

Z-pin 增强树脂基复合材料单搭接接头 抗冲击性能

许爱华, 李 勇, 还大军, 褚奇奕, 周煦洁
(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要: 为了研究 Z-pin 增强树脂基复合材料接头的抗冲击性能,制备了 Z-pin 增强单搭接接头冲击试样。对比不同树脂体系 Z-pin/层合板界面裂纹扩展,分别通过 Z-pin 拔脱试验和接头剪切试验研究 Z-pin 冲击后拔脱强度和单搭接接头冲击后剪切强度;结合有限元模拟和超声 C 扫描研究搭接面分层损伤情况。结果表明,相同冲击能量下,环氧 Z-pin/环氧层合板界面抗冲击性更强,冲击能量越大,裂纹扩展越显著;Z-pin 增强树脂基复合材料显著减小分层损伤面积,提高冲击后剪切强度,体积分数为 1.5%、直径为 0.5 mm 的 Z-pin 增强层合板分层损伤面积仅为 40%,冲击后剪切强度的下降率仅为 24.89%。随着 Z-pin 体积分数增加,搭接面损伤面积逐渐减小,冲击后剪切强度先增加后降低;随着 Z-pin 直径增加,层间损伤面积增加,冲击后剪切强度逐渐降低。Z-pin 增强接头分层损伤模型模拟结果与试验结果基本吻合。

关 键 词: Z-pin 增强树脂基; 复合材料; 单搭接接头; 低速冲击; 有限元模拟; 冲击后强度

中图分类号: V258; TB332 **文献标志码:** A

Impact resistance performances of resin matrix composite single lap joints reinforced by Z-pin

XU Aihua, LI Yong, HUAN Dajun, CHU Qiyi, ZHOU Xujie
(College of Material Science and Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the impact resistance performances of resin matrix composite joints reinforced by Z-pin, single lap joint specimens reinforced by Z-pin were prepared. The crack propagation along Z-pin/laminates interface was compared with different resins matrix of Z-pin. Z-pin pullout and lap shear tests were carried out to study the after-impact pullout strength of Z-pin and after-impact shear strength of single lap joint, respectively. The ultrasonic C-scan method combined with finite element simulation was utilized to explore the delamination damage area of joint interface. The results showed that compared with the BMI resin matrix Z-pin, the resistance performance between epoxy Z-pin/epoxy laminates was stronger at the same impact energy. With the increase of impact energy, the crack propagation was more significant. Z-pin reinforced resin matrix composites remarkably reduced delamination damage area and improved the after-impact shear strength. The delamination damage area of joint reinforced by Z-pin was 40%, and its reduction of after-impact shear strength was 24.89% when Z-pin's volume fraction was 1.5% and diameter was 0.5 mm.

收稿日期:2016-09-14
基金项目:航空科学基金(2015ZE52049); 江苏高校优势学科建设工程资助项目
作者简介:许爱华(1991—),女,硕士生,主要研究方向为先进复合材料三维增强技术。

引用格式:许爱华,李勇,还大军,等. Z-pin 增强树脂基复合材料单搭接接头抗冲击性能[J]. 航空动力学报,2018,33(3):671-682.
XU Aihua, LI Yong, HUAN Dajun, et al. Impact resistance performances of resin matrix composite single lap joints reinforced by Z-pin[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 671-682.

With the increase of Z-pin volume fraction, the delamination damage area decreased gradually, while the after-impact shear strength increased firstly and then decreased. The damage area of lap surface increased as the increment of Z-pin diameter while the after-impact shear strength decreased. The results of finite element modeling were consistent with the test results.

Key words: Z-pin reinforced resin matrix; composites; single lap joints; low velocity impact; finite element simulation; after-impact shear strength

树脂基复合材料凭借耐疲劳、耐腐蚀性好及阻噪能力强等优点在航空发动机冷端部件(风扇机匣、压气机叶片、进气机匣等)和发动机短舱、反推力装置等部件上得到广泛应用^[1]。随着树脂基复合材料应用得愈发广泛,复合材料连接技术面临更严峻的考验。复合材料结构件界面连接保证了载荷传递的连续性,其安全性设计对于充分发挥结构的整体性具有重要意义^[2]。研究发现^[3-5],薄弱的界面连接处极易发生界面脱黏从而导致结构提前破坏,并且弱界面黏结的存在使复合材料宏观性能下降^[6],限制了复合材料面内力学优势的发挥,特别是在航空航天领域。多种复合材料三维增强技术已被用于复合材料连接结构的增强,如缝合、穿刺以及 Z-pin 增强技术等。其中 Z-pin 增强技术是通过将碳纤维或金属制成的短针沿厚度方向植入层合板以提高界面结合^[7]。与其他层间增强技术相比,Z-pin 是一种专门适用于预浸料成型复合材料的层间增强技术,具有对纤维损伤小,层间增强效率高优点。研究表明,Z-pin 的引入可使复合材料 I 型、II 型层间断裂韧性分别提高 18%^[8]和 53%^[9]以及层间结合强度提高 40%^[10]。

Chang 等^[11]试验研究了 Z-pin 增强单搭接接头的剪切性能,Z-pin 体积分数为 0.5%、2%和 4%时,其拉伸破坏载荷分别提高了 8%、41%和 23%。Greenhalgh 等^[12]通过 T 型接头拔脱试验研究 Z-pin 增强对其损伤容限的影响。结果表明:含有 Z-pin 增强的复合材料损伤容限提高了 229%。陶永强^[13]的研究表明 Z-pin 增强陶瓷基复合材料搭接接头强度与搭接长度成线性关系,并用有限元法模拟了不同 Z-pin 直径和体积分数对能量释放率的影响。董晓阳等^[14]制备了不同参数的 Z-pin 增强树脂基复合材料的单搭接接头,通过剪切试验,研究了 Z-pin 体积分数、直径以及植入角度对单搭接接头静态连接性能的影响规律。

Z-pin 增强对复合材料连接界面在准静态条

件下强度和损伤容限的改善已得到多次证明,但是,关于冲击载荷的影响,特别是低速冲击条件下,Z-pin 增强接头连接的机理和影响规律鲜有报导。已有研究表明,Z-pin 植入可以提高复合材料层合板的抗冲击能力,减少分层损伤面积^[15-16],并提高冲击后强度^[17-18]。Z-pin 增强效率取决于其与树脂基体的界面结合以及自身的力学性能。当 Z-pin 增强搭接接头受到冲击载荷时,Z-pin/层合板界面及连接件界面均为裂纹易萌生的区域,裂纹的产生直接影响到 Z-pin 增强单搭接接头的连接强度。

本文在 Z-pin 增强接头已有的研究基础上,对 Z-pin 增强树脂基复合材料的单搭接接头低速冲击载荷下的抗冲击性能进行研究。研究冲击后裂纹沿 Z-pin 与层合板界面的扩展演化及其对 Z-pin 拔脱性能的影响。结合超声 C 扫描和有限元模拟对接头在不同冲击能量作用下的损伤进行评价。利用剪切试验研究 Z-pin 参数对接头冲击后剪切强度的影响规律。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用的预浸料为 USN12500/T300 单向碳纤维增强环氧树脂预浸料(山东威海光威公司,含胶质量分数为 33%);Z-pin 直径包括 0.3、0.5、0.7 mm,分别采用 T300(日本东丽公司)的 1000、3000 和 6000 丝束的碳纤维纱增强 FW125 环氧树脂(江苏昆山裕博复合材料有限公司)和 NHZP-1 双马树脂(南京航空航天大学自主研发),经微径杆拉挤工艺成型。其拉挤工艺流程如图 1 所示,由碳纤维浸渍树脂,在牵引装置的作用下经过模具加温定型并在烘道中后固化而得。

1.2 Z-pin 增强单搭接接头试样制备

接头规格和尺寸参照 ASTM D 3039/D 3039M-07 设计,单搭接接头试样几何尺寸如图 2(a)所示,其中试样长度 $l=250$ mm,搭接长度

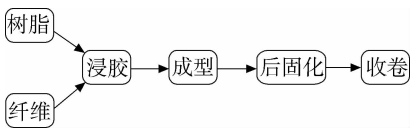


图 1 Z-pin 拉挤工艺流程

Fig. 1 Pultrusion process of Z-pin

$l_0=30\text{ mm}$,加强片长度 $l_1=50\text{ mm}$,试样宽度 $b=25\text{ mm}$,连接件总厚度 $h_d=4\text{ mm}$ 。

单搭接接头 Z 向增强体 Z-pin,与层合板的结合强度影响其增强效果,而 Z-pin 通常以拔脱形式破坏,那么,为研究不同树脂体系结合下不同冲击能量对 Z-pin 拔脱性能的影响规律,参照文献[19]所述方法设计试样进行拔脱试验。试样尺寸分别如图 2(b)所示:试样长度 $l_q=40\text{ mm}$,宽度 $b_q=20\text{ mm}$,厚度 $h_q=4\text{ mm}$ 。Z-pin 直径为 0.5 mm ,按照 3×3 点阵植入试样的中心区域,Z-pin 间距 $l_{\text{pin}}=5\text{ mm}$ 。铺层中间面添加一层聚四氟乙烯薄膜(厚度为 0.04 mm),用于防止上、下层合板的胶接影响到 Z-pin 拔出过程。

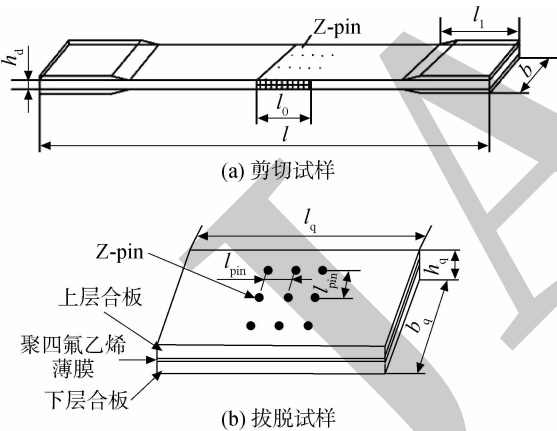


图 2 Z-pin 增强接头试样几何尺寸

Fig. 2 Geometric dimensions of Z-pinned reinforced joint

Z-pin 增强单搭接接头以 Z-pin 体积分数(φ_{pin})、Z-pin 直径(d)和冲击能量(E)为参数,设计制备了 8 组试样(见表 1),每组 5 个样品。表 2 为不同树脂体系拔脱试样在冲击试验中的具体冲击能量数值。

由于复合材料的铺层顺序和比例会显著影响其抗冲击的能力^[20],因此,本文预浸料铺层顺序采用对称的 $[0/90]_{5s}$ 铺层结构,按照以上尺寸裁剪并铺叠,利用机械手臂辅助的方式实现接头连接部位的 Z-pin 植入(图 3),试样的热压罐固化工艺曲线如图 4 所示。

表 1 Z-pin 增强单搭接接头试样参数
Table 1 Parameters of Z-pinned reinforced single lap joint

编号	体积分数/%	直径/mm	冲击能量/ (J/(kg/m ³))
1			1.813
2	1.5	0.3	1.813
3	1.5	0.7	1.813
4	1.5	0.5	1.813
5	0.5	0.5	1.813
6	3.0	0.5	1.813
7	1.5	0.5	3.021
8	1.5	0.5	4.230

表 2 Z-pin 增强拔脱试样参数
Table 2 Parameters of Z-pinned reinforced pullout specimen

编号	树脂体系	直径/mm	冲击能量/ (J/(kg/m ³))
1	环氧	0.5	1.813
2	双马	0.5	1.813
3	环氧	0.5	3.021
4	双马	0.5	3.021
5	环氧	0.5	4.230
6	双马	0.5	4.230

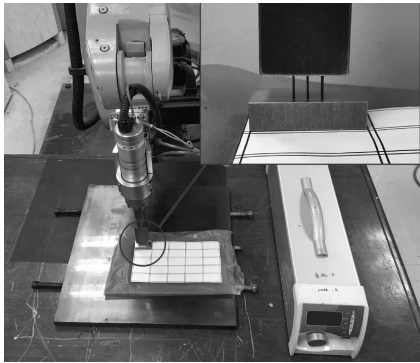


图 3 机械手臂辅助 Z-pin 增强层合板超声植入
Fig. 3 Ultrasonic inserting process of Z-pinned specimens assisted with robot arm

1.3 Z-pin 增强单搭接接头冲击试验

为了研究 Z-pin 对单搭接接头冲击性能的影响,参照 ASTM D 7136/D 7136M-07 标准要求,对单搭接接头进行低速落锤冲击试验。试验装置图及试样装夹方式如图 5 所示,冲击部位为搭接

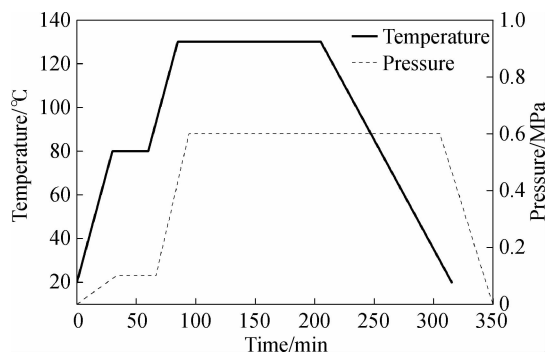


图 4 USN12500 预浸料固化工艺曲线
Fig. 4 Autoclave curing process curve of USN12500 prepreg

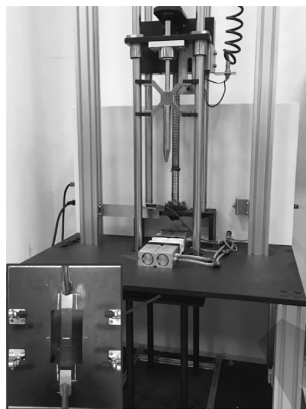


图 5 落锤冲击试验装置
Fig. 5 Landing impact testing machine

区域的中心部位,落锤质量为 1.28 kg,落锤前端形状是半球形,由于试样搭接面积较小,所以冲击头直径选用 5 mm。冲击后接头处的损伤情况通过超声 C 扫描来检测。

1.4 Z-pin 增强单搭接接头冲击后拔脱试验

为了研究不同 Z-pin/基体界面结合的抗冲击性能,对比 T300/FW125 和 T300/NHZIP-1 Z-pin 增强搭接接头冲击前后拔脱性能差异。运用金相显微观察来观测 Z-pin/基体界面的裂纹扩展情况,而 Z-pin 的冲击后拔脱性能主要通过拔脱试验来研究,试验装置图如图 6 所示,试验在新三思 CMT5105 型电子力学试验机上进行,试验条件为室温,加载速度为 0.5 mm/min。拔脱试验可以测定拔脱时 Z-pin 与层合板的界面结合力,两个 T 形固定块与试样之间用 914 胶来黏接固定。

1.5 Z-pin 增强单搭接接头冲击后剪切试验

冲击后剪切强度是表征接头抗冲击性能的重要表征方法。本文采用接头剪切试验测量单搭接接头受冲击后的剪切强度,获得 Z-pin 参数、冲击

能量对单搭接接头冲击性能和冲击后剪切强度的影响,找出 Z-pin 参数对单搭接接头冲击后剪切强度的增强规律。参照 ASTM D 3039/D 3039M-14 标准要求,在新三思 CMT5105 型电子力学试验机上进行(如图 7 所示),加载速率为 0.5 mm/min。



图 6 Z-pin 拔脱试验装置
Fig. 6 Device of Z-pin pullout test



图 7 接头剪切试验装置
Fig. 7 Device of the joint shear test

1.6 有限元模拟

为了预测不同条件下 Z-pin 增强单搭接接头冲击后损伤情况,利用断裂力学方法,基于商用有限元分析软件 ABAQUS 建立了复合材料单搭接接头的有限元网格划分模型,其中,单搭接接头设为各向异性材料,采用 Cohesive 单元模拟搭接面间的界面和 Z-pin 增强层间性能的贡献。Cohesive 单元的初始损伤基于应力判据,损伤演化基于断裂能判据,各材料的参数如表 3~表 5 所示,表 3 中 E_1 、 E_2 分别为复合材料两个主方向弹性模量, μ_{12} 为泊松比, G_{12} 、 G_{13} 和 G_{23} 为三个方向的切变模量; X_t 和 X_c 为复合材料的纵向拉伸和压缩强度, Y_t 和 Y_c 为横向拉伸和压缩强度, S_{12} 和 S_{13}

为剪切强度。表 4 中 k_{I} 、 k_{II} 和 k_{III} 分别为 I 方向、II 方向和 III 方向的牵引刚度； σ_{I} 、 σ_{II} 和 σ_{III} 分别为 I 方向、II 方向和 III 方向的牵引强度； G_{Ic} 、 G_{IIc} 和 G_{IIIc} 分别为 I 方向、II 方向和 III 方向的断裂应变能。表中 Cohesive 断裂应变释放率分别由双悬臂梁试验 (DCB) 和端部开口弯曲试验 (ENF) 测

得,强度损伤值由脱拔试验与剪切试验获得,牵引刚度及其他参数分别参照文献[21]。为了模拟冲击后的分层损伤,利用单元删除功能,当节点应力达到 Hashin 准则破坏极限后,选择将其删除。建立的 Z-pin 增强单搭接接头冲击有限元模型如图 8 所示。

表 3 碳纤维预浸料的材料属性
Table 3 Material performances of carbon fiber prepreg

参数	数值	参数	数值	参数	数值
E_1 /MPa	131 900	X_t /MPa	1 328	纵向拉伸断裂应变能/ 10^{-4} (mJ/mm ²)	2
E_2 /MPa	9 510	X_c /MPa	1 064	纵向压缩断裂应变能/ 10^{-4} (mJ/mm ²)	2
μ_{12}	0. 326	Y_t /MPa	70. 9	横向拉伸断裂应变能/ 10^{-5} (mJ/mm ²)	3. 3
G_{12} /MPa	5 270	Y_c /MPa	221	横向压缩断裂应变能/ 10^{-5} (mJ/mm ²)	3. 3
G_{13} /MPa	7 030	S_{12} /MPa	71. 2		
G_{23} /MPa	3 390	S_{13} /MPa	94. 5		

表 4 内聚单元参数定义
Table 4 Parameter definitions of cohesive element

牵引刚度/ 10^{12} (N/mm ³)			牵引强度/MPa			断裂应变能/(mJ/mm ²)		
k_{I}	k_{II}	k_{III}	σ_{I}	σ_{II}	σ_{III}	G_{Ic}	G_{IIc}	G_{IIIc}
4. 0	1. 4	1. 4	25. 0	13. 5	13. 5	0. 33	0. 79	0. 79

表 5 内聚单元模拟 Z-pin 的力学行为
Table 5 Cohesive element mechanical performances of Z-pin

d /mm	牵引刚度/ 10^{10} (N/mm ³)			牵引强度/MPa			断裂应变能/(mJ/mm ²)		
	k_{I}	k_{II}	k_{III}	σ_{I}	σ_{II}	σ_{III}	G_{Ic}	G_{IIc}	G_{IIIc}
0. 3	0. 002	1. 2	1. 2	80	195	195	70	30	30
0. 5	0. 005	2. 1	2. 1	210	450	450	190	90	90
0. 7	0. 010	4. 2	4. 2	400	900	900	360	170	170

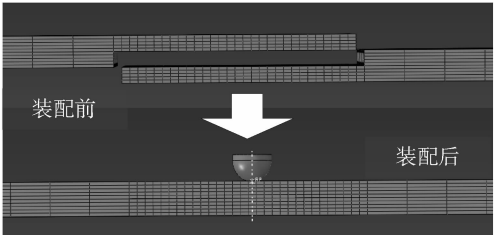


图 8 Z-pin 增强单搭接接头冲击有限元模型
Fig. 8 Impact finite element model of Z-pinned reinforced single lap joint

建模过程:先建立单层层合板并对搭接区域进行细化,之后采用孤立网格逐层偏置的方法,Z-

pin 区域与其他区域的偏置过程分别进行,之后分别赋予各个区域对应的材料属性,最后再把两个搭接面进行组装,搭接面采用界面绑定。

2 结果和讨论

2.1 Z-pin 增强接头冲击后的拔脱性能

冲击载荷下接头界面分层破坏情况主要取决于界面结合强度与冲击能量的大小,它们将直接影响到冲击后 Z-pin 剩余拔脱强度。

为研究不同的树脂体系与冲击能量下 Z-pin 的拔脱情况,表 6 记录了冲击前后 Z-pin 冲击后拔脱强度的具体数值及下降率。从表 6 中可以发

现,Z-pin 冲击后的拔脱强度均降低,并且随着冲击能量的增加,Z-pin 的冲击后拔脱强度依次降低;当冲击能量相同时,双马树脂 Z-pin 的冲击后拔脱强度均低于环氧树脂 Z-pin 冲击后拔脱强度,且其拔脱强度的下降率也更高。

图 9 为碳纤维/环氧树脂和碳纤维/双马树脂 Z-pin 增强搭接接头不同冲击能量下 Z-pin/层合板界面连接情况。从图 9(a)、图 9(b)中可以发现,冲击前的 Z-pin/层合板界面结合良好;而当冲击能量较低的时候如图 9(c)、图 9(d),界面无明显的裂纹出现;当冲击能量 $E=3.021\text{ J}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 时,环氧树脂 Z-pin 周围无明显的裂纹出现,而双马树脂 Z-pin 周围开始出现细长条裂纹,如图 9(e)、图 9(f)所示;图 9(g)、图 9(h)表明冲击能量较大的时候,

表 6 不同冲击能量下 Z-pin 冲击后拔脱强度
Table 6 Z-pin after-impact pullout strength with different impact energies

编号	Z-pin 树脂基体	冲击能量/ (J/(kg/m ³))	冲击后 拔脱强度/ MPa	冲击后 拔脱强度 下降率/%
1	环氧	0	4.24	
2	双马	0	3.40	
3	环氧	1.813	4.13	2.60
4	双马	1.813	3.20	5.88
5	环氧	3.021	3.50	17.45
6	双马	3.021	2.29	32.65
5	环氧	4.230	2.46	41.98
6	双马	4.230	1.52	55.29

两种树脂体系周围都出现了明显裂纹。此现象说明受到冲击时碳纤维/双马树脂 Z-pin 增强搭接接头结合界面相对于碳纤维/环氧树脂 Z-pin 增强接头裂纹更容易萌生并扩展。出现上述现象的主要原因是由于双马树脂体系 Z-pin 与层合板中环氧基体的相容性较差,导致 Z-pin/基体界面强度较低,在冲击载荷作用下,Z-pin/基体界面易萌生裂纹并扩展,从而使得 Z-pin 的拔脱强度大幅度降低。

2.2 Z-pin 增强接头冲击后的分层损伤

Z-pin 增强的接头中,Z-pin 对裂纹的扩展造成阻碍,裂纹扩展需要穿过或绕过 Z-pin,过程中将消耗大量的能量,从而 Z-pin 能抑制损伤面积

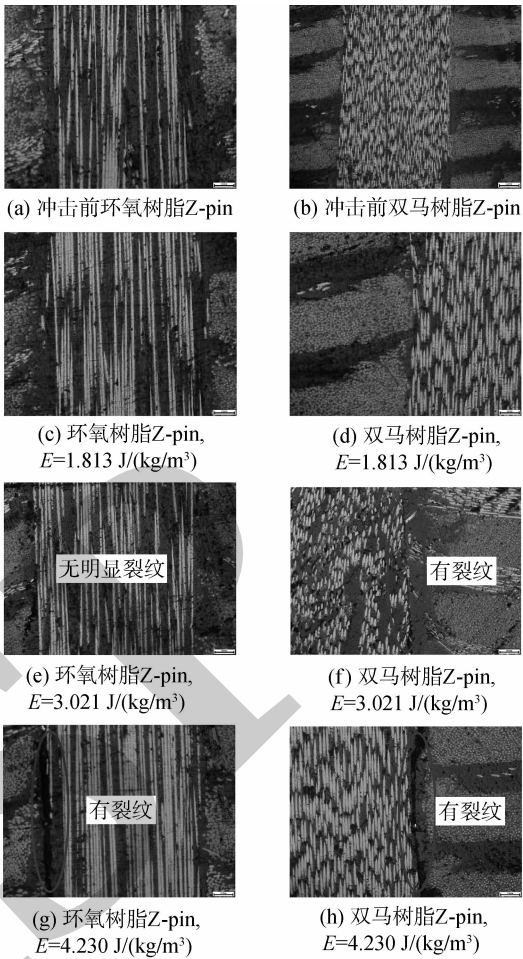


图 9 不同基体树脂 Z-pin/层合板在不同冲击能量下的界面连接对比

Fig. 9 Comparison of the interface between Z-pin/ laminates with different matrix resins and impact energies

的进一步扩大。

接头受到剪切的时候,接头搭接面切应力占主导,Z-pin 也表现为剪切失效,当 Z-pin 从复合材料基体中表现为剪切失效时,Z-pin/层合板界面总的剪切强度 τ_i 与试样中 Z-pin 的体积分数有关

$$\tau_i = \varphi_{pin} \tau_j \tag{1}$$

式中 τ_j 为 Z-pin 单位体积分数的剪切强度 (MPa)。

因此,可以得到最大剪切力 F_s 。

$$F_s = \frac{1}{4} \int_0^{\varphi_{pin}} \tau_j \pi d^2 d\varphi \tag{2}$$

此外,当 Z-pin 参数一定时,冲击能量也是影响冲击损伤的重要因素。因此,本文基于超声 C 扫描和有限元模拟的方法,分别从 Z-pin 体积分数、Z-pin 直径以及冲击能量三个角度来研究冲击

引起的分层损伤面积。

2.2.1 Z-pin 体积分数对分层损伤的影响

图 10 为 1.813J/(kg/m³)冲击能量下有限元模拟得到的不同体积分数 Z-pin 增强单搭接接头分层损伤分析结果。图中可以看出,在相同的冲击能量下,Z-pin 体积分数越大,层间损伤面积越小,搭接接头的抗冲击能力越来越强,趋势表明 Z-pin 的体积分数越大,抑制层合板分层的效果越好。

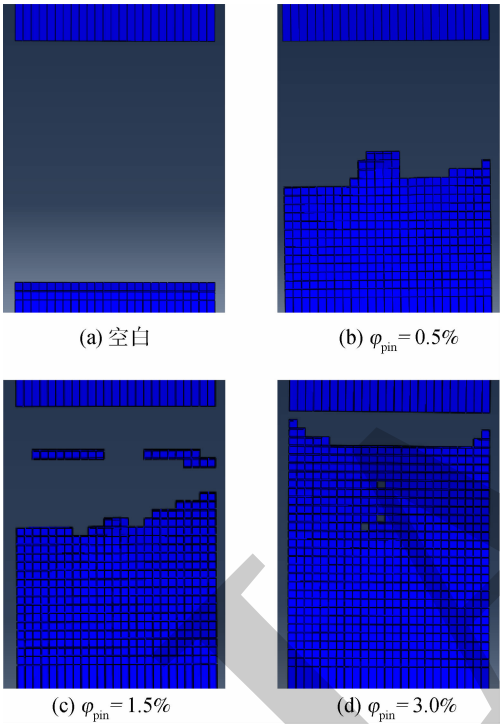


图 10 不同 Z-pin 体积分数增强单搭接接头分层损伤面积有限元模拟结果

Fig. 10 Finite element simulation results of reinforced single lap joint delamination damage areas with different Z-pin volume fractions

图 11 为 1.813 J/(kg/m³)冲击能量对不同体积分数 Z-pin 增强单搭接接头造成的分层损伤的超声 C 扫描检测结果。从图中可以看出,冲击损伤面积随 Z-pin 体积分数的增加而减小,体积分数达到 3.0%时,其增强层合板的分层损伤面积相对于无 Z-pin 增强层合板明显减小。

图 12 为不同体积分数 Z-pin 增强单搭接接头分层损伤的有限元模拟结果与超声 C 扫描损伤面积结果对比。有限元模拟结果表明:无 Z-pin 增强的层合板,冲击后搭接区域几乎 100%的单元失效。而体积分数分别为 0.5%、1.5%、3.0%的 Z-pin 增强的接头冲击后分别仅有 58%、40%、

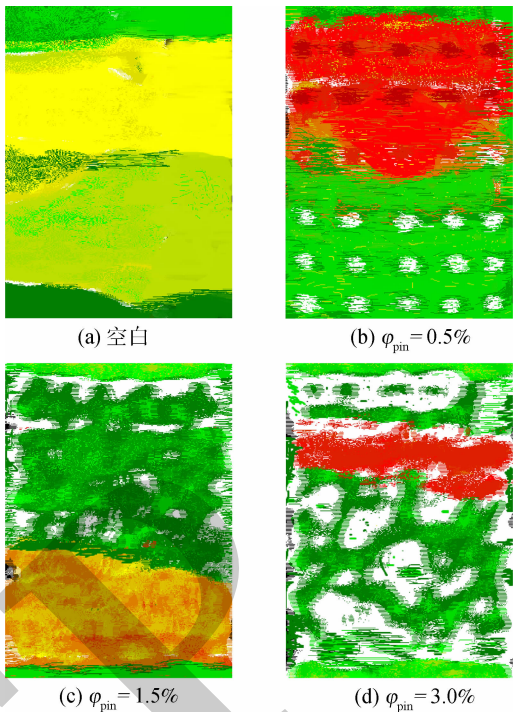


图 11 不同 Z-pin 体积分数增强单搭接接头分层面积的超声 C 扫描图像

Fig. 11 C-scan images of reinforced single lap joint delamination damage areas with different Z-pin volume fractions

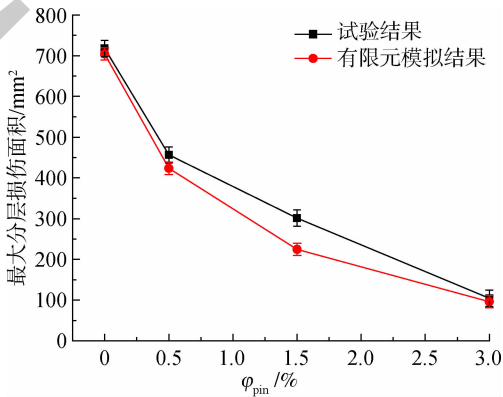


图 12 接头层间损伤面积与 Z-pin 体积分数的关系

Fig. 12 Relationship between the joint delamination damage area and Z-pin volume fraction

12%的单元失效。试验结果表明:无 Z-pin 增强的层合板冲击后有 98%的区域分层破坏。Z-pin 体积分数为 0.5%、1.5%和 3.0%的接头冲击后分别仅有 61%、45%和 13%的搭接面积受到破坏。

由图 12 中可看出,两者趋势是一致的,试验结果略大于有限元模拟结果,这主要是因为 Z-pin 植入引入的缺陷对层合板面内性能具有劣化作用,致使损伤面积增大。这种损伤会被超声 C 扫

描检测出来,而在有限元分析中未加以考虑。

2.2.2 Z-pin 直径对分层损伤的影响

已有的研究表明,Z-pin 直径的增加一方面会导致对层合板面内性能损伤的加大,另一方面也会提高其层间增强效率^[22-25]。复合材料搭接头处的面内和层间性能共同决定了接头的力学性能。因此,对于 Z-pin 增强接头力学性能研究来说,Z-pin 直径是一个重要的影响因素。

图 13 为有限元模拟得到的不同直径 Z-pin 增强单搭接接头分层结果。图中可以看出,在相同的冲击能量下,随着 Z-pin 直径的增大,层间损伤面积越大,搭接接头的抗冲击能力越弱。

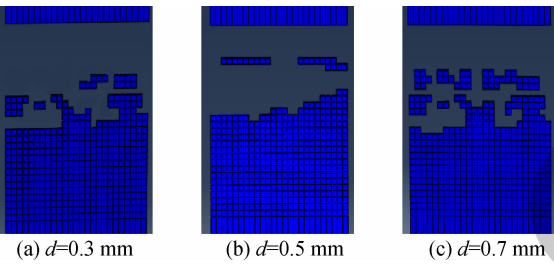


图 13 不同 Z-pin 直径增强单搭接接头分层面积有限元模拟结果

Fig. 13 Finite element simulation results of reinforced single lap joint delamination damage area with different Z-pin diameters

本文对比了直径 $d=0.3, 0.5, 0.7\text{ mm}$ 的 Z-pin 增强($\varphi_{\text{pin}}=1.5\%$, $E=1.813\text{ J}/(\text{kg}/\text{m}^3)$)对冲击层间损伤面积的影响,其超声 C 扫描结果如图 14 所示。由图可以看出,接头的层间损伤面积随着 Z-pin 直径的增加而增加。

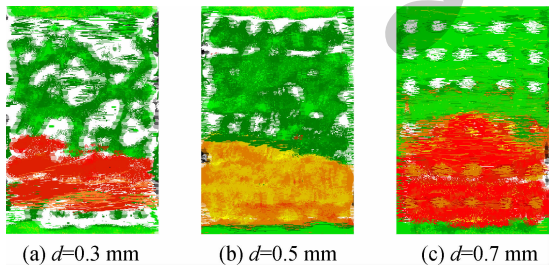


图 14 不同 Z-pin 直径增强单搭接接头分层损伤面积的超声 C 扫描图像

Fig. 14 C-scan images of reinforced single lap joint delamination damage areas with different Z-pin diameters

图 15 为不同直径 Z-pin 增强单搭接接头有限元模拟结果与 C 扫试验结果的对比,试验结果

与有限元结果基本一致。有限元模拟结果表明:直径 $d=0.5, 0.7\text{ mm}$ 增强的接头层间损伤面积相对于 0.3 mm 的分别增加了 15.07% 、 33.54% 。试验结果表明:Z-pin 直径为 $0.3, 0.5\text{ mm}$ 和 0.7 mm 时($\varphi_{\text{pin}}=1.5\%$),相对于 0.3 mm 直径 Z-pin 的层间损伤面积,分别增加 17.05% 和 32.71% ,即随着 Z-pin 直径的增加,搭接头的冲击分层损伤面积依次增加。

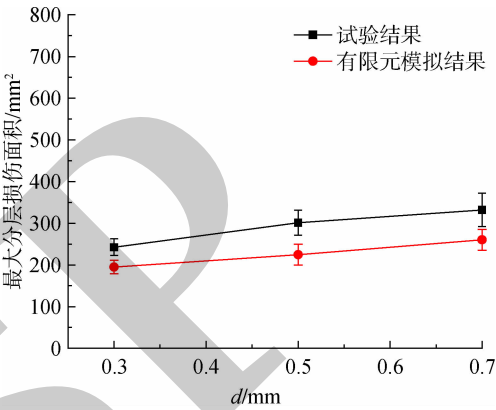


图 15 接头层间损伤面积与 Z-pin 直径的关系
Fig. 15 Relationship between the joint delamination damage areas and Z-pin diameter

相同体积分数下,直径较小的 Z-pin/层合板接触界面较大,所以 Z-pin 钉扎效果好。且在试验过程中 Z-pin 直径的增加会显著增加 Z-pin 眼状区的范围^[26],造成严重的富树脂区,这些区域在冲击载荷作用下,成为裂纹萌生源,导致了裂纹扩展面积的增加,而有限元模拟中有限元模型无法捕捉到 Z-pin 直径变化对冲击损伤的影响。

2.2.3 冲击能量对分层损伤的影响

Z-pin 增强引入了除层合板外的冲击能量吸收机制,如 Z-pin 的变形和剪断破坏,层合板分层与 Z-pin 的失效都会消耗能量。

图 16 为不同冲击能量下 Z-pin 增强单搭接接头分层面积有限元模拟结果。模拟结果表明在 $1.813\sim 4.230\text{ J}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 的范围内冲击能量越大,接头的分层损伤面积也越大。

图 17 所示为不同冲击能量下 Z-pin 增强试样的超声 C 扫描图像,当直径 $d=0.5\text{ mm}$ 、体积分数 $\varphi_{\text{pin}}=1.5\%$ 时,Z-pin 增强单搭接接头层间损伤面积随着冲击能量的增加逐渐增加,当冲击能量 $E=4.230\text{ J}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 时,接头两端均出现了破坏。

图 18 为不同冲击能量下 Z-pin 增强单搭接

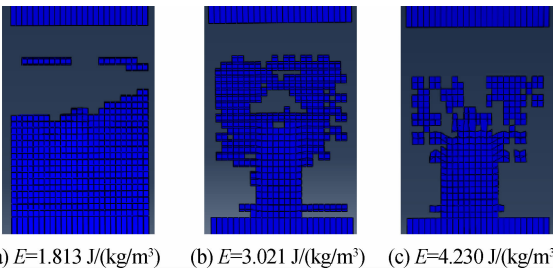


图 16 不同冲击能量下 Z-pin 增强单搭接接头分层面积有限元模拟结果

Fig. 16 Finite element simulation results of Z-pin reinforced single lap joint delamination damage areas with different impact energies

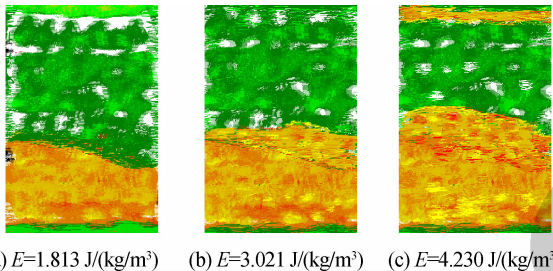


图 17 不同冲击能量下 Z-pin 增强单搭接接头分层面积的超声 C 扫描图像

Fig. 17 C-scan images of Z-pin reinforced single lap joint delamination damage areas with different impact energies

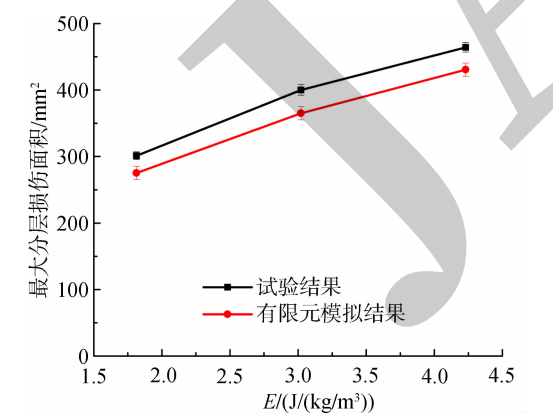


图 18 接头层间损伤面积与不同冲击能量间的关系

Fig. 18 Relationship between the joint delamination damage area and impact energy

接头有限元模拟结果与 C 扫试验结果的对比图。模拟结果表明:冲击能量 $E=3.021, 4.230 \text{ J/(kg/m}^3\text{)}$ 时分层损伤面积相对于 $1.813 \text{ J/(kg/m}^3\text{)}$ 时分别增加了 32.73%、56.36%。试验结果表明:冲击能量 $E=3.021, 4.230 \text{ J/(kg/m}^3\text{)}$ 时分层损伤面积相对于 $1.813 \text{ J/(kg/m}^3\text{)}$ 时分别增加了 24.30%、36.80%。由图中看来两种结果基本一

致,试验测得的分层损伤面积略大于模拟值。

2.3 冲击后剪切强度

当 Z-pin 增强树脂基复合材料单搭接接头受剪切载荷的时候,随着剪切载荷持续增加至承载极限,裂纹在接头末端产生并逐渐扩展至贯穿整个搭接区域,最后发生灾难性失效^[27]。搭接面的剪切强度 τ_b 计算公式

$$\tau_b = F_b / (bl_0) \tag{3}$$

式中 F_b 为单搭接接头剪切失效时的峰值载荷 (N)。

以上试验可看出,Z-pin 直径、体积分数和冲击能量均对接头的层间损伤面积有不同的影响,除此之外,这些因素还会影响接头的冲击后剪切强度。本文分别测试了未受冲击及冲击损伤后接头的剪切强度,并计算出剪切强度下降率。

2.3.1 Z-pin 体积分数对冲击后剪切强度的影响

图 19 为接头剪切强度与 Z-pin 体积分数的关系曲线。由图可以看出,随着 Z-pin 体积分数的增加,接头的冲击后剪切强度增加。无 Z-pin 增强的空白试样冲击后几乎无承载能力,体积分数为 0.5%、1.5% 的冲击后剪切强度相对于空白试样分别增加了 8.7 MPa、12.92 MPa,但是当增加到 3.0% 时,剩余剪切强度相对于体积分数为 1.5% 时开始下降,相对于空白试样增加 10.24 MPa。四种体积分数时剪切强度下降率分别为 92.75%、32.57%、24.89% 及 0.81%,除了空白试样下降率较大外,0.5% 和 1.5% 时试样冲击造成的下降率相似,但 3% 时下降率几乎为零,在剪切载荷下该试样件本体部位发生断裂(图 20)。

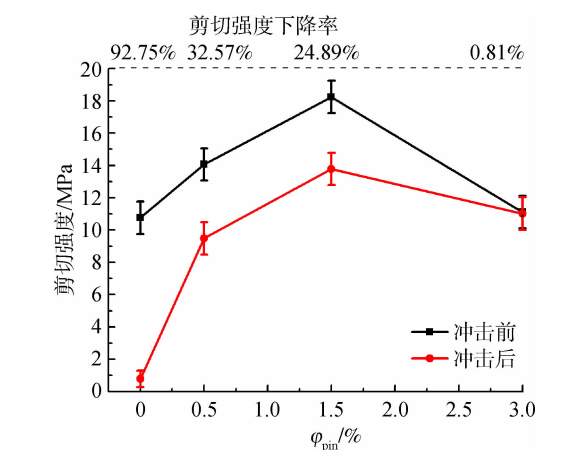


图 19 接头剪切强度与 Z-pin 体积分数的关系

Fig. 19 Relationship between the joint shear strength and Z-pin volume fraction



图 20 Z-pin 体积分数为 3.0% 的接头样貌
Fig. 20 Joint appearance of Z-pin
volume fraction of 3.0%

这是由于随着 Z-pin 体积分数的增加,单搭接接头界面连接强度增加,同时 Z-pin 的植入对层合板面内造成的损伤愈加严重,导致纤维严重屈曲,最终导致薄弱点由连接界面转变至连接件本身。

2.3.2 Z-pin 直径对冲击后剪切强度的影响

图 21 所示为 Z-pin 增强单搭接接头剪切强度与 Z-pin 直径的关系,由图可以看出 Z-pin 增强单搭接接头冲击前的强度与冲击后剪切强度均随 Z-pin 直径的增加而降低,并且 0.3、0.5 mm 和 0.7 mm 三种直径增强试样冲击后相对于未冲击的剪切强度下降率分别为 13.39%、24.89% 和 37.03%。由此可看出随着直径的增加,接头冲击后剪切强度的下降程度增加,其中 0.7 mm 相对

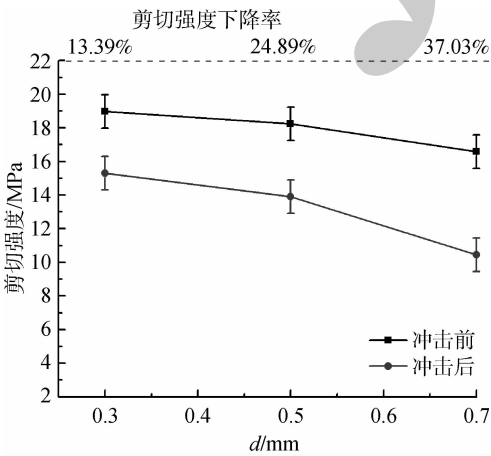


图 21 接头剪切强度与 Z-pin 直径的关系
Fig. 21 Relationship between the joint
shear strength and Z-pin diameter

于 0.3 mm 时冲击后剪切强度下降了 31.76%。这是由于在相同体积分数下,随着 Z-pin 直径的增加,层合板的发生滑移型剪切断裂的临界能量 G_{II} 下降^[28],更易发生分层破坏,层间损伤面积增加,单搭接接头有效承载面积下降,从而使得接头冲击后剪切强度及保持率下降。

2.3.3 冲击能量对冲击后剪切强度的影响

图 22 为直径为 0.5 mm、体积分数为 1.5% 的 Z-pin 增强单搭接接头经过不同能量冲击后剪切强度的变化情况,图中冲击前接头的抗剪切强度平均为 18.20 MPa,而 3.021 J/(kg/m³)、4.230 J/(kg/m³) 和 1.813 J/(kg/m³) 三种能量冲击后试样剪切强度相对于未冲击的剪切强度下降率分别为 13.39%、24.89%、37.03%。随着冲击能量的增加,裂纹扩展程度增加,冲击后层间损伤面积增加。同时随着冲击能量增加,Z-pin/层合板界面分层加剧导致更多 Z-pin 失效,Z-pin 对裂纹扩展的抑制作用减弱,从而导致接头的抗剪切强度降低。

图 23 为 Z-pin 增强单搭接接头受冲击及剪切破坏后 Z-pin 几种不同的表面形貌图,Z-pin 的

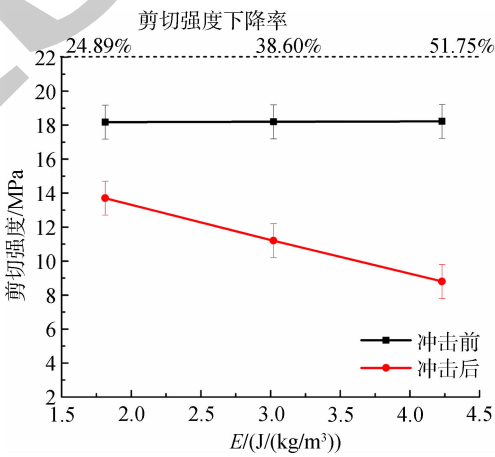


图 22 接头剪切强度与冲击能量间的关系
Fig. 22 Relationship between the joint shear strength
and impact energy

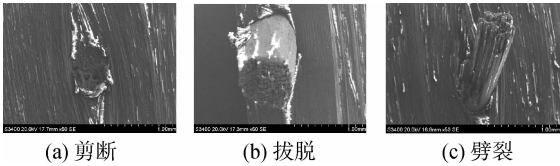


图 23 接头剪切破坏后 Z-pin 的表面形貌
Fig. 23 Surface morphology of Z-pin after joint
shear failure

破坏形貌主要有剪断、拔脱及劈裂等几种。Z-pin 增强单搭接接头受到冲击载荷的时候,部分 Z-pin 与层合板之间会有裂纹产生,裂纹的产生会吸收冲击能量,Z-pin 对接头中裂纹的扩展具有较好的抑制作用。接头受到剪切作用后,部分 Z-pin 直接剪断,少量的 Z-pin 被拔脱,极少量 Z-pin 在拔脱的同时发生劈裂。

3 结 论

本文采用试验和有限元模拟研究了 Z-pin 增强单搭接接头的抗冲击性能,包括冲击分层损伤面积、Z-pin 冲击后拔脱强度及接头冲击后剪切强度,获得如下结论:

1) Z-pin 增强层合板拔脱强度主要取决于界面结合强度和冲击能量大小。冲击能量为 $4.230 \text{ J}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 时,环氧及双马树脂体系 Z-pin 增强环氧层合板的拔脱强度下降率分别为 41.98% 和 55.29%。

2) Z-pin 增强有效阻止了搭接接头的冲击损伤裂纹的扩展,其增强效果与 Z-pin 体积分数和直径有关。层间损伤面积随 Z-pin 体积分数的增加和直径的减小而降低,体积分数为 3.0% 时试样的分层面积仅 13%,直径为 13 mm 时相对直径为 0.7 mm 层间损伤面积减小了 32.71%。

3) Z-pin 增强显著提高了搭接接头的冲击后性能,其冲击后剪切强度的下降率最小仅为 13.39%。且冲击后剪切强度大小随 Z-pin 体积分数的增加而先上升后下降,同时,随 Z-pin 直径的增加而降低,0.7 mm 相对于 0.3 mm 时冲击后剪切强度下降了 31.76%。

4) 有限元模型能有效模拟 Z-pin 增强单搭接接头的冲击分层损伤面积,其模拟结果及影响因素趋势与试验结果基本吻合。

本研究获得的结果表明 Z-pin 增强可以显著提高搭接接头的力学性能,并获得了 Z-pin 参数对搭接面增强的规律,为 Z-pin 在复合材料结构中的应用提供了重要的参考价值。

参考文献:

[1] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等.航空发动机用耐高温材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(11):27-31.
ZHANG Peng,ZHU Qiang,QIN Heyong,et al. Research progress of high temperature materials for aero-engine[J]. Materials Review,2014,28(11):27-31. (in Chinese)

[2] 谢鸣九.复合材料连接[M].上海:上海交通大学出版社,2011:4-5.

[3] KIM K S,YOO J S,YI Y M,et al. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods [J]. Composite Structures,2006,72(4):477-485.

[4] VAIDYA U K,GAUTAM A R S,HOSUR M,et al. Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives,2006,26(3):184-198.

[5] KIM J H,PARK B J,HAN Y W. Evaluation of fatigue characteristics for adhesively-bonded composite stepped lap joint[J]. Composite Structures,2004,66(1):69-75.

[6] 孙志刚,宋迎东,廉英琦,等.弱界面粘结对复合材料有效性能的影响[J].航空动力学报,2005,20(6):915-919.
SUN Zhigang,SONG Yingdong,LIAN Yingqi,et al. Composite mechanical behavior with weak interfacial bonding [J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(6):915-919. (in Chinese)

[7] 张向阳,李勇,褚奇奕,等.碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 加捻拉挤工艺及其性能[J].航空动力学报,2015,30(7):1638-1644.
ZHANG Xiangyang,LI Yong,CHU Qiyi,et al. Pultrusion and properties of the twisted carbon fiber/phenolic resin Z-pin[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(7):1638-1644. (in Chinese)

[8] 孙先念,郑长良.层合复合材料 z-pinning 增强技术的力学进展[J].航空学报,2006,27(6):1194-1202.
SUN Xiannian,ZHENG Changliang. Advance on modeling through-the-thickness reinforcement of laminated composite by z-pinning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(6):1194-1202. (in Chinese)

[9] CARTIÉ D D R,TROULIS M,PARTRIDGE I K. Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates[J]. Composites Science and Technology,2006,66(6):855-861.

[10] RUGG K L,COX B N,MASSABO R. Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by Z-fibers[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing,2002,33(2):177-190.

[11] CHANG P,MOURITZ A P,COX B N. Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension[J]. Composites Science and Technology,2006,66(13):2163-2176.

[12] GREENHALGH E,LEWIS A,BOWEN R,et al. Evaluation of toughening concepts at structural features in CFRP:Part I stiffener pull-off[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing,2006,37(10):1521-1535.

[13] 陶永强.Z-pin 增强陶瓷基复合材料接头的连接性能[D].西安:西北工业大学,2007.
TAO Yongqiang. The connecting performance of 2-d ceramic matrix composite joint reinforced by Z-pins [D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2007. (in

Chinese)

[14] 董晓阳,李勇,张向阳,等. Z-pin 增强树脂基复合材料单搭接连接性能[J]. 航空学报,2014,35(5):1302-1310.
DONG Xiaoyang,LI Yong,ZHANG Xiangyang,et al. Performance of polymer composite single lap joints reinforced by Z-pin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014,35(5):1302-1310. (in Chinese)

[15] GRASSI M,ZHANG X,MEO M. Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing, 2002,33(12):1653-1664.

[16] 滕锦,李斌太,庄茁. Z-pin 增韧复合材料层合板低速冲击损伤过程研究[J]. 工程力学,2006,23(1):209-216.
TENG Jin,LI Bintai,ZHUANG Zhuo. A study on low-velocity impact damage of Z-pin reinforced laminates[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (1): 209-216. (in Chinese)

[17] KOH T M,ISA M D,FEIH S,et al. Experimental assessment of the damage tolerance of z-pinned T-stiffened composite panels[J]. Composites:Part B Engineering,2013,44(1):620-627.

[18] 董晓阳. Z-pin 增强树脂基复合材料单搭接接头连接性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
DONG Xiaoyang. Study on performance of polymer composites single lap joints reinforced by Z-pin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[19] DAI S C,YAN W,LIU H Y,et al. Experimental study on Z-pin bridging law by pullout test[J]. Composites Science and Technology,2004,64(16):2451-2457.

[20] 崔海坡,温卫东,张阿龙. 不同冲击能量对层合板损伤及剩余强度的影响[J]. 航空动力学报,2015,30(10):2331-2337.
CUI Haipo,WEN Weidong,ZHANG Along. Influence of different impact energies on damage[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(10):2331-2337. (in Chinese)

[21] HALDAR S,CAPUTO D,BUESKING K,et al. Flexural behavior of singly curved X-Cor® sandwich composite structures; experiment and finite element modeling[J]. Composite Structures,2015,129(1):70-79.

[22] CHANG P,MOURITZ A P,COX B N. Properties and failure mechanisms of Z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing,2006,37(10):1501-1513.

[23] CHANG P,MOURITZ A P,COX B N. Flexural properties of Z-pinned laminates[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing,2007,38(2):244-251.

[24] MOURITZ A P. Delamination properties of Z-pinned composites in hot-wet environment[J]. Composites:Part A Applied Science and Manufacturing,2013,52:134-142.

[25] SONG M C,SANKAR B V,SUBHASH G,et al. Analysis of mode I delamination Z-pinned composites using a non-dimensional analytical model[J]. Composites:Part B Engineering,2012,43(4):1776-1784.

[26] MOURITZ A P. Review of z-pinned composite laminates[J]. Composite:Part A Applied Science and Manufacturing,2007,38(12):2383-2397.

[27] REIS P N B,ANTUNES F J V,FERREIRA J A M. Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints[J]. Composite Structures,2005,67(1):125-133.

[28] 马丹. Z-pin 增强双马来酰亚胺层合板制备及力学性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
MA Dan. Research on preparation process and mechanical properties Z-pinned BMI composites laminates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

(编辑:陈 越)