

文章编号: 1674-8190(2023)05-101-08

# 薄层碳纤维斜纹布层压板二次胶接试验研究

江帆, 单杭英, 潘荣华, 杨忠清  
(南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016)

**摘要:** 将复合材料薄板二次胶接技术应用在小型无人机机翼主承力结构上, 对于降低机翼盒段的制造成本具有重要的工程应用价值。采用碳纤维斜纹布制 2 mm 薄板进行单搭接结构拉剪试验, 分析 3 种不同型号的胶粘剂对该薄板的适配性以及胶层厚度和层压板铺层角度对二次胶接强度的影响, 并通过 ABAQUS 软件进行模拟验证。结果表明: 使用 SY-23B 环氧结构胶, 胶层厚度为 0.2 mm、铺层方式为  $[(0/90)]_8 - [(0/90)]_8$  的结构件, 胶接性能最优, 结构剪切强度可以达到 18.2 MPa, 满足小型无人机受力盒段的胶接强度要求, 二次胶接成型的机翼受力盒段具有轻质化、低成本的优点。

**关键词:** 复合材料; 薄板二次胶接; 机翼盒段; 单搭接结构; 剪切强度

中图分类号: V215; TB33

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.13

## Experimental study on secondary bonding of thin carbon fibre twill laminates

JIANG Fan, SHAN Hangying, PAN Ronghua, YANG Zhongqing  
(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The application of thin composite material laminate secondary bonding technology to the main load-bearing structure of small UAV wings has important engineering applications for reducing the manufacturing costs of wing box section. A single-lap structural tensile shear test is carried out using a 2 mm sheet made of carbon fibre twill. The suitability of three different types of adhesive for the sheet is analyzed, as well as the effect of adhesive thickness and laminate lay-up angle on the strength of the secondary glue joint, and the simulation is verified by ABAQUS software. The results show that, using SY-23B epoxy structural adhesive, the adhesive layer thickness is 0.2 mm, the lay-up method is  $[(0/90)]_8 - [(0/90)]_8$ , the bonding performance is optimal, the structural shear strength can reach 18.2 MPa, which can meet the small UAV stress box section bonding strength requirements, the secondary bonding formed wing stress box section has the advantages of light weight, low cost.

**Key words:** composite material; laminate secondary bonding; wing box section; single-lap structure; shear strength

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3082020NP2020415)

通信作者: 单杭英, amyshan@nuaa.edu.cn

引用格式: 江帆, 单杭英, 潘荣华, 等. 薄层碳纤维斜纹布层压板二次胶接试验研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 101-108.

JIANG Fan, SHAN Hangying, PAN Ronghua, et al. Experimental study on secondary bonding of thin carbon fibre twill laminates [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 101-108. (in Chinese)

## 0 引言

随着复合材料在航空航天领域中的应用越来越多<sup>[1-2]</sup>,在复合材料的使用上,存在大量的连接问题。而胶接由于其结构轻、连接效率高、应力分布均匀、减震、绝缘等优点,成为航空结构连接方式上的首选<sup>[3-4]</sup>。

目前机翼盒段常用的成型工艺为共固化和共胶接,其胶接强度也较高。二次胶接相对来说粘接强度稍低,但是对于低速无人机来说,已经可以满足载荷需求,其次零件分次固化,工艺风险小<sup>[5]</sup>。

研究者针对复合材料二次胶接技术展开了研究,S. Budhe 等<sup>[6]</sup>综述了复合材料胶接结构,并讨论了影响胶接结构性能的直接参数和间接参数;毛振刚等<sup>[7]</sup>针对不同搭接长度和铺层方式的 3.6 mm 厚碳纤维复合材料层合板单搭接胶接结构进行了拉伸试验,得到最佳铺层方式和最优胶接长度,将胶接结构的连接强度提升了 13.26%;拓宏亮等<sup>[8]</sup>以复合材料单搭接胶接头为研究对象对单搭接胶接接头的应力应变分布规律、裂纹扩展与破坏机理展开研究;张艳芳等<sup>[9]</sup>进行不同尺寸的 3 mm 厚高温结构胶—双马基碳纤维层压板的二次胶接试验,通过提高胶膜的流动性提高胶接质量;梁祖典等<sup>[10]</sup>针对不同搭接长度和不同被胶接件厚度的 T300/QY8911 层合板单搭接胶接接头进行了试验研究和数值模拟,发现接头强度随胶接件厚度增大而增大;张西伟等<sup>[11]</sup>通过拉剪试验分析了 J116B 胶粘剂与碳 VII/QY9611 复合材料不同胶接工艺界面的拉剪性能;马晓龙等<sup>[12]</sup>基于遗传算法针对搭接长度对平纹机织复合材料胶接结构连接性能影响进行了多尺度分析;胡春幸等<sup>[13]</sup>以 3.6 mm 的 T300/7901 层压板为试验对象,采用遗传算法对 CFRP 层合板单搭接胶接结构进行优化,将拉伸强度和剪切强度分别提高了 25.92% 和 25.88%;宋显刚等<sup>[14]</sup>针对层合板与金属、层合板之间二次胶接连接建立有限元模型,验证了疲劳试验结果,证明胶接连接对疲劳的容忍度较高,能够满足实际使用需求;惠嘉等<sup>[15]</sup>以 Von Mises 屈服准则为胶层失效判据,采用材料刚度退化的方法,研究了胶接强度在一定范围内随着胶层厚度和胶接长度的增大而增大,呈非线性关系;I. Y. Sulu<sup>[16]</sup>研究了搭接长度、宽度以及铺层角度对插入式双搭接胶接结构的影响,并确定了最优的胶接参数;张银银等<sup>[17]</sup>应用 ANSYS 有限元分析软件,研究

T700/TDE86 复合材料层合板单搭接胶接接头在单向拉伸载荷作用下的胶层中面及界面应力;韩啸等<sup>[18]</sup>采用胶接双悬臂梁试验和内聚力模型数值仿真相结合的方法,研究胶层厚度对胶粘剂 I 型断裂韧性的影响规律。

常规的单向布层压板,虽然强度较高,但是单层厚度约为 0.11~0.15 mm,铺层为特定厚度的蒙皮时需要的成本也比较高,而碳纤维编织布每层厚度约为 0.25 mm,铺层方式简单,因此使用碳纤维斜纹布薄板作为蒙皮可以简化制造过程,降低盒段梁的成本。

上述文献鲜有对于厚度在 2 及 2 mm 以下的薄层层压板间二次胶接强度的研究,本文以 2 mm 厚的碳纤维斜纹布薄板二次胶接结构为试验件,研究不同胶接参数下复合材料层压板单搭接胶接结构的最大载荷与剪切应力,分析不同类型胶粘剂、铺层方式以及胶粘剂厚度对二次胶接强度的影响,并基于胶粘剂的内聚破坏,通过仿真模拟加以验证。

## 1 试验设计

### 1.1 材料选择

试验基材采用中航航空科技股份有限公司生产的 ACTECH 1206/CW200T 中温固化高韧性预浸料,单层 0.25 mm,编织方式如图 1 示。

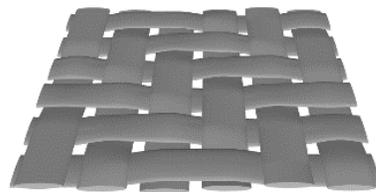


图 1 二维编织示意图

Fig. 1 2D weave diagram

单层碳纤维斜纹布的材料参数如表 1 所示。

表 1 单层碳纤维斜纹布材料参数  
Table 1 Single-layer CFRP material parameters

材料参数	数值
0°拉伸强度 $\sigma_1$ /MPa	814
0°拉伸模量 $E_1$ /GPa	73.0
90°拉伸强度 $\sigma_2$ /MPa	795
90°拉伸模量 $E_2$ /GPa	71.1
层间剪切强度 $\tau$ /MPa	70.1
泊松比 $\mu$	0.3

试验时选择市面上应用比较成熟的三种胶粘剂:中国航发北京航空材料研究院研制的SY-23B糊状环氧结构胶;上海华谊树脂有限公司研制的SW-200结构胶;哈尔滨新精鑫有限公司生产的X4113结构胶。

### 1.2 二次胶接拉伸剪切试验

选用 100 mm×25 mm×2 mm 的碳纤维斜纹布层压板作为实验件,进行单搭接二次胶接拉伸剪切试验。二次胶接前先使用角磨机对基材和垫板的待胶接区域进行打磨,并用有机溶剂进行清洗,然后按照胶粘剂各组分比例现用现配,涂胶方式为手刷,胶接完毕后放入电烘箱进行固化。

研究胶粘剂对二次胶接剪切强度的影响时,分别使用三种常用胶粘剂:SY-23B,记为 J1;SW-200,记为 J2;X4113,记为 J3。

研究胶层厚度对二次胶接剪切强度的影响时,主要使用的定制模具如图 2 所示,通过控制间隙的方式控制胶层厚度。

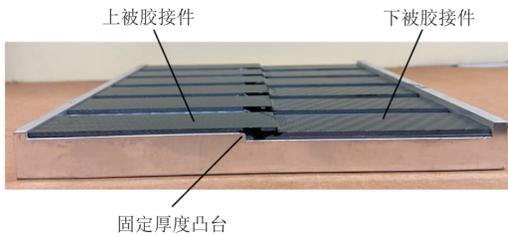


图 2 胶接模具示意图  
Fig. 2 Diagram of the bonding mould

研究铺层方式对二次胶接剪切强度的影响时,采用铺层方式分别为  $[(0/90)]_s - [(0/90)]_s$ 、 $[(0/90)]_s - [(\pm 45)]_s$  及  $[(\pm 45)]_s - [(\pm 45)]_s$ , 记为 P1、P2、P3(沿板材长度方向为  $0^\circ$  方向),如图 3 所示。

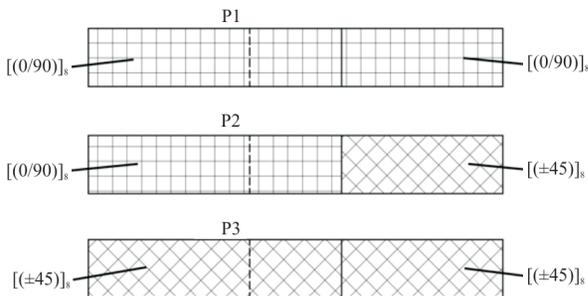


图 3 铺层方式示意图  
Fig. 3 Diagram of the layering method

试验使用电子万能试验机进行拉伸,在结构两端胶接垫板,形成反对称结构,减少因附加弯矩造成的剥离应力,实验参照 GB/T 33334—2016<sup>[19]</sup>。加载速度为 1 mm/min,装夹时通过刻度保证试样在夹具中央,加载对中示意图如 4 所示。

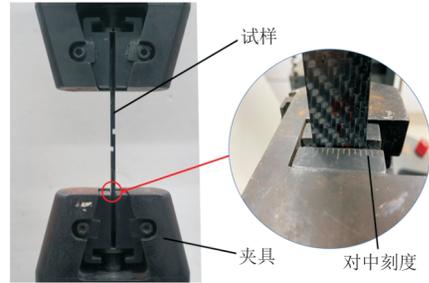


图 4 加载对中示意图  
Fig. 4 Loading alignment diagram

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同胶粘剂对胶接强度的影响

分别使用三种不同型号的胶粘剂进行拉伸剪切实验,得到的极限载荷和离散率如图 5 所示。

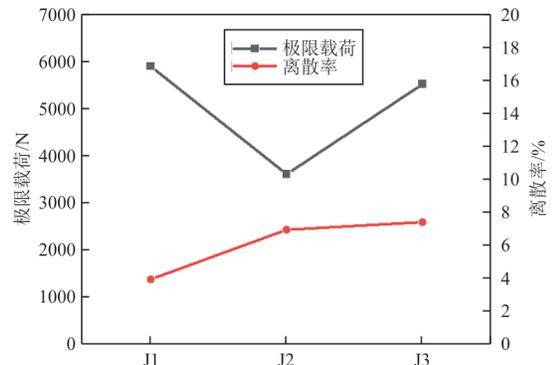


图 5 不同胶粘剂的极限载荷与离散率  
Fig. 5 Extreme loads and dispersion rates of different adhesives

在试验结果中,使用 J1 胶粘剂的二次胶接结构极限载荷平均为 5 881.1 N,离散率为 3.9%,而使用 J2 和 J3 胶粘剂的极限载荷平均值分别为 3 595.9 和 5 500.9 N,离散率为 6.91% 和 7.37%。从图 5 可以看出:J1 和 J3 具有相似的抗剪切性能,J2 的抗剪切性能最低。J1 的 6 个试样试验结果离散率比较低,对于选用的 ACTECH 1206/CW200T 中温固化高韧性预浸料制作的复合材料薄板,SY-23B 具有更高的二次胶接强度与稳定性。

## 2.2 胶层厚度对胶接强度的影响

试验时选择适配性高的 SY-23B 环氧结构胶, 胶层厚度采用 0.2、0.6、1.0 mm, 分别记为 T1、T2、T3, 接头断裂如图 6 所示。

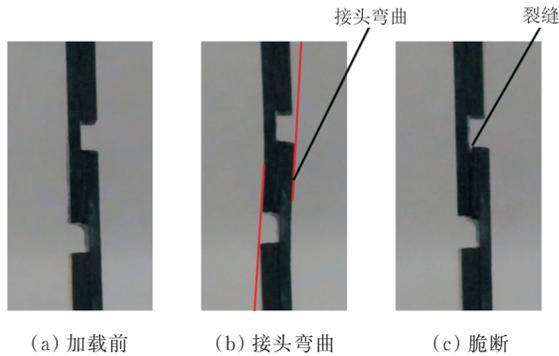


图 6 接头断裂过程  
Fig. 6 Joint breakage process

从图 6 可以看出: 刚开始加载, 结构逐渐绷紧, 随着位移载荷的增加, 附加弯矩也逐渐变大, 接头处开始发生弯曲, 如图 6(b) 所示, 接头的胶接边缘在轴向拉伸剪切应力和剥离应力的双重作用下, 伴随着爆裂声产生肉眼可见的裂缝, 直至达到极限载荷, 结构发生脆断。

不同胶粘剂厚度结构破坏的极限载荷、剪切强度和离散率如图 7 所示, 三组实验的离散率均低于 9%, 证明本组试验数据是可靠的。

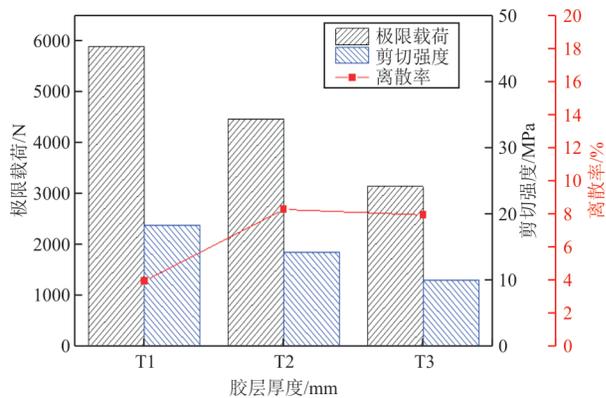


图 7 不同厚度胶粘剂的极限载荷与离散率  
Fig. 7 Extreme loads and dispersion rates of adhesives of different thicknesses

T1 组试验 6 个试样具有最高的平均极限载荷和剪切强度, 分别为 5 881.1 N 和 18.2 MPa, 同时离散率为 3.89%, 在三组实验中最低。与 T1 组相比, T2 和 T3 组试验结果离散程度增大许多, 这是因为随着胶层厚度的增加, 更加容易出现胶层脱粘和气孔较多等额外因素, 而且受胶粘剂固化程

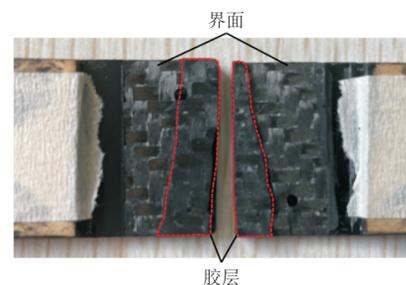
度的影响也更明显。随着胶层厚度及结构厚度的增加, 由附加弯矩引起的剥离应力也越大, 接头边缘处更容易发生断裂, 导致整个接头强度降低。

胶层厚度 0.2 mm 拉伸断裂图如图 8 所示, 破坏模式为界面破坏, 少量的胶粘内聚破坏, 可以看到裸露的碳纤维丝束。残胶零星分布在断裂面上, 且几乎都附着在沿拉力方向的纤维束上。

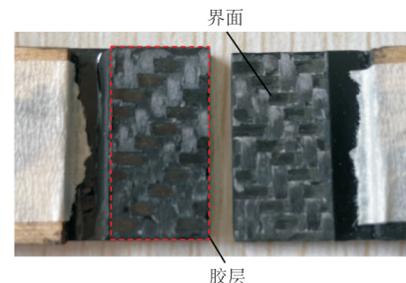


图 8 0.2 mm 时拉伸断裂  
Fig. 8 Tensile fracture at 0.2 mm

胶层厚度 0.6、1.0 mm 时胶接界面的破坏情况及残余胶层的分布情况如图 9 所示, 可以看出: 0.6 mm 时, 试样破坏模式为混合破坏, 既有界面破坏, 又有胶层自身沿厚度方向的断裂; 1.0 mm 时, 试样破坏模式为界面破坏, 胶层牢牢粘接在其中一块复合材料层压板上, 证明此时胶接界面的破坏随着胶层厚度的增加逐渐占据主导因素。



(a) 0.6 mm 断裂情况



(b) 1.0 mm 时断裂情况

图 9 0.6 与 1.0 mm 结构的破坏模式  
Fig. 9 Damage pattern of the structure at 0.6 and 1.0 mm

比较三组试验,胶层厚度 0.2 mm 时,结构承载极限可以达到 5 881.1 N,而 0.6 和 1.0 mm 时,结构承载极限仅有 4 452.1 和 3 132.4 N。这是由于当胶层厚度较小时,胶接强度受胶接界面强度和胶粘剂自身强度的共同影响。随着胶层厚度的增加和剥离力矩的增加,界面强度成为结构的短板,在胶层完好无损的情况下,界面已经完全脱粘。

对于 ACTECH 1206/CW200T 中温固化高韧性预浸料制作的复合材料薄板二次胶接,厚度低于 0.2 mm 的胶层胶接强度可能更高,但对于胶接工艺及精度的要求也更高,因此在一定胶层厚度范围内,0.2 mm 厚的胶层提供的胶接效果最优。

### 2.3 铺层方式对胶接强度的影响

试验时胶粘剂同样选用适配性高的 SY-23B 环氧结构胶,胶层厚度为 0.2 mm。

三种铺层方式下的胶接结构拉伸断裂的平均极限载荷以及剪切强度如表 2 所示,可以看出:铺层方式 P1 的剪切强度最大,比铺层方式 P2 和 P3 分别提高了 28.17% 和 30%。

表 2 不同铺层方式下胶接结构拉伸的粘胶强度  
Table 2 Bond strength of bonded structures under different lay up modes

铺层方式	极限载荷/N	剪切强度/MPa	离散率/%
P1	5 881.1	18.2	3.90
P2	4 611.5	14.2	7.84
P3	4 446.0	14.0	7.26

铺层方式 P2 拉伸断裂后的情况如图 10 所示,可以看出:胶层大多附着在 0° 铺层的板上,说明紧贴胶层的纤维方向为 0° 铺层的碳纤维层压板与胶粘剂的粘接界面强度较高,而紧贴胶层纤维方向为 45° 的铺层与胶粘剂的粘接界面强度较低,率先发生脱粘。

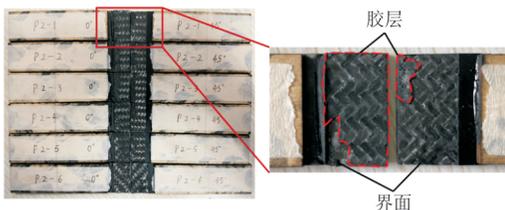


图 10 P2 铺层时胶层断裂示意图  
Fig. 10 Diagram of the fracture of the adhesive layer during P2 lay-up

比较三种铺层方式 P1、P2 和 P3,铺层方式为 P1 时,结构中不存在纤维方向为 45° 的铺层紧贴胶层,胶接强度为 18.2 MPa;铺层方式为 P2 时,结构中不存在 1 个纤维方向为 45° 的铺层紧贴胶层,胶接强度也随之降低;铺层方式为 P3 时,结构中不存在 2 个纤维方向为 45° 的铺层紧贴胶层,胶接强度最低。

对于 ACTECH 1206/CW200T 预浸料制作的复合材料薄板二次胶接过程中,采用铺层方式为 [(0/90)]<sub>s</sub> - [(0/90)]<sub>s</sub> 的结构具有最大的拉伸剪切强度。使紧贴界面的纤维铺层方向与受载方向一致,可以极大增加界面的强度,这与文献[10]中所得到的结论相似。

### 3 有限元分析

本文使用牵引—分离定理 (Traction Separate Laws)<sup>[20]</sup> 在宏观尺度上定义牵引力与位移之间的关系,线弹性模型如图 11 示。

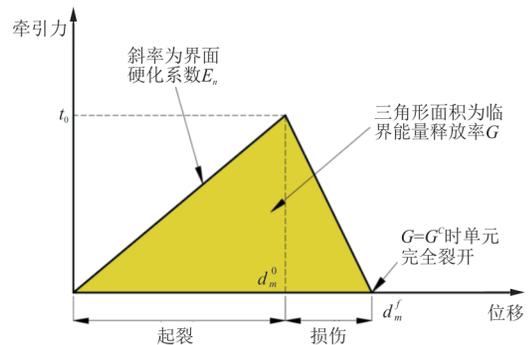


图 11 牵引—分离定理线性模型  
Fig. 11 Linear model of the traction-separation laws

在胶层单元损伤前,应力与应变满足如下关系:

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{t}$  为应力矢量;  $\mathbf{K}$  为单元刚度矩阵;  $\boldsymbol{\epsilon}$  为应变,表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} \epsilon_n = \frac{d_n}{T_0} \\ \epsilon_s = \frac{d_s}{T_0} \\ \epsilon_t = \frac{d_t}{T_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d$  为位移;  $T_0$  为胶层本构厚度。

在损伤模型中,当损伤达到损伤起始准则后,

就会根据定义的损伤演化规律进行破坏。胶层单元破坏的时候很少是由于单独的 I 型(张开)、II 型(滑移)、III 型(撕开)开裂,而是发生混合模式的开裂,因此采用混合破坏模式下的二次名义应力准则<sup>[21]</sup>,如式(3)所示。

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 \quad (3)$$

式中: $f$ 为断裂标准,当 $1.0 \leq f \leq 1.0 + f_{tol}$ 时将发生断裂; $f_{tol}$ 为公差,此处默认为 0.05; $t_n$ 为垂直裂缝面上的牵引力; $t_s$ 、 $t_t$ 分别为裂缝面上互相垂直的牵引力。

用材料的总体刚度退化率(Scalar Stiffness Degradation)来表示材料的总体损伤程度。应力分量如式(4)所示。

$$\begin{cases} t_n = \begin{cases} (1 - S_{DEG}) & (t_n \geq 0) \\ t_n & (t_n < 0) \end{cases} \\ t_s = (1 - S_{DEG}) t_s \\ t_t = (1 - S_{DEG}) t_t \end{cases} \quad (4)$$

Cohesive 单元在损伤演化过程中采用 B-K 准则的断裂能定律,如式(5)所示。

$$G^c = G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left( \frac{G_s}{G_T} \right)^\eta \quad (5)$$

式中: $G_n^c$ 为 I 型断裂临界能量释放率; $G_s^c$ 为 II 型断裂临界能量释放率; $G_s = G_s + G_t$ 、 $G_T = G_n + G_s$ ; $\eta$ 为与复合材料有关的参数,代表了 I 型、II 型和 III 型断裂临界能量释放率的混合比,B-K 准则认为 II 型和 III 型断裂临界能量释放率相等,即  $G_s^c = G_t^c$ 。

基于 ABAQUS 2020 利用粘聚区模型(Cohesive Zone Model,简称 CZM),将胶层单元赋予 Cohesive 单元属性。层压板单元使用六面体 C3D8R 离散,胶层单元使用三维八节点实体单元进行离散,网格类型为 COH3D8。为减少计算量,对结构接头处网格进行局部细化,有限元模型如图 12 所示。



图 12 胶接结构有限元模型

Fig. 12 Finite element model for bonding structure

胶层厚度为 0.2 mm 时胶粘单元刚度退化的过程如图 13 所示,可以看出:刚度退化率为 1 时,单元断裂删除;随着位移载荷的增加,胶层边缘处单元的刚度退化最快,率先发生破坏,然后对称向胶层中间蔓延,直至整体破坏。断裂最先出现在接头边缘处,与试验时结构的断裂过程相符。

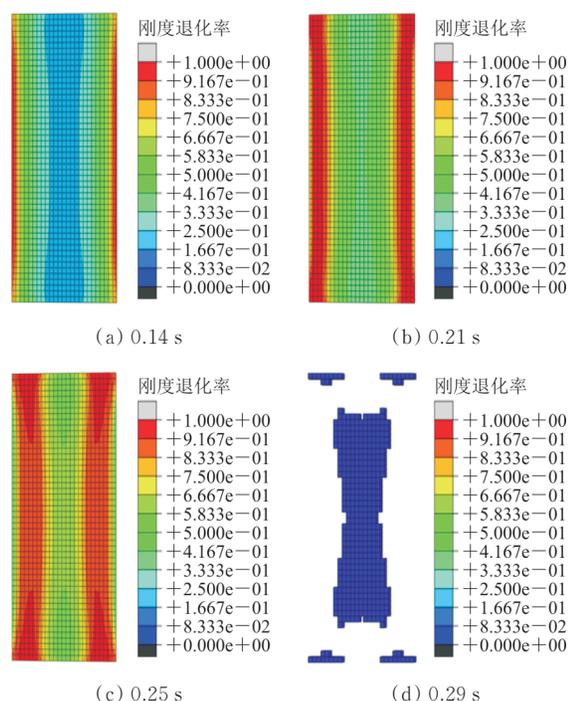


图 13 胶层刚度退化规律

Fig. 13 Degradation pattern of adhesive layer stiffness

胶层厚度为 0.2 mm 时加载点历史输出的位移—载荷曲线以及试验时同组 6 个试样的位移—载荷曲线如图 14 所示,可以看出:数值模拟结果与实验结果变化趋势基本一致,模拟得到的最大载荷为 6 989.83 N,与试验得到的平均值之间的误差为 15.86%。

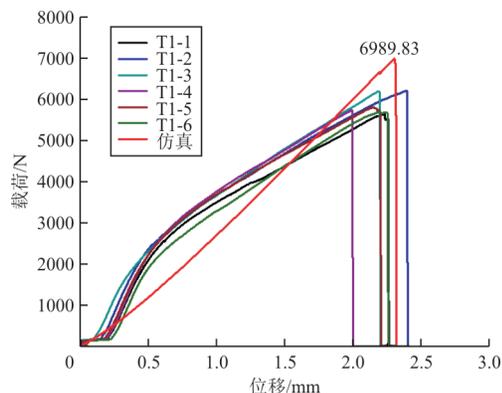


图 14 试验与仿真的位移—载荷曲线

Fig. 14 Displacement-load curves for tests and simulations

仿真得到的极限载荷要高于试验得到的极限载荷,这是由于在二次胶接过程中因为温度、胶粘剂固化程度、胶粘剂分布不均匀等现实因素所致。在位移为0~0.25 mm区间内,在试样装夹过程中存在少量未释放的预紧力等因素影响,载荷随着位移的增加只有少量增加,在0.2 mm之后,结构处于紧绷状态,载荷增幅与位移的增加近似成正比关系,在位移为0.5 mm附近,试样出现如图6(b)所示的小幅度变形,载荷增幅得到缓冲,斜率变缓,直至最后断裂。

## 4 结 论

1) ACTECH1206-CW200T 复合材料层压板与SY-23B糊状环氧结构胶的适配性强于SW200结构胶和X4113结构胶,其单搭接结构的剪切强度最高可以达到18.2 MPa。

2) 对于2 mm厚度的碳纤维斜纹布层压板二次胶接,胶层厚度为0.2 mm时,胶接强度最高;胶层厚度增加到0.6和1.0 mm时,胶接强度同比降低24.3%和32.1%。

3) 碳纤维斜纹布层压板间二次胶接,紧贴胶接界面的纤维方向与受载方向一致时,会增强二次胶接的强度,即采用铺层方式 $[(0/90)]_8$ — $[(0/90)]_8$ 时结构的拉伸剪切强度最高。

4) 2 mm厚的复合材料薄板按照本文胶接参数进行二次胶接,具有良好抗剪切能力,可以将复合材料薄板二次胶接应用到小型无人机机翼盒上,以此降低盒段梁的制造成本。

## 参 考 文 献

- [1] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 26-31.  
LIU Shanguo. Advanced composite technology of foreign aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 26-31. (in Chinese)
- [2] 邱超, 马心旗, 王亚震, 等. 薄层碳纤维增强树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(14): 22-31.  
QIU Chao, MA Xinqi, WANG Yazhen, et al. Research and application progresses of thin-ply carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 22-31. (in Chinese)
- [3] 乔海涛, 邹贤武. 复合材料胶接技术的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2010(2): 11-14.  
QIAO Haitao, ZOU Xianwu. Progress of composite bonding technique[J]. Aerospace Materials and Technology, 2010(2): 11-14. (in Chinese)
- [4] SELA N. The effect of adhesive thickness interlaminar toughness of interleaved CFRP specimens[J]. Composites, 1989, 20(3): 88-93.
- [5] 周长庚, 荀国立, 邱启艳, 等. 航空复合材料整体成型技术应用现状与分析[J]. 新材料产业, 2016(5): 52-57.  
ZHOU Changgeng, XUN Guoli, QIU Qiyang, et al. Current status and analysis of the application of aeronautical composite monolithic molding technology[J]. New Materials Industry, 2016(5): 52-57. (in Chinese)
- [6] BUDHE S, BANEJA M D, DE BARROS S, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 72: 30-42.
- [7] 毛振刚, 侯玉亮, 李成, 等. 搭接长度和铺层方式对CFRP复合材料层板胶接结构连接性能和损伤行为的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 121-131.  
MAO Zhengang, HOU Yuliang, LI Cheng, et al. Effect of lap length and stacking sequence on strength and damage behaviors of adhesively bonded CFRP composite laminates[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 121-131. (in Chinese)
- [8] 拓宏亮, 吴涛, 卢智先, 等. 复合材料单搭接胶接头静力与疲劳裂纹扩展研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 91-100.  
TUO Hongliang, WU Tao, LU Zhixian, et al. Study on static and fatigue cracks propagation of single-lap bonded composite joints[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 91-100. (in Chinese)
- [9] 张艳芳, 冷卫红, 罗辑, 等. 复材/复材二次胶接胶接质量及强度影响因素研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(7): 77-80.  
ZHANG Yanfang, LENG Weihong, LUO Ji, et al. Study on factors on the co-bonding quality and bonding strength of composite panels[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(7): 77-80. (in Chinese)
- [10] 梁祖典, 燕瑛, 张涛涛, 等. 复合材料单搭接胶接头试验研究与数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1786-1792.  
LIANG Zudian, YAN Ying, ZHANG Taotao, et al. Experimental investigation and numerical simulation of composite laminate adhesively bonded single-lap joints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1786-1792. (in Chinese)
- [11] 张西伟, 梁宪珠, 薛向晨, 等. J116B胶粘剂与碳Ⅷ/QY9611复合材料不同胶接工艺界面的拉剪性能研究[C]//第17届全国复合材料学术会议. 北京: 中国力学学会, 2012: 102-104.  
ZHANG Xiwei, LIANG Xianzhu, XUE Xiangchen, et al. Studies on tensile-shear performance of interface of J116B adhesive film and carbon fiber/QY9611 composites using different bonding process[C]// The 17th National Composites Academic Conference. Beijing: STAM, 2012: 102-104.

- (in Chinese)
- [12] 马晓龙, 李成, 铁瑛, 等. 搭接长度对平纹机织复合材料胶接结构连接性能影响的多尺度分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 101-111.  
MA Xiaolong, LI Cheng, TIE Ying, et al. Ltscale analysis on the effect of lap length on bonding strength of adhesively bonding structures of plain weave composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 101-111. (in Chinese)
- [13] 胡春幸, 侯玉亮, 铁瑛, 等. 不同胶接参数对CFRP层合板单搭胶接结构强度的影响及优化设计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 154-165.  
HU Chunxing, HOU Yuliang, TIE Ying, et al. Influence of different bonding parameters on the strength of CFRP laminates with single lap bonding structure and optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 154-165. (in Chinese)
- [14] 宋显刚, 王明, 蔡计杰, 等. 碳纤维复合材料二次胶接强度研究[J]. 合成纤维, 2021, 50(12): 47-51.  
SONG Xiangang, WANG Ming, CAI Jijie, et al. Study of secondary gluing strength of carbon fibre composites [J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(12): 47-51. (in Chinese)
- [15] 惠嘉, 万小朋, 赵美英. 复合材料胶接强度分析[J]. 机械制造, 2012, 50(7): 71-75.  
HUI Jia, WAN Xiaopeng, ZHAO Meiyong. Analysis of the strength of composite glued joints[J]. Machinery, 2012, 50(7): 71-75. (in Chinese)
- [16] SULU I Y. Mechanical behavior of single-lap and double-lap adhesive joined composite parts[J]. Mechanical Testing Numerical Simulation, 2017, 59: 11-12.
- [17] 张银银, 杨银环, 刘思远. 层合板单搭胶接接头应力的三维有限元分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 727-730.  
ZHANG Yinyin, YANG Yinhuan, LIU Siyuan. Three-dimensional finite element stress analysis of single-lap laminates adhesively joints[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2018, 34(6): 727-730. (in Chinese)
- [18] 韩啸, 金勇, 杨鹏, 等. 胶层厚度对胶粘剂 I 型断裂韧性影响试验和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 43-52.  
HAN Xiao, JIN Yong, YANG Peng, et al. Experimental and simulation study on the effect of adhesive thickness on mode I fracture toughness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 43-52. (in Chinese)
- [19] 中国石油和化学工业联合会. 胶粘剂单搭接拉伸剪切强度试验方法(复合材料对复合材料): GB/T 33334—2016 [S]. 北京: 中国石油和化学工业联合会, 2016.  
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies (composite and composite): GB/T 33334—2016 [S]. Beijing: China Petroleum and Chemical Industry Federation, 2016. (in Chinese)
- [20] ALFRED C. Guidelines for applying cohesive models to the damage behaviour of engineering materials and structures [M]. Berlin: Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 2015.
- [21] GUO W, XUE P, YANG J. Nonlinear progressive damage model for composite laminates used for low velocity impact [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(9): 1145-1154.
- 作者简介:**  
江帆(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。  
单杭英(1978—),女,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器结构设计。  
潘荣华(1982—),男,硕士,工艺工程师。主要研究方向:飞行器制造,复合材料成型工艺。  
杨忠清(1963—),男,硕士,研究员。主要研究方向:无人机结构设计,无人机强度设计,飞行器可靠性。
- (编辑:丛艳娟)