马玉秋,郭策,陈光明,等.仿生轻质高强韧夹芯结构设计及其韧性性能分析[J].机械科学与技术,2022,41(5):801-807

仿生轻质高强韧夹芯结构设计及其韧性性能分析

马玉秋[1],郭策*,[1],陈光明[1],戴宁[2],管吉钢[3],何湘鹏[1]
(1. 南京航空航天大学 仿生结构与材料防护研究所,南京 210016;
2. 南京航空航天大学 机电学院,南京 210016;
3. 南京航空航天大学 航天学院,南京 210016)

摘要:复合材料轻质夹芯结构因其优异的力学性能被广泛应用于航空航天领域。本文在对白星花金龟鞘翅断面形貌观测的基础上,根据鞘翅表皮层中纤维铺排方式以及微观结构特征设计了仿鞘翅轻质高韧夹芯结构。并利用有限元法对复合材料双螺旋铺层面板以及仿生鞘翅夹芯结构进行三点弯曲力学性能分析,对结构韧性进行分析和评价;进一步对夹芯结构进行承压性能分析。结果表明与传统蜂窝夹芯结构相比,所设计的仿鞘翅复合材料夹芯结构具有更优异的韧性,且与蜂窝夹芯结构承压能力相当。该研究对新型轻质高强高韧复合材料结构设计具有一定的参考和指导意义。

关键词:鞘翅;轻质结构;有限元;三点弯曲;断裂韧性
中图分类号:TG156 **文献标志码**:A
DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20200392 **文章编号**:1003-8728(2022)05-0801-07

OSID 码

Design and Toughness Analysis of Bionic Lightweight Sandwich Structure with High Strength and Toughness

MA Yuqiu[1], GUO Ce*,[1], CHEN Guangming[1], DAI Ning[2], GUAN Jigang[3], HE Xiangpeng[1]
(1. Institute of Bioinspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Composite lightweight sandwich structures are widely used in aerospace because of their excellent mechanical properties. Based on the microstructure of the cross section of Protaetia orentalis's elytra, one bio-inspired light sandwich structure with high toughness was designed according to the characteristics of the fibres arrangement and microstructure in elytra. The three-point bending mechanical properties of bionic double-helix laminate and bionic sandwich structure are studied with finite element method, and the fracture toughness was investigated and evaluated. The compression performance of sandwich structure is further analyzed. The results show that bionic sandwich structures have better toughness and the capacity of bearing comparing with the honeycomb sandwich structure. Moreover, the present study has certain reference and guiding significance for designing new composites with high strength and fracture toughness.

Keywords: elytra; lightweight structure; finite element; three-point bending; fracture toughness

自然界生物为适应自身生存的环境,在经历长期的进化后形成各具特色的材料结构和性能,如甲虫在经过上亿年进化后形成高强高韧的轻质结构材料-鞘翅,鞘翅优异的力学性能使其成为航空航天和深空探测领域轻质、高强韧结构材料设计和优化的

收稿日期:2020-08-15
基金项目:国家自然科学基金项目(51875282)
作者简介:马玉秋(1997-),硕士研究生,研究方向为轻质多功能仿生结构与材料,yuqiu_ma@163.com
* **通信作者**:郭策,教授,博士生导师,guozc@nuaa.edu.cn

理想仿生对象[1-2]。

甲虫鞘翅所具有的独特结构特点使其具有多种优异的性能,目前关于甲虫鞘翅的研究主要集中在3个方面[3]:1)鞘翅表面形貌研究;2)断面微结构及其仿生结构力学性能研究;3)鞘翅仿生复合材料研究。Zaheri 等[4]探索无花果虫鞘翅发现成虫鞘翅中纤维呈现双螺旋铺排方式,而幼虫时期纤维正交铺排,并使用 3D 打印技术验证了纤维铺排方式对应鞘翅的功能适应性;Gorb[5]研究认为,昆虫表皮结构非常特殊,这使其能够在垂直的光滑表面上进行活动,表皮的附着原理随结构的差异而不同,常见的附着结构大致可分为夹、钩、黏性分泌物、锁、吸盘、垫、膨胀锚、摩擦等。这些对昆虫表面结构的研究为进一步设计开发仿生结构,为制备具有类昆虫表面结构的材料表面奠定了基础;吉林大学任露泉等[6]以臭蜣螂甲虫为研究对象,通过观测鞘翅表面形貌来分析非光滑凸起的分布规律,发现蜣螂鞘翅表面的非光滑几何结构的单元大小符合高斯型分布,并分析了非光滑单元结构分布对表面减粘降阻的影响;杨志贤等[7]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;陆振玉等[8]将一种新型的仿甲虫鞘翅轻质结构应用于飞机大开口区的筋板结构优化设计,优化后开口区加筋结构总质量减少15%,屈曲因子较优化前提高 21%,结构最大位移较优化前减少 20%;周怡等[9]根据东方龙虱鞘翅微观结构设计出具有层状纤维缠绕方式的仿生轻质结构,通过与无纤维缠绕的结构分析对比得出有纤维缠绕的仿生轻质结构力学性能更加优异。

笔者以白星花金龟鞘翅为研究对象,利用扫描电镜(SEM)对鞘翅的微观结构进行观察,发现在鞘翅表皮层中,几丁质纤维存在双螺旋铺排以及经纬交织两种铺排方式,并在鞘翅的横断面中观察到空腔小柱结构。根据鞘翅微观结构特征,本文设计了两种铺层角度的仿生复合材料层合板,利用 ABAQUS/Explicit 对仿生层合板进行三点弯曲力学性能分析,并评价其韧性;进一步根据鞘翅断面中的空腔小柱结构设计出两种仿鞘翅芯体结构,将仿生纤维双螺旋铺排层合板和仿生芯体结构组合,形成新型高韧性仿鞘翅夹芯结构,并以同质量的蜂窝夹芯结构为参考结构,开展结构断裂韧性的评价与对比研究;并进一步与蜂窝结构进行压缩性能对比,以测评所设计的仿鞘翅轻质结构的承压能力。

1 甲虫鞘翅纤维观测

1.1 甲虫鞘翅力学性能

由于生物飞行和人类航空航天对材料比强度、比刚度及韧性有着共同的要求,经过高度优化的生物自然复合材料——鞘翅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[10-11]。杨志贤等[12]对 4 种不同种类的鞘翅进行材料力性能测试,得到白星花金龟平均硬度为 0.44 GPa,平均弹性模量为 9.08 GPa;陈斌等[13]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比常规铺层层合板有更高的断裂韧性和强度。这些都表明白星花金龟鞘翅是一种轻质、高比强度生物复合材料,为本文设计仿生轻质高强韧复合材料提供了生物模板。

1.2 鞘翅断面微观结构

甲虫鞘翅内部的微观结构及生物材料的拓扑分布规律与其力学性能密切相关。白星花金龟鞘翅横断面的微结构如图 1 所示,鞘翅的上、下表皮层铺设 10 数层厚约 2 μm 的几丁质纤维层,构成鞘翅的背壁和腹壁结构,而鞘翅相邻层中几丁质纤维铺层形式有两种:经纬交织和双螺旋铺层。经纬交织特征为表皮层中部分区域的相邻纤维层正交铺排,而双螺旋铺层结构特征为两相邻铺层纤维取向的夹角约为 80°,两相间层纤维方向的夹角相差约 30°(图 1c)),Zaheri 指出纤维这种双螺旋铺层体现了功能适应性,并且有效提高了鞘翅的韧性[4];在鞘翅断面可见其背壁和腹壁连接着直径为 60~75 μm 的小柱结构(图 1d)),同时小柱与小柱之间分布着加强筋板(图 1e)、蓝色方框),这种小柱-加强筋的结构特征能够有效减轻鞘翅的重量,同时保证其有足够的强度和韧性[14]。

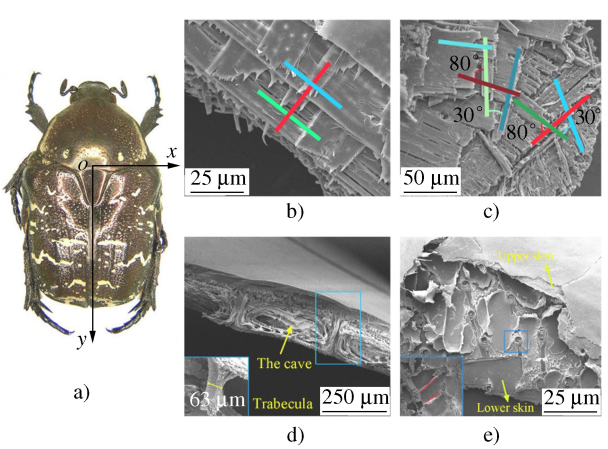
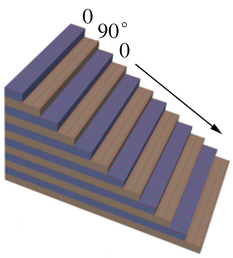


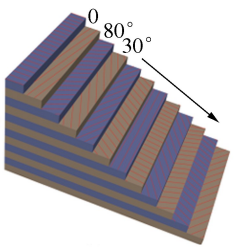
图 1 白星花金龟鞘翅断面微观结构图

1.3　仿甲虫鞘翅显微双螺旋铺排复合材料设计

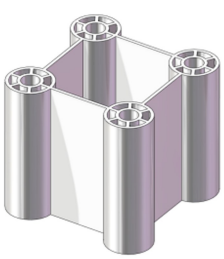
从上述对白星花金龟鞘翅的微观结构特征出发,进行仿鞘翅轻质高韧夹芯结构设计。由于生物体的复杂性,很难而且也没有必要完全原封不动地照搬生物模型,应进行合理简化。本文依据白星花金龟鞘翅上表皮中观测到的纤维双螺旋铺层与经纬交织两种铺排方式设计了两种仿生复合材料层合板,两种仿生层合板铺层角度分别为$[0/90]_6$和[0/80/30/110/60/140/90/170/120/200/150/230](如图 2a)、图 2b)所示);以碳纤维-环氧树脂复合材料为材料[15],研究铺层角度对结构断裂韧性的影响。



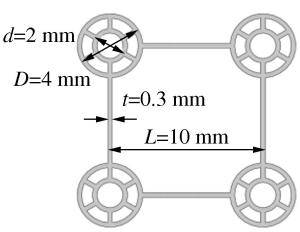
a) 碳纤维板铺层示意图



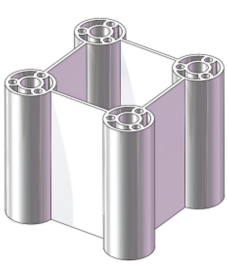
b) 碳纤维板铺层示意图



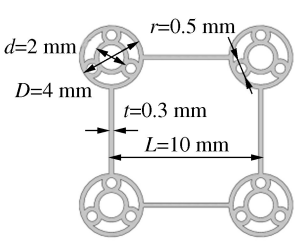
c) 基于白星花金龟鞘翅结构设计的轻质仿生结构



d) 结构尺寸参数



e) 基于白星花金龟鞘翅结构设计的轻质仿生结构



f) 结构尺寸参数

图 2　两种层合板的有限元模型

1.4　芯体结构设计

白星花金龟鞘翅中小柱内部是蛋白质芯,外部由几丁质纤维缠绕而成,鞘翅的小柱-加强筋结构是保证结构强度和减轻结构重量的主要因素[7,13-14]。基于这种鞘翅断面的微观结构特征,对小柱-加强筋结构进行适当简化,由此提出两种新型仿白星花金龟鞘翅夹芯结构,两种芯体结构均由 4 个空心小柱构成的正方形单元排布而成,芯体结构Ⅰ的空心小柱在内外壁周向均匀分布有薄板状加强筋,如图 2c)所示;芯体结构Ⅱ的空心小柱内外壁周向则分布有柱状加强筋,如图 2e)所示;芯体单元的结构尺寸参数如图 2d)、图 2f)所示。

2　结构强韧性分析

2.1　韧性的评价

韧性是结构材料在断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力[16],包括断裂韧性和冲击韧性。航空航天飞行器在飞行过程中,长期经受复杂载荷作用,极易发生断裂失效,因此研究具有良好抗断裂韧性的复合夹芯结构对于航天器的发展具有重要意义。

断裂韧性的评价指标主要有 K_{IC}、J 积分、能量吸收 U 等[16-17],根据文献,可通过对夹芯结构进行三点弯曲力学性能分析,并计算曲线下的积分面积来表征结构的断裂韧性[17-20]。

$$U = \int_0^{\delta} F \mathrm{d}\delta \tag{1}$$

式中:δ 为位移;F 为载荷。

2.2　层合板三点弯曲有限元分析

2.2.1　有限元模型的建立

分别建立如图 2 所示的两种层合板的有限元模型。采用商用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对复合材料试件的三点弯曲过程进行数值模拟。参照 GBT/1449《纤维增强塑料弯曲性能试验方法》[21],选定碳纤维复合材料层合板三维模型尺寸为 80 mm×15 mm×1.92 mm,共有 12 层,铺层角度参考节 1.3;每个单层板使用壳单元 SC8R 来模拟,在层与层之间设置插入 3D 无厚度粘接层,粘接单元类型为 COH3D8(cohesive 单元)[22-23],压头和支撑座为刚性体,单元类型为 R3D4;边界条件为两端简在上压头施加向下位移载荷,层合板有限元计算模型见图 3。



图 3　层合板有限元模型

2.2.2　材料属性

材料采用碳纤维 T300,其材料属性如图见表 1,Cohesive 单元的属性见表 2。

表 1 单层碳纤维板材料参数及力学性能

ρ/ (kg·m^{-3})	$E_1=E_2$/ MPa	E_3/ MPa	G_{12}/ MPa	$G_{13}=G_{23}$/ MPa	v/ MPa	X_T/ MPa	X_C/ MPa	Y_T/ MPa	Y_C/ MPa	S_{12}/ MPa	$S_{23}=S_{13}$/ MPa
1.5	10 500	8 000	4 320	3 230	0.3	314	314	61	180	73	73

表 2 Cohesive 界面层属性参数[23]

ρ/ (kg·m^{-3})	$\tau_n^{(s)}$/ MPa	$\tau_s^{(s)}$/ MPa	$\tau_t^{(s)}$/ MPa	$K_n^{(s)}$/ MPa	$K_s^{(s)}$/ MPa	$K_t^{(s)}$/ MPa	$G_{\mathrm{I}C}$/ (N·mm^{-1})	$G_{\mathrm{II}C}$/ (N·mm^{-1})	$G_{\mathrm{III}C}$/ (N·mm^{-1})
1.3	11	17	17	850	850	314	0.3	0.8	0.8

2.2.3 计算结果

在两种复合材料层合板有限元模型中的上压头设置参考点,输出约束反力 *RF* 和位移 *U*[24]。从两者的位移-载荷图中可以看出:初始两者的载荷均呈现明显的线性变化,随之复合材料内部出现局部的纤维断裂,由于纤维在复合材料中起增强作用,纤维断裂意味着结构局部承载能力的削弱,压头继续下压,纤维层继续发生断裂,载荷出现波动。

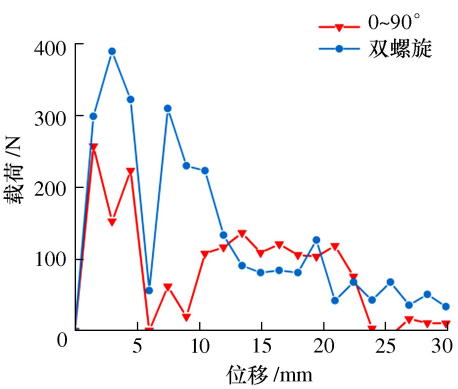


图 4 层合板三点弯曲位移-载荷曲线

由两种层合板结构的载荷-位移曲线所包络的面积积分可知,仿生双螺旋层合板的韧性比 0~90°更加优异。具体结果见表 3。

表 3 两种层合板力学性能对比

类型	韧性/J
双螺旋	4.12
经纬交织(0~90°)	2.60

2.3 仿鞘翅夹芯结构断裂韧性的有限元分析

2.3.1 仿鞘翅夹芯结构的有限元模型建立

将具有仿生双螺旋铺层层合板的仿生轻质夹芯结构设计成梁结构,并按照 GB/T 1456-2005《夹层结构弯曲性能试验方法》[25]确定梁的结构尺寸为 260 mm×60 mm×15.92 mm,跨距为 160 mm,压头和支撑座半径为 5 mm。建立仿生夹芯梁的有限元分析模型,使用壳单元 S4R 划分面板和芯体结构,芯体和面板之间的接触设置为点-面绑定接触,压头和支撑座为刚性体,单元类型为 R3D4,支撑座为支点简支,在上压头施加向下位移载荷,有限元计算模型见图 5。

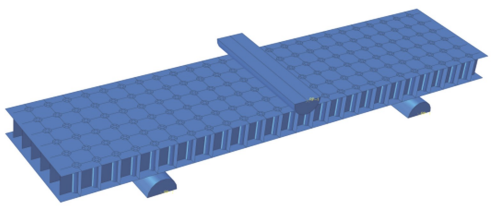


图 5 仿生夹芯结构的有限元模型

2.3.2 芯体结构材料的选择及属性

考虑芯体单元结构及其阵列的复杂性,本文拟采用 3D 打印技术制备,材料选择钛合金 TC4[26],其材料属性见表 4。

表 4 TC4 力学性能

ρ/(kg·m^{-3})	E/MPa	v	σ_s/MPa
1.3	118 000	0.3	862

2.3.3 有限元分析

按照 2.1 节断裂韧性的计算公式对本文提出的仿鞘翅夹芯结构与蜂窝结构的韧性在质量相当的条件下进行对比分析。首先对 3 种结构进行三点弯曲力学性能分析,得到其应力云图如图 6 和载荷-位移曲线图 7 所示。从图 6 中可以看出,随着位移载荷的施加,夹芯结构的面板与芯体均开始出现轻微破坏,破坏区主要集中在压头区域下方。从图 7 载荷-位移曲线图中可以看出:仿生轻质夹芯结构Ⅰ和Ⅱ型的初始破坏载荷约为 12 500 N,而蜂窝结构的破坏载荷约为 10 000 N,仿鞘翅结构的抗弯能力明显优于蜂窝夹芯结构。进一步按照公式(1)计算 3 种结构的断裂韧性,可知蜂窝结构的韧性最低为207.35 J,而仿鞘翅结构Ⅱ的断裂韧性最高为292.49 J。

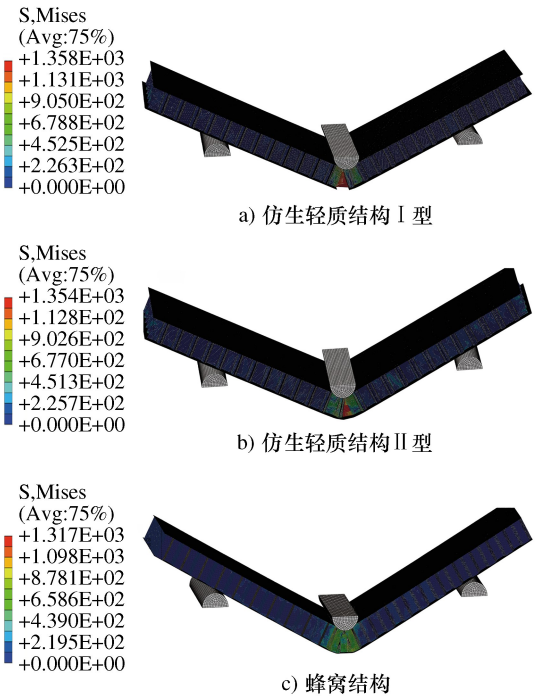


图 6　3 种夹芯结构三点弯曲应力云图

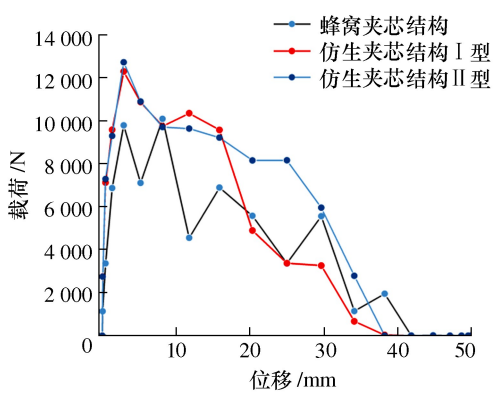


图 7　3 种夹芯结构位移-载荷曲线

具体结果见图 8，仿生夹芯结构Ⅱ型的断裂韧性比蜂窝结构提高 41%，由此可见，本文所设计的仿生轻质夹芯结构具有优异的韧性。

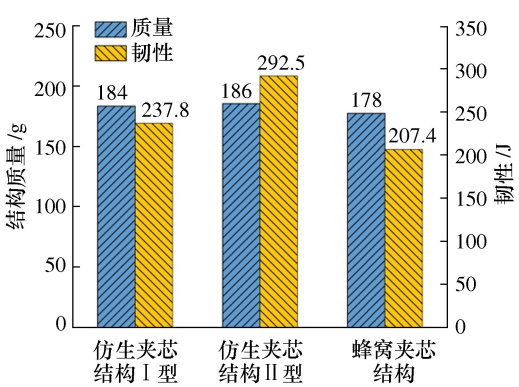


图 8　3 种夹芯结构韧性分析数据

3　芯体结构的承压能力分析

3.1　有限元模型的建立

本文以工程中常用的蜂窝结构作为参照结构，对比分析所设计的两种仿生轻质夹芯结构的承压性能。在 ABAQUS/Explicit 中分别建立仿鞘翅夹芯结构和蜂窝夹芯结构的有限元模型，模型均采用 S4R 壳单元离散，上、下面板设为刚体，单元类型为 R3D4，在上面板施加位移载荷，下面板固定。

3.2　计算结果分析

为了分析比较本文所提出的两种仿鞘翅结构与蜂窝结构的抗压能力，提取 3 种每个子步下的底面约束反力和位移，即可得到相应结构模型的载荷-位移曲线，如图 9d）所示，一开始载荷力呈明显的线性变化，即处于线弹性阶段；而当达到临界屈曲后载荷随位移的变化非常小，进入了弹塑性和塑性坍塌阶段，具体结果见图 10。

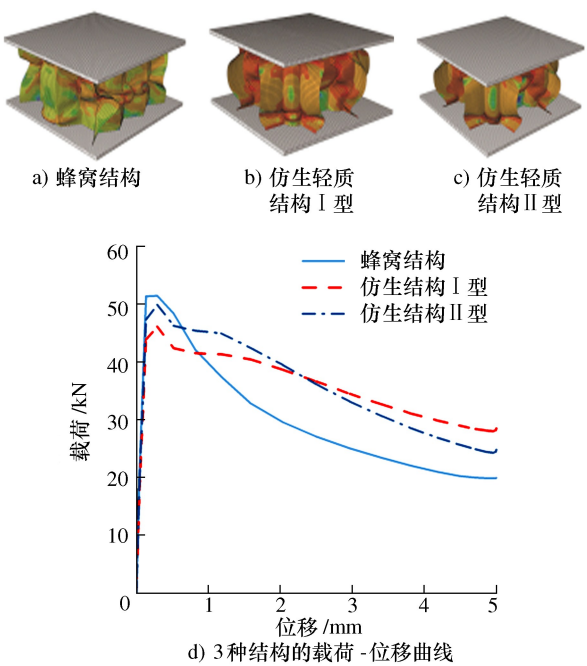


图 9　3 种结构模型及其位移-载荷曲线

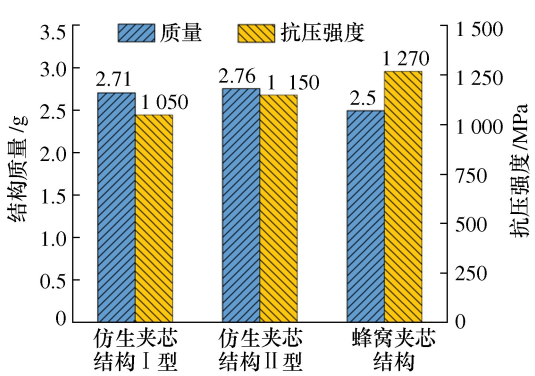


图 10　3 种夹芯结构压缩力学性能对比

由图 10 可知,在质量相近的条件下,仿生轻质结构Ⅰ、Ⅱ的压缩强度与蜂窝结构的抗压能力接近,这说明本文所设计的轻质仿鞘翅夹芯结构不仅具有优异的断裂韧性,而且具有较好的承载能力。

4 结论

1) 本文通过对白星花金龟鞘翅的形态学观测,发现鞘翅表皮层中纤维具有双螺旋和经纬两种铺层方式,对比分析了两种铺层层合板的断裂韧性,选择双螺旋层合板作为面板,并根据鞘翅断面微观结构提出两种仿生芯体结构,将面板、芯体结合形成新型仿生夹芯结构。

2) 确定了断裂韧性的评价方法,对断裂韧性分析的结果表明本文所提出的仿生夹芯结构Ⅱ的断裂韧性明显优于蜂窝夹芯结构,韧性提高了约为 41%;对承压性能的分析结果表明仿生芯体结构与蜂窝结构的承压能力相近。可见,本文所设计的轻质仿鞘翅夹芯结构不仅具有优异的断裂韧性,而且具有较好的承载能力。

3) 本文初步完成了仿生轻质高强韧夹芯结构的设计和仿真分析工作,后续将利用 3D 打印金属工艺技术制备仿生芯体结构,完成仿生轻质夹芯结构的试验部分,为工程实践应用的轻质高强高韧结构设计提供新的方法和理念。

[参考文献]

[1] SUN J Y, LIU C, DU H Y, et al. Design of a bionic aviation material based on the microstructure of beetle′s elytra [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017,114:62-72

[2] CAI Z B, LI Z Y, DING Y, et al. Preparation and impact resistance performance of bionic sandwich structure inspired from beetle forewing[J]. Composites Part B: Engineering, 2019,161:490-501

[3] SUN J Y, BHUSHAN B. Structure and mechanical properties of beetle wings: a review[J]. RSC Advances, 2012,2(33):12606-12623

[4] ZAHERI A, FENNER J S, RUSSELL B P, et al. Revealing the mechanics of helicoidal composites through additive manufacturing and beetle developmental stage analysis [J]. Advanced Functional Materials, 2018,28(33):1803073

[5] GORB S N. Walking on the ceiling: structures, functional principles, and ecological implications [J]. Arthropod Structure & Development, 2004,33(1):1-2

[6] 任露泉,李建桥,陈秉聪.非光滑表面的仿生降阻研究[J].科学通报,1995,40(19):1812-1814
REN L Q, LI J Q, CHEN B C. Study on bionic reducing resistance on non-smooth surface[J]. Chinese Science Bulletin, 1995,40(19):1812-1814 (in Chinese)

[7] 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
YANG Z X, DAI Z D, GUO C. Morphology and mechanical properties of Cybister elytra [J]. Chinese Science Bulletin, 2010,55(8):771-776

[8] 郭策,陆振玉,吴元琦.仿生轻质结构在飞机大开口区的应用及其优化设计[J].机械工程学报,2017,53(13):125-135
GUO C, LU Z Y, WU Y Q. The application of biomimetic lightweight sandwich panel to the aircraft structure with large cutout and its optimum design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017,53(13):125-135 (in Chinese)

[9] 周怡,郭策,朱春生,等.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[J].中国机械工程,2011,22(16):1969-1973
ZHOU Y, GUO C, SHU C S, et al. Study on design and mechanics properties of beetle′s elytra-inspired lightweight structures with filament winding[J]. China Mechanical Engineering, 2011,22(16):1969-1973 (in Chinese)

[10] KUNDANATI L, SIGNETTI S, GUPTA H S, et al. Multilayer stag beetle elytra perform better under external loading via non-symmetric bending properties[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2018,15(144):20180427

[11] CHENG L, THOMAS A, GLANCEY J L, et al. Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011,42(2):211-220

[12] 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
CHEN B, PENG X H, FAN J H. Microstructure of natural biocomposites and research of biomimetic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000,

17(3):59-62 (in Chinese)

[13] 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[J].复合材料学报,2007,24(2):92-98
YANG Z X, WANG W Y, YU Q Q, et al. Measurements on mechanical parameters and studies on microstructure of elytra in beetles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007,24(2):92-98 (in Chinese)

[14] YU X D, PAN L C, CHEN J X, et al. Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular-honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra[J]. Journal of Materials Science, 2018, 54(3):2193-2204

[15] GRUNENFELDER L K, SUKSANGPANYA N, SALINAS C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites [J]. Acta Biomaterialia, 2014,10(9):3997-4008

[16] RITCHIE R O. The conflicts between strength and toughness [J]. Nature Materials, 2011, 10 (11): 817-822

[17] MENG L, LIANG H L, YU H C, et al. The energy absorption and bearing capacity of light-weight bio-inspired structures produced by selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2019,93:170-182

[18] CHANG Y, CHEN P Y. Hierarchical structure and mechanical properties of snake (Naja atra) and turtle (Ocadia sinensis) eggshells[J]. Acta Biomaterialia, 2016,31:33-49

[19] APICHATTRABRUT T, RAVI-CHANDAR K. Helicoidal composites[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2006,13(1):61-76

[20] MENEZES-SOBRINHO I L. Fracture toughness in fibrous materials[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2002,65(1 Pt 1):011502

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 1449-2005 纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].北京:中国标准出版社,2005
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Commission. GB/T 1449-2005 Fibre-reinforced plastic composites-determination of flexural properties [S]. Beijing: China Standards Press, 2005 (in Chinese)

[22] CHAO X J, QI L H, TIAN W L, et al. Evaluation for interfacial fracture of fiber-reinforced pyrocarbon matrix composites by using a zero-thickness cohesive approach[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,820:153378

[23] 蒋振,文鹤鸣.粘结单元在模拟 FRP 层合板低速冲击响应中的应用[J].爆炸与冲击,2019,39(4):043202, doi:10.11883/bzycj-2017-0245
JIANG Z, WEN H M. Application of cohesive elements in modeling the low-velocity impact response and failure of fiber reinforced plastic laminates[J]. Explosion And Shock Waves, 2019,39(4):043202, doi: 10.11883/bzycj-2017-0245 (in Chinese)

[24] 杨志贤,于娜,刘泽华.非贯通球形空腔型轻质仿生结构的设计及其力学性能[J].复合材料学报,2015(3):848-855
YANG Z X, YU N, LIU Z H. Design and mechanical properties of lightweight bionic structures with non-connected spherical lumens [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015,32(3):848-855 (in Chinese)

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检验总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 1456-2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S].北京:中国标准出版社,2005
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Commission. GB/T 1456-2005 Test method for flexural properties of sandwich constructions[S]. Beijing: China Standards Press, 2005 (in Chinese)

[26] 高健,刘立彬,贺韡,等.航空钛合金零件激光选区熔化 3D 打印技术应用的关键基础研究[J].航空制造技术,2018,61(23):87-90,95
GAO J, LIU L B, HE W, et al. Research on key application problems of selective laser melting 3D printing technology in aeronautical titanium alloy parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018,61(23): 87-90,95 (in Chinese)