航 空 学 报
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica

Oct. 15 2024 Vol. 45 No. 19
ISSN 1000-6893 CN 11-1929/V

http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

引用格式：王昕，季海波，李振，等. 仿生螺旋结构纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 航空学报，2024，45(19)：029987. WANG X，JI H B，LI Z，et al. Recent advances in mechanical properties of fibre-reinforced composites with bio-inspired helicoidal lay-ups[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2024，45(19)：029987(in Chinese). doi:10.7527/S1000-6893.2024.29987

仿生螺旋结构纤维增强复合材料力学性能研究进展

综述

王昕[1]，季海波[2,3]，李振[1]，李秉洋[1,4]，章琪[1]，张瑞[5]，徐翔[6]，孟晗[2,3]，王鹏飞[1,*]，卢天健[2,3]

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．南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室，南京 210016
3．南京航空航天大学 多功能轻量化材料与结构工信部重点实验室，南京 210016
4．北京大学 工学院，北京 100871
5．武汉纺织大学 纺织新材料及先进加工技术国家重点实验室，武汉 430200
6．安徽农业大学 工学院，合肥 230036

摘 要：仿生螺旋结构纤维增强复合材料是受生物外骨骼和鳞片微观结构启发而设计的一种新型复合材料。该结构通过在单向铺层中引入的层间转角，能够显著降低复合材料在受载时的层间应力，从而提高层间粘接性能和抗冲击能力。本文综述并评价了仿生螺旋灵感的来源、常见的构型与制备工艺、静/动态力学性能的研究现状及应用前景，分析了仿生螺旋复合材料的动/静态力学响应及其力学机理，仿生螺旋铺层作为一种新兴设计思路对提升纤维增强复合材料刚度、强度及韧性等具有显著优势。通过总结现有仿生螺旋结构在复合材料领域的研究进展与不足，对未来的发展方向进行了探讨与展望。本文的研究成果对于设计力学性能优异的仿生复合材料具有理论和实践指导意义。

关键词：纤维增强复合材料；力学性能；仿生设计制造；层间性能；抗冲击性能

中图分类号：V258 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6893(2024)19-029987-22

轻量化是飞行器与航天器发展的永恒主题。在航空航天领域中，复合材料的应用不仅能够降低飞行器与航天器的重量，提高载荷能力和燃料效率，还能够增加可靠性和耐久性[1]。纤维增强复合材料凭借其高比强度、高比模量的优异力学性能，以及优良的耐腐蚀性和热稳定性，在航空航天领域的应用逐渐受到重视[1-3]。特别是碳纤维增强复合材料，已经广泛应用于导弹、运载火箭和卫星的结构件中[4]。复合材料的优异性能为飞行器与航天器的设计和制造提供了更大的灵活性和创新空间。

在航空航天领域中复合材料常常用于承受高强度和高载荷的结构应用，对冲击损伤特别敏感，提升复合材料抗冲击性能对于构件的安全性和可靠性有着重要意义[5]。纤维增强复合材料在多次冲击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

收稿日期：2023-12-15；退修日期：2024-04-29；录用日期：2024-07-01；网络出版时间：2024-08-23 08:52
网络出版地址：https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I19/29987
基金项目：国家自然科学基金(12402407，12302187，U22B2013)；北京市科技新星计划(20230484287)
*通信作者. E-mail：hvhe@163.com

导致结构失效，这是此类材料最基本的损伤断裂形式[6]。目前复合材料层间增强的方式主要包括：增强树脂基体的性能、层间增韧以及增加法向材料三维增强[7]。其中，层间增韧方法有纤维层间增韧、纳米材料层间增韧、颗粒层间增韧、薄膜层间增韧等，这些技术不改变现有的工艺方法，可使复合材料的抗分层能力和抗冲击损伤能力有较大的提升，但多数处于手工试验阶段，将科研技术成果转化为实际工程应用的能力偏弱[7]。增加法向材料的方法有三维编织、机织和缝合技和Z-pin增强技术，该类方法改变了现有的工艺方法，制造过程复杂且成本较高。在此背景下，近年来受生物外骨骼和鳞片微观螺旋结构的启发，出现了一种新型复合材料设计方法[8-10]，即在单向铺层中螺旋式地引入微小的层间转角，可以大幅度降低碳纤维和玻璃纤维增强复合材料受载时的层间应力[11-12]，进而强化了整体的层间性能、面外承载与抗冲击能力，相关研究有望为大型装备主承载结构的高性能制造提供理论指导与实践依据。

本文围绕仿生螺旋结构纤维增强复合材料（简称仿生螺旋复合材料），从仿生螺旋的概念来源、常见构型与制备工艺出发，对静态和动态力学性能及应用研究进展进行了简要概述。最后对仿生螺旋复合材料的研究现状进行了总结，并对未来的研究趋势进行了探讨，为仿生螺旋复合材料的工程应用提供理论指导和技术支持。

1 仿生螺旋结构纤维增强复合材料

1.1 仿生来源

自然界的生物体展示出许多独特的结构和特性，这些特性为工程仿生设计提供了丰富的灵感。Bouligand[13]在1965年首次从节肢动物的外骨骼中发现了层状螺旋堆叠结构（又称Bouligand结构），这种结构由单向排列的几丁质蛋白纤维层和硬化蛋白基质复合堆叠而成，并且每一层相对于相邻层旋转了一定角度[14-19]。后来，研究人员又在螳螂虾[15,20-24]、龙虾[14,25-27]、螃蟹[28-29]、甲虫[12,16,30]、鲤鱼[31-32]等生物中发现了这种结构，如图1(a)～图1(d)[15,25,30-31]所示。

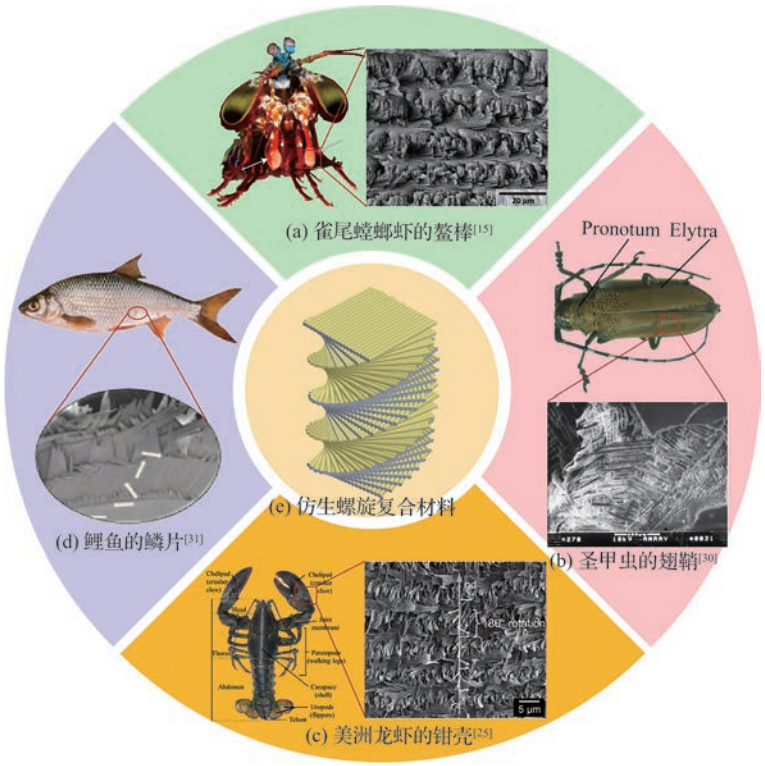


图1 仿生螺旋结构概念来源

Fig. 1 Conceptual sources of bio-inspired helicoidal structures

仿生螺旋结构(Bouligand结构)具有良好的强度与韧性,被认为是甲壳类动物外骨骼或鱼类鳞片优异力学性能的关键所在。雀尾螳螂虾(Odontodactylus scyllarus)使用螯棒攻击猎物的撞击速度高达14～23 m/s,冲击力高达400～1 500 N[33],是它们体重的数千倍,即使经历了数千次的冲击,螯棒仍可以保持其完整性,其中的螺旋结构对整体的能量耗散和抗冲击性能至关重要[34]。日本金龟子(Popillia japonica)的外骨骼角质层具有伪正交结构,即2个正交层间通过薄螺旋铺层连接,与传统的正交结构相比,伪正交结构提高了界面抗断裂性能[12]。巨骨舌鱼(Arapaima gigas)通过高强度和高韧性的鳞片抵御食人鱼捕食,其鳞片的内部Bouligand结构使其在拉伸作用下,大多数片状体向拉伸轴方向重新定位,并通过拉伸/滑动机制在拉伸中变形,而其他片状体则对称地远离拉伸轴旋转并压缩,从而增强鳞片的延展性和韧性以防止断裂[32]。研究人员模仿生物外骨骼和鳞片中的Bouligand结构,构造了仿生螺旋复合材料,如图1(e)所示,通过研究仿生螺旋结构对复合材料的增强增韧机制,为设计更加强大的材料提供了理论基础和实践指导。

1.2 常见构型

为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。常见构型如图2[31,35-42]所示,包括传统的正交铺层[35]、准各向同性铺层[35],以及单层线性螺旋[36-37]、双层线性螺旋[38-39]、正交线性螺旋[31]、中心面对称螺旋铺层[11,40-42]等仿生螺旋铺层构型。其中图2(c)～图2(e)[31,36-39]构型相对于中平面具有反对称性,可能会因为在固化过程中产生的残余应力而翘曲。除了线性螺旋以外,螺旋角度还可以按照递归、指数、半圆以及斐波那契数列等规律变化[43-44]。

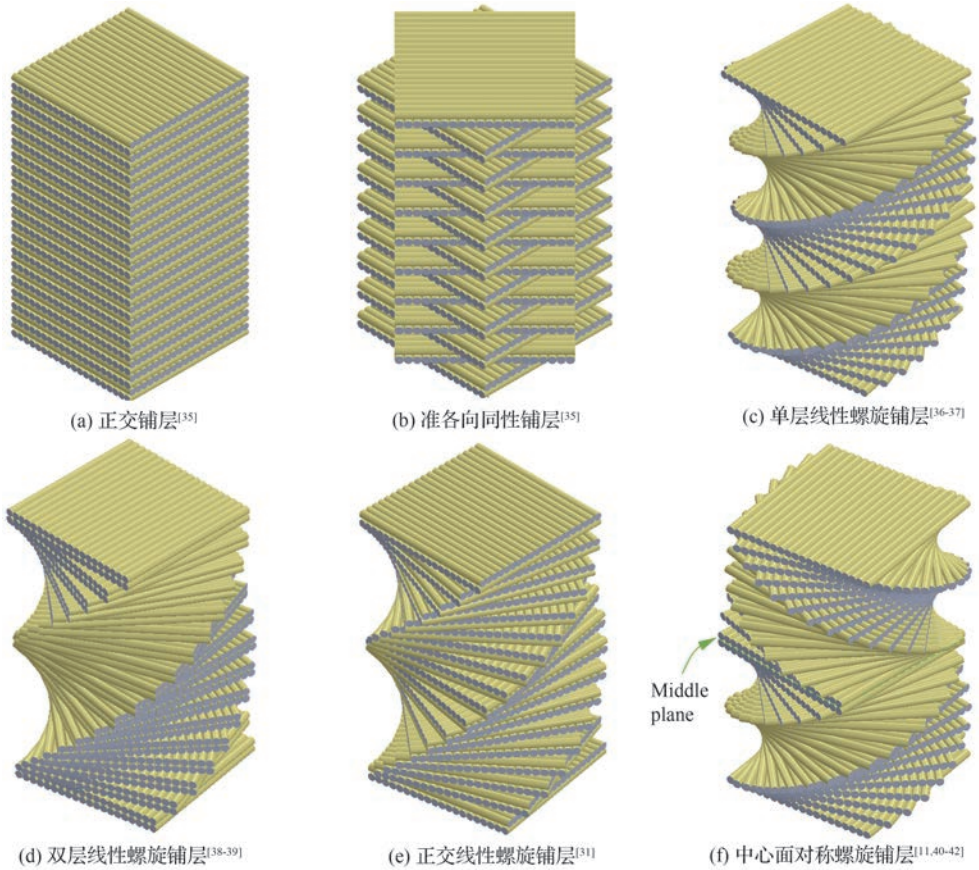


图2 常见纤维增强复合材料铺层构型

Fig. 2 Configurations of common fiber-reinforced composite lay-ups

1.3 制备工艺

制备仿生螺旋结构复合材料的有效工艺主要是模压成型工艺[45-47]和基于熔融沉积的3D打印工艺[37,48]。

模压成型工艺是制造纤维增强复合材料的一种常见方法,它将预混料或预浸料按照一定的层次和顺序堆叠在一起,再经过加热和加压处理,最终形成固化的复合材料[49]。与其他传统制备方法(例如手糊成型、拉挤成型、缠绕成型、真空树脂传递模塑成型)相比,模压法的优点是生产效率高,便于实现专业化和自动化生产;产品尺寸精度高、重复性好;缺点是需要较高的设备投资和制造成本[49]。

基于熔融沉积的3D打印工艺涉及使用熔融的树脂和纤维材料混合物,通过喷嘴将材料层层叠加,然后固化成型[50]。与模压成型等传统制造技术相比,3D打印成型具有工艺过程简单,制造成本低,材料利用率高等优点。同时,3D打印技术可实现复杂结构的一体化成形,无需模具及连接件,为复杂复合材料结构的低成本制造提供了有效的技术途径。但3D打印工艺过程中较低的成型压力和较短的施压时间会导致纤维增强复合材料中的气体难以排除,产生的孔隙缺陷会降低复合材料力学性能[51]。

2 静态力学性能研究进展

研究复合材料的力学性能可为其在航空航天领域的应用进一步提供支撑。目前,针对仿生螺旋复合材料的静态力学性能,已有大量关于层间特性[52-54]、拉伸特性[11,55]、弯曲特性[37,56-63]、压痕特性[11,64]和屈曲特性[65-66]的理论、试验和数值模拟研究。现有研究不仅对比了仿生螺旋复合材料与准各向同性复合材料或正交铺层复合材料的特性差异,还探究了螺旋角度、厚度等材料参数对其力学特性的影响。

2.1 分层特性

层间应力是导致纤维增强复合材料分层的主要原因,传统复合材料的纤维方向会在0°、30°、45°和90°方向之间突变,此时各层之间的弹性特性不匹配而引起较大的层间剪应力会导致材料分层[11]。相比之下,仿生螺旋复合材料的各层之间角度变化更小,因此在相同载荷下,其层间剪应力更小,更不容易发生分层现象。研究人员通过理论、仿真和试验方法深入探讨了仿生螺旋复合材料在抗分层性能方面的优异特性和机理。

对仿生螺旋复合材料的理论研究基于经典复合材料理论。例如,局部坐标系下单层复合材料的刚度矩阵$\boldsymbol{C}$可以表达为

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:C_{ij}可以表达为

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

其中:E_1、E_2、E_3、G_{12}、G_{13}、G_{23}、ν_{12}、ν_{23}与ν_{13}分别为材料各方向的弹性模量、剪切模量与泊松比。利用以下转换矩阵$\boldsymbol{T}$可以得出每个单层在全局坐标系下的局部刚度矩阵:

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & m^2-n^2 \end{bmatrix} \\ m=\cos\theta, n=\sin\theta, \boldsymbol{Q}=\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{T} \end{cases} \tag{3}$$

式中:θ是单层的旋转角度,$\boldsymbol{Q}$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$\boldsymbol{Q}$矩阵,就能根据以下公式计算出面内刚度矩阵$\boldsymbol{A}$、耦合刚度矩阵$\boldsymbol{B}$和弯曲刚度矩阵$\boldsymbol{D}$:

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

基于上述经典复合材料理论，Cheng等[12]通过理论分析和数值仿真发现，在相同截面所受弯矩和剪力条件下，随着过渡区层数增加（即层间的螺旋角度减小），仿生螺旋复合材料的层间法向和切向应力峰值呈下降趋势。这表明，螺旋复合材料在相同载荷条件下具有更低的层间应力水平，因此更不容易发生分层破坏模式，如图3(a)[12]所示。螺旋铺层设计有效降低了复合材料的层间剪应力，从而抑制或延缓了分层的发展。Ouyang等[52]通过经典复合材料理论和短梁剪切理论进一步研究了层间剪应力的变化。他们发现，随着螺旋角度$\Delta\theta$的增大，复合材料的归一化最大层间剪应力首先减小，在特定层数（例如24、32、48）分别在$\Delta\theta=6^\circ$、9.1°、12.3°时达到最小值，然后随着$\Delta\theta$的增大而增大，如图3(b)[52]所示。这些理论结果显示，在给定的层数范围内，存在一个最优的螺旋构型，能够最小化层间剪应力的峰值，从而改善复合材料的层间剪切特性。后续的试验结果验证了这些理论预测的准确性。Zhang等[46]在他们的仿真和实验研究中进一步探讨了仿生螺旋复合材料层间剪应力的分布变化，如图3(c)[46]所示。他们发现，层间螺旋角的变化显著影响复合材料各层间的剪切应力分布，可能导致复杂的破坏形式，如纤维断裂、基体断裂、纤维-基体脱粘和剥落等。这些发现强调了螺旋铺层设计在调控复合材料破坏行为和能量吸收能力方面的重要性。Yin等[37]利用数值仿真方法比较了螺旋复合材料和准各向同性复合材料在三点弯曲时的层间应力分布，如图3(d)[37]所示。结果显示，对于仿生螺旋复合材料，层间剪应力集

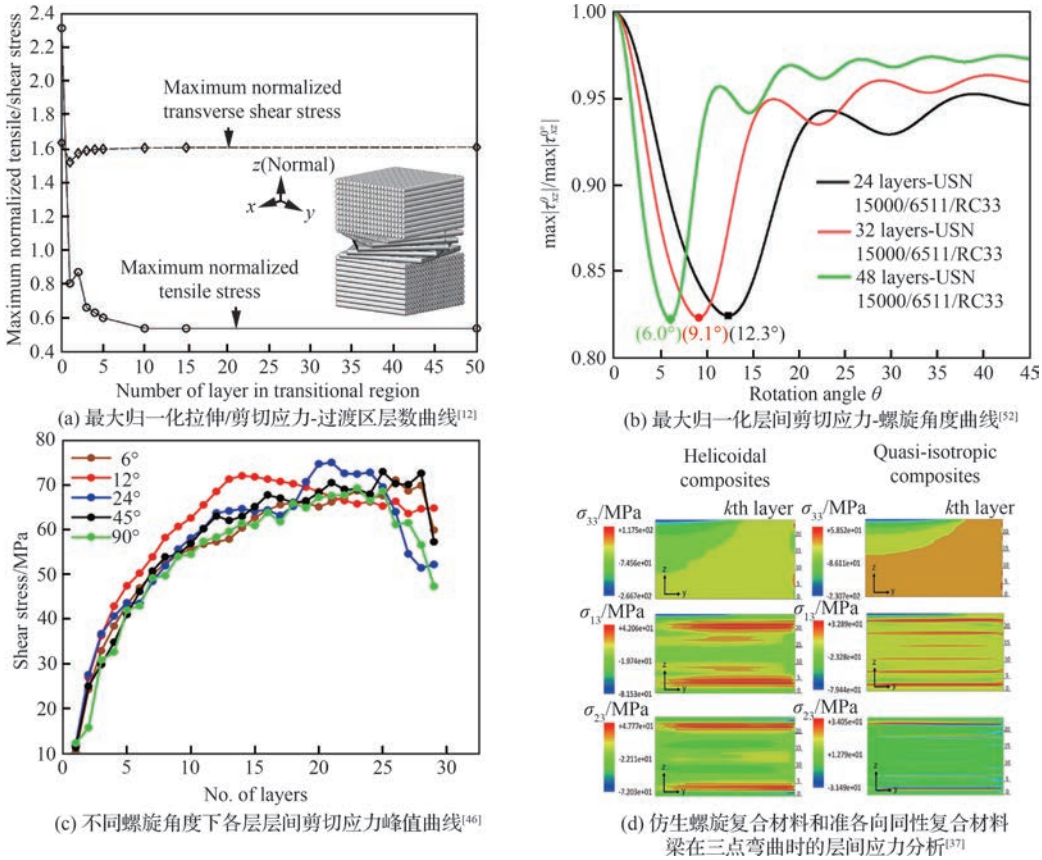


图3 仿生螺旋复合材料的分层特性研究

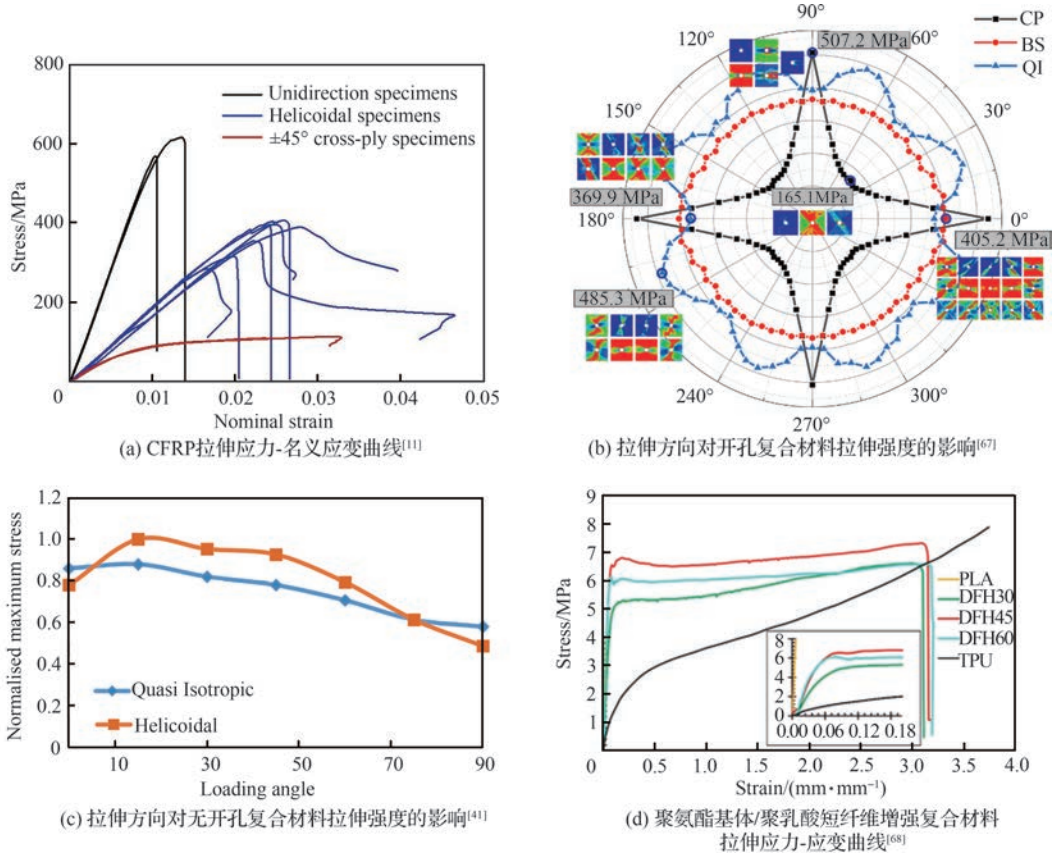
Fig. 3 Study of delamination characteristics of bio-inspired helicoidal composites

中在梁的上下边界附近(第2~5层之间和第20~23层之间),而对于准各向同性层状复合材料,这些层间剪切应力在多个界面(如第2、6、10、14、18、22层)上都出现,这说明准各向同性复合材料在这些界面处可能更容易发生分层现象,相较之下,螺旋复合材料在这些区域产生较少的分层倾向。

综上所述,仿生螺旋复合材料在降低层间应力、改善层间剪切性能以及抑制分层破坏方面具备潜力和优势。

2.2 拉伸特性

仿生螺旋结构降低了复合材料面内各向异性水平,相较于传统铺层复合材料,其沿某一特定方向排布的纤维数量更少,故拉伸强度可能有所下降,但沿面内各方向的拉伸强度差异也随之降低。Apichattrabrut和Ravi-chandar[11]进行了针对不同铺层CFRP(Carbon Fiber-Reinforced Plastic)的准静态拉伸测试。研究结果如图4(a)[11]所示,相比于传统的±45°正交铺层CFRP,螺旋铺层($\Delta\theta = 10°$)的CFRP表现出显著更高的刚度、强度和损伤容限。这是因为在拉伸过程中,螺旋铺层有助于限制横向裂纹的扩展。Luo等[67]对开孔CFRP的不同方向的拉伸特性进行了测试,如图4(b)[67]所示,发现随着螺旋角度的变化,螺旋铺层CFRP不同方向的开孔拉伸强度从405.2 MPa减小到364.1 MPa,变化幅度为10.1%,而正交铺层结构不同方向的开孔拉伸强度从533.8 MPa减小到165.1 MPa,变化幅度为69.1%。此外,当螺旋角超过5°时,螺旋铺层CFRP表现出更高的开孔拉伸强度,也表现出比准各向同性结构更稳定的开孔拉伸强度。Pinto等[41]的实验结果(图4(c)[41])表明,仿生螺旋和准各向同性复合材料的拉伸强度优劣受拉伸方向影响。当中心面对称螺旋铺层选择的螺旋角度(例如15°),是准各向同性铺层中层间角度(45°)的因数,则2种材料的拉伸模量几乎



(a) CFRP拉伸应力-名义应变曲线[11]

(b) 拉伸方向对开孔复合材料拉伸强度的影响[67]

(c) 拉伸方向对无开孔复合材料拉伸强度的影响[41]

(d) 聚氨酯基体/聚乳酸短纤维增强复合材料拉伸应力-应变曲线[68]

图4 仿生螺旋复合材料的拉伸特性研究

Fig. 4 Study of tensile characteristics of bio-inspired helicoidal composites

相等,这一结论可以通过经典的层合板理论验证。Góez等[68]基于熔融沉积技术3D打印了热塑性聚氨酯基体/聚乳酸短纤维增强复合材料,并进行了准静态拉伸实验,如图4(d)[68]所示。实验观察到,随着螺旋角度的增大,材料的拉伸刚度逐渐增大,平台应力的波动逐渐减小,表现出较高的拉伸韧性。Nwambu等[69-70]研究了湿热老化对非对称螺旋碳纤维增强复合材料拉伸性能的影响。他们发现,湿热老化会显著降低复合材料的拉伸模量和拉伸强度,而这种影响程度与螺旋角度密切相关。在高温湿热时效处理后,非连续螺旋复合材料的刚度和强度明显低于未处理和低温处理的材料,这是由于湿热引入的水分破坏了纤维基体界面并导致基体塑化。

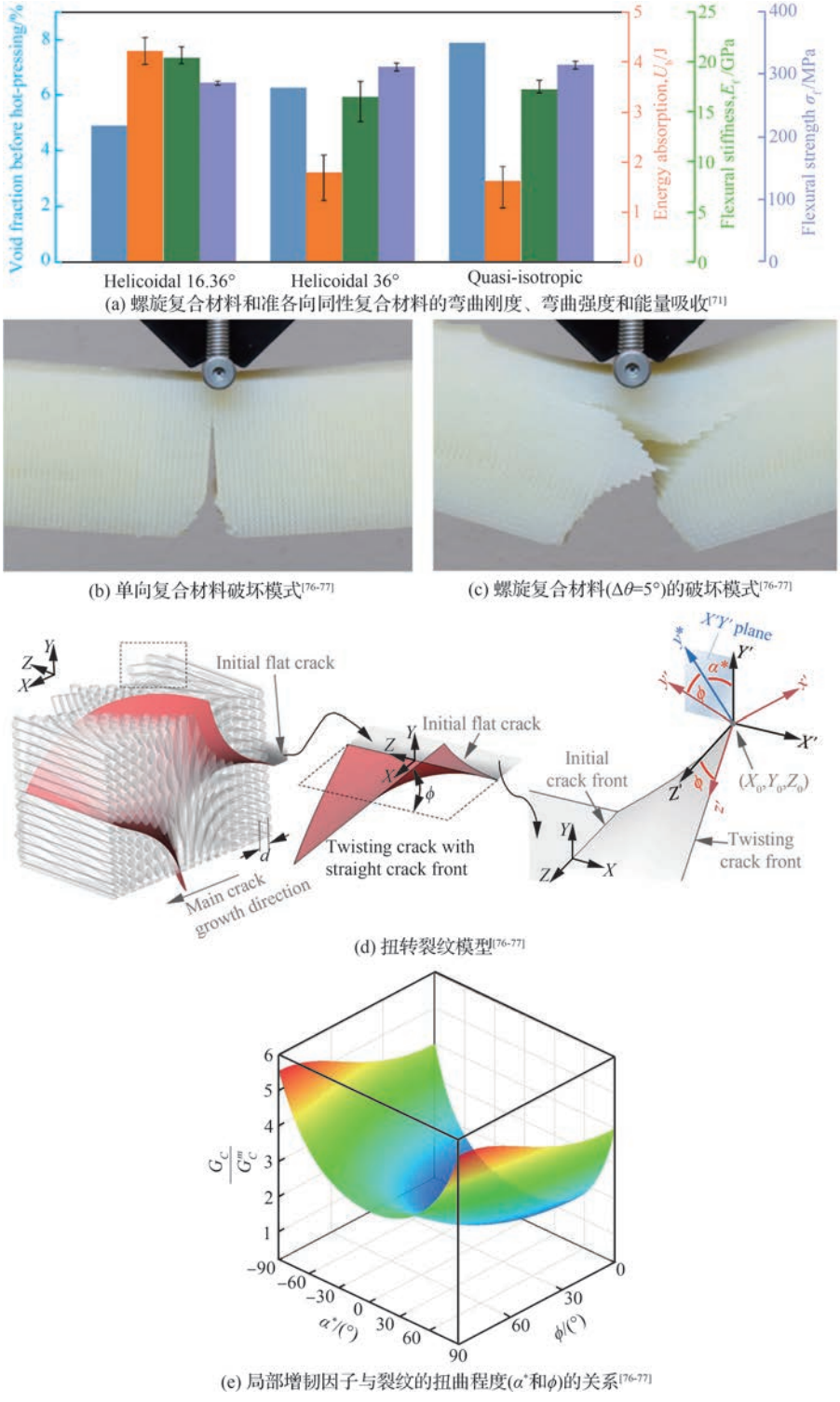
总体而言,仿生螺旋复合材料降低了面内各向异性并提高了拉伸性能稳定性。

2.3 弯曲特性

关于准静态弯曲特性,仿生螺旋结构可以有效提升复合材料的弯曲刚度、强度与能量吸收。Delaunois等[71]在3D打印的单向纤维增强复合材料中引入部分螺旋铺层,显著提升了材料的弯曲刚度和强度。Yin等[37]采用熔融沉积方法制造了连续碳纤维复合材料层合板,并进行了三点弯曲测试。结果显示,与准各向同性复合材料相比,螺旋角为16.36°的复合材料弯曲刚度提高了18%,抗弯强度降低了10%,能量吸收能力提升了一倍(图5(a)[71])。Li等[72]采用短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料进行3D打印,并通过准静态三点弯曲表征其力学特性。研究结果显示,螺旋复合材料的抗弯强度、抗弯模量和吸收能量分别比准各向同性复合材料高出6.9%、23.9%和5.9%。Sharma等[73]利用抛物线剪切变形理论分析了仿生螺旋层合复合材料板的弯曲行为,发现与准各向同性材料不同,螺旋设计使得材料在厚度方向上的应力分布更加均匀,同时消除了正交铺层和准各向同性系统中的应力集中现象,从而使螺旋结构的横向剪应力最小化。Mohamed等[35]基于板的一阶剪切变形理论假设分析了仿生螺旋复合材料的弯曲特性,发现铺层方式对复合材料的弯曲有显著影响,且这种影响随复合材料的长径比、边厚比和边界条件的不同而变化。Han等[74]在螺旋铺层的玄武岩纤维增强复合材料平板基础上,进一步提出了正弦波纹板型设计,该设计的抗弯强度和模量分别比平板提高了28.4%和36.9%。Han等[75]通过三点弯曲试验发现,对于碳纤维蒙皮铝蜂窝夹芯结构,采用螺旋铺层可以显著提升能量吸收能力,分别比编织铺层和单向铺层提升了278.3%和115.4%。

为了深入探究仿生螺旋复合材料在准静态弯曲下的增强和增韧机理,研究人员对其破坏模式进行了进一步研究。Nobphadon等[76-77]对于仿生螺旋GFRP的三点弯曲特性进行了试验与仿真研究,发现相比于单向铺层复合材料($\Delta\theta=0°$),螺旋复合材料($\Delta\theta=5°$、10°和30°)的刚度、强度和韧性有着极大的提升。复合材料的破坏模式如图5(b)~图5(c)[76-77]所示,在三点弯曲作用下,螺旋复合材料表现出扭转裂纹的破坏模式,通过改变局部断裂模式和增大裂纹表面积,有效延缓了裂纹的扩展,推迟了材料的灾难性破坏,进而提高了抗断裂性能。建立的扭转裂纹分析模型(图5(d)[76-77])预测了扭转裂纹尖端的局部应力强度因子和局部能量释放率。局部增韧因子与裂纹的扭曲程度(α^*和Φ)如图5(e)[76-77]所示。

Yang等[78]利用构型力理论估计了螺旋结构的裂纹驱动力,并建立了基于裂纹扭结和扭转观测的仿生螺旋复合材料应变能释放率理论模型。通过裂纹驱动力计算模型的仿真,预测了仿生试样在I型加载下的断裂韧性,并进一步探讨了增韧机理。研究结果表明,螺旋纤维的弹性模量和取向对螺旋复合材料的断裂特性具有重要影响。Ouyang等[52]对螺旋角度分别为6°、9.1°、12°、25.7°的32层CFRP的三点弯曲特性进行了理论与试验研究,发现$\Delta\theta=9.1°$时峰值载荷最大。螺旋角较大时破坏机制以剪切分层为主,螺旋角较小时破坏机制逐渐转变为以亚临界损伤和扭转裂纹为主。Mencattelli和Pinho[79]发现,CFRP在三点弯曲测试中的主导失效模式,从纤维破坏($\Delta\theta=45°$)到同时出现纤维破坏和分层($\Delta\theta=20°$, 10°),再到分层($\Delta\theta=5°$),再到亚临界扩散损伤($\Delta\theta=2.5°$)的渐进转变。螺旋铺层使得三点弯曲过程中损伤扩散产生的总耗散能大幅增加,



(a) 螺旋复合材料和准各向同性复合材料的弯曲刚度、弯曲强度和能量吸收[71]

(b) 单向复合材料破坏模式[76-77]

(c) 螺旋复合材料($\Delta\theta$=5°)的破坏模式[76-77]

(d) 扭转裂纹模型[76-77]

(e) 局部增韧因子与裂纹的扭曲程度(α^*和ϕ)的关系[76-77]

图5 仿生螺旋复合材料的弯曲特性研究

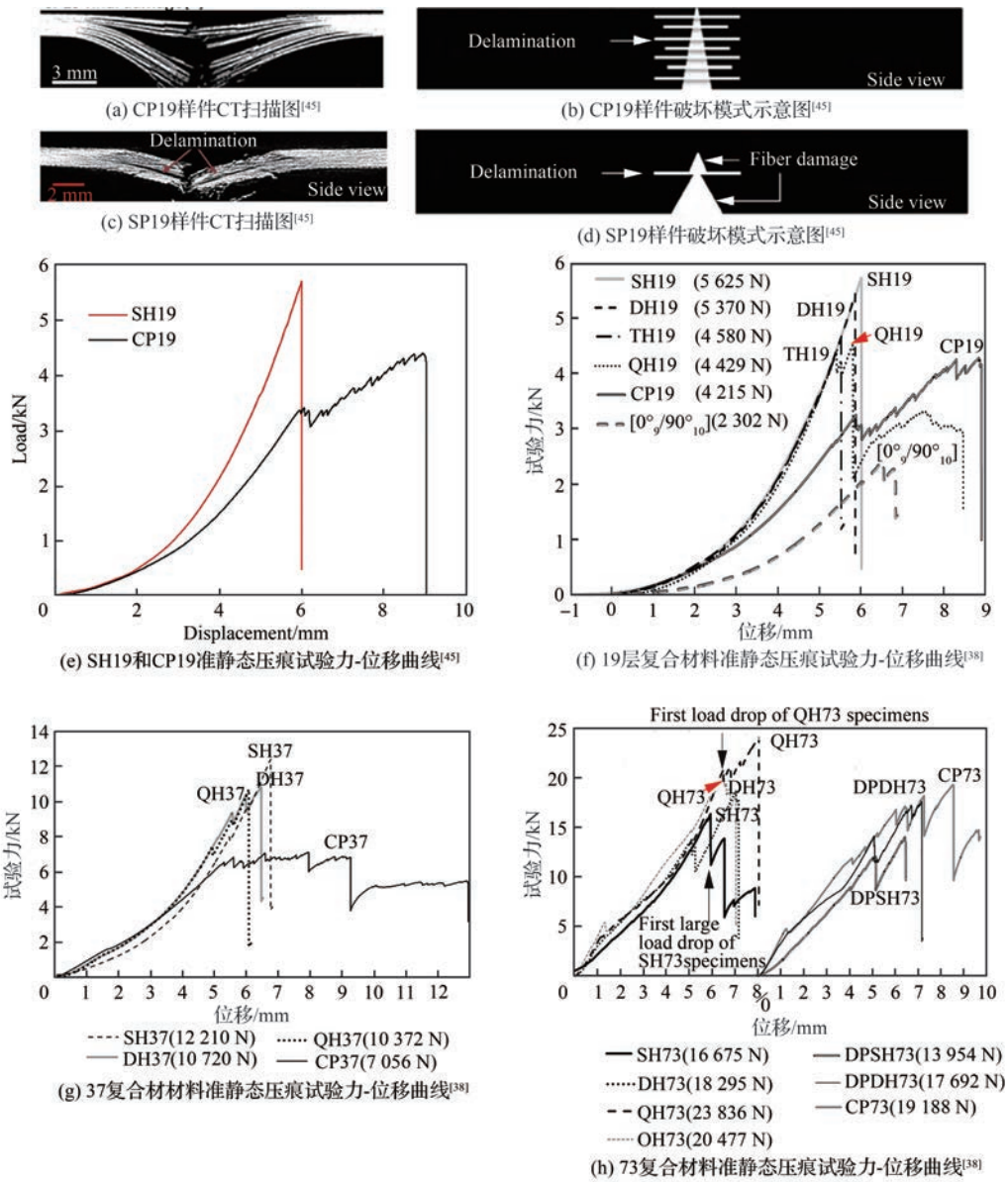
Fig. 5 Study of flexural characteristics of bio-inspired helicoidal composites

$\Delta\theta$=2.5°时的能量比$\Delta\theta$=45°时的高77%。Wu等[80]提出了一种非连续纤维的螺旋复合材料,并对单边缘缺口试件进行了弯曲实验。断裂力学分析显示,该结构通过裂纹扭转和裂纹桥接的混合增韧机制,在裂纹取向不敏感的情况下表现出优异的抗断裂性能。调整非连续螺旋复合材料的裂纹桥接断裂能、纤维长度和螺旋角度,能够有效优化其断裂能力。

综上可知，仿生螺旋复合材料在准静态弯曲下展现了显著的增强和增韧特性。通过改变螺旋角度和层铺方式，可以有效提升材料的弯曲刚度、强度和能量吸收能力。此外，螺旋铺层设计还改善了材料的断裂模式和抗断裂性能，延缓了裂纹的扩展和灾难性破坏的发生。

2.4 压痕特性

仿生螺旋复合材料在准静态压痕作用下产生更少的分层破坏，从而表现出更高的刚度和峰值载荷。Liu等[45]为了探究仿生螺旋CFRP的失效机理，对试验样件进行CT扫描，如图6(a)～图6(d)[45]所示，发现螺旋CFRP仅在中间层存在较大的分层现象，而正交CFRP存在多处分层，在横向载荷作用下，复合材料背面拉伸开始出现横向裂纹，并向复合材料内部扩展。螺旋CFRP在准静态压痕作用下的峰值荷载比正交CFRP的结果高30%左右，如图6(e)[45]所示，每当横向



(a) CP19样件CT扫描图[45]　(b) CP19样件破坏模式示意图[45]

(c) SP19样件CT扫描图[45]　(d) SP19样件破坏模式示意图[45]

(e) SH19和CP19准静态压痕试验力-位移曲线[45]

(f) 19层复合材料准静态压痕试验力-位移曲线[38]

(g) 37复合材料材料准静态压痕试验力-位移曲线[38]

(h) 73复合材料准静态压痕试验力-位移曲线[38]

注：CP-正交铺层，SH19-10°螺旋，DH19-20°螺旋，TH19-30°螺旋，QH19-40°螺旋，SH37-5°螺旋，DH37-10°螺旋，QH37-20°螺旋，SH73-2.5°螺旋，DH73-5°螺旋，QH73-10°螺旋，OH73-20°螺旋，DPSH73-5°双层螺旋，DPDH73-10°双层螺旋

图6 仿生螺旋复合材料准静态压痕特性研究

Fig. 6 Study of quasi-static indentation characteristics of bio-inspired helicoidal composites

裂纹达到分层时，载荷-位移图中就会出现一个下降。正交CFRP由于多次分层而出现多次荷载下降，而螺旋复合材料当横向裂纹达到中层分层时只出现一次灾难性荷载下降。Liu等[81]测试发现在相同的准静态压痕吸能时，螺旋GFRP比常规准各向同性GFRP轻20%。Guo等[82]为了分析螺旋CFRP内在增强机理，提出了自洽聚类分析方法的多尺度损伤模型，并在宏观和微观尺度上模拟了复合材料的损伤演化过程。

研究显示，仿生螺旋复合材料的准静态压痕特性与其厚度、螺旋角度、基体种类、材料种类等因素有关，但相同条件下最佳螺旋角度发生在材料的破坏模式由多种因素共同主导时。Liu等[38]的试验表明（图6(f)～图6(h)[38]），对于19层和37层的薄CFRP，螺旋结构的横向载荷峰值总是高于相同层数的正交复合材料，在5°～40°的范围内，峰值载荷随着螺旋角度的减少而增加；然而，在由73层螺旋CFRP，当螺旋角从20°减少到10°时，峰值载荷增加，但螺旋角进一步减少到5°和2.5°，峰值载荷低于相同层数的正交复合材料。与73层螺旋复合材料（DPSH73和DPDH73）相比，73层螺旋复合材料（SH37和DH37）的损伤模式发生了显著的变化：73层螺旋复合材料发生基体分裂并且扩展到复合材料的边缘，并没有明显的纤维断裂，而37层螺旋复合材料的破坏模式主要以纤维断裂为主，如图7[38]所示。因此，较厚的层增加了基体劈裂的倾向，导致横向荷载峰值的减小，横向荷载峰值的最佳螺旋角变大。Zhang等[46]对具有不同螺旋角度（$\Delta\theta=6°, 12°, 24°, 45°, 90°$）的CFRP进行了准静态压痕试验，发现在一定范围内，结构的强度随着螺旋角度减小而先增大后减小。特别是在螺旋角度为12°时，能量吸收达到峰值。这与螺旋结构中层内和层间的应力分布密切相关，较小的螺旋角度有助于减小沿纤维方向的损伤，但会增加垂直于纤维方向的基体撕裂。Liu等[83]进一步研究了螺旋角度在CFRP厚度中的不均匀分布。研究结果表明，在后表面使用较大的螺旋角度，可以增加由于弯曲拉伸应力引起的基体分裂的抵抗力。而在冲击面使用较小的螺旋角度，则可以增加抗剪切诱导的分层阻力。这种策略能够在复合材料中实现更高的峰值载荷。Zhang和Yuan[84]通过研究多种螺旋角度和单层厚度混杂对螺旋复合材料准静态压痕特性的影响，发现在外层使用大螺旋角和小厚度时，可以获得更高的初始弹性阶段峰值载荷；而在内层使用小螺旋角和大厚度

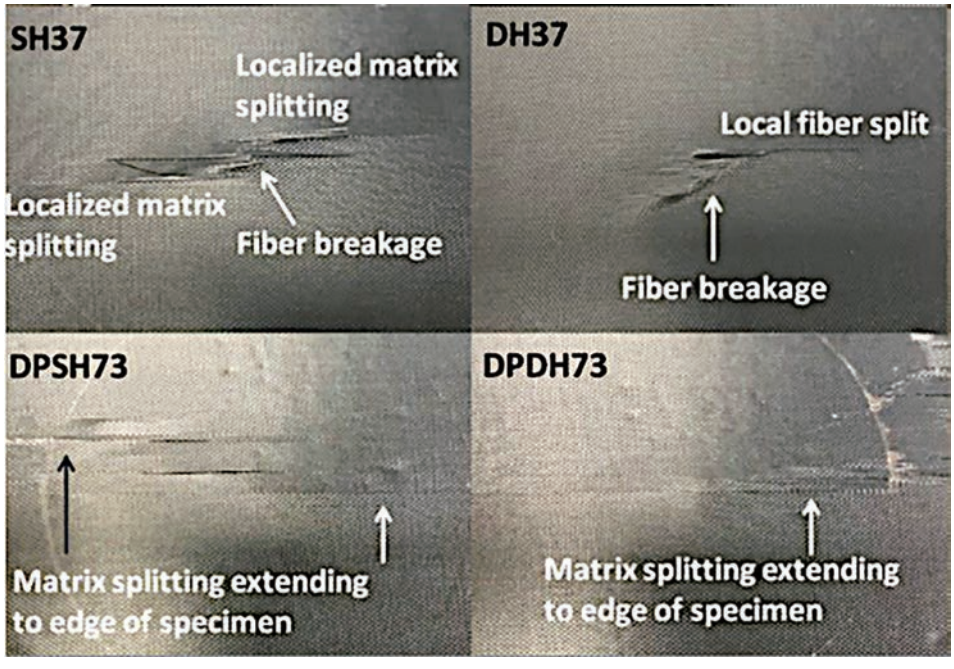


图7 不同构型仿生螺旋CFRP在准静态压痕作用下的破坏模式[38]

Fig. 7 Damage modes of bio-inspired helicoidal CFRP of different configurations subjected to quasi-static indentations[38]

时，能够实现更多的能量吸收，具有更好的防护性能。这些研究结果强调了多种螺旋角度和单层厚度混杂对于提高薄层复合材料抗压性能的重要性。

Liu等[85]的自愈合CFRP研究表明，相较于正交复合材料，仿生螺旋复合材料不仅能够承受更高的面外载荷，而且发生的纤维损伤明显较少。具体而言，螺旋复合材料能够恢复91%的面外载荷强度，而正交复合材料只能恢复56%。这进一步证明了螺旋复合材料在面外加载特性方面的优势。Liu等[39]研究了不同螺旋角度、厚度和材料的螺旋复合材料的面外加载特性。结果表明，无论层压材料体系如何，层压材料的破坏机制都是由螺旋状基体分裂和分层之间的竞争决定的，其次是纤维断裂。螺旋基体劈裂阻力随螺旋角与层厚之比减小，基体韧性减小。由于抗螺旋基体分裂的能力随着间距或基体韧性的降低而降低，对于基体较弱或层厚的复合材料，最佳螺旋角会增加，反之亦然。Chew等[86]对环氧树脂亚麻纤维增强复合材料的准静态压痕特性进行了测试，结果表明与正交铺层和准各向同性铺层相比，$\Delta\theta=9^{\circ}$的螺旋铺层可使峰值载荷分别提高72%和52%，螺旋复合材料在冲击下也能吸收更多的能量。

总体而言，螺旋复合材料的螺旋角度选择显著影响其横向载荷和损伤模式。适当的螺旋角度可以提高材料的载荷承载能力和能量吸收性能。

2.5 屈曲特性

铺层顺序对复合材料的屈曲特性影响深远。Mohamed等[35]首次研究螺旋方向复合材料结构的屈曲行为，其公式和分析基于板的一阶剪切变形理论。该工作研究了铺层顺序、边界条件、材料和几何性能等不同参数对复合板屈曲稳定性的影响。结果表明，铺层顺序对复合材料的临界屈曲的影响随复合材料的长径比、边厚比和边界条件的不同而变化。Paruthi等[65]对仿生正交和双螺旋铺层复合材料在热条件下的屈曲进行了分析。研究了厚度比、长径比、热条件、边界条件和螺旋角度等因素对屈曲特性的影响。与双螺旋方案相比，正交螺旋方案在提高板的刚度方面表现更好。对于薄板，正交螺旋铺层（$\Delta\theta=12^{\circ}$）具有较高的无量纲临界屈曲载荷，而对于厚板，QI铺层更优。随着温差的增大，无量纲临界屈曲载荷先增大后减小。边界条件在很大程度上决定了螺旋板的屈曲行为。增加板的长径比会增加仿生螺旋板的和临界屈曲载荷。

Garg等[87]对不同螺旋构型（即递归、指数、半圆、斐波那契和线性螺旋）的复合材料夹芯板的抗屈曲性能进行了理论分析，详细讨论了几何性能、材料性能、端部条件、层数和螺旋层构型的影响。发现增加板的边长与厚度比值（a/h）、无量纲临界屈曲载荷降低。对于薄板，随着板螺旋角的增大，无量纲临界屈曲载荷值先增大后减小。当$a/h=10$时，无量纲临界屈曲载荷随板螺旋角的增大而增大。随着芯材厚度的增加，各种结构的无量纲临界屈曲载荷均有所降低。临界屈曲载荷随层数的增加而增大，而在其他情况下，随着层数的增加，无量纲临界屈曲载荷随层数的增加而减小。在螺旋铺层中，螺旋递推和斐波那契铺层的无量纲临界屈曲载荷最大。Lu等[66]对线性、非线性递归、斐波那契和指数螺旋构型的CFRP进行优化设计。研究了螺旋CFRP在单轴压缩下的压缩后屈曲和均匀温升下的热后屈曲2种情况，并首次研究了屈曲后区域的二次屈曲和模态跳变现象。结果表明，仿生螺旋CFRP可以提高屈曲载荷和屈曲温度，以及屈曲后的压缩和热强度。在特定情况下，矩形螺旋复合材料在屈曲后会发生二次屈曲和模态跳变。Lian等[88]提出了一种考虑屈曲振型局部位移梯度的非对称弯曲加筋设计方法，针对单轴压缩或剪切荷载作用下的简支弯曲网格加筋板，建立了综合设计框架。与角网格设计相比，弯曲网格加筋螺旋复合板在单轴压缩下的重量减轻了13.26%，在多载荷情况下的剪切载荷下重量减轻了11.68%。

综上，铺层顺序对复合材料的临界屈曲载荷和损伤模式有显著影响。螺旋铺层在提高板的刚度和临界屈曲载荷方面表现突出，特别适用于薄板结构。此外，不同螺旋构型如递归、斐波那契和指数螺旋在屈曲载荷和温度响应方面的优化设计，进一步提升了复合材料的屈曲性能

表现。

3 动态力学性能研究进展

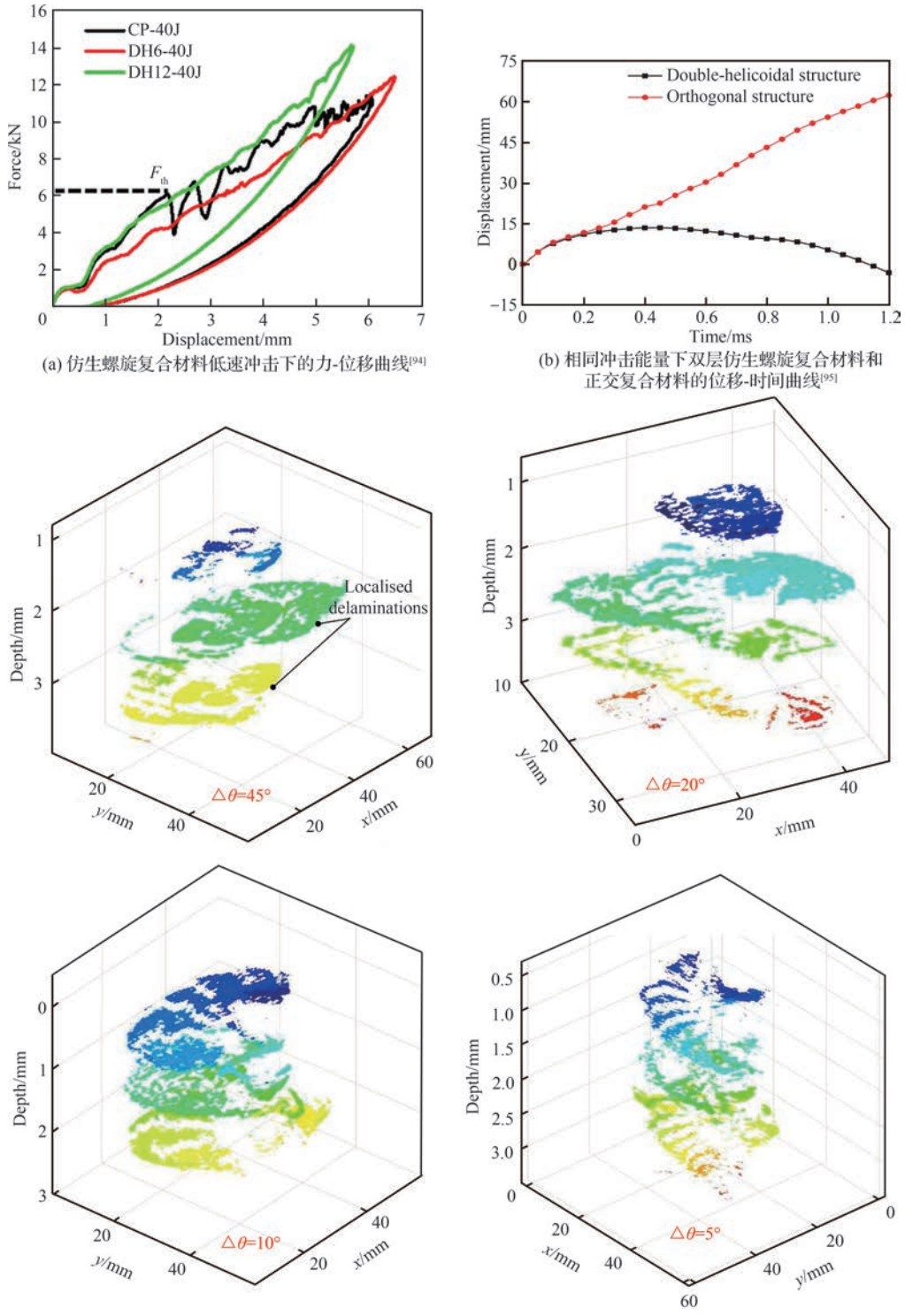
螺旋铺层复合材料的动力学性能也受到了一定关注。研究者针对螺旋铺层复合材料的低速冲击特性[15,89]、高速冲击特性[90-91]和振动特性[92-93]开展了研究，揭示了铺层角度、纤维种类、基体选择等因素的影响规律。

3.1 低速冲击特性

为了提升复合材料的低速冲击和冲后压缩性能，各种仿生螺旋结构已广泛应用于复合材料设计中。Ouyang等[94]的试验结果表明，在40 J的低速冲击条件下，相较于正交铺层的CFRP，以6°和12°螺旋角度铺设的复合材料峰值力分别增加了4.4%和21.3%，但能量吸收分别减少了16.0%和23.2%，如图8(a)[94]所示。Grunenfelder等[15]的试验表明，与准各向同性CFRP相比，螺旋铺层样品在低速冲击和冲后压缩试验中展现出更大的面内损伤面积，但面板厚度方向的损伤程度较低。特别是以16.3°和25.7°螺旋角度铺设的试样显示出提高的残余强度，而7.8°角度的试样则表现出降低的残余强度。Han等[75]采用螺旋铺层的碳纤维蒙皮铝蜂窝夹芯结构，其平均冲击接触力比编织铺层和单向铺层分别提高了60.9%和106.0%。韩登安等[95]对冰雹载荷下CFRP的撞击损伤进行了数值模拟研究，发现相同工况下正交复合材料的撞击区域破坏严重，而双层螺旋仿生复合材料变形后发生回弹直至稳定，如图8(b)[95]所示，正交螺旋仿生结构在冰雹作用下的毁伤程度低于相同密度下的正交层合结构，这一结果佐证了其在减少冰雹损害方面的潜力。Wang等[96]对线性和非线性螺旋铺层的杂环芳纶纤维增强复合材料进行了低速冲击测试。尽管线性螺旋铺层复合材料在低速冲击下具有较高的刚度和峰值力，但其吸收的冲击能量却少于正交复合材料。Yang等[97]提出了一种基于Timoshenko光束理论和非线性赫兹接触理论的新型计算建模方法，用以预测仿生螺旋结构在低速冲击和冲击波作用下的减载特性。Zhao等[98]的研究结果显示，采用12°螺旋铺层的复合材料在低速冲击测试中表现出显著的峰值载荷提升，比单向铺层和准各向同性铺层分别增加了56.4%和8.8%，同时其残余强度比正交铺层试样高出15%。较小旋转角度的螺旋纤维排列有效地分散了载荷，使裂纹在面内方向上重定向，从而阻碍了损伤沿厚度方向的突变传播。Deng等[99]的仿真结果表明，相比与准各向同性铺层，螺旋铺层的抗冲击特性得到大幅提升，其中指数变化螺旋复合材料的提高幅度最大。

螺旋角度是影响仿生螺旋复合材料的低速冲击性能的重要因素。Mencattelli和Pinho[100]测试了不同角度(2.5°～45°)的螺旋铺层复合材料的低速冲击和冲后压缩性能。结果显示，随着螺旋角度的减小，损伤呈螺旋演变，分层减少，亚临界损伤扩散增强，从而提高了损伤容限[100]，如图8(c)[100]所示。冲后压缩试验表明，随着螺旋角的增大，样件中0°层的比例急剧下降，但剩余强度和破坏应变并没有减小[100]。这些研究进一步证实了螺旋复合材料中纽结的基体裂纹、稳定的铺层破碎和裂纹分支等亚临界破坏机制的存在，这些机制是其性能显著增强的关键因素[79]。Jiang等[43]的数值模拟研究显示，按照递归或指数规律变化的螺旋角度在仿生碳/环氧复合材料中可以提升抗低速冲击特性。Meo等[57]通过数学缩放的三角序列制备了螺旋角度随厚度增加而增加的功能梯度CFRP，其在低速冲击下表现出显著改善的抗损伤特性，包括减少41%的损坏面积和增加111%的冲击后剩余能量。在Ginzburg等[101]研究则发现，螺旋CFRP在高冲击能量(80 J)下的残余压缩特性优于相应的准各向同性板；但在较低冲击能量(40 J)下，结论相反。

仿生螺旋设计对复合材料抗低速冲击特性的提升效果还受到纤维和基体种类影响，特别在碳纤维、玻璃纤维以及环氧树脂体系下性能提升显著。Rivera等[40]研究了玻璃纤维和凯夫拉纤维、环氧树脂和聚氨酯基体以及螺旋角度对复合材料低速冲击响应、抗损伤性和残余强度的影响。结果表明，环氧基复合材料在冲击时表现出最高的峰值载荷，这是由于材料固有的刚性性质造成的预期结果。冲击环氧基复合材料表现出更大程度的外部损伤，如分层和纤维断裂，而聚



(a) 仿生螺旋复合材料低速冲击下的力-位移曲线[94]

(b) 相同冲击能量下双层仿生螺旋复合材料和正交复合材料的位移-时间曲线[95]

(c) 具有不同螺旋角的CFRP试样超声波扫描示意图[100]

图8 仿生螺旋复合材料低速冲击特性研究

Fig. 8 Study of low velocity impact characteristics of bio-inspired helicoidal composites

氨酯基复合材料则没有外部损伤。与准各向同性设计相比,环氧基复合材料中所有的螺旋面板凹痕深度显著减少,小角度螺旋试样减小的程度最大。此外,对比面板的残余抗压强度,与准各向同性设计相比,大多数螺旋环氧基复合材料的残余抗压强度显著提高,大角度玻璃纤维环氧复

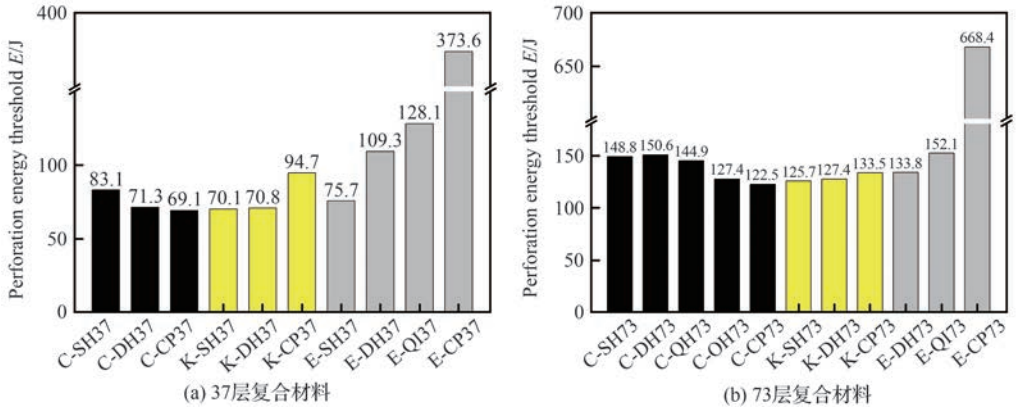
合材料的残余抗压强度提高了60%以上。然而，聚氨酯基复合材料相比于准各向同性板和环氧基复合材料并没有明显的改善。Wang等[102]在基准设计基础上，通过CFRP和GFRP混杂螺旋铺层多目标优化设计，使其在低速冲击作用下的峰值能量吸收提高31.0%，材料成本降低33.4%。Ge等[103]通过仿真得到螺旋结构的编织复合材料在冲击表面表现出不同的损伤形态：与非螺旋复合材料的十字形裂纹不同，螺旋复合材料由于连续两层之间的失配效应，其裂纹形状是扭曲的，裂纹扭转的程度和范围随螺旋角的增大而增大。Yang等[104]对螺旋复合材料抗低速冲击特性的敏感性进行分析，得出较小的螺旋角和较大的纤维纵向弹性模量可以获得更理想的抗冲击特性和更好的吸能特性。

此外，Liu等[105]制备了嵌入尼龙6层间增韧/愈合剂的仿生螺旋复合材料和常规准各向同性复合材料，并进行了跌落冲击试验并进行修复。试验结果表明，与传统复合材料相比，螺旋复合材料不仅可以在明显更高的冲击能量下完全恢复其面外峰值载荷，而且愈合后的螺旋复合材料的峰值载荷甚至超过其原始复合材料高达26%。然而，螺旋复合材料的载荷恢复速率显著依赖于其螺旋角，螺旋角为6°的螺旋复合材料在43.4 J的冲击下完全恢复，而夹角为18°的螺旋复合材料只能在24.8 J的冲击下完全恢复。

综上所述，相比正交铺层与准各向同性铺层，螺旋铺层复合材料在低速冲击和冲后压缩试验中展现出更大的面内损伤面积，但面板厚度方向的损伤程度更低。仿生螺旋复合材料表现出更好的抗低速冲击特性和剩余强度，并受到铺层角度、冲击能量和材料等因素的影响。

3.2 高速冲击特性

仿生螺旋铺层复合材料的抗侵彻特性受多种因素影响，其中纤维种类的选择尤为重要。Abir等[106]的研究指出，对于37层复合材料，螺旋铺层结构的弹道极限比正交铺层和准各向同性铺层分别提高了8%和15%。Kazemi等[91]的高速冲击试验结果表明，在入射速度一定时，与准各向同性铺层的CFRP相比，螺旋铺层的CFRP能量耗散提高了22%，螺旋铺层的碳纤维/聚对苯撑苯并二噁唑纤维混合增强复合材料的能量耗散提高了约118%。准各向同性铺层CFRP的破坏模式以剪切堵塞为主，脱层和基体裂纹局限于冲击区附近，而用螺旋铺层的CFRP分层尺寸和基体裂纹明显增加，破坏模式转变为拉伸破坏和分层。Liu等[90]用碳纤维、凯夫拉纤维和超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料制备仿生螺旋复合材料。弹道测试结果如图9[90]所示，结果表明：小角度螺旋CFRP的特性优于正交复合材料和准各向同性复合材料，然而螺旋凯夫拉纤维和超高分子量聚乙烯纤维复合材料相对于正交复合材料表现较差。Wang等[107]对螺旋铺层的杂环芳纶纤维增强复合



注：C-碳纤维复合材料，K-芳纶纤维复合材料，E-超高分子量聚乙烯纤维复合材料，CP-正交铺层，SH37-5°螺旋，DH37-10°螺旋，SH73-2.5°螺旋，DH73-5°螺旋，QH73-10°螺旋，OH73-20°螺旋，QI-准各向同性铺层

图9 不同纤维增强复合材料的弹道性能[90]

Fig. 9 Ballistic performance of different fibre-reinforced composites[90]

材料的抗侵彻特性进行了测试,发现与准各向同性和正交铺层相比,旋转角度较小的螺旋铺装层的射孔阻力和吸能能力较差,正交铺层构型是最佳纤维结构。Chew等[86]对环氧树脂亚麻纤维增强复合材料的抗侵彻特性进行了测试,结果表明螺旋复合材料在冲击下能吸收更多的能量。

仿生螺旋铺层复合材料在抗侵彻特性上的差异源于其不同的破坏机理。例如,对于碳纤维仿生螺旋增强复合材料,其在弹道冲击下展现出与传统复合材料不同的损伤模式,主要表现为贯穿厚度的螺旋损伤[106]。这种独特的损伤模式通过变形和破坏机制的协同作用,使得螺旋复合材料在完全侵彻前能够吸收更多的能量,从而提高其弹道极限。实验观察到不同铺层碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料的典型破坏模式如图10[90]所示,小角度螺旋复合材料的主要损伤是基体分裂。弹丸击穿复合材料冲击面上的纤维,然后从复合材料背面由于基体分裂而产生的基体裂缝中滑出。正交层、准各向同性复合材料和大角度螺旋复合材料的主要破坏形式为纤维损伤。因此,正交结构推荐用于坚韧纤维增强的复合材料,仿生螺旋铺层有利于脆性复合材料。随着失效机制的了解,通过混合螺旋层和正交层配置,碳纤维环氧复合材料可以达到更高的弹道极限。混合结构复合材料在冲击能吸收方面比正交复合材料和准各向同性复合材料分别高出32.6%和86.6%。Karthikeyan等[108]通过理论和试验方法,研究了侵彻条件下超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料的宏观和微观变形破坏机理与螺旋角度的关系。

综合以上,仿生铺层设计可以显著提升碳纤维等脆性复合材料的抗高速冲击特性,而关于芳纶和超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料等坚韧纤维增强的复合材料正交铺层更佳。

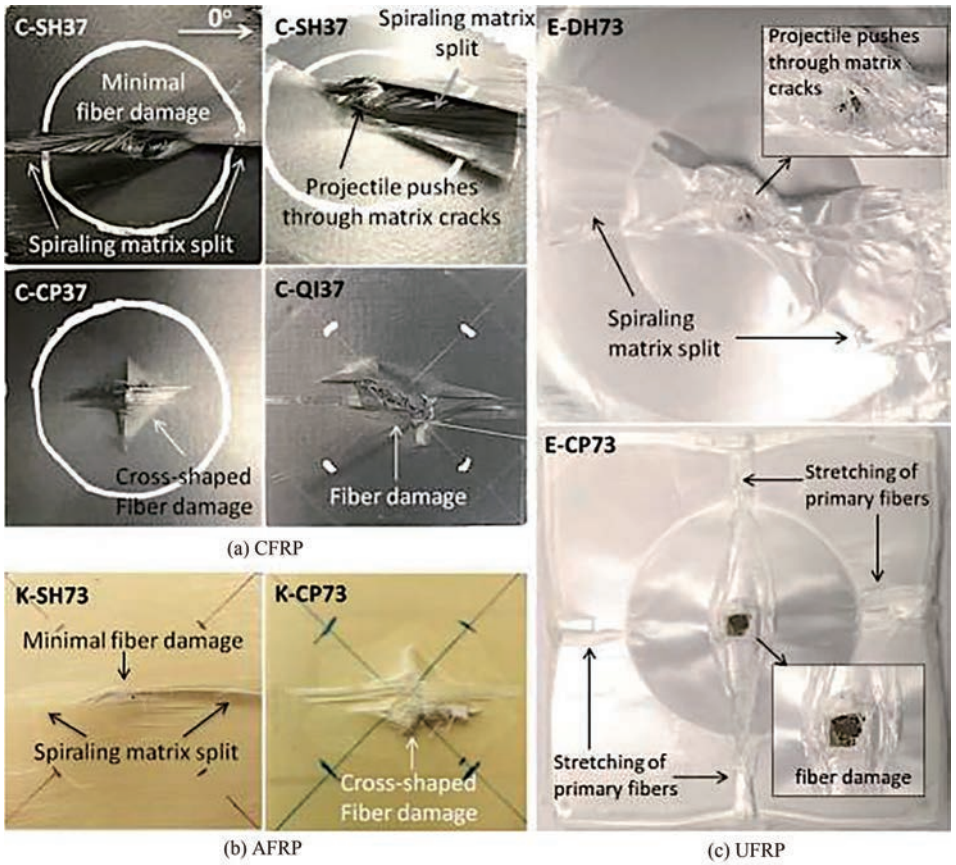


图10 仿生螺旋、正交和准各向同性复合材料的典型破坏模式[90]

Fig. 10 Typical damage modes of bio-inspired helicoidal, cross-ply and quasi-isotropic fibre-reinforced composite[90]

3.3 振动特性

对于仿生螺旋复合材料振动特性的研究多以理论和仿真为主。Garg等[92]采用高阶锯齿形理论进行分析,比剪切变形理论更准确地预测了螺旋铺层纤维增强复合材料的振动特性,详细研究了边界条件、几何特性、层数、螺旋角度和材料特性对材料自由振动特性的影响。Lu等[93]对螺旋CFRP的最大基频进行了多目标优化,并对最优基频的非线性自由振动特性进行了研究。结果表明,所设计的螺旋层序可以改善CFRP的线性振动特性,以非线性斐波那契和线性组合形式堆叠的复合材料具有更优异的振动特性。

Garg等[87]后续又利用高阶锯齿形理论,进一步研究了螺旋三明治板的振动和屈曲特性。在分析过程中考虑了不同类型的螺旋构型,即递归、指数、半圆、斐波那契和线性螺旋。对螺旋复合材料的自由振动特性与均匀分布和正交铺层的传统复合材料进行了比较,详细研究了层数、螺旋结构、几何特性和末端条件对仿生螺旋层合材料屈曲和自由振动分析的影响。Paruthi等[65]比较了双螺旋和正交螺旋仿生层合复合材料板在热条件下的自由振动行为,研究了铺层构型、长径比、边界条件、热条件、边厚比和螺旋角度对振动特性的影响。他们的研究表明,在自由振动条件下,螺旋铺层比QI铺层表现更好,特别是对于薄板。

总体而言,通过仿生螺旋铺层设计可以改善纤维增强复合材料的振动特性。对于薄板,正交螺旋铺层具有较高的无量纲固有频率,而对于厚板,QI铺层更佳。

4 应用研究

仿生螺旋复合材料近10年才开始受到人们的广泛关注,目前依然处在简单的性能分析阶段,关于其应用还停留在预研和设计阶段。传统铺层的纤维增强复合材料因具有高比强度和比模量及可设计强等优势,已被广泛应用于航空航天领域。在此基础上,仿生螺旋复合材料仅引入了铺层角度设计,材料体系与制备工艺无重大改变,力学性能显著提升,故而随着研究工作的不断深入,仿生螺旋复合材料独特的高强高韧、可设计性等优势将使得其在航空航天等领域拥有很大的应用前景。结合本文的研究工作,认为仿生螺旋复合材料在飞机机翼、飞机侧壁板、火箭承载筒、卫星壁板、航天器燃料储箱等领域具有应用的潜力。

5 总结与展望

现有研究对于仿生螺旋复合材料动、静态力学响应及响应机理进行了初步探索。在一定条件下,相较于传统铺层方式,仿生螺旋铺层使得碳纤维和玻璃纤维增强复合材料的整体刚度、强度、韧性及抗冲击特性得到提升,强化机理主要包括:改变了纤维方向排布,降低了材料面内各向异性性水平,使得板在受到集中面外载荷时的弯曲刚度增大;在截面所受弯矩和剪力一定时,随着层间的螺旋角度减小,层间法线和切向应力峰值呈下降趋势,在相同载荷条件下螺旋复合材料更不容易发生分层的破坏模式;仿生螺旋结构中形成扭曲裂纹,裂纹前端局部断裂模式的改变导致了局部应变能释放率的降低,从而增加了扩展裂纹所需的外加能释放率。而仿生螺旋铺层对于芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料抗侵彻特性尚未发现明显提升。

仿生螺旋铺层提升纤维增强复合材料特性作为一种新兴设计思路,具有提升材料刚度、强度及韧性等优势,将在飞行器与航天器中有更广泛的发展和应用。但目前仍存在如下问题,亟待解决。

1) 现有研究主要集中与复合材料的力学特性方面,并未针对其在航空航天领域中的实际应用问题开展研究。航空航天领域中复合材料需要在极端复杂环境中高可靠服役,对材料的轻量化、耐温性、多功能一体化(防热承载、防热隐身、透波隔热、防热隔热、主被动防隔热等)性能要求极高。需要深入研究仿生螺旋复合材料在极端环境中组分、结构及性能的演变规律、多物理化学场与材料耦合作用等,提高对材料服役性能的认识。

2) 尽管对于碳纤维和玻璃纤维增强复合材料的仿生螺旋增强性能机理已经有了一定的了

解，但对于树脂含量、层间强弱、螺旋角度或变角度螺旋等因素的优化设计准则仍然不足。这些因素对于材料的性能具有重要影响，因此需要进一步深入研究和优化设计。

3）目前的研究主要集中于复合材料本身的力学性能，对于多种材料复合结构的研究尚浅，相关优化设计尚未开始。实际应用中，复合材料常常与其他材料组成复合结构，如金属、陶瓷等。因此，未来的研究应该更加关注不同材料复合结构的性能优化和设计。

参 考 文 献

[1] 熊健，李志彬，刘惠彬，等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报，2021，38(6)：1629-1650.
XIONG J，LI Z B，LIU H B，et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(6)：1629-1650 (in Chinese).

[2] 冯志海，李俊宁，田跃龙，等. 航天先进复合材料研究进展[J]. 复合材料学报，2022，39(9)：4187-4195.
FENG Z H，LI J N，TIAN Y L，et al. Research progress of advanced composite materials for aerospace applications[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2022，39(9)：4187-4195 (in Chinese).

[3] 徐悦. 碳纤维复合材料的性能分析及其在航空领域的应用[J]. 化学工程与装备，2023(5)：200-202.
XU Y. Performance analysis of carbon fiber composites and their application in aviation [J]. Chemical Engineering & Equipment，2023(5)：200-202 (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 Y Z，WANG Z J，LIU G F. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University，2021，39(5)：44-51 (in Chinese).

[5] 慕琴琴，燕群，杭超，等. 不同厚度及冲击角度对复合材料平板抗冲击能力的影响[J]. 实验力学，2023，38(1)：142-150.
MU Q Q，YAN Q，HANG C，et al. Effect of different thickness and impact angel on the impact resistance of composite flat panels[J]. Journal of Experimental Mechanics，2023，38(1)：142-150 (in Chinese).

[6] 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 H，LI Y，TU H Y. Research on interlayer properties of short fiber intercalated carbon fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2022，39(8)：3674-3683 (in Chinese).

[7] 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 X J，ZHAN L，ZHOU A L，et al. Research progress on interlaminar toughening technology of fiber reinforced composites[J]. Composites Science and Engineering，2022(1)：117-128 (in Chinese).

[8] GHAZLAN A，NGO T，TAN P，et al. Inspiration from Nature's body armours-A review of biological and bioinspired composites[J]. Composites Part B：Engineering，2021，205：108513.

[9] PLOCHER J，MENCATTELLI L，NARDUCCI F，et al. Learning from nature：Bio-inspiration for damage-tolerant high-performance fibre-reinforced composites[J]. Composites Science and Technology，2021，208：108669.

[10] HUANG W，RESTREPO D，JUNG J Y，et al. Multi-scale toughening mechanisms in biological materials and bioinspired designs[J]. Advanced Materials，2019，31(43)：e1901561.

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

[12] CHENG L，WANG L Y，KARLSSON A M. Mechanics-based analysis of selected features of the exoskeletal microstructure of Popillia japonica[J]. Journal of Materials Research，2009，24(11)：3253-3267.

[13] BOULIGAND Y. Sur une architecture torsadée répandue dans de nombreuses cuticules d′Arthropodes [J]. CR Acad Sci，1965，261：3665-3668.

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

[16] 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.

[17] SHARMA A，SHUKLA N K，BELARBI M O，et al. Bio-inspired nacre and helicoidal composites：From structure to mechanical applications[J]. Thin-Walled Structures，2023，192：111146.

[18] MEYERS M A, CHEN P Y, LIN A Y M, et al. Biological materials: Structure and mechanical properties [J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(1): 1-206.

[19] ZHAO S C, YIN X M, ZHANG D Y. A study of a bio-inspired impact resistant carbon fiber laminate with a sinusoidal helicoidal structure in the mandibles of trap-jaw ants[J]. Acta Biomaterialia, 2023, 169: 179-191.

[20] YARAGHI N A, GUARÍN-ZAPATA N, GRUNENFELDER L K, et al. A sinusoidally architected helicoidal biocomposite [J]. Advanced Materials, 2016, 28(32): 6835-6844.

[21] HUANG W, SHISHEHBOR M, GUARÍN-ZAPATA N, et al. A natural impact-resistant bicontinuous composite nanoparticle coating[J]. Nature Materials, 2020, 19: 1236-1243.

[22] 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.

[23] NALEWAY S E, TAYLOR J R A, PORTER M M, et al. Structure and mechanical properties of selected protective systems in marine organisms [J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 59: 1143-1167.

[24] VERMA D, TOMAR V. Structural-nanomechanical property correlation of shallow water shrimp (Pandalus platyceros) exoskeleton at elevated temperature[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(3): 360-370.

[25] 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.

[26] CHENG L, WANG L Y, 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.

[27] RAABE D, ROMANO P, SACHS C, et al. Microstructure and crystallographic texture of the chitin-protein network in the biological composite material of the exoskeleton of the lobster Homarus americanus [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 421(1-2): 143-153.

[28] 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): 65-68.

[29] 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.

[30] 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.

[31] YIN S, YANG R H, HUANG Y, et al. Toughening mechanism of coelacanth-fish-inspired double-helicoidal composites [J]. Composites Science and Technology, 2021, 205: 108650.

[32] 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: 2634.

[33] PATEK S N, CALDWELL R L. Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: Strike forces of the peacock mantis shrimp Odontodactylus scyllarus[J]. The Journal of Experimental Biology, 2005, 208(Pt 19): 3655-3664.

[34] WEAVER J C, MILLIRON G W, MISEREZ A, et al. The stomatopod dactyl club: A formidable damage-tolerant biological hammer [J]. Science, 2012, 336(6086): 1275-1280.

[35] MOHAMED S A, MOHAMED N, ELTAHER M A. Bending, buckling and linear vibration of bio-inspired composite plates [J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 111851.

[36] GUO C, HE J. Multi-scale concurrent analysis for bio-inspired helicoidal CFRP laminates and experimental investigation [J]. Composite Structures, 2022, 296: 115886.

[37] YIN S, CHEN H Y, YANG R H, et al. Tough nature-inspired helicoidal composites with printing-induced voids [J]. Cell Reports Physical Science, 2020, 1: 100109.

[38] 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.

[39] 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.

[40] RIVERA J, YARAGHI N A, HUANG W, et al. Modulation of impact energy dissipation in biomimetic helicoidal composites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 14619-14629.

[41] PINTO F, IERVOLINO O, SCARSELLI G, et al. Bio-inspired twisted composites based on Bouligand structures[C]// Bioinspiration, biomimetics, and bioreplication 2016. SPIE, 2016.

[42] 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.

[43] JIANG H Y, REN Y R, LIU Z H, et al. Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups[J]. Composite Structures, 2019, 214: 463-475.

[44] DHARI R S, PATEL N P, WANG H X, et al. Numerical investigation of Fibonacci series based bio-inspired laminates under impact loading [J]. Composite Structures, 2021, 255: 112985.

[45] 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.

[46] ZHANG X Y, LUAN Y B, LI Y C, et al. Bioinspired design of lightweight laminated structural materials and the intralayer/interlayer strengthening and toughening mechanisms induced by the helical structure[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114575.

[47] 阿拉腾沙嘎, 蒋禅, 胡嘉起. 仿生螺旋结构复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 1-4.
ALATENG S, JIANG S, HU J Q. Research progress in biomimetic spiral structure composites [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11): 1-4 (in Chinese).

[48] NING H B, FLATER P, GASKEY B, et al. Failure mechanisms of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites with complex fiber configurations under impact[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2024, 9(4): 753-766.

[49] 何亚飞, 矫维成, 杨帆, 等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. 纤维复合材料, 2011, 28(2): 7-13.
HE Y F, JIAO W C, YANG F, et al. The development of polymer composites forming process [J]. Fiber Composites, 2011, 28(2): 7-13 (in Chinese).

[50] AKHOUNDI B, BEHRAVESH A H, BAGHERI SAED A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(3): 99-116.

[51] 李岩, 龙昱, 郝潞岑, 等. 3D打印纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 力学季刊, 2022, 43(4): 731-750.
LI Y, LONG Y, HAO L C, et al. Recent advances in the mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced composites[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(4): 731-750 (in Chinese).

[52] OUYANG W, GONG B W, WANG H, et al. Identifying optimal rotating pitch angles in composites with Bouligand structure [J]. Composites Communications, 2021, 23: 100602.

[53] RIBBANS B, LI Y J, TAN T. A bioinspired study on the interlaminar shear resistance of helicoidal fiber structures[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 56: 57-67.

[54] YANG F, YI F J, XIE W H. The role of ply angle in interlaminar delamination properties of CFRP laminates [J]. Mechanics of Materials, 2021, 160: 103928.

[55] 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.

[56] LEREW D, FLATER P, GASKEY B, et al. Mechanical behavior of bio-inspired helicoidal thermoplastic composites [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024, 37(3): 1094-1110.

[57] MEO M, RIZZO F, PORTUS M, et al. Bioinspired helicoidal composite structure featuring functionally graded variable ply pitch[J]. Materials, 2021, 14(18): 5133.

[58] MOHAMED S A, MOHAMED N, ABO-BAKR R M, et al. Multi-objective optimization of snap-through instability of helicoidal composite imperfect beams using Bernstein polynomials method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 120: 301-329.

[59] MORIKAWA K, YAHIRO H, MATSUMOTO T. Visual examination of flexural cracking behaviors in a helicoidally laminated composite [J]. Procedia Engineering, 2017, 171: 1301-1307.

[60] NWAMBU C N, ROBERT C, ALAM P. Viscoelastic properties of bioinspired asymmetric helicoidal CFRP composites[J]. MRS Advances, 2022, 7(31): 805-810.

[61] SHI M D, HAN Z W, HAN Q G, et al. Research on the mechanical and water-repellent properties of bionic carbon fiber reinforced plastic composites inspired by coelacanth scale and lotus leaf[J]. Composites Science and Technology, 2022, 226: 109542.

[62] WANG K, WU X D, AN L H, et al. Crack modes and toughening mechanism of a bioinspired helicoidal recursive composite with nonlinear recursive rotation angle-based layups [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2023, 142: 105866.

[63] YANG R H, WANG H T, WANG B, et al. Sinusoidally architected helicoidal composites inspired by the dactyl club of mantis shrimp[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2023, 14(3): 321-336.

[64] SHANG J S, NGERN N H H, TAN V B C. Crustacean-inspired helicoidal laminates [J]. Composites Science and Technology, 2016, 128: 222-232.

[65] PARUTHI S, SHARMA N, GULIA R, et al. Thermal-based free vibration and buckling behavior of bio-inspired cross- and double-helicoidal/bouligand laminated composite plates[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2023, 36(6): 933-942.

[66] LU T Y, SHEN H S, WANG H, et al. Optimization design and secondary buckling of bio-inspired helicoidal laminated plates under thermomechanical loads[J]. Composite Structures, 2023, 321: 117344.

[67] LUO H Y, WANG H S, ZHAO Z Y, et al. Experimental and numerical investigation on the failure behavior of Bouligand laminates under off-axis open-hole tensile loading[J]. Composite Structures, 2023, 313: 116932.

[68] VILLARRAGA J, BUSTAMANTE GÓEZ L M, ZAVATTIERI P. Fiber angle influence and toughness characterization of bioinspired discontinuous fiber helicoids composite materials produced via additive manufacturing[J]. Revista EIA, 2023, 20(40): 1-15.

[69] NWAMBU C, ROBERT C, ALAM P. The tensile behaviour of unaged and hygrothermally aged asymmetric helicoidally stacked CFRP composites [J]. Journal of Composites Science, 2022, 6(5): 137.

[70] NWAMBU C, ROBERT C, ALAM P. Tensile behaviour of unaged and hygrothermally aged discontinuous Bouligand structured CFRP composites[J]. Oxford Open Materials Science, 2023, 3(1): itac016.

[71] DELAUNOIS Y, TITS A, GROSSMAN Q, et al. Design strategies of the mantis shrimp spike: How the crustacean cuticle became a remarkable biological harpoon [J]. Natural Sciences, 2023, 3(3): e20220060.

[72] LI W H, HUANG W Z, XIONG Y, et al. Failure mechanism and heat treatment effect of 3D-printed bio-inspired helicoidal CF/PEEK composites [J]. Composites Communications, 2023, 37: 101464.

[73] SHARMA A, BELARBI M O, GARG A, et al. Bending analysis of bio-inspired helicoidal/Bouligand laminated composite plates[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2023: 1-15.

[74] HAN Q G, CHEN S T, WANG J H, et al. Biomimetic laminated basalt fiber-reinforced composite with sinusoidally architected helicoidal structure integrating superior mechanical properties and microwave-transmissibility [J]. Composites Science and Technology, 2023, 231: 109836.

[75] HAN Q G, QIN H L, LIU Z H, et al. Experimental investigation on impact and bending properties of a novel dactyl-inspired sandwich honeycomb with carbon fiber[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119161.

[76] SUKSANGPANYA N, YARAGHI N A, KISAILUS D, et al. Twisting cracks in Bouligand structures [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 76: 38-57.

[77] SUKSANGPANYA N, YARAGHI N A, PIPES R B, et al. Crack twisting and toughening strategies in Bouligand architectures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 150: 83-106.

[78] YANG F, XIE W H, MENG S H. Crack-driving force and toughening mechanism in crustacean-inspired helicoidal structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 208-209: 107-118.

[79] MENCATTELLI L, PINHO S T. Ultra-thin-ply CFRP Bouligand bio-inspired structures with enhanced load-bearing capacity, delayed catastrophic failure and high energy dissipation capability[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 129: 105655.

[80] WU K J, SONG Z Q, ZHANG S S, et al. Discontinuous fibrous Bouligand architecture enabling formidable fracture resistance with crack orientation insensitivity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(27): 15465-15472.

[81] LIU J L, MENCATTELLI L, ZHI J, et al. Lightweight, fiber-damage-resistant, and healable bio-inspired glass-fiber reinforced polymer laminate[J]. Polymers, 2022, 14(3): 475.

[82] HE J, GUO C, LI W K. Understanding the helicoidal damage behavior of bio-inspired laminates by conducting multiscale concurrent simulation and experimental analysis[J]. Composite Structures, 2023, 314: 116972.

[83] 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.

[84] ZHANG X F, YUAN Y N. Bioinspired hybrid helical structure in lobster Homarus Americanus: Enhancing penetration resistance and protective performance [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 177: 107927.

[85] LIU J L, LEE H P, TAY T E, et al. Healable bio-inspired helicoidal laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137: 106024.

[86] CHEW E, LIU J L, TAY T E, et al. Improving the mechanical properties of natural fibre reinforced laminates composites through Biomimicry [J]. Composite Structures, 2021, 258: 113208.

[87] GARG A, BELARBI M O, CHALAK H D, et al. Buckling and free vibration analysis of bio-inspired laminated sandwich plates with helicoidal/Bouligand face sheets containing softcore[J]. Ocean Engineering, 2023, 270: 113684.

[88] LIAN X, ZHANG W D, MAO Y M, et al. Buckling optimization of curved grid-stiffened helicoidal composite panel including the factor of mode shape in multiple load cases[J]. Composite Structures, 2023, 322: 117383.

[89] LU X C, ZHANG X M, LI Y B, et al. Enhanced low-velocity impact resistance of helicoidal composites by fused filament fabrication (FFF)[J]. Polymers, 2022, 14(7): 1440.

[90] LIU J L, SINGH A K, LEE H P, et al. The response of bio-inspired helicoidal laminates to small projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 142: 103608.

[91] KAZEMI M E, MEDEAU V, GREENHALGH E, et al. Bio-inspired interleaved hybrids: Novel solutions for improving the high-velocity impact response of carbon fibre-reinforced polymers (CFRP)[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 264: 110930.

[92] GARG A, BELARBI M O, LI L, et al. Free vibration analysis of bio-inspired helicoid laminated composite plates[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2023, 58(7): 538-548.

[93] LU T Y, SHEN H S, WANG H, et al. Linear and nonlinear free vibration and optimal design of bio-inspired helicoidal CFRPC laminated plates[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(9): 2450098.

[94] OUYANG W, WANG H, DONG J L, et al. Cross-helicoidal approach to the design of damage-resistant composites[J]. Composite Structures, 2023, 306: 116577.

[95] 韩登安, 徐丹, 叶仁传, 等. 冰雹载荷下基于碳纤维增强复合材料的腔棘鱼鳞双螺旋仿生结构的撞击损伤分析[J]. 高压物理学报, 2022, 36(4): 164-172.
HAN D A, XU D, YE R C, et al. Analysis on damage of double-helicoidal carbon fiber reinforced polymer bionic structure inspired by coelacanth scales under hail load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36 (4): 164-172 (in Chinese).

[96] WANG C Z, SU D D, XIE Z F, et al. Dynamic behaviour of Bio-inspired heterocyclic aramid fibre-reinforced laminates subjected to low-velocity drop-weight impact [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106733.

[97] YANG F, XIE W H, MENG S H. Impact and blast performance enhancement in bio-inspired helicoidal structures: A numerical study[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 142: 104025.

[98] ZHAO S C, ZHANG D Y, YAN Y P, et al. Investigation of bionic composite laminates inspired by the natural impact-resistant helicoidal structure in the mandibles of trap-jaw ants[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2023, 18(5): 056005.

[99] DENG Y B, JIANG H Y, REN Y R. Low-velocity impact resistance behaviors of bionic double-helicoidal composite laminates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 248: 108248.

[100] MENCATTELLI L, PINHO S T. Realising bio-inspired impact damage-tolerant thin-ply CFRP Bouligand structures via promoting diffused sub-critical helicoidal damage[J]. Composites Science and Technology, 2019, 182: 107684.

[101] GINZBURG D, PINTO F, IERVOLINO O, et al. Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact[J]. Composite Structures, 2017, 161: 187-203.

[102] WANG Z, LUO Q T, LI Q, et al. Design optimization of bioinspired helicoidal CFRPP/GFRPP hybrid composites for multiple low-velocity impact loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 219: 107064.

[103] GE X X, ZHANG P, ZHAO F, et al. Experimental and numerical investigations on the dynamic response of woven carbon fiber reinforced thick composite laminates under low-velocity impact [J]. Composite Structures, 2022, 279: 114792.

[104] YANG F, XIE W H, MENG S H. Global sensitivity analysis of low-velocity impact response of bio-inspired helicoidal laminates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 187: 106110.

[105] LIU J L, PHAM V N H, TAY T E, et al. Bio-inspired helicoidal thin-ply carbon fiber reinforced epoxy laminates with nylon microparticles for improved toughness and healing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 171: 107588.

[106] ABIR M R, TAY T E, LEE H P. On the improved ballistic performance of bio-inspired composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 123: 59-70.

[107] WANG H X, WANG C Z, HAZELL P J, et al. Insights into the high-velocity impact behaviour of bio-inspired composite laminates with helicoidal lay-ups[J]. Polymer Testing, 2021, 103: 107348.

[108] KARTHIKEYAN K, KAZEMAHVAZI S, RUSSELL B P. Optimal fibre architecture of soft-matrix ballistic laminates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 88: 227-237.

(责任编辑：张晗)

Recent advances in mechanical properties of fibre-reinforced composites with bio-inspired helicoidal lay-ups

WANG Xin[1], JI Haibo[2,3], LI Zhen[1], LI Bingyang[1,4], ZHANG Qi[1], ZHANG Rui[5], XU Xiang[6], MENG Han[2,3], WANG Pengfei[1,*], LU Tianjian[2,3]

1. *Advanced Materials and Energy Center, China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing 100088, China*
2. *State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*
3. *MIIT Key Laboratory of Multifunctional Lightweight Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*
4. *College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China*
5. *State Key Laboratory of New Textile Materials and Advanced Processing Technologies, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China*
6. *School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China*

Abstract: Fiber-reinforced composites with bio-inspired helicoidal lay-ups are a new type of composites inspired by the microstructure of biological exoskeletons and scales. The helicoidal lay-ups are able to significantly reduce the interlaminar stresses of transversely loaded composites by introducing small inter-ply angles, thus improving the interlaminar properties and impact resistance. This paper presents a state-of-the-art review of bio-inspired helicoidal composites, including bionics principles, typical configurations, fabrication methods, application prospects, and the current research advances in their static/dynamic mechanical properties. The static/dynamic mechanical responses and underlying enhancement mechanisms of bio-inspired helicoidal composites are systematically analyzed. It has been clarified that as a kind of emerging design method, stacking unidirectional laminates helicoidally with small interply angles results in improvements in stiffness, strength and toughness of fibre-reinforced composites compared with the traditional cross-ply or quasi-isotropic ones. By summarizing the shortcomings of the existing efforts, the future development trend of bio-inspired helicoidal composites is discussed. In a word, the concluding remarks raised in this paper are of great theoretical and practical significance for the design of high-performance fibre-reinforced composites.

Keywords: fibre-reinforced composites; mechanical properties; bio-inspired design and manufacturing; interlaminar properties; impact resistance

Received: 2023-12-15; **Revised**: 2024-04-29; **Accepted**: 2024-07-01; **Published online**: 2024-08-23 08:52
URL: https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I19/29987
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (12402407, 12302187, U22B2013); Beijing Nova Program (20230484287)
* **Corresponding author.** E-mail: hvhe@163.com