

东方龙虱鞘翅: 形态学及力学性能研究

杨志贤, 戴振东*, 郭策

南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016

* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2008-11-15 收稿, 2009-03-27 接受

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50635030)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 50675160)和航空科学基金(批准号: 2007ZA52008)资助项目

摘要 研究了东方龙虱鞘翅的拓扑结构及其鞘翅生物材料的力学性能。SEM 观测表明鞘翅横截面和纵向截面结构相同, 是一种具“桥墩”状连接的空腔轻质结构, 由致密的黑色外表皮层和其下数十层几丁质纤维层平行、螺旋交织构成的内表皮层组成; 纳米压痕仪测得新鲜鞘翅外侧区域的硬度和弹性模量分别为 0.31 和 6.13 GPa; 拉伸实验得到新鲜鞘翅横向和纵向的强度极限分别为 169.2 和 194.5 MPa; 干燥鞘翅对应的强度极限为 85.38 和 90.91 MPa, 新鲜鞘翅的强度是干燥鞘翅值的 2 倍; 结果表明甲虫鞘翅是一种力学性能呈现拓扑分布规律的轻质生物复合材料, 该研究为航空航天材料的轻质结构的设计提供了生物学的参考。

关键词
鞘翅
形态结构
力学性能
轻质结构
拉伸实验

近年来高新技术产业的飞速发展, 对材料的轻重比、刚重比、耐损伤等性能提出了更高的要求; 轻质高强度一直是航空航天材料和结构研制追求的目标。统计表明, 对商用飞机、战斗机和卫星、空间站等飞行器, 每减少 1 磅的结构重量能带来的经济效益分别约为 300, 3000 和 30000 美元。汽车自重减少 10% 可节约燃料 5%, 轻量化也是汽车节约能源重要的方法之一^[1]。采用轻合金材料(如钛、铝、镁铝合金等)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, 但轻质结构的拓扑几何的优化还远没有完善。地球上几乎所有的生物材料都是复合材料, 其高强重比和耐损伤性能早已为人们所称道, 生物材料的优良特性为先进复合材料的设计展示了诱人的前景, 为轻质、高强、耐损伤结构材料的设计提供了设计灵感。

在大自然中, 各种生物为了适应自身生存的环境, 在经历了长期的进化后, 形成了各具特色的生物结构和优良的性能(如高的强度和韧性、各向异性、

自愈合功能和良好的功能适应性), 现存的生物材料结构大都成功地达到了最佳优化^[2]。甲虫鞘翅主要由几丁质纤维、胶原蛋白及多糖等成分构成, 它质地坚硬, 结构独特, 主要用于保护身体及飞行翅和维持飞行中的平衡等。因具有高的强度和韧性、各向异性和良好的机械力学性能等特点而成为航空航天领域良好的仿生对象, 同时可为深空探测方面轻质、可靠、高效、节能且易于控制的空间飞行器零部件的几何设计和材料优化提供仿生学上的灵感^[3]。

目前国内外对于甲虫鞘翅的研究主要集中在鞘翅的表面形貌和结构^[4~9]、鞘翅结构的染色机制^[10]、鞘翅联接结构^[11,12]和鞘翅联接机制^[13,14]等方面, 很少对其力学性能尤其是拉伸性能的研究。东方龙虱属甲虫类鞘翅目, 主要生活在水中, 为适应海、陆、空全方位空间环境需求而进化的生物材料必然具有多功能性。本文以东方龙虱为研究对象, 对其形态结构进行了观测, 同时测定了鞘翅不同部位的力学性能参数及其强度, 分析了其分布规律性。

引用格式: 杨志贤, 戴振东, 郭策. 东方龙虱鞘翅: 形态学及力学性能研究. 科学通报, 2009, 54: 1767~1772

Yang Z X, Dai Z D, Guo C. Morphology and mechanical properties of cybister elytra. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0363-4

1 材料与方法

1.1 材料

实验前先准备新鲜东方龙虱(cybister)10只和冰箱冷藏东方龙虱5只(购自广州水产市场), 龙虱体长2.4~2.8 cm, 重1.4~1.6 g, 鞘翅长20~26 mm.

1.2 坐标系的建立

为了研究方便, 如图1(a)所示以甲虫小盾板的位置为坐标系原点, 鞘翅的横向为 X 轴(外侧为正), 鞘翅的纵向为 Y 轴(朝尾部为正)建立坐标系. 图中 X_1 , X_2 , X_3 坐标和 Y_1 , Y_2 , Y_3 坐标是SEM实验待观测截面位置.

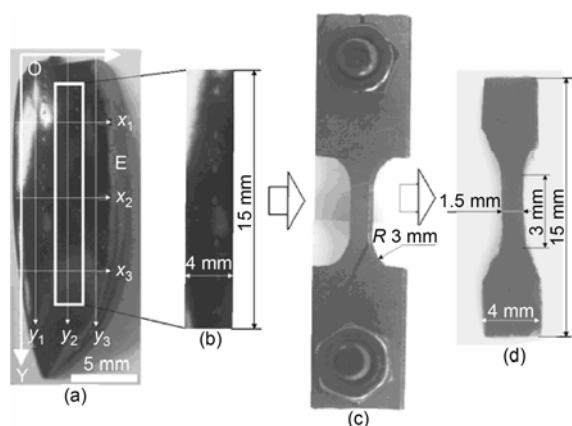


图1 试样制备过程

(a) 坐标系的建立及 Y 方向取样位置; (b) Y 方向初样;
(c) 夹具(夹紧试样); (d) Y 方向待测试样

1.3 SEM观测

实验前取4片新鲜东方龙虱鞘翅在70%的酒精溶液中脱水半小时, 自然晾干, 再经过液氮冷冻1 h后取出, 用镊子分别在不同试样的 X_1 , X_2 , X_3 和 Y_1 , Y_2 , Y_3 截面依序掰断, 得到鞘翅在 X 截面和 Y 截面的6个试样, 喷金处理后进行扫描电子显微镜(QUANTA200, FEI, Hong Kong, 20 kV)实验.

1.4 纳米压痕测试

实验前取6片新鲜鞘翅, 超声波清洗5 min后晾干, 然后从鞘翅的外侧区域E(图1(a))提取待测试样6个(大小2 mm×2 mm), 每个试样重复实验数6~10次. 实验方法和数据处理方法见文献[15].

1.5 鞘翅拉伸实验

试样的制备: 实验前取10片新鲜鞘翅和10片干

燥鞘翅(处理同1.4节), 分别从鞘翅的 X 方向和 Y 方向提取出待测初样(图1(a), (b)), 放入夹具中固定(图1(c)), 用手术刀沿着夹具轮廓切去多余部分, 得到待测试样(图1(d)). 本实验中 X 方向试样和 Y 方向试样的尺寸和制备过程均相同, 图1为 Y 方向试样的制备过程, 合格的试样应保证切割面的平整以消除局部应力. 实验前共制备合格试样数: 新鲜鞘翅 X 方向7个, Y 方向8个, 干燥鞘翅 X 方向7个, Y 方向7个.

拉伸实验: 实验在多功能材料黏附和摩擦性能试验机上进行[16]. 实验前将试样的一端固定在工作台上, 另一端固定在传感器上并保持试样竖直状态, 驱动电机向上运动拉伸试样直至拉断, 通过数据采集软件采集试样从开始变形至屈服断裂过程所受的拉力值. 实验过程须保证试样断裂在中间区段(图1(d)中1.5 mm宽度区段), 若在试样被夹具夹持部位断裂, 则该实验结果无效. 电机速率: 0.05 mm/s, 系统应变速率: $1.67 \times 10^{-2}/s$, 数据采集频率: 50 Hz; 传感器最大载荷: 80 N, 分辨率: 0.08 N.

2 实验结果及分析

2.1 鞘翅形态结构

经过长期的进化后, 东方龙虱鞘翅形成一种具“桥墩”状连接的空腔轻质结构, 比较鞘翅 X_1 , X_2 , X_3 截面(图2(a)) and Y_1 , Y_2 , Y_3 截面(图2(b)) SEM图可以看出鞘翅在横向截面和纵向截面形态结构相同, 均是由致密的黑色外表皮层(EPI)和其下数十层几丁质纤维层呈平行或螺旋交织构成的内表皮层(EXO)组成; 鞘翅厚度(220.78 ± 37.67) μm ($N=7$, $n=21$, N 为试样数, n 为总测量次数), 致密的黑色外表皮层厚度(11.84 ± 1.99) μm ($N=7$, $n=20$), 内表皮层中单层纤维层厚度(5.04 ± 1.68) μm ($N=7$, $n=21$); 鞘翅截面有很多近似圆型空腔(CAV), 这些空腔是由数层平行交织的纤维层环绕而成, X 方向空腔直径(81.57 ± 12.83) μm ($N=3$, $n=15$), 数目25~35个, Y 方向空腔直径(100.83 ± 16.60) μm ($N=4$, $n=22$), 数目70~80个, “空腔的桥墩”状纤维束形成一种空心柱体结构直接连接鞘翅的上表皮层和下表皮层, 其纤维与上、下表皮层的纤维呈螺旋及正负交替方式编织. 线性回归得到鞘翅的占空比(空腔面积除以鞘翅截面面积)约为22%; 前文工作[15]测得鞘翅的密度为0.89 g/cm³, 结果表明鞘翅是一种轻质型生物复合材料.

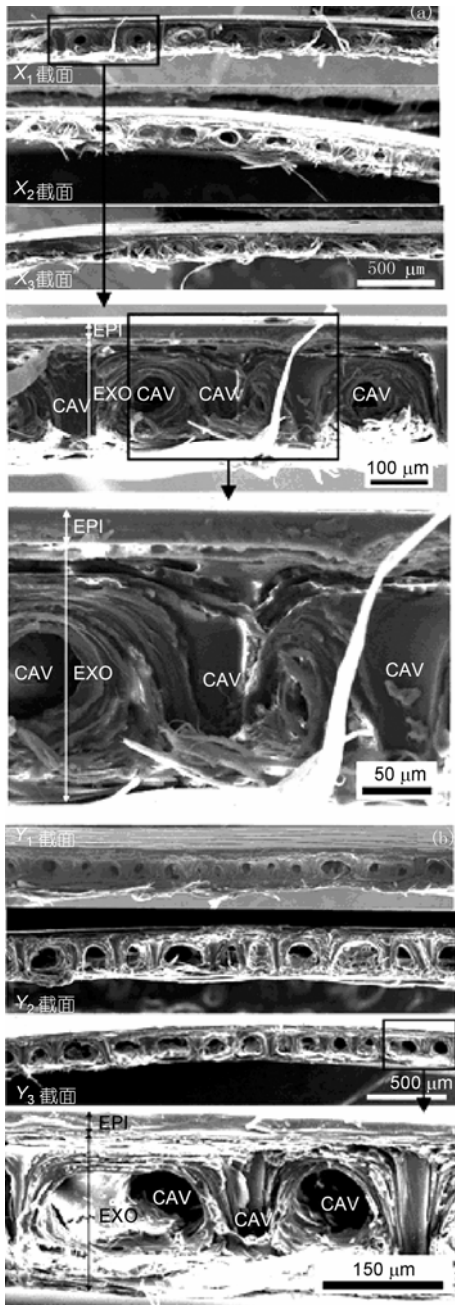


图2 鞘翅X方向及Y方向截面形态结构

(a) X方向截面 SEM图; (b) Y方向截面 SEM图。EPI(epicuticle): 致密的黑色外表皮层; EXO(exocuticle): 纤维层编织而成的内表皮层; CAV(cavity): 内部空腔

2.2 鞘翅纳米力学性能

东方龙虱鞘翅很薄, 大约 200 μm , 最外层是厚约 10 μm 的黑色致密外表皮层, 是鞘翅的主要承力层, 其下是内表皮层, 质地相对疏松, 用来吸收能量达到减振的目的。实验在纳米压痕仪上进行, 压深为 500 nm,

远小于外表皮层的厚度(10 μm), 故本实验得到的结果为鞘翅外表皮层的力学性能, 实验结果取所有有效数据点的平均值。实验得到鞘翅外侧区域(E区域)的硬度为 (0.31 ± 0.07) GPa ($N=6, n=30, N$ 为试样数, n 为所有有效压痕点数), 弹性模量为 (6.13 ± 0.41) GPa ($N=6, n=30$), 与已有工作(表 1)^[17]相比较, 鞘翅外侧区域(E试样)的力学参数值最小, 可见鞘翅材料的力学性能呈现拓扑分布规律。(A, B, C, D区域为鞘翅中部区域头部至尾部的不同区域, 具体位置见文献[17])。

表1 鞘翅不同区域的硬度和模量值比较^[17]

样品	A ($n=6$)	B ($n=7$)	C ($n=5$)	D ($n=6$)
硬度/GPa	0.390 ± 0.094	0.487 ± 0.097	0.478 ± 0.102	0.537 ± 0.104
模量/GPa	7.40 ± 0.61	8.34 ± 0.99	8.04 ± 0.70	8.87 ± 0.57

2.3 鞘翅拉伸实验

图 3(a)是鞘翅在 X 方向的应力应变曲线图, 新鲜试样 7 个, 有效实验 4 个, 干燥试样 7 个, 有效实验 6 个。由图可以看出鞘翅的变形主要以弹性变形为主; 新鲜试样断裂时的应变为 $12.22\% \pm 0.95\%$ ($N=4, N$ 为试样数), 干燥试样断裂时的应变为 $12.75\% \pm 2.53\%$ ($N=6$), 新鲜试样的强度极限为 (169.2 ± 22.5) MPa ($N=4$), 而干燥试样的强度极限为 (85.4 ± 13.7) MPa ($N=6$), 发生相同应变时, 新鲜试样所能承受的外部应力明显高于干燥试样。对应变曲线上 2%后的数据进行线性拟合后求直线的斜率可近似得到试样的弹性模量值, 经计算新鲜试样在 X 方向的弹性模量为 (1192 ± 129) MPa ($N=4$), 干燥试样在 X 方向的弹性模量为 (564 ± 79) MPa ($N=6$)。

图 3(b)是鞘翅在 Y 方向试样的应力应变曲线图, 新鲜试样 8 个, 有效实验 5 个, 干燥试样 7 个, 有效实验 6 个。由图可以看出 Y 方向试样的曲线变化与 X 方向试样基本一致, 也是以弹性变形为主, 经过屈服变形后断裂, 且发生相同应变时, 新鲜试样所能承受的应力明显要大于干燥试样。Y 方向新鲜试样断裂时的应变为 $12.11\% \pm 0.95\%$ ($N=5$), 干燥试样断裂时的应变为 $12.74\% \pm 0.53\%$ ($N=6$), 新鲜试样的强度极限为 (194.5 ± 23.4) MPa ($N=5$), 而干燥试样的强度极限为 (90.9 ± 18.7) MPa ($N=6$); 同样, 按上述方法计算得到 Y 方向试样的弹性模量值为: 新鲜试样 (1412 ± 159) MPa ($N=5$), 干燥试样 (593 ± 160) MPa ($N=6$)。

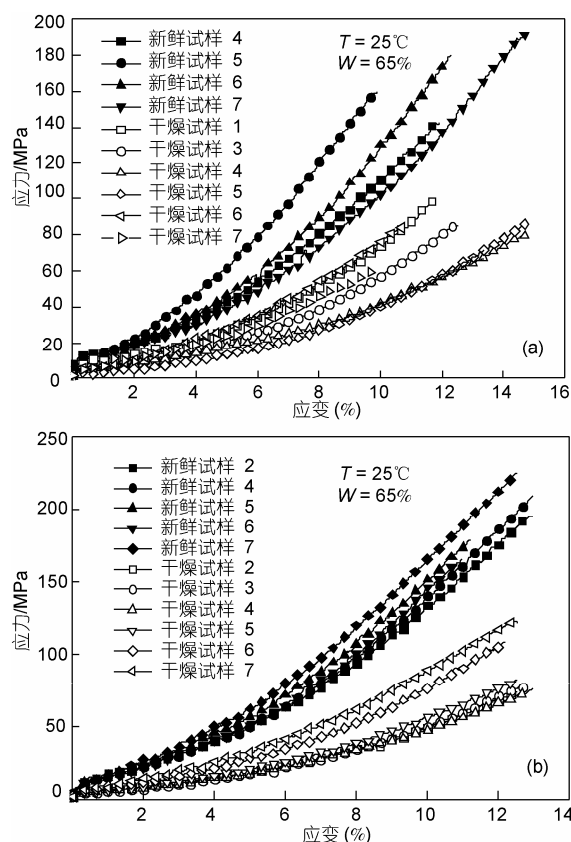


图3 不同方向鞘翅试样应力-应变曲线

(a) X 方向试样; (b) Y 方向试样

3 讨论

3.1 鞘翅形态结构

鞘翅虽不参与甲虫飞行,但对于甲虫来说却至关重要,如保护飞行翅不受伤害,维持其下飞行翅所处环境温度和湿度的平衡,保证飞行过程的转弯和躯体的平稳,抵御外部敌对压力等。要实现诸多功能,鞘翅必须具备优化的结构设计和优秀的机械力学性能,达到轻质、高比强度、高比刚度及抗弯、抗压和抗腐蚀等性能要求。由鞘翅的形态结构分析:鞘翅外表皮层(EPI)主要由胶原蛋白成分构成,组织致密,力学性能优异,是甲虫在运动过程中的主要受力层,内表皮层质由几丁质纤维层编织铺设而成,质地疏松,且这些纤维层在鞘翅内部螺旋编织成许多近似圆形空腔,由图2中X截面和Y截面的SEM结果可以判定鞘翅内部形成很多球形或椭球形空腔,同时连接鞘翅上、下表皮层的纤维束也是空心柱体结构,这些结构的优化设计都有利于鞘翅轻质化的要求。程红等人^[8]的研究表明鞘翅空腔中充满油脂物质,这种

油脂腺除可以提供鞘翅运动所需能量外,还可降低自身比重,并且其分泌的油性化学物质可以润滑鞘翅和躯体腹壁。陈锦祥等人^[18]的研究认为空心纤维束在鞘翅内部呈类似于蜂窝结构的六边形分布,这种结构即轻质化,又可以有效地提高鞘翅的抗压和抗弯变形能力。

3.2 纳米力学性能

前文工作(表1)表明鞘翅A、B、C、D区域的力学性能差异不大,而鞘翅外侧E区域的力学参数值却要小得多(硬度0.31 GPa,弹性模量6.13 GPa),该结果也正体现了鞘翅结构设计的优化,因为鞘翅是甲虫的主要承力部件,而对单个鞘翅来说,A、B、C、D区域是其主要承力区域,所以力学性能比较优异,而鞘翅外侧区域主要用来与腹壁联接以密封飞行翅所处的内腔空间,因而对其力学性能要求也比较低,该区域鞘翅的厚度为 $(106.41 \pm 16.76) \mu\text{m}$ ($N=3, n=15, N$ 为试样数, n 为总测量次数),不到鞘翅平均厚度的一半,这样的结构设计有利于鞘翅的轻质化,同时可提高其比强度。

鞘翅主要是由几丁质纤维构成,几丁质纤维的韧性大,抗拉能力强^[19],纤维层间的平行或螺旋交织结构有利于降低复合材料的剪切应力,提高其抗剪切,抗剥离性能;纤维层间的平行编织结构还有利于吸收外表皮层受外部压力时产生的动能传递,缓冲鞘翅的局部变形,有类似弹簧的功效。Kurachi等人^[20]实验证明具有5层以上纤维层的甲虫鞘翅表皮可以感应到所有颜色的光,有利于判断外界光线的强弱。

3.3 拉伸实验

图4(a)是由试样的应力应变曲线经回归计算得到的鞘翅弹性模量值比较。横向比较,对不同状态鞘翅的X方向试样和Y方向试样进行 t 检验,得到新鲜鞘翅 $t=0.056$,干燥鞘翅 $t=0.701$,均大于0.05,可见对不同状态鞘翅的弹性模量来说,其在X方向和Y方向的值无明显差异;纵向比较,分别对X方向试样和Y方向试样进行 t 检验,得到X方向试样 $t=5.6 \times 10^{-4}$,Y方向试样 $t=1.8 \times 10^{-5}$,其值均小于0.05,说明无论在X方向还是在Y方向,新鲜鞘翅弹性模量值与干燥鞘翅弹性模量均存在明显差异,图中结果表明新鲜鞘翅的模量值是干燥试样的2倍多。就弹性模量而言,相比于本文2.2节得到的外表皮层(EPI)的弹性模量值

(6.13 GPa), 拉伸实验得到的结果明显要小得多, 该结论也进一步证实了东方龙虱为满足内、外表皮层的不同功能需求而进化形成的鞘翅结构具优化设计。

图 4(b)是拉伸实验不同方向试样断裂时的应变值比较。横向比较, 对不同状态鞘翅的 X 方向试样和 Y 方向试样进行 t 检验, 得到新鲜鞘翅 $t=0.927$, 干燥鞘翅 $t=0.988$, 值均大于 0.05; 纵向比较, 分别对 X 方向

试样和 Y 方向试样进行 t 检验, 得到 X 方向试样 $t=0.72$, Y 方向试样 $t=0.24$, 其值均大于 0.05, 可见对于屈服应变, 不同状态鞘翅的试样在其 X 方向和 Y 方向均无明显差异。回归计算得鞘翅断裂时的应变均值为 $12.45\% \pm 0.34\%$, 相比其他生物材料的屈服应变, 如螃蟹脚 $6.4\% \pm 1.0\%$ ^[21], 龙虾螯 $1.8\% \pm 0.3\%$ ^[22], 鞘翅材料具有更好的延塑性。

图 4(c)是拉伸实验得到的不同试样强度极限的比较图。横向比较, 对不同状态鞘翅的 X 方向试样和 Y 方向试样进行 t 检验, 得到新鲜鞘翅 $t=0.144$, 干燥鞘翅 $t=0.574$, 均大于 0.05, 可见对不同状态鞘翅的强度极限来说, 其在 X 方向和 Y 方向的值无明显差异; 纵向比较, 分别对 X 方向试样和 Y 方向试样进行 t 检验, 得到 X 方向试样 $t=1.7 \times 10^{-3}$, Y 方向试样 $t=5.6 \times 10^{-5}$, 其值均小于 0.05, 说明无论在 X 方向还是在 Y 方向, 新鲜鞘翅强度极限值与干燥鞘翅强度极限值均存在明显差异, 由图可看出新鲜试样的强度极限值是干燥试样的 2 倍以上, 可见其强度极限变化趋势与弹性模量的变化趋势一致。经过脱水, 风干等物理变化后, 受同样拉力作用时, 干燥试样更容易达到屈服应变而断裂, 以上鞘翅强度的变化规律表明鞘翅纤维层的亲水性对鞘翅的力学性能有很大的影响。

4 结论

(1) 鞘翅的横向截面和纵向截面具有相同的形态结构, 均是由致密的黑色外表皮层(EPI)和其下数十层几丁质纤维层呈平行或螺旋编织构成的内表皮层(EXO)组成, 满足生物材料轻质化需求。

(2) 鞘翅的外侧区域(试样 E)的硬度和弹性模量最小, 鞘翅材料的力学性能呈拓扑分布规律。

(3) 受外力变形时, 鞘翅主要以弹性变形为主。

(4) 鞘翅受拉断裂时, 新鲜鞘翅断裂时的应变为: X 方向 $12.22\% \pm 0.95\%$, Y 方向 $12.11\% \pm 0.95\%$, 干燥鞘翅断裂时的应变为: X 方向 $12.75\% \pm 2.53\%$, Y 方向 $12.74\% \pm 0.53\%$, 鞘翅延塑性能优异。

(5) 新鲜鞘翅的强度极限: X 方向 (169.2 ± 22.5) MPa, Y 方向 (194.5 ± 23.4) MPa, 干燥鞘翅的强度极限: X 方向 (85.4 ± 13.7) MPa, Y 方向 (90.9 ± 18.7) MPa, 新鲜鞘翅的强度极限值是干燥鞘翅的 2 倍以上, 同时鞘翅 Y 方向的强度极限都要大于其 X 方向的强度极限。

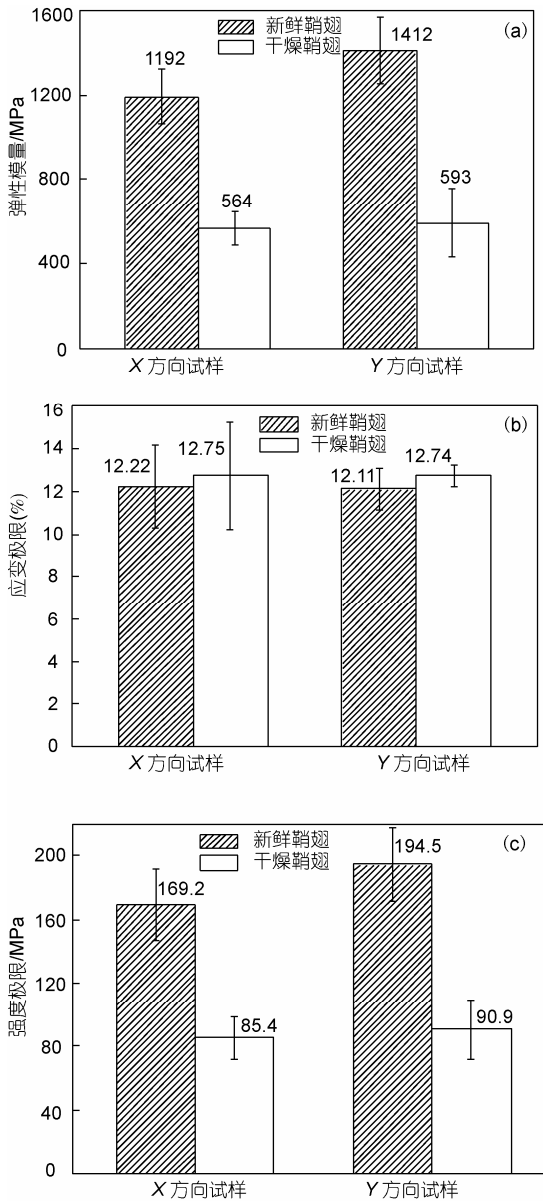


图 4 鞘翅力学参数对比图

(a) 不同试样弹性模量比较; (b) 试样应变极限的比较; (c) 试样强度极限的比较

参考文献

- 1 Dai Z D, Zhang Y F, Liang X C, et al. Coupling between elytra of some beetles: Mechanism, forces and effect of surface texture. *Sci China Ser C: Life Sci*, 2008, 51: 894—901[[doi](#)]
- 2 王立铎, 孙文珍, 梁彤翔, 等. 仿生材料的研究现状. *材料工程*, 1996, 17: 3—5
- 3 戴振东, 王卫英, 张亚峰, 等. 高强重比甲虫外骨骼材料的结构、强度拓扑及其在深空探测中的应用. 见: 深空探测技术与科学专题研讨会, 北京, 2005. 68—72
- 4 张迎春, 海世伟, 张金选, 等. 扫描电镜对锯齿叉趾铁甲背部形态的观察研究. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 29: 70—73
- 5 张迎春, 张莹, 郑哲民, 等. 4种昆虫鞘翅表面超微结构的比较. *西北大学学报(自然科学版)*, 2001, 31: 522—524
- 6 陈锦祥, 倪庆清. 甲虫前翅中的三维复合材料结构. *复合材料学报*, 2003, 20: 61—66
- 7 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. *材料研究学报*, 2003, 17: 630—636
- 8 程红, 陈茂生, 孙久荣. 臭蛱蝶体壁的组织结构. *昆虫学报*, 2003, 46: 429—435
- 9 Holleway B A. Elytra surface structures as indicators of relationships in stag beetles, with reference to the New Zealand species (Coleoptera, Lucanidae). *New Zealand J Zoo*, 1997, 24: 51—63
- 10 Liu F, Yin H W, Dong B Q, et al. Inconspicuous structural coloration in the elytra of beetles *Chlorophila obscuripennis* (Coleoptera). *Phys Rev*, 2008, 77: 012901—012904
- 11 Breed R S, Ball E F. The interlocking mechanisms which are found in connection with the elytra of Coleoptera. *Biol Bull*, 1909, 6: 289—303
- 12 Gorb S N, Rolf G B, Kastner V, et al. Structural design and biomechanics of friction-based releasable attachment devices in insects. *Integr Comp Bio*, 2002, 42: 1127—1139[[doi](#)]
- 13 Gorb S N, Goodwyn P J. Wing-locking mechanisms in aquatic heteroptera. *J Morphol*, 2003, 257: 127—146[[doi](#)]
- 14 Goodwyn P J, Gorb S N. Attachment forces of the hemelytra-locking mechanisms in aquatic bugs (*Heteroptera:Belostomatidae*). *J Insect Phys*, 2003, 49: 753—764[[doi](#)]
- 15 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. *复合材料学报*, 2007, 24: 92—98
- 16 Dai Z D, Yu M, Gorb S N. Frictional characteristics of the beetle head-joint material. *Wear*, 2006, 260: 169—174
- 17 虞庆庆, 杨志贤, 戴振东, 等. 东方龙虱鞘翅微结构及力学性能研究. *自然科学进展*, 2006, 16: 365—369
- 18 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. *复合材料学报*, 2005, 22: 103—108
- 19 上海第一医学院主编. 组织胚胎学. 北京: 人民卫生出版社, 1979. 39—47
- 20 Kurachi M, Takaku Y, Komiya Y, et al. The origin of extensive colour polymorphism in *Platymaris sericea*. *Naturwissenschaften*, 2002, 89: 295—298[[doi](#)]
- 21 Chen P Y, Albert Y M L, Mckittrick J, et al. Structure and mechanical properties of crab exoskeletons. *Acta Biomater*, 2007, 12: 1—10
- 22 Sachs C, Fabritius H, Raabe D. Experimental investigation of the elastic-plastic deformation of mineralized lobster cuticle by digital image correlation. *J Strut Biol*, 2006, 155: 409—425[[doi](#)]