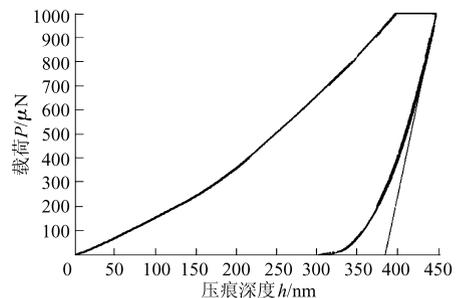


图5 东方蝼蛄前足爪趾外侧趾尖表皮材料的载荷-压痕深度关系曲线

Fig.5 Force-displacement curve of the foreleg's tarsal claw tip cuticle of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) using nanoindenter

表2 东方蝼蛄前足爪趾弹性模量和纳米硬度
Tab.2 Reduced modulus and nano-hardness of tarsal claw cuticle of the foreleg of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister) GPa

测量位置	弹性模量 E_r	纳米硬度 H
爪趾外侧	8.61 ± 1.07	0.46 ± 0.10
爪趾内侧	12.88 ± 3.15	1.21 ± 0.51

3 结论

(1) 东方蝼蛄前足爪趾的内侧具有加强筋结构, 爪趾中间具有中空结构。其中空结构横断面面积随着距离趾尖的距离增大而增大, 占断面总面积的百分比也不断增大。断面形态表明爪趾材料呈层状结构, 其最外层的壳质层厚度约为 $10\ \mu\text{m}$, 内部由厚度约为 $2\ \mu\text{m}$ 的层状结构组成。

(2) 东方蝼蛄前足爪趾外侧表皮的纳米硬度平均值为 $0.46\ \text{GPa}$, 弹性模量的平均值为 $8.61\ \text{GPa}$; 爪趾内侧表皮纳米硬度平均值为 $1.21\ \text{GPa}$, 弹性模量平均值为 $12.88\ \text{GPa}$; 爪趾内侧表皮材料的弹性模量和纳米硬度明显高于爪趾外侧的表皮材料。东方蝼蛄前足爪趾表皮的纳米硬度高于臭蜚螂、粪堆粪金龟、弧齿爪蓘金龟的前足胫节表皮材料的纳米硬度, 并高于牛蹄、羊蹄、猪蹄蹄壁材料的纳米硬度。

参 考 文 献

- Ebenstein D M, Pruitt L A. Nanoindentation of biological materials[J]. *Nanotoday*, 2006, 1(3):26~33.
- 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, 16:S744~S748.
- 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.
- Fan Z F, Smith P, Rauch F, et al. Nanoindentation as a means for distinguishing clinical type of osteogenesis imperfecta [J]. *Composites: Part B*, 2007, 38(3):411~415.
- He L H, Swain M V. Influence of environment on the mechanical behaviour of mature human enamel[J]. *Biomaterials*, 2007, 28(30):4 512~4 520.
- Dickinson M E, Wolf K V, Mann A B. Nanomechanical and chemical characterization of incipient in vitro carious lesions in human dental enamel[J]. *Archives of Oral Biology*, 2007, 52(8):753~760.
- Song F, Xiao K W, Bai K, et al. Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 457(1~2):254~260.
- 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.
- Tze W T Y, Wang S, Rials T G, et al. Nanoindentation of wood cell walls: continuous stiffness and hardness measurements [J]. *Composites: Part A*, 2007, 38(3): 945~953.
- 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.
- Sun J Y, Tong J, Zhou J. Application of nano-indenter for investigation of the properties of the elytra cuticle of the dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky)[J]. *IEE Proceedings Nanobiotechnology*, 2006, 153(5): 129~133.
- 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.
- 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.
- Aaron S Weed, Howard Frank J. Oviposition behavior of *pheropsophus aequinoctialis* L. (Coleoptera: Carabidae): a natural enemy of scapteriscus mole crickets (Orthoptera: Gryllotalpidae)[J]. *Journal of Insect Behavior*, 2005, 18(5): 707~723.
- 孙霁宇. 臭蜚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)
- 郭颖杰. 哺乳动物角蛋白材料力学及摩擦学行为研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Guo Yingjie. Mechanical and tribological behaviours of several mammal keratin materials[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (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):172~175.
Gao Hang, Tong Jin. Body surface morphology and wettability of the oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis* Burmeister)[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(11):172~175. (in Chinese)