具有层状纤维缠绕的仿甲虫鞘翅轻质结构的设计及其力学性能分析

周　怡　郭　策　朱春生　戴振东
南京航空航天大学，南京，210016

摘要：在对鞘翅断面微结构观测的基础上，分析了鞘翅的微观结构特征。设计了具有层状碳纤维缠绕的仿生轻质结构，并利用有限元法对其进行了力学性能分析。同时制备出了仿鞘翅结构复合材料模型，并进行了准静态压缩实验。将实验结果与有限元分析结果进行比较，证明了有限元分析结果的有效性。在此基础上，进一步比较了两种不同纤维缠绕方式的仿生轻质结构的力学性能，证明了两层交错纤维缠绕的仿生结构设计是合理的。

关键词：鞘翅；微观结构；结构仿生；有限元分析；复合材料
中图分类号：TB17　　**文章编号**：1004—132X(2011)16—1969—05

Study on Design and Mechanics Properties of Beetle's Elytra－inspired Lightweight Structures with Filament Winding

Zhou Yi　Guo Ce　Zhu Chunsheng　Dai Zhendong
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing，210016

Abstract：Based on the microstructure of the cross section of a beetle's elytra，one compound material of bio－inspired lightweight structures was designed. Three kinds of mechanics properties of the lightweight structures were studied with FEM. At the same time，quasi－static compression experiments on the structure models were carried out. The experimental results and the FEA results were compared and analyzed，which proved the effectiveness of the FEA. The mechanics properties of two kinds of finament－wound structure were compared，the results proving the bionic structure of two layer staggered fiber design are reasonable.

Key words：elytra；microstructure；bio－inspired structure；finite element analysis(FEA)；compound material

0　引言

甲虫是自然界中非常庞大的一个种群，它们的前翅在进化过程中慢慢地蜕变为具有高强度及高断裂韧性结构的鞘翅[1-2]。由于甲虫鞘翅质轻、强度质量比高，且张合高效，从而成为几何设计和材料优化良好的仿生对象。陈锦祥等[3-6]研究了独角仙鞘翅的断面结构和表面微结构，指出鞘翅

收稿日期：2010—09—27
基金项目：国家自然科学基金资助项目(30770285)；江苏省自然科学基金资助项目(BK2009376)；航空科学基金(2007ZA52008)

信号调制分类[J]. 信息工程大学学报，2009，10(4)：466-470.
[6] Mmarques J P. 模式识别—原理、方法及应用[M]. 吴逸飞，译. 北京：清华大学出版社，2002.
[7] 李晓宇，张新峰，沈兰荪. 支持向量机(SVM)的研究进展[J]. 测控技术，2006，25(5)：7-12 .
[8] 张钦礼. 基于支持向量机和模糊系统的机器学习方法及其应用研究[D]. 无锡：江南大学，2009.
[9] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报，2000，26(1)：32-42.
[10] 张贤达. 时间序列分析[M]. 北京：清华大学出版社，1996.
[11] Brillinger D R，Rosenblatt M. Computation and Interpretation of Kth－order Spectra，In：Harris，eds. Spectral Analysis of Time Series[M]. New York：Wiley，1967.
[12] 杨叔子，吴雅，轩建平，等. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉：华中理工大学出版社，1994.
[13] Giannakis G B. On the Identifiability of Non－Gaussion ARMA Models Using Cumulants[J]. IEEE Trans. AC，1990，35(1)：18-26.

（编辑　王艳丽）

作者简介：施政中，男，1986 年生。华侨大学机电及自动化学院硕士研究生。主要研究方向为智能机器学习、机械振动分析。黄宜坚，男，1945 年生。华侨大学机电及自动化学院教授、博士研究生导师。

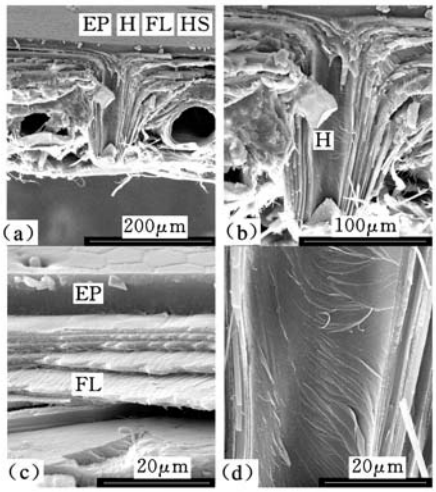
是一种以小柱为中空层的夹心层状三合板结构。陈斌等[7]根据绿色金龟子鞘翅组织的增强纤维的铺层机理制备出仿生双螺旋铺层复合材料和仿生预成形空洞复合材料。虞庆庆等[8]、杨志贤等[9-10]研究了东方龙虱鞘翅的断面结构，指出鞘翅由背壁层、腹壁层和中空夹芯层构成，背壁层、腹壁层之间由桥墩状纤维组织空心柱体结构连接，以提高其力学性能。

本文以东方龙虱的鞘翅为主要研究对象，通过对鞘翅断面微结构做扫描电镜观测，分析了鞘翅的微观结构特征。设计了具有层状纤维缠绕的仿甲虫鞘翅结构，并利用 ANSYS Workbench 10.0对其进行有限元分析，得到了该结构的三种力学特性曲线，并与无纤维缠绕的结构进行了比较。同时制备出了具有碳纤维缠绕的仿鞘翅结构复合材料模型，并进行了准静态压缩实验。将实验结果与有限元分析结果进行比较，证明了有限元分析结果的正确性和可靠性。在此基础上，进一步分析了不同纤维缠绕模式的结构力学特性。

1 仿生结构设计

1.1 鞘翅微观结构特征

根据杨志贤等[10]对东方龙虱鞘翅断面微结构的研究，可知其鞘翅主要由外表皮层(epicuticle)和内表皮层(exocuticle)构成，外表皮层是鞘翅最外层，是由胶原蛋白成分构成的黑色致密层，内表皮层由数十层几丁质纤维层平行、螺旋或正负编织铺设而成(图 1b～图 1d)，质地疏松。在鞘翅内沿断面排列着圆形或椭圆形的空腔(图 1、图 2 中的 HS)，在每两个空腔之间还存在着垂直于上下表面的小柱孔(图 1、图 2 中的 H)。由鞘翅的



EP:蜡质层　FL:纤维层　HS:空腔　H:小柱孔

图 1　鞘翅横向断面微结构[10]

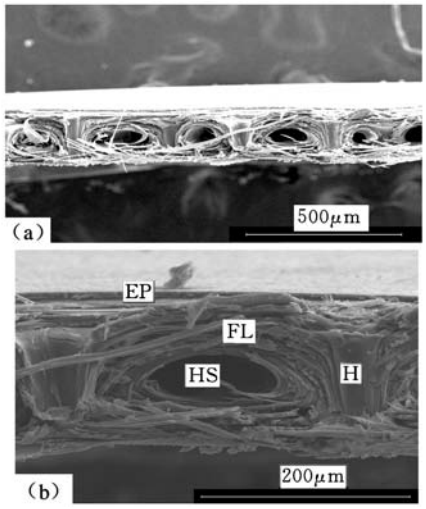


图 2　鞘翅纵向断面微结构[10]

横纵断面扫描电镜(SEM)图可见，鞘翅是一种以空心纤维束连接鞘翅背壁、腹壁的夹芯层中空轻质结构，这样的结构能有效减轻整个鞘翅的密度，同时鞘翅几丁质纤维层间的复合材料编织方式有利于加强鞘翅的强度，使鞘翅能充分抵抗外界的不利因素，从而保护甲虫躯体和飞行翅。

1.2 仿鞘翅轻质结构的设计

笔者根据东方龙虱鞘翅的断面微结构特点，进行了仿鞘翅轻质结构设计，在设计过程中，由于东方龙虱鞘翅的纤维层具有一定的复杂性，并且分布并不均匀，因此需对设计的结构进行合理的简化。

通过对鞘翅结构的观察和分析，发现鞘翅中主要减轻重量的部分是鞘翅内的圆形或椭圆形的空腔以及空腔之间的小柱孔，而层状分布的几丁质纤维层主要起到提高鞘翅力学性能的作用，且是缠绕出孔洞结构的主要成分。因此在设计过程中，结合鞘翅这些特点，并参考陈锦祥等[3,5]提出的模型，设计出了一种具有两层交错纤维缠绕的仿生结构，如图 3 所示。单根小柱断面结构如图 4 所示。

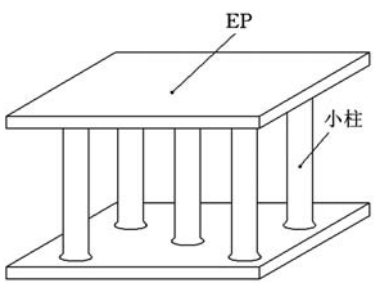
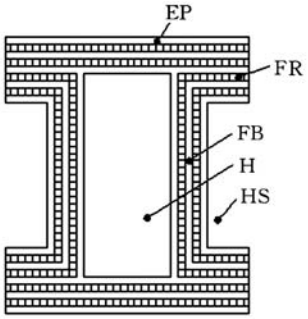


图 3　仿鞘翅轻质结构

2 仿生轻质结构的力学性能分析

参考宋文伟等[2]对轻质结构的力学性能分析



FB:竖直纤维层　FR:螺旋纤维层

图 4　单根小柱断面微结构

方法,本文利用 Pro/E 软件建立仿生结构的 3D 模型,由于分析和制备复合材料具有一定的复杂性,因此我们先从单层纤维复合材料开始进行分析。首先建立单层竖直纤维铺放模式的复合材料结构模型,如图 5 所示。模型整体尺寸为 30mm×30mm×20mm,上下层板均厚 1.5mm,小柱孔直径为 3.5mm,壁厚 0.5mm。为了进行比较,同时建立了形状完全相同的不含纤维的 3D 结构模型。由于 ANSYS Workbench 10.0具有与诸多 CAD 软件无缝接口的功能,所以可以方便地通过接口将模型数据导入ANSYS Workbench 10.0中进行分析,模型所采用的单元类型为 Solid 186,共有31 215个单元,60 659个节点。

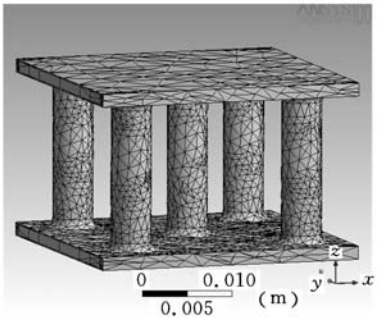


图 5　仿生结构有限元模型

在 ANSYS Workbench 10.0 的 simulation 模块中,需要选取模型的材料属性,为了方便与实际模型进行对比,本文仿生轻质结构与实际模型采用的材料属性如表 1 所示。

表 1　模型材料属性

材料	弹性模量 (GPa)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)
T700 碳纤维	253	1.78	4980
SU810 环氧树脂	2.5	1.2	55

2.1　准静态压缩力学性能分析

2.1.1　压缩力学性能有限元分析

模拟蜂窝结构静态压缩实验条件[11],在模型的上表面施加位移载荷,模型的底面设为固定约束,采用增加子步数的方法来逐渐施加载荷,同时选择合适的载荷步长。

通过有限元计算,提取每个子步下模型上表面发生最大位移处的约束反力和位移值,根据该数值作该结构的载荷力随位移变化的曲线,其结果与无纤维缠绕的结构模型的结果进行比较,如图 6 所示。

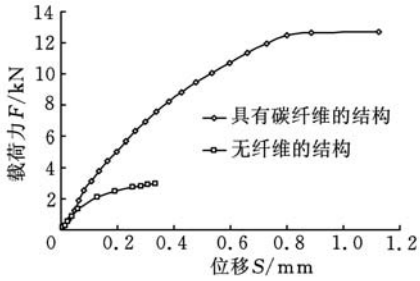


图 6　压缩性能曲线

2.1.2　仿生结构模型的压缩性能实验验证

(1)模型的制备。为了检验所设计的仿生轻质结构力学性能有限元分析的可靠性,需要对仿生结构模型进行实验验证。因此本文采用碳纤维复合材料制备出单层竖直纤维铺放模式的结构模型(图 7),模型材料的性能参数已在有限元分析时给出,模型的主要结构尺寸与有限元分析相同。

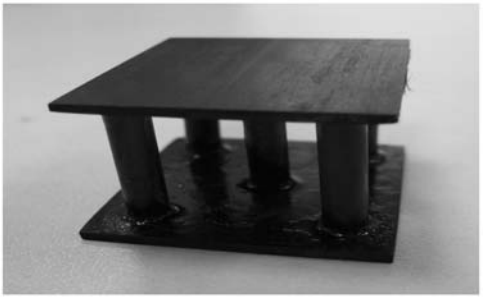


图 7　仿生结构模型

(2)准静态压缩实验。本实验设备为长春试验机研究所生产的微机控制电子万能试验机,试验力的范围是0～100kN;以恒定的速率 $v=1$mm/min 的速度对试样进行单向压缩,在压缩过程中,通过传感器记录加载量和压缩变形的位移量。

(3)实验结果与有限元分析结果的对比。将实验得到的力－位移曲线与有限元分析结果进行对比,结果如图 8 所示。

实验得到的压缩最大极限载荷为11.6kN,而有限元分析所得到的压缩极限载荷为12.7kN,实际样品测试值偏小的原因可能是试样上下层板与小柱体之间采用胶接方式,可能对其力学性能有一定影响。有限元分析值与测试值间的误差为

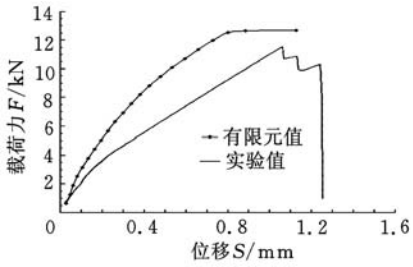


图 8　有限元分析结果与实验结果对比

9.5%。误差值在预定误差范围之内，说明了有限元分析结果的可靠性。

2.2　拉伸力学性能有限元分析

模拟复合材料层合板拉伸过程的有限元分析方法[12]，在模型左侧面加固定约束，右侧面加载，进行有限元计算。提取每个子步下加载面最大位移处的约束反力和位移值，作该结构模型的载荷力随位移变化曲线，并与无纤维缠绕的结构模型的结果进行比较，其结果如图 9 所示。

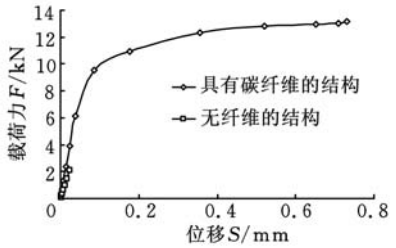


图 9　拉伸性能曲线

2.3　剪切力学性能有限元分析

模拟钢管剪切的有限元分析方法[13]，对模型加载，通过有限元的计算结果，提取每个子步下加载面最大位移处的约束反力和位移值，作该结构模型的载荷力随位移变化曲线，并与无纤维缠绕的结构模型的结果进行比较，结果如图 10 所示。

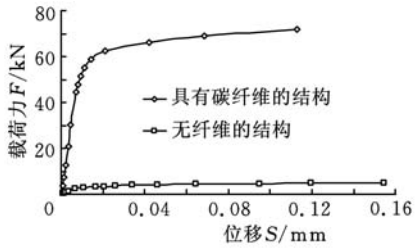


图 10　剪切性能曲线

从以上压缩、拉伸、剪切这三组力学性能曲线图中可以明显看出，具有碳纤维缠绕的轻质结构的三种力学性能均优于普通树脂的轻质结构的力学性能。根据有限元计算结果，结合已知结构模型的平均密度，即可计算出两种结构模型的比强度值，见表 2。由表 2 也可知，具有碳纤维缠绕的轻质结构力学性能大大优于采用普通树脂单一基体材料的轻质结构。

表 2　三种力学性能的比较

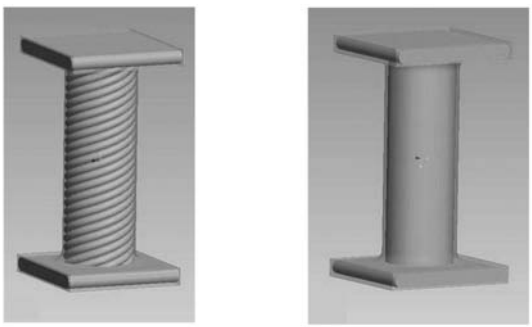
项目	具有碳纤维缠绕的结构	无纤维缠绕的结构
平均密度(g/cm³)	0.35	0.27
压缩极限强度(MPa)	14.1	3.4
压缩比强度(MPa/(g·cm⁻³))	40.3	12.6
拉伸极限强度(MPa)	146	23
拉伸比强度(MPa/(g·cm⁻³))	417.1	85.2
剪切极限强度(MPa)	160	11
剪切比强度(MPa/(g·cm⁻³))	457.1	40.7

本文所设计的是具有两层碳纤维交错缠绕的仿生轻质结构，在模型制备和有限元分析过程中首先对单层竖直铺放模式的碳纤维轻质结构进行分析。由分析结果可知，具有单层纤维缠绕的轻质结构在承受压缩、剪切和拉伸载荷时，其力学性能均优于单一树脂基体材料的相同结构的力学性能。本文在此基础上进一步分析比较了不同纤维缠绕模式下的结构力学特性。

3　不同纤维缠绕方式的结构力学性能分析

3.1　3D 有限元模型的建立

为了比较两种不同纤维铺放模式的力学性能，在已有的模型基础上分别加入螺旋纤维缠绕层和竖直纤维缠绕层，其中螺旋纤维缠绕层的纤维缠绕角度为 65°。此处以单个小柱体为单元进行力学性能分析，其 3D 模型如图 11 所示。



(a)加入螺旋纤维缠绕层的小柱体　　(b)加入竖直纤维缠绕层的小柱体

图 11　3D 模型

3.2　材料属性

模型材料依然选用碳纤维环氧树脂复合材料，其性能参数见表 1。

3.3　三种力学性能的比较

针对竖直和螺旋这两种不同纤维缠绕方式的模型，分别比较了它们的压缩、拉伸以及剪切性能，其结果如图 12～图 14 所示。

从三种力学性能的有限元分析结果来看，在受拉伸和剪切力时，螺旋缠绕＋竖直缠绕的纤维缠绕方式具有更好的力学性能，而承受压缩载荷

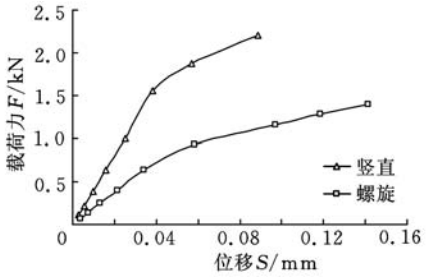


图 12　压缩性能曲线

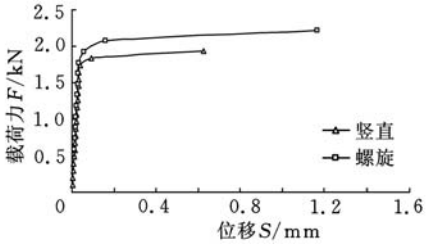


图 13　拉伸性能曲线

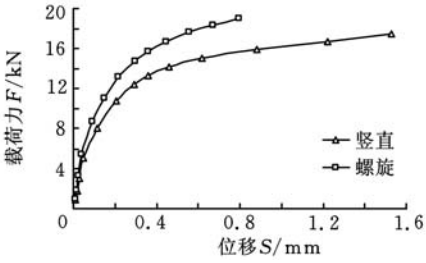


图 14　剪切性能曲线

时，竖直缠绕＋竖直缠绕的纤维缠绕方式具有较好的力学性能，表明纤维竖直缠绕方式更适宜承受压缩载荷。因此，设计两层交错式的纤维缠绕方式能够结合两种缠绕方式的优点，从而发挥其更好的力学性能。

4　结语

本文基于对东方龙虱鞘翅微观结构的分析，设计出了一种具有层状纤维缠绕方式的仿生轻质结构，并利用有限元法对该结构模型进行数值分析，给出结构模型的三种力学性能曲线，通过与单一普通树脂材料的相同结构比较可知，具有纤维缠绕层的仿生轻质结构的三种力学性能均明显优于普通树脂材料的相同结构。同时，制备出了仿鞘翅轻质结构模型，并进行了准静态压缩实验，将实验结果与有限元分析结果进行比较，证明了有限元分析结果的可靠性。在此基础上，进一步分析比较了两种不同纤维缠绕方式的结构力学特性。通过比较可知，不同纤维缠绕方式的结构具有不同的力学优越性，这说明生物结构中存在这两种不同纤维缠绕方式是合理的，同时也为我们仿生轻质结构的设计与开发开拓了新思路。

参考文献：

[1] Chen Bin, Peng Xianghe, Fan Jinghong. Round－hole－fiber Distribution in Insect Cuticle and Biomimetic Research[J]. JSME International Journal, 2004, 47(4): 1128-1132.

[2] 宋文伟，郭策，戴振东. 仿甲虫鞘翅轻质结构的力学性能研究[J]. 机械科学与技术，2010(10)：23-26.

[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] Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Yasuhisa E, et al. Distribution of Trabeculae and Elytral Surface Structures of the Horned Beetle(Allomyrina Dichotoma)[J]. Insect Science, 2002, 9(1): 55-61.

[5] Chen Jinxiang, Ni Qingqing, Xu Yinglian, et al. Lightweight Composite Structures in the Forewings of Beetles[J]. Composite Structures, 2007, 79(3): 331-337.

[6] Chen Jinxiang, Dai Guangze, Xu Yinglian, et al. Basic Study of Biomimetic Composite Materials in the Forewings of Beetles[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 483/484: 625-628.

[7] 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.

[8] 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[J]. 自然科学进展，2006，16(3)：365-369.

[9] 杨志贤，戴振东，郭策. 东方龙虱鞘翅：形态学及力学性能研究[J]，科学通报，2009，54(12)：1767-1772.

[10] 杨志贤. 甲虫鞘翅材料的微结构、力学性能及联接机制的仿生研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2009.

[11] 徐永军，李敏，战颂，等. 蜂窝结构抗拉压性能实验研究及数值模拟[J]. 实验室研究与探索，2007，26(11)：222-225.

[12] 左中鹅，王瑞，徐磊. 基于有限单元法的平纹织物复合材料强度预测：复合材料层合板拉伸过程的有限元分析[J]. 纺织学报，2010，31(1)：64-67.

[13] 韩霞，郝南海. 钢管剪切的有限元分析[J]. 机械制造与研究，2009，38(5)：15-17.

（编辑　王艳丽）

作者简介：周　怡，女，1986 年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。研究方向为仿生轻质结构设计与分析。**郭　策**（通讯作者），女，1971 年生。南京航空航天大学机电学院教授。**朱春生**，男，1978 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。**戴振东**，男，1961 年生。南京航空航天大学教授、博士研究生导师。