

**引文格式:** 严斌, 陈汉元, 周举, 等. 半厚度 Z-pin 植入对层合板弯曲性能的影响研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 97-101.  
YAN Bin, CHEN Hanyuan, ZHOU Ju, et al. Effect of half thickness Z-pin implantation on flexural properties of laminates[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 97-101.

## 半厚度 Z-pin 植入对层合板弯曲性能的影响研究

严斌<sup>1</sup>, 陈汉元<sup>1</sup>, 周举<sup>2</sup>, 代悦<sup>3</sup>, 刘维伟<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳 550081;

3. 西安理工大学, 西安 710048)

**[摘要]** 通过三点弯曲试验研究了 Z-pin 在半厚度植入条件下其材质、直径和加捻状态对 Z-pin 增强复合材料层合板弯曲性能的影响。结果表明, 采用 Z-pin 半厚度植入工艺相比于未增强对照组试件, 增强组试件的弯曲强度、弯曲模量及弯曲应变能都有所提升。Z-pin 材质、直径和加捻状态对试件弯曲强度、模量和弯曲应变能的影响甚微, 究其原因因为增强组试件界面 X、Y 处潜在的分层缺陷扩展严重, 分层损伤主导了弯曲过程中试件的破坏。但 Z-pin 直径对层合板的失效模式有着重要影响, 表现为小直径 Z-pin 增强试件分层裂纹扩展较为严重, 但萌生裂纹数量较少, 试件损伤多表现为受单一裂纹控制; 大直径 Z-pin 增强试件裂纹扩展相对一般, 但萌生裂纹数量较多, 试件多表现为多重裂纹的损伤。

**关键词:** 复合材料; Z-pin; 弯曲性能; 桥联作用; 弯曲应变能

### Effect of Half Thickness Z-pin Implantation on Flexural Properties of Laminates

YAN Bin<sup>1</sup>, CHEN Hanyuan<sup>1</sup>, ZHOU Ju<sup>2</sup>, DAI Yue<sup>3</sup>, LIU Weiwei<sup>1</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC Guiyang Engine Design and Research Institute, Guiyang 550081, China;

3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**[ABSTRACT]** The effects of material, diameter and twisting state of Z-pin on the bending properties of Z-pin reinforced composite laminates were studied by three-point bending test. The results show that the flexural strength, flexural modulus and flexural strain energy of the reinforced laminates with Z-pin half thickness implantation process are significantly improved compared with the control group. The material, diameter and twisting state of Z-pin have little effect on the flexural strength, modulus and strain energy of the specimens. The reason is that the potential delamination defects at the interface X and Y of the reinforcement group expand seriously, and the delamination damage dominates the failure of the specimen in the bending process. However, the Z-pin diameter has an important influence on the failure mode of laminates. The results show that the delamination crack propagation of small diameter Z-pin reinforced specimens is serious, but the number of initiation cracks is small. The damage of specimens is mostly controlled by a single crack. The crack growth of large-diameter Z-pin reinforced specimens is relatively common, but the number of initiation cracks is more, and the specimens are mostly multi crack damaged.

**Keywords:** Composite; Z-pin; Flexural properties; Bridging effect; Flexural strain energy

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2021.22.097

复合材料层合板是由性能不同或相同的单层板黏合而成的一种多层层合结构, 在载荷作用下各单层板的

变形情况不同, 但通过黏结构成一体协调变形, 各层之间由于必须相互变形协调而存在层间应力分布<sup>[1]</sup>, 因

此分层破坏是复合材料层合板主要的破坏形式之一。目前, Z-pin 层间增强技术是一种相对较为成熟、可靠的复合材料层间增强方式,可显著提高层合板的层间强度,抗分层性能及抗冲击损伤容限<sup>[2]</sup>。现阶段 Z-pin 技术已获得一定的实际工程应用。在国外,洛克希德·马丁公司将 Z-pin 技术应用到了机翼盒段试验<sup>[3]</sup>;F-35 战斗机和 C17 重型运输机上也使用了 Z-pin 技术<sup>[4]</sup>。在国内,一些新型号的航空航天飞行器也在积极应用 Z-pin 技术。

Chang 等<sup>[5]</sup>研究了 Z-pin 直径与体积植入密度对试件弯曲性能的影响,研究表明试件弯曲强度随直径、体积植入密度的增加而线性降低,其原因为 Z-pin 植入后造成试件增厚,增厚导致面内纤维体积含量降低,进而造成弯曲强度下降。而试件弯曲模量并不受直径和体积植入密度影响,部分试件的模量甚至略微提升。Knopp 等<sup>[6]</sup>研究了湿热环境变化对 Z-pin 增强复合材料层合板的弯曲性能的影响,研究表明湿热环境的变化会显著降低试件弯曲强度,但湿热环境的变化对试件弯曲模量的影响一般。Grassi 等<sup>[7]</sup>研究表明 Z-pin 增强层合板面内强度、模量的损失也与其铺层顺序有关,单向铺层顺序对面内性能的降低最大。此外,层合板铺层中减少 0° 铺层的使用,面内性能的降低也会随之减少。Yasaee 等<sup>[8]</sup>通过研究植入长度分别为 2mm、4mm 和 8mm 的 Z-pin 对层合板抗疲劳性能的影响发现,层合板的 I 型疲劳强度随着 Z-pin 长度的增加会先增大到某一阈值,后续再增加 Z-pin 长度,疲劳强度不会有增加。相比未增强试件,植入深度为 2mm 的 Z-pin 增强试件的 I 型疲劳强度增加了约 3 倍;相比未增强试件,植入深度为 4mm 的 Z-pin 增强试件的 I 型疲劳强度增加了约 8 倍。Yasaee 等<sup>[9]</sup>研究了不同长度的 Z-pin 植入到多种铺层顺序的层合板中的性能表现,研究表明,长 Z-pin 对层合板层间性能提升效果更好。此外, Z-pin 长度对其桥联机理、失效形式及耗能机制等有着重要影响。

目前,在 Z-pin 植入变厚度的复杂曲面构件时,由于构件厚度存在变化,故多采用依据构件厚度梯度简单分区进行 Z-pin 植入。构件厚度的变化是连续的,但分区的变化是不连续的,这会造成在各分区的过渡区域内极易出现 Z-pin 长度小于构件厚度,难以达到全厚度植入的要求。此外,构件在固化后会由于 Z-pin 的植入而发生增厚现象,各分区间的过渡区域内 Z-pin 多为半厚度植入,因此有必要开展 Z-pin 半厚度植入对构件力学性能的影响研究。

针对 Z-pin 增强复合材料层合板弯曲性能的研究,大多集中在全厚度 Z-pin 植入条件下层合板的性能表现,对半厚度 Z-pin 植入条件下层合板的弯曲性能少有

研究。本研究通过三点弯曲试验研究了在半厚度 Z-pin 植入条件下 Z-pin 材质、直径和加捻状态对层合板弯曲强度、模量以及屈服行为的影响。此外,还记录和分析了 Z-pin 增强组试件的失效模式,对 Z-pin 植入工艺的设计以及改进工作有指导意义。

## 1 试验与试件制备

### 1.1 材料与试验件

参照美国标准 ASTM D7264/D7264M-15 三点弯曲试验标准<sup>[10]</sup>,设计了图 1 所示的弯曲试验件,空心圆代表 Z-pin,含空心圆的区域为 Z-pin 待植入区域。层合板使用 T800 碳纤维/Epoxy 预浸料(Hexcel 公司),铺层顺序 [0/45/0/-45]<sub>3s</sub>,层数为 24。

Z-pin 由纤维和环氧树脂共胶接(Co-bond)制成,纤维的材质为 T300 碳纤维(山东光威公司)和聚酰亚胺纤维(江苏奥神公司),环氧树脂为 WSR6101(无锡树脂厂)。依据文献[11]的研究对部分聚酰亚胺纤维 Z-pin 进行了 80 捻/m 加捻处理。Z-pin 间距取 2.5mm×2.5mm,以矩形排布的方式进行 Z-pin 半厚度植入(简称短 Z-pin),并规定 0° 纤维方向为沿层合板长度方向,试验方案的设计如表 1 所示。

表 1 中 CRF 为碳纤维(Carbon fiber),PIF 为聚酰亚胺纤维(Polyimide fiber);TW 为加捻(Twisted);UTW 为不加捻(Untwisted);聚酰亚胺纤维 Z-pin 规格有 200D 和 400D 两种,对应直径分别为 0.18mm(简称小直径,下同)和 0.28mm(简称大直径,下同),BLANK

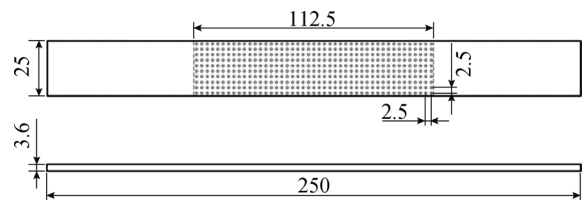


图 1 三点弯曲试件尺寸(mm)

Fig. 1 Size of three point flexural specimen(mm)

表 1 试验件 Z-pin 规划

Table 1 Programming of Z-pin for specimen

试验内容	Z-pin 材质	Z-pin 直径/mm	Z-pin 直径/mm 加捻状态	试验组标记	试件数量
弯曲试验 (TPB)	—	—	—	BLANK	5
	CRF	0.28	UTW	UTWCRF	5
	PIF	0.18	TW	TW200DPIF	5
			UTW	UTW200DPIF	5
		0.28	TW	TW400DPIF	5
			UTW	UTW400DPIF	5

为未增强对照组试件。

## 1.2 试验件制备

“半厚度”Z-pin植入的概念来源于Yasae等<sup>[12]</sup>的研究中,目前针对半厚度Z-pin植入工艺分为三大层分别铺叠,如图2所示。中心C层为要植入Z-pin的层合板子层,上、下子层A和B无需植入Z-pin,待C层植入完Z-pin后和A、B层拼合成一个整体层合板,形成半厚度植入Z-pin层合板,此时会形成两个结合界面X和Y。半厚度植入Z-pin后,要求Z-pin所处的位置应对称于复合材料层合板中性面,即Z-pin上端至复合材料层合板上表面的距离等于其下端至下表面的距离,都为1/4个层合板总厚度。所有试件按照图3所示的固化工艺路线进行固化成型,采用二次升温、升压以便让树脂充分流动,填充在铺叠工序中引入的气泡排出后留下的孔隙,以及有足够的时间发生固化交联反应。

## 1.3 弯曲性能试验

试验环境设置及试件预处理严格按照三点弯曲试验标准<sup>[10]</sup>进行操作。所有试件侧面统一涂白,侧面中轴线处划线标记,方便后续目视观察。试验机支座为梯形固定支座,使用半圆形固定加载头,采用位移控制方式进行加载,加载速度为2mm/min,当弯曲载荷骤降超过20%即认为试件发生失效,试验中止、卸载。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件失效模式

对照组试件的失效模式主要是分层破坏,分层破坏沿层合板面内方向和厚度方向广泛存在,从加载压头处开始,分层扩展长度随着分层位置的下移而变短。试件下表面的子层板内的纤维发生了拉伸断裂,子层板的拉伸断裂会加重分层破坏的发生。但Z-pin增强试件的失效模式与对照组试件有所不同,如图4所示。可知整体上增强试件也出现了分层破坏,但分层裂纹主要集中在中心增强层和上、下子层的界面结合处(界面X、Y处)。此外,小直径Z-pin增强组试件分层裂纹扩展较为严重,但萌生裂纹数量较少。大直径Z-pin增强组试件裂纹扩展相对一般,但萌生裂纹数量较多,表现出明显的多条裂纹萌生扩展。

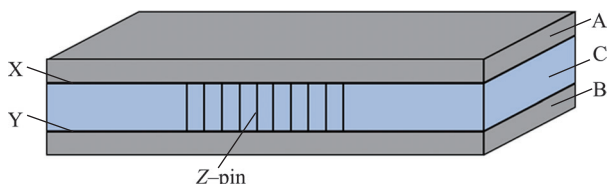


图2 短Z-pin增强层合板试件制备示意图  
Fig.2 Sketch of manufacturing specimen with short Z-pinned laminates

### 2.2 试验结果分析

挑选出各组组内的典型破坏试件,绘制载荷-位移曲线,如图5所示。可知,短Z-pin增强试件与空白试件在失效之前均未表现出屈服现象,各增强组试件间的峰值载荷、失效挠度值基本无差异,这说明短Z-pin的直径、材质以及加捻状态对试件弯曲强度、模量的影响甚微。试件界面X、Y处存在初始缺陷,界面X、Y分层后会诱发其他子层间发生分层,分层损伤主导了弯曲过程中试件的损伤失效,但中心层内的Z-pin通过发挥桥联作用,在一定程度上延缓了试件的分层损伤,故增强组试件的峰值载荷与失效前容伤位移均高于空白试件。部分试件载荷-位移曲线起始段出现了明显的趾尖区域(表现为曲线下凹),这是由于橡胶垫是超弹性变形材料,其应力-应变曲线起始段就是非线性的。此外,由于试件装夹松弛等因素也会造成趾尖区域的出现,趾尖区域的出现是添加橡胶垫和试件装夹综合作用的结果。为获得正确的弯曲模量和失效时的挠度,要对趾尖区进行补偿,补偿的方法是将曲线线性段过曲线拐点延长找

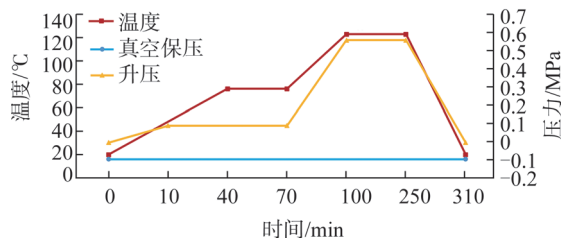


图3 试验件固化工艺路线

Fig.3 Curing process route of laminates

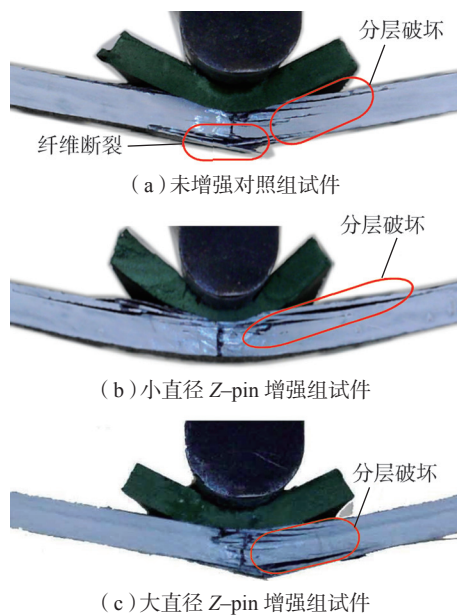


图4 试件的典型失效模式

Fig.4 Typical failure modes of specimens

到在 X 轴上的正确零点,后文中相关计算结果均已考虑了上述趾尖区的补偿。

### 2.3 弯曲性能计算

依据三点弯曲试验标准<sup>[10]</sup>中的计算公式,对各组试验件的弯曲强度、弯曲模量进行计算,计算结果如表 2 所示,其中  $\bar{\sigma}_f$  表示组内平均弯曲强度,  $\bar{E}_f$  表示组内平均弯曲模量,  $C_v$  为组内指标计算值的离散系数。由计算结果可知, Z-pin 增强组试件的弯曲强度、模量都有所提升。

### 2.4 弯曲应变能分析

据以往 Z-pin 增强机理的研究<sup>[13,6]</sup>可知, Z-pin 增强试件在弯曲失效前的弯曲应变能越大,试件抵抗弯曲破坏的能力就越强。Z-pin 卸载破坏所耗散的能量是 Z-pin 增强试件弯曲应变能的重要组成部分。Z-pin 被破坏所耗散的能量包括 Z-pin 发生弹性变形的应变能, Z-pin 与眼状区树脂间的脱黏形成新表面的表面能及 Z-pin 或劈裂、或剪断、或发生摩擦所耗散的能量,上述的能量耗散释放了本应积聚在裂纹尖端驱动裂纹扩展的应变储能,从而延缓了试件损伤扩展的发展进程<sup>[14]</sup>。弯曲试验过程中存在以下功能关系<sup>[15]</sup>:

$$W=U+U_k+U_{ir} \quad (1)$$

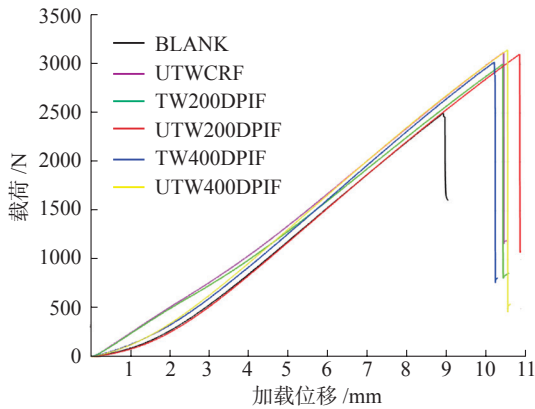


图5 各组试件载荷-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve of each group of specimens

表2 各组试件平均弯曲强度和平均弯曲模量

Table 2 Average flexural strength and modulus of each group of specimens

组别	$\sigma_f$			$E_f$		
	$\bar{\sigma}_f$ /MPa	增幅/%	$C_v$ /%	$\bar{E}_f$ /GPa	增幅/%	$C_v$ /%
BLANK	1131.37	—	8.27	64.97	—	5.28
UTWCRF	1306.46	16.06	7.38	67.91	2.59	7.69
TW200DPIF	1289.05	13.94	5.20	66.58	2.13	3.67
UTW200DPIF	1285.17	13.59	7.01	68.40	5.05	1.57
TW400DPIF	1322.55	16.90	5.39	69.71	5.37	2.27
UTW400DPIF	1317.96	16.49	6.22	69.94	5.40	9.41

式中,  $W$  为外力做的功;  $U$  为弯曲应变能;  $U_k$  为试件的动能,在静态试验中加载速率一般较低,故  $U_k$  较小可忽略;  $U_{ir}$  为功能转换过程中的不可避免的能量耗散(如压头与试件间的摩擦内能损耗等),  $U_{ir}$  较小也可忽略。各组试件的弯曲应变能可通过计算对应载荷-位移曲线与坐标轴所围成的面积得到,计算结果如图 6 所示(Y 轴对应直方图表征弯曲应变能, Y 轴对应折线图表征弯曲应变能增量),由图 6 可知,各 Z-pin 增强组相比于空白对照组而言,增强试件的弯曲应变能明显更高,但从弯曲应变能增量折线图可看出各增强组间的提升效果没有表现出规律性变化,各组间的差异也不明显。这说明在 Z-pin 半厚度植入条件下,试件的弯曲应变能对 Z-pin 直径、材质以及加捻状态并不敏感。由于试件界面 X、Y 处存在初始缺陷,界面 X、Y 分层后会诱发其他子层间发生分层,分层损伤主导了弯曲过程中试件的损伤失效,致使各增强组试件的弯曲应变能未表现出显著差异。

Z-pin 增强组试件的分层裂纹主要集中在试件中心增强层和上、下子层的界面结合处(界面 X、Y 处)的原因为 Z-pin 半植入时采用三大层分层铺叠,这种铺叠方式简单高效,也保证了在不损伤上、下两个子层的情况下精确控制“半厚度”的植入精度,但上、下两个子层和中心增强层之间会引入更多的初始缺陷。产生初始缺陷的原因为:植入 Z-pin 后中心增强层的俯视图如图 7 (a)所示(亮点为 Z-pin),观察植入点处的局部放大图图 7 (b)可发现 Z-pin 端部被压裂钝化,造成其中心区下陷,边缘区上翘,中心增强层与子层拼接时无法紧密贴合导致形成空隙。在固化阶段由于 Z-pin 与层合板的热膨胀系数不同, Z-pin 上子层会加剧空隙扩展形成初始缺陷,且 Z-pin 直径越大缺陷越严重。因此,层合板靠近压头附近的铺

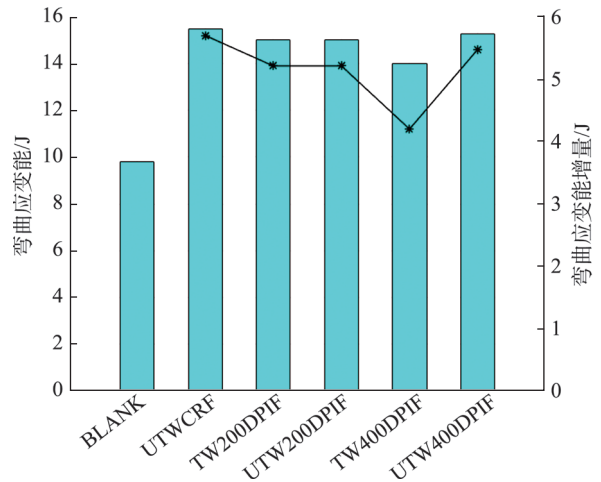
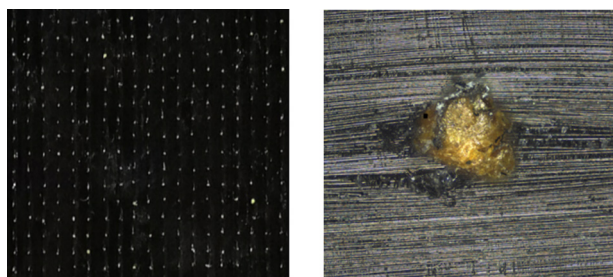


图6 各组试件弯曲应变能

Fig.6 Flexural strain energy of each group of specimens



(a) 俯视图

(b) 局部放大

图7 植入Z-pin后的复合材料层合板

Fig.7 Composite laminates after Z-pin implantation

层受压后极易发生初始缺陷扩展演化。

大、小直径 Z-pin 增强试件的裂纹演化情况不同的原因为 Z-pin 作为异物植入中心增强层后会在面内引入更多的起始损伤,这些损伤包括纤维的断裂损伤、位置波动、绕流卷曲及以 Z-pin 为中心形成的眼状富树脂区等<sup>[2]</sup>。这些面内的起始损伤受 Z-pin 直径的影响,即小直径 Z-pin 植入所引发的面内起始损伤比大直径组小。由于裂纹的扩展总是涉及到能量的耗散,能量的变化总是遵循着能量守恒的原则。由前文可知,各增强组试件的弯曲应变能并无显著差异,但大直径 Z-pin 引入的初始缺陷较多,故大直径 Z-pin 增强试件沿厚度方向萌生的分层裂纹数量往往较多,但裂纹扩展相对一般,试件多表现为多重裂纹的损伤;而小直径 Z-pin 引入的初始缺陷相对较少,故小直径 Z-pin 增强试件沿厚度方向萌生裂纹数量较少,但分层裂纹扩展较为严重,试件损伤多表现为受单一裂纹控制。

### 3 结论

(1) 半厚度 Z-pin 植入条件下,增强组试件也出现了分层破坏,且分层裂纹主要集中在中心增强层和上、下子层的界面结合处。

(2) Z-pin 通过发挥桥联作用提高了试件的弯曲强度、模量和弯曲应变能,但增强组试件中心增强层和上、下子层的界面结合处的分层损伤主导了弯曲过程中试件的破坏,导致各增强组间的增益效果并无显著差异。

(3) Z-pin 的半厚度植入会在试件中心增强层和上、下子层的界面结合处引入更多、更大的初始缺陷,使试件存在更大的失效风险。

### 参考文献

[1] 沈观林,胡更开,刘彬. 复合材料力学[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社,2013.

SHEN Guanlin, HU Gengkai, LIU Bin. Mechanics of composite materials[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

[2] MOURITZ. Review of Z-pinned composite laminates[J].

Composites: Part A, 2007, 38: 2383-2397.

[3] KIMBERLEY D, CAROLINE B, MAI Y W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching a review[J]. Composites Science and Technology, 1994, 50: 305-317.

[4] PEGORIN F, PINGKARAWAT K, MOURITZ A P. Comparative study of the mode I and mode II delamination fatigue properties of Z-pinned aircraft composites[J]. Materials and Design, 2015, 65: 139-146.

[5] CHANG P, MOURITZ AP, COX B N. Flexural properties of Z-pinned laminates[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 244-251.

[6] KNOPP A, DÜSTERHÖFT C, REICHEL M, et al. Flexural properties of Z-pinned composite laminates in seawater environment[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(24): 8343-8354.

[7] GRASSI M, ZHANG X, MEO M. Prediction of stiffness and stresses in Z-fibre reinforced composite laminates[J]. Composites A, 2002, 33: 53-64.

[8] YASAE M, BIGG L, MOHAMED G, et al. Influence of Z-pin length on the delamination fracture toughness and fatigue resistance of pinned composites[J]. Composites Part B, 2015(78): 298-307.

[9] YASAE M, MOHAMED G, HALLETT S R. Multiple Delamination interaction in Z-pinned composites in mode II[J]. Experimental Mechanics, 2016, 49: 343-352.

[10] 美国材料与试验协会. 聚合物基复合材料弯曲性能试验标准: ASTM D7264/D7264M-15[S]. 费城: ASTM D30标准委员会, 2019.

American Society for Testing and Materials. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM D7264/D7264M-15[S]. Philadelphia: ASTM D30 Standards Committee, 2019.

[11] 王晓旭, 陈利, 焦亚男, 等. 加捻Z-pin与层合板的界面粘接性能试验[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(6): 856-862.

WANG Xiaoxu, CHEN Li, JIAO Yanan, et al. Experimental study on interfacial adhesive properties between twisted Z-pin and laminates[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(6): 856-862.

[12] YASAE M, LAWRENCE B, GALAL M, et al. Influence of Z-pin embedded length on the interlaminar traction response of multi-directional composite laminates[J]. Materials & Design, 2017, 115: 26-36.

[13] YAN W Y, LIU H Y, MAI Y W. Numerical study on the mode I delamination toughness of Z-pinned laminates[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1481-1493.

[14] 张向阳. Z-pin增强复合材料加筋蒙皮结构力学性能及损伤机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

ZHANG Xiangyang. The mechanical performance and failure mechanism of Z-pin reinforced composite skin/stiffener structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[15] GRASSI M, ZHANG X. Finite element analyses of mode I interlaminar delamination in Z-fibre reinforced composite laminates[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1815-1832.

通讯作者: 刘维伟, 副教授, 博士, 主要从事先进复合材料结构设计与制造技术研究。

(责编 古系)