

高强韧仿生螺旋复合材料超结构设计与分析*

王 昕¹, 李 振¹, 季海波¹, 杨宏俊², 李秉洋³, 王鹏飞¹

(1. 中国航天科技创新研究院 先进材料与能源研究中心, 北京 100088;

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

3. 北京大学 工学院, 北京 100871)

摘要: 随着人类航天活动的日益频繁, 轨道空间环境不断恶化, 提升航天器结构强度和韧性具有重要的现实意义. 该文设计了具有中面对称特性的高强韧仿生螺旋复合材料超结构, 开发了相应的热压制备工艺. 通过准静态压痕性能测试, 以荷载-位移曲线、峰值力、失效位移、刚度与能量吸收为关键力学指标, 分别在 37 层与 73 层下对正交、准各向同性以及 5°, 10°, 20°螺旋铺层的碳纤维增强复合材料(carbon fibre reinforced polymer, CFRP)超结构进行了性能表征, 并分析了破坏模式与失效机理. 研究表明: 相较于传统铺层方法, 采用对称螺旋铺层方式能够有效减小层间应力, 显著提升超结构的准静态压痕性能; 尤其是当螺旋角设定为 10°时, 超结构在峰值载荷和能量吸收方面得到了卓越的性能提升. 该研究成果不仅为航天领域内高性能复合材料超结构的设计与制造提供了理论支持, 同时也为其实际应用奠定了实践基础.

关键词: 碳纤维增强复合材料; 仿生螺旋铺层设计; 准静态压痕性能; 航天器; 超结构

中图分类号: V25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450103

Design and Analysis of High Strength and Toughness Bio-Inspired Helicoidal Composite Metastructures

WANG Xin¹, LI Zhen¹, JI Haibo¹,

YANG Hongjun², LI Bingyang³, WANG Pengfei¹

(1. *Advanced Materials and Energy Center, China Academy of Aerospace Science and Innovation,*

Beijing 100088, P.R.China;

2. *China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, P.R.China;*

3. *College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, P.R.China)*

Abstract: With the increasing frequency of human space activities, the orbital space environment is deteriorating. It is of great practical significance to enhance the strength and toughness of spacecraft structures. High strength & toughness bio-inspired helicoidal composite metastructures with mid-plane symmetry characteristics were designed and a corresponding hot-pressing preparation process was developed. The carbon fibre rein-

* 收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(12402407; U22B2013); 北京市科技新星项目(20230484287)

作者简介: 王昕(1994—), 男, 工程师, 博士(E-mail: wxtj_9449@163.com);

李秉洋(1989—), 男, 高级工程师, 硕士(通讯作者. E-mail: libingyang@stu.pku.edu.cn);

王鹏飞(1985—), 男, 研究员, 博士(通讯作者. E-mail: hvhe@163.com).

引用格式: 王昕, 李振, 季海波, 杨宏俊, 李秉洋, 王鹏飞. 高强韧仿生螺旋复合材料超结构设计与分析[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(8): 1106-1116.

forced polymer metastructures with cross-ply, quasi-isotropic and 5° , 10° and 20° helicoidal lay-ups were characterized by quasi-static indentation performance tests, and the damage modes and the failure mechanisms were analyzed. The load-displacement curves, peak forces, failure displacements, stiffnesses and energy absorptions, were used as the mechanical property measures, with the thicknesses of the structures including 37 and 73 layers. The results show that, compared with the traditional lay-up method, the symmetric helicoidal lay-up can effectively reduce the interlayer stress and significantly improve the quasi-static indentation performances of the metastructures. Especially with a helicoidal angle of 10° , the metastructures have excellent performance enhancement in terms of peak loads and energy absorptions. The research results not only provide a theoretical support for the design and fabrication of high-performance composite metastructures in the aerospace field, but also lay a practical foundation for their practical application.

Key words: carbon fibre reinforced polymer; bio-inspired helicoidal lay-up design; quasi-static indentation property; spacecraft; metastructure

0 引 言

在新时代背景下,建设航天强国已成为我国国家战略的重要组成部分。面对日益复杂和极端的太空环境,航天工程面临着前所未有的挑战,尤其是如何应对并保护航天器免受空间碎片的影响成为了研究的焦点^[1]。随着世界航天发射活动的日益频繁,在轨航天器、废弃物、失效载荷等不断增多,空间碎片数量呈现持续快速增长的趋势^[2]。据统计,目前在轨的大型碎片数量庞大,并且以每年约 5% 的速度持续增长,在地球周围形成了“空间碎片带”^[3]。碳纤维增强复合材料(CFRP)以其高比强度、高比刚度、耐疲劳和耐腐蚀性等优势,已成为航天器结构材料的重要选择^[4-6],如图 1 所示。面对日益恶化的空间碎片环境,提升碳纤维增强复合材料的抗冲击性能是实现航天活动安全可持续发展的基石。

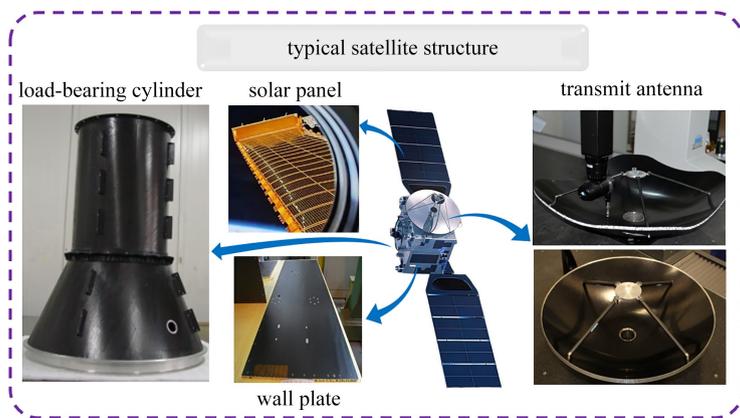


图 1 碳纤维增强复合材料在航天器中的应用

Fig. 1 Carbon fibre reinforced polymers in spacecraft applications

纤维增强复合材料在冲击载荷下容易产生层间分层,这使复合材料在较低的载荷下就发生分层失稳和分层扩展,从而导致结构失效^[7]。目前,提升层压板层间剪切性能的方式主要有缝合、三维编织和植入 Z-pin 等,这些方法虽有效但也存在一定的局限性,包括对材料内部性能的影响及制备工艺的复杂性^[8]。在此背景下,受到自然界中如螳螂虾^[9-12]、龙虾^[13-15]、螃蟹^[16-17]、鲤鱼^[18-19]和甲虫^[20-22]等生物外骨骼或鳞片微观螺旋结构的启发,研究人员发现了一种新的思路:通过在复合材料中引入特定的层间转角来显著减少受载时的层间应力,从而增强层间黏接性能和抗冲击能力,实现高强度与高韧性复合材料设计。生物中的螺旋结构最早由 Bouligand^[23]于 1965 年发现,后来螺旋结构的优异性能得到了验证;Wang 等^[24]使用显微镜和光谱观察分析由螺旋构型产生的增韧机制,发现通过调整不同的纤维排列和成分,可以实现纵向应力的转移,从而有效

提升纵向抗压能力,并避免结构的灾难性破坏.此外,Liu等^[25-29]研究指出,仿生螺旋复合材料的准静态压痕性能与其厚度、螺旋角度、基体种类、材料种类等因素有关.Yin等^[30]使用3D打印技术模拟了螳螂虾螯棒里观察到的空隙特征,进一步提升了吸收能量的能力,他们后续又受腔棘鱼启发^[31],研究发现双螺旋结构比单螺旋结构吸能效果更好,且其在失效模式下对纤维取向不敏感,更易于设计.

为了深入探究仿生螺旋复合材料相较于传统铺层复合材料的力学性能提升和强化机理,研究人员提出了各种复合材料铺层构型,包括传统的正交铺层、准各向同性铺层、单层线性螺旋等.然而,现有研究聚焦于自然的仿生结构,其相对于中平面具有反对称性,该结构可能会在固化过程中产生耦合效应导致翘曲缺陷,影响结构的实际应用.因此,本研究设计和制备了具有中面对称特性的高强韧仿生螺旋复合材料超结构,在37层与73层厚度下对正交、准各向同性以及 5° 、 10° 、 20° 螺旋铺层的碳纤维增强复合材料超结构进行了准静态压痕性能表征,并分析了结构的破坏模式与力学机理.

1 仿生螺旋复合材料超结构铺层设计方法

基于经典层合板理论,局部坐标下层合板刚度矩阵可以表达为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} C_{11} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{22} = E_2(1 - \nu_{31}\nu_{13}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{33} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{12} = E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{13} = E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{23} = E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}) / (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}), \\ C_{44} = G_{23}, C_{55} = G_{13}, C_{66} = G_{12}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_i, G_{ij}, ν_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 分别为材料各方向的弹性模量、剪切模量与 Poisson 比.利用以下转换矩阵可以得出每个单层在全局坐标系下的局部刚度矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix}, \quad m = \cos \theta, \quad n = \sin \theta, \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{C} \mathbf{T}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{T} 是转换矩阵, θ 是单层的旋转角度, \mathbf{Q} 是全局坐标下的单层刚度矩阵.计算所有单层的刚度矩阵可以计算所有板层的 \mathbf{Q} 矩阵,就能根据以下公式计算出面内刚度矩阵 \mathbf{A} 、耦合刚度矩阵 \mathbf{B} 和弯曲刚度矩阵 \mathbf{D} :

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}), \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i, j = 1, 2, 6, \\ D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), \\ A_{lm} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{lm})_k (h_k - h_{k-1}), \quad l, m = 4, 5, \end{cases} \quad (5)$$

式中, N 是薄层的数量, h_k 是从中表面到第 k 层上侧的距离, h_{k-1} 是到第 k 层下侧的距离. 在经典层合板理论中, 层合板广义力与广义中面应变关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^o \\ \boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由式(6)可以发现, 仿生螺旋复合材料的铺层设计方法应当考虑对称性要求, 以使得耦合刚度矩阵 $\mathbf{B} = \mathbf{0}$, 从而避免层合板由拉伸-弯曲、拉伸-扭转、剪切-弯曲、剪切-扭转等耦合效应引起的变形缺陷. 确定铺层总数 n 与螺旋转角 θ , 则计及对称性的螺旋铺层顺序可表示为

$$\begin{cases} \left[\left[\frac{(n-2)\theta}{2} / \frac{(n-4)\theta}{2} / \frac{(n-6)\theta}{2} / \dots / 2\theta / \theta / 0^\circ \right]_s \right], & n = 2k, k \in \mathbf{N}^*, \\ \left[\left[\left(\frac{(n-1)\theta}{2} / \frac{(n-3)\theta}{2} / \frac{(n-5)\theta}{2} / \dots / 2\theta / \theta \right) / 0^\circ \right]_s \right], & n = 2k + 1, k \in \mathbf{N}^*, \end{cases} \quad (7)$$

式中, 下标 s 表示对称. 基于式(7)与文献[25], 本文针对 37 层和 73 层碳纤维增强复合材料, 分别设计了 5 种铺层构型, 其中 37 层的仿生螺旋复合材料超结构可表示为

$$\begin{cases} [(0^\circ/90^\circ)_{9s}/0^\circ], & \text{CP37 (cross-ply)}, \\ [(0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ)_4/0^\circ/90^\circ]_s/0^\circ, & \text{QI37 (quasi-isotropic)}, \\ [(90^\circ/85^\circ/80^\circ/\dots/10^\circ/5^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP37-5}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 5^\circ), \\ [(180^\circ/170^\circ/160^\circ/\dots/20^\circ/10^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP37-10}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 10^\circ), \\ [(360^\circ/340^\circ/320^\circ/\dots/40^\circ/20^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP37-20}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 20^\circ); \end{cases} \quad (8)$$

73 层的仿生螺旋复合材料超结构可表示为

$$\begin{cases} [(0^\circ/90^\circ)_{18s}/0^\circ], & \text{CP73 (cross-ply)}, \\ [(0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ)_{9s}/0^\circ], & \text{QI73 (quasi-isotropic)}, \\ [(180^\circ/175^\circ/170^\circ/\dots/10^\circ/5^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP73-5}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 5^\circ), \\ [(360^\circ/350^\circ/340^\circ/\dots/20^\circ/10^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP73-10}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 10^\circ), \\ [(720^\circ/700^\circ/680^\circ/\dots/40^\circ/20^\circ)_s/0^\circ], & \text{HP73-20}^\circ (\text{bio-inspired helicoidal } \theta = 20^\circ). \end{cases} \quad (9)$$

2 仿生螺旋复合材料超结构制备工艺流程

2.1 基材信息

本文采用单向 12K T700 碳纤维预浸料, 由百丰碳纤维科技有限公司制造, 其基体为 125 °C 固化的 WP-R1200 型号环氧树脂体系, 由惠柏新材料科技股份有限公司生产. 该碳纤维预浸料具有约 0.08 mm 的厚度和 75 g/m² 的面积密度, 其中碳纤维的质量分数达到 60%.

2.2 制备工艺

在样件制备前, 需要将储存于 -4 °C 环境中的碳纤维预浸料取出并在室温下静置 1 h 解冻, 低温储存与室温解冻的过程中均需用塑料袋密封包裹预浸料, 以防止冷凝水或其他环境因素对其造成污染. 仿生螺旋复合材料超结构制备工艺流程如图 2 所示: ① 利用激光切割机技术, 将单层单向碳纤维预浸料按照预先设计的铺层角度精确切割成 88 mm×88 mm 的正方形小片, 确保每一片的尺寸和角度均符合设计要求; ② 按照

既定的铺层序列,通过手工方式精细地铺贴和堆叠每一层切割好的碳纤维预浸料,以形成设计所需的层叠结构;③ 将铺贴好的样件平整地固定在一块粘有脱模布的刚性模具表面,确保在固化过程中样件不会发生位移和变形;④ 将模具及样件置于热压机中,在 140 °C 的温度和 3.8 kPa 的压力环境下维持 2 h,以完成复合材料超结构的固化成型过程。

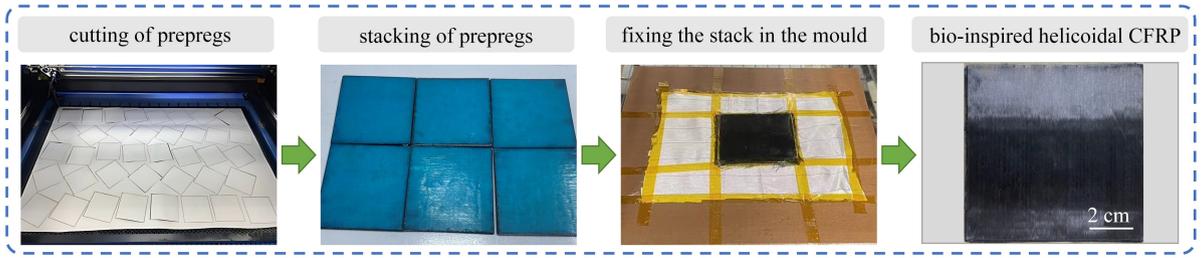


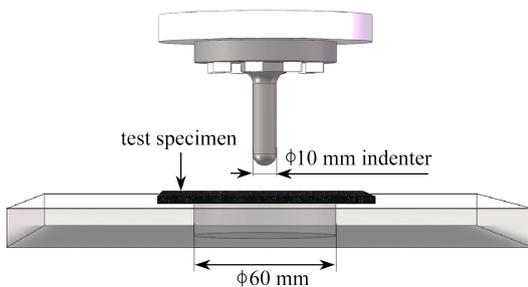
图2 仿生螺旋复合材料超结构制备工艺流程

Fig. 2 The preparation procedure of bio-inspired helicoidal composite metastructures

3 仿生螺旋复合材料超结构力学性能分析

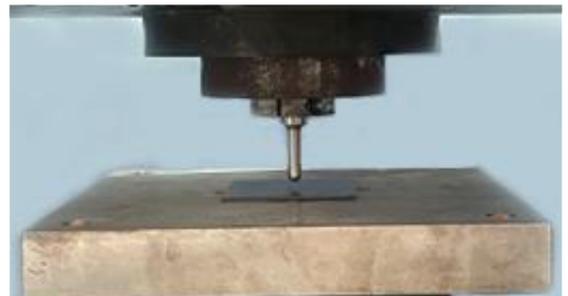
3.1 实验方法

本研究对仿生螺旋复合材料超结构的准静态压痕性能进行测试.参考 ASTM D6264M 标准,实验设置如图 3 所示.试样面内尺寸为 88 mm×88 mm,支撑在通孔直径为 60 mm 的底板一侧.所用压头为直径为 10 mm 的半球形压头,该压头形状有助于模拟复合材料在实际应用中可能遭受的局部冲击或压力.为了确保在整个测试过程中压头的稳定性,使用螺栓将其固定于万能试验机上.实验过程中,万能试验机以 1 mm/min 的恒定速度向下移动压头,并在试样中心施加面外集中载荷。



(a) 示意图

(a) The schematic diagram



(b) 实物图

(b) The actual diagram

图3 仿生螺旋复合材料超结构的准静态压痕测试设置

Fig. 3 The quasi-static indentation test setup for bio-inspired helicoidal composite metastructures

3.2 力学响应

37 层仿生螺旋复合材料超结构试件在实验中的荷载与位移曲线如图 4(a) 所示.本实验定义超结构在面外加载条件下,峰值荷载下降超过 30% 的瞬间为结构失效点.为确保实验结果的可靠性,每种结构均进行了两次实验,图中曲线显示本实验具有良好的重复性.值得注意的是,所有中面对称超结构的荷载-位移曲线均是先近似线性上升,随后增速放缓,并在最终失效前出现多次荷载下降,这一现象与中面对称结构的表现不同,后者仅在破坏点附近出现明显的荷载下降^[30].针对 5 种不同铺层构型,其失效位移、峰值力、刚度和能量吸收情况如图 5 所示.当铺层角度为 10° (标记为 HP37-10°) 时,相比其他铺层配置,显示出最大的峰值荷载、最高的弹性刚度和最佳的能量吸收能力,而失效位移相对较小。

同样地,73 层试件的荷载-位移曲线展示在图 4(b) 中.鉴于之前实验良好的重复性,在此部分中每种结构仅进行了一次实验.5 种铺层构型的失效位移、峰值力、刚度和能量吸收数值绘制在图 6 中.可以发现,HP73-10° 展示出最佳性能,其峰值力比 CP73 提高了 50%,尽管其失效位移并非最大,但其能量吸收能力表

现出色.同时,在传统铺层构型基础上,HP73-10°的性能提升相较于 HP37-10°的性能提升更为突出.此外,当层间角度从 20°(HP73-20°)减少到 10°(HP73-10°)时,峰值载荷达到最大.与 HP37-20°相比,HP73-20°在与相同厚度的最优结果的差距上有所减小.

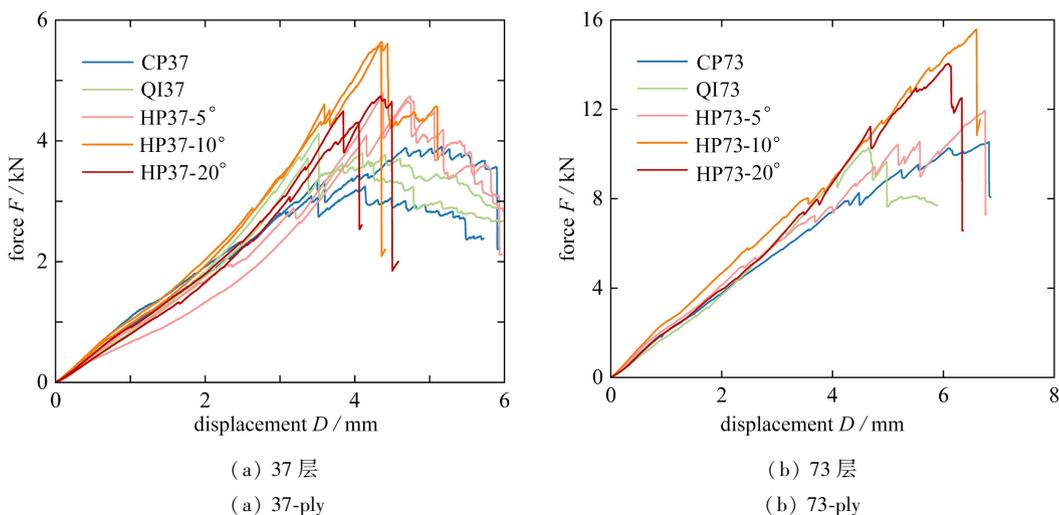


图 4 仿生螺旋复合材料超结构载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of bio-inspired helicoidal composite metastructures

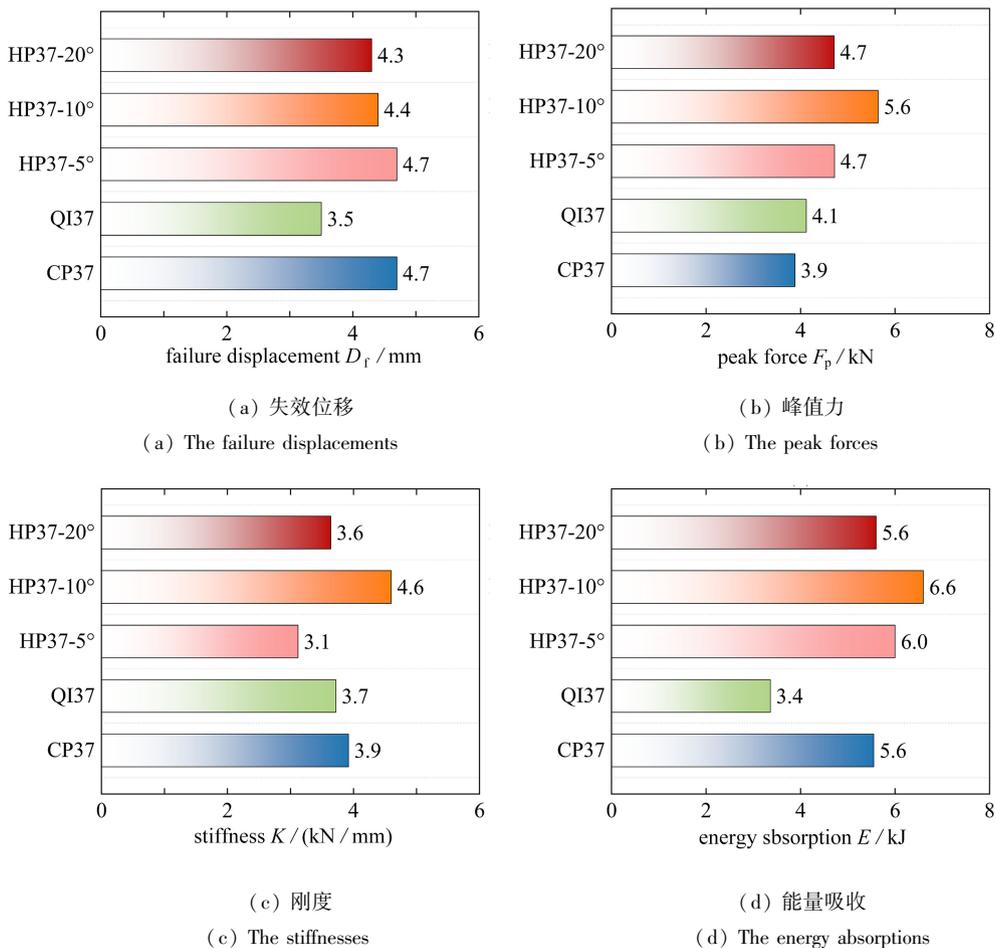


图 5 37 层仿生螺旋复合材料超结构的失效位移、峰值力、刚度与能量吸收

Fig. 5 Failure displacements, peak forces, stiffnesses and energy absorptions of 37-ply bio-inspired helicoidal composite metastructures

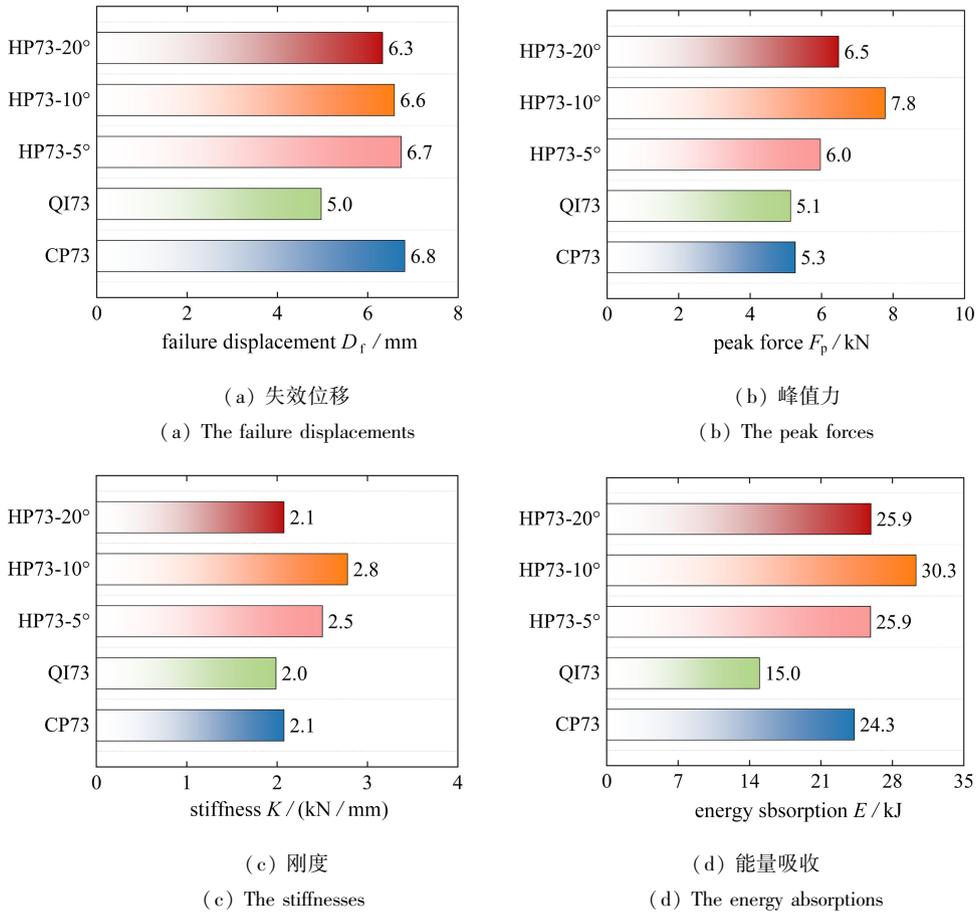


图6 73层仿生螺旋复合材料超结构的失效位移、峰值力、刚度与能量吸收

Fig. 6 Failure displacements, peak forces, stiffnesses and energy absorptions of 73-ply bio-inspired helicoidal composite metastructures

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本。

3.3 破坏模式

3.2 小节表明,正交铺层纤维增强复合材料超结构具有最低的峰值载荷,其原因在于弯曲过程中,位于结构底部的 0° 方向纤维之间容易形成横向裂纹.与之相对,本研究中的对称螺旋铺层由于其更小的层间夹角,能够更有效地利用弯曲拉伸应力,产生抵抗基体分层的阻力,纤维和基体的损伤需要进一步向正面扩展才能触发分层,引起载荷下降^[26].因此,螺旋的构型有效阻止了基体的分层,导致破坏结构需要更多的载荷来产生横向裂纹,提升了峰值力.从图7中可以看出,CP37、QI37与HP37-5°均产生基体劈裂延伸至样件边缘的破坏模式,而HP37-10°与HP37-20°的背面破坏则以纤维断裂为主.由于采取对称铺层方式,HP37-5°内的单向纤维层并没有像HP37-10°和HP37-20°一样均匀转满一圈,导致部分方向的强度薄弱,和CP37与QI37的情况较为相似,并不能因为螺旋提升力学性能.相比之下,HP37-10°由于具有更少的大分层,其力学性能优于HP37-20°.

对于73层超结构,当层间角度从 20° (HP73-20°)减小到 10° (HP73-10°)时,峰值载荷达到最大值.这是由于在较厚的层合板中,基体劈裂的影响变得更加显著,使得结构需要更大螺旋角度来达到横向荷载峰值的最大化^[25].从图8中可以看出,CP73和QI73主要的破坏模式为纤维断裂,与之相比,层间夹角较小的HP73-5°破坏以基体劈裂主,并伴随有少量的纤维断裂,更能抵抗纤维损伤.与之相对,当层间角减小时,螺旋层合板结构会出现大量基体分裂,并延伸至结构边缘.HP73-10°的破坏模式是纤维断裂以及纤维断裂区域内的基体劈裂,无明显主导破坏模式,其力学性能最佳.而HP73-20°主要以纤维断裂为主要破坏模式,并伴有

纤维断裂区域的基体劈裂.现有研究表明:无论层合板结构的材料体系如何,其失效模式都是由螺旋状基体劈裂和基体分层之间的竞争决定的,其次是纤维断裂.而螺旋基体劈裂阻力会随层间角与层厚之比减小或基体韧性减小而减小,所以对于基体较弱或层厚的层合板结构,最佳层间角会增加,反之亦然^[30].

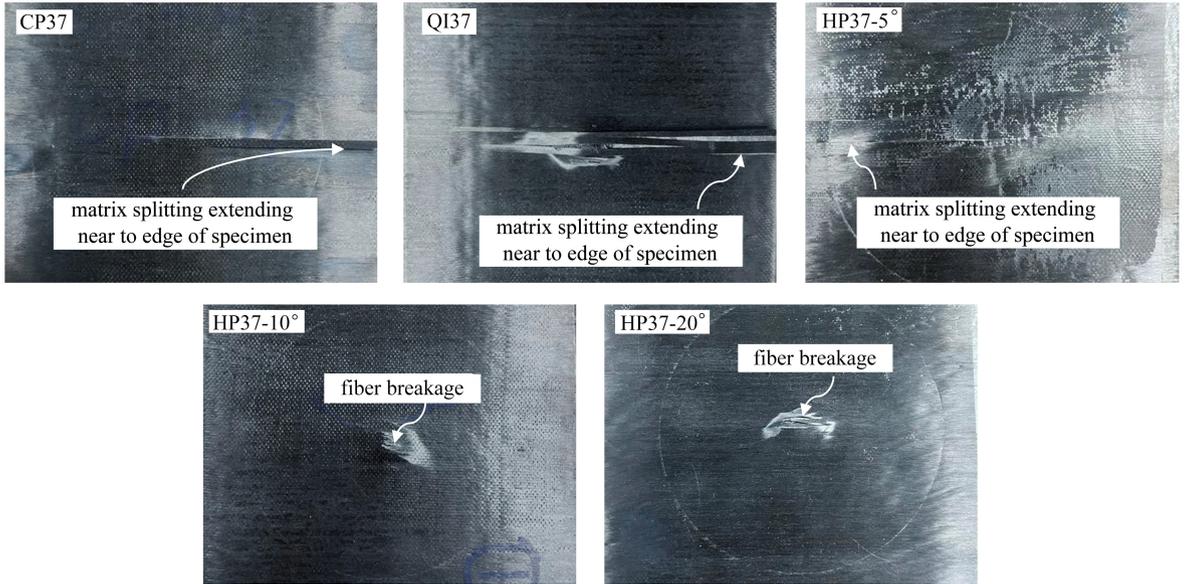


图 7 37 层仿生螺旋复合材料超结构的破坏模式

Fig. 7 Damage modes of 37-ply bio-inspired helicoidal composite metastructures

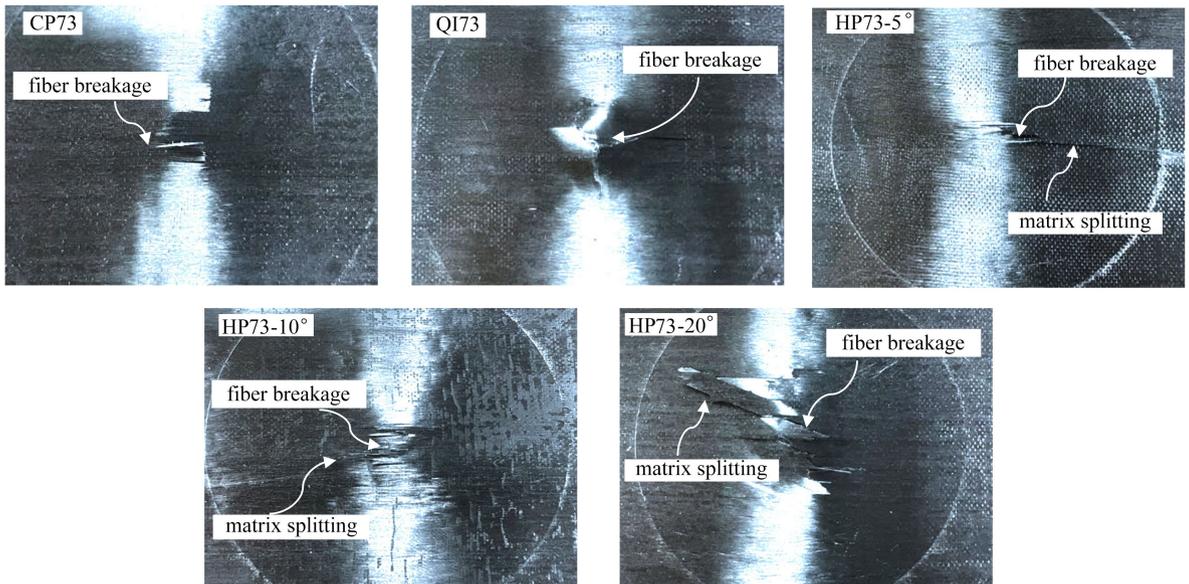


图 8 73 层仿生螺旋复合材料超结构的破坏模式

Fig. 8 Damage modes of 73-ply bio-inspired helicoidal composite metastructures

3.4 机理分析

为了揭示仿生螺旋复合材料超结构准静态压痕性能提升的机理,本小节对简化后的梁结构层间剪切应力进行了分析.假设中面对称仿生螺旋复合材料超结构的总层数为 N (N 为奇数),螺旋角为 θ ,则对于跨度为 b 中心受集中载荷 P 的简支梁,基于梁理论和经典层合板理论(第 1 节),其在横力弯曲下距中面第 k 个单层处的层间剪切应力值 $\tau^{(k)}$ 计算公式为^[32]

$$\tau^{(k)} = -\frac{1}{D_{11}} \frac{P}{2b} \sum_{j=k}^{N-1} \bar{Q}_{11}^{(j)} \frac{h_j^2 - h_{j-1}^2}{2}. \quad (10)$$

可以看出, k 等于 1 时 $\tau^{(k)}$ 取最大值, 即最大层间应力出现在中面层处:

$$\tau_{\max}^{(k)} = -\frac{1}{D_{11}} \frac{P}{2b} \sum_{j=1}^{N-1} \bar{Q}_{11}^{(j)} \frac{h_j^2 - h_{j-1}^2}{2}. \quad (11)$$

倘若取 $\theta = 1^\circ, 2^\circ, \dots, 19^\circ, 20^\circ$, 则通过上式可以计算得到 $\tau_{\max}^{(k)}$ 随 θ 的取值先减小后增大, 且在 $\theta = 9^\circ$ 时达到最小值, 同时整体小于 $\theta = 45^\circ$ 或 90° 的情况. 因此相比于传统准各向同性或正交铺层, 中面对称仿生螺旋复合材料超结构由于其较小的层间转角, 使得其在相同载荷下最大层间剪应力更小, 抗分层性能更强, 故而在受到面外集中载荷时的力学性能更优, 同时 9° 的最优螺旋角度也与实验结果相吻合.

4 总 结

本研究深入探讨了受昆虫外骨骼启发的高强度、高韧性碳纤维增强复合材料超结构的设计、制造及其性能表征. 为解决热压过程中非对称层合板产生的翘曲问题, 本文设计了中面对称的铺层结构, 并开发了相应的热压制备工艺. 此外, 通过准静态压痕测试, 对 37 层与 73 层的碳纤维增强复合材料超结构的性能进行了细致的表征. 研究结果揭示:

与传统结构相比, 中面对称的仿生螺旋铺层结构在准静态压痕测试中显示出显著的峰值力和能量吸收性能提升, 特别是当螺旋角度设定为 10° 时, 性能提升最为显著. 对于 37 层的对称螺旋铺层结构而言, 由于层间夹角较小, 相较于正交和准各向同性铺层结构, 其能更有效地利用弯曲拉伸应力, 产生抵抗基体分层的较大阻力, 因此表现出更优异的力学性能. 对于 73 层的对称螺旋铺层, 较厚的层数增强了基体劈裂的可能性, 导致基体劈裂与分层的竞争成为决定最终破坏模式的关键因素. 研究还发现, 随着层间角度和层厚比的减小或基体韧性的降低, 螺旋基体劈裂的阻力会相应减小. 因此, 对于基体较弱或层厚更大的层合板, 优化层间角度可以有效增强结构的整体性能, 此时纤维断裂转变为次要的破坏模式.

综上所述, 本研究的成果不仅为碳纤维增强复合材料超结构的设计与制造提供了重要的实践依据, 也为未来相关材料的研究与应用开辟了新的方向.

参考文献 (References):

- [1] 吴伟仁, 于登云, 刘继忠, 等. 我国太空活动现代化治理中的若干重大问题[J]. 科学通报, 2021, **66**(15): 1795-1801. (WU Weiren, YU Dengyun, LIU Jizhong, et al. Key issues of modernization of space governance[J]. *Science China Press*, 2021, **66**(15): 1795-1801. (in Chinese))
- [2] 龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望[J]. 空间碎片研究, 2019, **19**(3): 2-13. (GONG Zizheng, ZHAO Qiuyan, LI Ming, et al. The frontier problem and prospect of space debris protection research [J]. *Space Debris Research*, 2019, **19**(3): 2-13. (in Chinese))
- [3] 汤靖师, 程昊文. 空间碎片问题的起源、现状和发展[J]. 物理, 2021, **50**(5): 317-323. (TANG Jingshi, CHENG Haowen. The origin, status and future of space debris[J]. *Physics*, 2021, **50**(5): 317-323. (in Chinese))
- [4] 黄亿洲, 王志瑾, 刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J]. 西安航空学院学报, 2021, **39**(5): 44-51. (HUANG Yizhou, WANG Zhijin, LIU Gefei. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical University*, 2021, **39**(5): 44-51. (in Chinese))
- [5] 江洪, 彭导琦. 先进复合材料在航天航空器中的应用[J]. 新材料产业, 2022(1): 2-7. (JIANG Hong, PENG Daoqi. Application of advanced composition materials in aerospace[J]. *Advanced Materials Industry*, 2022 (1): 2-7. (in Chinese))

- [6] 李玉峰, 李玲丽, 潘宗友. 一种卫星用钛内衬-碳纤维缠绕复合材料气瓶特性研究[J]. 宇航学报, 2014, **35**(11): 1318-1325. (LI Yufeng, LI Lingli, PAN Zongyou. Characteristic study on titanium-liner/carbon-fiber over-wrapped vessels on the satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35**(11): 1318-1325. (in Chinese))
- [7] 郑昊, 李岩, 涂昊昀. 短纤维插层碳纤维/环氧树脂复合材料层间性能[J]. 复合材料学报, 2022, **39**(8): 3674-3683. (ZHENG Hao, LI Yan, TU Haoyun. Research on interlayer properties of short fiber intercalated carbon fiber/epoxy composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, **39**(8): 3674-3683. (in Chinese))
- [8] 刘晓军, 战丽, 邹爱玲, 等. 纤维增强复合材料层间增韧技术研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2022(1): 117-128. (LIU Xiaojun, ZHAN Li, ZOU Ailing, et al. Research progress on interlaminar toughening technology of fiber reinforced composites[J]. *Journal Composites Science and Engineering*, 2022(1): 117-128. (in Chinese))
- [9] GRUNENFELDER L K, SUKSANGPANYA N, SALINAS C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites[J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, **10**(9): 3997-4008.
- [10] YARAGHI N A, GUARÍN-ZAPATA N, GRUNENFELDER L K, et al. A sinusoidally architected helicoidal bio-composite[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(32): 6835-6844.
- [11] HUANG W, SHISHEHBOR M, GUARÍN-ZAPATA N, et al. A natural impact-resistant bicontinuous composite nanoparticle coating[J]. *Nature Materials*, 2020, **19**: 1236-1243.
- [12] GRUNENFELDER L K, MILLIRON G, HERRERA S, et al. Ecologically driven ultrastructural and hydrodynamic designs in stomatopod cuticles[J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(9): 1705295.
- [13] FABRITIUS H O, SACHS C, TRIGUERO P R, et al. Influence of structural principles on the mechanics of a biological fiber-based composite material with hierarchical organization: the exoskeleton of the lobster *Homarus americanus*[J]. *Advanced Materials*, 2009, **21**(4): 391-400.
- [14] RAABE D, SACHS C, ROMANO P. The crustacean exoskeleton as an example of a structurally and mechanically graded biological nanocomposite material[J]. *Acta Materialia*, 2005, **53**(15): 4281-4292.
- [15] CHENG L, WANG L, KARLSSON A M. Image analyses of two crustacean exoskeletons and implications of the exoskeletal microstructure on the mechanical behavior[J]. *Journal of Materials Research*, 2008, **23**(11): 2854-2872.
- [16] BOßELMANN F, ROMANO P, FABRITIUS H, et al. The composition of the exoskeleton of two crustacea: the American lobster *Homarus americanus* and the edible crab *Cancer pagurus*[J]. *Thermochimica Acta*, 2007, **463**(1/2): 65-68.
- [17] CHEN P Y, LIN A Y M, MCKITTRICK J, et al. Structure and mechanical properties of crab exoskeletons[J]. *Acta Biomaterialia*, 2008, **4**(3): 587-596.
- [18] YIN S, YANG R, HUANG Y, et al. Toughening mechanism of coelacanth-fish-inspired double-helicoidal composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, **205**: 108650.
- [19] ZIMMERMANN E A, GLUDOVATZ B, SCHAIBLE E, et al. Mechanical adaptability of the bouligand-type structure in natural dermal armour[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**(1): 1-7.
- [20] CHENG L, WANG L, KARLSSON A M. Mechanics-based analysis of selected features of the exoskeletal microstructure of *Popillia japonica*[J]. *Journal of Materials Research*, 2009, **24**: 3253-3267.
- [21] RAABE D, ROMANO P, SACHS C, et al. Discovery of a honeycomb structure in the twisted plywood patterns of fibrous biological nanocomposite tissue[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **283**(1/2): 1-7.
- [22] CHEN B, PENG X, CAI C, et al. Helicoidal microstructure of Scarabaei cuticle and biomimetic research[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **423**(1/2): 237-242.
- [23] BOULIGAND Y. Sur une architecture torsade répandue dans de nombreuses cuticules d'Arthropodes[J]. *CR Acad Sci*, 1965, **261**: 3665-3668.
- [24] WANG M, LI L, NIU S C, et al. Fiber arrangement endow compression resistance of the mantis shrimp hammer-like appendage[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, **21**: 3169-3180.

- [25] LIU J L, LEE H P, TAN V B C. Effects of inter-ply angles on the failure mechanisms in bioinspired helicoidal laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, **165**: 282-289.
- [26] LIU J L, LEE H P, KONG S H R, et al. Improving laminates through non-uniform inter-ply angles[J]. *Composites (Part A): Applied Science and Manufacturing*, 2019, **127**: 105625.
- [27] LIU J L, LEE H P, LAI K S, et al. Bio-inspired laminates of different material systems[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2020, **87**(3): 031007.
- [28] LIU J L, LEE H P, TAN V B C. Failure mechanisms in bioinspired helicoidal laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, **157**: 99-106.
- [29] LIU J L, LIM E W L, SUN Z P, et al. Improving strength and impact resistance of 3D printed components with helicoidal printing direction[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, **169**: 104320.
- [30] YIN S, CHEN H, YANG R, et al. Tough nature-inspired helicoidal composites with printing-induced voids[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2020, **1**(7): 100109.
- [31] YIN S, YANG R, HUANG Y, et al. Toughening mechanism of coelacanth-fish-inspired double-helicoidal composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, **205**: 108650.
- [32] 王欢, 欧阳文婷, 彭华新, 等. 一种仿生复合材料螺旋铺层设计方法: CN110962364B[P]. 2021-03-26. (WANG Huan, OUYANG Wenting, PENG Huaxin, et al. A design method for spiral layering of biomimetic composite materials: CN110962364B[P]. 2021-03-26. (in Chinese))