复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第1期 2月 2013年
Vol. 30 No. 1 February 2013

文章编号：1000-3851(2013)01-0257-06

独角仙鞘翅微结构及其纳米力学性能

杨志贤*[1,2]，许迪初[1]，骆利芹[1]，戴振东[2]，郭 策[2]

（1. 江苏大学 机械工程学院，镇江 212013；2. 南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所，南京 210016）

摘 要： 利用SEM对独角仙鞘翅的微结构进行了观测，并借助纳米压痕仪测试分析了鞘翅的纳米力学性能。SEM试验表明独角仙鞘翅是一种具有拱形空腔的中空轻质生物复合材料，其断面占空比为26.36%。鞘翅由外表皮和内表皮构成，而内表皮又通过11～12层纤维层采用45°角正交叠加铺设，层间辅以许多微纤维丝交叉连接方式编织在一起，形成层合板结构。试验测得鞘翅外表皮纳米力学性能分别为：硬度(0.28±0.13) GPa，弹性模量(5.62±1.21) GPa，接触刚度 (1.67±0.14)×10^4 N/m。其纳米力学性能呈现拓扑分布规律，由头部至尾部区域有增大趋势。试验测试结果为后续研究中设计一种基于独角仙鞘翅的新型轻质仿生结构提供了仿生学模型和理论参考。

关键词： 独角仙；鞘翅；微结构；中空轻质结构；纳米力学性能

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Micro-structure and nano-mechanical property of the elytra (*Coleoptera*: *Allomyrina dichotoma*)

YANG Zhixian*[1,2], XU Dichu[1], LUO Liqin[1], DAI Zhendong[2], GUO Ce[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The micro-structure of elytra was observed by SEM. The nano-mechanical property of elytra was tested and analyzed with a nano-indentation machine. SEM images indicate that the elytra of *Allomyrina dichotoma* are lightweight biological composites with a hollow structure like as arch shape. The duty ratio of cross-section is 26.36%. The elytra are composed of epicuticle(EPI) and exocuticle(EXO). The exocuticle consists of 11～12 fiber layers, laying in quadrature manner with a ply angle 45° plus lots of fibrils braiding across, which form a laminated plate structure. The hardness, modulus and contact stiffness of epicuticle in elytra acquired with nano-indentation testing are (0.28±0.13) GPa, (5.62±1.21) GPa and (1.67±0.14)×10^4 N/m, respectively. The nano-mechanical properties of elytra present a topological distribution characteristic, namely is a gradually incremental tendency from the cephalosome zone to the empennage zone. The results may provide biological template and biomimetic theory to design a new lightweight bionic structure inspired by the elytra in beetle *Allomyrina dichotoma* for the further researches.

Keywords: *Allomyrina dichotoma*; elytra; micro-structure; hollow lightweight structure; nano-mechanical properties

近年来高新技术产业的飞速发展，对材料的强质比、刚质比、耐损伤等性能提出了更高的要求，轻质高强化一直是工程领域及航空航天领域所追求的目标。采用轻合金材料(如钛、铝、镁锂合金等)和轻质结构(如蜂窝、皱褶、泡沫金属、纤维增强复合材料等)是实现结构/材料轻质化的主要途径。

自然界生物为适应自身生存的环境，在经历了长期的进化后，形成了各具特色的材料结构和性能(高的强度和断裂韧性，抗挤压和剥离能力，良好的功能适应性等)，如：分级竹丝复合材料的模量可达

收到初稿日期： 2012-04-02；**收到修改稿日期：** 2012-06-19；**网络出版时间：** 2012-10-11 17:21:03
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20121011.1721.001.html
基金项目： 国家自然科学基金(51005105，90916021)；江苏大学高级人才启动基金(10JDG058)
通讯作者： 杨志贤，博士，讲师，从事仿生材料与轻质结构的研究 E-mail：hiyoo@ujs.edu.cn

28 GPa，强度达 28 MPa 以上，性能可超过玻璃钢[1]；贝壳珍珠层的硬度是普通文石的 2 倍，而断裂韧性是后者的 1000 余倍[2]，比单相碳酸钙陶瓷高出 2～3 个数量级[3]；蛛丝强度为 600～1000 MPa，比强度(强度/密度)为 444～833 MPa·(g·cm^{-3})$^{-1}$；蝗虫脚爪的强度为 160～640 MPa，比强度为 133～640 MPa·(g·cm^{-3})$^{-1}$，其高比强度和耐损伤性能早已为人们所称道[4]。吉林大学佟金等对臭蜣螂前胸板及东方蝼蛄爪趾和口器结构的研究表明其为中空结构，同时测得东方蝼蛄前足爪趾表皮纳米力学性能为：弹性模量 E_r＝6.45 GPa，纳米硬度 H＝0.21 GPa[5-7]。生物复合材料的优良特性为先进复合材料的设计展示了诱人前景，为轻质、高强、耐损伤结构材料的设计，从仿生学的角度提供了设计灵感。

甲虫鞘翅是由其前翅经过上亿年的进化而形成的具备多功能需求的轻质材料。目前国内外就甲虫生物材料的结构、强度分布及几何拓扑等方面展开了一定的研究[8]，陈锦祥等对甲虫巨锯锹甲的研究表明，其前翅是以小柱为中空层的夹芯层状三合板结构，有很强的抗断裂韧性和抗剥离能力，是一种轻量型的复合材料板材[9-13]。前期工作以生活在水环境中的甲虫东方龙虱为对象，研究了其鞘翅及吸附脚掌的微结构和力学性能，结果表明，东方龙虱鞘翅内部具椭圆形空腔分布，同时由桥墩状空心纤维束连接鞘翅上、下表皮层而形成的中空轻质结构[14-16]。其比强度为 200～220 MPa·(g·cm^{-3})$^{-1}$，与超轻镁锂合金相当(160～210 MPa·(g·cm^{-3})$^{-1}$)[17]。本文中以生活在陆地环境的甲虫独角仙为对象，研究了其鞘翅的微结构及纳米力学性能。

1　实验方法

1.1　材　料

实验用甲虫独角仙(*Allomyrina dichotoma*)属鞘翅目(*Coleoptera*)金龟子科(*Scarabaeoidea*)独角仙亚科(*Dynastinae*)，采自江西新干县(质量(4.54±0.15) g，鞘翅长(30±1) mm)。图 1 为独角仙成虫外观。

1.2　SEM 试样制备

将独角仙鞘翅从成虫驱体上取下，先用超声波(低频)清洗 2～3 min，去除表面灰尘及杂质颗粒，接着放入浓度分别为 75%、85%、95%的酒精溶液中各浸泡 10 min 进行脱水(利于后续的喷金处理)，将脱水后的鞘翅液氮冷冻约 1 h 后取出用镊子在需观测部位掰断鞘翅取样，液氮冷冻的目的是防止鞘翅断面在掰断时因外力压迫而产生变形，保证其微结构的完整性。最后进行喷金导电涂层处理，完成扫描电镜试样的制备。

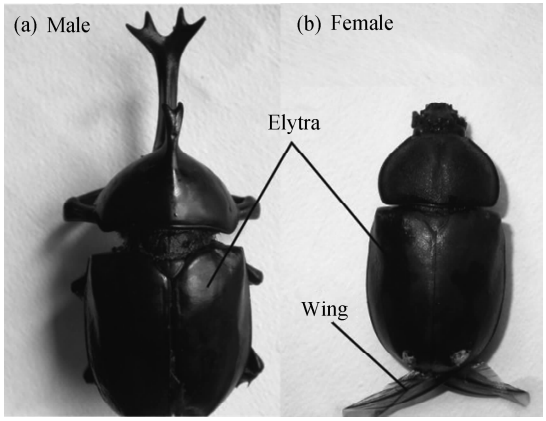


图 1　独角仙成虫外观

Fig. 1　Appearance of adult beetle *Allomyrina dichotoma*

1.3　鞘翅表面粗糙度的测定

准备 8 mm×8 mm 鞘翅表面作为测试样本(6 个样本)，设定取样长度为 0.25 mm，评定长度为 6 mm，每个评定长度上取样 6 个进行测定，共 36 个测试值，实验结果取平均值作为独角仙鞘翅表面粗糙度的参数值。

1.4　纳米力学性能测试

将甲虫鞘翅用蒸馏水洗净，自然风干。在鞘翅正面不同区域(靠近头部区域、中间区域和靠近尾部区域)获取 3 mm×3 mm 试样 5 个(A、B、C、D、E)(如图 2 所示)，每个试样取 9 个点进行重复实验，测试鞘翅的纳米力学性能，最后取 5 个试样的平均值作为独角仙鞘翅的纳米力学性能参数值。试验用的纳米压痕仪(Nano Indenter SA2，MTS，USA)技术指标：位移分辨率 0.2 nm，最大压深 15 μm，最大加载 10 mN，载荷分辨率 1 nN，热漂移率 0.15 nm/s，泊松比 0.35。实验环境：温度(27±0.5) ℃，湿度 65%。

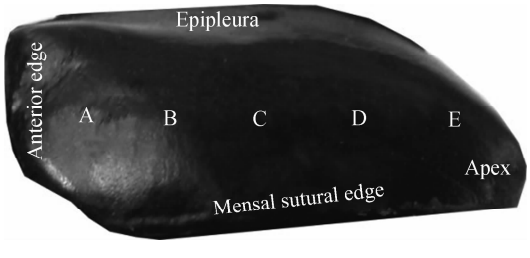


图 2　试样获取位置图(鞘翅正面)

Fig. 2　Zones of specimens taken from the elytra(in top view)

2 结果与讨论

2.1 鞘翅微结构

图 3 是鞘翅断面微结构 SEM 照片。为了便于理解，此处将独角仙鞘翅划分为三层：背壁层(dorsum)、腹壁层(abdomen)和中空层(cavity core)。图 3(a)表明，鞘翅是一种具有中空结构的轻质生物复合材料。表 1 列出了鞘翅各微结构的几何参数值，其中鞘翅厚度为(57.88±13.94) μm (n=19，n 为重复测试的次数)，鞘翅在空腔位置时其断面最厚，达到 87.02 μm，背壁层与腹壁层连接处最薄，最小值为 40.15 μm，独角仙鞘翅结构是一种具有非均匀厚度的中空轻质结构。鞘翅上表面体现出非光滑表面织构，上面布满许多规律性分布的凹坑(concavity)(图 3(a)中白色箭头所示)，凹坑直径为(33.82±2.88) μm(n=13)，凹坑内具直径(10.98±0.89) μm(n=6)的凸苞微结构(convexity)，与连接相邻两空腔的纤维束相对应，对连接鞘翅的上、下表皮起加强筋的作用，有利于增加整个鞘翅结构的强度和抗断裂抗剥离能力[18]。鞘翅背壁层主要由黑色的致密外表皮(EPI：Epicuticle)和由多层纤维层层叠铺设而成的内表皮(EXO：Exocuticle)构成(图 3(c))，其中外表皮厚度(9.21±0.58) μm(n=11)，其成分为胶原蛋白，单层纤维层由亚纤维束编织而成，其成分为几丁质纤维[19]，厚度(2.24±0.40) μm(n=19)，整个内表皮由 11～12 层纤维层铺设而成(图 3(d))，其铺设方式为 45°角正交叠加铺层(图3(e)中黑色箭头所示)。层与层之间通过许多直径约 160 nm 微纤维丝编织在一起(图 3(e)中白色箭头所示)，形成夹层板复合材料结构。鞘翅腹壁层的结构与背壁层相似，由外表皮和内表皮组成，其外表皮和单层纤维层的厚度较薄(图3(f))，只达到背壁层的 1/5 和 2/5，具体参数值见表 1。图 3(f)表明鞘翅内表皮中的纤维层由亚纤维束铺设而成，单个亚纤维束由许多纳米级纤维丝以接近 90°角的方式螺旋编织而成(图 3(g))。

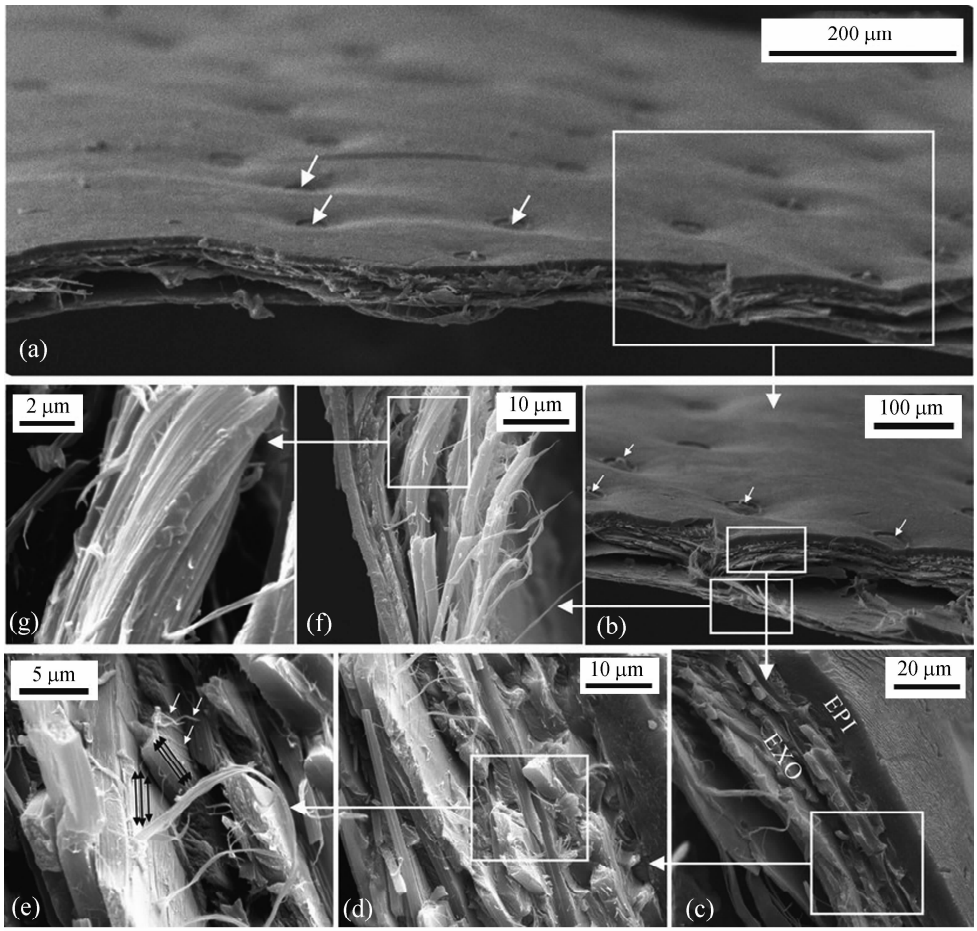


图 3 独角仙鞘翅微结构

Fig. 3 Micro-structures of elytra in beetle *Allomyrina dichotoma* (EPI—Epicuticle, EXO—Exocuticle; (a) Cross-section of elytra; (b) Shape of cavity; (c) Dorsum; (d) Exocuticle; (e) Laying manner of fiber layers; (f) Fiber bundles; (g) Details of single fiber bundle)

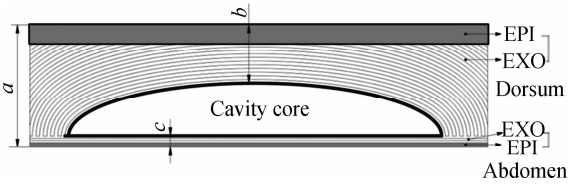
表 1　独角仙鞘翅微结构各参数值

Table 1　Parameters of the micro-structure of elytra in beetle *Allomyrina dichotoma*　μm

Items	Thickness			Diameter		Dorsum			Abdomen		
	Elytra	Dorsum	Abdomen	Concavity	Convexity	EPI	Fiber layer	Fibril	EPI	Fiber layer	Fiber bundle
Average	57.88	51.75	11.39	33.82	10.98	9.21	2.24	0.16	2.03	0.86	3.02
Deviation	13.94	5.40	1.90	2.88	1.85	0.58	0.40	0.03	0.14	0.14	0.41
Repeats	19	13	13	13	6	11	19	13	10	10	10

Note: EPI—Epicuticle.

为了定量分析鞘翅断面占空比，建立基于其断面微结构的鞘翅断面结构示意图(图 4)。图中用半个椭圆对鞘翅中空层的拱形空腔进行拟合，各结构的几何尺寸均来源于鞘翅的 SEM 图。单个鞘翅试样断面占空比定义为断面中所有拟合的半椭圆面积之和与鞘翅整个断面面积之比。通过对不同甲虫多个鞘翅试样断面的分析计算得到独角仙鞘翅断面占空比均值为(26.36±3.58)%（试样数量 $N=8$）。



Notes: Parameter *a* stands for the thickness of elytra; *b* is for the dorsum and *c* is for the abdomen; EPI stands for epicuticle and EXO is for exocuticle.

图 4　独角仙鞘翅断面结构示意图

Fig. 4　Schematic figure of cross-section structures of elytra in beetle *Allomyrina dichotoma*

前期工作对生活在水环境中的甲虫东方龙虱鞘翅的微结构及其力学性能进行了研究[17]，表 2 给出了生活在两种不同环境的甲虫独角仙和东方龙虱鞘翅结构参数的比较。可知生活在水环境的东方龙虱鞘翅厚度约为 220.78 μm，其鞘翅断面占空比为 22.14%，而在陆地环境的独角仙鞘翅厚度约为 57.88 μm，其鞘翅断面占空比为 26.36%；同时东方龙虱鞘翅中空层呈椭圆形空腔，厚度均匀，而独角仙鞘翅内部空腔呈拱形，且鞘翅断面厚度不均匀。

目前常见的中空轻质结构材料主要有蜂窝结构、泡沫结构和点阵结构。广泛应用的铝蜂窝夹芯板壳具有很好的力学性能，但其价格昂贵。甲虫鞘翅属于轻质点阵材料，是一种法向纤维束夹芯体，与传统材料的最大不同在于其独特多变的微结构和高孔隙率，具备许多优良的特性。鞘翅具有周期性的空腔拓扑结构，利用其空腔特性可以在其中填充吸能、隔热、吸声、吸波等材料，以满足多功能需求[20]。鞘翅独特的微结构可以为后续工作中设计一种新型轻质仿生结构提供良好的仿生学模型。

2.2　表面粗糙度

扫描电镜结果表明，独角仙鞘翅表面呈现非光滑表面织构，其表面布满规律性分布的凹坑，凹坑中具有凸苞微结构。实验测得鞘翅表面粗糙度 R_a 值为(0.66±0.12) μm。类似的非光滑表面微结构还出现在其他种类的甲虫身上，南非沙漠甲虫的前胸背板和鞘翅上规律性分布着许多微凸苞结构，直径约 0.5 mm，间隔为 0.1～1.5 mm，这种结构具有疏水性，有利于在沙漠中聚集水分，维持沙漠甲虫的生存[21]。佟金等对蜣螂的研究表明其前胸背板是非光滑表面，上面均布许多微小的凸苞结构，该结构具有自清洁效果和减黏降阻的作用，并测得其触水接触角为 97.2°，具有疏水性[22]。

表 2　独角仙和东方龙虱鞘翅的比较

Table 2　Comparison of elytra between *Allomyrina dichotoma* and *Cybister japonicus*

Beetles	Thickness of elytra		Surface texture	Shape of cavity	Duty ratio of cross-section/%	Density/(g·cm^{-3})
	Average/μm	Trait				
Cybister japonicus	220.78	Equality	Convexity	Ellipse	22.14	0.89
Allomyrina dichotoma	57.88	Uneven	Concavity	Arch	26.36	0.88

2.3 纳米力学性能测试及分析

由表 1 可知独角仙鞘翅是一种微纳米级生物复合材料，受光学显微镜放大倍数及其分辨力的限制，常规显微硬度测试方法难以向微纳米尺度延伸，无法采用工程材料力学性能测试方法进行测试。图 5(a)为独角仙鞘翅纳米力学测试得到的载荷-压痕深度变化曲线，主要包含加载、保压和卸载三个阶段，有效的实验结果应该是加载线和卸载线不交叉。图 5(b)和 5(c)分别为纳米压痕实验得到的鞘翅的硬度、弹性模量对压痕深度的变化曲线。由于最大压深为 500 nm，而鞘翅外表皮层厚度为 9.21 μm，因此本试验结果主要表征的是独角仙鞘翅外表皮的纳米力学性能。测试过程主要经历两个过程；(1) 由于实验环境和仪器本身而产生的热漂移过程($0<h<100$ nm)，该过程得到的实验数据不能真实地反映材料的纳米力学性能；(2) 稳定保压过程($h>100$ nm)。数据处理时取曲线稳定段(100～500 nm)的平均值作为该测试点的纳米力学参数值。表 3 列出了鞘翅不同区域试样纳米力学参数值，可知其头部区域参数值最小(A 区域)，分别为硬度 0.16 GPa，弹性模量 4.42 GPa，尾部区域参数值最大(E 区域)，分别为硬度 0.51 GPa，弹性模量 7.29 GPa，由头部区域至尾部区域有增大趋势，其力学性能呈现拓扑分布规律。原因可能是与其功能需求相适应：休息时，鞘翅靠近尾部区域要承受更多的外部压力，飞行时，鞘翅张开，其尾端要抵御更大的空气阻力，具体原因还有待于后续工作进一步的研究。结果处理时，取各试样的平均值来表征独角仙鞘翅外表皮纳米力学性能参数值，计算得到其纳米力学性能参数值分别为：硬度(0.28±0.13) GPa($N=6$，$n=23$，N 为试样数，n 为有效压痕点数)，模量(5.62±1.21) GPa，接触刚度(1.67±0.14)×10^4 N/m。与生活在水环境的甲虫东方龙虱鞘翅相比(表 3)，独角仙鞘翅各试样纳米力学性能参数值明显小很多；同时表 2 表明独角仙鞘翅

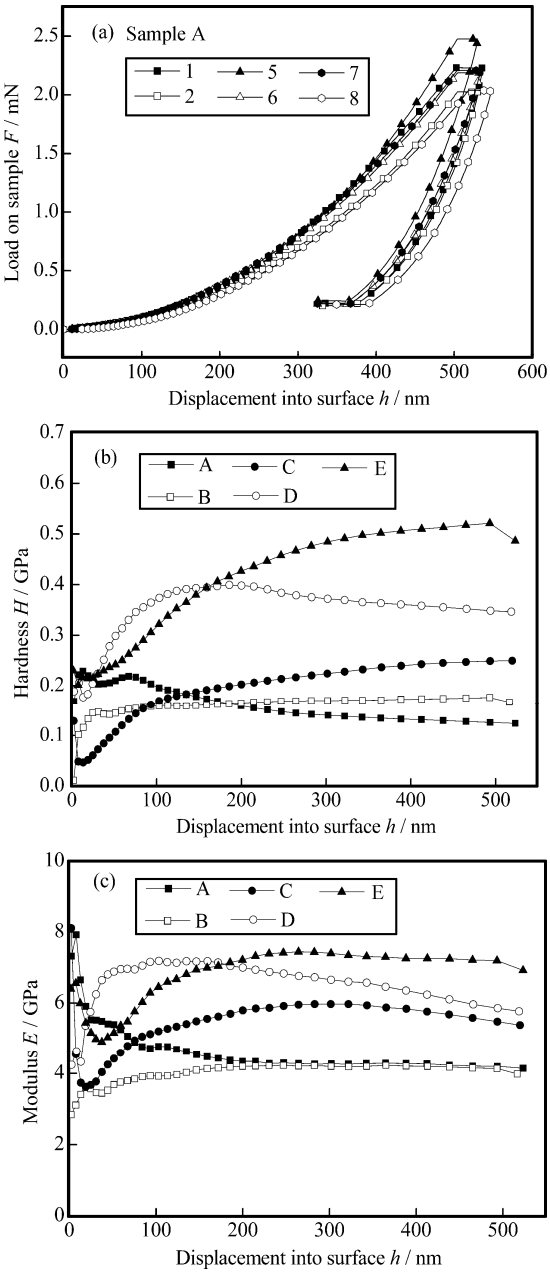


图 5 独角仙鞘翅试样纳米力学性能比较曲线图

Fig. 5 Comparisons of nano-mechanical properties of elytra in beetle *Allomyrina dichotoma* samples (Temperature is 27 ℃, humidity is 65% and Poisson's ratio is 0.35)

表 3 独角仙鞘翅纳米力学参数值与前期工作东方龙虱鞘翅的比较

Table 3 Comparison of nano-mechanical properties of elytra in beetle *Allomyrina dichotoma* with beetle *Cybister japonicus* studied in former work GPa

Items		A	B	C	D	E	Average
Allomyrina dichotoma	*H*	0.16±0.11	0.17±0.05	0.21±0.06	0.37±0.26	0.51±0.11	0.28±0.13
	E	4.42±2.18	4.13±0.70	5.71±1.13	6.56±2.09	7.29±0.83	5.62±1.21
Cybister japonicus[17]	*H*	0.39±0.09	0.49±0.10	0.48±0.10	0.54±0.11	0.31±0.07	0.44±0.10
	E	7.40±0.61	8.34±0.99	8.04±0.70	8.87±0.57	6.13±0.41	7.76±0.66

Notes: *H* stands for hardness and *E* is for modulus.

厚度均值不到东方龙虱鞘翅厚度的 1/4，而其断面占空比大于东方龙虱鞘翅；表 2 和表 3 的对比分析结果体现了甲虫鞘翅材料为适应不同的生活环境而采用了各自最优化的鞘翅结构。

3 结　论

（1）独角仙鞘翅是具有拱形空腔的中空轻质生物复合材料，断面占空比为(26.36±3.58)%。鞘翅由外表皮和内表皮构成，其中内表皮由 11～12 层纤维层铺设而成，其铺设方式采用的是一种 45°角正交叠加铺层，层与层之间通过许多微纤维丝编织在一起，形成层合板复合材料结构。

（2）鞘翅表面呈现非光滑表面织构，其表面规律分布着许多直径(33.82±2.88) μm 的凹坑结构。实验测得鞘翅表面粗糙值为(0.66±0.12) μm。

（3）鞘翅外表皮的硬度(0.28±0.13) GPa，弹性模量(5.62±1.21) GPa，接触刚度 (1.67±0.14)×10^4 N/m。其力学性能呈现拓扑分布规律，由头部至尾部区域有增大趋势。

参考文献：

[1] 孙正军，程　强，江泽慧. 分级竹丝复合材料的原理与性质[J]. 复合材料学报，2008，25(1)：84-87.
Sun Zhengjun，Cheng Qiang，Jiang Zehui. Processing and properties of graded bamboo filament composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(1)：84-87.

[2] 李恒德，冯庆玲，崔福斋，等. 贝壳珍珠层及仿生制备研究[J]. 清华大学学报：自然科学版，2001，41(4)：41-47.
Li Hengde，Feng Qingling，Cui Fuzai，et al. Biomimetic research based on the study of the nacre structure [J]. Journal of Tsinghua Univ：Sci & Tech，2001，41(4)：41-47.

[3] 王立铎，孙文珍，梁彤翔，等. 仿生材料的研究现状[J]. 材料工程，1996，17(2)：3-5.
Wang Liduo，Sun Wenzhen，Liang Tongxiang，et al. Progress in bionic materials [J]. Journal of Materials Engineering，1996，17(2)：3-5.

[4] 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]. J Exp Biol，2002，205(11)：2479-2488.

[5] Tong J，Wang H，Ma Y，et al. Two-body abrasive wear of the outside shell surfaces of mollusk Lamprotula fibrosa Heude，Rapana venosa Valenciennes and Dosinia anus Philippi [J]. Tribology Letters，2005，19(4)：331-338.

[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 nano indentation 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.

[7] 高　吭，李玉柱，佟　金，孙霁宇. 东方蝼蛄口器结构与表皮纳米力学性能研究[J]. 农业机械学报，2011，42(8)：224-227.
Gao Hang，Li Yuzhu，Tong Jin，Sun Jiyu. Microstructure and nanoindentation properties of mouthparts of oriental mole cricket [J]. 2011，42(8)：224-227.

[8] 杨志贤，戴振东. 甲虫生物材料的仿生研究进展[J]. 复合材料学报，2008，25(2)：1-9.
Yang Zhixian，Dai Zhendong. Progress in bionic research on biomaterials of beetles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：1-9.

[9] Chen J X，Ni Q Q，Xu Y，et al. Light weight composite structures in fore-wing of beetles[J]. Journal of Composite Structures，2007，79(3)：331-337.

[10] Chen J X，Ni Q Q，Yasuhisa E，et al. Distribution of trabeculae and elytral surface structures of the horned beetle (*Allomyrina dichotoma*) [J]. Entomologia Sinica，2002，9(1)：55-61.

[11] 陈锦祥，倪庆清. 甲虫前翅中的三维复合材料结构[J]. 复合材料学报，2003，20(6)：61-66.
Chen Jinxiang，Ni Qingqing. Three dimensional composite structures in the fore-wing of beetles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2003，20(6)：61-66.

[12] 陈锦祥，倪庆清，徐英莲. 甲虫前翅结构中的优化设计[J]. 复合材料学报，2004，21(5)：88-92.
Chen Jinxiang，Ni Qingqing，Xu Yinglian. Optimum design in the structures of beetle fore-wings [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(5)：88-92.

[13] 陈锦祥，倪庆清，李　庆，等. 蜂窝-柱子芯夹层轻量型仿生物复合材料结构[J]. 复合材料学报，2005，22(2)：103-108.
Chen Jinxiang，Ni Qingqing，Li Qing，et al. Biomimetic lightweight composite structure with honeycomb-trabecula [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(2)：103-108.

[14] 杨志贤，王卫英，虞庆庆，等. 四种甲虫鞘翅的力学参数测定及微结构观测[J]. 复合材料学报，2007，24(2)：92-98.
Yang Zhixian，Wang Weiying，Yu Qingqing，et al. Measurements on mechanical parameters and studies on microstructure of elytra in beetles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(2)：92-98.

[15] 杨志贤，戴振东，王卫英. 东方龙虱(雄性)抱握足形态学及吸附特性[J]. 复合材料学报，2009，26(3)：213-218.
Yang Zhixian，Dai Zhendong，Wang Weiying. Morphology and adhesive characteristics of *Cybister*(male) fore-foot's adhesive pads [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(3)：213-218.

[16] 窦君智，郭　策，戴振东. 东方龙虱鞘翅内表皮层及断面硬度和弹性模量[J]. 复合材料学报，2011，28(5)：181-185.
Dou Junzhi，Guo Ce，Dai Zhendong. Mechanical properties of the exocuticle and sections of *Cybister* elytra [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(5)：181-185.

[17] Yang Z X，Dai Z D，Guo C. Morphology and mechanical properties of *Cybister* elytra [J]. Chinese Science Bulletin，2010，55(8)：771-776.

[18] Chen Jinxiang，Ni Qingqing，Xu Yinglian，et al. Light weight composite structures in fore-wing of beetles [J]. Journal of Composite Structures，2007，79(3)：331-337.

[19] Chen P Y，Lin A Y M，Lin Y S，et al. Structure and mechanical properties of selected biological materials [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials，2008，1(3)：208-226.

[20] Fan H L，Fang D N. Enhancement of mechanical properties of hollow strut foams：Analysis [J]. Material Design，2009，30：1659-1666.

[21] Parker，A R，Lawrence C R. Water capture by a desert beetle [J]. Nature，2001，414：33-34.

[22] Tong J，Sun J Y，Chen D H，et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements [J]. Soil & Tillage Research，2005，80：1-12.