

# 航天器冲击防护用热塑性仿生复合材料的弯曲性能研究

陈昊宇<sup>1,2</sup>, 殷莎<sup>1,2</sup>, 胡建星<sup>1,2</sup>, 张品亮<sup>3</sup>, 龚自正<sup>3</sup>, 许骏<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院;

2. 北京航空航天大学 先进载运科学研究中心; 北京 100191;

3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 模仿自然界中甲壳类动物外骨骼内的螺旋铺层微结构, 采用 3D 打印制备得到螺旋铺层仿生复合材料, 分析其在三点弯曲载荷下的力学性能并与工程中常见的准各向同性复合材料进行对比。实验结果显示: 仿生复合材料的弯曲性能及失效形式明显区别于传统铺层方案, 在弯曲载荷下不易产生分层, 结构可在受损伤条件下较长阶段内保持一定的承载能力。结合裂纹扩展过程中对裂纹形貌的显微观察, 进一步揭示了该仿生复合材料强韧性的机理。研究结果可为该种仿生复合材料的工程应用提供参考。

**关键词:** 仿生复合材料; 耐撞性; 分层; 韧性

中图分类号: TB33; TB303; V524.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2019)02-0151-05

DOI: [10.12126/see.2019.02.008](https://doi.org/10.12126/see.2019.02.008)

## Bending properties of thermoplastic bioinspired helicoidal laminated composites used in impact protection of spacecraft

CHEN Haoyu<sup>1,2</sup>, YIN Sha<sup>1,2</sup>, HU Jianxing<sup>1,2</sup>, ZHANG Pinliang<sup>3</sup>, GONG Zizheng<sup>3</sup>, XU Jun<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University;

2. Advanced Vehicle Research Center (AVRC), Beihang University; Beijing 100191, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In this paper, a kind of helicoidal laminated bio-inspired composite is designed by imitating the microstructure of the exoskeleton of some crustaceans in nature, and then fabricated by the 3-D printing. The mechanical properties of the biomimetic composite material under three-point-bending conditions are analyzed and compared with those of the traditional laminated composites. The experimental results show that the failure modes of the helicoidal laminated composite materials are quite different from those made under the traditional laminating schemes and the delamination does not tend to occur under the bending loads for the helicoidal laminates, which means that the helicoidal laminating structure can maintain an adequate bearing capacity for a long period of time in the damage evolution. The mechanism of the high toughness of the bio-inspired composites is revealed by analyzing the crack propagation process based on the microscopic observation of the crack morphology. The results may provide some reference for the engineering application of this kind of bio-inspired composite materials.

**Keywords:** bio-inspired composites; crashworthiness; delamination; toughness

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2019-03-13

基金项目: 北京卫星环境工程研究所创新基金项目 (编号: CAST-BISEE 2017-021)

引用格式: 陈昊宇, 殷莎, 胡建星, 等. 航天器冲击防护用热塑性仿生复合材料的弯曲性能研究[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(2): 151-155

CHEN H Y, YIN S, HU J X, et al. Bending properties of thermoplastic bioinspired helicoidal laminated composites used in impact protection of spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(2): 151-155

## 0 引言

纤维增强复合材料具有轻质、高比刚度、高比强度,以及可设计、工艺性好等优点,目前已广泛应用于航空航天等领域<sup>[1-3]</sup>。固体火箭发动机采用玻璃纤维壳体可以较钢制壳体质量减少50%以上,大大提升火箭运载能力。在飞机结构设计方面,复合材料主要应用于水平安定面、尾翼、机身等,可使飞机结构质量减少10%~40%,成本降低15%~30%<sup>[3]</sup>。复合材料易发生脆性失效,在航空航天领域常见的冲击、大过载等恶劣工作状态下,易出现基体、纤维的断裂、分层等局部失效。先进复合材料可通过合理控制局部失效的萌生和扩展来提升韧性。自然界中,一些甲壳类动物的外骨骼具有超强的强度与断裂韧性<sup>[4-5]</sup>。通过显微观察发现,这些生物材料中存在纤维螺旋铺层的微结构<sup>[5-6]</sup>。为借鉴这种结构研制高强度仿生材料,研究螺旋铺层结构的失效机理意义重大。Cheng等人模仿甲壳虫鞘翅外骨骼微结构,发现螺旋铺层复合材料在弯曲刚度、强度方面较准各向同性铺层材料具有优势<sup>[7]</sup>。Weaver等人观察了裂纹偏转的三维形貌,阐释了生物材料螺旋铺层中的裂纹偏转机理<sup>[8]</sup>。Suksangpanya等人于2017年通过理论分析研究了螺旋铺层复合材料中裂纹的螺旋分布对于应力强度因子的影响,发现在裂纹前端局部断裂模式的改变减小了局部断裂能释放率,增大了裂纹扩展所需的能量<sup>[9]</sup>。Tan等人分析了螺旋铺层方案中不同螺旋角、层数和对称性等因素对于层合板在准静态压痕加载下的失效形式和极限承载能力的影响。该研究通过CT扫描和有限元模拟揭示了交叉铺层和螺旋铺层等层合板内部的裂纹和分层的分布以及随加载过程的演化<sup>[10-12]</sup>。然而,关于螺旋铺层复合材料在弯曲载荷下的力学性能和裂纹扩展过程的研究有限。

本研究通过热塑性3D打印制备复合材料样品,进行了弯曲载荷下实验研究,分析了螺旋铺层方案与传统铺层方案的失效形式及断裂韧性的区别,并通过高倍率显微观察裂纹形貌,揭示了其裂纹扩展的过程。

## 1 三点弯实验

### 1.1 试样设计与制备

本文采用热塑性3D打印工艺(VARI)制备

复合材料试样,如图1所示。区别于传统复合材料制备方法,在本工艺过程中,热塑性基体在打印加热喷头处熔融并与碳纤维丝混合,挤出的混合体按照编程路径铺放,自然冷却后形成纤维基体结合紧密的复合材料。制备的样品具有纤维连续、纤维取向精确的特点<sup>[13]</sup>。本研究打印的试样外形符合ASME-D7264/D7264M-15标准<sup>[14]</sup>。螺旋铺层方案为 $[0/16.36/32.73/49.09/65.45/81.82/98.18/114.54/130.91/147.27/163.64/180]_S$ ;同时制备准各向同性复合材料,其铺层方案为 $[0/\pm 45/90]_{3S}$ ,用以对比两者的弯曲力学性能。2种方案中的 $0^\circ$ 方向与试样的长度方向(x方向)一致。

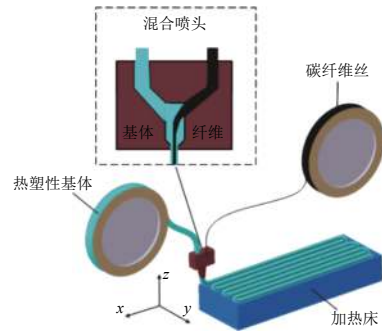


图1 热塑性3D打印制备复合材料原理

Fig. 1 Scheme of thermoplastic composite 3D printing

### 1.2 实验过程

采用INSTRON 8801试验机对试样进行准静态弯曲加载。根据ASME-D7264/D7264M-15标准确定夹具的支撑跨距、圆柱压头半径等参数,实验设备和样品如图2所示。加载速率设为1 mm/min。为保证实验数据可信,每种铺层方案采用3个相同试样进行重复实验。

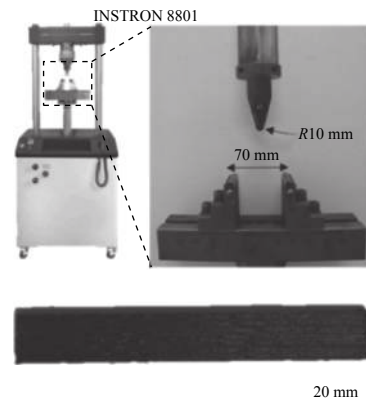


图2 三点弯实验设备和试样

Fig. 2 Three-point-bending testing equipment and sample

### 1.3 实验结果

实验结果如图 3 和图 4 所示。由图 3(a) 和图 4(a) 可知, 三点弯实验的结果重复性良好、可信。由图 3(a)、(b) 和图 4(a)、(b) 可知, 2 种铺层方案的弯曲加载历程均可分为 3 个阶段。首先材料发生弹性变形, 试样在弯曲载荷下拉伸, 侧应力随载荷增加而增大, 2 种铺层方案均出现了 0° 纤维断裂, 故两者的第 1 次峰值载荷接近。弯曲实验之后, 采用 Keyence® 高倍率超景深显微系统对样品进行观察, 可清晰观察到裂纹表面的三维形貌, 为分析裂纹扩展路径提供了现象依据。在 0° 纤维断裂后, 准各向同性铺层在加载点附近不断出现分层, 导致其承载能力迅速下降; 螺旋铺层也出现了较为严重的穿层裂纹, 并在试样厚度方向连续螺旋上升。图 4(c) 中黄色线条越粗代表该层裂纹断面在 z 方向上高度越高。

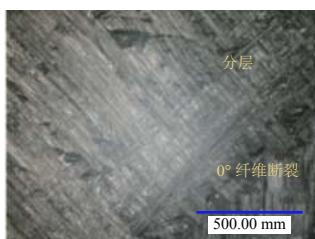
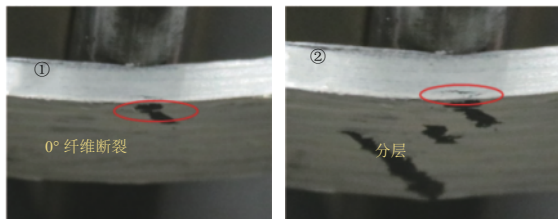
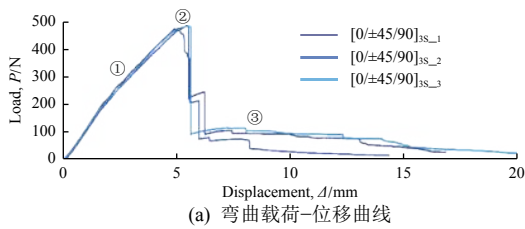
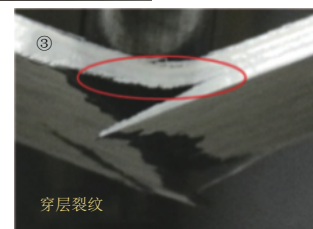
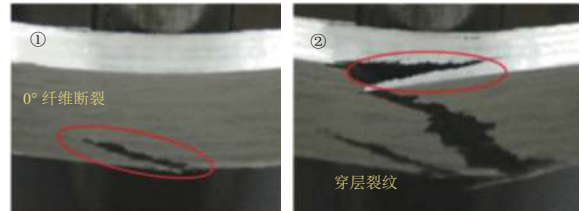
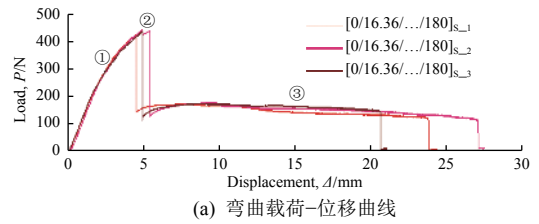
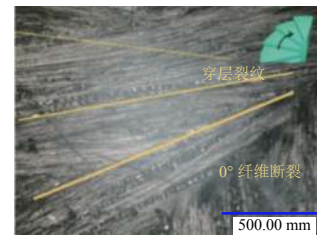


图 3 准各向同性铺层方案三点弯实验结果  
Fig. 3 Quasi-isotropic laminating sequence samples



(b) 不同加载阶段裂纹萌生和扩展形式



(c) 弯曲后试样裂纹表面形貌

图 4 螺旋铺层方案三点弯实验结果  
Fig. 4 Helicoidal laminating sequence samples

## 2 理论分析与讨论

### 2.1 刚度理论计算

根据层合板经典刚度理论, 复合材料层合板的面内刚度矩阵、耦合刚度矩阵和弯曲刚度矩阵的计算式分别为:

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}); \quad (1)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2); \quad (2)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (3)$$

式中:  $\bar{Q}_{ij}$  为单层板刚度系数;  $z$  为单层在铺层厚度方向上的坐标。

参照文献 [15] 中相同材料的性能参数, 取

$E_{11}=29.998$  GPa,  $E_{22}=9.366$  GPa,  $\nu_{12}=0.301$ ,  $G_{12}=4.13$  GPa, 计算螺旋铺层和准各向同性铺层的刚度矩阵, 结果见表1。其中对称铺层的耦合刚度矩阵  $B$  为零阵。一般认为, 弯曲矩阵系数  $d_{11}$ 、 $d_{22}$  分别决

定复合材料梁在转矩  $M_x$ 、 $M_y$  纯弯曲状态下的刚度。对比表1中弯曲矩阵系数  $d_{22}$  可以看出, 螺旋铺层层合板的该系数较传统铺层提升了10.94%, 因此, 螺旋铺层层合板的弯曲刚度也会有较大提升。

表1 2种铺层方案的刚度矩阵

Table 1 Stiffness matrix of two laminating sequences

刚度矩阵	准各向同性铺层	螺旋铺层
面内刚度矩阵 $A$	$\begin{bmatrix} 5.39 \times 10^4 & 1.55 \times 10^4 & 0 \\ 1.55 \times 10^4 & 5.39 \times 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 1.92 \times 10^4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.72 \times 10^4 & 1.49 \times 10^4 & 0 \\ 1.49 \times 10^4 & 5.17 \times 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 1.87 \times 10^4 \end{bmatrix}$
耦合刚度矩阵 $B$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
弯曲刚度矩阵 $D$	$\begin{bmatrix} 4.50 \times 10^5 & 1.15 \times 10^4 & 7.46 \times 10^2 \\ 1.15 \times 10^4 & 3.21 \times 10^4 & 7.46 \times 10^2 \\ 7.46 \times 10^2 & 7.46 \times 10^2 & 1.43 \times 10^4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.69 \times 10^4 & 1.09 \times 10^4 & 5.55 \times 10^3 \\ 1.09 \times 10^4 & 3.55 \times 10^4 & 3.75 \times 10^3 \\ 5.55 \times 10^3 & 3.75 \times 10^3 & 1.36 \times 10^4 \end{bmatrix}$

## 2.2 刚度与韧性

三点弯载荷下, 材料的弯曲刚度为

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (4)$$

式中:  $L$  为试样两端简支的跨距;  $m$  为载荷-位移曲线中初始弹性段的斜率;  $b$ 、 $h$  分别为试样的宽度、厚度。

材料的弯曲强度, 即材料受拉伸侧最大应力为

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (5)$$

式中  $P$  为材料的极限弯曲承载力。

取材料承载能力下降到峰值承载能力20%处的位移为材料的失效位移。

总结螺旋铺层复合材料的弯曲刚度、弯曲强度及失效位移如表2所示, 各项性能均取3个重复试样的平均值。可以看出, 螺旋铺层复合材料的弯曲刚度较准各向同性铺层提升了18.27%, 与刚度矩阵理论分析结果一致; 强度与准各向同性铺层接近, 失效位移大幅减小。由图3(a)和图4(a)可以看出, 螺旋铺层试样在经历第1次载荷下降后承载能力在长时间内保持稳定, 直到结构彻底失效; 而准各向同性铺层则在第1次载荷下降后快速失去承载能力, 未出现前者具有的载荷平台段。

表2 2种铺层方案的弯曲载荷下力学性能对比

Table 2 Comparison of flexural mechanical properties of two laminating sequences

性能	准各向同性铺层	螺旋铺层
弯曲刚度/GPa	17.24±0.12	20.39±0.13
弯曲强度/MPa	317.99±9.06	286.81±8.51
失效位移/mm	5.92±1.05	23.89±3.17

## 2.3 裂纹的萌生与扩展

由于螺旋铺层的层间错配角较小, 裂纹可以连续从多层的层内平行纤维之间穿过, 避免了可能导致结构整体失效的分层现象。所以, 螺旋铺层虽然出现了较为严重的穿层裂纹, 但裂纹在试样厚度方向上连续螺旋上升, 其尖端越来越远离加载点位置, 应力减小, 导致裂纹在较长加载时间内不易发生扩展, 故而保持了较长的承载力平台段。

## 3 结束语

本文模仿甲壳类动物的外骨骼微结构, 采用3D打印增材制造技术制备得到一种热塑性仿生复合材料, 并进行了三点弯实验。基于经典层合板理论, 螺旋铺层复合材料的理论弯曲刚度与实验测得的结果一致。通过观察裂纹扩展过程, 螺旋铺层复合材料未出现大量分层现象; 且随着穿层裂纹的螺旋扩展, 裂纹尖端逐渐远离加载点位置, 增加了裂纹扩展的难度。因此螺旋铺层复合材料在三点弯加载中有较长的承载力平台段, 不易发生整体结构破坏。与传统准各向同性铺层的复合材料相比, 仿生螺旋铺层复合材料在刚度和断裂韧性上表现更为优异。本研究可为螺旋铺层仿生复合材料的工程应用提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 于翹. 复合材料在航天领域发展的新动向[C]//中国复合材料学会2003年复合材料学术年会论文集, 2003: 24-27
- [2] 龚自正, 韩增尧, 庞宝君. 空间碎片防护研究现状与国内发展建议[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 24-31

- GONG Z Z, HAN Z Z, PANG B J. Research status and domestic development proposals of space debris protection[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(1): 24-31
- [3] 王兴刚, 于洋, 李树茂, 等. 先进热塑性树脂基复合材料在航天航空上的应用[J]. *纤维复合材料*, 2011(2): 44-47
- WANG X G, YU Y, LI S M, et al. Application of advanced thermoplastic resin matrix composites in aerospace[J]. *Fiber Composites*, 2011(2): 44-47
- [4] GRUNENFELDER L K, SUKSANGPANYA N, SALINAS C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites[J]. *Acta Biomater*, 2014, 10(9): 3997-4008
- [5] RIBBANS B, LI Y, TAN T. A bioinspired study on the interlaminar shear resistance of helicoidal fiber structures[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2016, 56: 57-67
- [6] YARAGHI N A, GUARIN-ZAPATA N, GRUNENFELDER L K, et al. A Sinusoidally architected helicoidal biocomposite[J]. *Adv Mater*, 2016, 28: 6835-6844
- [7] 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
- [8] 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
- [9] SUKSANGPANYA N, YARAGHI N A, KISAILUS D, et al. Twisting cracks in Bouligand structures[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 76: 38-57
- [10] SHANG J S, NGERN N H H, TAN V B C. Crustacean-inspired helicoidal laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 128: 222-232
- [11] LIU J L, LEE H P, TAN V B C, et al. Effects of inter-ply angles on the failure mechanisms in bioinspired helicoidal laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 165: 282-289
- [12] 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
- [13] BRENKEN B, BAROCIO E, FAVALORO A, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: a review[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 1-16
- [14] ASTM International. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM-D7264/D7264M-15[S], 2015: 1-10
- [15] 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

(编辑: 冯露漪)

作者简介: 陈昊宇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为车用轻量化材料。E-mail: haoyuchen@buaa.edu.cn。

\*通信作者: 许骏(1983—), 男, 博士学位, 教授, 研究方向为冲击动力学。E-mail: junxu@buaa.edu.cn。