

文章编号: 1000-3851(2007)02-0092-07

# 四种甲虫鞘翅的力学参数测定及微结构观测

杨志贤, 王卫英, 虞庆庆, 戴振东\*

(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:** 研究了4种甲虫(白星花金龟、东方龙虱、独角仙、毛黄鳃金龟)鞘翅的材料力学参数及其微结构。鞘翅截面微观结构观察表明, 这4种甲虫鞘翅均由鞘翅背壁、中空夹芯层和鞘翅腹壁构成, 背、腹壁之间由桥墩状几丁质纤维空心柱体结构连接, 两鞘翅间以凹凸啮合结构联接。用纳米压痕仪测得这4种甲虫鞘翅背壁致密层的弹性模量均值分别为9.08、8.21、4.76、6.00 GPa, 硬度分别为0.44、0.48、0.18、0.18 GPa。用多功能材料性能实验机测定白星花金龟、东方龙虱、独角仙鞘翅之间的联接强度分别为46.43、7.38、11.34 mN/mm。该研究为轻质结构的设计提供了仿生学基础。

**关键词:** 鞘翅; 材料力学参数; 空心柱体; 凹凸啮合结构; 联接强度

中图分类号: TB332 文献标识码: A

Measurements on mechanical parameters and studies on microstructure of elytra in beetles

YANG Zhi xian , WANG Wei ying , YU Qingqing , DAI Zhendong \*

(Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract :** The mechanical parameters and microstructures of the elytra were studied for four kinds of beetles (Potosia (Liocola) brevitarsis lewis, Cybister, Alomyrina dichotoma, Holotrichia trichophora). The elytra's microstructures in cross-sections show that the elytra are composed of the compact dorse, the hollow section and the ventral face, the chitin fibre hollow-pole structure connects the compact dorse and the ventral face, and the elytra couple each other with the concave-convex structure. The Young's modulus and hardness of the elytra measured by the Nano Indenter SA2 (MTS) are 9.08, 8.21, 4.76, 6.00 GPa and 0.44, 0.48, 0.18, 0.18 GPa, respectively. Coupling forces between the elytra measured by a Multifunctional Test Machine are 46.43, 7.38, 11.34 mN/mm for Potosia (Liocola) brevitarsis lewis, Cybister and Alomyrina dichotoma. The research provides biomimetic information for light structure designs.

**Keywords :** elytra ; mechanical parameters ; the hollow-pole ; the concave-convex structure ; coupling intensity

鞘翅目昆虫(Coleoptera, 俗称甲虫)是昆虫纲同时也是动物界最大的一个目, 共约35万多种。鞘翅目昆虫种类多, 分布广, 适应性强, 这与它们具有鞘翅这一结构密切相关。鞘翅为该类昆虫的前翅, 它质地坚硬, 主要用于保护身体及飞行翅。在长期进化过程中, 为了适应复杂多变的环境, 鞘翅的形态和结构也有很大不同。国内外对于鞘翅的表面微结构和截面结构已有大量的描述<sup>[1-3]</sup>。程红等研究了臭蜣螂体壁的组织结构, 指出鞘翅的组织是由角质蛋白层和几丁质纤维层构成<sup>[4]</sup>。陈锦祥等研究了独角仙鞘翅的断面结构和表面微结构, 指出鞘

翅是一种以小柱为中空层的夹心层状三合板结构, 并且鞘翅表面上一个凹坑对应着中空层内的一个柱体, 这些柱体在鞘翅内部呈多边形排列, 与内部薄膜组成网状结构, 以加强鞘翅的强度和断裂韧性<sup>[5-7]</sup>。陈斌等研究了绿色金龟子鞘翅组织的增强纤维的铺层机理, 表明鞘翅这种结构具有很强的抗弯能力和断裂韧性<sup>[8]</sup>。国外Holleway对锹甲的鞘翅表面形貌做过详细的研究, 结果表明锹甲的鞘翅表面有很多小的凹坑, 在凹坑中部还长出一根细小的刚毛, 刚毛末端呈刷子状<sup>[9]</sup>。Gorb详细地研究了甲虫吸附在鞘翅表面的摩擦力影响方式和常见的

收稿日期: 2006-05-08; 收修改稿日期: 2006-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90205014); “863”计划2002AA423230); 博士点基金2004-0287020)

通讯作者: 戴振东, 教授, 博士生导师, 主要从事仿生结构与材料防护的研究 E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

几类不同的吸附机制<sup>[10]</sup>。Wootton 在研究甲虫鞘翅功能形态学方面有很大进展<sup>[11]</sup>。Frantsevich 对鞘翅的联接结构和鞘翅的张合机制从几何学角度做过初步的探讨<sup>[12]</sup>。但未见鞘翅表层纳米力学性能测试的报道, 也未见鞘翅间联接力测试的相关报道。

本文作者研究白星花金龟、东方龙虱、独角仙、毛黄鳃金龟4种甲虫的鞘翅断面微结构及其联接强度, 测定4种甲虫不同区域的力学性能参数, 探讨鞘翅的几何结构与其功能之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

实验用甲虫毛黄鳃金龟( *Holotrichia trichophora* ) (重  $1.08 \text{ g} \pm 0.04 \text{ g}$ , 鞘翅长  $12 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ ) 采自江苏盱眙县; 东方龙虱( *Cybister* ) (重  $1.43 \text{ g} \pm 0.07 \text{ g}$ , 鞘翅长  $22 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ ) 购自广东省广州市水产市场; 独角仙( *Allomyrina dichotoma* ) (重  $4.54 \text{ g} \pm 0.15 \text{ g}$ , 鞘翅长  $30 \text{ mm} \pm 0.7 \text{ mm}$ ) 采自江苏南京; 白星花金龟( *P. brevitaris lewis* ) (重  $1.23 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$ , 鞘翅长  $15 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$ ) 采自江苏睢宁县。数量6~10只不等。

### 1.2 实验方法及试样准备

**鞘翅结构:** 将鞘翅用蒸馏水冲洗, 室内风干; 然后放入10%的NaOH溶液中浸泡直到变软达到适合的切片硬度(具体时间视鞘翅的硬度决定); 将泡软的鞘翅放在蒸馏水中清洗3次, 包埋、切片(厚度  $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ); 最后进行光学显微镜及扫描电镜(QUANTA200 FEI)观察并照相。

**鞘翅力学参数测试:** 在鞘翅正面取不同的3个区域测试鞘翅的力学性能, 分别为靠近头部区域、中间区域和靠近尾部区域, 同时在每个区域取  $3 \times 3 = 9$  个点阵进行重复实验。试验用的纳米压痕仪(Nano Indenter SA2, MTS, USA)技术指标: 位移分辨率  $0.0002 \text{ nm}$ , 最大压深  $15 \mu\text{m}$ , 最大加载  $10 \text{ mN}$ , 载荷分辨率  $1 \text{ nN}$ 。

**鞘翅比重测试:** 为测定鞘翅的比重, 取15~18对新鲜的鞘翅, 用蒸馏水清洗, 室内风干1 d, 称重; 然后将鞘翅浸入装有水的试管, 用超声波去除残留在鞘翅表面的气泡, 读出放入鞘翅前后的容积差, 得到所测鞘翅的体积, 从而测出鞘翅的比重。测定对象主要是东方龙虱和金龟子, 实验重复次数  $n = 5$ 。

**鞘翅联接力测试:** 用多功能材料性能测试系统测量鞘翅联接力(见图1)。将鞘翅自然对接, 左端固定在试样台上, 右端固定在传感器上, 电机驱动传感器向右移动, 直到鞘翅自然联接打开。测得的最大载荷即为鞘翅的联接力(试样数  $N = 2$ , 实验重复次数  $n = 8 \sim 10$  )。

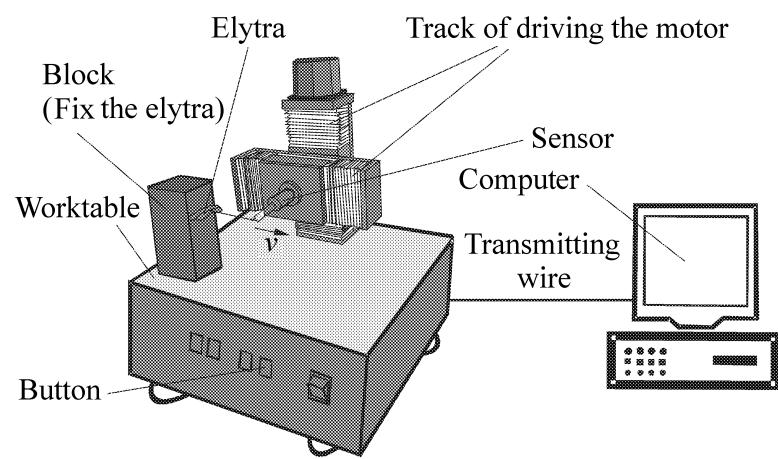


图1 鞘翅联接强度实验系统图

Fig.1 Test system for measuring the coupling force of elytra

## 2 结果及分析

### 2.1 鞘翅横断面结构

鞘翅截面由鞘翅背壁(Dorse)、鞘翅腹壁(Ventral face)、内部空腔(Hollow section)以及连接空腔的桥墩状纤维空心柱体(Hollow pillar)构成<sup>[4,5,8]</sup>(见图2)。鞘翅厚约  $50 \sim 400 \mu\text{m}$ , 随种类和鞘翅部位不同而变化(见图2、图3)。

鞘翅背壁由厚的角质蛋白层覆盖, 下面紧连接着数层纤维组织层, 每层厚约  $2 \mu\text{m}$ (图4(c)), 与鞘翅腹壁一起组成材料性能优异的生物复合材料<sup>[6-8]</sup>。

由鞘翅的横截面(图4(b))可见鞘翅是一种以纤维空心柱体支撑鞘翅的夹芯层结构, 鞘翅的背、腹壁之间由桥墩状纤维柱体连接起来, 甲虫的种类不同, 柱体的数量和形状也各有差异, 这样的结构既有效地减轻了整个鞘翅的比重, 又能抵抗外界的压迫。已有的研究表明鞘翅的这种结构具有很大的抗剥离能力和抗弯曲能力<sup>[6,8]</sup>。鞘翅腹壁较薄, 外层有厚约  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的角质蛋白层, 腹壁内层同背壁一样也连接有数层纤维层。腹壁外表面有大量刚毛, 有的种类已经进化成小刺突。

鞘翅夹芯层中分布着很多与鞘翅背壁、鞘翅腹壁相连接的桥墩状纤维空心柱体结构(图2、图4(b))。鞘翅中的桥墩状纤维组织柱体结构类似于加强筋的作用, 用来支撑和加固鞘翅; 同时用来

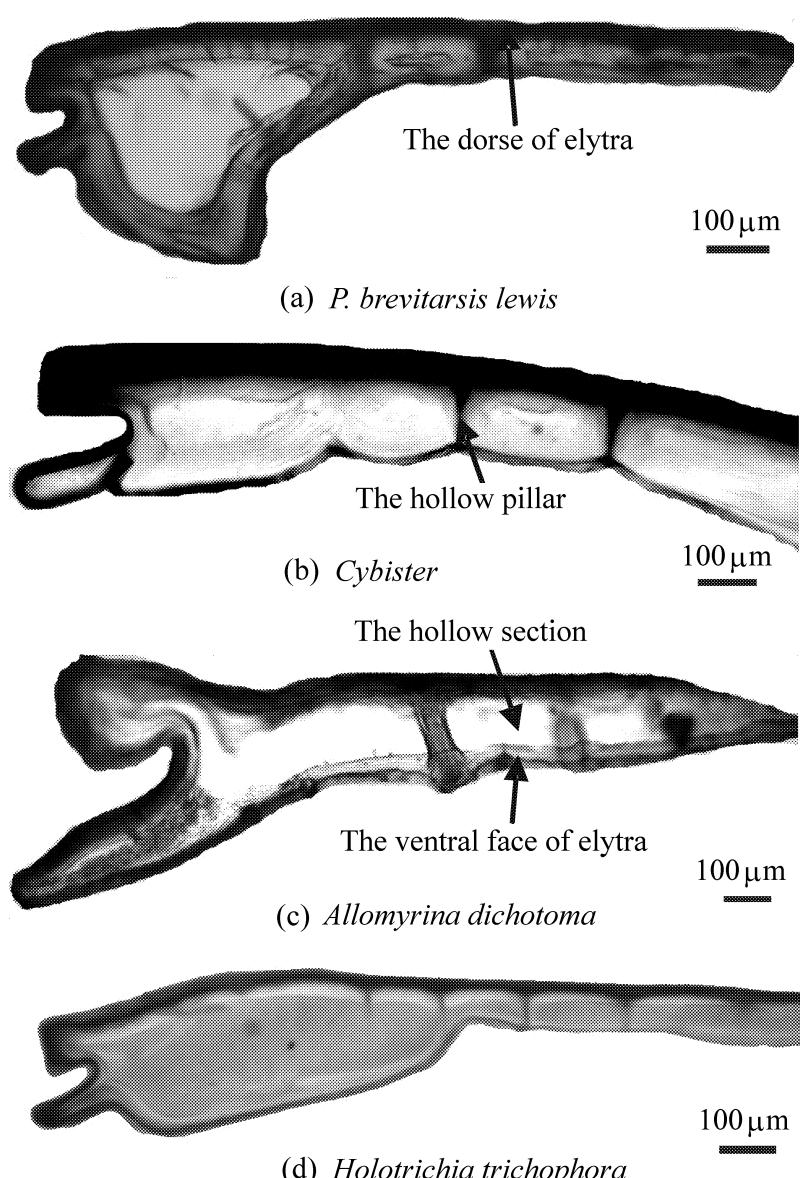


图2 4种甲虫鞘翅横断面比较图

Fig.2 Comparison of the cross sections in 4 beetles elytra

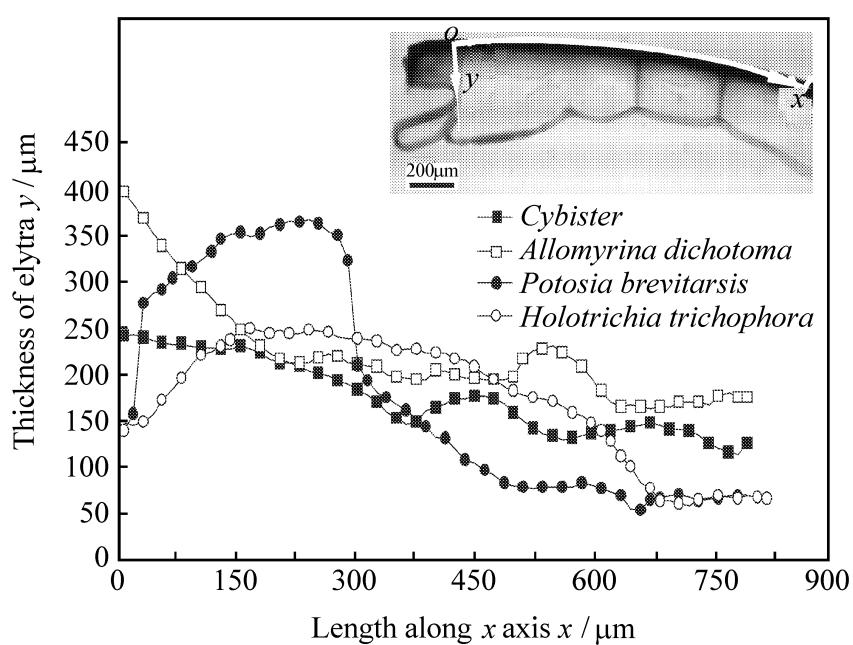


图3 甲虫鞘翅厚度比较

Fig.3 Comparison of the elytra s thickness

连接鞘翅背、腹壁的空心柱体结构本身都带通孔(图4(b))，这种特殊的结构除了能减轻本身体重外，也有利于鞘翅内部与外界的物质交换，这与陈锦祥<sup>[5, 6]</sup>和陈斌<sup>[8]</sup>的研究结论相吻合。

图2表明甲虫鞘翅有一个共同特点：联接区域鞘翅比较厚，其它部位相对较薄。按图3以鞘翅截

面的背壁为x坐标，背壁的法线中与联接结构中凹结构的内侧相切的那条为y坐标，以它们的交点为坐标原点建立坐标系统，测量鞘翅厚度加以比较。y轴表示沿鞘翅背壁法线方向的厚度。由图3发现非联接区域甲虫的体形越大，鞘翅也越厚；在联接区域，却不一定。白星花金龟鞘翅截面最大，平均达到350 μm，但是它的体形比东方龙虱和独角仙小得多，与毛黄鳃金龟体形大小相当。

## 2.2 鞘翅联接处微结构

由图2可知，4种不同甲虫鞘翅的联接区域均为凹凸结构，分别由上部凸起、下部凸起及中部内凹结构构成。但种类不同，凸起部分的长度及厚度不同。甲虫鞘翅联接区域凸起部分的长度由头部至尾部呈线性变化，靠近头部区域最短，靠近尾部区域最长。

鞘翅联接区域的组织结构与鞘翅背壁结构一样(图4(b))。不同种类或者同一种类的不同甲虫之间的联接处凸起结构的形状也存在差异。

图5是东方龙虱鞘翅联接处微结构。由图5可知东方龙虱联接处的中部凹结构是由一条条的凹凸纹路组成，共有6~8条，每条凸起纹路的宽度为8~10 μm，在凸起的周围长有许多小刺突，长约2~4 μm。东方龙虱鞘翅的联接主要由两步完成：先是通过这些联接处凹凸结构相互啮合完成合翅过程；接着在内凹中的凹凸纹路进一步相互啮合，同时辅以纹路周围的小刺突相互交织而达到最终的紧密联接。由联接强度的测试发现鞘翅的这种联接方式高效且牢靠。

## 2.3 鞘翅力学性能分析

鞘翅很薄，一般在50~230 μm之间，而且是层状的几丁质纤维组织复合材料，在鞘翅横截面垂直方向上各层的尺寸是微米乃至纳米量级(图4(c))，需在纳米尺度下对其力学性能进行测试，所以采用纳米压痕实验法测量。纳米压痕仪精密到在纳米级上对材料的力学参数进行计算，精度高<sup>[13]</sup>。实验得出4种甲虫的硬度及弹性模量结果比较见图6和图7。在压深达到100 nm以后鞘翅的力学性能由于鞘翅的表面效应趋于稳定。除白星花金龟外，其它3种甲虫都是由头部区域至尾部区域，硬度和弹性模量逐渐增大，说明鞘翅是一种各向异性的特殊复合材料。但是整体的结果表明在不同部位的硬度和弹性模量相差不大。计算得到它们的平均硬度和平均弹性模量比较见表1。

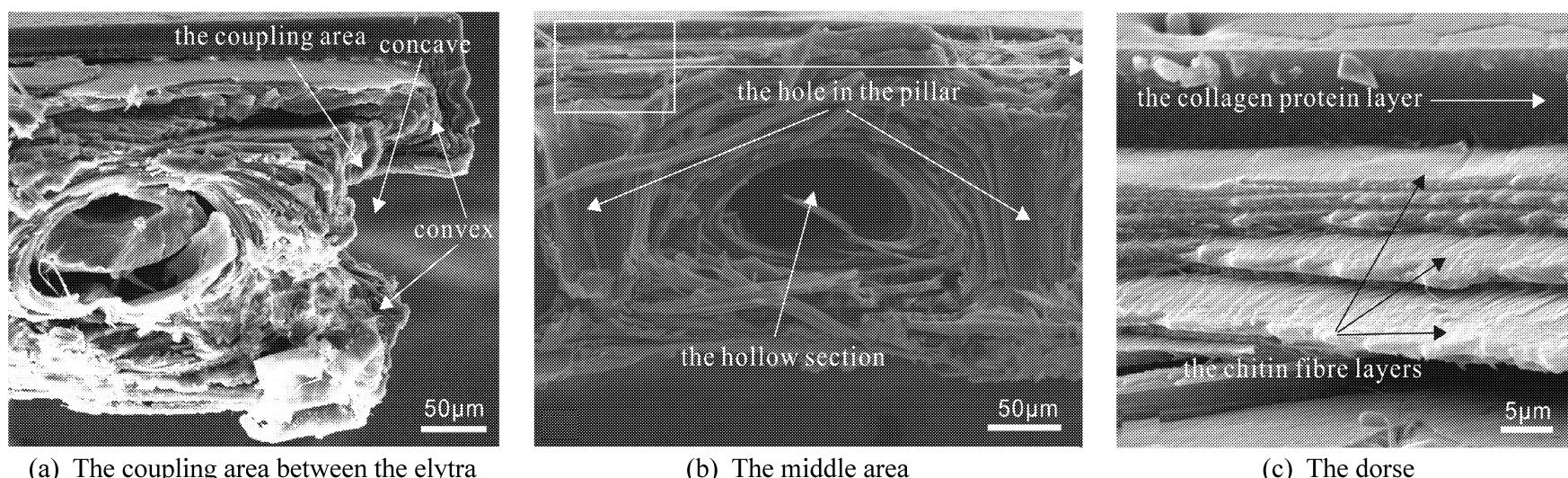


图4 东方龙虱鞘翅横断面SEM图比较

Fig.4 Gross sections of the cybister s elytra (SEM)

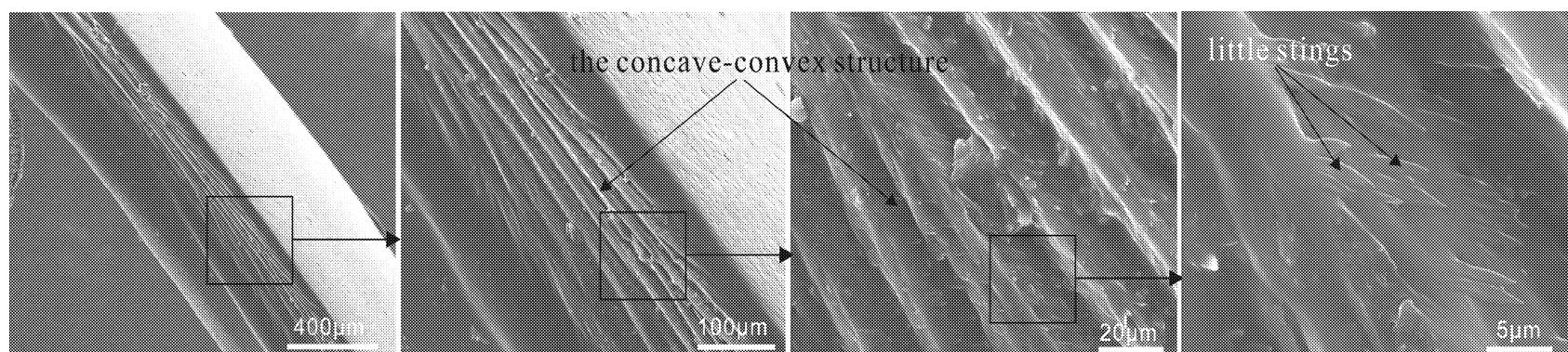


图5 东方龙虱鞘翅联接处微结构( SEM)

Fig.5 The microstructures of the coupling area of the cybister s elytra (SEM)

表1 4种甲虫鞘翅的硬度和弹性模量数据对照表

Table 1 Comparison of the data for hardness and modulus

| Beetles        | Hardness/<br>GPa | Modulus/<br>GPa | Samples | Repeats |
|----------------|------------------|-----------------|---------|---------|
| P. brevifarsis | $0.44 \pm 0.10$  | $9.08 \pm 0.92$ | 2       | 34      |
| Cybister       | $0.48 \pm 0.10$  | $8.21 \pm 0.70$ | 3       | 52      |
| A. dichotoma   | $0.18 \pm 0.09$  | $4.76 \pm 0.54$ | 3       | 55      |
| H. trichophora | $0.18 \pm 0.09$  | $6.00 \pm 0.60$ | 2       | 32      |

## 2.4 鞘翅比重分析

经过10次的重复实验, 得到东方龙虱鞘翅密度 $0.89 \text{ g/cm}^3 \pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ , 龟子鞘翅的密度为 $0.80 \text{ g/cm}^3 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2.5 鞘翅联接强度分析

实验测得4种甲虫鞘翅的联接力分别为: 东方龙虱 $160 \text{ mN} \pm 20 \text{ mN}$ , 是本身体重的11倍; 白星花金龟 $660 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$ , 是本身体重的54倍; 独角仙 $400 \text{ mN} \pm 20 \text{ mN}$ , 是本身体重的7.5倍。由于试验甲虫存在个体差异, 测出的联接力不具有可比性, 因此计算各个甲虫鞘翅单位长度上所产生的联接力加以比较。由于毛黄鳃金龟鞘翅的联接力太

小, 实验没能测到其联接力。其它3种甲虫鞘翅的联接强度对比结果见表2。

表2 3种甲虫鞘翅联接强度数据表

Table 2 The data of the coupling intensity of the elytra

| Beetles        | Coupling intensity/<br>( mN·mm <sup>-1</sup> ) | Samples | Repeats |
|----------------|--|---------|---------|
| P. brevifarsis | $46.43 \pm 12$                                 | 2       | 8       |
| Cybister       | $7.28 \pm 4$                                   | 3       | 21      |
| A. dichotoma   | $11.34 \pm 5$                                  | 2       | 14      |

## 3 讨论

鞘翅在鞘翅目昆虫的生活中发挥着重要作用, 如防止体内水分蒸发, 抗击外部压力, 抵抗外界物理或化学等不良因素的变化, 保护身体不受伤害, 维护飞行中的平衡等。鞘翅这种特殊的结构除了减轻鞘翅的重量、减小鞘翅的比重外, 还具有高的比强度、比刚度和断裂韧性及抗弯曲、抗扭曲能力<sup>[5-8]</sup>。

利用纳米压痕仪, 对不同种类的鞘翅进行材料力学性能测试, 得到白星花金龟的平均硬度为

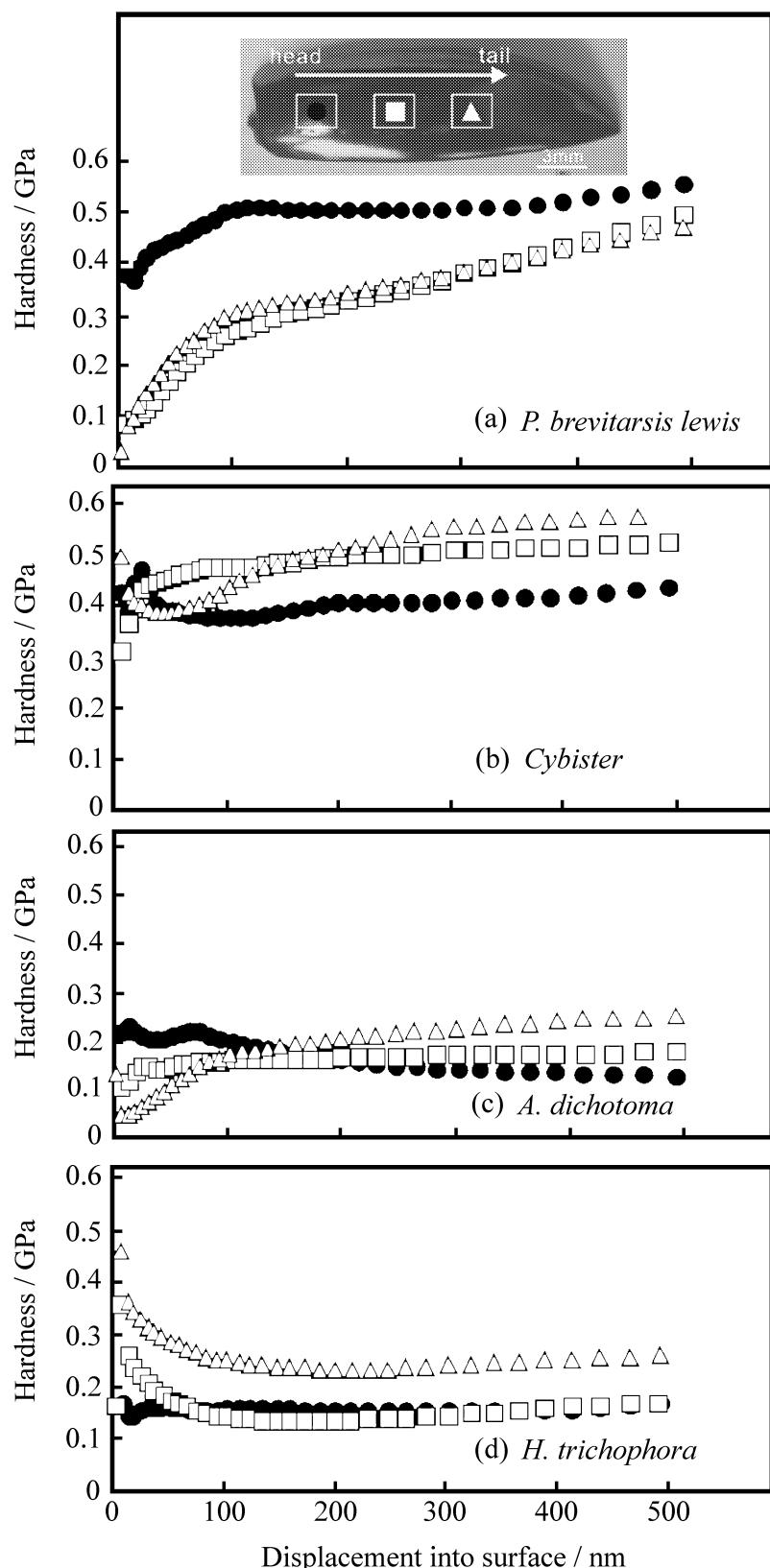


图6 甲虫鞘翅不同部位硬度比较

Fig. 6 Comparison of the elytra's different areas' hardness

Sample : N = 2 ; Repeats : n = 3 × 3

0.44 GPa, 平均弹性模量为 9.08 GPa; 东方龙虱鞘翅的平均硬度为 0.48 GPa, 平均弹性模量为 8.21 GPa; 独角仙的平均硬度为 0.18 GPa, 平均弹性模量为 4.76 GPa; 金龟子鞘翅的平均硬度为 0.18 GPa, 平均弹性模量为 6.08 GPa。如表1。

连接鞘翅背、腹壁的桥墩状纤维组织空心柱体结构(Hollow pillar)(图4(a)、图4(b))可以支撑和加固鞘翅, 保证甲虫在飞行过程中灵活、轻便, 不因鞘翅本身而阻碍运动。几丁质纤维的韧性大、抗拉能力强<sup>[14]</sup>, 几丁质纤维的这种特性也使得鞘翅的韧性高。这可为仿生材料领域设计轻质材料提供

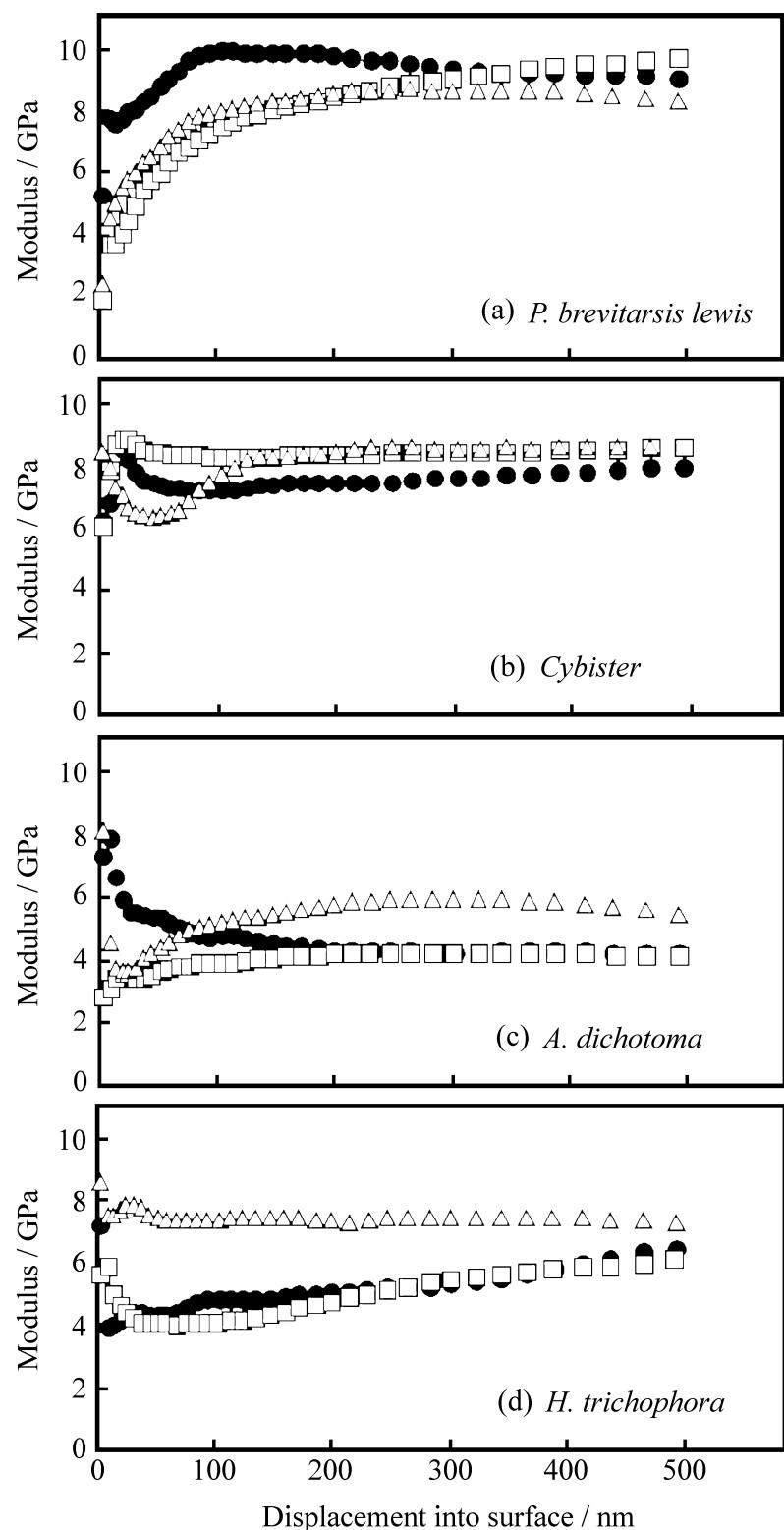


图7 甲虫鞘翅不同部位弹性模量比较

Fig. 7 Comparison of the elytra's different areas' modulus

Samples : N = 2 ; Repeats : n = 3 × 3

### 参考和启示。

鞘翅在经过几十万年的发展变化, 进化到采用现在的这种凹凸啮合结构来适应自然界复杂的环境变化, 说明其联接快速、高效的优越性。通过高速摄像机拍摄鞘翅张翅的录像, 发现鞘翅的张翅和合翅过程都仅仅是在几十毫秒时间内完成, 可见效率之高<sup>[12]</sup>。目前国内尚无该方面的研究, 国外对于鞘翅的啮合方式的研究有不同程度的进展。Breed 和 Ball (1909) 对鞘翅的啮合结构有相当的描述<sup>[15]</sup>。Fiori(1975) 的研究表明鞘翅的左右翅均为对称式的凹凸结构(图8), 在进行联接的时候, 是左边鞘翅的凸起伸入右边鞘翅的凹陷处进行啮合, 还是反过来右边鞘翅的凸起伸入左边鞘翅的凹陷处进行啮

合完全是一种随机的行为<sup>[16]</sup>。本文中的结果进一步证实了这一结论。甲虫鞘翅经过上万年的进化形成的这种结构, 既保证了鞘翅联接的紧密, 不受外界干扰, 又保证鞘翅在张开时不需要耗费太大的能量。可以说甲虫在飞行的过程中是做到能量利用最优化的一个经典实例, 为仿生出一种轻质、高效的联接机构提供了很好的参考。

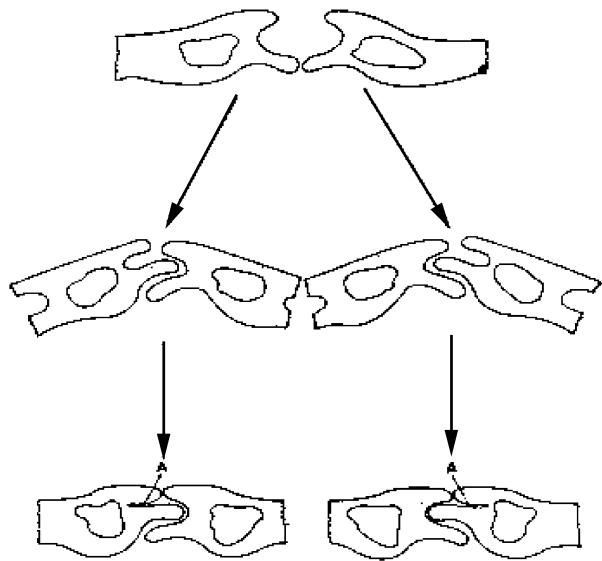


图8 鞘翅的联接过程<sup>[16]</sup>

Fig.8 The meshed way of both elytra<sup>[16]</sup>

由表2可以看出, 鞘翅的联接力都远大于甲虫自身的重量, 其中以白星花金龟的联接强度最大, 它的联接方式更有参考价值。鞘翅产生这么高的联接强度主要与鞘翅具有这种特殊的拓扑几何结构有关。如此高的联接强度, 足以保证鞘翅联接的紧密性, 保护被鞘翅覆盖着的身体不受外界压迫和不受外界的污染。至于不同种类之间联接强度差别很大的原因主要是由各自的生活习性及环境的差异性决定。独角仙生活在橡树上, 以腐烂的枝干为食, 不善飞行, 鞘翅基本保持闭合状态, 所以联接强度也相对较大; 白星花金龟善飞行, 但它在飞行的时候鞘翅并不张开, 而是稍微向上提升一定角度, 保证里面的飞行翅在飞行过程中不受阻碍, 所以它的联接强度特别大; 东方龙虱经常在水中和地面上生活, 为保证飞行的灵活性, 它的联接强度相对小得多。

## 4 结 论

(1) 甲虫鞘翅联接处的结构和断面结构一样由3层构成: 背壁层、腹壁层和中空夹芯层。背壁层、腹壁层之间由桥墩状纤维组织空心柱体结构连接起来提高鞘翅的力学性能。

(2) 甲虫鞘翅的比重为0.80~0.89 g/cm<sup>3</sup>; 硬

度为0.15~0.50 GPa; 弹性模量为4.5~9.0 GPa。

(3) 鞘翅联接采用凹凸啮合结构, 轻质、高效。它们的个体虽小, 但鞘翅啮合在一起的时候却能抵抗相当于它们自身体重十几倍的外界拉力, 联接强度特别高。

通过对4种不同甲虫鞘翅断面结构和鞘翅联接机理的剖析及对相关力学参数的测定, 表明甲虫鞘翅是一种轻质、高比强度生物复合材料, 鞘翅张合高效, 为制造轻质型材料提供了结构参考, 同时为航空航天制造轻质、高比强度且联接高效的机构提供了一定的仿生依据。

致谢: 感谢孙久荣教授和周飞教授在完成本文工作中给予的指导和帮助!

## 参 考 文 献:

- [1] 北京农业大学《昆虫学通论》编写组. 昆虫学通论(上) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1980: 64~76.  
The edit group of Beijing Agriculture University. Summary of entomology (A) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1980: 64~76.
- [2] 谭娟杰, 虞佩玉, 李鸿兴, 等. 中国经济昆虫志, 鞘翅目, 叶甲总科(I) [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 10~11..  
Tan Juanjie, Yu Peiyu, Li Hongxing, et al. Insect records of Chinese economy ( Coleoptera, Flea beetle (I)) [M]. Beijing: Science Press, 1980: 10~11.
- [3] 张迎春, 张莹, 郑哲民. 4种昆虫鞘翅表面超微结构的比较 [J]. 西北大学学报, 2001, 31(6): 522~524.  
Zhang Yingchun, Zhang Ying, Zheng Zhenmin. Compare of the ultrastructures in 4 beetles elytra [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2001, 31(6): 522~524.
- [4] 程红, 陈茂生, 孙久荣. 臭蜣螂体壁的组织结构 [J]. 昆虫学报, 2003, 46(4): 429~435.  
Cheng Hong, Chen Maosheng, Sun Jirong. Histological structures of the dung beetle [J]. Acta Entomologica, 2003, 46(4): 429~435.
- [5] 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.
- [6] 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 light weight composite structure with honeycomb-trabecula [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(2): 103~108.
- [7] Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Yasuhisa Endo, et al. Distribution of trabeculae and elytral surface structures of the horned

- beetle (*Allomyrina dichotoma*) [J]. *Entomologia Sinica*, 2002, 9(1): 55–61.
- [8] 陈斌, 彭向和, 范镜泓. 金龟子外甲壳的纤维增强特征和树枝状分叉纤维结构 [J]. 材料研究学报, 2003, 17(6): 630–636.  
Chen Bin, Peng Xianghe, Fan Jinghong. Fiber-reinforce characteristics of chafer cuticle and research on structure of branched fiber [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2003, 17(6): 630–636.
- [9] Holleyway B A. Elytra surface structures as indicators of relationships in stag beetles, with reference to the New Zealand species (Coleoptera, Lucanidae) [J]. *New Zealand Journal of Zoology*, 1997, 24(1): 51–63.
- [10] Horb S N, Rolf G B, Kastner V, et al. Structural design and biomechanics of friction-based releasable attachment devices in insects [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(6): 1127–1139.
- [11] Mootton R J. Functional morphology of insect wings [J]. *Annual Review of Entomology*, 1992, 37(1): 113–140.
- [12] Rantsevich L, Dai Zhengdong, Wang Weiyang, et al. Geometry of elytra opening and closing in some beetles (Coleoptera, Polyphaga) [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(16): 3145–3158.
- [13] 虞庆庆, 王卫英, 戴振东, 等. 东方龙虱鞘翅表面形貌及力学性能研究 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 365–369.  
Yu Qingqing, Wang Weiyang, Dai Zhendong, et al. Studies on surface textures and mechanical properties of elytra in Cybister [J]. *Progress of Natural Science*, 2006, 16(3): 365–369.
- [14] 上海第一医学院主编. 组织胚胎学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1979: 39–47.  
Shanghai first medical institute. *Organise embryology* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1979: 39–47.
- [15] Reed R S, Ball E F. The interlocking mechanisms which are found in connection with the elytra of Coleoptera [J]. *Biol Bull*, 1909, 6(1): 289–303.
- [16] Iori G. La ‘sutura’ elitrale dei coleotteri [J]. In *Atti del Congresso Nazionale Italiano di Entomologia*, 1975, 10: 91–111.