复 合 材 料 学 报 第21卷 第5期 10月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 5 October 2004

文章编号: 1000-3851(2004)05-0088-05

甲虫前翅结构中的优化设计

陈锦祥[1,*], 倪庆清[2], 徐英莲[1]

(1. 浙江理工大学 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018; 2. 日本京都工艺纤维大学 606-8585)

摘 要: 为了设计开发轻量型仿生复合材料, 选择了独角仙和锹形虫两种甲虫前翅为仿生对象, 用电子显微镜观察了这两种甲虫前翅结构上的异同, 考察了甲虫前翅中的优化设计思路。结果表明: (1) 两种甲虫前翅均采用了以小柱为中空层的夹芯层状结构及框架结构的轻量型设计手法。(2) 独角仙前翅为一次性式的十分经济的设计方式, 而锹形虫则为耐用型设计方式。

关键词: 仿生复合材料; 甲虫前翅; 独角仙; 锹形虫; 优化设计

中图分类号: TB 332 **文献标识码:** A

OPTIMUM DESIGN IN THE STRUCTURES OF BEETLE FORE WINGS

CHEN Jinxiang[1,*], NI Qingqing[2], XU Yinglian[1]

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Zhejiang University of Sciences, Hangzhou 310018, China; 2. Kyoto Institute of Technology, Japan)

Abstract: In order to develop the light-weight biomimetics composite structures, two kinds of beetle fore wings beetles, Allomyrina dichotoma and Prosopocoilus inclinatus, were selected as the biomimetics objectives. Based on the microscope observation, the structure characterizations and the optimum design mentality in these two beetle fore wings were inspected. As a result: (1) Both beetle fore-wings are of sandwich plate structure with a central void layer, where there exist many distributed trabeculae. Thus the beetle fore wings are one of typical light-weight composite frame structures. (2) The structure of allomyrina dichotoma fore-wing is disposable and shows an economical design way, while the structure of prosopocoilus inclinatus shows a strong and durable design way.

Keywords: biomimetics composite material; beetle fore wing; allomyrina dichotoma; prosopocoilus inclinatus; optimum design

利用电子计算机等进行优化设计可以说已经是众所周知的事实。而在自然界, 生物为了生存和适应自然环境, 在漫长的历史进化中, 对其所拥有的功能及其所在的环境往往形成具有最佳的生物体结构。为了设计开发轻量型复合材料, 本文作者从仿生学的角度出发, 选择甲虫前翅(Fore-wing) 进行了一系列的研究[1,2]。正如前文[3] 所报道的那样, 选择甲虫前翅的理由是: (1) 甲虫能飞行, 全身必须轻巧; (2) 前翅曝露在外表, 起着保护躯体的作用, 必须具有足够的强度; (3) 在生物的进化过程中, 甲虫所属的昆虫类为早期出现的动物, 进化时期长, 躯体(前翅) 结构的优化程度可能较高; (4) 昆虫种类达60 多种, 约占所有动物的8 成左右[4], 通过比较不同种类间甲虫前翅的结构异同, 期望能得到更多有益的设计指导思想。对于(1), (2) 中所推测的理由已在所发表的文中得到了一些验证[2,3]。

有关甲虫前翅的外观构造, 主要由几丁质(Chitin) 纤维及蛋白质(Protein) 等组成[5], 及其几丁质纤维的层与层之间纤维的排列方向是以螺旋的方式变化着[6] 的结构等, 早已有较多的报道。但在早期, 甲虫前翅被认为是一种已经是没有生命力的物质, 也很可能是这个原因, 至本研究止, 对前翅的三维结构研究还很不充分, 已有的报道往往多限于外观及其二维水平上。因此, 有关甲虫前翅在材料、结构上的仿生学研究往往着眼于纤维的排列方

收稿日期: 2003-08-05; 收修改稿日期: 2003-11-06
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50273034 E0302); 浙江省自然科学基金资助项目(501017)
通讯作者: 陈锦祥, 工学博士, 研究员, 主要从事仿生复合材料、金属材料强度解析评价研究 E-mail: chenjinx@yahoo.com.cn

式等二维水平上[7,8]。本研究通过对多种甲虫前翅的彻底解剖，全面系统地考察了前翅的三维立体结构[9,10]，并对其中的部分结构进行了力学实验及解析[1,2]，初步探明了甲虫前翅确实具有优秀的力学特性。本文作者则针对以上(3)，(4)中所推测的理由，重点从优化设计的立场，考察了不同种类甲虫(独角仙和锹形虫：Allomyrina dichotoma and prosopocoilus inclinatus)前翅的结构异同。

1 实验方法

实验动物为雄性的独角仙和锹形虫成虫。图1为雄性的锹形虫的照片。独角仙成虫，实验样品及其主要实验仪器详见参考文献[3]。样品的观察位置如图1(b)所示。按前、中、后大致分成三大部分，分别用Y1、Y2、Y3等字母作标记。

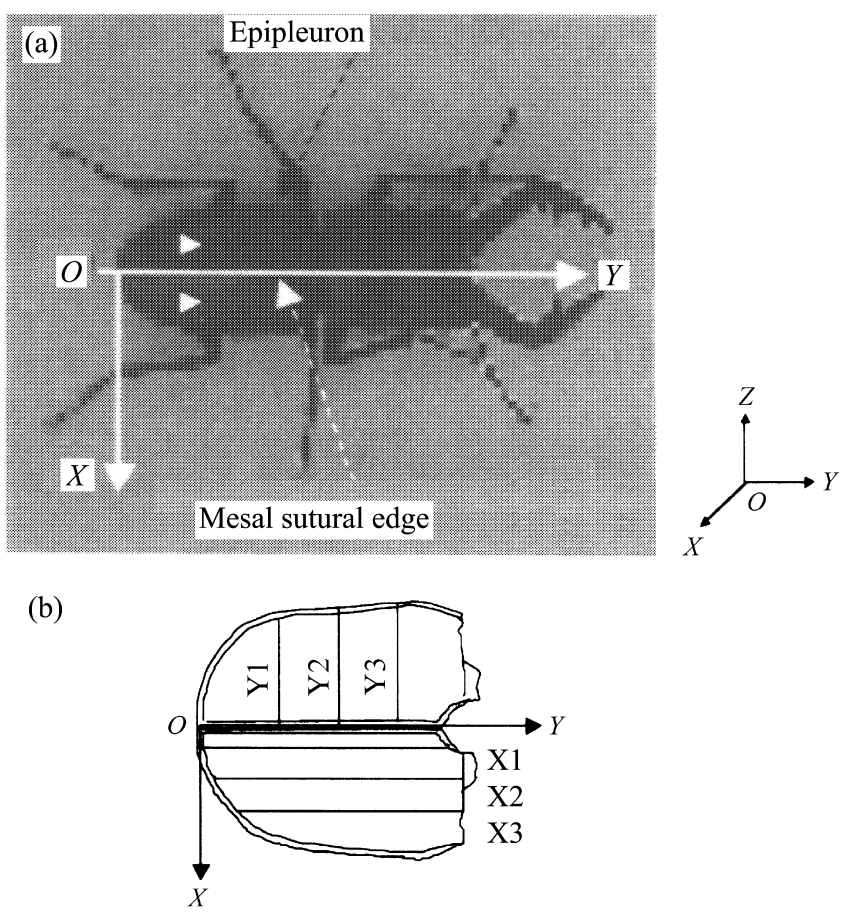

图1 雄性独脚仙的前翅(a)及其观察位置的坐标(b)

Fig. 1 Fore-wings (△) of male prosopocoilus inclinatus (a) and cartesian coordinates of observing positions (b)

2 实验结果

2.1 甲虫前翅的形状及其小柱的分布

图2为两种甲虫前翅在10% KOH水溶液中煮沸3 h后的照片。图中分布着很多小圆点，这些小圆点每一个即为一根小柱(Trabecula)[10]。由图可见，两种甲虫除了都有很多小柱以外，最外边均为一框架形结构(Frame structure，参见图3，以下图中简称为“Frame”，图中与“Frame”相关处出现的“Mesal sutural edge”和“Epipleuron”为昆虫学上对前翅中线及外侧边缘的称呼)。但小柱的分布密度有很大的差异。对图2所示前翅各自9个四方形图形内每平方毫米上的小柱密度进行了测定，其平均值锹形虫约为35，独角仙大约为6，两者相差近6倍。

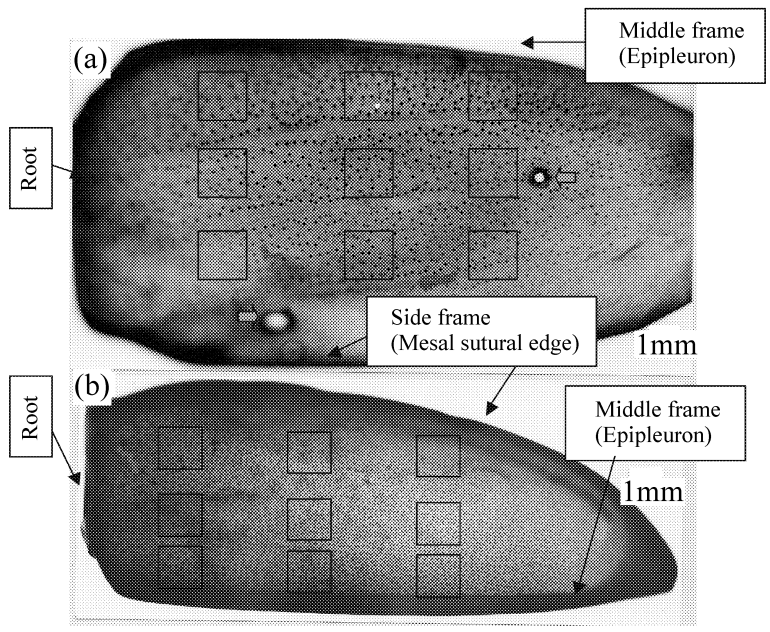

图2 10%KOH处理后的前翅及其小柱分布情况

Fig. 2 Fore-wing and its trabeculae distribution after 10% KOH treatment

(a) Allomyrina dichotoma, the holes as marked due to damage in beetle battle; (b) Prosopocoilus inclinatus

2.2 甲虫前翅的断面及框架结构

图3(b)为锹形虫右翅的断面(图1所示的X-Z平面)的电子显微镜照片。为了便于对比，图3(a)同时给出了独角仙左翅断面照片[3]。从图中可见，左右两端部具有很大的空隙，这种空隙往往具有类似于中空长方形或中空三角形的图形结构，而且越到前翅的根部，这种中空图形的纵横比越大。例如，图3(a)、图3(b)虽为两种不同种类的甲虫，但也能看到前翅根部(图3(b)中Y3位置)左右两端的断面要比前翅中部(图3(a)中Y2位置)的断面要深。另外，尽管图3中因放大倍率较低，较难看清断面的详细结构，不过，参见图4，可以清楚地看到前翅全体由上层、下层及中空层组成。表1给出了按图4(c)所示的方法粗略测得的前翅中央部的平均空隙L_v(μm)，框结构中最大的空隙及其各自的空隙率F_v(%)。表中的数据为图1(b)中Y1、Y2、Y3三位置的平均值。同表最右边给出了中线框架部与外侧框架部的平均值与中央部的倍数。由表可见，就前翅断面总厚度T而言，不论是中央部还是框架部，两种甲虫均较为接近，并且，框架部的空隙L_v要比中间部大4倍(独角仙)到7倍(锹形虫)左右，但中央部的空隙高度独角仙要大得多。

表1　两种甲虫前翅断面厚度、空隙层厚度(μm)与空隙率(%)

Table 1　Lamination thickness and void ratio for two kinds of beetles fore-wings[1]

Object	Beetle kind	(1) Middle	(2) Mesal sutural	(3) Epipleuron	(4) Average of (2)+(3)	(4)/(2)
T/μm	Allomyrina dichotoma	158	332	704	518	3.3
	Prosopocoilus inclinatus	147	488	669	579	3.9
L_v/μm	Allomyrina dichotoma	101	270	489	379.5	3.8
	Prosopocoilus inclinatus	41	257	348	302.5	7.4
F_v/%	Allomyrina dichotoma	59	81	69.4	75.2	1.3
	Prosopocoilus inclinatus	28	53	52	52.5	1.9
(L_u+L_d)/μm	Allomyrina dichotoma	57	62	215	139	2.4
	Prosopocoilus inclinatus	106	231	321	276	2.6

Note: The data of (1) ~ (3) are the average value at the locations of Y1, Y2, Y3;

2 The central lower lamination average thicknesses of allomyrina dichotoma and prosopocoilus inclinatus are 12 μm and 37 μm, respectively;

3 T: total thickness of fore-wing; L_v: void thickness; F_v: void ratio; (L_u+L_d): total thickness of upper and lower lamination (see Fig. 4).

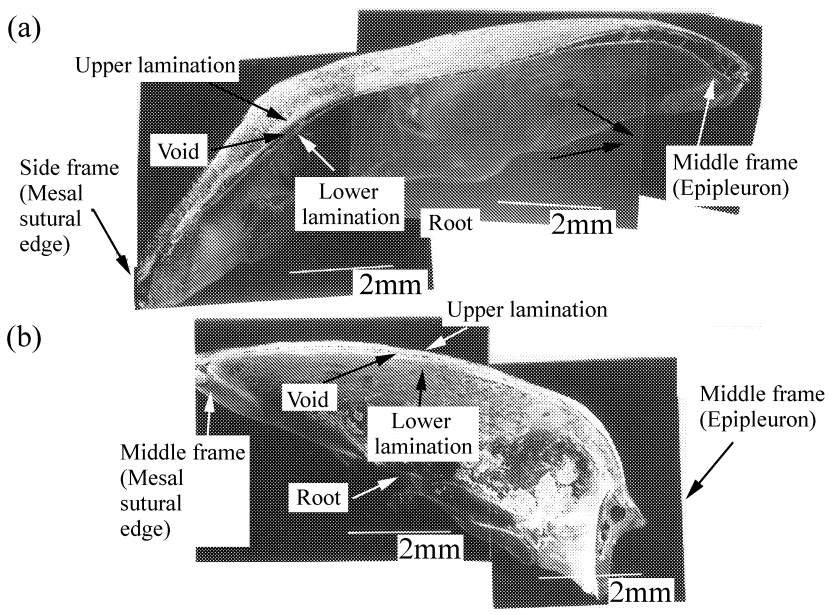

图3　甲虫前翅断面中的框架结构

Fig. 3　Frame structure in the cross-section of beetle fore-wing

(a) Allomyrina dichotoma, at section position Y2;

(b) Prosopocoilus inclinatus, at section position Y3

与此相应，中央部的上下层厚度之和(L_u+L_d)锹形虫约为独角仙的2倍。

2.3　独角仙与锹形虫前翅内小柱的特征(设计手法)

图4(a)、图4(b)为独角仙，图4(c)、图4(d)为锹形虫小柱的纵向外形及剖面的电子显微镜照片。从图4(a)、图4(c)小柱纵向外形上可以清楚地看见：独角仙的小柱细而长，锹形虫的小柱粗而短。再从图4(b)、图4(d)小柱的纵向剖面上可以看见：独角仙的小柱与上层厚下层薄的结构相对应，上部粗而下部细。而锹形虫小柱内部的纤维多而结实，小柱上下部粗细基本一致。另外，独角仙小柱的上粗下细现象也可以从图4(a)中观察到。

3　分析与探讨

3.1　甲虫前翅中的轻量型结构的设计手法

这是甲虫独角仙与锹形虫前翅共同的特点。由图3、图4独角仙和锹形虫前翅的结构可知，锹形虫和独角仙具有相同的、以分布有小柱为中空层的夹芯层状三合板结构。对于独角仙前翅局部的简易结构模型本文作者已作过报道，而且其中的小柱结构，对层状纤维强化的复合材料而言，可以极其有效地提高复合材料层间的抗剥离性能(详见参考文献[2,3])。再从表1断面厚度分布来看，(1)锹形虫约有近30%的空隙率，特别是独角仙空隙率高达60%。(2)通过对图3所示的框架结构进行模式化后的计算结果表明：由于前述的两种甲虫的框架结构越到前翅的根部，中空长方形或中空三角形的图形越是变为纵横比越大的断面特征，前翅的根部，对水平轴的惯性矩越大[1]。总体上，可以认为两种甲虫通过变截面的框架结构设计方法，获得了其所需的弯曲刚度及扭转刚度[1]。可见，甲虫前翅为一种优化了的轻量型结构。

3.2　因使用目的而异的经济型设计手法

尽管两种甲虫都通过柱子芯中空三夹层结构和变截面的框架结构设计方法达到了轻量化的目的，但是，从前面的实验结果中，可以清楚地观察到这两种甲虫前翅具有明显的不同之处。例如，锹形虫不仅具有粗短结实的小柱(图4)，大于独角仙6倍的小柱分布密度(图2)，而且其上下层的厚度约为独角仙的2倍，中空层高度只有独角仙的

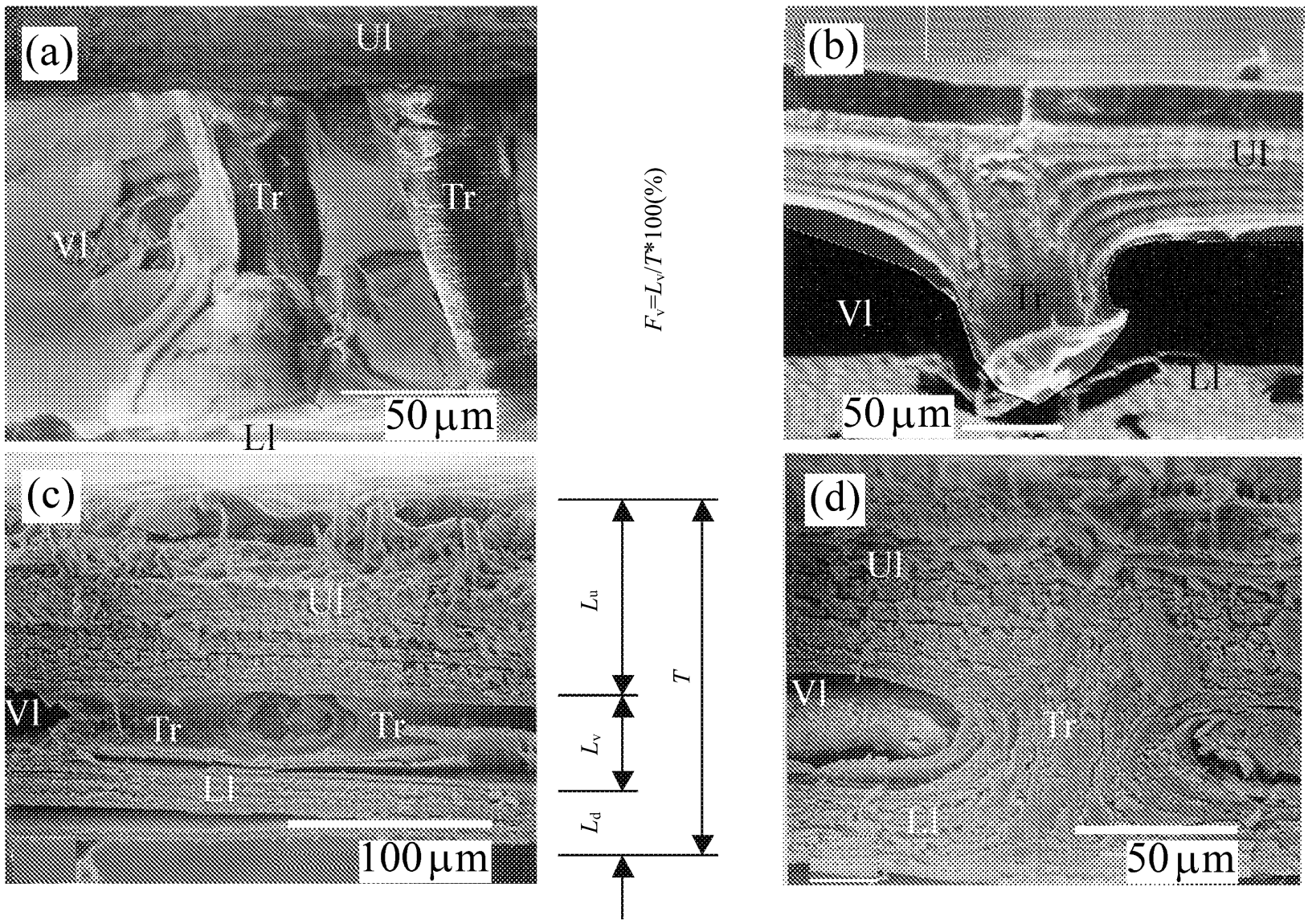

图4　独角仙((a)、(b))与锹形虫((c)、(d))小柱的特征

Fig. 4　Trabecula characteristics for allomyrina dichotoma ((a), (b)) and prosopocoilus inclinatus ((c), (d))

(a), (c): Cross section in along X direction; (b), (d): Cross section along Y direction;

Ul: Upper lamination; Vl: Void lamination; Ll: Lower lamination; Tr: Trabecula

40%(图4，表1)。从这些差别中可以认为，锹形虫前翅结构为轻量型结构中的高强度结构，而独角仙则为轻量型结构中的轻量型结构。前者主要通过数量(小柱直径，密度，上下层厚度等)的变化，后者不仅通过数量的变化，它还通过形状(小柱上部粗而下部细)、结构上的变化(独角仙前翅中还有典型的轻量型结构——蜂窝结构的存在，详见参考文献[10])来达到轻量化的目的。

那么，为什么这两种甲虫会有这么大的区别呢？本文作者认为，这和甲虫的生存期限有关。锹形虫是能够越冬的甲虫，而独角仙则不能越冬，大约只能生存数周。虽然没有考证两种甲虫准确的生存期限，粗略地假设锹形虫生存期限为12个月，而独角仙为半个月，则其生存期限的差异约为20多倍。可以形象地说，如果作为一种产品，锹形虫为持久耐用的产品，而独角仙为一种一次性消耗品。因此，在设计强度上，锹形虫采用了强化的设计方法，而独角仙则为一种极为巧妙、经济的设计方法。如独角仙除以上论述过的采用蜂窝等结构外，中央部具有极薄的下层(仅为锹形虫的三分之一)，因为下层直接与身体相邻，受外界攻击的可能性很小，所以尽量节省下层所用的材料。另外，在实验饲养的甲虫中，经常可以观察到独角仙因甲虫之间的争斗，其前翅中出现小孔洞的现象。这可以理解为，一次性消耗品在强度上作出了一定的让步。

综上所述，虽然在定量上仍有待于今后作进一步的分析探讨，但从定性的角度，已经让我们认识到甲虫前翅确实是一种相当优化的生物体结构。而且，不同的甲虫，根据其生活习性及其所需的强度，在漫长的进化历程中，通过结构上的优化设计达到了各自所需的要求。

4　结　论

为了设计开发轻量型仿生复合材料，着重从优化设计角度考察了甲虫独角仙成虫前翅的结构，结果表明：

(1) 两种甲虫前翅均采用了以小柱为中空层的

夹芯层状结构及框架结构的轻量型设计手法。

(2) 独角仙前翅为一次性式的十分经济的设计方式，而锹形虫则为耐用型设计方式。

(3) 今后将对上述中空层的夹芯层状结构和框架结构及其两种不同设计方式的结构的力学性能进行定量解析，以确定一些具体功能(使用目的)下的设计参数。

参考文献:

[1] 陳錦祥，岩本正治，倪慶清，等. 甲虫上翅の断面構造とその最適性[J]. 材料，2000，49(4)：407-412.

[2] 陳錦祥，岩本正治，倪慶清，等. 甲虫上翅の層間強化機構に関する一考察[A]. 日本機械学会論文集(A)[C]. 2001，67(654)：273-279.

[3] 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.

[4] 中根猛彦，大林一夫，野村鎮，等. 原色昆虫大图鑑(第2卷(甲虫篇))[M]. 東京：北隆館，1978. 1-10.

[5] 石井象二郎. 昆虫生理学[M]. 東京：倍風館，1982. 1-100.

[6] 竹本喜一. 生物を真似た新素材[M]. 東京：株式講談社，1995. 134-142.

[7] 増田由美子，岡田　明，田畑　洋，等. カタゾウムシの翅構造と力学特性[A]. 日本機械学会材料力学部門講演論文集[C]. 1995(1995-A). 121-122.

[8] 陈　斌，彭向和，范镜泓. 生物自然复合材料的结构特征及仿生复合材料的研究[J]. 复合材料学报，2000，17(3)：59-62.

[9] Chen J X, Ni Q Q, Endo Y, et al. Fine structure of the trabeculae in the fore-wing of allomyrina dichotoma (Linne) and prosopocoilus inclinatus (Motschulskey) (Coleoptera: Scarabaeidae) [J]. Entomologia Sinica, 2001, 8(2): 115-123.

[10] Chen J X, Ni Q Q, Endo Y, et al. Distribution of the trabeculae in the fore-wing of horned beetle, allomyrina dichotoma (Linne) (Coleoptera: Scarabaeidae) [J]. Entomologia Sinica, 2002, 9(1): 55-61.