复合材料学报 第17卷 第3期 8月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol 17 No. 3 August 2000

文章编号: 1000-3851(2000)03-0059-04

生物自然复合材料的结构特征及仿生复合材料的研究

陈 斌, 彭向和, 范镜泓
(重庆大学 工程力学系, 重庆 400044)

摘 要: 经过若干世纪的选择进化, 生物自然复合材料昆虫外甲壳的细观结构高度优化, 使其具有种种优良的性质。本文研究了昆虫外甲壳的细观结构特征, 这些结构特征为人工合成复合材料提供了一些有益的启示。按在昆虫外甲壳中发现的双螺旋铺层结构和纤维绕孔铺层结构, 用玻璃纤维和环氧树脂制备了仿生铺层复合材料, 比较实验表明, 仿生铺层复合材料比常规铺层复合材料有更高的强度和断裂韧性。

关键词: 生物自然复合材料; 仿生; 强度; 断裂韧性
中图分类号: TB 330.1; TB 39 **文献标识码**: A

MICROSTRUCTURE OF NATURAL BIOCOMPOSITES AND RESEARCH OF BIOMIMETIC COMPOSITES

CHEN Bin, PENG Xiang-he, FAN Jing-hong
(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Through untold centuries of evolutionary development, the insect exoskeleton has become a highly optimized structure suited to a variety of demanding duties. In this study, the structure of the exoskeleton of the insect was investigated for structural characteristics that may prove beneficial to advanced composite efforts. The arrangements of plies discovered in insect exoskeleton were applied to the biomimetic design and synthesis of the glass fiber reinforced epoxy composites. It was shown experimentally that the fracture toughness and the intensity of biomimetic plies are higher those that of conventional ones.

Key words: biocomposite; biomimetic; strength; fracture toughness

自然界存在许多具有优良力学性质的生物自然复合材料, 如木、竹、软体动物的壳及动物的骨、肌腱、韧带、软骨等。组成生物自然复合材料的原始材料(成分)从生物多糖到各种各样的蛋白质、无机物和矿物质, 虽然这些原始生物材料的力学性质并不好, 但是这些材料通过优良的复合与构造, 形成了具有很高强度、刚度以及韧性的生物自然复合材料。对这些生物自然复合材料精细结构的深入研究无疑将会对人工合成高性能复合材料以及智能材料的研究提供有益的指导。

自80年代以来, 生物自然复合材料及其仿生的研究在国际上引起了极大重视[1], 并已取得了一系列研究成果。Sarikaya[2]等研究了珍珠贝壳的精致层合结构和力学机理, 并将其用于研究陶瓷-聚合物和陶瓷-金属基复合材料, 结果发现其断裂韧性比按常规设计的复合材料提高了40%。Gordon和Jeronimidis[3]用复合材料柱、板和夹芯材料模仿在木细胞中发现的螺旋结构做成玻璃纤维/环氧树脂仿木复合材料, 结果断裂韧性也有大幅度的提高。Gunderson[4]对蜣螂等的外甲进行了研究, 初次发现了双螺旋结构。向春庭[5]对鞘翅目昆虫鞘翅的细观结构进行了观察研究, 发现了双喇叭型钉扎等细观结构。

本文选择昆虫蝉和金龟子的外甲壳为研究对象, 利用扫描电镜(SEM)和光学显微镜对其细观结构进行了观察研究, 在此基础上进行强韧机理分析及与人工复合材料的比较分析, 探讨了昆虫外甲壳细观结构与其宏观力学性能的联系, 得出设计制造新型人工合成复合材料的一些有益启示。最后, 仿其

收稿日期: 1998-11-10; **收修改稿日期**: 1999-07-19
基金项目: 国家教委优秀年轻教师基金资助项目; 重庆市应用基础研究资助项目
作者简介: 陈 斌(1956), 男, 博士, 副教授, 主要从事固体力学、复合材料力学等方面的研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主要细观结构特征试制了仿生双螺旋铺层层合板和仿生预成形孔洞层合板, 并进行了初步的比较实验研究。

1　昆虫外甲壳的 SEM 观察与分析

1.1　昆虫外甲壳的 SEM 观察

观察试样取自蝉和金龟子虫的外甲壳层。利用扫描电镜(SEM)和光学显微镜观察昆虫外甲壳层的各种细观和宏观结构特征。SEM 试样的准备是: 首先从昆虫身上剥离外甲壳, 用 80% 的酒精清洗内外表面后, 放入烘箱中充分干燥脱水, 然后根据所需要观察的层面对试样进行各种方位的剖切。最后, 将试样放于试样盒中用离子溅射仪喷涂金一钯涂层后, 放于 Amray kyky- 1000B 型扫描电镜中进行观测。试验过程中注意试样的显示位置, 通过电镜下的观察和电镜照片, 了解每一部分以及层面的结构和次结构。

SEM 观察表明: 昆虫外甲壳是一种层状复合材料, 埋置于蛋白质基体中的单向几丁质纤维平行于外甲壳表面整齐地排列(图 1)。这些由几丁质纤维和蛋白质基体粘合组成的薄层片各自有着自己的铺层方向, 其构成的铺层形式因部位不同而不同。特别也发现了一种奇特的双螺旋铺层结构, 特征为两相邻铺层近似为 80～90°, 而两相间铺层的夹角近似为 20～30°。这些相互叠合的纤维层保持一个定角旋转(图 2)。

在一些地方由纤维与基体组成的纤维片条之间存在许多垂直于片条的圆柱形"钉柱", 这些"钉柱"在纤维片条中近似等距排列, 使纤维片条在彼此相连的情况下保持一定的间隙(图 3)。同一铺层以及不同铺层中的几丁质纤维的尺寸和各层的厚度可能

图 1　增强纤维构成的铺层

Fig. 1　The fiber-reinforced laminates

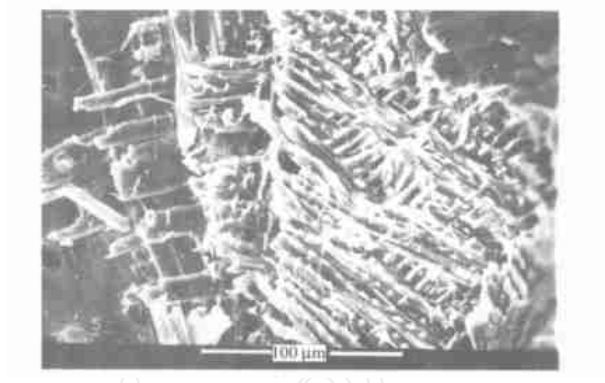

图 2　双螺旋铺层结构

Fig. 2　The dual helicoidal arrangement of plies

不一样, 叠层数也因部位不同而不同。如蝉的头部后背壳的中部有着最多的分层数、最粗大的纤维和最厚的层厚。

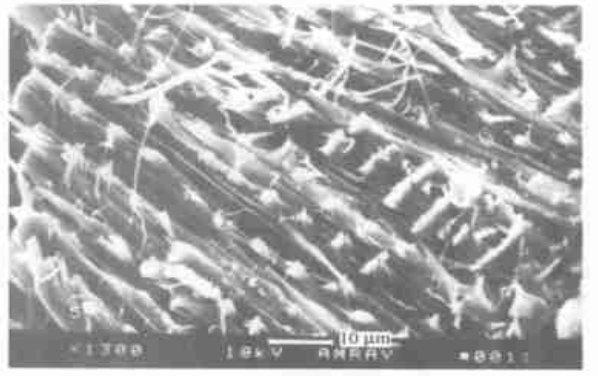

图 3　纤维片条间的"钉柱"

Fig. 3　The sticks joining the fiber pieces

昆虫外甲壳内部有许多用于传感的神经器官管道和用于传输物质的孔洞, 在这些管道或孔洞附近纤维密度较大并且是未中断地连续绕过(图 4)。

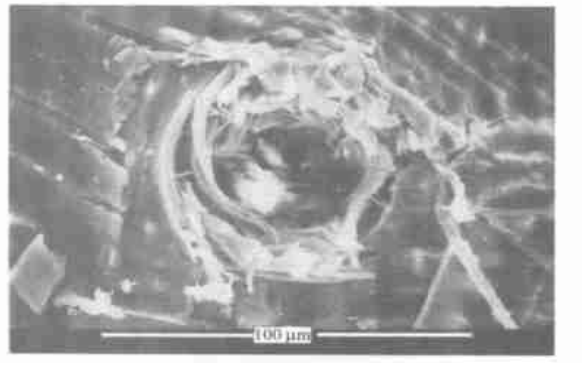

图 4　孔边的纤维连续地绕过

Fig. 4　The fiber continuity around the hole

1.2　比较与分析

由于生物飞行和人类航空航天对材料比强度、比刚度以及韧性有着共同的要求, 经过高度优化的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生物自然复合材料——昆虫外甲壳的细观结构非常类似于我们今天广泛使用的人工合成纤维增强复合材料。它也是一种由纤维和基体组成的两相层状复合材料, 与材料表面平行的增强纤维承受载荷, 基体传递和分散载荷。层状复合材料因为具有良好的力学性质而被自然界和人类共同认识和采用。昆虫外甲壳的纤维片条中存在许多"钉柱"以及由"钉柱"支撑而形成的空隙, 这样的结构形式使材料既较轻而又具有较好的刚度和面内抗剪强度, 满足了昆虫外甲壳自然复合材料对提高材料强度、刚度、减轻材料重量以及释放或减轻材料内应力的要求。在昆虫外甲壳中的传感器官和传输物质的管道及孔洞附近的纤维具有较高的密度及保持连续地绕过, 这与孔边的高应力场相适应, 当外甲壳发生断裂时在这些地方遇到强烈的抵抗而消耗大量的能量, 使材料在孔洞附近具有很好的强度和止裂能力(这些管道或孔洞与整个昆虫外甲壳同时形成), 而常规复合材料或结构为联接和紧固需要, 在需要孔洞的地方常采用机械加工的方法(对已成形的复合材料板进行钻、冲孔), 这使得孔洞处的纤维被切断, 孔边造成了相当严重的损伤和应力集中, 孔洞附近成为材料或整个结构的破坏危险处。昆虫外甲壳自然复合材料中的纤维和铺层数是变化的, 在可能出现较大外力的部位往往具有较粗大的纤维和较多的叠层及厚度(如蝉的头部背壳), 而人工合成复合材料中的纤维粗细和叠层数往往是不变的。另外昆虫外甲壳的纤维铺层还采用了人工合成复合材料很少用到的双螺旋结构。昆虫外甲壳采用恰当的结构和精致的复合方法, 尽可能的控制和优化纤维及其它材料的分布, 以满足功能的最大需求, 这些都为我们改善现有人工合成复合材料以及发展新型复合材料提供了有益的启示。昆虫外甲壳作为一种生物材料, 还具有自我诊断、调整和修复的功能, 它将用于结构的系统和用于智能的系统协调地组织于一体, 对其更深入的研究还将为智能复合材料及结构的研究提供指导。

2　仿生复合材料的研究

2.1　仿生双螺旋铺层复合材料

在对昆虫外甲壳细观结构观察分析的基础上, 仿其主要结构特征双螺旋铺层结构, 试制了仿生双螺旋铺层复合材料层合板。复合材料层合板的增强材料选用南京玻纤院高强-Ⅱ型玻璃纤维, 树脂基体采用环氧 648/三氟化硼单乙胺, 重量配比为树脂∶固化剂= 100∶3。仿生双螺旋铺层结构层合板的制造过程是: 首先在无纬纤维缠绕机上用同步浸蘸树脂的工艺制得浸润了树脂的玻璃纤维无纬布, 然后在半凉干状态下按双螺旋铺层结构(图 5)进行裁剪铺层, 最后在平板热压机上热压固合制得仿生双螺旋铺层复合材料板。同时, 为进行比较研究, 按同样材料和工艺制造了常规铺层层合板$(0_2/+/-45_2/90_2)_s$。

将两种层合板做成断裂韧性测试试件[6](图 6), 每种做合乎要求的 3～5 个试件。在 INSTRON 材料试验机上进行比较试验研究, 测出每组试件的破坏应力 σ 再求得平均值, 并由断裂韧性计算公式[6]

$$K_{IC} = F\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

进行计算。式中修正系数 F 按修正的 Koiter 公式有

$$F = \left[1 - 0.5\left(\frac{a}{b}\right) + 0.37\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0.044\left(\frac{a}{b}\right)^2\right] \Big/ \sqrt{1 - a/b} \tag{2}$$

常规铺层及仿生双螺旋铺层复合材料板断裂韧性的计算结果分别为 20.61 和 23.44 MPa$\sqrt{m}$, 从此结果可以看出双螺旋结构层合板有更高的断裂韧性。

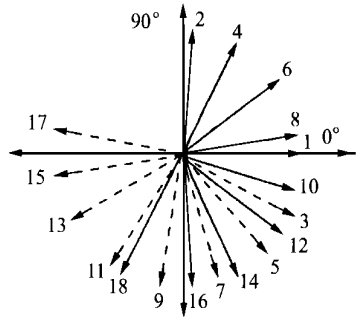

图 5　双螺旋结构铺层图谱

Fig. 5　Diagram of the dual helicoidal plies

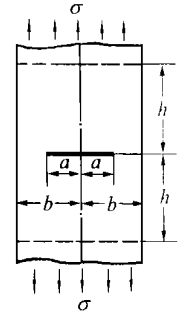

图 6　测试试件

Fig. 6　Test specimen

2.2　仿生预成形孔洞复合材料

受在昆虫外甲壳中发现的孔洞等结构薄弱处增强纤维是未中断地连续绕过的启发, 仿生制备了预成形孔洞(绕孔铺层)复合材料层合板。首先加工了一副能获得预成形孔洞复合材料板的模具。为得到预成形孔洞, 该模具的上下模板上开出通孔, 并配作相应尺寸的圆柱销(设计了 4、8、11 mm 几种直径)。为便于进行比较, 模具的一半面积用来得到预成形孔洞复合材料板, 另一半用来得到钻孔复合材料板。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

然后同前制造双螺旋铺层复合材料板的配方和工艺制造出无纬玻璃纤维布, 在半凉干状态下剪裁后, 在模具上进行叠层, 叠层时注意让无纬玻璃纤维布的纤维绕过预置于下模具孔中的圆柱销, 然后合上开有对应孔洞的上模具板, 让圆柱销也插入上模具板的开孔中, 合模后将模具放入热压机中进行热压固化, 固化成形后抽去圆柱销、打开模具就得到了质量良好的含预成形孔洞的复合材料层合板, 对未布置预成形孔洞的另一半复合材料板进行钻孔加工便得到用于比较研究的钻孔复合材料层合板。将制得的预成形孔洞及钻孔复合材料板制成试件, 在拉力试验机上作极限强度的比较试验, 试验结果见表 1 所示。从试验结果可以看出, 预成形孔洞(绕孔铺层) 复合材料板比钻孔复合材料板有更高的极限强度, 并且随孔洞直径的增大, 极限强度的提高幅度也增大。

表 1　拉伸试验结果

Table 1　Tension test results, showing considerable increase in strength for the preformed hole specimens compared to those with drilled holes

孔洞直径/mm	钻孔试件强度/MPa	预成形孔试件强度/MPa	强度提高幅度/%
4	103.3	141.4	36.9
8	92.6	129.1	39.4
11	79.2	115.2	45.5

3　结　论

本文利用扫描电镜等对昆虫外甲壳的细观结构进行了观察研究及强韧性机理分析, 得出改善现有人工合成复合材料及发展新型复合材料有益的启示。在此基础上进行了仿生复合材料的制备及与人工合成复合材料的比较研究, 比较实验表明, 仿生双螺旋铺层层合板及仿生预成形孔洞复合材料板比常规铺层层合板有更高的断裂韧性和强度。

参考文献:

[1] Burte H M, Deusen R L, Hemenger P M, *et al*. The potential impact of biotechnology on composites [M]. Lancaster Pennsylvania: Tech Pub Co Inc, 1986. 65-68.

[2] Sarikaya M, Gunnison K E, Yasrebi M, *et al*. Seeshells as a natural model to study laminated composites [M]. Lancaster Pennsylvania: Tech Pub Co Inc, 1990. 176-183.

[3] Gordon J E, Jeronimidis G. Composites with high work of fracture[J]. *Phil Tran R*, 1980, A 294: 545-549.

[4] Gunderson S, Schiavone R. The insect exoskeleton: a natural structural composite[J]. *JOM*, 1989, 41(11): 60-62.

[5] 向春庭. 自然复合材料机理和仿生复合材料的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1994.

[6] 高　庆. 工程断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net